

Vjerojatnost otočnoga pogona fotonaponske elektrane s više mrežnih izmjenjivačkih jedinica priključene na mrežu srednjega napona

Ivas, Mihovil

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:515374>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Mihovil Ivas

**VJEROJATNOST OTOČNOGA POGONA
FOTONAPONSKE ELEKTRANE S VIŠE MREŽNIH
IZMJENJIVAČKIH JEDINICA PRIKLJUČENE NA
MREŽU SREDNJEGA NAPONA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Mihovil Ivas

**VJEROJATNOST OTOČNOGA POGONA
FOTONAPONSKE ELEKTRANE S VIŠE MREŽNIH
IZMJENJIVAČKIH JEDINICA PRIKLJUČENE NA
MREŽU SREDNJEGA NAPONA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof.dr.sc. Ante Marušić

Zagreb, 2019.



University of Zagreb
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Mihovil Ivas

**ISLAND OPERATION PROBABILITY
FOR MULTI-INVERTER PHOTOVOLTAIC
POWER PLANT CONNECTED TO
MEDIUM VOLTAGE GRID**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Ante Marušić, PhD

Zagreb, 2019

Doktorski rad je izrađen na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na
Zavodu za visoki napon i energetiku

Mentor: prof. dr. sc. Ante Marušić

Doktorski rad ima 208 stranica

Doktorski rad broj _____

O mentoru:

Ante Marušić rođen je u Dubrovniku 1952. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao u polju elektrotehnike na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER), 1976., 1986. odnosno 1994. godine.

Od ožujka 1977. godine radi na Zavodu za visoki napon i energetiku FER-a. Bio je gostujući profesor na Sveučilištu u Rijeci, Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i Univerzitetu u Tuzli (BiH). U prosincu 2010. godine izabran je za redovitog profesora u trajnom zvanju. Sudjelovao je na tri znanstvena projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske i dva projekta Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ/NZZ). Objavio je više od 90 radova u časopisima i zbornicima konferencija u području relejne zaštite i automatike elektroenergetskog sustava, te projektiranja električnih postrojenja.

Prof. Marušić član je stručnih udruga IEEE, CIGRÉ, IASTED, HRO CIGRÉ, HKIE, HD MIPRO, EDZ i KoREMA. Sudjeluje u 16 programskih odbora znanstvenih konferencija, član je dvaju uredničkih odbora znanstvenih časopisa te sudjeluje kao recenzent u većem broju inozemnih časopisa i konferencija. Godine 1986. primio je nagradu „Prof. dr. Vratislav Bedjanić“ u Ljubljani (SLO) za posebno istaknutu magistarsku radnju.

About the Supervisor:

Ante Marušić was born in Dubrovnik in 1952. He received B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Zagreb, Croatia, in 1976, 1986 and 1994, respectively.

From March 1977 he is working at the Department of Power System at FER. He was a visiting professor at the University of Rijeka, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek and University of Tuzla (BiH). In 2010 he was promoted to Tenured Full Professor. He participated in three scientific projects financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia and two projects financed by the Croatian Science Foundation. He published more than 90 papers in journals and conference proceedings in the area of power system protection and automation and design of electrical facilities.

Prof. Marušić is a member of IEEE, CIGRÉ, IASTED, HRO CIGRÉ, HKIE, HD MIPRO, EDZ and KoREMA. He participated in 16 conference program committees, he is member of two journal editorial boards and he serves as a technical reviewer for various international journals and conferences. He received „Prof. dr. Vratislav Bedjanić Award“ from University of Ljubljana (SLO) for outstanding M.Sc. theses in 1986.

*Posebnu zahvalnost želim iskazati
svojoj supruzi Ivki i kćerima Fridi i Rozi na strpljenju,
svom mentoru Anti na vodstvu i
svom bivšem poslodavcu i stipenditoru, tvrtki Telenerg d.o.o. Zagreb,*

*te svim ostalima koji su na neki način pomogli izradi ovog rada - motiviranjem, potporom,
razgovorom, idejom, ustupanjem podataka, stručnim komentarom, sretnom slučajnošću, a koje
nabrajam kronološkim redom pojavljivanja u tom procesu:*

*roditeljima Petru i Nadi Ivas,
Dubravku Radiću, Telenerg d.o.o.,
Zlatku Bukovcu, Soltech d.o.o.,
Marini Čavlović, HEP-ODS d.o.o.,
Mati Lasiću, HOPS d.o.o. (prethodno Končar institut za elektrotehniku d.d.),
Ivanu Burulu, HEP-ODS d.o.o.,
Draganu Lovrinoviću, Telenerg d.o.o.,
Renatu Dujmiću, Telenerg d.o.o. i
svim koautorima objavljenih radova iz područja teme istraživanja.*

SAŽETAK

Otočni pogon distribuiranog izvora može se javiti u slučaju podudaranja proizvodnje distribuiranog izvora i potrošnje konzuma lokalne mreže u trenutku odvajanja takvog lokalnog sustava od ostatka mreže. Apsolutno pouzdane metode zaštite od pojave takvog pogona jedino su neekonomične komunikacijske metode temeljene na sustavu daljinskog vođenja. U ovom radu obrađuje se vjerojatnosno kvantificiranje pojave takvog neželjenog otočnog pogona s naglaskom na određeni tip elektrana - fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača koja se priključuje na mrežu srednjeg napona. Ovaj specifičan tip elektrana ima nekoliko osobina koje ga čine različitim od drugih klasičnih tipova izvora na temelju čega se i pristup istraživanju otočnog rada ovog tipa elektrana mora razlikovati.

U radu se prvo analizira struktura tipične fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača koja se priključuje na mrežu srednjeg napona. Teoretski su određeni doprinosi ukupnoj radnoj i jalovoj snazi svih elemenata od kojih je elektrana sastavljena. Definiran je P-Q dijagram svih mogućih radnih točaka elektrane na mjestu priključka na mrežu te provedena usporedba mjerenja izvršenih na stvarnoj elektrani s izračunatim vrijednostima, analiza i korekcija modela. Zatim je predložena metodologija za izračun vjerojatnosti pojave otočnog rada. Pri proračunu vjerojatnosti definiranom metodom koriste se prije definirani P-Q dijagram elektrane, podaci o konfiguraciji mreže, statistički pogonski parametri mreže i potrošača te definirane krivulje gustoće vjerojatnosti snaga proizvodnje fotonaponske elektrane i potrošnje lokalne mreže modelirane trokutastom razdiobom koja je predložena analizom literature i dostupnih podataka iz mjerenja u mreži operatora distributivnog sustava. Metoda je primjenjiva na najčešće korištene pasivne metode zaštite od otočnog rada, za koje je u radu potom analizirana zona neprepoznavanja. Proračun vjerojatnosti u ovisnosti o primjenjenoj funkciji zaštite je proveden na primjeru stvarne elektrane i lokalne mreže, na temelju čega su izvedeni zaključci.

Ključne riječi: otočni pogon, vjerojatnosna analiza rizika, distribuirani izvori, izmjenjivač, sunčana elektrana, pogonska karta, zaštita od otočnog pogona, vjerojatnost otočnog pogona

ABSTRACT

Island operation probability for multi-inverter photovoltaic power plant connected to medium voltage grid

Island operation is a condition in which producing unit, i.e. distributed source, is feeding some of the consumers in separated part of the network which is disconnected from main power source and is not fed from grid side. Island operation of distributed source generally is acceptable when its main purpose is to feed consumers of the specific industrial grid or similar local network, while such sources in its normal operation operate parallelly with the rest of the grid to which they eventually feed the surplus of the produced energy. Such sources always have the possibility of regulation which allows them to maintain the voltage and frequency in defined ranges. When distributed generation sources do not have regulation possibility, and this would be the case with all intermittent renewable sources which are being connected to the grid in growing numbers, islanding operation is unwanted. Particular type of sources which are dealt with in this research are multi-inverter power plants connected to medium voltage level distribution grid.

First sections of this thesis present the actual statuses and development perspectives of the photovoltaic sector worldwide and locally. Following this introduction part the problem of unwanted islanding of distributed generation is described with all of its aspects.

Island operation is the state of producing unit in which it can safely feed partial load in disconnected local part of the grid. Possibility of island operation means that source is having regulating systems for regulation of rotation speed, active power and excitation which allows for plant to be able to safely adapt to any amount of partial load larger of technical minimum for the particular producing unit. Such island operation must be possible to be maintained for several hours. During operation with partial load, producing unit must be capable to regulate changes in load. Basic criteria for sustainable island operation of separated parts of alternate current electrical systems is that active and reactive power of generation and load must be balanced at any given moment. Following this requirement it is obvious that island operation of distributed source without possibility of regulation is unwanted by network operator. Common practice for network operators worldwide at the moment is not to allow such operation, and to request such sources to be disconnected in case of islanding conditions.

Few main reasons for which such operation is unwanted are indicated herewith: there is danger for maintenance and restoration personnel, not knowing that part of the network,

although disconnected, is still powered; voltage and frequency of islanded network part can slip out of defined range, power quality worsens, which adversely affect the loads and can result in damage of both customer and utility side equipment; automatic re-closing of utility breaker may create a condition of asynchronous closure which can lead to serious damage of the equipment; the very purpose of automatic re-closing of utility breaker, which is to clear the transient faults on the feeders, is not fulfilled, as fault arc will not extinguish if it is fed from distributed generation source in island operation.

Immediately after switching out of switching device and disconnection from the main grid supply, distributed generation source is in operation with local load separated from the rest of the electric system. Such island is non-regulated electrical system with unpredictable behavior, the cause of which is the mismatch of the generation power and load power and non-existence of voltage and frequency regulation. Occurrence of the island operation on feeders having nominal load power much larger than maximum possible generation power on same feeder is practically impossible. Greater amount of power from distributed generation sources on network feeders increases the probability of lasting island operation. This probability depends on balance of generation power and load power, network conditions, regulation possibilities and applied protection methods. The most influencing factor is mismatch between load power and generation power, where neither one of the values is constant. Both load power and generation power are independent variables, i.e. probability functions which can be derived from long-term measurements during operation. If generation power and load power in disconnected system are approximately equal, there will not be necessary change in amplitude or frequency of the voltage at the point of connection to actuate any of installed island operation protection.

Reliability of island detection methods can be defined by the size of the protection non-detection zone (NDZ), which is the range of mismatch of the active and reactive power (ΔP and ΔQ) in which island operation will not be detected. The non-detection zone is a consequence of a necessity to prevent unwanted and incorrect actuation of protection. It is necessary for island protection to be insensitive to some standard transient occurrences in electrical system, such are voltage dips, over voltages, harmonic distortions and changes in frequency. Worst case for island operation detection is most certainly complete balance of generation power and load power in the disconnection moment, i.e. non existence of ΔP and ΔQ .

This thesis furtherly presents a research on island operation probability for particular type of distributed generation sources - multi-inverter power plants connected to medium voltage level distribution grid, which would be solar power plants in range of 500 kW to several

MW as per grid code in Croatia. The existing and proposed methods for island operation detection with these types of power plants and related functions integrated within inverters are described. Motivation for probability assessment of island operation is explained, followed by theoretical research which is also presented on and results are compared where possible with case study power plant measurements on the first such power plant in Croatia – solar photovoltaic power plant Kanfanar.

The original research part first presents the proposal of the methodology for the development of realistic operation chart, i.e. P - Q diagram, at point of common coupling of photovoltaic power plant, comprised of multiple inverter units, connected to medium voltage grid. Structure and components of common multi-inverter photovoltaic power plant connected to medium voltage are analyzed. From alternate current side point of view, such plants are composed of the inverters, low voltage cables, transformer and medium voltage cable to interface substation which is the point of common coupling with the grid. Substitute model of the power plant is used to define the plant at the point of common coupling with two characteristic values: active and reactive power, delivered to or consumed from the grid, at that point. Such model of distributed source at the point of connection can be used to define operation chart of the power plant, i.e. P - Q diagram, showing area of possible operation points. Contributions of all plant components to total active and reactive power are theoretically determined. Theoretical equations for the contribution to the total active power and reactive power of the plant for inverters, low voltage cables, transformers, medium voltage cable and auxiliary consumption are given. Special consideration is given to pre-defined inverter power factor. When the given equations are summated to give equations for total active and reactive power, it is concluded that these are dependable on only two changing variables: voltage and momentary generation power (generated from photovoltaic cells and transferred to grid through inverters). As limit values of these two variables are also known, equations of maximum and minimum values for total active and reactive power can be calculated when maximum and minimum values of changing variables are entered to equations. These equations can be presented graphically as curves. Area in P - Q diagram bordered by calculated border curves is area of possible power plant operation points. This area therefore represents operation chart of typical photovoltaic power plant connected to medium voltage grid, at point of connection of the plant to the grid. The proposed methodology has been applied to the case study plant and its operation P - Q diagram constructed.

Operation point trajectory obtained from case study measurements was compared to power plant operation chart constructed from calculations. Comparison of overlapped diagrams

shows similarity, but also there is dislocation of theoretically calculated and assumed operation chart from measurement values. Conclusions have been drawn regarding the influence to the reactive power of inverter transition from stand-by operation into working mode operation and regarding the set power factor of inverter which was deemed fixed. Based on the comparison with real case measurements, slight modifications in the process of constructing the operation chart are proposed in order for operation chart to encompass all realistic operation points of the power plant.

Furtherly, the methodology for calculation of probability for the islanding event of the distributed generation source is proposed. The fault tree for such event is discussed. Two basic events, disconnection on the switching device between the local grid and outer grid and balanced conditions of generation and load in local grid, need to happen simultaneously in order to cause island operation. Nevertheless, there are number of pairs of these events, depending on network configuration. The fault tree is then the starting point for the proposal of the process of the method for calculating the probability of islanding event. The probability of the basic events is defined. For first event it is the probability of the balanced conditions in local grid, which depends on the generation power and load power variables, active and reactive powers, respectively, and the range of the non-detection zone of the applied island protection function. For second event the probability is defined in terms of the switching occurrence frequency for the switching device in concern in the decided time period of the calculation. Flow chart for the proposed method is given.

Frequency distribution functions for all variables (active and reactive power of the generation, active and reactive power of the load) had to be modelled for the probability calculations. All the variables are continuous random variables within given possible range. The matching of theoretical frequency distribution functions has been discussed. Average daily generation profile curve and load profile curve have been presented. Relevant literature on photovoltaic generation power frequency distribution modelling and on distribution load frequency distribution modelling have been consulted, and related available case study measurements commented and used to come to the conclusion. The triangular distributions curves have been chosen for frequency distribution function modelling as applicable for all variables, with the noted and explained restrictions. Case study example is then used to present the generation power and load power frequency distribution function parameters calculation with the given input parameters known for this plant. Frequency distribution function and curves are defined both for active and reactive power of the case study power plant and for the

active and reactive power of the local load in all the possible partial local grids dependent on case study grid configuration.

The next section of the thesis deals with the non-detection zones for the selected island operation detection protection functions. The non-detection zone gives the borders for integration of functions in order to calculate the island operation probability. The selected protection functions are the ones on which the proposed methodology can be applied. These are passive methods already widely used and recommended for usage for the purpose of islanding detection: overvoltage and undervoltage, overfrequency and underfrequency, and rate of change of frequency. The relations for determination of non-detection zone borders for each of the proposed protection functions have been derived. It is concluded that the overvoltage and undervoltage protection non-detection zone range is dependent on unbalance of the active powers of generation and load, whilst the overfrequency and underfrequency protection non-detection zone range is dependent on unbalance of the reactive powers of generation and load. The rate of change of frequency protection has the non-detection zone range dependent on unbalance of active powers of generation and load, but also on one other parameter, rotational inertia in the system. This additional parameter has particularly significant impact to the detection of the island operation with the type of the power plants which are the main subject of this research, inverter power plants, which do not have its own inertia. Therefore, compared to some more classical distributed generation with rotational machine as a generator, the inertia of the system is much lower. The inertia is the equal only to load inertia. In such case, for the same settings, the non-detection zone of this protection function is significantly smaller when applied to inverter type generation then to rotational machine generation of the same power. In such case it is reasonable to consider this protection function very satisfying, which can be proved by calculating the probability of island operation event occurrence proposed in this work.

At the end, using the proposed methodology, the calculation of island operation probability for case study power plant has been conducted. Probability of occurrence of forbidden island operation of power plant without regulation, on a real example, has shown the differences when different protection functions are applied, and when grid is operated with different network configurations of power plant connection. Suggestion is that configuration of the power plant network connection should be carefully reviewed in order to lower the risks, if there is no highly reliable protection applied.

Keywords: island operation, probabilistic risk analysis, distributed generation source, inverter, solar power plant, operation chart, island protection, island protection probability

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
2.	Tehnološki i regulatorni kontekst	4
2.1.	Fotonaponske elektrane - pregled trendova u svijetu i perspektive razvoja sektora	4
2.2.	Fotonaponske elektrane - pregled stanja u Hrvatskoj	6
2.3.	Priključak distribuiranog izvora na mrežu u Hrvatskoj	7
2.3.1.	Regulatorni okvir	7
2.3.2.	Uvjeti operatora mreže	9
2.3.3.	Povratno djelovanje elektrane na mrežu	10
2.4.	Istraživanje problema pojave otočnog rada.....	11
2.5.	Fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona.....	11
2.6.	Motiv istraživačkog rada u datom kontekstu i ciljevi	13
3.	Neželjeni otočni pogon distribuiranih izvora	16
3.1.	Otočni pogon u distribucijskoj mreži	16
3.2.	Pojava neželjenog otočnog pogona	16
3.3.	Nužnost prepoznavanja otočnog pogona	17
3.4.	Moguće posljedice kao razlog neželjenosti otočnog pogona	18
3.4.1.	„Kontrolirani“ i „nekontrolirani“ otočni pogon	18
3.4.2.	Asinkroni uklop	20
3.4.3.	Problematika automatskog ponovnog uklopa i zahtjevi	20
3.4.4.	Radovi u mreži i nečekivani otočni pogon.....	21
3.4.5.	Sklopne operacije u distributivnoj mreži	22
3.4.6.	Upravljanje mrežom u otočnom pogonu	23
3.4.7.	Zaštita u distribucijskoj mreži i otočni pogon	24
3.5.	Problem detekcije otočnog pogona	25
3.6.	Ponašanje veličina sustava u otočnom pogonu	26
3.6.1.	Interpretiranje stanja sustava iz lokalnog mjerenja veličina sustava.....	26
3.6.2.	Ponašanje frekvencije.....	26
3.6.3.	Interpretiranje napona	30
3.6.4.	Interpretiranje struje	32
3.6.5.	Interpretiranje impedancije	33
3.6.6.	Zaključno o ponašanju veličina sustava	33
4.	Zaštita od otočnog pogona	35

4.1.	Podjela metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona.....	35
4.1.1.	Lokalne metode	35
4.1.2.	Daljinske metode	40
4.2.	Zona neosjetljivosti metode detekcije	40
4.3.	Usporedba vrsti metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona.....	42
4.3.1.	Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta metoda	42
4.3.2.	Valorizacija metoda detekcije otočnog rada	43
4.3.3.	Prepreke primjeni daljinskih metoda.....	44
4.3.4.	Trend vraćanja fokusa na lokalne pasivne metode	44
4.4.	Preporuke za projektiranje zaštite od otočnog rada	45
5.	Zaštita od otočnog pogona elektrana izmjenjivačkog tipa.....	47
5.1.	Izmjenjivači kao izvori (u fotonaponskim elektranama) i razlika u odnosu na druge tipove izvora (generatore)	47
5.2.	Klasifikacija zaštita od otočnog pogona izmjenjivača	48
5.2.1.	Pasivne metode integrirane u izmjenjivačima	49
5.2.2.	Aktivne metode integrirane u izmjenjivačima	52
5.3.	Standardi	56
5.4.	Problem više izmjenjivača i uspješne zaštite od otočnog pogona.....	58
5.5.	Motiv definiranja metode provedbe proračuna/procjene vjerojatnosti otočnog rada proučavanog tipa elektrana	59
6.	Model izrade pogonske karte fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona	61
6.1.	Principna shema fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona	61
6.2.	Nadomjesni model	63
6.3.	Pogonska karta	63
6.4.	Doprinosi pojedinih elemenata	64
6.5.	Radna snaga (P) elektrane u točki priključka	64
6.5.1.	Izmjenjivači	65
6.5.2.	Niskonaponski kabeli	66
6.5.3.	Transformator	67
6.5.4.	Srednjenaponski kabel	68
6.5.5.	Vlastita (kućna) potrošnja	68
6.5.6.	Ukupna radna snaga elektrane	69
6.6.	Jalova snaga (Q) elektrane u točki priključka	69

6.6.1.	Izmjenjivači	69
6.6.2.	Niskonaponski kabeli	72
6.6.3.	Transformator	73
6.6.4.	Kompenzacija induktiviteta transformatora	74
6.6.5.	Srednjenaponski kabel	75
6.6.6.	Vlastita (kućna) potrošnja	75
6.6.7.	Ukupna jalova snaga elektrane	75
6.7.	Pogonska karta elektrane u P-Q dijagramu	76
6.7.1.	Teoretska ograničenja nasuprot propisanim ograničenjima i ograničenjima zbog zadanih podešenja (faktora snage).....	77
6.8.	Primjena predloženog načina konstrukcije pogonske karte na primjeru stvarne elektrane	78
6.8.1.	Računska procjena i analiza radne snage elektrane	78
6.8.2.	Računska procjena i analiza jalove snage elektrane	79
6.8.3.	Izrada pogonske karte u P-Q dijagramu	80
6.9.	Mjerenja provedena na stvarnoj elektrani	85
6.10.	Analiza usporedbe mjerenih i računatih vrijednosti i korekcija modela pogonske karte na primjeru stvarne elektrane	89
7.	Osnovne postavke metodologije za izračun vjerojatnosti otočnog pogona elektrane s izdvojenim dijelom lokalne mreže	92
7.1.	Stablo kvara	92
7.2.	Broj razmatranih lokalnih dijelova mreže.....	94
7.3.	Vjerojatnosti inicijalnih događaja	95
7.3.1.	Vjerojatnost pojave uravnotežene snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja lokalnog dijela mreže.....	95
7.3.2.	Učestalost pojave isklopa sklopnog uređaja između lokalnog dijela mreže i ostatka sustava	99
7.4.	Vremenski period	100
7.5.	Ukupna vjerojatnost pojave otočnog pogona	100
7.6.	Dijagram toka opisane metode.....	102
8.	Prikaz varijabli snage opterećenja lokalnog dijela mreže odgovarajućom funkcijom gustoće vjerojatnosti varijable snage	104
8.1.	Dijagrami snage opterećenja	104
8.2.	Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable snage opterećenja	107

8.3.	Modeliranje uz malo dostupnih podataka	109
8.3.1.	Nepotpuni podaci o snazi opterećenja po točkama mreže	109
8.3.2.	Pogodna funkcija razdiobe za modeliranje iz dostupnih podataka	110
8.3.3.	Trokutasta ili triangularna razdioba	111
8.4.	Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja	113
8.4.1.	Modeliranje uz poznate ulazne podatke	113
8.4.2.	Modeliranje uz ekstrapolirane ulazne podatke	114
8.5.	Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja	115
8.5.1.	Dnevna krivulja jalove snage opterećenja	115
8.5.2.	Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja	116
9.	Prikaz varijabli snage proizvodnje elektrane odgovarajućom funkcijom gustoće vjerojatnosti varijable snage	118
9.1.	Dijagrami snage proizvodnje fotonaponske elektrane	118
9.1.1.	Prosječni godišnji dnevni dijagram	119
9.2.	Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje elektrane	120
9.3.	Mjerni podaci pribavljeni kroz istraživanje pri izradi ovog rada	121
9.3.1.	Manjkavosti korištenih mjernih podataka	121
9.3.2.	Grafički prikaz pribavljenih mjernih podataka	122
9.3.3.	Komentar prikazanih mjernih podataka	123
9.3.4.	Moguća aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti za prikupljena mjerenja ..	123
9.4.	Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje fotonaponske elektrane funkcijom gustoće vjerojatnosti za trokutastu razdiobu	125
9.4.1.	Općenita primjenjivost trokutaste razdiobe	125
9.4.2.	Dostupnost ulaznog podatak o prosjačnoj snazi za funkciju aproksimacije	126
9.4.3.	Očekivana prosječna snaga za elektrane na području Hrvatske	127
9.5.	Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage proizvodnje	128
9.5.1.	Ulazni podaci	128
9.5.2.	Primijenjive formule funkcije gustoće vjerojatnosti	128
9.6.	Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage proizvodnje	130
9.6.1.	Ulazni podaci	132
10.	Funkcije gustoće vjerojatnosti varijabli snage proizvodnje i potrošnje lokalne mreže na primjeru SE Kanfanar i lokalne mreže u skladu s opisanom metodologijom	133
10.1.	Spoj SE Kanfanar na elektroenergetsku mrežu	133
10.2.	Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage proizvodnje elektrane	134

10.3. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage proizvodnje elektrane	134
10.4. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage opterećenja za moguće lokalne dijelove mreže	136
10.5. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage opterećenja za moguće lokalne dijelove mreže	140
10.6. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijabli radne i jalove snage proizvodnje u slučaju nekog drugog tipa elektrane	142
11. Zona nedetekcije zaštitnih metoda od otočnog rada	145
11.1. Odabrane zaštitne funkcije	145
11.2. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita	147
11.3. Podnaponska i nadnaponska zaštita	149
11.4. Detekcija brzine promjene frekvencije	151
11.4.1. Kinetička energija i konstanta tromosti (sustava)	151
11.4.2. Zona neprepoznavanja otočnog pogona	154
12. Proračun vjerojatnosti otočnog rada na primjeru SE Kanfanar i lokalne mreže prema opisanoj metodologiji	156
12.1. Dodatni ulazni podaci koji je još potrebno definirati	156
12.1.1. Učestalost isklopa sklopnih uređaja	156
12.1.2. Faktor dobrote	158
12.1.3. Inercija zamašnih masa lokalnih dijelova mreže (za funkciju df/dt)	158
12.2. Proračuni	159
12.2.1. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita	159
12.2.2. Podnaponska i nadnaponska zaštita	161
12.2.3. Detekcija brzine promjene frekvencije df/dt	162
12.3. Komentar proračuna	163
12.4. Usporedba dobivene vjerojatnosti sa slučajem kad bi se radilo o elektrani sa sinkronim generatorom	164
12.4.1. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita	164
12.4.2. Podnaponska i nadnaponska zaštita	165
12.4.3. Detekcija brzine promjene frekvencije df/dt	165
12.4.4. Komentar	166
12.5. Usporedba vjerojatnosti izračunatih za elektrane različitih vrijednosti snaga spojene na istom mjestu u promatranom slučaju	167
12.6. Komentar	169

13. Zaključak	172
Literatura	175
Popis kratica	183
Popis oznaka	186
Popis slika	192
Popis tablica.....	196
Prilog 1 - Korišteni podaci o Sunčanoj elektrani Kanfanar	198
Prilog 2 - Korištena mjerenja vršena u postrojenju Sunčane elektrane Kanfanar	202
Prilog 3 - Mjerenja kod izvršenog pokusa iniciranja pojave otočnog pogona u postrojenju Sunčane elektrane Kanfanar	204
Životopis	206
Curriculum vitae	208

1. UVOD

Otočni pogon definiran je kao stanje proizvodne jedinice u kojem ona može sigurno podnijeti djelomično opterećenje u izdvojenom dijelu elektroenergetskog sustava. Sposobnost otočnog pogona podrazumijeva sustav reguliranja (npr. brzine vrtnje, djelatne snage, uzbude) koji omogućuje da proizvodna jedinica može sigurno prijeći na bilo koje djelomično opterećenje veće od tehničkog minimuma i da pri pogonu s djelomičnim opterećenjem može regulirati udarno opterećenje. Takav otočni pogon mora biti održiv više sati. Temeljni je kriterij održivog otočnog pogona izdvojenih dijelova izmjeničnih elektroenergetskih sustava da radna i jalova snaga proizvodnje i tereta moraju biti uravnotežene u svakom trenutku.

Otočni pogon distribuiranog izvora u pravilu je poželjan kad je primarna namjera distribuiranog izvora napajanje potrošnje određenog industrijskog pogona ili točno određene lokalne mreže, a takav izvor u redovnom pogonu radi u paralelnom spoju s vanjskom mrežom u koju eventualno predaje višak proizvedene energije. Takav distribuirani izvor uvijek ima mogućnost regulacije koja mu omogućava da održava napon i frekvenciju u zadanim granicama. Kod distribuiranih izvora s nemogućnošću regulacije, kakvi su svi intermitentni obnovljivi izvori, a koji se u sve većem broju priključuju na elektroenergetski sustav, otočni rad je nepoželjan. Trenutna je praksa u svijetu da se zahtjeva odspajanje takvih izvora u slučaju pojave otočnog rada.

Trenutno nakon isklapanja rastavnog uređaja i odvajanja od mreže jedan ili više distribuiranih izvora u pogonu su s teretom i odvojeni od ostatka sustava. Takav otok je neregulirani energetski sustav s nepredvidljivim ponašanjem, čemu je razlog razlika snage proizvodnje i potrošnje i nepostojanje regulacije napona i frekvencije. Pojava otočnog pogona na odvodima mreže s nazivnim teretom mnogo većim od maksimalne moguće snage proizvodnje na istima je praktički nemoguća. Povećanje udjela snage distribuiranih izvora na odvodima mreže dovodi do povećanja vjerojatnosti stabilnog otočnog pogona. Vjerojatnost ovisi o neuravnoteženosti proizvodnje i tereta, odzivu mreže, mogućnosti regulacije i odzivu primijenjenih metoda zaštite. Najvažniji je faktor razlika između snage proizvodnje i tereta, koje su međusobno nezavisne varijable.

Mrežni pretvarači (izmjenjivači) su tehnologija koja danas omogućuje u činkovito i fleksibilno povezivanje različitih vrsta distribuiranih izvora (obnovljivi izvori energije, sustavi pohrane energije) na elektroenergetski sustav i čija će uloga biti sve značajnija u budućnosti elektroenergetskog sustava kao sastavnog dijela napredne mreže (*smart grid*-a). Distribuirani

izvori, npr. fotonaponske ćelije, mikroturbine ili gorive ćelije ne proizvode izmjenični napon frekvencije 50 Hz. Elektronički pretvarači prevaramo električnu energiju dobivenu iz izvora u oblik koji je potreban trošilima. Najčešći slučaj izvora u kojem se danas koriste izmjenjivači je za priključak polja fotonaponskih ćelija na izmjeničnu mrežu.

Fotonaponske elektrane snage veće od 500 kVA spajaju se na mrežu srednjeg napona. Općenito, kod ovakvih elektrana, iako je priključak cijele elektrane na mreži srednjeg napona, sam izvor (izmjenjivač) se spaja na niskonaponskoj strani, te se preko transformatora spaja na mrežu srednjeg napona. Dva su osnovna tipa, s centralnim izmjenjivačem velike snage ili s više izmjenjivačkih jedinica manjih snaga. U praksi se pokazalo da su zahtjevi gotovo isključivo za elektrane s više manjih izmjenjivačkih jedinica koje su tipski proizvodi i ekonomski su isplativiji investitoru. Elektrana se priključuje na neki od postojećih izvoda iz pojne transformatorske stanice, na kojem već postoji određeni broj potrošačkih transformatorskih stanica sa svojim potrošačima. Priključak se izvodi preko dvaju postrojenja: transformatorske stanice elektrane i susretnog postrojenja operatora sustava. Točka priključka elektrane na mrežu je u susretnom postrojenju, u odvodnom polju prema transformatorskoj stanici elektrane. Odvod na koji se priključuje u pogonu je, gledajući napajanje sa strane mreže (pojne transformatorske stanice), radijalno napajanje, a u pravilu ima mogućnost napajanja i s druge strane, obično s druge sekcije srednjenaponskog postrojenja iste pojne stanice ili iz neke druge pojne transformatorske stanice. Uklopno stanje, ovisno o pogonskim prilikama, određuje operater sustava.

Ako su snaga proizvodnje i tereta na odspojenom odvodu približno jednake u trenutku isklapanja odvoda sa čvrste mreže, neće biti dovoljne promjene u amplitudi ili frekvenciji napona na priključku distribuiranog izvora, da bi proradila bilo koja od osnovnih nadnaponskih/podnaponskih ili nadfrekvencijskih/podfrekvencijskih zaštita. Samo će dovoljna promjena radne snage promijeniti amplitudu napona u mjeri da je nadnaponska/podnaponska zaštita može detektirati. Promjena jalove snage promijenit će fazni pomak, a posljedično i frekvenciju te ukoliko je dovoljno velika omogućit će detekciju nadfrekvencijskom/podfrekvencijskom zaštitom. Pouzdanost tih i drugih metoda detekcije otočnog pogona može se odrediti veličinom zone neprepoznavanja (*non-detection zone*, NDZ), definirane kao prostor neusklađenosti snaga (ΔP i ΔQ) u kojem otočni rad neće biti prepoznat jer postoji mogućnost nepoželjnih i netočnih prorada zaštite. Nužno je da zaštita od otočnog pogona bude neosjetljiva na standardne poremećaje u mreži. Iz navedenih razloga u pravilu standardna nad/pod-naponska/frekvencijska zaštita kao zaštita od otočnog rada ne smatra se dovoljno pouzdanom, pa su tijekom zadnjih godina predložene razne metode zaštite. One se

mogu podijeliti na lokalne (na razini samog izmjenjivača, jedne jedinice) i mrežne metode (udaljena detekcija), ali i na pasivne (mjerjenje električnih veličina) i aktivne metode (injektiranje određenog poremećaja u svrhu destabilizacije eventualnog otočnog pogona). Također postoje i hibridne metode koje su kombinacija više metoda s ciljem eliminacije nedostataka jednih i drugih te pouzdanijeg utvrđivanja pogonskog stanja otočnog pogona.

Kod mikro elektrana koje su na mrežu spojene jednim izmjenjivačem standardom su definirane preporuke za mjere zaštite od otočnog rada. Problem kod prethodno opisanih većih elektrana sastavljenih od više izmjenjivača je što integrirane metode pojedinih izmjenjivača, pogotovo aktivne, koje imaju bolju pouzdanost pri otkrivanju otočnog pogona, mogu međusobno interferirati ako svi izmjenjivači nisu međusobno sinkronizirani, pa nisu pouzdane u ovom slučaju. Metode temeljene na sustavu daljinskog vođenja operatera su najpouzdanije, ali one se pak zbog velikih troškova smatraju neekonomičnima, pogotovo u slučaju više elektrana.

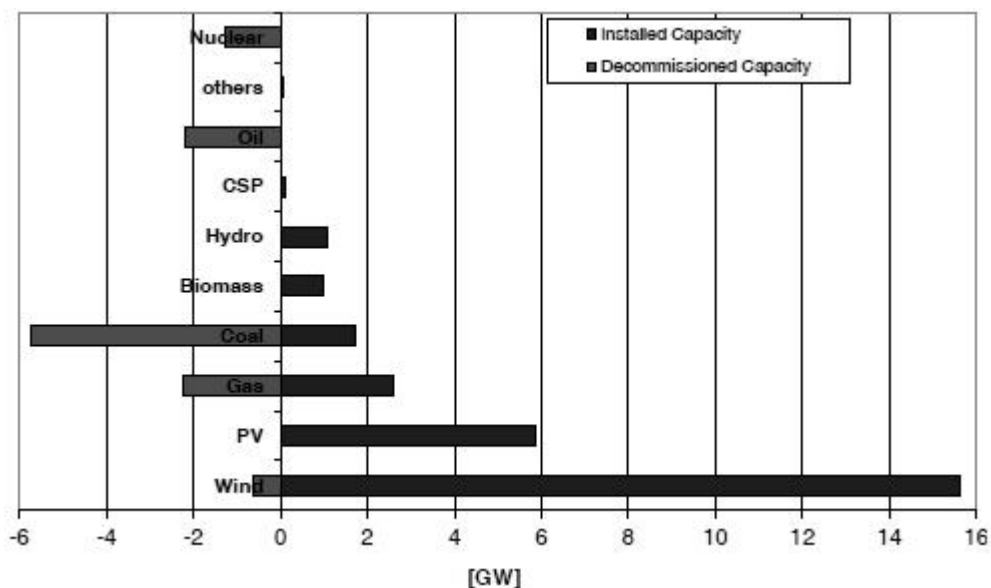
Ovaj rad pokušat će ponuditi rješenje ne isključivo na razini izvora, već uzimajući u obzir karakteristike sustava na koji se izvor priključuje, pokušavajući odgovoriti na pitanje vjerojatnosti pojave neželjenog otočnog rada, a pri primijenjenima standardnim funkcijama pasivne zaštite, koje su dostupne, lako za izvedbu i na razini pojedinačnog izmjenjivača i na razini elektrane, te bez povratnog utjecaja na ostale korisnike mreže.

2. TEHNOLOŠKI I REGULATORNI KONTEKST

2.1. Fotonaponske elektrane - pregled trendova u svijetu i perspektive razvoja sektora

Na svjetskoj razini u 2017. godini izgrađeno je novih energetske proizvodnih objekata u ukupnoj snazi od 28,1 GW. U isto vrijeme povučeno je iz pogona 12,1 GW snage elektrana kojima je prošao životni vijek. Netto rast ukupnih proizvodnih kapaciteta Europske unije na godišnjoj razini bio je dakle 16 GW. [1]

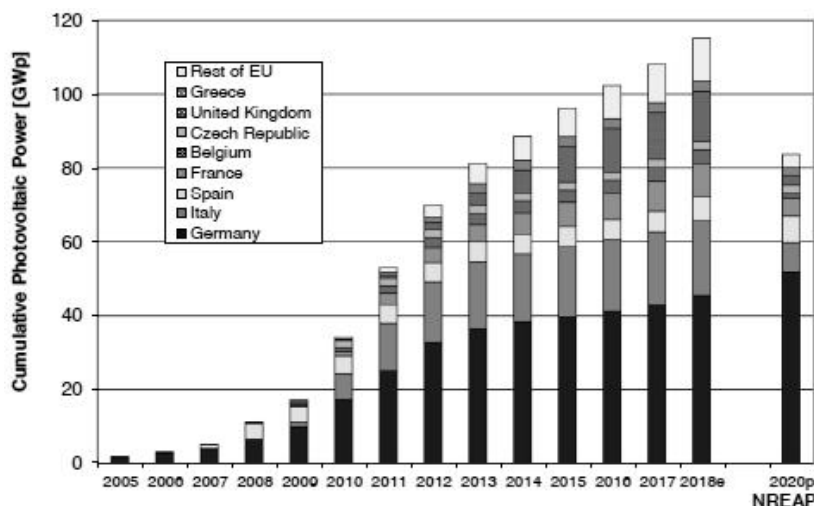
Od novoinstaliranih kapaciteta 23,7 GW (84,5%) otpada na obnovljive izvore energije, a unutar tog dio koji otpada na sunčane elektrane fotonaponskog tipa bio je 5,9 GW (21%). Ukupna podjela bila je otprilike slijedeća: vjetroelektrane 15 GW, fotonaponske elektrane 5,9 GW, hidroelektrane 1,1 GW, elektrane na biomasu 0,96 GW, elektrane na prirodni plin 356 MW, sunčane termalne elektrane 118 MW i ostali izvori 8 MW. Netto udio elektrana na klasična goriva je pao, i to: elektrana na ugljen za 4 GW, a elektrana na plin za 2,2 GW [1]. Slika 2-1 prikazuje novoizgrađene i povučene snage prema izvorima.



Slika2-1 Novoinstalirani i povučeni kapaciteti proizvodnje električne energije prema tipu izvora u 2017. godini [1]

Fotonaponske elektrane čine dakle vrlo značajan udio u novoizgrađenim kapacitetima proizvodnje, gotovo najveći. Prosječna godišnja stopa rasta instalirane snage u fotonaponskim elektranama u razdoblju 2000. do 2014. godine u svijetu iznosila je 44% [2]. U slijedećih pet godina neoptimistični scenarij razvoja tog sektora predviđa udvostručenje instalirane snage, a

optimistični utrostručenje [3]. Ukupno je na kraju 2014. godine u svijetu bilo instalirano više od 177 GW vršne snage fotonaponskih elektrana [4] što čini otprilike 3% ukupno instalirane snage proizvodnje u elektranama. Nešto manje od 60% novoizgrađenih kapaciteta fotonaponskih elektrana u sustavima je poticajnih tarifa, dok je ostali dio pronašao tržišnu opravdanost i bez poticaja [4]. Slika 2-2 prikazuje rast ukupne instalirane snage u fotonaponskim elektranama od 2005. do 2018. godine i udio pojedinih zemalja [1].



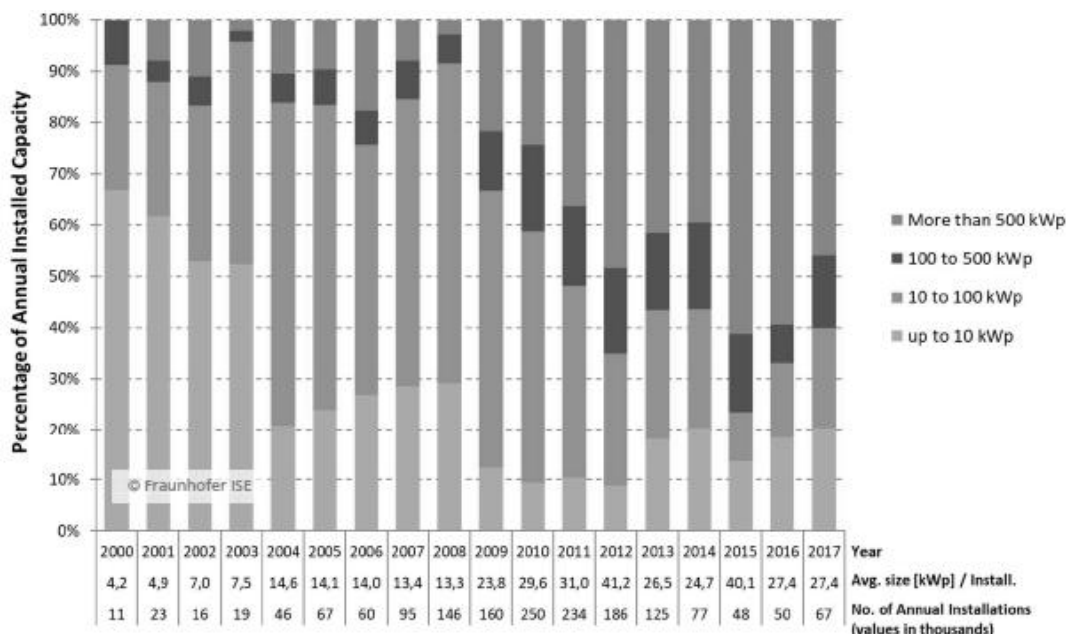
Slika2-2 Rast ukupne instalirane snage u fotonaponskim elektranama od 2005. do 2018. godine s udjelom pojedinih zemalja

Svjetski lideri po ukupnoj snazi instaliranih fotonaponskih sustava su Njemačka, Kina, Japan, Italija i Sjedinjene Američke Države. Po udjelu električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama u ukupno proizvedenoj električnoj energiji prednjače Italija (8%), Grčka (7%) [4] i Njemačka (7,5%) [5]. Za usporedbu, u Hrvatskoj se udio proizvedene električne energije u fotonaponskim elektranama u odnosu na ukupno proizvedenu električnu energiju u svim elektranama trenutno kreće na razini od oko 0,3%.

U početku razvoja sektora fotonaponskih elektrana većina izgrađenih elektrana bile su manjih snaga, integrirane na objektima, i priključivale su se na niskonaponsku mrežu. Zadnjih godina brzo raste udio neintegriranih fotonaponskih elektrana, većih od 500 kVA, koje se spajaju direktno na sredjenaponsku mrežu operatera distribucijskog sustava. Kao primjer, na Slici 2-3 prikazan je rast udjela snage većih fotonaponskih elektrana u ukupno instaliranoj snazi, na primjeru Njemačke koja prednjači po razvijenosti ovog sektora [3].

Podaci o najvećim fotonaponskim elektranama na svijetu mijenjaju se pak iz godine u godinu jer se redovno obaraju rekordi u veličini novih elektrana. Tako je 2005. godine najveća

elektrana imala snagu od 6,3 MW (Bavaria Solarpark u Njemačkoj), a danas u Sjedinjenim Američkim Državama ima nekoliko izgrađenih elektrana instalirane snage veće od 500 MW od kojih je najveća Solar Star snage 579 MW.



Slika 2-3 Udjel snage većih fotonaponskih elektrana u ukupno instaliranoj snazi u Njemačkoj

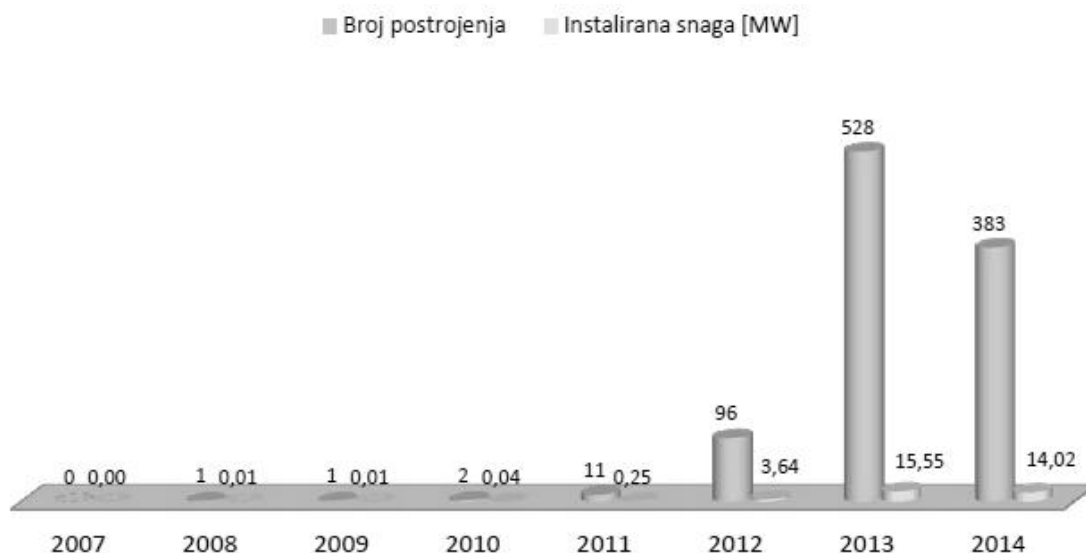
2.2. Fotonaponske elektrane - pregled stanja u Hrvatskoj

Na Slici 2-4 prikazan je broj i ukupna instalirana snaga izgrađenih fotonaponskih elektrana po pojedinim godinama u Hrvatskoj. Razvoj ovog sektora u Hrvatskoj dosad je bio pokretan isključivo poticajnim tarifnim sustavima, što u bližoj budućnosti više neće biti slučaj, obzirom da su planirane poticajne kvote sunčanih elektrana ispunjene, a cilj od 52 MW iz Nacionalnog akcijskog plana za obnovljive izvore energije do 2020. godine već ispunjen [6].

Potpisane ugovore o poticajnom otkupu proizvedene električne energije iz fotonaponskih elektrana tako je 2016. godine u Hrvatskoj imalo ukupno 1229 postrojenja fotonaponskih elektrana ukupne instalirane snage 53,97 MW. Planovi i lokacije za neke veće fotonaponske elektrane se s vremena na vrijeme spominju u medijima kada se spominju OIE, ali daljnji razvoj sektora zasad je prepušten tržišnim uvjetima.

U trajnom pogonu je na dan 25.2.2016. bilo 1213 postrojenja ukupne instalirane snage 43,98 MW [7] od kojih su 5 elektrana priključene na mrežu srednjeg napona (Sunčana elektrana Kanfanar od 999 kW, Sunčana elektrana Gumiimpex od 999 kW, Fotonaponska elektrana

Barban od 570 MW, Fotonaponska elektrana Stankovci od 950 MW, Fotonaponska elektrana Županja od 1000 kW). U testnom radu, u gradnji ili u postupku pripreme gradnje je još 16 elektrana ukupne snage 10,99 MW [8] od kojih je 9 elektrana instalirane snage oko 1 MW, koje će se priključiti na mrežu srednjeg napona operatora distribucijskog sustava.



Slika 2-4 Broj postrojenja i instalirana snaga sunčanih elektrana u pojedinoj godini

Postotni udio ukupne instalirane snage energetskog sustava Hrvatske koji otpada na fotonaponske elektrane trenutno je otprilike 1%, dok je postotni udio ukupno proizvedene električne energije u fotonaponskim elektranama u odnosu na ukupno proizvedenu električnu energiju u svim elektranama u Hrvatskoj otprilike 0,3%. Ako se ti brojevi usporede s prije navedenim brojevima za neke druge razvijene države, može se pretpostaviti da će se ovaj sektor u Hrvatskoj i dalje ubrzano razvijati.

2.3. Priključak distribuiranog izvora na mrežu u Hrvatskoj

2.3.1. Regulatorni okvir

Pravno-regulatorni okvir za priključak malih elektrana na elektroenergetsku mrežu počiva na nekoliko osnovnih dokumenata.

„Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava“ uređuje se pogon i način vođenja, razvoj i izgradnja elektroenergetskog sustava (EES-a) te uspostavljanje priključaka na

prijenosnu i distribucijsku mrežu u EES kao i mjerna pravila za obračunsko mjerno mjesto [9]. Operator distribucijskog sustava odgovoran je za utvrđivanje tehničkih uvjeta za priključak i priključenje na distribucijsku mrežu novih korisnika mreže, te uvjeta za povećanje priključne snage postojećim korisnicima mreže. U Poglavlju 5.3. Mrežnih pravila EES-a navedene su smjernice za priključenje korisnika mreže na distribucijsku elektroenergetsku mrežu: opći uvjeti za priključak postrojenja korisnika mreže na distribucijsku mrežu, temeljne značajke na mjestu priključka (odstupanje frekvencije, odstupanje napona, valni oblik napona, nesimetrija napona, pogonsko i zaštitno uzemljenje, razina kratkog spoja, razina izolacije, zaštita od kvarova i smetnji, faktor snage), povratno djelovanje na mrežu, posebni uvjeti za priključenje proizvodnih jedinica i dodatni tehnički uvjeti za priključenje proizvodnih jedinica. U Mrežnim pravilima posebno važna cjelina za proizvođače je potpoglavlje 5.3.5: Posebni uvjeti za priključenje proizvodnih jedinica. Projekt svake elektrane koja se projektira za paralelni pogon s mrežom mora strogo poštivati sve tamo navedene uvjete. Svrha tehničkih i pogonskih uvjeta za priključenje na distribucijsku mrežu je osiguranje normalnog pogona distribucijske mreže, sprječavanje nedopuštenog povratnog djelovanja na mrežu i postojeće korisnike mreže. Posebnim i dodatnim tehničkim i pogonskim uvjetima uvažavaju se posebnosti pogona i tehničkih značajki proizvodnih jedinica. Nova Mrežna pravila donesena su 2018. godine i donose određene promjene u dopuštenim režimima rada proizvodnih jedinica, posebno u vidu mogućnosti pružanja pomoćnih usluga operatoru sustava.

Mjesto priključka, naponsku razinu priključka, tehničke i pogonske uvjete utvrđuje operator distribucijskog sustava sukladno Općim uvjetima za opskrbu električnom energijom [10] i Mrežnim pravilima. Proizvodne jedinice odnosno elektrane koje se priključuju na distribucijsku mrežu prema Mrežnim pravilima razvrstane su na kategorije prema nazivnom naponu priključka (priključene na mrežu niskog napona i priključene na mrežu srednjeg napona), te prema nazivnoj snazi elektrane (elektrane snage veće od 5 MW, elektrane snage manje ili jednake 5 MW te mikroelektrane snage do 30 kW).

Na niskonaponsku mrežu priključuje se elektrana ukupne snage do uključivo 500 kW. Priključak može biti ostvaren na niskonaponski vod ili na niskonaponske sabirnice transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV. Na niskonaponski vod mogu se priključiti elektrane ukupne snage do uključivo 100 kW. Na srednjenaponsku mrežu (10, 20, 30 i 35 kV) priključuju se elektrane ukupne snage veće od 500 kW do uključivo 10 MW, ali se mogu priključiti i elektrane manjih snaga.

Trenutno je jedina granska norma koja razmatra priključenje proizvođača na mrežu HEP-ODS-a „Tehnički uvjeti za priključak malih elektrana na elektroenergetski sustav

Hrvatske elektroprivrede“ [11] iz 1995. godine. U tijeku je izrada studije „Uvjeti priključenja elektrana na distribucijsku mrežu“ koja u konačnici treba rezultirati novom granskom normom koja bi obuhvaćala sve tipove elektrana priključne snage do 10 MW [12].

2.3.2. Uvjeti operatora mreže

U postupku priključenja elektrane (kao korisnika mreže) na distribucijsku mrežu, na zahtjev elektrane HEP-ODS d.o.o. kao operator mreže izdaje temeljne dokumente, sklapa s elektranom ugovore i daje suglasnosti na dokumentaciju koju izrađuje elektrana (korisnik mreže) [13].

Temeljni dokumenti:

- Elaboraat optimalnog tehničkog rješenja priključka (EOTRP),
- Prethodna elektroenergetska suglasnost (PEES),
- Elektroenergetska suglasnost (EES).

Ugovori:

- Ugovor za izradu EOTRP-a,
- (Pred)Ugovor o priključenju,
- Ugovor o korištenju mreže,
- Ugovor o vođenju pogona.

Suglasnosti na:

- Projekt elektroenergetskog dijela elektrane,
- Elaboraat utjecaja elektrane na mrežu (EUEM),
- Elaboraat podešenja zaštite (EPZ),
- Elaboraat opremanja obračunskog mjernog mjesta,
- Plan i program ispitivanja u pokusnom radu,
- Početak pokusnog rada (dozvola za pokusni rad),
- Konačno izvješće o provedenom pokusnom radu.

Izradu temeljnih dokumenata i ugovora financira investitor, a izrađuje ih operator sustava (HEP-ODS), dok dokumente na koje operator izdaje suglasnost izrađuje investitor, ili netko drugi u ime investitora.

Navedeni zahtjevi predstavljaju trenutnu praksu HEP-ODS-a na području priključenja elektrana. Kako se radi o složenom postupku, koji je uspostavljen relativno nedavno, izmjene pojedinih zahtjeva ili dokumenata su ne samo moguće, nego i neizbježne [13].

2.3.3. Povratno djelovanje elektrane na mrežu

S tehničke strane najvažniji je aspekt priključka distribuiranog izvora na distribucijsku mrežu povratno djelovanje elektrane na mrežu. S obzirom na „pasivnost“ i jednosmjerni tok energije kao osnovne karakteristike i jedan od postulata distributivne mreže sve do prije desetak godina i po četaka masovnijeg priključivanja distribuiranih izvora, na temu povratnog djelovanja elektrane na mrežu provedeno je mnogo istraživanja i mnogi problemi su uspješno riješeni.

Operatoru mreže analiza povratnog djelovanja elektrane na mrežu za elektranu koja se priključuje provedena je u dva dokumenta nabrojena u prethodnom poglavlju: Elaboratu utjecaja elektrane na mrežu (EUEM) i Elaboratu podešenja zaštite (EPZ) koje je korisnik obavezan prirediti i dati na suglasnost operatoru mreže prije priključenja.

2.3.3.1. Elaborat utjecaja elektrane na mrežu

Ovisno o zadovoljavanju kriterija odnosa snage elektrane i snage kratkog spoja mreže na mjestu priključka [9] za elektranu je potrebno izraditi Elaborat utjecaja na mrežu, koji se sastoji od dva dijela. Prvi dio su proračuni koji prethode mjerenju, a sadrže analizu utjecaja elektrane na mrežu: utjecaj na tokove snaga i naponske prilike (za osnovni harmonik), utjecaj na kratkospojne prilike, te utjecaj na kvalitetu napona (za elektrane na srednjem naponu i analiza viših harmonika). U prvom dijelu EUEM-a nalazi se i protokol snimanja kvalitete električne energije. Drugi dio EUEM-a je snimanje kvalitete električne energije i izrada izvješća. Prema normi HRN EN 50160 mjere se kontinuirano u normalnom pogonu pokazatelji kvalitete električne energije na obračunskom mjernom mjestu elektrane u periodu od 7 dana bez elektrane i 7 dana s elektranom na mreži. Elaborat o utjecaju elektrane na kvalitetu električne energije mora jasno pokazati da je utjecaj elektrane na mrežu unutar dopuštenih granica.

2.3.3.2. Elaborat podešenja zaštite

Elaborat podešenja zaštite sadrži analizu mreže i zaštitnih uređaja u cilju utvrđivanja selektivnog udešenja zaštite u elektrani, na prekidaču za odvajanje i u okolnoj mreži. Ovaj se elaborat naslanja na proračun tokova snaga i kratkog spoja. Elaborat mora obuhvaćati čitavu korespondirajuću mrežu – mrežu u kojoj se osjeća utjecaj elektrane [13]. Elaborat mora dati prijedlog udešenja zaštite (proradne vrijednosti i vrijeme zatezanja) u elektrani i u mreži za:

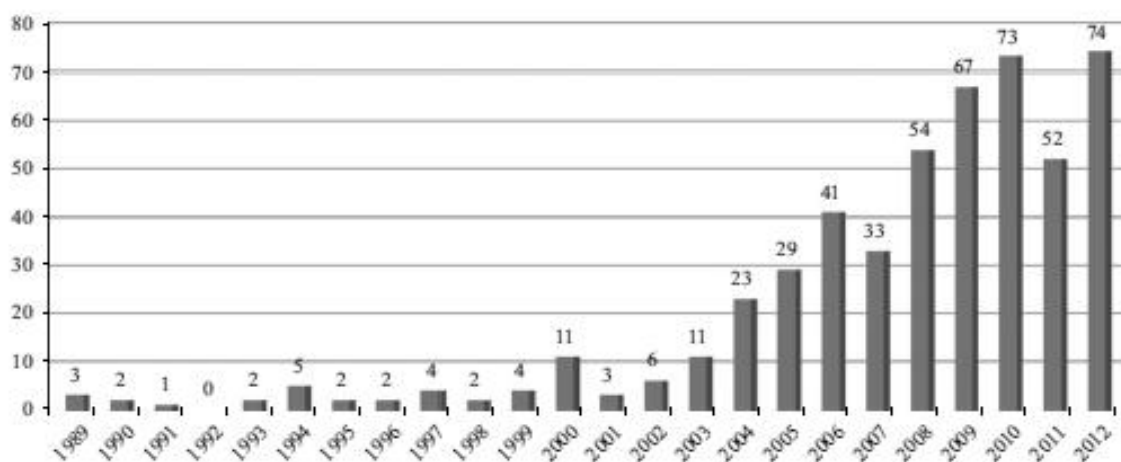
- zaštitu od smetnji i kvarova u elektrani
- zaštitu od smetnji i kvarova u mreži

- zaštitu koja osigurava primjereni paralelni pogon elektrane na mreži

Elaborat mora dokazati selektivnost predloženih podešenja, koja se kasnije ispituje u pokusnom radu.

2.4. Istraživanje problema pojave otočnog rada

Jedna od bitnih zaštitnih funkcija koju elaborat podešenja zaštite analizira, a koja je uvjetovana suglasnostima operatora mreže, jest zaštita od otočnog rada elektrane. Kako je navedeno u uvodnom poglavlju ovog rada i kako će detaljno biti objašnjeno u nastavku, određena tehnička ograničenja potpune zaštite od takvog neželjenog pogona elektrane s mrežom postoje i nisu riješena, kako kod nas, tako i u svijetu. Ta činjenica, tj. aktualnost teme i trend sve većeg istraživanja ove problematike, vidljiva je npr. iz statističkog podatka o broju radova objavljenih na temu zaštite od otočnog rada distribuiranih izvora, na IEEE konferencijama i časopisima, prikazanih na slici 2-5 [14], a aktuelna je zadnjih godina i na domaćim skupovima CIRED-a i CIGRÉ.



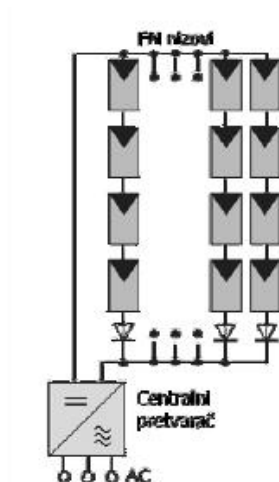
Slika 2-5 Broj radova na temu zaštite od otočnog rada u časopisima i na konferencijama IEEE u razdoblju 1989-2012.

2.5. Fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona

U skladu s Mrežnim pravilima EES-a [9], na srednjenaponsku mrežu (10, 20, 30 i 35 kV) priključuju se fotonaponske elektrane ukupne snage veće od 500 kW do uključivo 10 MW, ali se mogu priključiti i elektrane manjih snaga. Općenito, kod ovakvih elektrana, iako je

priključak na mreži srednjeg napona (10 ili 20 kV), sam izvor se spaja na niskonaponskoj strani, te se preko „blok“ transformatora spaja na mrežu srednjeg napona.

Izvor u smislu spoja na izmjeničnu mrežu je izmjenjivač, uređaj energetske elektronike koji upotrebom poluvodičkog mosta s pulsno-širinskom modulacijom pretvara električnu energiju dobivenu iz fotonaponskih ćelija u oblik koji je potreban trošilima, tj. istosmjerni napon pretvara u izmjenični napon frekvencije 50 Hz. Kod fotonaponskih sustava vršne snage veće od 10 kW, uglavnom se koriste grupni inverteri u kojima je veći broj fotonaponskih modula serijski spojen u niz, a zatim je više takvih nizova spojeno paralelno na izmjenjivač, što je prikazano na Slici 2-6 [15].



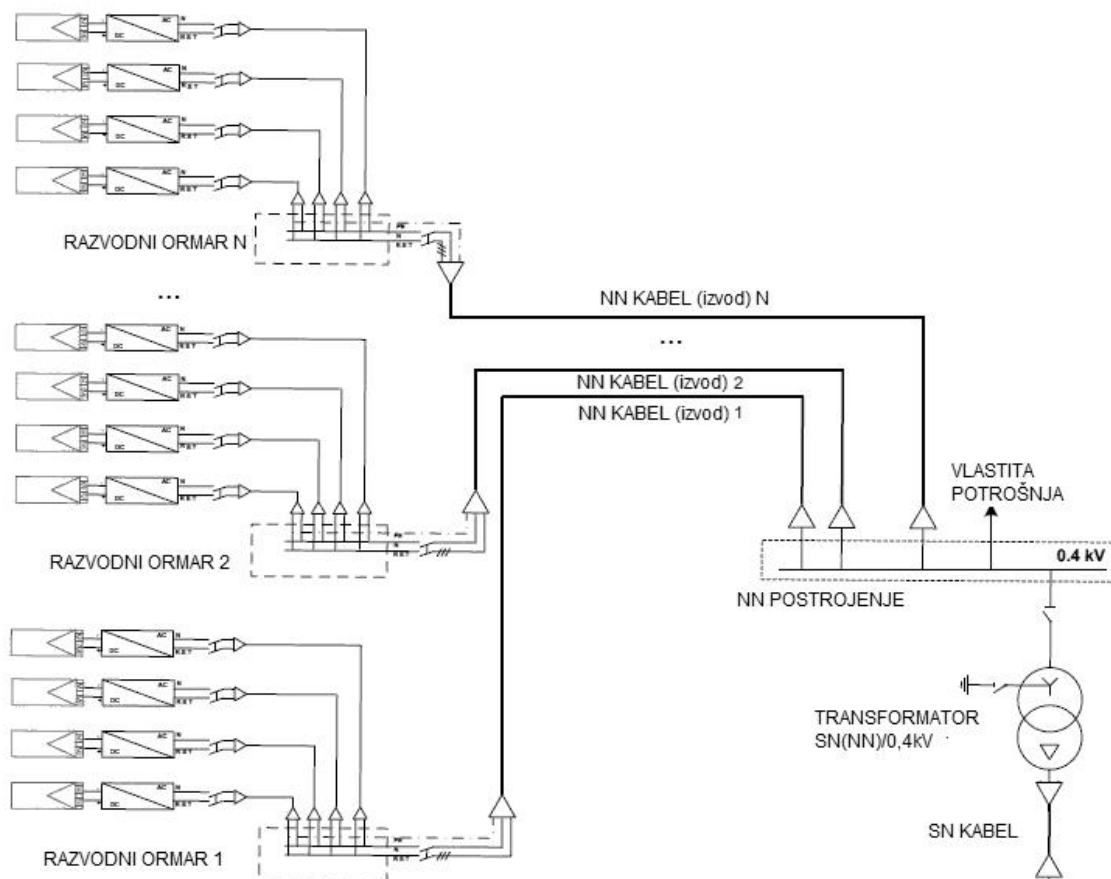
Slika 2-6 Izmjenjivač za više nizova fotonaponskih ćelija

Kod većih elektrana dva su osnovna tipa: s jednim centralnim izmjenjivačem velike snage ili s više takvih izmjenjivačkih jedinica manjih snaga ($>10\text{kW}$). U praksi se pokazalo da su češće elektrane s više manjih izmjenjivačkih jedinica koje su tipski proizvodi i ekonomski su isplativiji investitoru radi većе djelotvornosti i pouzdanosti sustava. Stoga je takav tip elektrane i odabran za istraživanja provedena u ovom radu.

Principna shema fotonaponske elektrane sastavljene od više mrežnih izmjenjivačkih jedinica i priključene na mrežu srednjeg napona prikazana je na Slici 2-7 [15].

Elektrana se obično priključuje na neki od postojećih sredjenaponskih izvoda iz transformatorske stanice VN/SN, na kojem već postoji određeni broj SN/NN transformatorskih stanica sa svojim potrošačima. Priključak se izvodi preko dvaju postrojenja: transformatorske stanice elektrane i susretnog postrojenja operatora sustava. Točka priključka elektrane na mrežu je u susretnom postrojenju, u odvodnom polju prema transformatorskoj stanici elektrane. Odvod

na koji se priključuje u pogonu je, gledajući napajanje sa strane mreže, tj. pojne transformatorske stanice, radijalno napajanje, a u pravilu ima mogućnost napajanja i s druge strane, obično s druge sekcije srednjenaponskog postrojenja iste pojne stanice ili iz neke druge VN/SN stanice. Uklopno stanje, ovisno o pogonskim prilikama, određuje operater sustava.



Slika 2-7 Na čelna shema niskonaponske mreže fotonaponske elektrane i povezivanja s priključnom TS NN/SN preko koje je elektrana priključena na mrežu srednjeg napona

2.6. Motiv istraživačkog rada u datom kontekstu i ciljevi

Kao objašnjenje motivacije koja je dovela do istraživanja ove teme u nastavku je navedeno nekoliko činjenica koje predstavljaju sažetak ovog poglavlja u kojem je dan pregled trenutnog stanja u sektoru fotonaponskih elektrana:

- Fotonaponske ćelije su tehnologija proizvodnje električne energije iz sunčeve energije, koji sektor ima stalan ubrzani rast u posljednjem desetljeću, u svijetu i u Hrvatskoj.

- Fotonaponske elektrane u Hrvatskoj koje se spajaju na mrežu srednjeg napona su elektrane snaga 500 kW-10MW. Obzirom na veličinu, takve elektrane imaju nezanemariv utjecaj na značajan dio njima lokalnog energetskeg sustava.
- 2016. godine takvih je 5 elektrana spojenih na mrežu, a najmanje još 10 će se spojiti u periodu 2017-2019.
- Obzirom na tehnologiju fotonaponskih ćelija, priključak elektrana na izmjeničnu mrežu ostvaruje se preko izmjenjivača. Veće fotonaponske elektrane sastoje se od više paralelno spojenih izmjenjivača koji se preko transformatora spajaju na mrežu srednjeg napona.
- Zaštita od neželjenog otočnog rada distribuiranih izvora je jedan od problema utjecaja malih elektrana na mrežu koji nisu u potpunosti riješeni.

Gore navedene činjenice, konstatirane u ovom uvodnom poglavlju, problemu koji se istražuje i koji teoretski postoji odavno daju aspekt aktualnosti. Nastavno na te činjenice u nastavku navodim i neke razloge koji će biti razmatrani i pojašnjeni u nastavku ovog rada, a čime će biti objašnjena razločnost razmatranja vjerojatnosti otočnog rada baš ovog specifičnog tipa distribuiranih izvora.

Naime, ključne razlike fotonaponske elektrane s više izmjenjivačkih jedinica, u odnosu na male elektrane druge tehnologije kojima je pogonski uređaj spojen na distributivnu mrežu sinkroni ili asinkroni generator, a koje presudno utječu na vjerojatnost pojave otočnog rada elektrane, što će biti pokazano, su:

- Specifični dnevni dijagram proizvodnje elektrane (ovisan o količini prikupljene sunčeve energije u pojedinom trenutku), kao karakteristika izvora, koja nije podesiva ali je statistički predvidiva,
- Veći broj pojedinačnih izvora spojen na istom mjestu zajedničkog priključka na mrežu operatera kao jedna jedinstvena elektrana,
- Nepostojanje inercije ili tromosti kod izmjenjivačkih jedinica, koje iz razloga što nemaju rotacijskih zamašnih masa nemaju niti kinetičku energiju pohranjenu u njima, za razliku od pogonskih strojeva s rotacijskim masama, za koju karakteristiku ovog tipa izvora je cilj dokazati da presudno utječe na ponašanje frekvencije sustava u otčonom radu.

Ciljevi rada formirani su kroz očekivani znanstveni doprinos predloženog istraživanja kao slijedeći:

- Izrada modela izrade pogonske karte, tj. P-Q dijagrama na mjestu priključka fotonaponske elektrane, sastavljene od više izmjenjivačkih jedinica, na mrežu srednjeg napona,
- Metoda određivanja vjerojatnosti otočnog pogona na temelju P-Q dijagrama fotonaponske elektrane, konfiguracije mreže te statističkih pogonskih parametara mreže i potrošača,
- Usporedba vjerojatnosti otočnog pogona u ovisnosti o primijenjenoj metodi zaštite od otočnog pogona.

3. NEŽELJENI OTOČNI POGON DISTRIBUIRANIH IZVORA

3.1. Otočni pogon u distribucijskoj mreži

Otočni pogon je stabilan pogon dijela mreže odvojenog od ostalog dijela elektroenergetskog sustava. Stabilan pogon mreže, a tako i dijela mreže, je nemoguće bez postojanja stabilnog izvora. U [9] otočni pogon definira se kao pogonsko stanje proizvodne jedinice u kojem ona može sigurno podnijeti djelomično opterećenje u izdvojenom dijelu elektroenergetskog sustava. Stabilni otočni pogon je dakle neovisan pogon dijela mreže odvojenog isključenjem rasklopnog uređaja od ostatka sustava, a taj dio mreže ima barem jednu pojnu točku, izvor (proizvodnu jedinicu), koja predaje energiju u mrežu i ima mogućnost regulacije frekvencije i napona [16].

Otočni pogon u distribucijskoj mreži je zabranjen u Hrvatskoj, kao i u većini drugih elektroenergetskih sustava [17]. Neki od razloga zašto je otočni pogon u distribucijskoj mreži neželjen, pa je stoga i nedopušten, su: ferorezonancija, gubitak selektivnosti, utjecaj na regulaciju napona, promjena očekivanog profila pada napona, stabilnost sustava itd.

Određeni distribuirani izvori imaju mogućnost rada u režimu regulacije frekvencije i napona, te bi takvi za vrijeme otočnog rada mogli pridonositi stabilnosti otočnog pogona, a posljedično poboljšati parametre isporuke električne energije (npr. smanjeno vrijeme prekida napajanja za dio potrošača, u slučaju kvarova ili popravaka u mreži), međutim, trenutni propisi ne dozvoljavaju elektranama otočni pogon u distribucijskoj mreži. Razlog tome je i to što drugi distribuirani izvori (npr. fotonaponske elektrane koje čine značajan dio priključenih izvora) imaju izrazito ograničene mogućnosti ili uopće nemaju mogućnosti regulacije.

3.2. Pojava neželjenog otočnog pogona

Neželjeni otočni pogon može nastupiti iz različitih razloga [18]. Npr. kao posljedica kvarnog stanja koje je nastalo nakon kvara na transformatoru ili pak dovedu prema distribuiranom izvoru. Zaštita transformatora ili voda isključit će element mreže koji je u kvaru iz pogona te ostaviti dio mreže ispod mjesta odvajanja bez mrežnog napajanja. Ako u tom dijelu mreže postoji distribuirani izvor, tada distribuirani izvor napaja tako izdvojeni dio mreže, u slučaju da njegove ugrađene zaštite nisu detektirale kvar. Također, moguć je nastanak otočnog pogona kao posljedica neke prirodne nepogode, udara groma, pada grana na zračni vod, potresa. Moguće je i da nastane i namjernim isključenjem dijela distribucijske mreže kod održavanja ili

interventnih popravaka ukoliko takvo isključenje nije prethodno dogovoreno između operatera elektrane i operatora distribucijskog sustava.

Sumirano, otočni pogon može nastupiti isključenjem dijela mreže iz slijedećih razloga:

- djelovanje zaštite u mreži,
- planirana sklopna operacija u mreži,
- pogreška (npr. neprimjereni slijed sklopnih operacija u mreži),
- havarija u mreži (npr. prirodna katastrofa, vandalizam/terorizam).

Kao posljedica opisanih mogućih načina nastanka otočnog pogona, otočni pogon može biti:

- otočni pogon dijela mreže u kvaru odvojenog od „zdrave“ mreže,
- otočni pogon „zdravog“ dijela mreže odvojenog od mreže u kvaru,
- otočni pogon „zdravog“ dijela mreže odvojenog od „zdrave“ mreže.

Bez obzira na način na koji je nastupio otočni pogon, potrebno je njegovo pravovremeno prepoznavanje kako bi se spriječile posljedice (npr. asinkroni uklop kod povratnog uključenja izdvojenog dijela mreže na ostatak mreže). Ekstremne posljedice koje su moguće su velika oštećenja pogonske opreme ili životna opasnost za pogonsko osoblje. Manje posljedice, ali vjerojatnije, su utjecaj na smanjenje kvalitete isporučenjene električne energije uz što je posredno povezana odgovornost u slučaju kvarova na opremi korisnika za vrijeme otočnog pogona) [17].

3.3.Nužnost prepoznavanja otočnog pogona

Sposobnost zaštite elektrane za djelotvorno prepoznavanje otočnog pogona je jedna od nužnih sposobnosti svakog distribuiranog izvora u distribucijskoj mreži. Ta problematika aktualna je u svijetu od trenutka pojave priključivanja distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu.

Čak i u slučaju ozbiljnog razmatranja pozitivnog doprinosa elektrane otočnom pogonu jedan od preduvjeta je da zaštita elektrane može sa sigurnošću izvršiti slijedeće:

- a) prepoznati da je u nekom trenutku u otočnom pogonu,
- b) zaključiti treba li elektrana i dalje napajati mrežu u otočnom pogonu (pridonositi stabilnosti otočnog pogona, u kom slučaju treba raditi u režimu regulacije frekvencije i napona) ili se treba odvojiti od mreže.

Neprepoznavanje (nedetekcija) pojave otočnog pogona, a posljedično nepoželjno napajanje izdvojenog dijela mreže odvojene od ostalog dijela mreže smatra se opasnim stanjem

i neprimjerenim pogonom elektrane. Iz tog razloga svaka elektrana mora imati djelotvorno prepoznavanje (detekciju) otočnog pogona.

Djelotvorna detekcija otočnog pogona preduvjet je i da se eventualno u budućnosti, kada se to regulira propisima, elektrani dozvoli i otočni pogon sa zdravim dijelom mreže u regulacijskom načinu rada elektrane.

3.4. Moguće posljedice kao razlog neželjenosti otočnog pogona

Posljedice nekontroliranog otočnog pogona dijela distribucijske mreže može se razmatrati kroz nekoliko problematičnih aspekata.

3.4.1. „Kontrolirani“ i „nekontrolirani“ otočni pogon

Razlikuje se „kontrolirani otočni pogon“ od „nekontroliranog otočnog pogona“ [19]. Kontrolirani otočni pogon je namjeren stabilan pogon zdravog dijela mreže odvojenog od ostatka sustava. Otočni pogon se smatra kontroliranim kada je nastao s namjerom, tj. kada je u otočnom sustavu barem jedna elektrana opremljena primjerenom opremom za upravljanje, regulaciju i zaštitu (elektrana s regulacijom) čime se jamči pouzdan i siguran pogon izdvojenog dijela mreže (otoka) kojeg napaja. Ta elektrana je u tom slučaju detektirala otočni pogon i po nalogu operatora prešla u režim regulacije frekvencije i napona te održava okolinosti u otokčnom dijelu sustava unutar propisanih granica, a korisnici neometano koriste mrežu. Jedini primjereni otočni pogon je kontrolirani otočni pogon. Takav kontrolirani otočni pogon je dobrodošla metoda povećanja raspoloživosti napajanja (opskrbe).

Nasuprot tome, nekontrolirani otočni pogon uzrok je brojnih ozbiljnih problema i kao takav nije primjeren pogon i treba ga se izbjegavati na sve raspoložive načine [19]. Nekontrolirani otočni pogon je nenamjerni pogon jednog ili više generatora koji napajaju dio potrošnje u mreži odvojenoj od ostataka sustava. Čak i u slučaju da otočni sustav napaja elektrana opremljena regulacijom (nužnom opremom za stabilni otočni pogon), otočni pogon smatra se nekontroliranim uvijek kada je nastupio nenamjerno [19]. Nekontrolirani otočni pogon je neprimjereni pogon i smatra se nedopuštenim stanjem, te je propisima zabranjen.

Za elektrane koje se priključuju na prijenosnu mrežu operator prijenosnog sustava postavlja uvjete koji, između ostalog, obuhvaćaju [9] obvezne regulacijske sposobnosti elektrane (održavanje frekvencije, napona, kompenzacija jalove snage itd.). Takva situacija nije primjenjiva i na distribucijsku mrežu. U distribucijskoj mreži je iznimno velik raspon

priključnih snaga elektrana (od mikroelektrana priključne snage ispod 1 kW do elektrana priključne snage 10 MW). Nije realno očekivati od mikroelektrana napredne regulacijske mogućnosti, ne samo zato što to dramatično poskupljuje ova najmanja postrojenja, nego i zato što bi potencijalni regulacijski utjecaj mikroelektrana imao vrlo dvojbenu doseg. Stoga se niti u dalekoj budućnosti ne očekuje da bi otočni pogon u npr. niskonaponskoj mreži (odvojenoj od ostatka sustava) mogao biti smatran primjerenim [17].

Generalno, elektrana (distribuirani izvor) bi mogla steći status elektrane s regulacijom koja ima pravo (i obvezu) raditi u otočnom pogonu u dva slučaja [17]:

- sposobnost regulacije frekvencije i napona elektrani je preduvjet za priključenje (obveza elektrane propisana odgovarajućim propisima),
- elektrana ima, iako joj to uvjetima priključenja nije propisano, nužne tehničke mogućnosti, te stoga i sposobnosti temeljem kojih ima sklopljen ugovor s mjerodavnim operatorom sustava za pomoćne usluge sustavu, ako je jedna od ugovorenih usluga i rad u otočnom pogonu.

Iako nova Mrežna pravila donesena 2018. godine donose određene promjene u dopuštenim režimima rada proizvodnih jedinica, trenutno nijedna od ovih opcija nije moguća za elektrane koje se priključuju na distribucijsku mrežu u Hrvatskoj. Iz tog proizlazi da trenutno nema (i ne će uskoro biti) elektrana u distribucijskoj mreži kojima je uvjetovan ili dopušten otočni pogon. Stoga je svaki otočni pogon distribucijske mreže odvojene od prijenosne mreže neprimjeren otočni pogon [17].

Također, svaki otočni pogon dijela mreže u kvaru odvojenog od sustava je neprimjeren. To su slučajevi kada je na mreži u kvaru ostala priključena elektrana koja unatoč kvaru predaje energiju u mrežu. Također, ako su u otočnom dijelu mreže karakteristike u mreži (frekvencija, napon) izvan propisanih vrijednosti, takav otočni pogon je također neprimjeren. Moguće je također da dođe i do takve situacije da napon na mjestu priključka elektrane na mrežu bude unutar propisanih granica (elektrana detektira normalne okolnosti u mreži), dok je napon u dijelovima otočnog sustava udaljenim od elektrane znatno izvan propisanih granica. Rad svake elektrane u neprimjerenom otočnom pogonu stoga je izričito zabranjen.

Elektrana je u neprimjernom paralelnom pogonu s izdvojenim dijelom mreže i ako je ostala u otočnom pogonu zbog nedjelotvorne ili neprimjerene zaštite elektrane (uključivo i zaštitu od otočnog pogona). Operator distributivne mreže ovo stanje smatra kvarom elektrane (kvar zaštite u elektrani) te postupi sukladno toj činjenici: elektrana se isključuje s mreže sve dok ne osmisli nužne korektivne mjere, njih primijeni i funkcionalno ispita uspješnost provedenih korektivnih mjera te u pokusnom radu s mrežom dokaže djelotvornost provedenih korektivnih mjera, tj. djelotvornost zaštite od otočnog pogona [17].

3.4.2. Asinkroni uklop

Ponovni uklop otočnog dijela sustava (mreže u otočnom pogonu) na ostatak sustava uklapanjem sklopnog uređaja, bez provjere sinkronizma, je nedopuštena sklopna operacija, jer postoji veliki rizik od asinkronog uklopa. Asinkroni uklop može prouzročiti velike mehaničke momente i struje koje mogu oštetiti generator ili turbinu [20]. Prijelazne pojave koje pritom nastaju mogu biti štetne i za drugu opremu u mreži ili opremu ili potrošače kod korisnika mreže [21]. Ako asinkroni uklop nastupi na maksimumu periode naponskog vala, nastat će kapacitivni sklopni prenapon značajnog iznosa (u blago induktivno opterećenom sustavu prenapon može doseći iznos čak trostrukog nazivnog napona [22]). U brojne rizike koji iz tog proizlaze ubraja se i degradacija električnih komponenti, kao posljedica skokovitog pomaka napona i frekvencije.

Zbog tih razloga iznimno je važno detektirati otočni pogon brzo i precizno [18]. Većim ugrađivanjem komponenata naprednih mreža (*smart grids*), tj. automatike upravljanja u mreži, broj sklopnih operacija u mreži značajno raste. To je iz razloga pojave novog kriterija za promjenu uklopnog stanja, od sadašnjeg – osiguravanja samo raspoloživosti mreže, do budućeg – optimiranja pogona i okolnosti u mreži (napona, gubitaka i sl.) [17].

S porastom broja sklopnih operacija, kao i broja mjesta na kojima se prespaja mreža, raste i vjerojatnost za potencijalni asinkroni uklop otoka na ostatak sustava.

Ugrađivanje sinkronizatora, tj. provjera sinkronizma prije uklopa, realno je moguća na nekim značajnim točkama distributivnog sustava, ali nije realna (nije ekonomski opravdana) na svakom od sklopnih uređaja na kojima potencijalno može doći do asinkronog uklapanja dvaju nesinkroniziranih dijelova mreže.

3.4.3. Problematika automatskog ponovnog uklopa i zahtjevi

Automatski ponovni uklop (APU) u distribucijskoj mreži s distribuiranim izvorima također može za posljedicu imati asinkroni uklop. Kratka beznaponska pauza automatskog ponovnog uklopa postavlja vrlo strog zahtjev za brzinu odziva zaštite od otočnog pogona elektrane u kom vremenu se treba ispravno detektirati otočni pogon i elektrana odvojiti od mreže.

U slučajevima kad se u dijelu mreže na koji se priključuje elektrana primjenjuje automatski ponovni uklop, da bi potencijalno prolazni kvar nestao prije ponovnog uklapanja,

nužno je omogućiti dostatno vrijeme za gašenje luka na mjestu kvara. Hrvatski operator distribucijskog sustava (HEP-ODS) zahtijeva vrijeme od minimalno 100 ms za gašenje luka (iako iskustva pokazuju da je moguće da 100 ms može biti nedostatno). Uz kratku beznaponsku pauzu u trajanju 400 ms, to ostavlja zaštitu elektrane samo 300 ms za pouzdanu detekciju otočnog pogona i odvajanje elektrane od mreže [17].

Obzirom na ponašanje mrežnih parametara u slučaju kvara, u najvećem broju slučajeva elektranu će odmah po nastanku kvara djelotvorno odvojiti od mreže njena zaštita od kvara. Međutim, u slučaju zemljospoja u mreži, a ako je zaštita generatora na pragu generatora (na niskonaponskoj strani blok transformatora) u bloku spoju s transformatorom, zaštita generatora neće prepoznati zemljospoj, koji se neće „vidjeti“ na sekundaru transformatora. U tom slučaju moguće je da zaštita elektrane tijekom kratke beznaponske pauze detektira odstupanje napona (čemu pomaže isključenje u mreži zbog prorade zaštite od zemljospoja) ili detektira otočni pogon. Iskustvo pokazuje da elektranama, posebice onima većće tromosti pogonskog stroja (turbina-generator većće snage, od 5 do 10 MW), traženo može biti ozbiljan izazov. Međutim, prevencija asinkronog uklopa je imperativ i elektrana priključena na radijalnu mrežu (načelnim načinom pogona svih distribucijskih mreža) prema zahtjevima operatora sustava mora moći ispuniti ovaj zahtjev. Kad bi elektrana bila priključena na mrežu koja je u pogonu u petlji, element u kvaru bi bio isključen uz obostrani APU, te bi elektrana zbog takvog isključenja ostala radijalno napojena i ne bi bila u otočnom pogonu. U tom slučaju (nema otočnog pogona) elektrana mora ostati na mreži (proći kroz kvar) bez obzira radi li se o jednopolnom ili tropsopolnom automatskom ponovnom uklopu. Ovakva situacija u distribucijskoj mreži načelno nije moguća.

3.4.4. Radovi u mreži i neočekivani otočni pogon

Uobičajeni postupak isključenja mjesta rada u distribucijskoj mreži podrazumijeva odvajanje mjesta rada sa strane napajanja (napajanje iz mreže, pojne transformatorske stanice). Ako u mreži ima distribuiranih izvora, potrebno je obostrano odvajanje, tj. isključenje mjesta rada i od napajanja sa strane distribuiranog izvora. Ovakvim isključenjem, ako je na radijalnom kraku mreže između mjesta rada i kraja radijalnog kraka priključena elektrana, može nastati otočni pogon. Ukoliko elektrana nema ispravnu zaštitu od otočnog pogona, pri ponovnom uključanju mjesta rada postoji mogućnost da dođe do asinkronog uklopa, a obzirom da su u ovom slučaju prisutni radnici koji radove izvode, potencijalno je moguće i stradavanje radnika. Uvođenje principa rada a da radnik, nakon što provjeri postoji li obostrano napon na mjestu

rada, u slučaju da postoji napon od strane preostalog radijalnog kraka, odlazi i isključuje na mjestu priključenja s mrežom svaku elektranu koja je potencijalno ostala u otočnom pogonu je u praksi neizvedivo, jer na radijalnom kraku teoretski mogu biti priključeni deseci elektrana, pogotovo ako se radi o mreži na niskom naponu. Da bi se nakon radova u mreži moglo ponovno uspostaviti normalno pogonsko stanje, na jednoj strani na mjestu rada ne smije biti povratnog napona, jer se u protivnom riskira asinkroni uklop. Kako je prije navedeno, nije očekivano da ni u napretkom stupnja automatizacije distribucijskim mrežama neće na svakom potencijalnom mjestu odvajanja mjesta rada u mreži biti postavljen sklopni uređaj s kontrolom sinkronizma, što bi bio preduvjet uklopa u slučaju mogućeg povratnog napona s obje strane sklopnog uređaja, a zbog kako tehničkih tako i ekonomskih razloga.

3.4.5. Sklopne operacije u distributivnoj mreži

Provođenje sklopnih operacija u distribucijskoj mreži (prespajanje s jednog na drugi strujni krug, ili na napajanje s drugog transformatora ili iz druge pojne transformatorske stanice i sl.) u radijalnoj mreži izvodi se uz uvjet da s jedne strane (polu) sklopnog uređaja nema napona, kako ne bi došlo do rizika od asinkronog uklopa. Iz tog razloga dio voda koji se uklapa (prebacuje na drugi krug) se prvo isklapa, tj. dovodi u beznaponsko stanje. Pri takvim sklopnim operacijama cilj je operatera imati što kraće vrijeme beznaponske pauze u kojem potrošači na vodu osjete nestanak napona. Ako su u prespajanoj radijalnoj mreži priključene elektrane mora se osigurati i da se sve elektrane u prespajanoj mreži isključe s mreže čim nastupi otočni pogon nakon isklopa, a prije uklopa tog dijela voda u novo uklopno stanje. Ako u mreži postoje elektrane sa neadekvatnom (sporom) zaštitom od otočnog pogona, uklop se mora odgoditi određeno vrijeme, kako bi se i elektrane s sporom ili nedovoljno djelotvornom zaštitom od otočnog pogona odvojile prije uklopa. Trajanje prekida ciljano od operatera, u kojem bi dispečer trebao izvršiti prespajanje, je u vremenu kraće od 1,5 sekunde. U tom slučaju se takvo prespajanje smatra prolaznim zastojem, a ne prekidom napajanja [17]. Ako je trajanje prekida do ponovnog uklopa dijela mreže duže od toga, to izravno utječe na povećanje neraspodjivosti mreže (napajanja).

Ovaj problem dobiva na značajnu uvođenjem koncepcije naprednih mreža i povećavanjem automatizacije promjena uklopnih stanja u naprednim mrežama. Napredne mreže podrazumijevaju u čestale promjene uklopnih stanja. U slučaju sporog djelovanja zaštite od otočnog pogona, promjene uklopnog stanja morale bi biti spore, te bi se u svakom koraku

mijenjanja uklopnih stanja (u slučaju složenih preklapanja) trebalo čekati određeno vrijeme da se sve elektrane u preklapanom dijelu mreže sigurno odvoje prije novog uklapanja.

Mogućnost da bi elektrana mogla ostati u otočnom pogonu s dijelom mreže u periodu pogonskih promjena uklopnog stanja mreže povlači za sobom zahtjev da se na svaku sklopnu napravu u mreži, na kojoj bi se moglo vršiti uklapanje u dubini mreže, morao ugraditi uređaj za provjeru sinronizma ili barem urežaj koji bi blokirao uklop u slučaju postojanja obostranog napona na sklopnom uređaju, što je u distribucijskoj mreži realno nemoguće provesti, čak i kad bi takav otočni pogon bio dozvoljen, a nije, kako je već prije navedeno.

Moguć je i slučaj neispravnog djelovanja zaštita od otočnog pogona, tj. neprepoznavanje otočnog pogona od strane zaštite elektrane (npr. na pragu elektrane napon ostaje unutar propisanih granica, ali je van dopuštenih granica u nekoj udaljenoj točki mreže). Ako se uklop otoka na mrežu provodi na nekoj udaljenoj točki mreže, čak i kada ne bi došlo do asinkronog uklopa, zbog razlike iznosa napona (koje mogu biti i do 20%, a što je još uvijek unutar propisanog dopuštenog raspona napona) prilikom uklapanja mogu poteći velike struje izjednačenja, što može imati efekt vrlo sličan asinkronom uklopu, a posljedično prouzročiti kvar na sklopnom uređaju, pogotovo ako se uklop provodi sklopkom, a ne prekidačem.

3.4.6. Upravljanje mrežom u otočnom pogonu

Trenutno se upravljanje radijalnom distribucijskom mrežom temelji na upravljanju pojnim transformatorskim stanicama temeljem čega se kontroliraju tokovi snaga u mreži. Upravljanje mrežom u mogućem otočnom pogonu nije kod operatora distribucijskog sustava niti predviđeno niti razrađeno, niti su susretna postrojenja u mreži na sučelju s elektranom opremljena na razini nužnoj za upravljanje pojnom točkom [17]. U slučaju razmatranja mogućnosti priključenja elektrane s pravom ili obvezom rada u otočnom pogonu, razina upravljanja na mjestu priključenja elektrane na mrežu morala bi biti izvedena na razini upravljanja pojnom transformatorskom stanicom (mjerenja, uvedenost u centar daljinskog upravljanja), uz dodatne definirane protokole razmjene informacija s upravljačkim sustavom elektrane, a mjesto odvajanja mogućeg otočnog sustava moralo bi biti jednoznačno određeno i unaprijed poznato. Pogonske upute za upravljanje mrežom u otočnom radu i za izravnu suradnju s operaterom elektrane trebaju obuhvaćati postupanja u svim okolnostima, uključivo i kvarove u dijelu mreže u otočnom radu (uz uvažavanje ispada ili ostajanja ostalih elektrana u otočnom pogonu).

Trenutno u distribucijskoj mreži najveći broj čvorova mreže nije uveden u sustav daljinskog vođenja. Ne postoji niti je razrađen mehanizam kontrole održavanja napona u mogućem otočnom dijelu mreže (npr. na krajnjim točkama u mreži) unutar dopuštenih granica. Takav kontrolni mehanizam trebao bi imati i povratnu regulaciju s automatiziranim prebacivanjem podešenja reguliranih veličina u elektrani na regulaciju u otočnom pogonu.

3.4.7. Zaštita u distribucijskoj mreži i otočni pogon

Zaštita ugrađena u postojeće distribucijskim mrežama podešena je s ciljem postizanja selektivnosti u normalnom uklopnom stanju mreže u radijalnom pogonu. Po sadašnjim propisima, zaštita se, po priključenju distribuiranih izvora, ne podešava niti se ispituje primjerenost postojećih podešenja za otočni pogon distribuiranog izvora, zbog toga jer je otočni pogon zabranjen postojećim mrežnim pravilima [9].

Postojeće razdjelne (potrošačke) transformatorske stanice TS SN/NN u distribucijskoj mreži, kao i susretna postrojenja za priključenje elektrane na mrežu na srednjem naponu (10 i 20 kV), nisu opremljena za mogućnost rada elektrane u otočnom pogonu, jer su vodna polja u razdjelnim TS u mreži u pravilu opremljena samo rastavnim sklopkama (koje za razliku od polja opremljenih prekidačima nemaju niti zaštitu), a u pravilu nemaju niti mjerenja struje. Stoga, postojeća ugrađena primarna oprema u SN postrojenjima u dubini distribucijske mreže nije primjerena za otočni pogon, a sekundarne opreme (pa tako niti zaštitnih uređaja) po dubini SN distribucijske mreže (vodna polja) u pravilu nema, jer nije niti potrebna za radijalni pogon mreže bez mogućnosti otočnog pogona.

Stoga je koncept koji se primjenjuje kod priključenja distribuiranih izvora taj da se zaštita elektrane u radijalnoj mreži podešava po načelu da se elektrana prva isključuje s mreže u kvaru, čak i prije nego bi se mjesto kvara selektivno obostrano odvojilo (zato što ne postoji zaštita u vodnim poljima od elektrane prema mreži). U slučaju elektrane kojoj bi otočni pogon bio dopušten ova logika ne bi bila primjenjiva.

Kad bi bilo dopušteno priključenje na mrežu elektrane s pravom i obvezom otočnog pogona, njeno susretno postrojenje moralo bi imati ugrađenu primarnu i sekundarnu opremu složenosti ekvivalentne pojnim transformatorskim stanicama VN(SN)/SN. U tom bi slučaju trebalo imati definiran mehanizam prepodešenja zaštita elektrane/dijela mreže za rad u otočnom pogonu, za moguća mjesta odvajanja otočnog dijela mreže od ostatka mreže. Takva podešenja zaštite trebala bi biti selektivna i pouzdana za takav način pogona mreže.

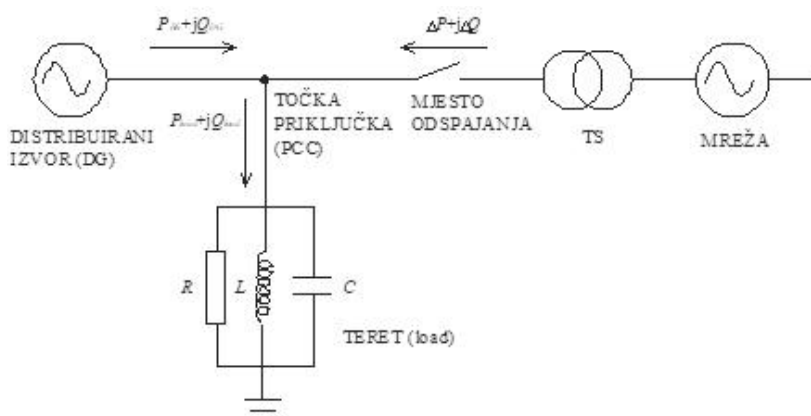
3.5. Problem detekcije otočnog pogona

Trenutno nakon isklapanja rastavnog uređaja i odvajanja od mreže jedan ili više distribuiranih izvora u pogonu su s teretom i odvojeni od ostatka sustava. Takav otok je neregulirani energetska sustav s nepredvidljivim ponašanjem, čemu je razlog razlika snage proizvodnje i potrošnje i nepostojanje regulacije napona i frekvencije.

Pojava otočnog pogona na odvodima mreže s nazivnim teretom mnogo većim od maksimalne moguće snage proizvodnje na istima je praktički nemoguća. Povećanje udjela snage distribuiranih izvora na odvodima mreže dovodi do povećanja vjerojatnosti stabilnog otočnog pogona. Vjerojatnost ovisi o neuravnoteženosti proizvodnje i tereta, odzivu mreže, mogućnosti regulacije i odzivu primijenjenih metoda zaštite. Najvažniji je faktor razlika između snage proizvodnje i tereta, gdje niti jedna od veličina nije konstantna. I teret i proizvodnja su nezavisne varijable, tj. vjerojatnosne funkcije izvedene iz dugoročnih pogonskih mjerenja.

Ako su snaga proizvodnje i tereta na odspojenom odvodu približno jednake, neće biti dovoljne promjene u amplitudi ili frekvenciji napona na priključku distribuiranog izvora, da bi proradila otočni pogon bio prepoznat kao takav od strane neke od funkcija zaštitnih uređaja elektrane.

Tokovi snaga između distribuiranog izvora, tereta i mreže prikazani su na Slici 3-1. Ako je prekidač uključen i mreža spojena, radna (P_{DG}) i jalova komponenta snage (jQ_{DG}) izvora teče od izvora prema mjestu priključka, a radna snaga (P_{load}) i jalova snaga (Q_{load}) teče od mjesta priključka prema teretu.



Slika 3-1 Nadomjesna shema spoja distribuiranog izvora na mrežu s prikazom tokova snaga za analizu uvjeta otočnog pogona [23]

Radna i jalova snaga (razlika snaga) koje teku od strane mreže su:

$$\Delta P = P_{load} - P_{DG} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{DG} \quad (2)$$

Ponašanje sustava u trenutku odspajanja od mreže ovisi o neuravnoteženosti radne i jalove snage ΔP i ΔQ u trenutku prije isklapanja prekidača i formiranja otoka. Značajni ΔP ili ΔQ će biti prepoznat od strane zaštite. Ako su vrijednosti blizu nule znači da su proizvodnja i teret približno jednaki pa gubitak mreže ne će biti prepoznat standardnim zaštitnim funkcijama.

3.6. Ponašanje veličina sustava u otočnom pogonu

3.6.1. Interpretiranje stanja sustava iz lokalnog mjerenja veličina sustava

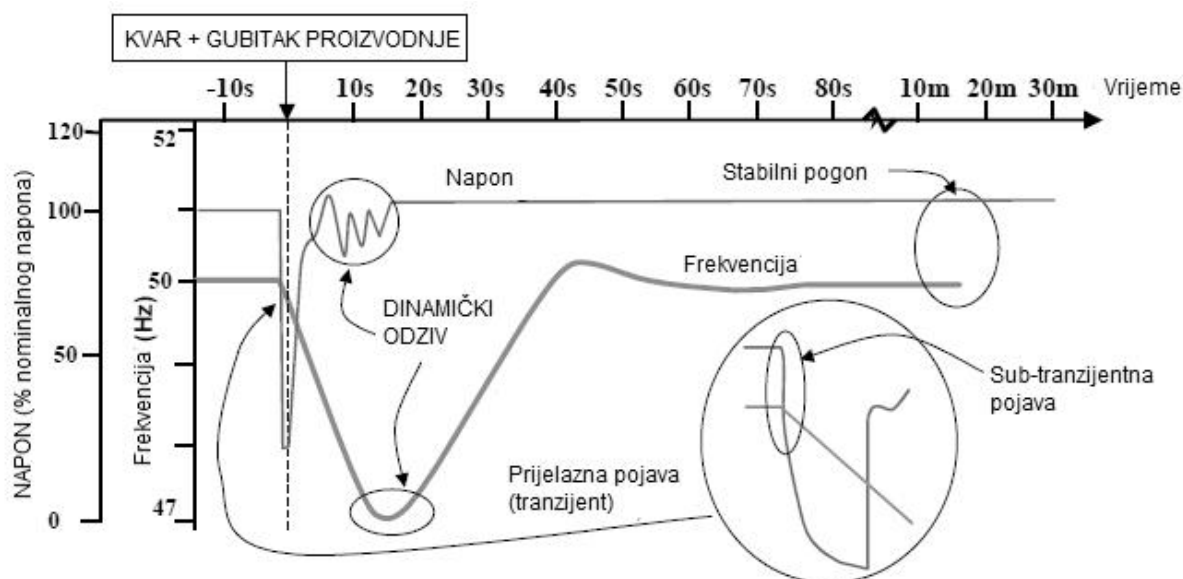
Za prepoznavanje nedozvoljenog stanja sustava i odluku o isključenju proizvodnje moguće je koristiti mjerene veličine sustava koje se mogu mjeriti na samom mjestu proizvodnje, tj. priključka elektrane na mrežu. Moguće je mjeriti ponašanje npr. frekvencije na mjestu priključenja elektrane, napona, struje ili impedancije. Do koje mjere ti parametri mjereni na jedinstvenoj točki na mjestu proizvodnje mogu biti korišteni za tumačenje stanja šireg energetskog sustava pojašnjeno je u narednom poglavlju, po pojedinom mjerenom parametru, povezivanjem svakog parametra s odgovarajućim karakteristikama sustava da bi se ocijenila veličina i promjena pri pojavi otočnog rada i procijenila mogućnost korištenja u svrhu potvrde neželjenog otočnog rada.

3.6.2. Ponašanje frekvencije

Frekvencija elektroenergetskog sustava približno je jednaka u svakoj točki tog sustava (sustav je sinkron). Frekvencija je stoga koristan parametar jer lokalno mjerenje daje informaciju o sustavu u cjelini.

Podudaranje radnih snaga podržava brzinu rotiranja masa i odgovarajuću električnu frekvenciju. Frekvencija sustava je stoga poremećena svakom razlikom snaga koja može biti povezana s trenutkom pojave otočnog rada. Za interpretaciju mjerenja frekvencije bitni su faktori koji utječu na veličinu i brzinu promjene frekvencije, čiji utjecaj u vremenskoj domeni je

opisan u nastavku. Ta opisana promjena frekvencije sustava u poremećaju (otočnom pogonu) prikazana je na Slici 3-2 zajedno sa odgovarajućom promjenom napona.



Slika 3-2 Vremenska promjena napona i frekvencije u sustavu u otočnom radu [24]

3.6.2.1. Stabilni pogon

U stabilnom pogonu ukupna izlazna radna snaga proizvodne jedinice spojene na sustav jednaka je sumi ukupne snage potrošača i gubitaka sustava. U sustavu u pogonu ovo podudaranje održava se reguliranjem generatora na način da budu u pogonu s izlaznom snagom ispod njihove nazivne snage, na nivou kontroliranom od strane turbinskog regulatora.

Kontrole frekvencije u velikim energetske sustavima vrši se tipično upravljanjem od strane operatora sustava s određenim pojedinim generatorima da bi se osigurala dogovorena razina karakteristika rezerve snage i rezerva u kontroli. U pravilu samo veliki i fleksibilni generatori se koriste za regulaciju frekvencije.

Distribuirani proizvodni izvori koji su predmet proučavanja ovog rada će u pravilu biti u pogonu bez rezerve ili frekvencijskog odziva. Uobičajeno je da mali distribuirani izvori (a posebno vjetroturbine ili fotonaponske elektrane) nemaju uopće mogućnost regulacije brzine vrtnje. Takvi generatori stoga se neće prilagođavati promjenama u frekvenciji sistema i neće doprinositi balansiranju radne i jalove snage.

Sposobnost sustava da održi kontrolu frekvencije stabilnog stanja ovisna je o osiguranoj adekvatnoj veličini rezerve snage koja može nadomjestiti povećanje tereta ili neočekivane redukcije proizvodnje u sustavu. Na razini dijela distribucijske mreže koja je spojena kroz pojnu

transformatorsku stanicu na „čvrstu“ mrežu, ta zalihost je osigurana dok postoji veza s mrežom, koja održava frekvenciju.

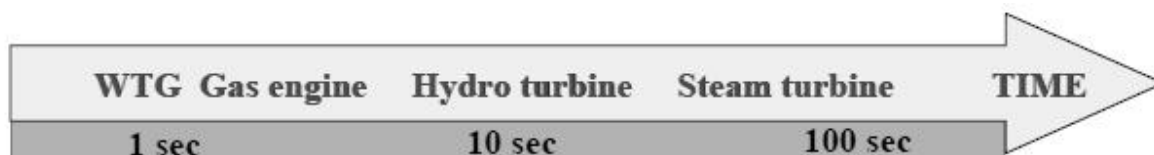
3.6.2.2. Dinamički odaziv

Sposobnost održanja frekvencije u mijenjajućem (nestabilnom) sustavu nije samo ovisna o veličini rezervne snage nego i o brzini odziva. Napredni turbinski regulatori su tipično elektroničke naprave visoke brzine ali one moraju aktivirati mehaničke ventile ili lopatice da bi kontrolirali dovod snage na rotor. Brzina odziva te mehaničke naprave limitira brzinu regulacije. Frekvencija je stoga promjenjiva u većem rasponu u kraćim (dinamičkim) vremenskim periodima.

Npr. elektrane s parnim turbinama, regulirane kretanjem teških parnih ventila, tipično zahtijevaju više vremena za odaziv (red veličine 100 s), manje vremena potrebno je vodenim turbinama (red veličine 10 s) i plinskim turbinama (red veličine 5 s), dok moderne vjetroturbine s kontrolom nagiba lopatica rotora, mogu odraditi cjelokupnu regulaciju za manje od jedne sekunde [24].

Obzirom da promjena u energetsom sustavu može biti trenutna (isključenje tereta, isključenje generatora itd) i da regulacijski sistem ne može odgovoriti trenutno da pokrije promjenu, inicijalna brzina promjene frekvencije je uglavnom definirana pohranjenom energijom u rotirajućim masama sustava (u inerciji sustava). Rotirajuća inercija je raspodijeljena po svim rotirajućim strojevima (generatori i motori) spojenim na sustav. U nekim sustavima, skoro pa trenutni odziv regulatora može biti omogućen s brzoreagirajućim pretvaračima energetske elektronike (npr. HVDC interkonektori). Takav pseudo-inercijski odziv može biti značajan u nekim sustavima. Ovdje nije razmatran jer se na razini distributivne mreže se ne očekuje primjena takvih naprednih sustava.

Konstante inercije generatora variraju u velikom rasponu, ovisno o tipu i veličini generatora, kako je prikazano uopćeno na Slici 3-3.



Slika 3-3 Brzina odziva regulatora prema tipovima pogonskih strojeva [24]

Izuzetak od ovog obrasca doprinosa inerciji je generator vjetroturbine promjenjive brzine koji odvaja električki i mehanički sistem na način kratkotrajne aerodinamičke fluktuacije snage mogu biti apsorbirane inercijom pogonskog stroja bez da se prenose na mrežu i obratno, fluktuacija frekvencije mreže ne utječe na brzinu rotora i stoga nema razmjene kratkotrajne dinamičke snage između električkog i mehaničkog sistema. Stoga je doprinos takvih generatora inercije električnog sustava jednak nuli.

Drugi važan izuzetak su općenito svi izvori izmjenjivačkog tipa. Standardno kontrolirani izmjenjivači nemaju ugrađene inercije koja bi mogla doprinjeti dinamičkoj razmjeni snage za vrijeme kratkotrajnih fluktuacija frekvencije u mreži. Stoga ovaj tip izvora ne doprinosi inerciji energetskog sustava. Važno je naglasiti da je navedeno bitno za proučavanje provedeno u ovom radu pa je stoga ovaj pasus posebno naglašen.

Konstante inercije motora (rotirajućih strojeva potrošača u sustavu) variraju ovisno o njihovim snagama i brzinama. Tipična konstanta inercije je između otprilike 0,1 MW/MVA za manje kompresore/motore (kućanski aparati, frižider) do otprilike 0,5 MW/MVA za industrijske pumpe/motore (nazivne snage otprilike 150 kW) [24].

Obzirom da je inercija trošila općenito red veličine manja od inercije generatora dozvoljeno ju je zanemariti u većini analiza, ali iznimka koju je bitno napomenuti je kad je sustav u otočnom pogonu pretežno s izvorima sa nultom inercijom (npr. izvori izmjenjivačkog tipa).

3.6.2.3. Tranzijentni i sub-tranzijentni odziv

Za sustave s rotirajućim strojevima, radi unutarnjeg otpora rotirajućih masa promjeni frekvencije sistema, nema posebne potrebe razmatrati tranzijentni i sub-tranzijentni frekvencijski odziv. Prividne promjene u frekvenciji u ovim kratkim vremenskim domenama rezultat su puno više fazne promjene napona nego promjena u fundamentalnoj frekvenciji i stoga su obrađene u poglavlju o tranzijentnim naponima.

Svakako, u energetskim sustavim napajanim iz izvora izmjenjivačkog tipa, nepodudaranja snaga trenutno vode u tranzijentne fluktuacije frekvencije sustava.

3.6.3. Interpretiranje napona

Za razliku od frekvencije, napon je vrlo promjenjiva veličina diljem električnog sustava. Napon se mijenja zbog prijenosa snage od izvora do trošila kroz vodiče koji imaju svojstvene radne i induktivne otpornosti. Prema Ohmovom zakonu, potrebna je razlika u naponu da bi struja tekla kroz otpor, a prema Faradayevom, da bi izmjenična struja tekla kroz induktivitet. Produkt struje i razlike napona na radnom otporu je gubitak radne snage u električnom sustavu. Produkt struje i razlike napona na induktivnom otporu je reaktivna snaga apsorbirana u električkom sustavu.

Stabilni energetski sustav mora omogućiti dovoljno reaktivne snage da bi dozvolio da zahtijevana radna snaga bude isporučena trošilima unutar granica tolerancije frekvencije. Reaktivna snaga dobija se iz dvije vrlo različite vrste kapacitivnih uređaja: kondenzatora koji su pasivni dielektrični uređaji, ponekad upravljani uklapanjem, koji predaju reaktivnu snagu u skladu s naponom i frekvencijom na njihovom mjestu priključka, i iz naponskih izvora koji predaju reaktivnu snagu u skladu s veličinom napona izvora i njihovom sučelju s mrežom. Dva su osnovna tipa naponskih izvora koja su prisutna u izmjeničnim sustavima, uzbudni namoti sinkronih generatora i energetski pretvarač (izmjenjivač) povezan na istosmjernoj strani s nekim istosmjernim izvorom ili kondenzatorom (tzv. statička uzbuda) [24].

3.6.3.1. Stabilni pogon

Radna i jalova snaga teče za vrijeme stabilnog pogona u distributivnom sustavu, a njen utjecaj pritom na profil napona kroz mrežu je prikazan na primjeru pojednostavljene radijalne mreže na Slici 3-4.

Sa Slike 3-4 vidi se da je naponski profil u stabilnom stanju određen sa:

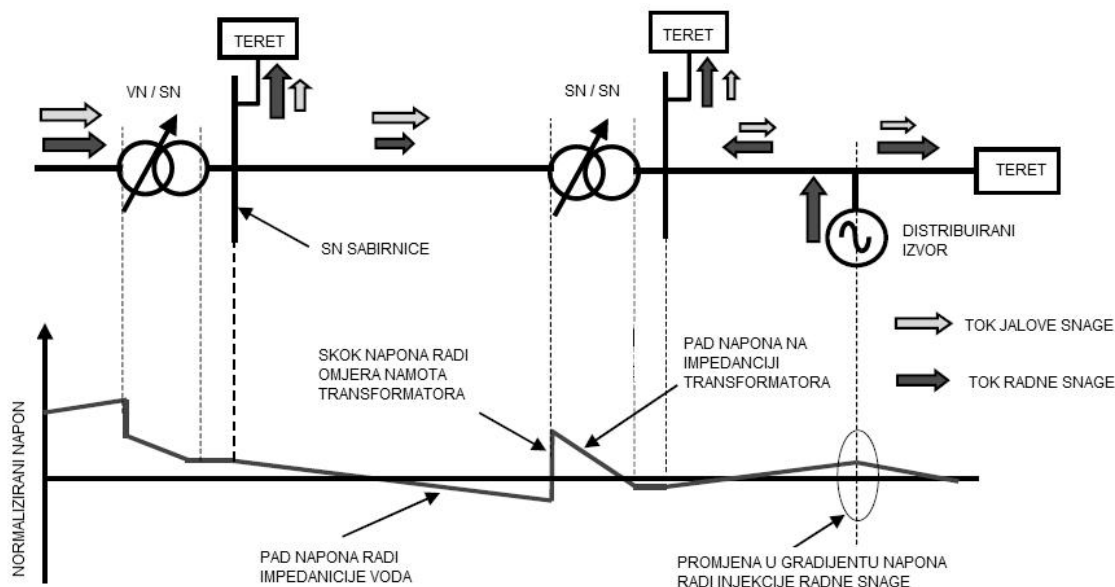
- veličinom i smjerom tokova radne i jalove snage,
- veličinom i raspodjelom impedancija elemenata mreže.

Prva aproksimacija je da je pad napona (ΔV) zbroj produkta toka radne snage (P) i radnog otpora (R) i produkta jalove snage (Q) i reaktancije (X), tj. vrijedi slijedeća relacija:

$$\Delta V = P \cdot R + Q \cdot X \quad (3)$$

Lokalne varijacije napona ublažene su regulacijskim transformatorima s mogućnošću mijenjanja omjera transformacije. Iako su oni važni u omogućavanju ostvarenja dozvoljenih

naponskih razina za krajnje potrošače, u ovom se pregledu mogu zanemariti radi njihove relativno male veličine pri kontroli (uobičajeno do 10%) i sporom odzivu (uobičajeno 60 sekundi prije prvog naponskog koraka veličine 1-2%).



Slika 3-4 Utjecaj tokova snaga na profil napona kroz mrežu [24]

Primarni naponski nivo uspostavlja se u mrežama tako da se osigura da u mreži ima dovoljno jalove snage da bi se zadovoljili zahtjevi za napajanje induktivnih trošila širom mreže. U većini slučajeva primarni izvor jalove snage je struja uzbude sinkronih generatora sa sekundarnom pomoć od strane kondenzatora i statičke kompenzacije u nekim slučajevima. Operator sustava kontrolira osnovni napon sustava tako da zahtjeva od velikih generatora da svojim sustavima kontrole uzbude reguliraju svoj izlazni napon na traženu razinu.

Distribuirani izvori, koji su predmet ovog proučavanja, tipično su u pogonu s kontrolom izlaznog faktora snage (konstantan omjer radne i jalove snage), iako u nekim slučajevima operatori sustava (u područjima s visokim impedancijama mreže) koriste distribuirane izvore koji trajno rade da bi ublažili naponske varijacije kod udaljenih kupaca.

3.6.3.2. Dinamički odziv

Neposredno prije sklopne operacije energetske sustav je u pogonu s tokovima radne i jalove snage u skladu s veličinama i raspodjelom izvora i tereta u tom trenutku. Promjene u

veličini napona pojavljuju se kad se ti tokovi snaga preraspodijele, nakon sklopne operacije. Ako se zanemare prijelazne pojave, na dinamički prijelaz između dva stabilna stanja dominantno utječe način upravljanja (regulacije) i vremenske konstante uzbudnog namota sinkronog generatora. U sustavima s značajnom statičkom uzбудom prijelaz može biti pod najvećim utjecajem jako brzog (sub-tranzijentnog) odziva ovih uređaja.

3.6.3.3. Tranzijentni i sub-tranzijentni odziv

Prijelazno stanje sustava nakon provedene operacije rastavnim uređajem mijenja se uz podršku napona koju daje induktivna energija spremljenja u uzбудnim namotima sinkronih strojeva. Predavanje te reaktivne struje ograničeno je prijelaznom reaktancijom generatora na otprilike 4 do 8 puta nazivne struje. Kako energija induktivnog polja slabi tako se smanjuje i doprinos reaktivne struje sustavu, s tipičnom vremenskom konstantom od otprilike 300 ms. Prijelaznu komponentu izmjene napona u sub-tranzijentnom periodu podupire induktivna energija pohranjena u prigušnim namotima sinkronih i asinkronih strojeva. Injektiranje struje u ovom periodu ograničeno je na otprilike 6 do 12 puta nazivne struje sub-tranzijentnom reaktancijom generatora. Kako se smanjuje induktivna energija tako se i doprinos reaktivne struje sustavu smanjuje s tipičnom vremenskom konstantom od otprilike 40 ms [24].

3.6.4. Interpretiranje struje

Za razliku od frekvencije i napona, struja mjerena u točki priključka izvora na mrežu nije veličina sustava. Struja koja teče između mjesta izvora i mreže je izrazito lokalni parametar koji je primarno pod utjecajem izlaza sa generatora i odgovarajućeg lokalnog tereta. Stoga u normalnim uvjetima nije moguće koristiti ovaj parametar kao jedini pri zaključivanju o statusu sustava. Bez obzira na to, mjerenje struje koja teče od generatora prema mreži može omogućiti određene zaključke o težini i tipu poremećaja (kvara). Za razlikovanje unutrašnjih i vanjskih kvarova potrebno je mjeriti i napon i struju (usmjereni strujni relej). ako je struja kvara otprilike proporcionalna ukupnoj snazi proizvodnje priključenoj na lokaciji, sustav za detekciju mora također znati status svakog od generatora u trenutku kvara.

3.6.5. Interpretiranje impedancije

Konvencionalni pasivni impedantni releji određuju impedanciju mreže u kvaru iz mjerenih veličina struje i napona na mjestu gdje je ugrađena zaštita. Aktivni impedantni releji mjere impedanciju mreže koja nije u kvaru umetanjem kontroliranog „kvara“ ili stupnjevanje potrošnje u točki mjerenja i dobivanjem impedancije sustava iz mjerenja rezultirajućih promjena u naponu i struji.

Prednost korištenja ove metode je da sustav može biti nadgledan u regularnim intervalima bez potrebe čekanja prijelazne pojave nametnute vanjskim događajima (koju možda nije moguće detektirati). Nedostatak ove metode je da dodaje nestabilnost naponu u sustavu koju mjeri, a što može degradirati kvalitete električne energije sustava.

Jasno je da impedancija sustava sama po sebi ne može dati informaciju o stabilnosti cijelog ili dijela sustava. Bilo kakva interpretacija je stoga neodvojivo ograničena na koreliranje mjerene impedancije sa setovima mogućih konfiguracija mreže i daljnjim prosuđivanjem najvjerojatnije konfiguracije iz danog seta mogućih.

3.6.6. Zaključno o ponašanju veličina sustava

Može se iz prethodno navedenog zaključiti da je osnovna frekvencija sinkrona diljem sustava i stoga je pouzdani lokalni izvor informacija o dinamičkom statusu sustava. Unatoč tome, mogućnost mjerenja osnovne frekvencije pod utjecajem je poremećaja (skokova) faznih kuteva napona za vrijeme sub-tranzijentnog i tranzijentnog perioda. Lokalna mjerenja frekvencije moraju stoga biti odgovarajuće filtrirana da bi se izbjegla pogrešna interpretacija dinamike šireg sustava.

Iako je napon podvučan kao parametar lokalnog karaktera, on također sadrži i informaciju o širem sustavu za vrijeme prijelaznih pojava iniciranim sklapanjem rastavnih uređaja. Ta informacija sadržana je u lokalnom sub-tranzijentnom, tranzijentnom i dinamičkom odzivu napona. Glavna poteškoća je razumijevanje te informacije u svjetlu mogućih konfiguracija sustava i sklopnih događaja i utjecaja rotirajućih strojeva blizu mjesta mjerenja. Komunikacija ili informacija o statusu mreže i lokalnog izvora odmiče sustav zaštite od jeftinog i jednostavnog kakav je zamišljen s mjerenjem lokalno dostupnih veličina. Ako se već koristi daljinska komunikacija onda su i najbolja moguća rješenja drugačija (npr. *intertripping* metoda).

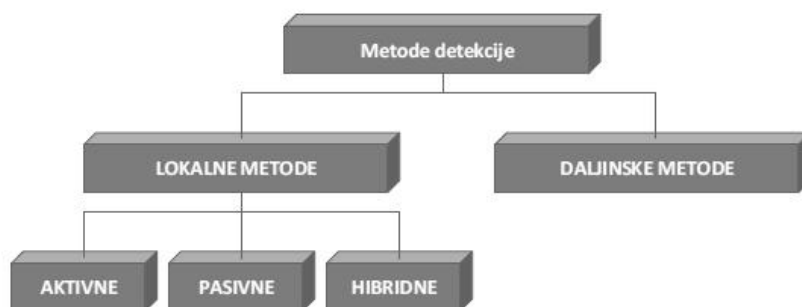
Mjerenja struje na su čelju elektrane daju neku informaciju o vanjskom sustavu, ali ona su jako ovisna o statusu generatora i drugih rotirajućih strojeva na lokaciji izvora. Korištenje mjerenja struje stoga, osim kad se koristi skupa s naponom za mjerenje impedancije, nije ni potrebno razmatrati u ovom proučavanju.

Lokalna mjerenja impedancije sustava daju informaciju o sustavu bez potrebe za vanjskim poremećajima. Ta informacija, ako se usporedi s očekivanim mogućim impedancijama ovisnim o konfiguracijama sustava, može se koristiti za ocjenu trenutne konfiguracije sustava u trenutku mjerenja.

4. ZAŠTITA OD OTOČNOG POGONA

4.1. Podjela metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona

Načini zaštite od otočnog pogona mogu se podijeliti na lokalno bazirane metode (sva zaštitna oprema nalazi se lokalno na mjestu primjene distribuiranog izvora) i daljinske (ili mrežne) metode (udaljena ili distribuirana detekcija), ali također i na pasivne metode (mjerenje električnih veličina) i aktivne metode (injektiranje određenog poremećaja u svrhu destabilizacije eventualnog otočnog pogona) [25,26]. Također postoje i hibridne metode koje su kombinacija više metoda (aktivnih i pasivnih) s ciljem eliminacije nedostataka jednih i drugih te što pouzdanijeg utvrđivanja pogonskog stanja otočnog pogona. Ovakva sažeta klasifikacija metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona prikazana je na Slici 4-1, a u nastavku su opisane grupe osnovnih metoda [27].



Slika 4-1 Podjela na vrste metoda detekcije otočnog pogona

4.1.1. Lokalne metode

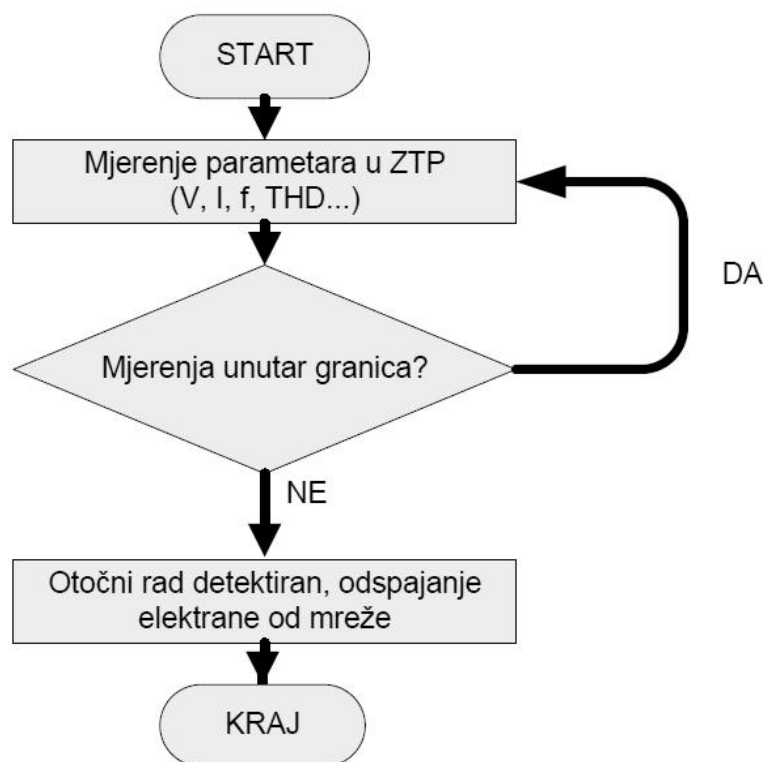
Lokalne metode se baziraju na ideji da se sva zaštitna oprema nalazi lokalno na mjestu primjene distribuiranog izvora. Pasivne metode koriste informacije koje mogu dobiti snimanjem stanja električnih veličina na mjestu priključka dok se aktivne metode baziraju na injektiranju pilot signala na temelju čijeg odziva se određuje činjenično stanje. Hibridne metode uključuju kombinaciju više metoda, obično pasivnih i aktivnih.

4.1.1.1. Pasivne metode

Pasivne metode, najraširenije metode za detekciju otočnog pogona, su vrlo brze i relativno jeftine u primjeni. Njihov je glavni nedostatak nemogućnost pravovremene detekcije

otočnog pogona u slučaju balansa radne i jalove snage distribuiranog izvora i lokalnog konzuma. Dodatni problem je i preosjetljivost na brze i velike promjene opterećenja kao što su skokovito opterećenje sumjerljivo sa snagom distribuiranog izvora u slabim mrežama ili isključenje izvora.

Dijagram toka rada pasivnih metoda prikazan je na slici 4-2.



Slika 4-2 Dijagram toka rada pasivnih metoda

Najčešće pasivne metode detekcije (i zaštite) od otočnog pogona su:

- Nadnaponska / podnaponska zaštita: Metoda se temelji na debalansu jalove energije koju trošilo treba (neposredno prije odvajanja) i koje daje izvor. Do trenutka odvajanja taj debalans je podmirivala mreža.
- Nadfrekvencijska / podfrekvencijska zaštita: Slično kao prethodna metoda, kod ove metoda koristi se činjenica da će uslijed promjene radne snage doći do porasta ili pada frekvencije (kod rotacijskih strojeva razlika snaga generatora i tereta ubrzati će ili usporiti vrtnju rotora).
- Zaštitna metoda detekcije brzine promjene frekvencije (ROCOF – engl. *rate of change of frequency*): Metoda se zasniva na činjenici da će uslijed naglog opterećenja ili rasterećenja doći do ubrzanja odnosno usporjenja brzine vrtnje rotora rotacijskih strojeva nakon što nestane sinkronog momenta mreže koji održava konstantnu brzinu vrtnje rotora distribuiranog izvora.

Većina suvremenih digitalnih releja imaju integriranu funkciju ROCOF zaštite. Uobičajene prorađne postavke kreću se od 0,1 do 1 Hz/s, a prorađna vremena zaštite od 200 ms do 500 ms. Problem s ovom zaštitom je mogućnost neselektivnih prorađa, primjerice pri ispadu velikih tereta, te slabija učinkovitost (neosjetljivost) pri malim promjenama snage na mjestu odvajanja u trenutku nastanka otočnog pogona.

- Zaštitna metoda detekcije brzine promjene radne snage dP/dt : Metoda se temelji na pretpostavci da je najbrža promjena snage zapravo ona koja nastane kod prelaska na otočni pogon. Problem je što ta pretpostavka nije ispunjena kod npr. naglog isklapanja ili uklapanja velikih tereta kad se javljaju slični prijelazni fenomeni pa tada može doći do neselektivne prorađe ove zaštite.

4.1.1.2. Aktivne metode

Aktivne metode podrazumijevaju namjerno unošenje kontrolirane smetnje u sustav, tj. baziraju se na tome da male smetnje imaju zanemariv učinak na sustav kada distribuirani izvor radi paralelno s mrežom, ali da je taj učinak velik kada distribuirani izvor ototčno napaja određeni dio distribucijske mreže.

Metode su učinkovite i u uvjetima apsolutnog balansa snaga ali zbog relativno dugog vremena kreiranja smetnje, odnosno detekcije odziva na smetnju, metoda je manjkava u slučajevima kad se u mreži primjenjuje brzi APU.

Aktivne metode dakle prate odziv mreže (sustava) na umjetno generirane poremećaje, tj. umjetno generirane promjene mjerenih električnih veličina, te, u slučaju nedostatnog odziva mreže na poremećaj zaključuju da nedostaje aktivna mreža i tako detektiraju ototčni pogon. Umjetno generirani poremećaj se periodički (ovisno o metodi od svakih 100 ms do svakih 500 ms) injektira u mrežu. Trajanje injektiranog poremećaja je različito, reda veličine 100 ms.

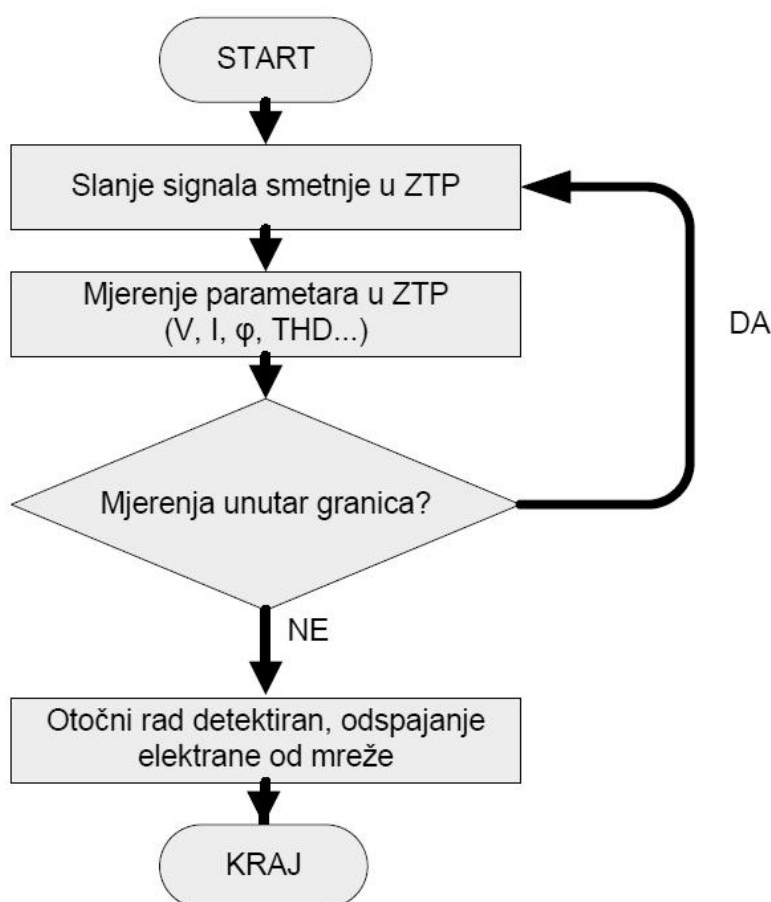
Najveći nedostatak aktivnih metoda je sustavno unošenje umjetno generiranih poremećaja u mrežu što „zagađuje“ mrežu. Dodatni problem je interakcija injektiranih poremećaja u slučaju većeg broja elektrana u otoku. Interakcija injektiranih poremećaja ima dvije osnovne posljedice:

- u slučaju istodobno injektiranih poremećaja iste vrste u lokalnu mrežu iz više elektrana raste amplituda poremećaja u mreži što može kontinuirano narušavati kvalitetu električne energije, a u ekstremnim slučajevima i ugroziti normalan pogon mreže
- superpozicija različitih injektiranih poremećaja (različite metode detekcije u različitim elektranama) može dovesti do netočnih zaključaka o (ne)postojanju otočnog pogona:

- superpozicijom kontradiktornih poremećaja poremećaji se mogu prigušiti ili čak i poništiti i tako dati privid postojanja aktivne mreže i u otočnom pogonu – detekcija je pogrešna
- nagomilavanjem istovjetnih neistodobnih poremećaja u otočnom pogonu (iz više elektrana s istom metodom detekcije) poremećaji se stoje u jedan te se impuls poremećaja uopće ne detektira kao promjena mjerene veličine, te se na isti način ne detektira da jeste/nije izostao odziv aktivne mreže – detekcija je nedjelotvorna.

U slučaju otočnog pogona u balansu aktivne metode kao takve, za razliku od pasivnih, ne gube svoju djelotvornost (jednako su djelotvorne kao i u disbalansu).

Dijagram toka rada aktivnih metoda prikazan je na slici 4-3.



Slika 4-3 Dijagram toka rada aktivnih metoda

4.1.1.3. Hibridne metode

Hibridne metode su kombinacija više različitih pasivnih metoda ili kombinacija pasivne i aktivne metode. Cilj hibridnih metoda je povećavanje djelotvornosti (brzine i točnosti) detekcije otočnog pogona.

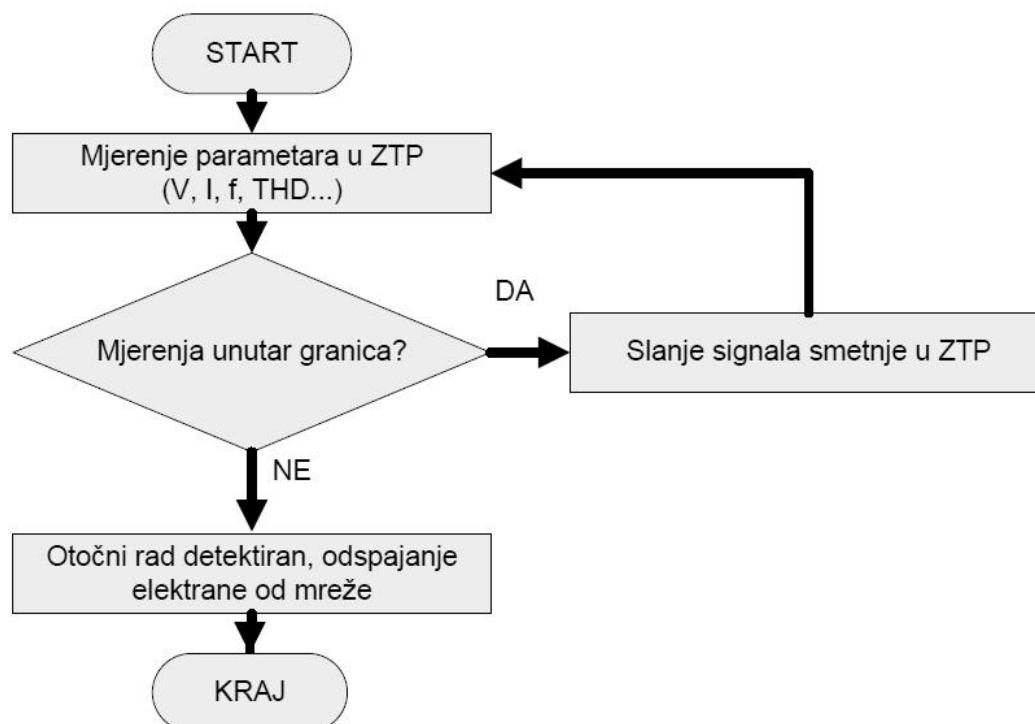
Hibridnom se, primjerice, smatra kombinacija dvije pasivne metode, od kojih je jedna brža u detekciji kod većeg disbalansa, a druga preciznija u detekciji kod manjeg disbalansa snaga proizvodnje i potrošnje, pa u kombinaciji pokazuju veću djelotvornost.

Hibridnom metodom se smatra i kombinacija pasivne i aktivne metode na način da je pasivna primarna metoda, a tek kada pasivna metoda detektira poremećaj koji upućuje na mogući otočni pogon ona potakne aktivnu metodu kao kontrolni mehanizam koji potvrđuje (opovrgava) radi li se uistinu o otočnom pogonu. Ovakvom hibridnom metodom uvode se dva poboljšanja:

- minimizira se osnovni nedostatak aktivnih metoda („zagađivanje“ mreže), jer aktivna metoda šalje poremećaj u mrežu tek nakon što je na to pobudi pasivna metoda,
- moguće je osjetljivije podesiti pasivnu metodu, bez rizika od neselektivnih naloga za isključenje, jer nalog neće biti dok otočni pogon ne bude potvrđen aktivnom metodom.

Na žalost, ova hibridna metoda ne prepoznaje otočni pogon u balansu (u balansu izostane poticaj pasivne metode aktivnoj da provjeri je li nastupio otočni pogon).

Dijagram toka rada opisanih hibridnih metoda prikazan je na slici 4-4.



Slika 4-4 Dijagram toka rada hibridne metode

4.1.2. Daljinske metode

Daljinske (komunikacijske) metode se baziraju na primjeni informacijskih tehnologija u prenošenju direktne ili indirektno informacije (komunikacija DI-a s distribucijskom mrežom) o ispunjavanju uvjeta za otočni pogon određenog distribuiranog izvora. Metoda je relativno pouzdana sa stajališta interpretacije signala čak i u uvjetima apsolutnog balansa proizvodnje i potrošnje na mjestu priključka te ne ovisi o smetnjama u energetske mreži. Mane su im cijena i pouzdanost signala u smislu smetnji. Brzina ovisi o mediju prijenosa.

Neke od izvedbi daljinske metode su:

- Prijenos signala putem energetske vode (engl. PLC, „*power line communication*“): Po istomvodu koji osigurava električnu vezu sa distribuiranim izvorom trajno se šalje pilot signal. Nestanak pilot signala može značiti prelazak u otočni pogon. Signal se generira na SN strani mreže u generatoru signala frekvencije različit od radne frekvencije mreže i amplitude zanemarive u odnosu na nazivni napon mreže. Na krajevima mreže nalaze se prijemnici signala, te dok oni detektiraju signal, distribuirani izvor radi paralelno sa mrežom.
- Prijenos isklopa (engl. *transfer trip*): Kod ove metode medij prijenosa može biti žičani (pilot kabel diferencijalnog releja, telefonski kabel), bežični (radiovalovi, mikrovalovi) ili svjetlovodni. Za razliku od prethodne metode, ovdje sustav ne odašilje kontinuirani signal već se odgovarajući signal generira kada dođe do promjene stanja prekidača koji uzrokuje prelazak u otočni pogon. U postojećem SCADA sustavu koji ima podatke o stanjima sklopne opreme, moguće je integrirati logiku prijenosa isklopa.

Kako daljinske metode podrazumijevaju razmjenu informacija između elektrane i mreže u cilju detekcije otočnog pogona, u slučaju da informacijska infrastruktura ne postoji, za primjenu ovih metoda nužni su zahvati u mreži, a ne samo u elektrani, što utječe na izuzetno visoku cijenu primjene ove grupe metoda.

4.2. Zona neosjetljivosti metode detekcije

Pouzdanost metoda detekcije otočnog pogona može se odrediti veličinom zone neosjetljivosti, neprepoznavanja (engl. *non-detection zone*, NDZ), definirane kao prostor neusklađenosti snaga (ΔP i ΔQ) u kojem otočni rad neće biti prepoznat jer postoji mogućnost nepoželjnih i netočnih prorada zaštite.

Nužno je da zaštita od otočnog pogona bude neosjetljiva na standardne poremećaje u mreži kao propade napona, prenapone, harmoničke distorzije i promjene u frekvenciji, pa stoga

zaštitna podešenja tih veličina moraju dozvoliti određene granice odstupanja. Npr. granice napona i frekvencije mreže su u pravilu normirane (npr. u HRN EN50160, vidi Tablicu 4-1).

Tablica 4-1 Maksimalni rasponi napona i frekvencije mreže prema EN 50160 [28]

Veličina	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Frekvencija	$f_{min} = 49 \text{ Hz}$	$f_{min} = 51 \text{ Hz}$
Napon	$V_{min} = 0,9 \text{ p.u.}$	$V_{min} = 1,1 \text{ p.u.}$

Stoga npr. zona neprepoznavanja za standardne zaštite nad/pod-naponske/frekvencijske može biti precizno određena. Za nadnaponsku i podnaponsku funkciju zaštite NDZ je [25]:

$$\left(\frac{V}{V_{max}} \right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_{DG}} \leq \left(\frac{V}{V_{min}} \right)^2 - 1 \quad (4)$$

a za nadfrekvencijsku i podfrekvencijsku funkciju zaštite NDZ je [25]:

$$Q_f \left(1 - \left(\frac{f}{f_{min}} \right)^2 \right) \leq \frac{\Delta Q}{P_{DG}} \leq Q_f \left(1 - \left(\frac{f}{f_{max}} \right)^2 \right) \quad (5)$$

gdje su:

V - trenutna vrijednost napona,

V_{max} - podešenje maksimalne dozvoljene vrijednosti napona,

V_{min} - podešenje dozvoljene minimalne vrijednosti napona,

f - trenutna vrijednost frekvencije,

f_{max} - podešenje maksimalne dozvoljene vrijednosti frekvencije,

f_{min} - podešenje minimalne dozvoljene vrijednosti frekvencije,

P_{DG} - radna snaga distribuiranog izvora,

ΔP - razlika (disbalans) radnih snaga proizvodnje i potrošača u „otoku“,

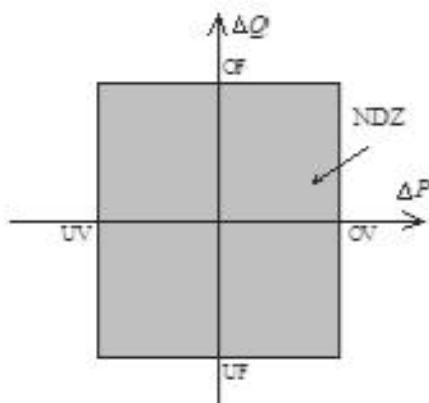
ΔQ - razlika (disbalans) jalovih snaga proizvodnje i potrošača u „otoku“,

Q_f - faktor dobrote tereta (ovisi o vrijednosti R , L i C potrošača u „otoku“).

Na Slici 4-5 prikazana je shematski takva zona neprepoznavanja otoknog rada gdje su vrijednosti neusklađenosti snaga (ΔP i ΔQ) za koje otokni rad neće biti prepoznat definirane

podešenjima naponskih i frekvencijskih (OV-nadnaponska, UV-podnaponska, OF-nadfrekvencijska, UF-podfrekvencijska) zaštitnih funkcija.

Najgori slučaj za detekciju otočnog rada sigurno je potpuno podudaranje snage proizvodnje i tereta u trenutku isklapanja mreže, tj. nepostojanje ΔP i ΔQ .



Slika 4-5 Zonaneosjetljivosti (NDZ) detekcije otočnog pogona

4.3. Usporedba vrsti metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona

4.3.1. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta metoda

U Tablici 4-2 je usporedbeni pregled karakterističnih prednosti i nedostataka pojedinih tipova metoda detekcije otočnog pogona. Opisane prednosti i nedostaci ne ovise o gustoći elektrana u mreži, osim u slučaju aktivnih metoda koje zagađuju mrežu u normalnom pogonu poremećajima koje emitiraju, što se pogoršava s povećanjem broja elektrana u mreži [29].

Tablica 4-2 Usporedba metoda detekcije otočnog pogona

Metode	Prednosti	Nedostaci
Lokalne metode - pasivne	• Kratko vrijeme detekcije • Nema povratnog utjecaja na mrežu • Vrlo točne u slučajevima velikih debalansa snaga	• Poteškoća u detekciji otočnog pogona kod balansa snage između proizvodnje i otočne potrošnje • Posebnu pozornost treba voditi na postavne vrijednosti zaštitnih releja • Ukoliko su postavke prestroge može doći do neselektivnog isklopa

Lokalne metode - aktivne	• Može detektirati otočni pogon i u situacijama apsolutnog balansa snage proizvodnje i otočne potrošnje	• Unosi smetnje u sustav • Vrijeme odziva je relativno dugo • Unesene smetnje često degradiraju kvalitetu električne energije, a značajnije smetnje mogu narušiti stabilnost sustava i kad nema otočnog pogona
Hibridne metode	• Imaju malu zonu neosjetljivosti • Smetnje se unose samo ako postoji sumnja na otočni pogon	• Vrijeme odziva zaštite od otočnog pogona se produžuje zbog korištenja dvaju metoda
Daljinske metode	• Visoka pouzdanost	• Potencijalno visoka cijena ukoliko nema potrebne infrastrukture (rasplet optičke mreže)

4.3.2. Valorizacija metoda detekcije otočnog rada

U Tablici 4-3 dani su podaci o udjelu pojedinih tipova metoda u predlaganim metodama detekcije i zaštite od otočnog rada na međunarodnim konferencijama IEEE [14]

Tablica 4-3 Zastupljenost predloženih metoda zaštite od otočnog rada

Metode	Udjel
Lokalne metode - pasivne	20 %
Lokalne metode - aktivne	41 %
Hibridne metode	34 %
Daljinske metode	5 %

Većinom su predlagane metode, koje se u literaturi mogu pronaći, razmatrane i predložene s ciljem eliminiranja zone neosjetljivosti, međutim to nije jedini kriterij. Tri su važna kriterija pomoću kojih se valorizira metoda detekcije otočnog pogona: pouzdanost, brzina i cijena. Pouzdanost se ogleda u pouzdanosti prijenosa signala (zbog zagušenja na komunikacijskom kanalu) ili pouzdanosti interpretacije signala. Brzina detekcije je ključna značajka, poglavito u mrežama s kratkim beznaponskim sekvencama APU-a. Cijena je često i presudna kod odabira metode. Valorizacija vrijednosti implementacije neke metode se mora

promatrati u kontekstu visine rizika od ostvarenja negativnog scenarija. Pored spomenutih kriterija, važni su još i utjecaj na mrežu te ovisnost o svojstvima mreže [27].

4.3.3. Prepreke primjeni daljinskih metoda

Sve daljinske metode nameću zahvate u postojećim postrojenjima u distribucijskoj mreži, ograničavajući način vođenja sustava i unose dodatnu složenost upravljanja sustavom na svim distribucijskim razinama, kao i razinu automatizacije.

Međutim, npr., potrebna razina automatizacije u ovom trenutku nije primjenjiva u distribucijskoj mreži HEP-ODS-a, te se u ovom stupnju razvoja mreže i primijenjene automatizacije distribucijske mreže HEP-ODS ne može obvezati na široku primjenu daljinskih metoda detekcije otočnog pogona u distribucijskoj mreži HEP-ODS-a [29]. Iz navedenih razloga zaštita elektrane od otočnog pogona na ovom stupnju razvoja distribucijske mreže mora se temeljiti na lokalnim metodama prepoznavanja otočnog pogona. Slična je situacija i s mrežama operatora distributivnog sustava u drugim zemljama, pa su ovakve metode, kako u svijetu, tako i u nas, primjenjivane jedino u pilot projektima [30, 31]. Vjerojatno će proći još određeno vrijeme do dostizanja potrebnog stupnja automatizacije distributivnih mreža da bi se mogle primjenjivati daljinske metode detekcije otočnog rada.

4.3.4. Trend vraćanja fokusa na lokalne pasivne metode

Uz navedene prepreke primjeni daljinskih metoda te zaključak o realnosti temeljenja shema zaštite od otočnog pogona na lokalnim metodama, te uz prethodno navedene nedostatke lokalnih aktivnih i hibridnih metoda, u posljednje vrijeme fokus proučavanja vraća se prema lokalnim pasivnim metodama.

Nedostatke u vidu postojanja zona neosjetljivosti kod pasivih zaštita sve više se stavlja na vagu s nedostacima ostalih metoda u brzini, unošenju smetnji u mrežu i visokoj cijeni. Tako neki istraživači budućnost pasivnih metoda vide kao nužne rezervne (*back-up*) metode daljinskim komunikacijskim metodama kad one uđu u široku primjenu [32]. Drugi pak kombinacije više pasivnih metoda predlažu kao najbolje rješenje [33].

4.4. Preporuke za projektiranje zaštite od otočnog rada

Uzimajući sve prethodno navedeno u obzir, osnovne preporuke za planiranje i projektiranje zaštite od otočnog pogona distribuiranih izvora su sljedeće [24]:

- Planiranje shema zaštite od otočnog rada treba biti bazirano na principu ocjene rizika, na temelju konfiguracije sustava, načina pogona izvora i odziva generatora. Za veće elektrane rizik od višekratnog ispada generatorskih jedinica treba biti razmatran u korelaciji sa sličnim rizicima povezanim sa trenutnim ispadima tereta. Takve ocjene traže prilično poznavanje konfiguracije sustava, pogona i odziva. Navedeno u obzir uzimaju standardi za priključenje, tj. mrežna pravila.
- Vjerojatnost pojave neželjenog otočnog rada ne smije biti smatrana „praktički nikakvom“. Posebno s pojavom sve većeg broja distribuiranih izvora u mreži i izvora čija je svrha podržavanje regulacije napona ili frekvencije potencijalni rizik pojave otočnog pogona ne može biti zanemaren.
- Osim standardnih naponskih i frekvencijskih zaštita dodatne zaštitne funkcije trebaju biti implementirane za detekciju otočnog rada kako bi se poboljšala ispravnost detekcije. Detekcija otočnog rada trebala bi biti ispravna i u situacijama kad su snage proizvodnje i potrošnje u „otoku“ bliskih iznosa (blizu balansa), a za realistične uvjete u mreži ne bi smjele imati zonu neosjetljivosti. Također, važno je da radu u slučaju više generatora spojenih na mrežu i u slučaju priključenja izvora na „slabom“ odvoju mreže.
- Za veće distribuirane izvore, zaštita treba biti projektirana na principu rigorozne ocjene osjetljivosti i povezanog rizika. Kako otočni pogon ne nosi nužno velik rizik u kraćem vremenskom periodu, vremenski zategnuta zaštita može dozvoliti bolju diskriminaciju u odnosu na druge prijelazne pojave i tako povećati sigurnost sustava, ali u sustavima s brzim automatskim ponovnim uklopom nju nije moguće izvesti.
- Za distribuirane izvore manjih veličina, pogotovo za standardizirane, cijena priključka mora biti na prihvatljivoj razini, što se postiže dijelom i integriranim, tipski ispitivanim, sustavima zaštite.
- Odabir i projektiranje zaštitnih funkcija treba biti uz primjenu visokih sigurnosnih standarda kako bi se smanjio rizik kvara zaštite i garantirala ispravna prorada tijekom životnog vijeka, za što treba propisati i održavanje i ispitivanje u pravilnim vremenskim razmacima, a u pogonu treba propisati sigurnosna pravila pristupa mogućim „živim“ dijelovima sustava čak i nakon isključenja rastavnih elemenata.

Uz navedene preporuke, rizici povezani s neželjenim otočnim radom, čak i u budućim scenarijima s vrlo visokim udjelom distribuirane proizvodnje, mogu biti održani na nivou koji ne povećava značajno već postojeći sigurnosni rizik. Stoga, preporuka je da se mogućnost pojave neželjenog otočnog rada i povezani rizici ne promatraju kao prepreka ili limitirajući faktor daljnjem razvoju distribuirane proizvodnje mrežama [24].

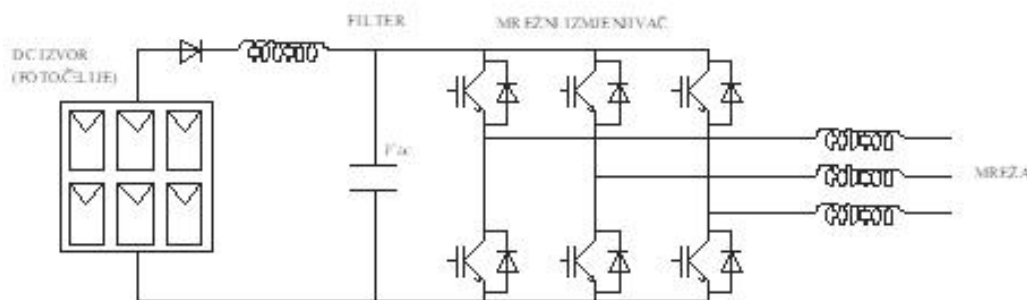
U nastavku ovog rada, objasnit će se primjena ovih navedenih preporučenih principa na razmatranom specifičnom tipu distribuiranih izvora, što je kao potom poslužilo kao motiv daljnjeg istraživanja i nastanka cjelokupnog rada.

5. ZAŠTITA OD OTOČNOG POGONA ELEKTRANA IZMJENJIVAČKOG TIPRA

5.1. Izmjenjivači kao izvori (u fotonaponskim elektranama) i razlika u odnosu na druge tipove izvora (generatore)

Mrežni pretvarači su tehnologija koja danas omogućuje učinkovito i fleksibilno povezivanje različitih vrsta distribuiranih izvora (obnovljivi izvori energije, sustavi pohrane energije) na elektroenergetski sustav. Stoga je moguće predvidjeti da će, kao što je sinkroni stroj imao središnju ulogu u klasičnom elektroenergetskom sustavu, mrežni izmjenjivač, temeljen na tehnologiji poluvodiča i obradi signala, imati sličnu ulogu u budućnosti elektroenergetskog sustava kao sastavni dio napredne mreže (smart grid-a) [25].

Distribuirani izvori, npr. fotonaponske ćelije, mikroturbine ili gorive ćelije ne proizvode izmjenični napon frekvencije 50 Hz. Elektronički pretvarači prevraćaju električnu energiju dobivenu iz izvora u oblik koji je potreban trošilima. Izmjenjivači su pretvarači istosmjernog u izmjenični napon određene frekvencije, upotrebom poluvodičkog mosta s pulsno-širinskom modulacijom. Principna shema spoja distribuiranog izvora istosmjerne struje na izmjeničnu trofaznu mrežu preko upravljivog izmjenjivača prikazana je na Slici 5-1.



Slika 5-1 Principna shema mrežnog izmjenjivača između DC izvora i AC mreže [34]

Promatrajući s aspekta izmjenične mreže, generator električne energije koji predaje energiju u mrežu u ovom slučaju je dakle izmjenjivač.

Druge moguće vrste tehnologije koje se koriste u električnom sustavu za pretvorbu dobivene energije u električnu koriste sinkroni ili asinkroni generator, preko kojih se npr. na distributivnu mrežu spajaju mali distribuirani izvori kojima su pogonski uređaji parne ili plinske

turbine. U odnosu na njih izmjenjivači imaju dvije ključne razlike vezane na tematiku obrađenu u ovom radu koje su i motivirale provođenje istraživanja.

Osnovna razlika između izmjenjivača s jedne strane i sinkronih i asinkronih generatora s druge strane je nepostojanje inercije ili tromosti kod izmjenjivačkih jedinica, koje iz razloga što nemaju rotacijskih zamašnih masa nemaju niti kinetičku energiju pohranjenu u njima, za razliku od ovih drugih, pogonskih strojeva s rotacijskim masama. To svojstvo značajno utječe na ponašanje izmjenjivača u raznim poremećajima, npr. u prilikama kratkog spoja, pa je poznato da je maksimalna struja koju izmjenjivači daju u kratkom spoju tek nešto veća od nazivne struje izmjenjivača. Također, ovo svojstvo ima veliki utjecaj na ponašanje izmjenjivača u prilikama pojave otočnog rada sustava koje napajaju.

Druga razlika nije direktno vezana na izmjenjivač, već na izvor čiju energiju izmjenjivač pretvara i predaje u izmjeničnu mrežu, ali tako posredno ključno utječe na mogućnosti rada izmjenjivača. U proučavanom slučaju izmjenjivači pretvaraju energiju koju dobivaju iz fotonaponskih ćelija. Taj obnovljivi izvor je iznimno intermitentan (kao više manje svi obnovljivi izvori) te stoga takvi izvori nemaju mogućnost regulacije, a izmjenjivači se podešavaju tako da rade u točki maksimalne snage.

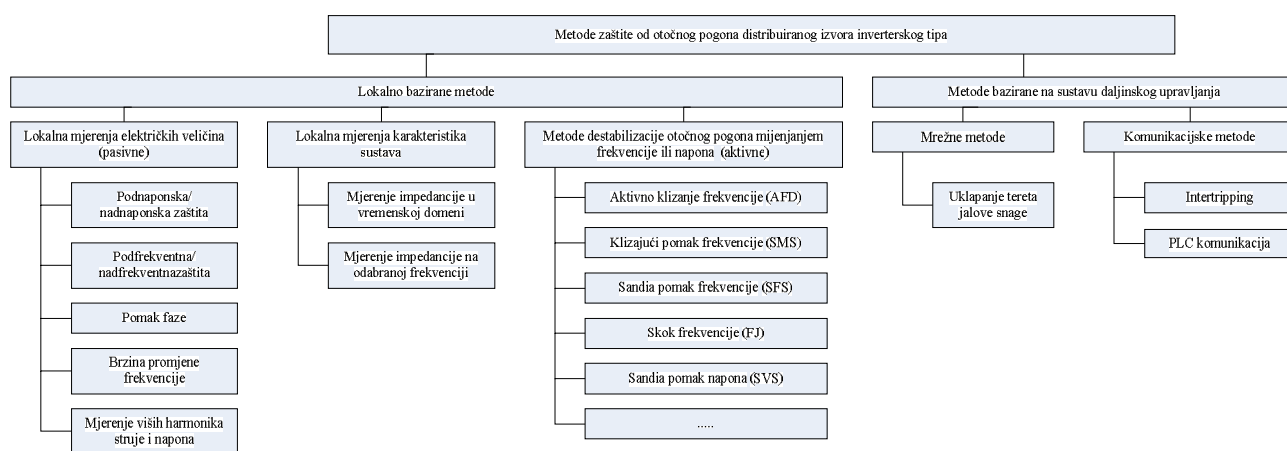
Postoji naravno mogućnost da bi izvori održali određenu zalihost, tj. da bi izmjenjivači bili podešeni na radnu točku u kojoj ne generiraju maksimalnu moguću snagu, ali se u praksi takvo što ne koristi jer se ta neproizvedena energija ne akumulira pa bi time bila nepovratno bačena. Samo teoretski se takav način pogona izmjenjivača ispod maksimalne radne točke, uz zadržavanje zalihosti snage, razmatra, u svrhu eventualne mogućnosti poželjnog otočnog pogona, uz potrebu dodatne strategije rasterećenja (engl. *load shedding*) [35], ali to nije predmet proučavanja ovog rada. Rasterećenja bi se tada provodila korištenjem sinkroniziranih mjerenja u realnom vremenu, u skladu s prioritetima napajanja i zahtjevima potrošnje, što povlači problem razine automatizacije distributivne mreže, opisan detaljnije u Poglavlju 4.3.3. ovog rada. Uz to se kosi s trenutnim standardima [20].

5.2. Klasifikacija zaštita od otočnog pogona izmjenjivača

Metode detekcije i zaštite od otočnog rada izmjenjivača potpadaju pod istu klasifikaciju koja je opisana u Poglavlju 4.1. ovog rada. U slučaju izmjenjivača, neke od tih metoda ne trebaju biti implementirane kroz zasebne uređaje ili releje zaštite, već se koristi to što je

izmjenjivač napredni elektronički uređaj, pa su u sklopu njega integrirani elementi u kojima se implementiraju zaštitne funkcije. Posebnost je izmjenjivača i lakša mogućnost izvedbe aktivnih metoda detekcije, koje su također integrirane i koriste iste sklopove koji imaju za svrhu ostvarivanje osnovne funkcije izmjenjivača. U generiranu izmjeničnu struju, napon i frekvenciju integrirane aktivne metode injektiraju određene poremećaje u svrhu destabilizacije eventualnog otočnog pogona.

Sažeta klasifikacija metoda detekcije i zaštite od otočnog pogona kod izmjenjivača prikazana je na Slici 5-2. U nastavku su opisane neke od osnovnih postojećih i razvijanih metoda integriranih u izmjenjivačima prema [36].



Slika 5-2 Klasifikacija metoda prepoznavanja i zaštite od otočnog pogona distribuiranog izvora izmjenjivačkog tipa

5.2.1. Pasivne metode integrirane u izmjenjivačima

5.2.1.1. Detekcija pod/nad-napona i pod/nad-frekvencije

Svaki izmjenjivač ima ugrađene releje za pod/nad-naponsku i pod/nad-frekvencijsku zaštitu. Ti releji se također mogu iskoristiti i za zaštitu od otočnog rada. Potrebno je konstantno mjeriti napon i frekvenciju u točki priključenja. U trenutku odvajanja lokalne mreže od ostatka sustava nastaje otok gdje elektrana izmjenjivačkog tipa dalje napaja potrošače. Proizvodnja elektrane u svakom trenutku mora biti jednaka potrošnji. Ako postoji razlika u proizvodnji i potrošnji radne snage (ΔP), to će utjecati na promjenu napona točki priključenja. Isto tako, ako postoji razlika u proizvodnji i potrošnji jalove snage (ΔQ), to će utjecati na promjenu frekvencije u otoku. Ako su te razlike radne i jalove snage dovoljno velike, uzrokovat će

proradu pod/nad-naponske i pod/nad-frekvencijske zaštite. Međutim ako su te razlike dovoljno male da napon i frekvencija ostanu unutar dozvoljenih granica, nastavlja se otočni rad sve dok ne dođe do razlike koja će uzrokovati proradu tih zaštita. Prednost ove metode je njena jednostavnost i prilično jeftina izvedba jer se isti releji koriste u više svrha. Također, čak i u slučaju nastanka otočnog rada frekvencija i napon će biti unutar propisanih granica te ne će uzrokovati oštećenje električnih uređaja i opreme, ali ostaje opasnost od povratnog napona koji može ugroziti zdravlje radnika na tom vođu. Nedostatak ove metode je prilično velika zona u kojoj se neće detektirati otočni rad.

5.2.1.2. Detekcija faznog skoka napona

U normalnom pogonu izmjenjivači rade s jediničnim faktorom snage te je izlazna struja izmjenjivača u fazi s mrežnim naponom u točki priključenja. U slučaju nestanka mrežnog napajanja, u prijelaznom razdoblju između normalnog i otočnog rada dogodit će se pomak faznog kuta napona u zajedničkoj točki priključenja V_{ZTP} kako bi se poklopio s faznim kutom lokalnog opterećenja koji obično ima faktor snage različit od jedan. To uzrokuje trenutni fazni skok napona što je vidljivo na slici 5-3. Metoda detekcijom faznog skoka napona zasniva se na konstantnom praćenju razlike u fazi između napona u zajedničkoj točki priključenja i izlaznoj struji izmjenjivača te otkrivanju faznog skoka koji signalizira otočni rad. Izmjenjivač prati fazni kut mrežnog napona koristeći fazno zatvorenu petlju [37].



Slika 5-3 Fazni skok napona u točki priključenja elektrane u slučaju pojave otočnog rada [36]

Prednosti ove metode su jednostavna implementacija s obzirom da izmjenjivač svakako mora koristiti fazno zatvorenu petlju za sinkronizaciju, samo je potrebno definirati isklon izmjenjivača u slučaju da greška u fazi prijeđe zadanu vrijednost. Ovaj proces također ne utječe na kvalitetu izlazne snage izmjenjivača. U učinkovitost ove metode se ne smanjuje u slučaju pojave više elektrana u istom otoku [36].

Najveći nedostatak ove metode je određivanje graničnih vrijednosti greške u fazi. Pojedini tereti, kao što su motori, prilikom pokretanja također uzrokuju prijelazne pojave koje uključuju i fazne skokove što može uzrokovati nepotrebno isključenje izmjenjivača. Također, za rad ove metode nužno je da izmjenjivač radi s jediničnim faktorom snage, a zona u kojoj se neće detektirati otočni rad tada postoji samo ako lokalno opterećenje mreže u trenutku mrežnog napajanja ima također jedinični faktor snage što je izuzetno mala vjerojatnost [38].

5.2.1.3. Detekcija harmoničnog izobličenja napona

U normalnim uvjetima rada kruta mreža predstavlja čvrsti izvor napona s malim faktorom ukupnog harmoničkog izobličenja (engl. *total harmonic distortion*, THD) i malom impedancijom. Izmjenjivač proizvodi struje harmonika koji odlaze u mrežu. Zbog male impedancije mreže dolazi do malog izobličenja valnog oblika napona koje ostaje unutar propisanih granica. U slučaju nestanka mrežnog napajanja, struje harmonika teku prema lokalnom teretu čija je impedancija znatno veća od impedancije mreže. Uzajamno djelovanje struja harmonika i veće impedancije stvorit će veća izobličenja valnog oblika napona. Ova metoda se zasniva na promatranju THD faktora napona u zajedničkoj točki priključenja. U slučaju pojave otočnog rada THD faktor će se naglo povećati preko dozvoljenih granica što će uzrokovati proradu zaštite i isključenje izmjenjivača.

Prednosti ove metode su njena visoka učinkovitost u širokom rasponu uvjeta u mreži, čak i u slučaju da se na istoj mreži nalazi više izmjenjivača [36].

Najveći nedostatak ove metode je, kao i kod detekcije faznog skoka, određivanje graničnih vrijednosti prorade zaštite. Kod potrošača s izraženom radnom komponentom otpora nema problema jer THD faktor znatno poraste. Nasuprot tome, *RLC* tereti se ponašaju kao filteri koji mogu i prigušiti veće frekvencije, što može dovesti do toga da i u slučaju nestanka napajanja od strane mreže THD faktor ne prijeđe graničnu vrijednost podešenja zaštite u izmjenjivaču. Isto tako, uključanje pojedinih trošila, naročito onih koji sadrže elektroničke komponente, može također uzrokovati trenutni porast THD faktora što može dovesti do krive prorade ove zaštite [38].

5.2.1.4. Detekcija brzine promjene frekvencije

Detekcija brzine promjene frekvencije (engl. *rate of change of frequency*, ROCOF, df/dt) naj češća je zaštitna funkcija koja se primjenjuje u detekciji otočnog pogona kod distribuiranih izvora, pa tako i kod izmjenjivača. Razlog za to je jednostavnost metode i jednostavnost te ekonomičnost primjene metode u izmjenjivaču. Trenutno nakon pojave otočnog rada, razlika (debalans) snaga proizvodnje i potrošnje u lokalnoj otočnoj mreži utječe na dinamičnu promjenu frekvencije (kako je opisano u Poglavlju 3.6.2.). Ta promjena (df/dt) mjeri se kroz nekoliko perioda (obično 2 do 50 perioda) i ako mjerena vrijednost prelazi podešeni prag duže od podešenja vremenskog zatezanja ove zaštite, izmjenjivač se isključuje.

Praksa u primjeni pokazala je da je optimalna vrijednost podešenja prorade ove funkcije 0,3 Hz/s kod manjih i srednjih jedinica, s vremenskim zatezanjem od 0,3-0,7 s, a kod ekstremnijih brzina promjene frekvencije, brži stupanj može biti podešen na proradu u vremenu od nekoliko perioda [39, 40].

Prednost ove metode u slučaju izmjenjivača je to što brzina promjene frekvencije sustava kod debalansa snage ovisi obrnuto proporcionalno o inerciji pohranjenoj u sustavu, tj. momentima tromosti zamašnih masa koje su posredno priključene na električnu mrežu. Kako izmjenjivači kao uređaj energetske elektronike nemaju rotacijskih dijelova, nemaju niti inerciju, pa je brzina promjene frekvencije znakovito brža nego kod distribuiranih izvora s sinkronim ili asinkronim generatorima.

Nedostatak metode je također određivanje graničnih vrijednosti brzine promjene frekvencije za podešenje pragova prorade. Uklopi i isklopi većih tereta ili kvarovi u mreži mogu također uzrokovati brzu dinamičku promjenu frekvencije i uzrokovati neselektivnu proradu ove zaštitne funkcije i nepotrebno isključenje izmjenjivača.

5.2.2. Aktivne metode integrirane u izmjenjivačima

5.2.2.1. Mjerenje promjene izlazne snage i impedancije

U pojedinoj literaturi se ova metoda dijeli na dvije metode, ali koriste isti princip rada. Izlazna struja izmjenjivača definirana je relacijom:

$$i_{izmj} = I_{izmj} \cdot \sin(\omega_{izmj}t + \Phi_{izmj}) \quad (6)$$

gdje je:

i_{izm} - izlazna struja izmjenjivača,

ω_{izm} - kružna frekvencija,

I_{izm} - amplituda izlazne struje izmjenjivača,

Φ_{izm} - fazni pomak.

Sve tri veličine s desne strane relacije mogu biti narušene što će dovesti do poremećaja izlazne struje izmjenjivača. Promjena izlazne struje izmjenjivača uzrokuje i promjenu impedancije ($d v_{izm}/d i_{izm}$). Stoga pojedini izmjenjivači prate impedanciju mreže, a pojedini snagu.

Impedancija mreže kad je uključeno mrežno napajanje je izuzetno mala, a ispadom mrežnog napajanja naglo se povećava. Stoga je potrebno podesiti graničnu vrijednost impedancije u izmjenjivaču na dovoljno malu vrijednost kako bi se ispadom mrežnog napajanja signaliziralo povećanje impedancije što rezultira proradom zaštite i ispadom izmjenjivača.

Promjena amplitude izlazne struje izmjenjivača uzrokuje promjenu izlazne snage što također signalizira otokni rad ako vrijednost prijeđe graničnu vrijednost podešenja zaštite u izmjenjivaču.

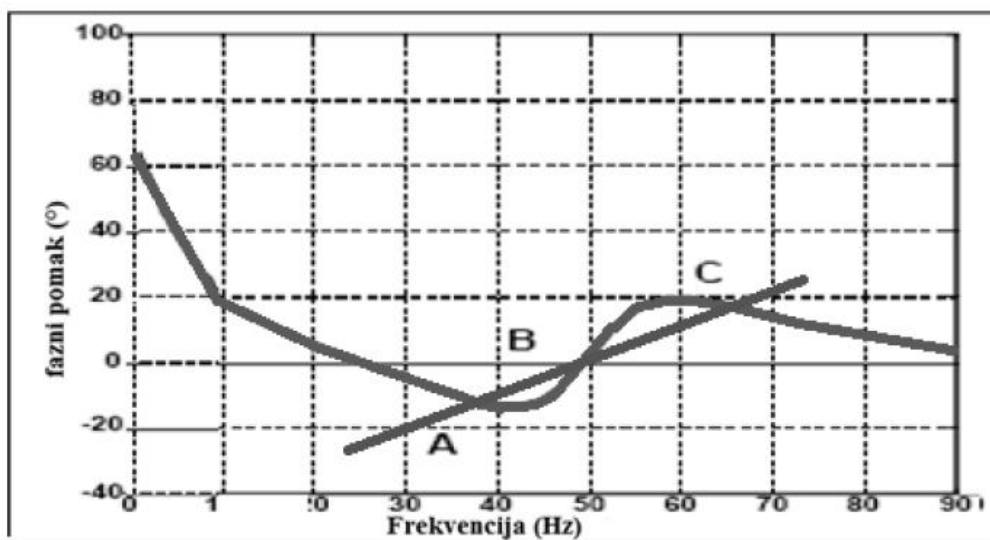
Prednost ove metode je njena visoka osjetljivost u detekciji otoknog rada, a zona u kojoj se otokni rad ne može detektirati je zanemarivo mala [36].

Nedostatak ove metode je što najbolje radi kad je samo jedan izmjenjivač spojen na mrežu. U slučaju više izmjenjivača, promjene struje više nisu toliko izražene osim ako se promjene zabilježe u svim izmjenjivačima ne sinkroniziraju na neki način. Sinkronizacija je tehnički izvodiva, ali nije ekonomična. Njome se i narušava kvaliteta električne energije [3].

5.2.2.2. Klizni pomak frekvencije

U normalnim radnim uvjetima izmjenjivač radi s jediničnim faktorom snage tako da je fazni kut između izlazne struje izmjenjivača i mrežnog napona jednak nula. Kod izmjenjivača koji primjenjuju metodu kliznog pomaka frekvencije za detekciju otoknog rada frekvencija postaje funkcija mrežnog napona (Slika 5-4). Na Slici 5-4 radna krivulja izmjenjivača je prikazana kao S-krivulja, a pravac predstavlja radnu krivulju RLC tereta. Točka B označava radnu točku stabilnog stanja u mreži, a izlazna struja izmjenjivača i napon mreže su u fazi. Izmjenjivač je projektiran tako da krivulja faznog odziva u blizini točke B ima veći koeficijent smjera od odziva RLC tereta. Stoga se pri nestanku mrežnog napajanja otok stabilizira u novoj

radnoj točki A ili C, ovisno o odnosu proizvodnje izmjenjivača i lokalne potrošnje, a period do stabilizacije predstavlja nestabilno stanje sustava. Ako je izmjenjivač dobro projektiran, točke A i C se nalaze izvan granica pod/nad. frekvencijske zaštite te dolazi do njene prorade i isključenja izmjenjivača.



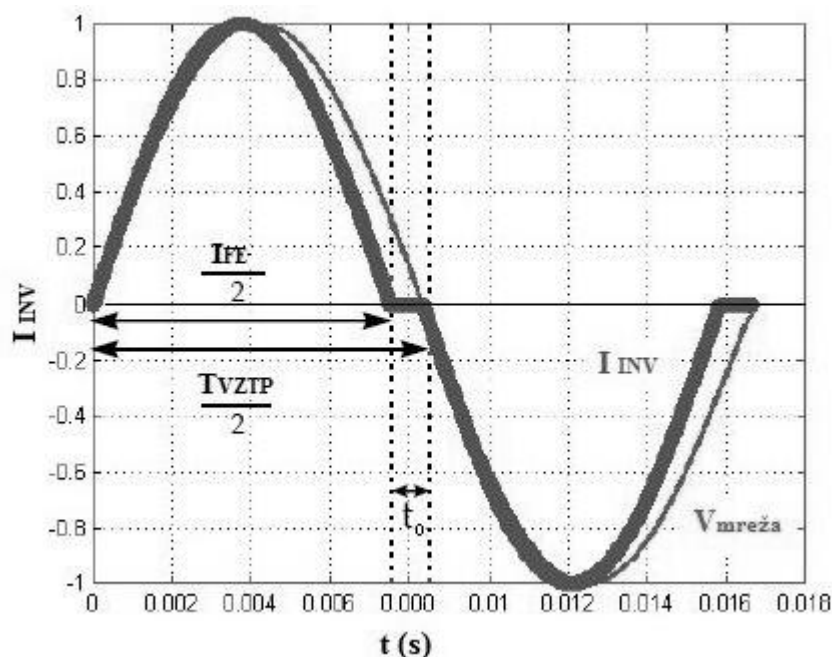
Slika 5-4 Radne krivulje izmjenjivača i RLC tereta [36]

Prednosti ove metode je relativno laka implementacija jer zahtjeva male izmjene na projektiranju izmjenjivača. Vrlo je učinkovita, a zona u kojoj ne detektira otočni rad je zanemarivo mala. Također, učinkovita je i u mrežama s više izmjenjivača, a narušavanje kvalitete električne energije je također malo [36].

Nedostatak je što ipak djelomično narušava kvalitetu napona, što može doći do izražaja kod velikog broja invertera spojenih na jedan izvod [38].

5.2.2.3. Aktivna promjena frekvencije

Kod metode aktivne promjene frekvencije (aktivno klizanje frekvencije, engl. *active frequency drift*) izmjenjivač generira struju s malim faznim pomakom u odnosu na napon na mjestu priključka, tj. pomoću ugrađenih mikro kontrolera izobliči valni oblik izlazne struje na način da povećava frekvenciju polovice valnog oblika izlazne struje, a zatim drži struju na nuli dok ne dostigne frekvenciju vala mrežnog napona (Slika 5-5). Isto se ponavlja i u drugoj poluperiodi sinusnog vala.



Slika 5-5 Prikaz valnog oblika izlazne struje izmjenjivača s aktivnim odstupanjem frekvencije i struje u krutoj mreži [36]

U normalnom pogonu kad je elektrana priključena na krutu mrežu, ova promjena frekvencije ne utječe na frekvenciju mreže. Međutim, u slučaju nastanka otočnog rada, frekvencija napona će se povećati jer napon prati izlaznu struju izmjenjivača te nastoji presjeći X_{os} u istoj točki vremena kao i izlazna struja izmjenjivača. S obzirom da je valni oblik struje narušen, nastaje greška u fazi zbog razlike u vremenu početka druge poluperiode vala t_0 . Izmjenjivač registrira tu faznu razliku i povećava frekvenciju izlazne struje kako bi eliminirao grešku u fazi. To opet uzrokuje povećanje frekvencije napona mreže. Ovaj ciklus se ponavlja sve dok frekvencija ne prijeđe granice frekvencijske zaštite invertera koja će potom odspojiti elektranu od mreže [37].

Prednosti ove metode su laka implementacija i relativno jeftina izvedba što je bitno za tipizirane izmjenjivače manjih elektrana. Ova metoda je vrlo učinkovita u detekciji otočnog rada te je zona u kojoj se otočni rad ne može detektirati gotovo zanemariva. Razni proizvođači izmjenjivača su zbog primjene ove metode morali postići dogovor oko istog smjera diskontinuiteta strujnog vala kako se različit izmjenjivači priključeni na istu mrežu ne bi poništavali i na taj način ometali detekciju otočnog rada [36].

Nedostatak ove metode je, kao i kod svih aktivnih metoda, to što narušava kvalitetu električne energije zbog slanja smetnji u mrežu. Smetnje pojedinog izmjenjivača ne predstavljaju veliki problem za krutu mrežu, ali veliki broj takvih izmjenjivača može narušiti

postojeću kvalitetu električne energije u mreži. Također, diskontinuirani valni oblik struje može uzrokovati radijsko-frekvencijsku interferenciju [38].

Varijacije ove metode su i klizajući pomak frekvencije (engl. *slip-mode frequency shift*), Sandia pomak frekvencije (engl. *Sandia frequency shift*) i skok frekvencije (engl. *frequency jump*). Npr. metoda Sandia pomak frekvencije koristi tehniku prekidanja izlazne struje u kratkom intervalu na početku poluperiode mijenjajući tako frekvenciju izlazne struje. Kad je izmjenjivač spojen na čvrstu mrežu, mjerena frekvencija napona na priključku neće doživjeti značajnu promjenu, ali u slučaju otopenog rada invertera bez čvrste mreže, u vremenu od nekoliko perioda, uneseni pomak frekvencije će, pozitivnom povratnom vezom, prouzročiti otklizavanje frekvencije napona na mjestu priključka izvan dozvoljenih granica [26].

5.3. Standardi

Standardizacija ovog područja nije harmonizirana. Postoji više referentnih standarda koje primjenjuju proizvođači izmjenjivača u različitim zemljama. Standardi koji obrađuju otopeni pogon izmjenjivača definiraju procedure ispitivanja i zahtjeve koje izmjenjivač mora ispuniti pri ispitivanju da bi zadovoljio standard. Standardi obrađuju tipična tvornička ispitivanja, i to za pojedinačne izmjenjivače.

Na slici 5-6 prikazana je principna shema za ispitni strujni krug za standardom definirana ispitivanja sposobnosti izmjenjivača za prepoznavanje otopenog rada. U krug je priključen nadomjesni teret, uređaj s mogućnošću regulacije radnog otpora (R), induktiviteta (L) i kapaciteta (C), koji se podešavaju u skladu s zahtjevima propisanim standardom. Svi standardi za takav teret definiraju traženi faktor dobrote, pri kojem se vrše ispitivanja. Faktor dobrote odgovara omjeru ukupno pohranjene energije (jalove) i ukupno potrošene energije (radne) za vrijeme jedne periode (2π) na određenoj frekvenciji, a definiran je (za paralelni RLC krug) prema IEC 62116 kao [41]:

$$Q_f = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (7)$$

gdje je:

Q_f - faktor dobrote potrošača,

R - radni otpor potrošača,

L - induktivitet potrošača,

C - kapacitet potrošača.

Na osnovnoj frekvenciji energetskog sustava, za rezonantni krug koji troši radnu snagu P , induktivnu jalovu snagu Q_L i kapacitivnu jalovu snagu Q_C , faktor dobrote Q_f je:

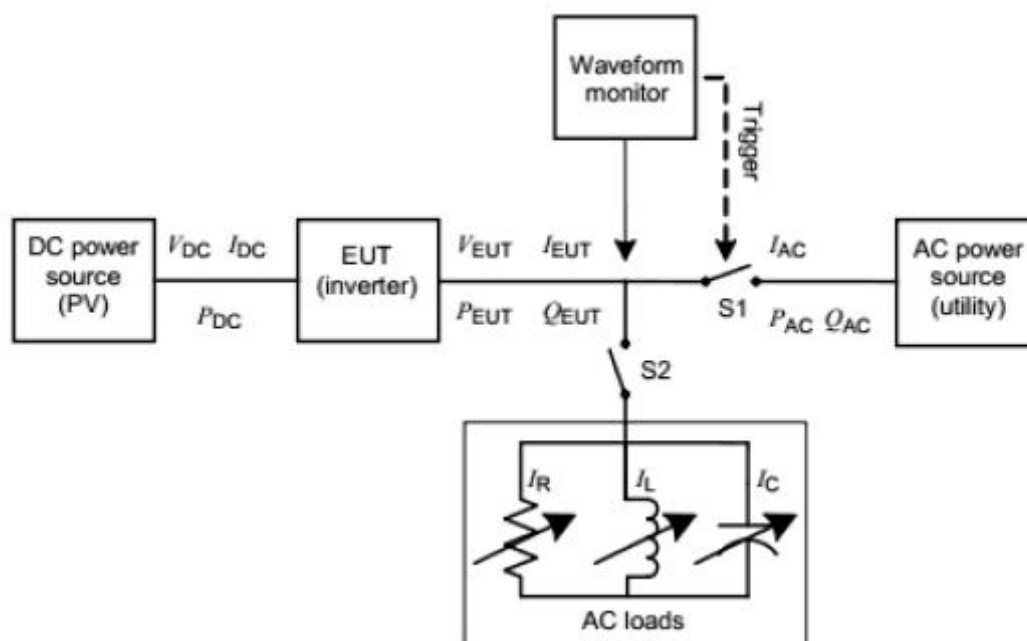
$$Q_f = \frac{1}{P} \cdot \sqrt{|Q_L| \cdot |Q_C|} \quad (8)$$

gdje je:

P - radna snaga (u W),

Q_L - induktivna snaga (u VAR_L),

Q_C - kapacitivna snaga (u VAR_C).



Slika 5-6 Principna shema ispitnog strujnog kruga za ispitivanje sposobnosti detekcije otočnog rada izmjenjivača [41]

Tablica 5-1 prikazuje usporedbu traženih vrijednosti Q_f , zahtijevanog vremena detekcije otočnog rada i graničnim vrijednostima napona i frekvencije prema razli čitim standardima koji obrađuju otočni rad izmjenjivača [14].

Faktor dobrote od 1 odgovara faktoru snage potrošnje od 0,7. U tom smislu standardi su uglavnom prilično rigorozni obzirom da realni uvjeti u mrežama odgovaraju manjim faktorima

dobrote. Manji faktor dobrote odgovara i manjim zonama neprepoznavanja otočnog rada zaštitnih funkcija koje su integrirane u izmjenjivače. S druge strane, može se primjetiti da propisana vremena detekcije prilično variraju od standarda do standarda, a vrijeme od 2 s ne zadovoljava neke od zahtjeva operatera mreže, posebno za slučaj kad u mreži postoji brzi APU. Najrigorozniji zahtjev je u njemačkom standardu, vrijeme detekcije od 0,2 s, u kojem slučaju je jedino to vrijeme kraće od vremena beznaponske pauze brzog APU-a.

Tablica 5-1 Pregled zahtjeva prema različitim standardima koji obrađuju otočni rad izmjenjivača [14]

	Faktor dobrote Q_f	Zahtjevano vrijeme detekcije	Nazivni raspon frekvencije	Nazivni raspon napona (u %)
IEC 62116	1	< 2 s	48,5 - 51,5 Hz	85 - 115%
IEEE 1547	1	< 2 s	59,3 - 60,5 Hz	88 - 110%
IEEE 929-2000	2,5	< 2 s	59,3 - 60,5 Hz	88 - 110%
Japanski standard	0(+motor)	pasivna < 0,5s aktivna $0,5 < t < 1s$	podešenje proizvođača	podešenje proizvođača
Korejanski standard	1	< 0,5 s	59,3 - 60,5 Hz	88 - 110%
VDE 0126-1-1	2	< 0,2 s	47,5 - 50,2 Hz	80 - 115%
AS4777.3-2005	1	< 2 s	proizvođač	proizvođač

5.4. Problem više izmjenjivača i uspješne zaštite od otočnog pogona

Kod mikro elektrana koje su na mrežu spojene jednim izmjenjivačem su i primijenjene i predložene metode zaštite od otočnog rada dobro istražene te postoje i standardom definirane preporuke za procedure ispitivanja mjera zaštite od otočnog rada, kako je navedeno u prethodnom poglavlju [41].

Problem kod prethodno opisanih većih elektrana sastavljenih od više izmjenjivača je što integrirane metode pojedinih izmjenjivača, pogotovo aktivne, koje imaju najbolju pouzdanost pri otkrivanju otočnog pogona, mogu međusobno interferirati ako svi izmjenjivači nisu međusobno sinkronizirani [42], pa nisu pouzdane u ovom slučaju. Osim toga, velik broj izmjenjivača i velika relativna snaga utječe i na relativnu veličinu poremećaja koji aktivne

metode detekcije potencijalno unose u mrežu, s negativnim utjecajem na kvalitetu električne energije, stabilnost napona, flikere i slično.

Najpoznatije metode otkrivanja otočnog pogona u ovom slučaju bile bi prethodno opisane komunikacijske metode temeljene na sustavu daljinskog vođenja operatera, koje se ne razlikuju od prethodno opisanog slučaja kad su primijenjene za pojedinačni izmjenjivač. Ali one se i u ovom slučaju zbog velikih troškova smatraju neekonomičnima.

U slučaju elektrana koje su predmet ovog istraživanja, velikih fotonaponskih sustava s više izmjenjivača, preporučuje se ne oslanjanje samo na integrirane metode detekcije i zaštite od otočnog rada izmjenjivača, već korištenje dodatnih neintegriranih zaštitnih uređaja s nekom od zaštitnih metoda, u točki priključka cjelokupne elektrane na mrežu [43].

5.5. Motiv definiranja metode provedbe proračuna/procjene vjerojatnosti otočnog rada proučavanog tipa elektrana

Istraživanja koja se bave razvojem metoda i shema zaštite idu u smjeru eliminacije zone neprepoznavanja zaštitne metode, ali potpuno pouzdane metode nisu u primjeni zbog nekih drugih ograničenja (nepostojanje tehnologije, izuzetna skupoća, negativan utjecaj na parametre kvalitete električne energije), kako je opisano u prethodnim dijelovima ovog rada. Stoga kod metoda u realnoj primjeni vjerojatnost pojave otočnog rada teoretski postoji.

Kako je navedeno u Poglavlju 4.4, planiranje shema zaštite od otočnog rada treba biti bazirano na principu ocjene rizika, na temelju konfiguracije sustava, načina pogona izvora i odziva generatora [24].

Ocjena rizika i ocjena vjerojatnosti pojave rizičnog pogona usko su povezane te je stoga jasno da je procjenu vjerojatnosti pojave otočnog rada za bilo koju primijenjenu shemu zaštite potrebno napraviti. To vrijedi za bilo koji tip distribuiranog izvora. Preporuka dalje navodi da se ocjena vjerojatnosti provodi na temelju konfiguracije sustava te specifičnosti izvora i odziva generatora.

Specifičnosti proučavanog tipa elektrana također su detaljno elaborirane u prethodnom dijelu ovog rada. Konfiguracija same elektrane i odziv „generatora“ su izrazito specifični i jedinstveni. Kod izmjenjivih jedinica nema inercije ili tromosti iz razloga što nemaju rotacijskih zamašnih masa, pa nemaju niti kinetičku energiju pohranjenu u njima. Dnevni dijagram proizvodnje elektrane ovisan je o količini prikupljene sunčeve energije u pojedinom trenutku. Veći broj pojedinačnih izvora spojen je na istom mjestu zajedničkog priključka na mrežu operatera kao jedna jedinstvena elektrana. Osim integriranih metoda zaštite u

izmjenjivačima potrebna je primjena neovisne metode u točki priključka na mrežu cjelokupne elektrane.

Uzimajući u obzir sve navedeno u nastavku rada bit će definirana metoda procjene vjerojatnosti koja prepoznaje specifičnosti proučavanog tipa elektrana i daje pouzdani ulazni podatak za potrebnu ocjenu rizika povezanih s takvim neželjenim pogonom.

Prije definiranja metode procjene vjerojatnosti, u slijedećem poglavlju obradit će se dijagram proizvodnje (radne i jalove snage) elektrane u točki priključka na mrežu, jer je to također specifičnost proučavanog tipa elektrana koja utječe na vjerojatnost pojave neželjenog otočnog pogona.

6. MODEL IZRADE POGONSKE KARTE FOTONAPONSKE ELEKTRANE PRIKLJUČENE NA MREŽU SREDNJEG NAPONA

Jedan od očekivanih izvornih znanstvenih doprinosa ovog rada jest prijedlog modela izrade pogonske karte, tj. P-Q dijagrama na mjestu priključka fotonaponske elektrane, sastavljene od više izmjenjivačkih jedinica, na mrežu srednjeg napona.

U ovom poglavlju analizirat će se zato struktura tipične fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača koja se priključuje na mrežu srednjeg napona. Teoretski će se odrediti doprinosi ukupnoj radnoj i jalovoj snazi svih elemenata od kojih je elektrana sastavljena. Na osnovu toga definirat će se P-Q dijagram svih mogućih radnih točaka elektrane na mjestu priključka na mrežu.

Provedena mjerenja na stvarnoj elektrani će se iskoristiti da se izvrši usporedba s izračunatim vrijednostima i naprave potrebne korekcije modela.

Definirani P-Q dijagram poslužit će u nastavku rada za izračun vjerojatnosti pojave točnog rada proučavanog tipa elektrana.

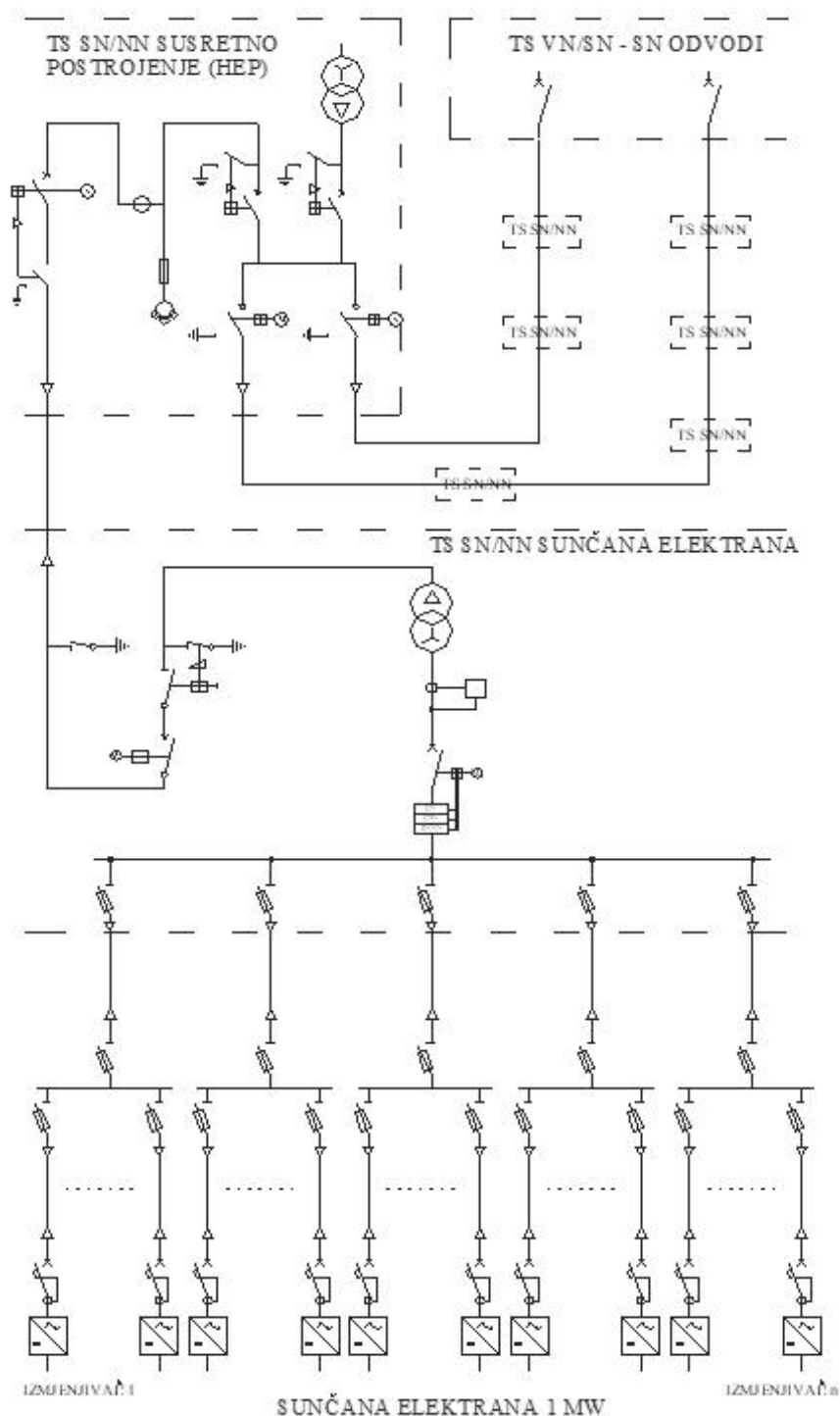
6.1. Principna shema fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona

Kod razmatranog specifičnog tipa elektrana, iako je točka priključka na mreži srednjeg napona (10 ili 20 kV), sam(i) izvor(i) se spaja(ju) na niskonaponskoj razini, te se preko „blok“ transformatora spaja na SN mrežu. Dva su osnovna tipa, s centralnim izmjenjivačem velike snage ili s više izmjenjivačkih jedinica manjih snaga. U praksi se pokazalo da su zahtjevi gotovo isključivo za elektrane s više manjih izmjenjivačkih jedinica koje su tipski proizvodi i ekonomski su isplativiji investitoru [44].

Principna shema (sunčane fotonaponske) elektrane sastavljene od više mrežnih izmjenjivačkih jedinica i priključene na mrežu srednjeg napona [45] prikazana je na Slici 6-1. Prikazan je simbolički i dio odvoda mreže na koju je elektrana priključena.

Elektrana se obično priključuje na neki od postojećih srednjenaponskih izvoda iz transformatorske stanice VN/SN, na kojem već postoji određeni broj SN/NN transformatorskih stanica sa svojim potrošačima. Priključak se izvodi preko dvaju postrojenja: transformatorske stanice elektrane i susretnog postrojenja operatora sustava [46]. Točka priključka elektrane na mrežu je u susretnom postrojenju, u odvodnom polju prema transformatorskoj stanici elektrane. Odvod na koji se priključuje u pogonu je, gledajući napajanje sa strane mreže, tj. pojne transformatorske stanice, radijalno napajan, a u pravilu ima mogućnost napajanja i s druge

strane, obično s druge sekcije srednjenaponskog postrojenja iste pojne stanice ili iz neke druge pojne VN/SN stanice. Uklopno stanje, ovisno o pogonskim prilikama, određuje operater sustava.



Slika 6-1 Principna shema sunčane elektrane s više mrežnih izmjenjivačkih jedinica priključene na mrežu srednjeg napona [45]

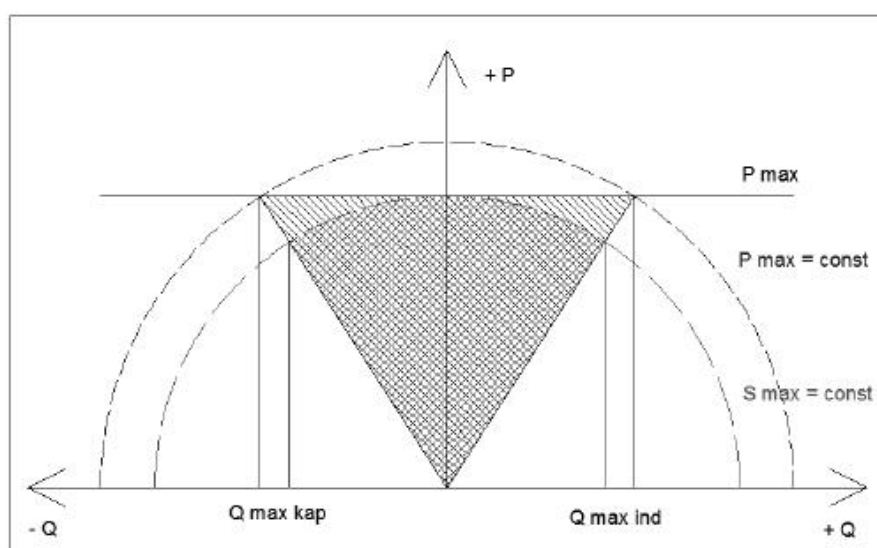
6.2. Nadomjesni model

U skladu sa prethodno navedenim, moguće je elektranu (i mrežu) sa Slike 6-1 prikazati nadomjesnim modelom u kojem nadomjesni izvor (elektrana) obuhvaća cjelokupnu unutarnju mrežu elektrane sa svim izmjenjivačima, transformatorom i SN kabelom do točke priključka u susretnom postrojenju. Na taj način nadomjesno prikazana elektrana može se definirati u točki priključka (sučelje na mrežu) s dva parametra, radnom snagom i jalovom snagom koju u toj točki razmjenjuje s mrežom, što je obrađeno u nastavku.

6.3. Pogonska karta

Uzimajući u obzir da je točka priključka elektrane na mrežu u susretnom postrojenju, u odvodnom polju prema transformatorskoj stanici elektrane [46], te obzirom na namjeru prikaza elektrane nadomjesnim modelom kako je navedeno u prethodnom poglavlju, takav model distribuiranog izvora u točki priključka definirat će P-Q dijagram s radnim područjem elektrane, tj. „pogonska karta“ elektrane.

Bitno je ovdje naglasiti da sami izmjenjivači, kao osnovni izvori u ovom tipu elektrane, imaju podesiv faktor snage. Neki proizvođači deklariraju sposobnost proizvodnje radne i jalove snage svojih izmjenjivača krivuljama mogućnosti pogona u P-Q dijagramu, za točke maksimalne prividne snage, kao na slici 6-2 [36, 47].



Slika 6-2 Primjer krivulje mogućnosti pogona pojedinog izmjenjivača deklarirana od strane proizvođača

Iz pragmatičnog razloga, tj. želje vlasnika elektrane za proizvodnjom maksimalno moguće radne snage (jer se otkupljuje isključivo radna energija predana u mrežu), u praksi se izmjenjivači podešavaju isključivo tako da predaju samo radnu energiju, tj. da rade sa faktorom snage 1. Stoga pri izradi pogonske karte elektrane vodimo računa o ovoj realnoj pojavi, na što će biti obraćena posebna pažnja. Teoretski će se obraditi mogućnost različitog podešenja faktora snage izmjenjivača, ali će se maksimalno uvažavati realnost i realna situacija da je faktor snage podešen na 1.

6.4. Doprinosi pojedinih elemenata

Na radnu snagu elektrane najviše utjecaja naravno ima snaga koju generiraju fotonaponski paneli i koja se s istosmjernog dijela, preko izmjenjivača, predaje u izmjeničnu mrežu elektrane. Na ostalim elementima izmjenične mreže dolazi do određenih gubitaka te radne snage koja se disipira na radnim otporima pojedinih elemenata. Na jalovu snagu elektrane utječu svi elementi. U nastavku su navedeni načini izračuna ili procjene doprinosa pojedinih elemenata elektrane ukupnoj radnoj i jalovoj snazi u točki priključka.

Na radnu točku elektrane, što se tiče jalove snage, očekivano je zasad da presudan utjecaj imaju svi elementi sustava elektrane, uvažavajući specifičnosti izmjenjivača (vjerojatno podešenje faktor snage na 1). Ostali elementi su u biti energetski transformator (utjecaj na iznos induktivne jalove snage) te niskonaponski i srednjenaponski kabeli (utjecaj na iznos kapacitivne jalove snage). Poseban slučaj je kod sunčanih elektrane kod kojih su paneli spojeni izmjenjivačima bez galvanskog odvajanja istosmjerne i izmjenične strane (što je najčešći slučaj) te se parazitne impedancije panela fotoćelija prenose na izmjeničnu stranu [48]. Ovisno o veličini solarnog polja i načinu montaže panela ova kapacitivna snaga može biti značajna u noćnom režimu rada elektrane kada dominira (posebno izraženo kod manjih elektrana).

6.5. Radna snaga (P) elektrane u točki priključka

Utjecaj pojedinačnih elemenata na ukupnu radnu snagu fotonaponske elektrane u točki priključka na mrežu srednjeg napona objašnjen je u nastavku.

6.5.1. Izmjenjivači

Izmjenjivači su u ovom tipu elektrana „generatori“ električne energije. Istosmjerni dio sustava u kojem su izvor zapravo fotonaponske ćelije, u ovom slučaju je tehnološki dio i nije bitan u ovom razmatranju. Gledano na strani izmjeničnog sustava, izmjenjivači predaju snagu u mrežu i promatramo ih kao primarni izvor izmjenične struje.

Obzirom da investitor elektrane, kako je već navedeno, obično želi ekonomično optimizirati proizvodnju, podešeni faktor snage izmjenjivača je u pravilu isključivo 1. No izmjenjivači, kao uređaj energetske elektronike, imaju fleksibilne mogućnosti proizvodnje radne i jalove snage, što je vidljivo na slici 6-2. Ovisno o podešenom faktoru snage ovisi i radna snaga izmjenjivača. Iznos radne snage izmjenjivača dan je slijedećom formulom:

$$P_{izm_i} = S_{izm_i} \cdot \cos \varphi_{izm_i} \quad (9)$$

gdje su:

P_{izm_i} - radna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani,

S_{izm_i} - prividna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani,

$\cos \varphi_{izm_i}$ - podešeni faktor snage pojedinog izmjenjivača u elektrani.

Stoga je ukupni utjecaj svih izmjenjivača na radnu snagu elektrane jednak zbroju trenutnih pojedinačnih snaga svakog od izmjenjivača:

$$P_{izm_uk} = \sum_{i=1}^n P_{izm_i} \quad (10)$$

gdje je:

P_{izm_uk} - ukupna proizvedena radna snaga svih izmjenjivača u određenom trenutku.

Najviša ukupna snaga jednaka je zbroju nazivnih snaga svih ugrađenih izmjenjivača i vrijedi:

$$P_{izm_uk_max} = \sum_{i=1}^n P_{izm_i_naz} \quad (11)$$

gdje su:

$P_{izm_uk_max}$ - najviša moguća ukupna radna snaga svih n izmjenjivača,

$P_{izm_i_naz}$ - nazivna radna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani.

6.5.2. Niskonaponski kabeli

Na niskonaponskim kabelima (na radnim otporima kabela) dolazi do disipacije radne snage koja se prenosi tim kabelima. Gubici na pojedinim kabelima mogu se izračunati pomoću relacije (12):

$$\Delta P_{kab_i} = \sqrt{3} \cdot R_{kab_i} \cdot I_{kab_i}^2 = \sqrt{3} \cdot R_{kab_i} \cdot \left(\frac{P_{kab_i}}{\sqrt{3} \cdot U_f} \right)^2 = \sqrt{3} \cdot R_{kab_i} \cdot \left(\frac{k \cdot P_{kab_i_naz}}{\sqrt{3} \cdot U_f} \right)^2 \quad (12)$$

gdje su:

ΔP_{kab_i} - gubici radne snage na i -tom kabelu (i -toj dionici kabela),

R_{kab_i} - vrijednost radnog otpora i -tog kabela,

I_{kab_i} - struja koja teče kroz i -ti kabel,

P_{kab_i} - vrijednost radne snage koja teče kroz i -ti kabel,

U_f - fazni napon (NN),

k - udio radne snage koja teče u nekom trenutku u ukupno mogućoj (nazivnoj radnoj snazi),

$P_{kab_i_naz}$ - nazivna radna snaga, najveća za koju se može očekivati da će teći pojedinim kabelom (dionicom kabela).

Vrijednost radnog otpora i -te dionice kabela moguće je izračunati iz poznatih podataka o kabelima:

$$R_{kab_i} = R_{spec_kab_i} \cdot l_{kab_i} \quad (13)$$

gdje su:

$R_{spec_kab_i}$ - vrijednost specifičnog radnog otpora i -tog kabela (Ω/km),

l_{kab_i} - duljina i -tog kabela.

Sa principne sheme elektrane na slici 6-1, vidi se da se na pojedinom niskonaponskom kabelu može za nazivnu radnu snagu kabela (dionice) očekivati maksimalna snaga jednog

izmjenjivača (prva dionica kabela do prvog razvodnog ormara) ili zbroj maksimalnih snaga nekoliko izmjenjivača priključenih na razvodni ormar (na drugoj dionici kabela između razvodnog ormara i glavnog razvoda). Vrijedi:

$$P_{kab_i_naz} = \sum_{i=1}^n P_{izmj_i_naz} \quad (14)$$

u kojoj relaciji je n broj izmjenjivača čija struja može teći kroz i -tu dionicu kabela.

Ukupne gubitci radne snage na niskonaponskim kabelima (ΔP_{kab_NN}) jednaki su zbroju gubitaka na svim kabelskim dionicama:

$$\Delta P_{kab_NN} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{kab_i} \quad (15)$$

gdje su $i=1$ do n niskonaponski kabeli u elektrani.

6.5.3. Transformator

U transformatoru se javljaju gubitci jer se snaga troši na magnetiziranje jezgre transformatora (gubitci u željezu ili gubitci u praznom hodu) i disipira na impedanciji namota transformatora (gubitci u namotima).

Gubitci zbog magnetiziranja jezgre ovise o naponu, a ne mijenjaju se kod različitog opterećenja transformatora, dok gubitci u namotima ovise o opterećenju transformatora u pogonu, tj. rastu s kvadratom struje koja teče kroz namote.

Navedeno se odnosi općenito na gubitke u transformatoru, a vrijedi i što se tiče same radne snage. Za gubitke radne snage vrijedi slijedeća relacija:

$$\Delta P_{tr} = \Delta P_{ks} + P_0 = k^2 \cdot P_{ks} + P_0 \quad (16)$$

gdje su:

ΔP_{tr} - gubitci radne snage u transformatoru,

ΔP_{ks} - gubitci u namotima,

P_0 - (nazivni) gubitci radne snage zbog magnetiziranja (gubitci u praznom hodu),

P_{ks} - nazivni gubici radne snage u namotima (gubici u kratkom spoju),

k - udio radne snage koja teče u nekom trenutku u ukupno mogućoj (nazivnoj radnoj snazi transformatora),

Nazivni gubici u praznom hodu (P_0) i nazivni gubici u kratkom spoju (P_{ks}) su podaci koje u pravilu deklarira proizvođač transformatora i kao takvi su poznati ulazni podaci za izračun ostalih vrijednosti (gubitaka radne i jalove snage).

6.5.4. Srednjenaponski kabel

Vrijednosti gubitaka radne snage na srednjenaponskom kabelu se mogu izračunati također pomoću relacije (12). Obzirom da ima samo jedan SN kabel, vrijedi:

$$\Delta P_{kab_SN} = \sqrt{3} \cdot R_{kab_SN} \cdot I_{kab_SN}^2 = \sqrt{3} \cdot R_{kab_SN} \cdot \left(\frac{k \cdot P_{kab_SN_naz}}{\sqrt{3} \cdot U_f} \right)^2 \quad (17)$$

gdje su:

ΔP_{kab_SN} - gubici radne snage na SN kabelu,

R_{kab_SN} - vrijednost radnog otpora SN kabela,

I_{kab_SN} - struja koja teče kroz SN kabel,

U_f - fazni napon (SN),

$P_{kab_SN_naz}$ - najveća radna snaga za koju se može očekivati da će teći SN kabelom.

6.5.5. Vlastita (kućna) potrošnja

Ukoliko u elektrani postoje potrošači (i) radne snage koji su spojeni u dijelu prije mjesta priključka na mrežu operatera sustava (na niskom ili na srednjem naponu), ukupna radna snaga tih potrošača zapravo je gubitak snage u elektrani i treba se takođe uzeti u obzir. Obzirom da je iznos te snage (P_{vp}) karakteristika potrošača, tretiramo ga kao gotovi ulazni parametar koji ulazi u ukupan zbroj pri izračunu ukupne radne snage elektrane. Međutim, treba naglasiti da ona uglavnom nije stalna.

6.5.6. Ukupna radna snaga elektrane

Da bi se dobila ukupna radna snaga elektrane nužno je zbrojiti sve prije navedene snage i gubitke na pojedinim elementima:

$$P_{uk} = P_{izm_uk} - \Delta P_{kab_NN} - \Delta P_{tr} - \Delta P_{kab_SN} - P_{vp} \quad (18)$$

gdje je:

P_{uk} - ukupna radna snaga elektrane u točki priključka na SN mrežu operatera sustava u datom trenutku,

P_{vp} - radna snaga potrošača vlastite potrošnje elektrane.

6.6. Jalova snaga (Q) elektrane u točki priključka

Utjecaj pojedinačnih elemenata na ukupnu jalovu snagu fotonaponske elektrane u točki priključka na mrežu srednjeg napona objašnjen je u nastavku.

6.6.1. Izmjenjivači

Obzirom na način generiranja jalove snage, postoji velika šarolikost kod različitih proizvoda (izmjenjivača). Najbolji izmjenjivači su sposobni davati bilo koju jalovu snagu (slika 6-2), u skladu sa podešenim zahtjevima za automatsku kontrolu faktora snage. Kako je već više puta naglašeno, obzirom da investitor elektrane u stvarnosti obično želi ekonomično optimizirati proizvodnju, podešeni faktor snage je u pravilu 1.

Kod nekih izmjenjivača u praznom hodu javlja se problem. Izmjenjivač tada nema snagu na ulazu pa nema ni izlazne struje, ni regulacije izlaznog faktora snage. Izlazni L-C filter pri nominalnoj frekvenciji izmjenične mreže kapacitivnog je karaktera i pri praznom hodu dominira, pa su tada ti izmjenjivači proizvođači čiste jalove snage veličine nekoliko postotaka nazivne snage izmjenjivača [49].

Kod fotonaponskih elektrana kod kojih su paneli spojeni preko izmjenjivača bez galvanskog odvajanja istosmjerne i izmjenične strane se parazitne impedancije panela fotoćelija prenose na izmjeničnu stranu [48]. Ovisno o veličini solarnog polja i načinu montaže panela ova kapacitivna snaga može biti značajna i kreće se oko nekoliko postotaka nazivne snage elektrane kod jednofaznih izmjenjivača bez galvanskog odvajanja.

6.6.1.1. Jalova snaga izmjenjivača uz podešeni faktor snage

Izmjenjivači, kao uređaji energetske elektronike, imaju fleksibilne mogućnosti proizvodnje radne i jalove snage, što je vidljivo na slici 6-2. Ovisno o podešenom faktoru snage mijenja se i jalova snaga izmjenjivača. Iznos jalove snage izmjenjivača dan je slijedećom formulom:

$$Q_{izm_i} = S_{izm_i} \cdot \sin \varphi_{izm_i} \quad (19)$$

gdje su:

Q_{izm_i} - jalova snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani,

S_{izm_i} - prividna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani,

$\sin \varphi_{izm_i}$ - sinus kuta faktora snage pojedinog izmjenjivača u elektrani.

Stoga je ukupni utjecaj svih izmjenjivača na jalovu snagu elektrane jednak zbroju trenutnih pojedinačnih snaga svakog od izmjenjivača:

$$Q_{izm_Σ} = \sum_{i=1}^n Q_{izm_i} \quad (20)$$

gdje je:

$Q_{izm_Σ}$ - suma proizvedene jalove snaga svih izmjenjivača u određenom trenutku.

6.6.1.2. Kapacitivna snaga izmjenjivača radi parazitnih kapaciteta na strani istosmjernog napona

U gotovo svih jednofaznih izmjenjivača bez galvanskog odvajanja (bez integriranog transformatora), pola amplitude mrežnog napona (115 V) prolazi na istosmjernu stranu i dolazi na fotonaponske (FN) module. U trofaznim izmjenjivačima ovaj efekat je značajno prigušen [49]. Kod izmjenjivača s transformatorima za galvansko odvajanje preneseni napon oscilira s valovitošću veličine samo nekoliko volta (2 V), mijenjajućí tako konstantno nabijenost parazitnih kapaciteta FN modula. U tom slučaju ova kapacitivna snaga je uglavnom zanemarive vrijednosti.

Kapacitivna struja koja se javlja zbog parazitnih kapaciteta polja fotonaponskih modula jednaka je [49]:

$$I_{izm_par} = C_{FN} \cdot \frac{\Delta Q_{FN}}{\Delta t} = C_{FN} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{par} \quad (21)$$

gdje su:

C_{FN} – parazitni kapacitet FN modula,

f – frekvencija mreže (50 Hz),

V_{par} - vrijednost prenesenog izmjeničnog napona na istosmjerni sustav (*ripple voltage*).

Kapacitet FN modula se može procijeniti iz:

$$C_{FN} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A_{FN}}{d_{FN}} \quad (22)$$

gdje su:

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm - konstanta permitivnosti vakuuma,

$\varepsilon_r = (5-10)$ - relativna konstanta permitivnosti stakla (od kojeg su izrađeni FN moduli),

A_{FN} - površina fotonaponskih panela,

d_{FN} - razmak između površina kondenzatora (debljina FN panela).

Ukupna kapacitivna jalova snaga svih izmjenjivača radi ovog efekta je:

$$Q_{izm_par} = 3 \cdot U_f \cdot I_{izm_par} = 6\pi \cdot U_f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A_{FN}}{d_{FN}} \cdot f \cdot V_{par} \quad (23)$$

gdje su:

Q_{izm_par} – ukupna kapacitivna jalova snaga svih izmjenjivača zajedno radi utjecaja parazitnih kapaciteta polja fotonaponskih modula,

U_f – fazni napon.

6.6.1.3. Ukupna jalova snaga koju predaju izmjenjivači

Ukupna jalova snaga izmjenjivača jednaka je zbroju podešene jalove snage i parazitne kapacitivne snage koja se javlja:

$$Q_{izm_uk} = Q_{izm_Σ} + Q_{izm_par} \quad (24)$$

gdje je:

Q_{izm_uk} – ukupna jalova snaga svih izmjenjivača zajedno.

Pri zbrajanju jalovih snaga potrebno je voditi računa o karakteru jalove snage. Induktivne jalove snage u računu unosimo s negativnim predznakom, a kapacitivne jalove snage s pozitivnim predznakom (obzirom da se razmatra elektrana, tj. proizvođač energije).

Relacija (24) ne vrijedi za prazni hod izmjenjivača (kad nema snage na istosmjernoj strani) i kada je izmjenjivač „ugašen“, a na izlaznom L-C filtru koji je pri nominalnoj frekvenciji izmjenične mreže kapacitivnog karaktera javlja se tada jalova kapacitivna snaga.

6.6.2. Niskonaponski kabeli

Niskonaponski kabeli povezuju izmjenjivače s transformatorom, kroz više zbirnih točaka u vidu razvodnih postrojenja (razvodnih ormara). U praznom hodu su uvijek blago kapacitivnog karaktera. Kako je ovisna i o naponu (koji je na niskonaponskoj strani relativno malen), tek u slučaju jako velikih duljina (velike površine elektrane) ova kapacitivna snaga može doći do značajnijeg izražaja. Induktivna komponenta ove jalove snage raste s porastom opterećenja.

Procjena ove vrijednosti, uz korištenje katalogskih podataka o kabelima, može se dobiti prema slijedećoj formuli:

$$Q_{kab_i} = 3 \cdot \frac{U_f^2}{X_{C_kab_i}} - 3 \cdot I_{kab_i}^2 \cdot X_{L_kab_i} = 6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f^2 \cdot C_{kab_i} \cdot l_{kab_i} - 6 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{S_{kab_i}^2}{U_f^2} \cdot L_{kab_i} \cdot l_{kab_i} \quad (25)$$

gdje su:

Q_{kab_i} - jalova snaga proizvedena/potrošena na i-tom kabelu,

U_f - fazni napon,

$X_{C_kab_i}$ - kapacitivna reaktancija i -tog kabela,

$X_{L_kab_i}$ - induktivna reaktancija i -tog kabela,

I_{kab_i} - struja koja teče kroz i -ti kabel,

C_{kab_i} - specifični kapacitet i -tog kabela,

L_{kab_i} - specifični induktivitet i -tog kabela,

l_{kab_i} - duljina i -tog kabela,

S_{kab_i} - snaga koja teče i -tim kabelom.

Za S_{kab_i} vrijedi da je:

$$S_{kab_i} = k \cdot S_{naz_kab_i} \quad (26)$$

gdje je:

k - faktor opterećenja kabela (udio snage koja teče u nekom trenutku u nazivnoj snazi (najvećoj snazi koja može teći kabelom u slučaju maksimalne proizvodnje izmjenjivača),

$S_{naz_kab_i}$ - nazivna snaga (najveća snaga koja može teći kabelom u slučaju maksimalne proizvodnje izmjenjivača) i -tog kabela.

Ukupna jalova snaga koja se javlja na niskonaponskim kabelima (Q_{kab_NN}) jednaka je zbroju jalovih snaga na svim kabelskim dionicama:

$$Q_{kab_NN} = \sum_{i=1}^n Q_{kab_i} \quad (27)$$

gdje su $i=1$ do n svi niskonaponski kabeli u elektrani.

6.6.3. Transformator

U transformatoru je jalova snaga potrebna za magnetiziranje jezgre transformatora, pa su stoga transformatori induktivnog karaktera u praznom hodu. Porastom opterećenja dolazi i do rasta induktivne jalove snage koja se troši na induktivitetima namota transformatora.

Vrijednost jalove snage može se izračunati iz slijedeće formule:

$$Q_{tr} = \Delta Q_0 + \Delta Q_{ks} = Q_0 + k^2 \cdot Q_{ks} = \sqrt{(i_0 \cdot S_n)^2 - P_0^2} + k^2 \cdot \sqrt{(u_k \cdot S_n)^2 - P_{ks}^2} \quad (28)$$

gdje su:

Q_{tr} – jalova snaga transformatora,

Q_0 – jalova snaga praznog hoda transformatora,

Q_k – jalova snaga transformatora ovisna o teretu,

k - faktor opterećenja transformatora (udio snage koja teče u nekom trenutku u nazivnoj snazi transformatora),

S_n – nazivna snaga transformatora,

i_0 – struja praznog hoda (%),

u_k – napon kratkog spoja (%),

P_0 - (nazivni) gubici radne snage zbog magnetiziranja (radni gubici u praznom hodu),

P_{ks} - nazivni gubici radne snage u namotima (radni gubici u kratkom spoju).

Struja praznog hoda (i_0) i napon kratkog spoja (u_k), nazivni gubici radne snage u praznom hodu (P_0) i u kratkom spoju (P_{ks}) su podatci koje u pravilu deklarira proizvođač transformatora i kao takvi su poznati ulazni podatci za izračun gornjih vrijednosti.

6.6.4. Kompenzacija induktiviteta transformatora

Obzirom da mogu biti ugrađeni, bitno je uzeti u obzir i kondenzatore ugrađene u niskonaponska postrojenja uz transformator s ciljem kompenzacije induktivnih gubitaka transformatora. Oni se u pravilu ugrađuju tipiziranih snaga, ovisno o nazivnoj snazi transformatora. Ugradnja je i u ovakvim slučajevima česta iako je ponekad kontraproduktivna, upravo iz razloga što se pri projektiranju ne uzme u obzir cjelokupna analiza jalove snage elektrane. Naime, rezultirajuća jalova snaga elektrane može biti kapacitivna i u tom slučaju ovi će kondenzatori svojom kapacitivnom snagom (Q_{kap_bat}) samo još „pogoršati“ situaciju. Pri tom je:

$$Q_{kond_bat} = 3 \cdot \frac{U_f^2}{X_{C_kond_bat}} = 3 \cdot U_f^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{kond_bat} = 6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f^2 \cdot C_{kond_bat} \quad (29)$$

gdje su:

Q_{kond_bat} - kapacitivna jalova snaga kondenzatorskih baterija,

$X_{C_kond_bat}$ – kapacitivna reaktancija kondenzatora,

C_{kond_bat} - kapacitet kondenzatora.

6.6.5. Srednjenaponski kabel

Srednjenaponski kabeli spajaju elektranu s točkom priključka na sustav. Izrazito su kapacitivnog karaktera i u slučaju duljina većih od nekoliko stotina metara postaju dominantni element od utjecaja na jalovu snagu na mjestu priključka. Vrijednosti se mogu izračunati također pomoću formule (25).

$$Q_{kab_SN} = 6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f^2 \cdot C_{kab_SN} \cdot l_{kab_SN} - 6 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{S_{kab_SN}^2}{U_f^2} \cdot L_{kab_SN} \cdot l_{kab_SN} \quad (30)$$

gdje su:

Q_{kab_SN} - jalova snaga SN kabela,

C_{kab_SN} - specifični kapacitet SN kabela,

L_{kab_SN} - specifični induktivitet SN kabela,

l_{kab_SN} - duljina SN kabela,

S_{kab_SN} - snaga koja teče SN kabelom.

6.6.6. Vlastita (kućna) potrošnja

Kao i kod radne snage, ukoliko u elektrani postoje potrošači (i) jalove snage koji su spojeni u dijelu prije mjesta priključka na mrežu operatora sustava (na niskom ili na srednjem naponu), ukupna jalova snaga tih potrošača treba se također uzeti u obzir. Obzirom da je iznos te snage (Q_{vp}) karakteristika potrošača, tretiramo ga kao gotovi ulazni parametar. Moguća je ovisnost te jalove snage potrošača o naponu i frekvenciji, ali ovdje se neće uzimati u razmatranje. Također, treba naglasiti da ona nije stalna.

6.6.7. Ukupna jalova snaga elektrane

Da bi se dobila ukupna jalova snaga elektrane nužno je zbrojiti sve navedene snage pojedinih elemenata s prikladnim predznakom:

$$Q_{uk} = \pm Q_{izmj_uk} \pm Q_{kab_NN} - Q_{tr} + Q_{kond_bat} \pm Q_{kab_SN} \pm Q_{vp} \quad (31)$$

gdje je:

Q_{uk} - ukupna jalova snaga elektrane u točki priključka na SN mrežu operatera sustava u datom trenutku,

Q_{vp} - jalova snaga potrošača vlastite potrošnje elektrane.

Prema prethodnim formulama za jalove kapacitivne i induktivne snage pojedinih elemenata elektrane mogu se detektirati slijedeće zakonitosti koje utječu na ukupnu jalovu snagu elektrane u točki priključka: induktivni dio jalove snage raste s porastom trenutne snage, tj. sa proizvodnjom elektrane, a kapacitivni dio jalove snage veći je što je trenutni napon mreže veći. Obzirom da su dozvoljene (moguće) promjene frekvencije izuzetno malene, za frekvenciju se može uzeti da je konstantna.

6.7. Pogonska karta elektrane u P-Q dijagramu

Uvrštenjem prethodnih formula u (18) i u (31) mogu se, uz fiksirane određene vrijednosti koje su karakteristike opreme i nije ih teško odrediti u specifičnom slučaju, dobiti relacije za P_{uk} i Q_{uk} , koje su ovisne samo o dvije promjenjive veličine: naponu i trenutnoj snazi proizvodnje koja se (generira iz fotonaponskih ćelija i) predaje u mrežu kroz izmjenjivače. Kako su poznate granične vrijednosti tih dvaju varijabli, njihovim uvrštenjem za jednu varijablu, moguće je dobiti krivulje minimalnih i maksimalnih vrijednosti druge varijable. Prostor u P-Q dijagramu koje te krivulje omeđuju je prostor mogućih radnih točaka elektrane. Taj prostor bi dakle predstavljao „pogonsku kartu“ tipične fotonaponske elektrane priključene na srednjenaponsku mrežu, u točki priključka na mrežu [50].

Minimalne i maksimalne vrijednosti za svaku od dvije varijable su slijedeće: mogući (propisani) raspon napona u niskonaponskoj mreži je od $0,9 U_n$ do $1,1 U_n$. Snaga proizvodnje iz tehnološkog dijela elektrane može varirati od 0 pa do maksimalne nazivne snage svih izmjenjivača.

Prethodno navedeno će se primijeniti na stvarnom primjeru, stvarne fotonaponske elektrane, za koju će se na navedeni način izraditi P-Q dijagram radnih točaka elektrane. Provedena mjerenja iskoristit će se za provjeru i korekciju modela.

6.7.1. Teoretska ograničenja nasuprot propisanim ograničenjima i ograničenjima zbog zadanih podešenja (faktora snage)

Prije konstrukcije pogonske karte ovog tipa elektrane bitno se osvrnuti na faktor snage elektrane (izmjenjivača). Razlog je naravno to što on ima velik utjecaj na radne točke elektrane, a kako je i vidljivo iz relacija (9) i (19).

Razmatranje faktora snage moguće je iz tri različita aspekta. Prvi je teoretska mogućnost izlaznog faktora snage samih izmjenjivača. Izmjenjivači, kao napredni uređaji energetske elektronike, mogu imati velike mogućnosti pretvaranja snage na svom ulazu u izlaznu snagu različitih faktora snage. To je vidljivo i sa slike 6-2. Mogućnosti deklarira proizvođač izmjenjivača te s ovog aspekta ograničenje ovisi isključivo o tehničkim mogućnostima samog izmjenjivača.

Međutim, unatoč mogućnosti i jako niskih faktora snage, od operatera sustava [10] propisano je da je prekomjerna predana (ili preuzeta) jalova energija proizvođača (potrošača) višak koji će biti naplaćen tom korisniku mreže. Prekomjerna predana jalova energija odgovara faktoru snage 0,95 te se dakle to može uzeti kao minimalni faktor snage koji će eventualno biti podešen na izmjenjivačima.

I kao treće, a što je već više puta navedeno, obzirom da se vlasniku distribuiranog izvora honorira (plaća) isključivo radna energija predana u mrežu, opravdano je očekivati da će ekonomska logika nametati da se faktori snage izmjenjivača podešavaju na 1, tj. da će izmjenjivači predavati isključivo radnu snagu.

Obzirom na tri prethodno navedene činjenice, za konstrukciju pogonske karte elektrane u ovom radu neće se razmatrati teoretske mogućnosti izmjenjivača. Kako je jedan od razloga razrade i detaljnog promatranja P-Q dijagrama mogućih radnih točaka elektrane u ovom radu definiranje ulaznih parametara za proračun vjerojatnosti otočnog pogona koji će se obrađivati u drugom dijelu rada, potreban je realan P-Q dijagram koji obuhvaća radne točke koje su vjerojatne. Tako će se izrada P-Q dijagrama provoditi obzirom na zadano podešenje faktora snage izmjenjivača, s posebnim naglaskom na faktor snage 1, a napraviti će se osvrt na granicu penaliziranog faktora snage zadanog od strane operatera mreže, tj. faktor snage od 0,95.

6.8. Primjena predloženog na čina konstrukcije pogonske karte na primjeru stvarne elektrane

Sunčana elektrana Kanfanar, u istoimenom mjestu u Istri, snage 1MW (999 kW instalirane snage panela, 912 kW instalirane snage izmjenjivača), u vrijeme gradnje i puštanja u trajni pogon (ožujak 2013. godine) bila je najveća sunčana elektrana u Hrvatskoj i prva sunčana elektrana koja je priključena na srednjem naponu na elektroenergetski sustav operatora HEP-Operator distribucijskog sustava (HEP-ODS-a). Priključena je na 20 kV mrežu Pogona Rovinj Distribucijskog područja Elektroistra Pula. Od tada na mrežu HEP-ODS-a priključeno je još nekoliko sličnih elektrana. [7]

Ova elektrana stvarni je primjer elektrana koje su predmet proučavanja ovog rada, fotonaponska elektrana sa više izmjenjivačkih jedinica priključena na mrežu srednjeg napona, Principna shema konfiguracije elektrane je ona prikazana na Slici 6-1.

Detaljni podaci o elektrani i svim elementima od kojih je sastavljena cijela elektrana navedeni su u Prilogu 1 ovog rada, oni su korišteni pri računima provedenim ovdje, ali radi preglednosti navedeni su detaljnije u prilogu radu.

6.8.1. Računska procjena i analiza radne snage elektrane

Prema formulama navedenim u Poglavlju 6.5. za proizvodnju i gubitke radne snage po pojedinim elementima elektrane SE Kanfanar procijenjeni su doprinosi i relevantan utjecaj pojedinih elemenata na ukupnu radnu snagu. U nastavku su navedeni iznosi.

Doprinos radne snage izmjenjivača se računa prema relacijama (9) do (11). Kako je navedeno da je instalirana snaga izmjenjivača 912 kW, a instalirana snaga fotonaponskih panela je veća, maksimalna radna snaga uz podešeni faktor snage $\cos \varphi = 1$ jest 912 kW. U noćnom režimu rada izmjenjivači troše 1,72 W, pa je minimalna radna snaga svih izmjenjivača je -0,13 kW za vrijeme noćnog perioda.

Gubitci radne snage na niskonaponskim vezama elektrane se dobiju uvrštenjem podataka o kabelima (Prilog 1) u relacije (12) do (15). Izračunati ukupni maksimalni gubitci radne snage (za maksimalnu nazivnu snagu izmjenjivača od 912 kW) na svim niskonaponskim kabelima zajedno iznose samo 0,79 kW. To odgovara udjelu od 0,087 %.

Gubici radne snage na transformatoru elektrane izračunati prema relaciji (16), uz uvrštene podatke o transformatoru i elektrani (Prilog 1) iznose od 1,75 kW u praznom hodu do 12,97 kW pri maksimalnom opterećenju transformatora za vrijeme maksimalne proizvodnje elektrane. Udio ovih gubitaka je dakle u slučaju ove elektrane od 0,19 % do 1,4 % maksimalne nazivne snage.

Na srednjenaponskom kabelu također se javljaju jako mali gubici radne snage, Izračunom prema relaciji (17) maksimalan iznos ovih gubitaka je 0,2 W, što je zanemarivo mali udio u maksimalnoj nazivnoj snazi elektrane.

U slučaju SE Kanfanar potrošači pomoćne (opće) potrošnje (unutarnja i vanjska rasvjeta, kamere i sl.) napojeni su posebnim niskonaponskim priključkom odvojenim od priključka elektrane na mrežu. U dijelu prije priključka izvora na mrežu, s niskonaponskog razvoda napojen je samo UPS sustav na koji su priključeni uređaji bez kojih elektrana ne bi mogla funkcionirati (vlastita potrošnja). Ukupna nazivna radna snaga tih potrošača iznosi oko 1 kW, međutim ona nije stalna već povremena.

Ukupna izračunata radna snaga elektrane SE Kanfanar na mjestu priključenja na mrežu kreće se od minimalno -2,88 kW (za vrijeme kad izmjenjivači ne proizvode energiju elektrana se ponaša kao potrošač radne snage) do maksimalno 898,04 kW (pri maksimalnoj proizvodnji elektrane). Radna snaga se u relativnom iznosu kreće od -0,31 % do 98,47 % nazivne instalirane snage izmjenjivača ugrađenih u elektrani SE Kanfanar.

6.8.2. Računska procjena i analiza jalove snage elektrane

Prema formulama navedenim u Poglavlju 6.6. za doprinose pojedinih elemenata jalovoj snazi elektrane SE Kanfanar procijenjeni su doprinosi i relevantan utjecaj pojedinih elemenata na ukupnu jalovu snagu. U nastavku su navedeni izračunati iznosi vrijede za nazivni napon sustava.

Doprinos izmjenjivača jalovoj snazi se izračuna pomoću relacija (19) do (24). Doprinos od proizvodnje uz podešeni faktor snage 1 nema. U slučaju kada bi podešeni faktor snage bio različit od 1 tada izmjenjivači pridonose proizvodnjom jalovoj snazi, ali to nije u ovom slučaju. Doprinos radi parazitnih kapaciteta fotonaponskog polja koji se prenose na

izmjeničnu stranu izračunat je i iznosi $13,30 \text{ kVA}_{\text{kap}}$ (cca 1,46 % u odnosu na nazivnu snagu elektrane). Kapacitet izlaznog filtra na kojem se u praznom hodu izmjenjivača javlja jalova snaga pri nazivnoj frekvenciji nije poznat pa se pri izradi pogonske karte pretpostavlja u iznosu 2% snage izmjenjivača. Pri maksimalnoj snazi svih izmjenjivača taj doprinos je izračunat na $18,24 \text{ kVA}_{\text{kap}}$.

Jalove snage na niskonaponskim vezama elektrane se dobiju uvrštenjem podataka o kabelima (Prilog 1) u relacije (25) i (27). Dominira kapacitivan karakter te su izračunate ukupne snage praktički konstantne bez obzira na trenutnu snagu izmjenjivača i na svim niskonaponskim kabelima zajedno iznose oko $30 \text{ VA}_{\text{kap}}$, što je u odnosu na nazivnu snagu elektrane zanemarivih 0,0033%.

Doprinos transformatora induktivnoj jalovoj snazi izračunat prema (28) iznosi $Q_{tr} = 7,81 \text{ kVA}_{\text{ind}}$ (0,8 % u odnosu na nazivnu snagu elektrane) kada nema proizvodnje elektrane (prazni hod) do $Q_{tr} = 56,70 \text{ kVA}_{\text{ind}}$ (6,2 %) pri maksimalnoj snazi elektrane.

Doprinos kondenzatorskih baterija izračunat prema (29) iznosi $Q_{\text{kond_bat}} = 60 \text{ kVA}_{\text{kap}}$. Ne uzima se u izračun ukupne jalove snage jer su baterije u pogonu SE Kanfanar isključene.

Kod jalove snage na srednjenaponskom kabelu također dominira kapacitivan karakter te je izračunata snaga praktički konstantna bez obzira na trenutnu snagu elektrane i izračunata prema (30) iznosi $Q_{\text{kabSN}} = 9,81 \text{ kVA}_{\text{kap}}$ (1,1 % u odnosu na nazivnu snagu elektrane).

Slijedom navedenih izračuna, rezultirajuća ukupna jalova snaga izračunata prema (31) bi se pri nazivnom naponu sustava trebala kretati od kapacitivne $Q_{uk} = 15,34 \text{ kVA}_{\text{kap}}$ (1,68 % u odnosu na nazivnu snagu elektrane) u nominalnom radu bez proizvodnje izmjenjivača do $Q_{uk} = 33,56 \text{ kVA}_{\text{ind}}$ (3,68 % u odnosu na nazivnu snagu elektrane) pri maksimalnoj mogućoj snazi elektrane.

6.8.3. Izrada pogonske karte u P-Q dijagramu

Brojčani podaci minimalnih i maksimalnih doprinosa proizvodnji i gubitcima radne i jalove snage od pojedinih elemenata elektrane navedeni su u prethodnom poglavlju radi dobivanja osjećaja o relativnim veličinama istih. U ovom poglavlju formule navedene u

Poglavljima 6.5 i 6.6 iskoristit će se za izradu (graničnih) krivulja u P-Q dijagramu, tj. za prikaz pogonske karte fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača i spojene na srednjenaponsku mrežu, na primjeru SE Kanfanar. Proces crtanja pogonske karte opisan je u nastavku.

U prvoj iteraciji pogonsku kartu teoretskih mogućnosti radnih točaka elektrane konstruiramo uz definirana ograničenja opreme (izmjenjivača) i karakteristike ostalih elemenata unutar elektrane.

Izmjenjivači u slučaju SE Kanfanar imaju ograničenje podešenja faktora snage na $\cos\varphi=0,75-1$ ind./kap. (vidi Prilog 1) pa to uzimamo u obzir pri izradi ovakve teoretske pogonske karte.

Koriste se relacije (18) za ukupnu radnu snagu elektrane i (31) za ukupnu jalovu snagu elektrane u koje se uvrste sve ostale relacije za doprinose pojedinih elemenata. U prikazu na grafovima pozitivna radna snaga znači predaju energije u mrežu, a pozitivna jalova snaga znači kapacitivnu snagu elektrane. Krivulja „minimalne radne snage“ (krivulja p_{min} na Slici 6-3) jest krivulja svih parova točaka (P_{uk} , Q_{uk}) uz uvjet da izmjenjivači ne predaju energiju u mrežu, tj. da nema proizvodnje na fotonaponskim panelima ($P_{izmj_uk}=0=kons.$). Kako je navedeno u Poglavlju 6.7, uvrštene su sve vrijednosti za sve konstante koje su karakteristike opreme i elemenata, a frekvencija se pretpostavlja konstantnom (50 Hz) jer njene male promjene nemaju značajnog utjecaja na izračun ukupne snage. Mijenja se samo napon (ograničenje napona od strane operatora sustava [9]), pa krivulja ide od početne točke za $U_f=0,9 \cdot U_n$ do konačne točke $U_f=1,1 \cdot U_n$ (gdje je U_n nazivni napon).

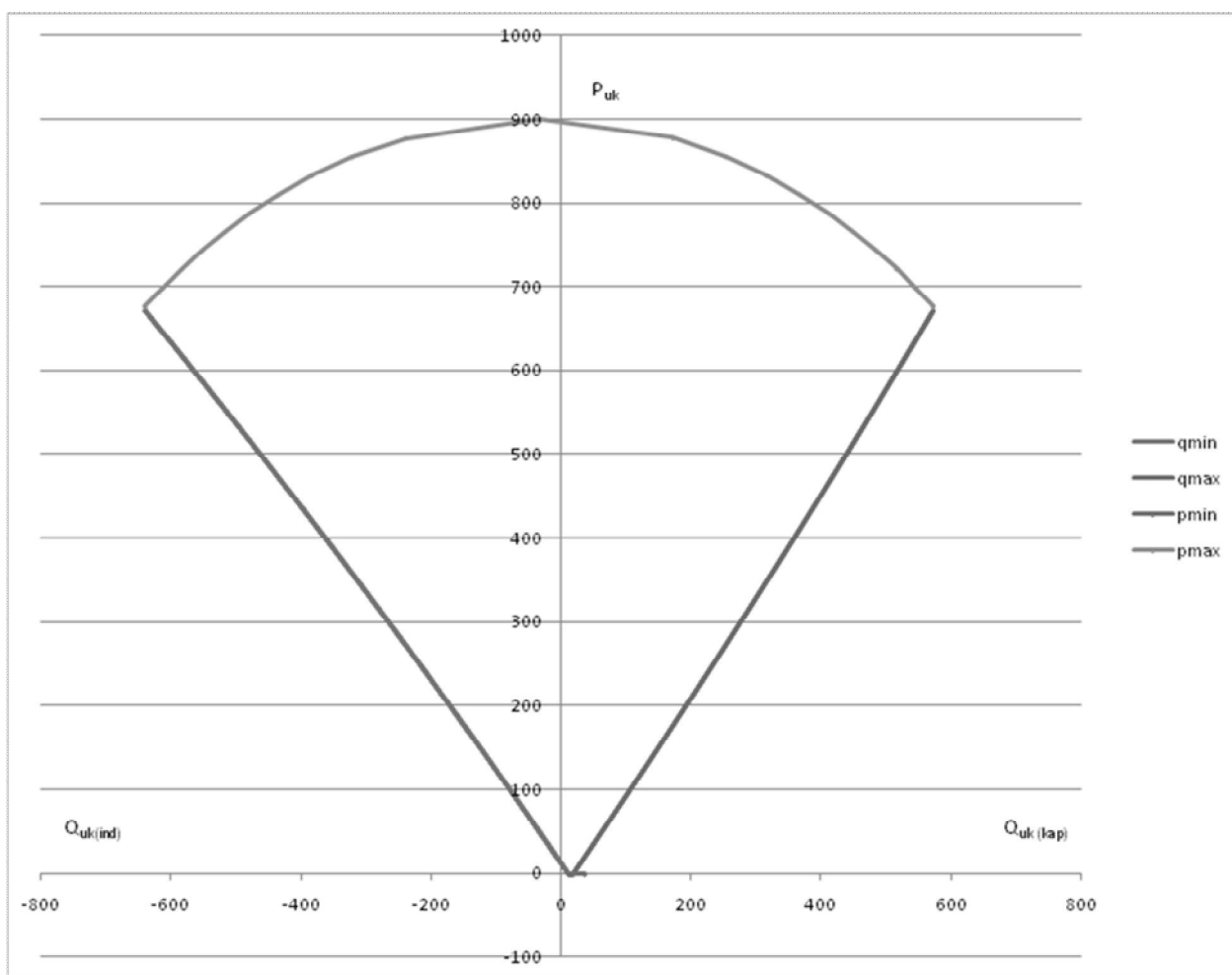
Krivulja „maksimalne jalove snage“ (ili maksimalne kapacitivne jalove snage, krivulja q_{max} na Slici 6-3) jest krivulja svih parova točaka (P_{uk} , Q_{uk}) uz uvjet da je napon mreže maksimalan ($U_f=1,1 \cdot U_n=kons.$) i da je faktor snage izmjenjivača minimalnog kapacitivnog iznosa (u slučaju SE Kanfanar $\cos\varphi=0,75kap$). Mijenja se iznos snage izmjenjivača od $S_{izmj_uk}=0$ do $S_{izmj_uk}=S_{izmj_uk_max}=912kVA$. Krivulja ide od početne točke kada nema proizvodnje električne energije od strane izmjenjivača do krajnje točke maksimalne prividne snage izmjenjivača.

Krivulja „maksimalne radne snage“ (krivulja p_{max} na Slici 6-3) jest krivulja svih parova točaka (P_{uk} , Q_{uk}) uz uvjet da izmjenjivači predaju najveću radnu snagu pri svim mogućim podešenjima faktora snage ($\cos\varphi=0,75kap-0,75ind$). Uvjet je i da je napon mreže maksimalan ($U_f=1,1 \cdot U_n=kons.$) kad izmjenjivači rade u kapacitivnom području, tj. da je minimalan

($U_f=0,9 \cdot U_n=kons.$) kad izmjenjivači rade u induktivnom području. Krivulja ide od početne točke za najmanji mogući kapacitivni faktor snage do krajnje točke za najmanji mogući induktivni faktor snage.

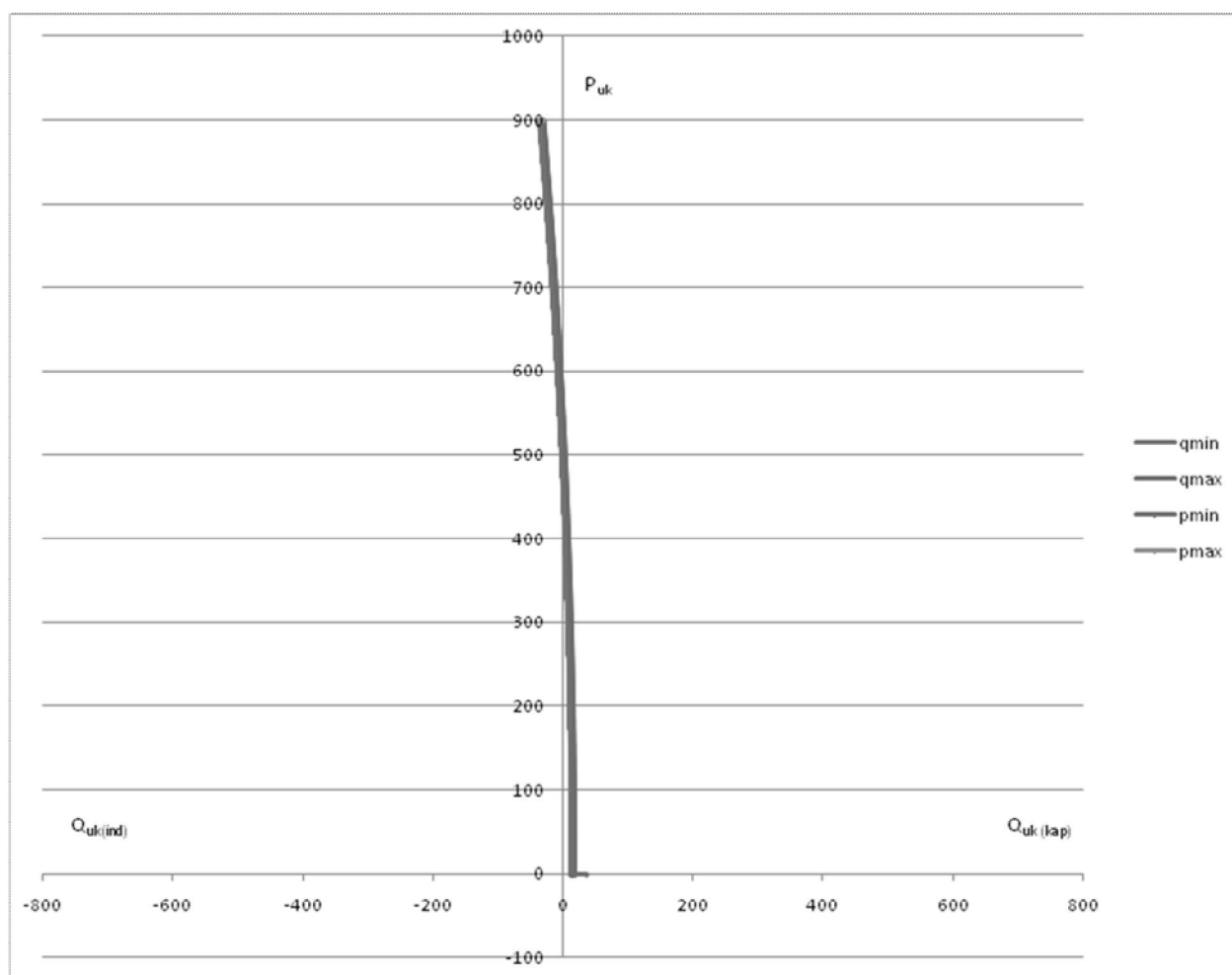
Krivulja „minimalne jalove snage“ (ili maksimalne induktivne jalove snage, krivulja q_{min} na Slici 6-3) jest krivulja svih parova točaka (P_{uk}, Q_{uk}) uz uvjet da je napon mreže minimalan ($U_f=0,9 \cdot U_n=kons.$) i da je faktor snage izmjenjivača minimalnog induktivnog iznosa (u slučaju SE Kanfanar $\cos\varphi=0,75ind$). Mijenja se iznos snage izmjenjivača od $S_{izm_uk}=S_{izm_uk_max}=912kVA$ do $S_{izm_uk}=0$. Krivulja ide od početne točke za maksimalnu prividnu snagu svih izmjenjivača do krajnje točke kada nema proizvodnje električne energije od strane izmjenjivača.

P-Q dijagram (pogonska karta) s iscrtanim opisanim graničnim krivuljama prikazan je na Slici 6-3.



Slika 6-3 Računski konstruirana teoretska pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za sva moguća podešenja faktora snage izmjenjivača

Na Slici 6-3 prikazana je teoretska pogonska karta za ovu stvarnu elektranu (SE Kanfanar). Međutim, u realnom pogonu ove elektrane (ovog tipa elektrana), jednom podešen faktor snage izmjenjivača je fiksiran i ne mijenja se. Pragmatično je prihvatiti tu činjenicu, te izraditi precizniju pogonsku kartu, koja ne obuhvaća sve teoretski moguće radne točke, već u kojoj će biti prikazane radne točke koje su vjerojatne u stvarnom pogonu. Da bi se izradila takva pogonska karta, uzimamo konstantnu vrijednost faktora snage, onu koja je podešena na izmjenjivačima, a kako je već navedeno, to je u slučaju SE Kanfanar $\cos\varphi=1$. Bitno je napomenuti da je taj faktor snage očekivano podešenje za bilo koju elektranu ovog tipa, jer uz maksimalnu proizvodnju radne snage u svim uvjetima maksimalna je i zarada od isporu čene električne energije vlasnika elektrane, a što je i glavni interes svih investitora u ovaj tip distribuiranih izvora.

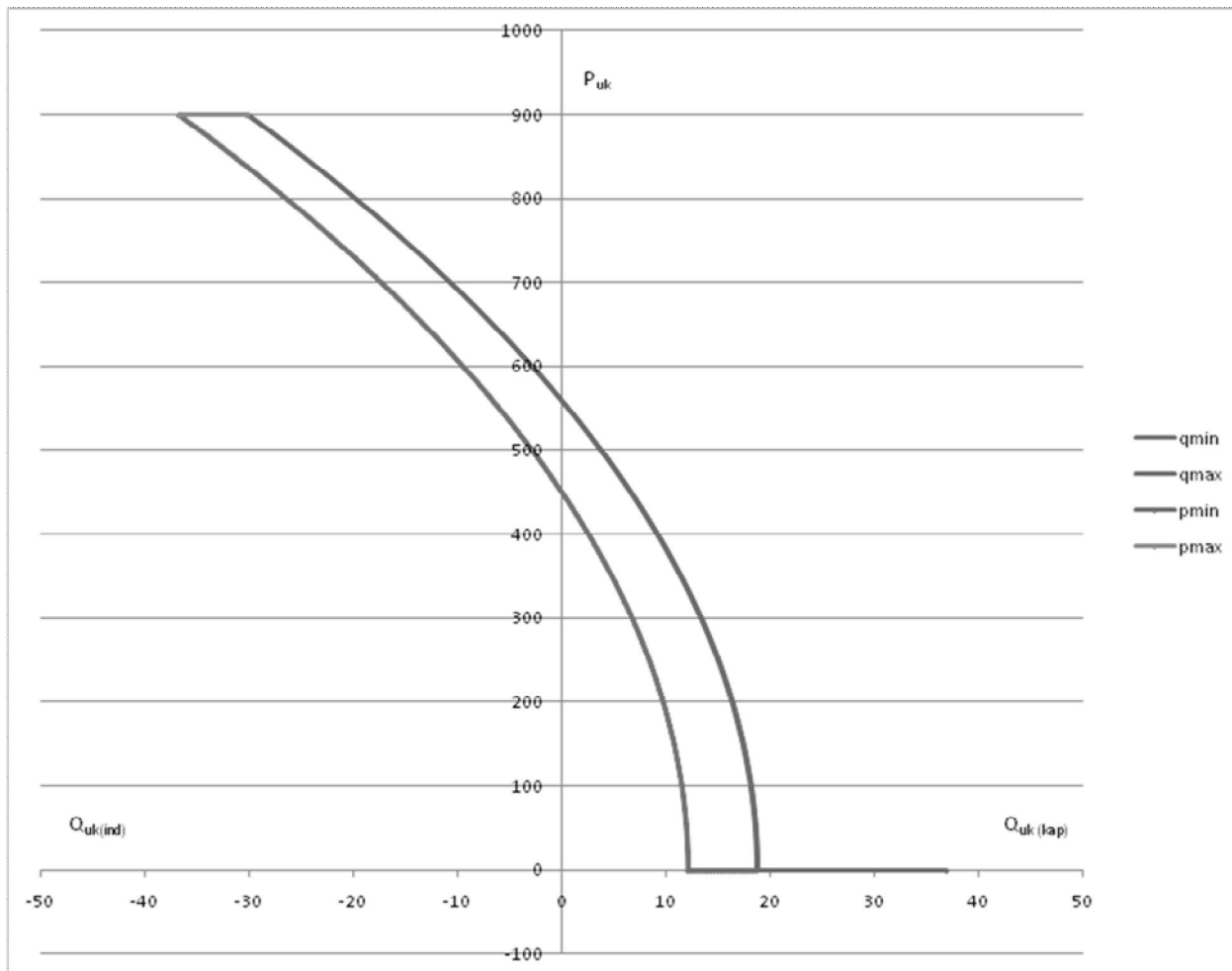


Slika 6-4 Računski konstruirana realna pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za podešenje faktora snage izmjenjivača $\cos\varphi=1$

Na Slici 6-4 prikazana je (po izračunima konstruirana) realna pogonska karta za elektranu SE Kanfanar. Podešenje faktora snage izmjenjivača je $\cos\varphi=1$. Takvo podešenje utječe na pomak krivulja „maksimalne jalove snage“ i „minimalne jalove snage“ u odnosu na prethodno konstruiranu teoretski moguću pogonsku kartu.

Usporedbom Slike 6-4 sa Slikom 6-3 vidljivo je koliko je fiksiranjem faktora snage izmjenjivača smanjen prostor mogućih radnih točaka (parovi P_{uk} , Q_{uk}) na realnoj pogonskoj karti u odnosu na teoretsku pogonsku kartu.

Da bi se dobila bolja predstava o graničnim krivuljama pogonske karte u ovom slučaju, na Slici 6-5 prikazana je ista pogonska karta sa Slike 6-4 s uvećanom osi jalove snage.



Slika 6-5 Računski konstruirana realna pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za podešenje faktora snage izmjenjivača $\cos\varphi=1$ (uvećana Q os)

Vidljivo je da je krivulja „minimalne radne snage“ konstanta po vrijednosti P_{uk} , što je očekivano, a u ovom slučaju (za $\cos\varphi=1$) je i krivulja maksimalne radne snage gotovo

konstantna po P_{uk} , tj. promjena napona između 90% i 110% U_n utječe neznatno na promjenu gubitaka radne snage zbog promjene struje kroz elemente elektrane. Izbočeni dio krivulje „minimalne radne snage“ odgovara očekivanoj jalovoj snazi koja se javlja na izlaznom filteru izmjenjivača za vrijeme praznog hoda, tj. „*stand-by*“ statusa izmjenjivača. Vidljivo je na Slici 6-5 i da su krivulje „maksimalne jalove snage“ i „minimalne jalove snage“ u odnosu na ukupnu radnu snagu drugog stupnja, tj. mijenjaju se u relaciji s kvadratom radne snage.

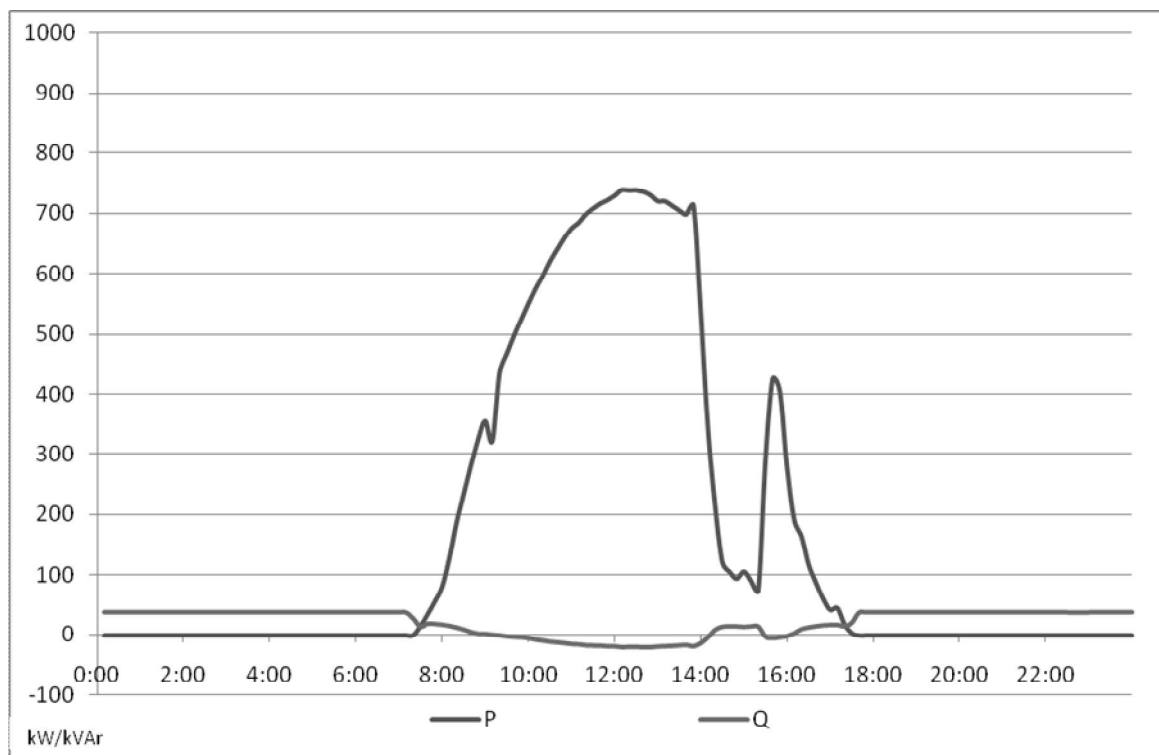
Općenito opisujući moguća pogonska stanja ovog tipa elektrana, može se zaključiti da u noćnom radu dominira utjecaj kapacitivne jalove snage koja se javlja na izlaznim L-C filtrima izmjenjivača i kapacitivne jalove snage na srednjenaponskom kabelu u praznom hodu, dok proizvodnje radne snage nema, a izmjenjivači su u „*stand-by*“ stanju. Pojavom sunca izmjenjivači se uključuju, nestaje pojava kapacitivne snage na izlaznim filtrima, počinje porast radne snage elektrane, koji prati i povećanje induktivne snage (gdje najveći utjecaj imaju induktivni gubici na transformatoru), te se jalova snaga kreće iz kapacitivnog područja (utjecaj kapacitivne snage na SN kabelu) prema induktivnom području, u koje prijeđe kad snaga elektrane prijeđe otprilike polovicu nazivne vrijednosti. Pri maksimalnoj vrijednosti snage elektrane najveća je i induktivna komponenta jalove snage.

Kako je ranije navedeno, ispravnost ovakvog modeliranja (konstrukcije) pogonske karte provjerit će se usporedbom s provedenim mjerenjima i u skladu s tim napraviti će se korekcije modela.

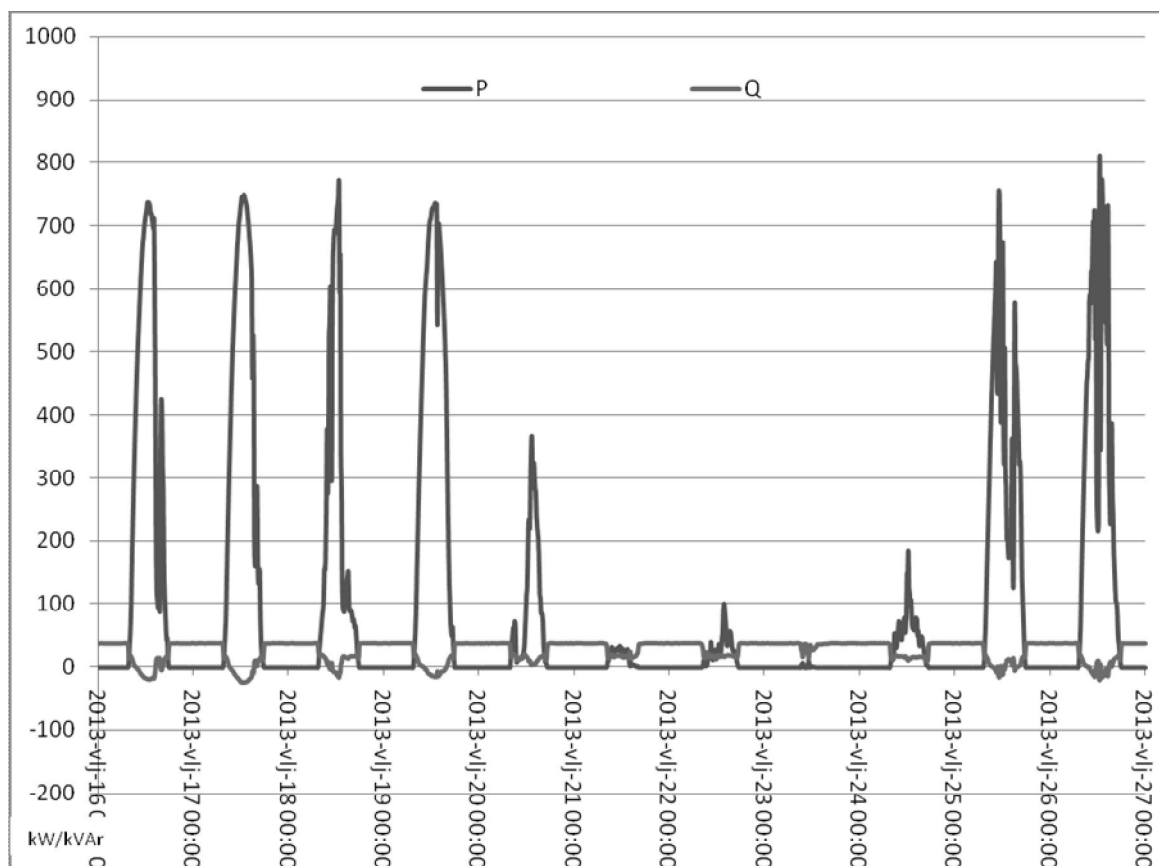
6.9. Mjerenja provedena na stvarnoj elektrani

U vrijeme probnog rada elektrane SE Kanfanar izvršena su mjerenja od kojih su neki rezultati prikazani u ovom radu [51]. Mjerenja su opisana u Prilogu 2 ovog rada.

Na Slici 6-6 prikazane su dnevne krivulje proizvodnje sunčane elektrane na dan 16. veljače 2013. Krivulje dijelom imaju tipični oblik karakterističan za sunčan (zimski) dan, ali ima i jedan pad proizvodnje u popodnevnim satima, uzrokovan vjerojatno naoblakom. Krivulje prikazuju radnu snagu (P) i jalovu snagu (Q) elektrane, a iscrtane su iz 10-minutnih mjerenih vrijednosti prosječne snage na mjernom mjestu u točki priključka elektrane na srednjenaponsku mrežu. Radi prikaza na grafovima u ovom slučaju pozitivna radna snaga znači predaju energije u mrežu, a pozitivna jalova snaga znači kapacitivnu snagu elektrane.

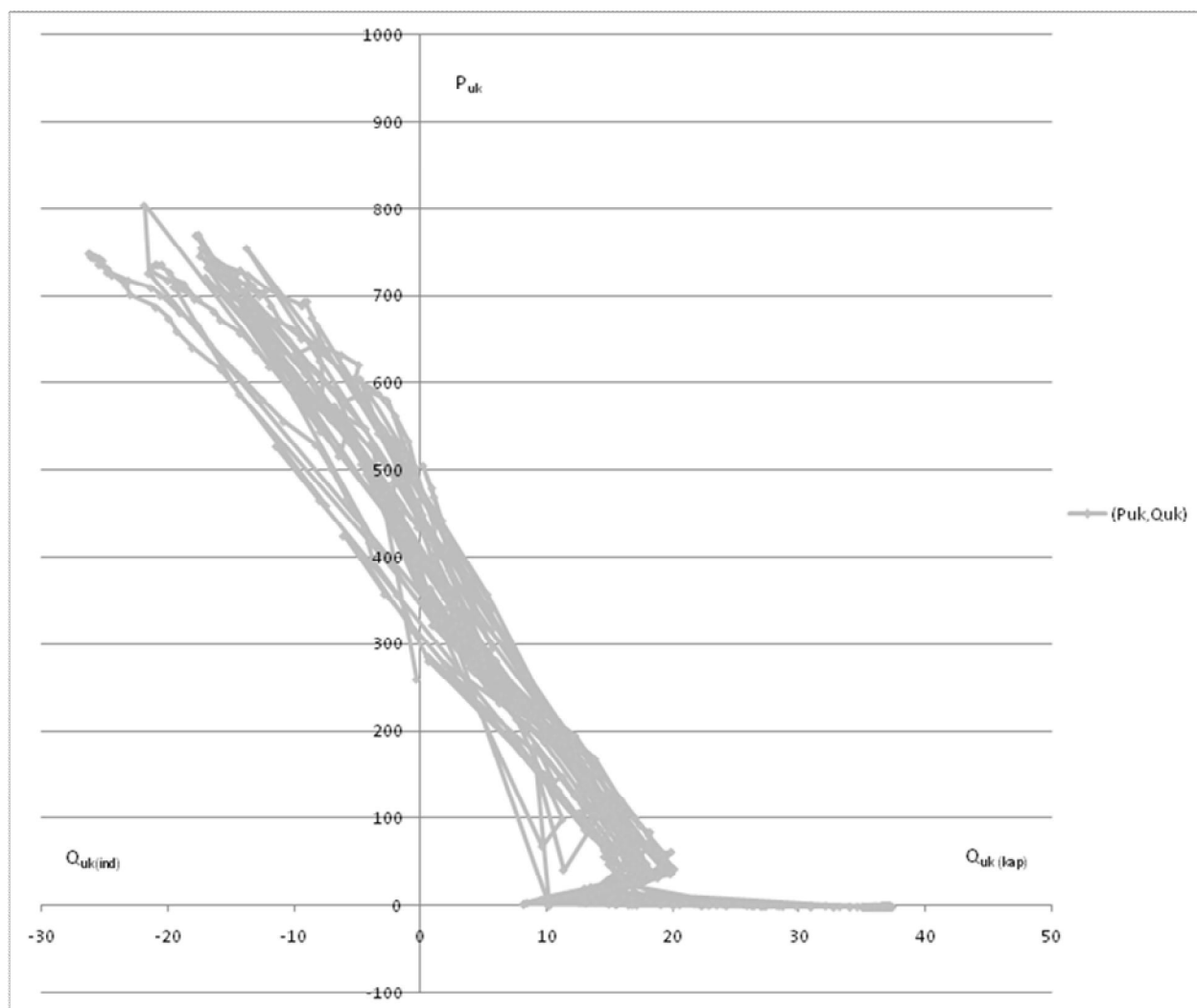


Slika 6-6 1-dnevna krivulja radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) na dan 16. veljače 2013.



Slika 6-7 11-dnevna krivulja radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) u periodu od 15. do 26. veljače 2013.

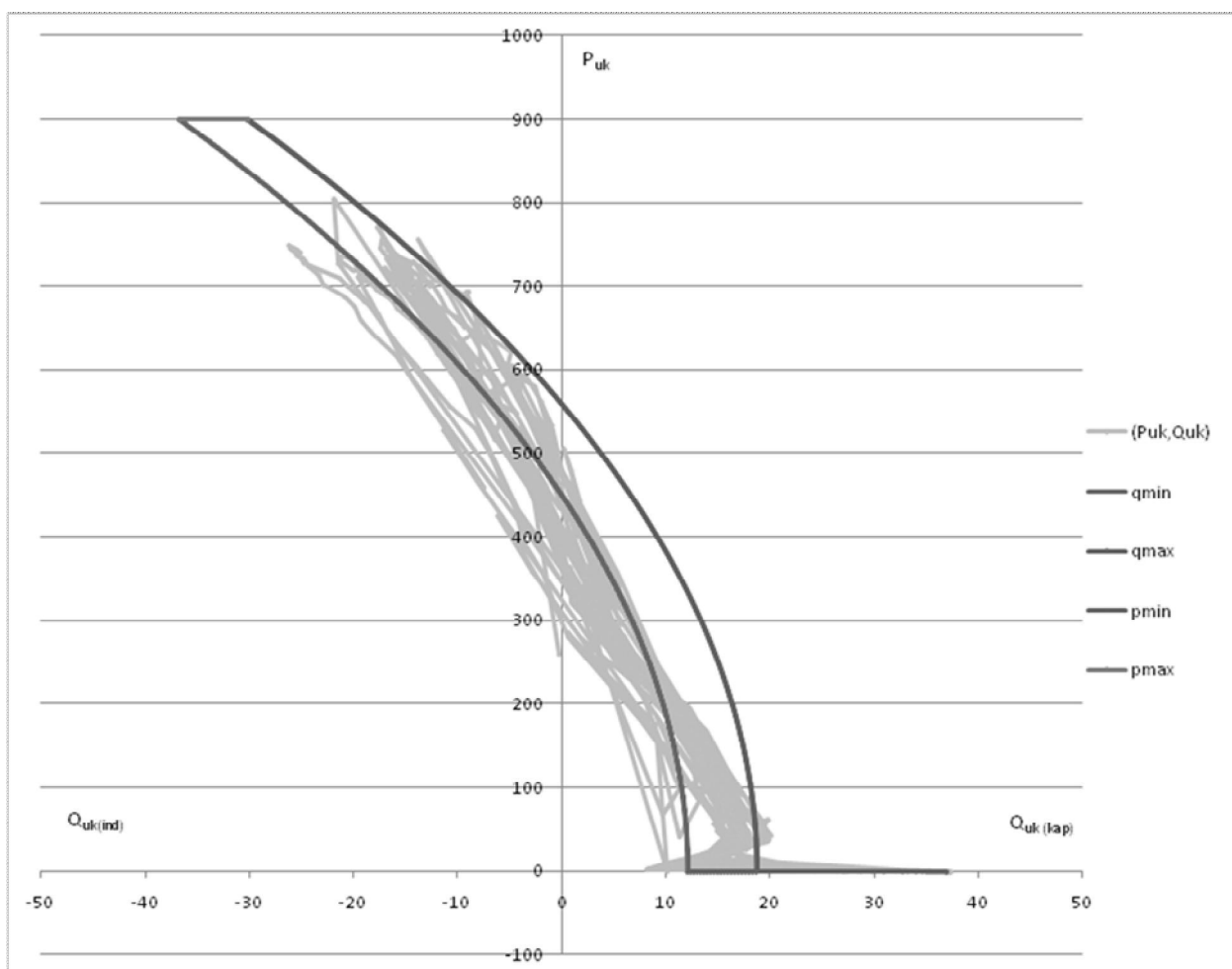
Ukupno su mjerenja vršena u periodu 11 dana, od 15. veljače 2013. do zaključno 26. veljače 2013. godine. Prikaz krivulja proizvodnje radne i jalove snage za svih 11 dana mjerenja dan je na Slici 6-7. Mjerenje je, kako je navedeno, vršeno na 20 kV sabirnicama na obračunskom mjernom mjestu za sunčanu elektranu Kanfanar, u susretnom postrojenju TS Solar Kanfanar, mjernim uređajem preko mjernog namota sekundara naponskog transformatora i sekundarne jezgre strujnog transformatora, zaštitnih karakteristika, što je moglo unijeti određenu pogrešku u izvršena mjerenja. Na prikazanom grafu može se jasno vidjeti razlika u dnevnim dijagramima snage proizvodnje fotonaponske elektrane, koja ovisi o vremenskim prilikama, što u ovom vremenskom periodu (veljača) dolazi do izražaja. Vidljivo je da npr. 21. i 22. veljače nije uopće bilo proizvodnje.



Slika 6-8 11-dnevna trajektorija kretanja radnih točaka radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) u periodu od 15. do 26. veljače 2013.

Prikažu li se sve izmjerene radne točke elektrane (parovi vrijednosti P_{uk} , Q_{uk}) sa 11-dnevnog dijagrama proizvodnje sa Slike 6-7 u koordinatnom sustavu s osima P i Q, tj. na P-Q dijagramu, dobije se P-Q dijagram s ucrtanom trajektorijom radnih točaka elektrane SE Kanfanar u peroidu mjerenja, prikazan na Slici 6-8.

Na ovaj način prikazane su radne točke (P_{uk} , Q_{uk}) elektrane čiji položaj se može usporediti s računski konstruiranom pogonskom kartom elektrane, prikazanom na prethodnim slikama. Preklopljena pogonska karta elektrane sa Slike 6-5 s dijagramom izmjerenih radnih točaka u periodu mjerenja sa Slike 6-8 prikazana je na Slici 6-9.



Slika 6-9 Preklopljena pogonska karta elektrane s dijagramom izmjerenih radnih točaka u periodu mjerenja

Usporedbom računatog i mjerenog može se primjetiti sličnost, ali preklapanjem izmjerene trajektorije s teoretski konstruiranom pogonskom kartom vidi se određeno odstupanje mjerenih vrijednosti od teoretski izračunatih i pretpostavljenih, i to najznačajnije u središnjem

dijelu računski konstruiranih krivulja. Induktivna snaga elektrane izraženija je u odnosu na izračunatu vrijednost.

6.10. Analiza usporedbe mjerenih i računatih vrijednosti i korekcija modela pogonske karte na primjeru stvarne elektrane

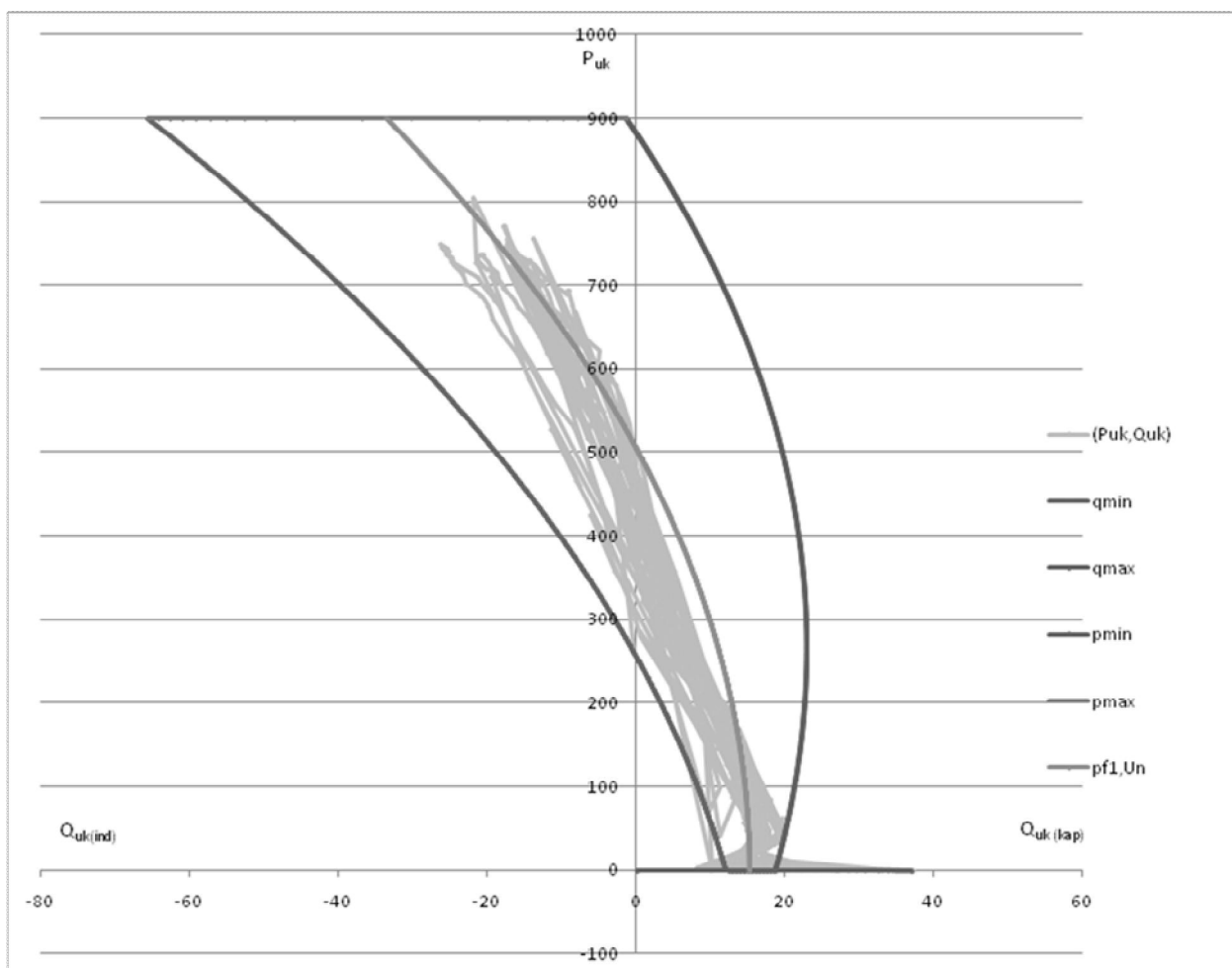
Zaključaka dobivenih iz usporedbe i analize odstupanja mjerenih vrijednosti od računatih je nekoliko.

Prvi se tiče odstupanja trajektorija gibanja radne točke u donjem dijelu krivulje, „zub“ koji se javlja pri pojavi radne snage, a koje ima razlog u „buđenju“ izmjenjivača, tj. u prelasku iz pasivnog („*stand-by*“) na čina rada u aktivni rad, tj. predaju snage iz istosmjernog dijela u izmjeničnu mrežu. Naime, u trenutku pojave snage na ulazu izmjenjivača, izmjenjivač se uključuje i u tom periodu izlazni L-C filter više ne generira jalovu kapacitivnu snagu u mrežu, pa dolazi do smanjenja kapacitivne snage [49]. Tek pri prijelazu u slijedeći stupanj rada, predaju snage u izmjeničnu mrežu, dolazi i do predaje dodatne kapacitivne snage, zbog objašnjenog (i pri izračunima uzetog u obzir) efekta prijenosa na izmjeničnu stranu parazitnih kapaciteta polja fotonaponskih ćelija. Vremenska neusklađenost svih izmjenjivača (veliki broj od 76 izmjenjivača u ovom slučaju) kod kojih se početak rada događa u razmaku i od nekoliko minuta, stvara nagib prema slijedećem radnom položaju s većom kapacitivnom jalovom snagom elektrane, kad su u normalnom radu svi izmjenjivači. Ovaj fenomen moguće je pri izradi pogonske karte donekle obuhvatiti proširenjem krivulje „minimalne radne snage prema induktivnom dijelu, tj. smanjenjem jalove snage za iznos kapacitivne jalove snage zbog parazitnih kapaciteta fotonaponskog polja za vrijeme praznog hoda izmjenjivača, tj. neproizvodnje.

Drugi zaključak koji se nameće je da podešenje faktora snage na izmjenjivačima, iako je „fiksno“, nije toliko čvrsto jer se izlazni faktor snage u izmjenjivaču regulira povratnom petljom koja ima određenu osjetljivost, pa se može pretpostaviti da on zapravo ima određeno odstupanje od podešenog u nekom malom rasponu.

Uvažavajući drugi zaključak, računski je konstruirana pogonska karta za moguća kretanja faktora snage (za podešenu vrijednost $\cos\varphi=1$) u rasponu od $\cos\varphi=0,9995$ kap do $\cos\varphi=0,9995$ ind, što je odstupanje realno za očekivati zbog načina regulacije izmjenjivača. Mogućnost induktivnog faktora snage pomaknut će „krivulju minimalne jalove snage“ više u induktivnu stranu. Uz to, uzet je u obzir i prvi zaključak vezan uz nepostojanje efekta parazitne kapacitivne snage kad nema proizvodnje od izmjenjivača, a sve ostale pretpostavke zadržane su

kao i prije. Konstruirana pogonska karta prikazana je na Slici 6-10 skupa s mjerenim trajektorijama kretanja radne točke u navedenom periodu mjerenja.



Slika 6-10 Korigirana pogonska karta elektrane za mogući raspon faktora snage izmjenjivača od $\cos\varphi=0,9995_{\text{kap}}$ do $\cos\varphi=0,9995_{\text{ind}}$ s dijagramom izmjerenih radnih točaka u periodu mjerenja

Ovako konstruirana pogonska karta obuhvaća ogromnu većinu mjerenih radnih točaka, a mali dio koji nije unutar konstruiranog prostora granica pogonskih točaka je, kako je prije navedeno, radi nejednakog vremena prelaska izmjenjivača iz noćnog „stand-by“ rada u normalni dnevni rad. Također, navedeno odstupanje može biti posljedica i nepreciznog mjerenja (mjerenja su vršena preko jezgre strujnog transformatora predviđene za zaštitu), što ipak bez ponovnih mjerenja nije moguće tvrditi, ili iz razloga što su podaci dobiveni mjerenjem uprosječene vrijednosti snaga u kratkim vremenskim razdobljima, a ne trenutne vrijednosti.

Može se primjetiti da su u prijevodnoj snazi elektrane mjerene radne točke dosta udaljenije od graničnih krivulja pogonske karte iz čega se zaključuje da je samoregulacija faktora snage

izmjenjivača bolja pri većoj snazi. Navedeno je vidljivo i na prethodnoj slici 6-9 na kojoj se vidi da već i pogonska karta konstruirana za fiksni faktor snage izmjenjivača $\cos\varphi=1$ obuhvaća u gornjem dijelu (veće snage) većinu izmjerenih radnih točaka.

Na slici 6-10 naznačena je i krivulja „očekivane“ trajektorije radnih točaka elektrane, za fiksni faktor snage izmjenjivača od $\cos\varphi=1$ i za nazivni napon. Krivulja je označena s „pfl,Un“. Može se također primjetiti da radne točke pri porastu snage izmjenjivača ne prate krivulje koje su kvadratne ovisnosti, već je trend rasta više linearan. Jedan od razloga za to je utjecaj snage same elektrane na naponske prilike na pragu elektrane, a koja snaga se predaje u odvod mreže na kojem je spojena, povećava vrijednost napona (smanjuje vrijednost pada napona) na tom dijelu mreže. Viši napon utječe na povećanje kapacitivne komponente jalove snage elektrane (na srednjenaponskom kabelu) i krivulju trajektorije iz očekivane kvadratne ovisnosti (kakva bi bila za konstantni napon) približava linearno ovisnoj karakteristici.

Zaključno se može zaključiti da konstruirana pogonska karta u zadovoljavajućoj mjeri odgovara izmjerenim podacima i vjerno prikazuje očekivani prostor mogućih radnih točaka fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača koja se priključuje na mrežu srednjeg napona. Opisani proces njene izrade i matematičke relacije iskoristit će se u nastavku ovog rada za izračune vjerojatnosti otočnog rada.

7. OSNOVNE POSTAVKE METODOLOGIJE ZA IZRAČUN VJEROJATNOSTI OTOČNOG POGONA ELEKTRANE S IZDVOJENIM DIJELOM LOKALNE MREŽE

U ovom poglavlju opisuje se metodologija koja će se koristiti za prijedlog metode za određivanje vjerojatnosti otočnog pogona fotonaponskih elektrana priključenih na mrežu srednjeg napona. Kako uz određene prilagodbe metoda može biti korištena za primjenu i na druge tipove distribuiranih izvora, ovdje će se izložiti općeniti dio, a specifični dijelovi za ovaj tip elektrana će se opisati u slijedećim poglavljima.

Potrebno je napomenuti da se otočni pogon elektrane ovdje razmatra kao jedan događaj. Ono što će se računati je vjerojatnost pojave takvog događaja, bez obzira na duljinu trajanja. Samo trajanje događaja i/ili vjerojatnost duljeg ostanka izdvojenog dijela sustava u otočnom radu se ne razmatra.

7.1. Stablo kvara

Otočni pogon elektrane, kako je navedeno, jest događaj koji se u pogonu može javiti. Kako takvo stanje nije dozvoljeno, taj događaj možemo nazvati i kvarom. Kao prvi korak u postupku određivanja vjerojatnosti da se dogodi neki događaj (kvar), potrebno je odrediti dijagram toka koji dovodi do pojave događaja koji se proučava. Takav dijagram naziva se stablom kvara. Da bi se dogodila pojava otočnog rada distribuiranog izvora, kako je i u uvodnim poglavljima ovog rada navedeno, dva su osnovna (inicijalna) događaja koja se trebaju istovremeno dogoditi.

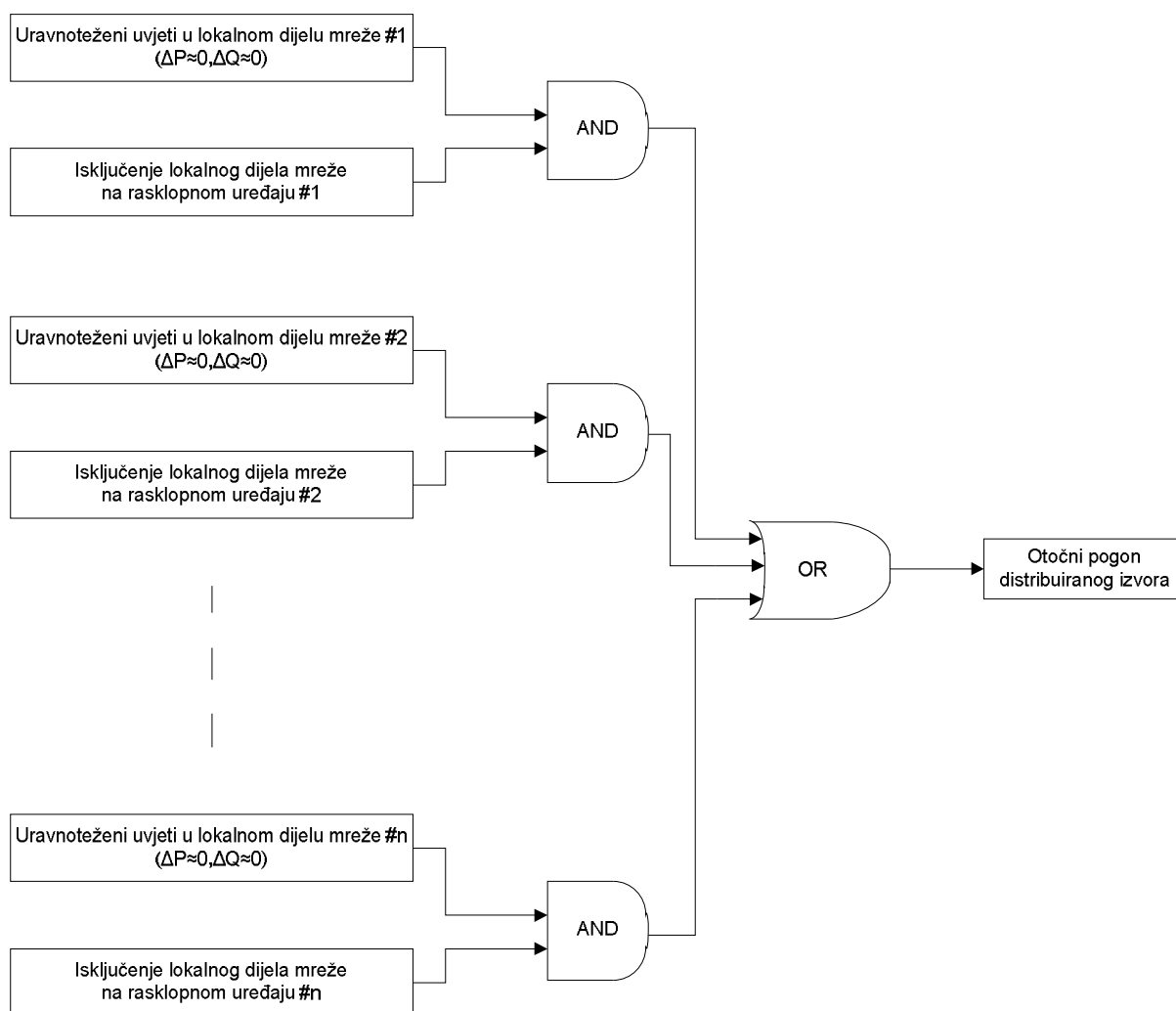
Jedan od događaja je „stanje“ uravnotežene snaga proizvodnje i potrošnje u lokalnom dijelu mreže, a drugi od događaja je događaj isklopa sklopnog uređaja koji isklapa točno onaj dio lokalne mreže na kojem tada postoje uravnoteženi uvjeti.

U tom trenutku u tom dijelu mreže sva „lokalno“ proizvedena energija se i potroši „lokalno“, a iz ostatka mreže (sustava), preko tog sklopnog uređaja nema ili gotovo da nema toka energije. Obzirom da zaštitne metode imaju određenu zonu neprepoznavanja (*non-detection zone*), koja je u poglavlju gdje su opisane zaštitne metode od otočnog rada objašnjena, određena mala razmjena energije s „krutom“ mrežom može postojati. Ta razmjena mora biti toliko mala da je poremećaj kojeg taj višak ili manjak energije u tom trenutku izazove u svojstvima (mjerenim parametrima) tada formiranog izoliranog sustava u granicama

neprepoznavanja zaštitne metode. Ako je to zadovoljeno, nastaje događaj otočnog pogona tako izoliranog sustava.

Međutim, moguće je imati velik broj takvih parova događaja, ovisno o konfiguraciji lokalne mreže, a istovremeno događanje opisanih dvaju događaja koji čine bilo koji par od tih parova događaja dovest će do pojave otočnog rada distribuiranog izvora. Broj parova događaja ovisi izravno o broju sklopnih uređaja u mreži na kojima je moguće da se dogodi isključenje ili isklop dijela lokalne mreže.

Stablo kvara stoga nije komplicirano, a prikazano je na Slici 7.1.



Slika 7-1 Stablo kvara za događaj otočnog pogona elektrane s dijelom mreže

U prvom koraku je dakle potrebno definirati koji su svi mogući parovi inicijalnih događaja u promatranom dijelu mreže na koji je priključen distribuirani izvor, a koji mogu dovesti do pojave otočnog pogona.

U naravi, potrebno je definirati koliko je mogućih „lokalnih mrežnih podsustava“ s kojima elektrana može ostati u otočnom radu (označen sa n na Slici 7-1).

7.2. Broj razmatranih lokalnih dijelova mreže

Između točke priključenja elektrane i pojne točke koja predstavlja „krutu“ mrežu, tj. elektroenergetski sustav, postoji više sklopnih uređaja (prekidača i/ili rastavnih sklopki). Potrebno je uzeti u obzir samo one uređaje koji se nalaze na direktnoj vezi između elektrane i mreže, ne i one uređaje koji se nalaze na otcjepima „lokalne“ mreže koji ne vode prema elektrani.

Gledajući na mjestu svakog od sklopnih uređaja, na stranu suprotno od „krute mreže“, tj. na stranu prema elektrani, nalazi se jedna od mogućih „lokalnih“ mreža, i -ta lokalna mreža. Takva lokalna mreža ima priključene i potrošače, te za svaku od takvih mreža treba izvršiti ocjenu opterećenja, tj. ukupne snage potrošača priključenih na tu „lokalnu“ mrežu. Što se tiče očekivane dostupnosti podataka, realno je za očekivati da je podatak o dnevnim dijagramima radne snage opterećenja takve pojedine „lokalne“ mreže dostupan, ili da je iz pogonskih podataka ili ocjene operatera barem poznat iznos srednje, te minimalne i maksimalne ukupne radne snage opterećenja svakog od na taj način razmatranih dijelova mreže.

Za određivanje ukupnog broja n mogućih lokalnih dijelova mreže kriterij je slijedeći:

$$P_{\min_mreža_1} < \dots < P_{\min_mreža_i} < \dots < P_{\min_mreža_n} < P_{\max_elektrane} < P_{\min_mreža_n+1} \quad (32)$$

gdje je:

$P_{\min_mreža_1}$ - minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza prvog sklopnog uređaja,

$P_{\min_mreža_i}$ - minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza i -tog sklopnog uređaja,

$P_{\min_mreža_n}$ - minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza n -tog sklopnog uređaja,

$P_{\max_elektrane}$ – maksimalna radna snaga priključene elektrane,

$P_{\min_mreža_n+1}$ - minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza $n+1$ -og sklopnog uređaja.

Kriterij iz relacije (32) je prilično intuitivan. Ako je minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže veća od maksimalno moguće radne snage koju elektrana daje u mrežu na mjestu priključenja tada na mjestu sklopnog uređaja na kojem je taj lokalni dio mreže spojen na ostatak mreže uvijek ima toka snage iz pravca krute mreže u lokalni dio mreže.

Iako se ovdje može ući u raspravu o graničnim slučajevima i rasponu zone neprepoznavanja (što će se uvažavati i opisati u nastavku rada), najviše radi navedene intuitivnosti ne treba pooštravati ovaj kriterij u smislu dozvoljavanja još i određenog odstupanja snage $P_{\min_mreža_n+1}$ i $P_{\max_elektrana}$.

Tako na mjestu $n+1$ -og sklopnog uređaja, gdje je zadovoljen kriterij iz relacije (32), da je $P_{\min_mreža_n+1} > P_{\max_elektrana}$, prestaje ovaj postupak za određivanje broja razmatranih lokalnih dijelova mreže, gdje je tada dobiveni n traženi broj parova događaja iz stabla kvara.

7.3. Vjerojatnosti inicijalnih događaja

Slijedeći je korak potreban za računanje vjerojatnosti događaja (kvara) određivanje vjerojatnosti pojedinih inicijalnih događaja.

Potrebno je stoga odrediti vjerojatnost događaja (pojave) uravnoteženosti snage proizvodnje i snage opterećenja svakog od mogućih lokalnih dijelova mreže u kojima se može formirati otočni sustav. Time dobijemo definiranu vjerojatnost prvog događaja u svakom od definiranih parova događaja.

Također je potrebno odrediti vjerojatnost događaja isklopa svakog od pojedinačnih sklopnih uređaja u lokalnom dijelu mreže na kojima može doći do odvajanja dijela lokalne mreže s elektranom od ostatka mreže (elektroenergetskog sustava). To je vjerojatnost drugog događaja u svakom od definiranih parova događaja.

7.3.1. Vjerojatnost pojave uravnotežene snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja lokalnog dijela mreže

Kad govorimo o uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja lokalne mreže bitno je naglasiti da uravnoteženost ne znači da su te snage jednake, već da su odstupanja, tj. razlika između njih, u granicama zone neprepoznavanja primijenjene zaštitne funkcije zaštite od otočnog pogona. Stoga je predmetna uravnoteženost uvijek povezana s

pojedinom zaštitom od otočnog pogona. Svaka pojedina zaštitna funkcija ima zonu neprepoznavanja unutar određenih granica razlika ΔP i/ili ΔQ za koje ne prepoznaje otočni rad.

Zona neprepoznavanja ili neosjetljivosti zaštitne funkcije zaštite od otočnog pogona objašnjena je u poglavlju 4.2. ovog rada. Za određivanje vjerojatnosti inicijalnog događaja stoga je prethodno potrebno znati koja je zaštita od otočnog pogona u primjeni i s kojim podešenjima, te izračunati kakav je utjecaj tih podešenja na granice ΔP i/ili ΔQ za koje je ta zaštita u tom slučaju neosjetljiva.

Osim toga, ono što je potrebno za što korektnije odrediti vjerojatnost ove pojave uravnoteženosti snaga (za primijenjenu zaštitnu funkciju) u prvom redu je određeni stupanj poznavanja očekivanih kretanja snaga proizvodnje elektrane i snaga opterećenja lokalne mreže (radnih i/ili jalovih snaga proizvodnje i opterećenja, ovisno o primijenjenoj zaštitnoj funkciji u određenom slučaju).

Ako možemo na određeni način vjerojatnosno modelirati snage (radnu i jalovu snagu) proizvodnje elektrane i snage (radnu i jalovu snagu) opterećenja lokalnog dijela mreže, još korak bliže smo određivanju vjerojatnosti pojave ovog inicijalnog događaja.

Pretpostavimo da su snage (odnosi se na snagu proizvodnje i na snagu opterećenja, a također i na radnu i na jalovu snagu) slučajne varijable. Naravno, one se nalaze na nekom prostoru, tj. u određenom intervalu mogućih vrijednosti. Taj interval je od minimalne do maksimalne snage, koje je potrebno poznavati ili odrediti.

Moguće je tada, na tom određenom intervalu vrijednosti, vjerojatnost veličine snage prikazati neprekinutom funkcijom razdiobe slučajne varijable. Funkcija gustoće vjerojatnosti f slučajne varijable X ima svojstva:

$$(i) \quad f(x) \geq 0 \quad (\text{za sve realne brojeve } x) \quad (33)$$

$$(ii) \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (34)$$

Pri tom je vjerojatnost da ta slučajna varijabla poprimi vrijednost u intervalu $[a, b]$:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (35)$$

Najbolji način prikaza, tj. najbolje odgovarajuća funkcija gustoće vjerojatnosti (engl. *probability distribution function*, *PDF*) za sve varijable koje je potrebno razmatrati (četiri varijable: radna snaga proizvodnje, jalova snaga proizvodnje, radna snaga opterećenja, jalova snaga opterećenja) bit će detaljnije razrađen u slijedećim poglavljima, s primjenom na u ovom radu proučavani specifični problem (fotonaponske elektrane na mreži srednjeg napona). To je svakako jako bitan dio, ali u ovom dijelu sama metodologija se predstavlja u što općenitijoj verziji. Svakako, kako je cilj razdiobu varijable iskoristiti u proračunskim operacijama pri analizi vjerojatnosti, razdiobu je pogodno aproksimirati nekom od jednostavnijih uobičajenih statističkih funkcija razdiobe varijable, koja će biti pogodna za provođenje daljnjih proračuna.

Kao daljnji korak, možemo pretpostaviti i to da su varijable snaga proizvodnje i snaga opterećenja međusobno nezavisne varijable. Bez daljnjega, neka posredna zavisnost može postojati, ali istu je teško ili nemoguće kvantificirati (samo primjera radi, za slučaj sunčanih elektrana: kad je sunce jako izlazna snaga elektrane je veća, ali je tada i toplije te raste potrošnja mreže uključivanjem dodatnih uređaja za hlađenje). Stoga, zanemarujemo istu, i za proračune pretpostavljamo da su to međusobno nezavisne varijable.

Dakle, sad imamo dvije slučajne kontinuirane nezavisne varijable, X i Y , sa svojim funkcijama gustoće vjerojatnosti na određenim intervalima koje se međusobno preklapaju. Varijable koje uspoređujemo su u jednom slučaju radna snaga proizvodnje elektrane i radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže, a u drugom slučaju jalova snaga proizvodnje elektrane i jalova snaga opterećenja lokalnog dijela mreže. Općenito vrijede iste relacije za oba slučaja.

Uzmimo da je X varijabla snaga proizvodnje elektrane, koja se kreće u rasponu od x_{min} do x_{max} , a Y varijabla snaga opterećenja, koja se kreće u rasponu od y_{min} do y_{max} , s funkcijama gustoće vjerojatnosti $f_X(x)$ i $f_Y(y)$.

Za pojedinu vrijednost od X iz navedenog intervala $x_{min} - x_{max}$, vjerojatnost da će se Y nalaziti u intervalu od $X - \Delta x_-$ do $X + \Delta x_+$ je prema (35):

$$P(X - \Delta x_- < Y < X + \Delta x_+) = \int_{X - \Delta x_-}^{X + \Delta x_+} f_Y(y) dy \quad (36)$$

gdje su:

$P()$ - vjerojatnost za dani događaj,

Δx_- - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za snagu vrijednosti X, u negativnom smjeru,

Δx_+ - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za snagu vrijednosti X, u pozitivnom smjeru.

Međutim, ta vjerojatnost vezana je samo na točno određenu vrijednost od X, te nije korisna za računanje ukupne vjerojatnosti, tj. to je za pojedinu vrijednost od X vjerojatnost da se Y nalazi u rasponu zone neprepoznavanja zaštite. S tim podatkom nismo dobili puno.

Da bi dobili vjerojatnost našeg inicijalnog događaja, potrebno je sada uočiti da je inicijalni događaj uravnoteženosti snaga proizvodnje i opterećenja zapravo dvodimenzionalna varijabla, tj. slučajni dvodimenzionalni kontinuirani vektor sastavljen od dvije slučajne varijable, X i Y.

Ako su X i Y nezavisne slučajne varijable, a to smo naveli kao ulaznu pretpostavku, i ako imaju svaka svoju funkciju gustoće vjerojatnosti $f_X(x)$ i $f_Y(y)$, tada za dvodimenzionalni slučajni vektor vrijedi da je zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti slučajnog vektora sastavljenog od tih dviju slučajnih varijabli [53]:

$$f_{XY}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \quad (37)$$

gdje su:

$f_X(x)$ - funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable X,

$f_Y(y)$ - funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable Y,

$f_{XY}(x, y)$ - funkcija gustoće vjerojatnosti dvodimenzionalnog slučajnog vektora sastavljenog od neovisnih varijabli X i Y.

Tako sada imamo određenu funkciju gustoće vjerojatnosti za prvi traženi inicijalni događaj iz parova događaja. To je funkcija prema (37).

Ono što nas zanima jest vjerojatnost inicijalnog događaja. Da bi odredili vjerojatnost, poćemo relaciju (35) za slučaj dvodimenzionalnog vektora:

$$P(x_1 < X < x_2, y_1 < Y < y_2) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f_{XY}(x, y) dx dy = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f_X(x) f_Y(y) dx dy = \int_{x_1}^{x_2} f_X(x) dx \int_{y_1}^{y_2} f_Y(y) dy \quad (38)$$

Sada iskoristimo još i poznate granične uvjete za koje želimo izračunati vjerojatnost inicijalnog događaja:

- X je varijabla snaga proizvodnje elektrane, koja se kreće u rasponu od x_{min} do x_{max} ,
- granice zone neprepoznavanja zaštitne funkcije po varijabli Y su od $X - \Delta x_-$ do $X + \Delta x_+$.

Uvrštenjem u (38) dobivamo traženu vjerojatnost prvog inicijalnog događaja (svakog od parova inicijalnih događaja), tj. vjerojatnost uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja lokalne mreže za točno određeni lokalni dio mreže:

$$P_{il} = P(x_{min} < X < x_{max}, X - \Delta x_- < Y < X + \Delta x_+) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} f_X(x) dx \int_{X - \Delta x_-}^{X + \Delta x_+} f_Y(y) dy \quad (39)$$

gdje su:

P_{il} - vjerojatnost prvog inicijalnog događaja iz i-tog para inicijalnih događaja, tj. vjerojatnost da su ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i opterećenja lokalne mreže,

x_{min} - minimalna moguća snaga elektrane,

x_{max} - maksimalna moguća snaga elektrane.

7.3.2. Učestalost pojave isklopa sklopnog uređaja između lokalnog dijela mreže i ostatka sustava

Vjerojatnost drugog inicijalnog događaja u svakom od definiranih parova događaja je vjerojatnost događaja isklopa (svakog od) pojedinačnih sklopnih uređaja u lokalnom dijelu mreže na kojima može doći do odvajanja dijela lokalne mreže s elektranom od ostatka mreže (elektroenergetskog sustava).

Statistički podaci o isklopima sklopnih uređaja mogu biti pribavljeni iz dostupnih podatkovnih baza operatera mreže, ili na neki drugi način. Bilo da se radi o pristupu na bazi pojedinog slučaja i pridjeljivanju karakteristika pojedinom sklopnom uređaju na bazi iskustva operatora/dispečera ili općenitom pristupu na temelju općih statističkih podataka za tip sklopnog uređaja i karakteristiku broja isklopa u određenom vremenskom razdoblju.

Iako su statistički podaci za sklopni uređaj, i iz njih izvedena karakteristika (broja isklopa u određenom vremenskom razdoblju) pojedinog sklopnog uređaja, pribavljivi, samu vjerojatnost događaja isklopa (u tom vremenskom razdoblju) nije lako iz toga izračunati, tj. za

tu varijablu znamo o čekivanu vrijednost, ali ne znamo funkciju gustoće vjerojatnosti. Pokazat ćemo u nastavku da to neće biti niti potrebno.

Zasad dakle samo definiramo karakteristiku za svaki promatrani sklopni uređaj – broj očekivanih isklopa u određenom vremenskom periodu. Označimo taj broj za i -ti sklopni uređaj s ps_{ui} .

Taj broj treba uključivati sve isklope sklopnog uređaja, pogonske manipulacije uzrokovane namjerom, nenamjerne slučajne isklope, isklope od zaštite itd.

7.4. Vremenski period

Vjerojatnost pojave događaja otocnog rada moramo računati za određeni vremenski period. Za osnovni period promatranja najzgodnije je uzeti jednu godinu, iz više razloga:

- Godišnji je ciklus ponavljajući (to je i dnevni ciklus, ali on ima sezonske oscilacije),
- Uprosječeni godišnji dijagrami proizvodnje elektrane ili snage opterećenja (prosječni godišnji dnevni dijagrami) su reprezentativni relativno dostupni ili ih se može izraditi iz poznatih teoretskih i/ili pogonskih podataka,
- Statistički podaci o isklopima sklopnih uređaja također se uobičajeno deklariraju dostupni na godišnjoj bazi.

Naravno, jednom kad izračunamo vjerojatnost za period od godine dana, nije veliki problem iz toga izračunati i za višegodišnja razdoblja, životni vijek elektrane i sl.

7.5. Ukupna vjerojatnost pojave otocnog pogona

Imamo više parova inicijalnih događaja od kojih istovremeno događanje bilo kojeg od parova događaja, tj. istovremeno oba inicijalna događaja koji čine pojedini par (prikazano na stablu kvara na Slici 7-1), dovodi do pojave događaja otocnog rada promatrane elektrane s nekim od lokalnih dijelova elektroenergetskog sustava. Inicijalni događaji u parovima su nezavisni, tj. nema zavisnosti između uravnoteženosti snage u lokalnom dijelu mreže i isklopa određenog sklopnog uređaja.

Vjerojatnost istovremenog događaja pojedinog para događaja (u promatranom periodu) stoga je jednaka umnošku vjerojatnosti jednog i vjerojatnosti drugog događaja iz para. Vjerojatnost tog istovremenog događanja oba inicijalna događaja iz i -tog para događaja označit ćemo s P_i .

Za prvi događaj, uravnoteženost snaga proizvodnje i opterećenja, vjerojatnost izračunamo sukladno formuli (39).

Obzirom da za drugi događaj, isklup sklopnog uređaja, vjerojatnost ne znamo, već znamo očekivani broj isklopa (godišnje), vjerojatnost ukupnog događaja (P_i) formulirati ćemo na malo drugačiji način.

Pogledajmo kolika je vjerojatnost da ne dođe do istovremene pojave oba inicijalna događaja, iz jednog (i -tog) para događaja, niti jednom u promatranom razdoblju. Ona je jednaka vjerojatnosti da niti jednom od svih p_{SUi} puta koliko dođe do isklopa i -tog sklopnog uređaja u promatranom (godišnjem) razdoblju, nisu ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja u lokalnom dijelu mreže.

Događaj „nisu ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja u lokalnom dijelu mreže“ je događaj komplementaran događaju da „jesu ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i snage opterećenja u lokalnom dijelu mreže“, pa je njegova vjerojatnost jednaka:

$$P_{il}' = 1 - P_{il} \quad (40)$$

Vjerojatnost događaja da ne dođe do istovremene pojave oba inicijalna događaja, iz jednog (i -tog) para događaja, niti jednom u promatranom razdoblju, jest:

$$P_i' = 1 - P_i = (P_{il}')^{p_{SUi}} = (1 - P_{il})^{p_{SUi}} \quad (41)$$

gdje su:

P_i' - vjerojatnost događaja da ne dođe do istovremene pojave oba inicijalna događaja iz i -tog para događaja,

P_i - vjerojatnost istovremenog događanja oba inicijalna događaja iz i -tog para događaja,

P_{il}' - vjerojatnost da ne dođe do prvog inicijalnog događaja iz i -tog para inicijalnih događaja,

P_{il} - vjerojatnost pojave prvog inicijalnog događaja iz i -tog para inicijalnih događaja, tj. vjerojatnost da su ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i opterećenja lokalne mreže,

p_{SUi} - broj očekivanih isklopa i -tog sklopnog uređaja u promatranom vremenskom periodu.

Slijedeći korak prema relaciji za ukupnu vjerojatnost je nastavak identične logike. Vjerojatnost da neće doći do istovremene pojave oba inicijalna događaja bilo kojeg od i parava događaja, niti jednom u promatranom razdoblju, jednaka je međusobnom umnošku svih vjerojatnosti prema relaciji (41) za sve parove od 1 do n . Ovoj vjerojatnosti komplementarna je tražena vjerojatnost, da će doći do pojave barem jednog para događaja. Vrijedi slijedeća relacija:

$$P_{or} = 1 - \prod_{i=1}^n P_i' = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{il})^{p_{SUi}} \quad (42)$$

gdje su:

P_{or} - vjerojatnost pojave događaja otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže,

n - broj dijelova lokalne mreže na kojima je moguća pojava otočnog rada elektrane,

P_{il}, p_{SUi} - kako je gore navedeno.

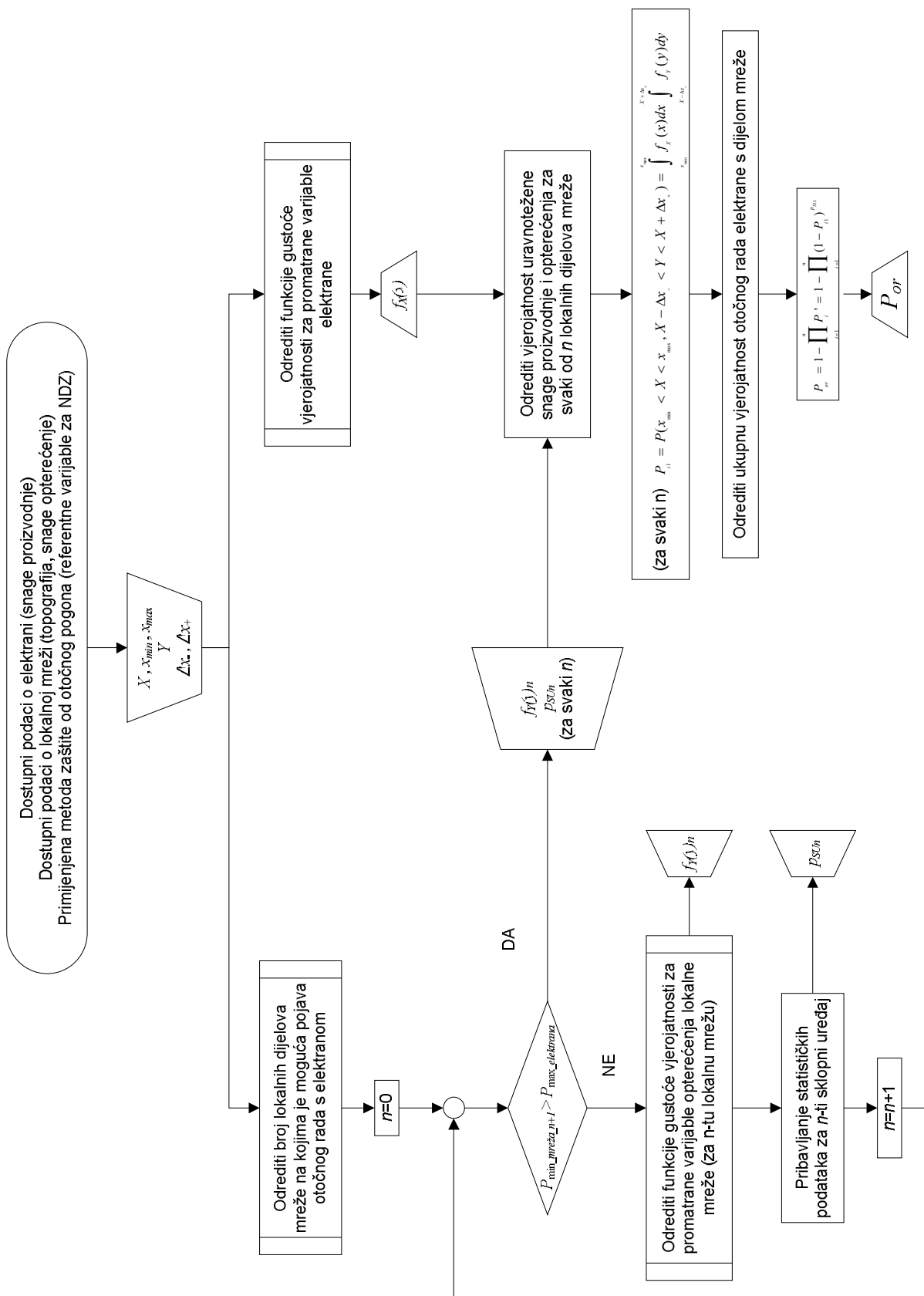
Ovdje je potrebno naglasiti da smo analizom lokalne mreže odredili broj n , da nam je statistički podatak p_{SUi} dostupan iz pogonskih statistika, a da sukladno relaciji (39) moramo odrediti svaki pojedini P_{il} .

7.6. Dijagram toka opisane metode

Opisano u prethodnim dijelovima ovog poglavlja može se uobličiti u proces primjenjiv za izračun vjerojatnosti otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže i predstaviti dijagramom toka. Isti je, kao kratka uputa općenitog postupka, prikazan na Slici 7-2.

Oznake varijabli na dijagramu toka su prema tekstu u ovom poglavlju.

Potprocesi metode s dijagrama toka na Slici 7-2, koji nisu u ovom poglavlju opisani („Određivanje funkcije gustoće vjerojatnosti za promatrane varijable opterećenja lokalne mreže“ i „Određivanje funkcije gustoće vjerojatnosti za promatrane varijable elektrane“) bit će obrađeni u slijedećim poglavljima ovog rada (što se elektrane tiče za specifični tip proučavan u ovom radu, u skladu s naslovom rada).



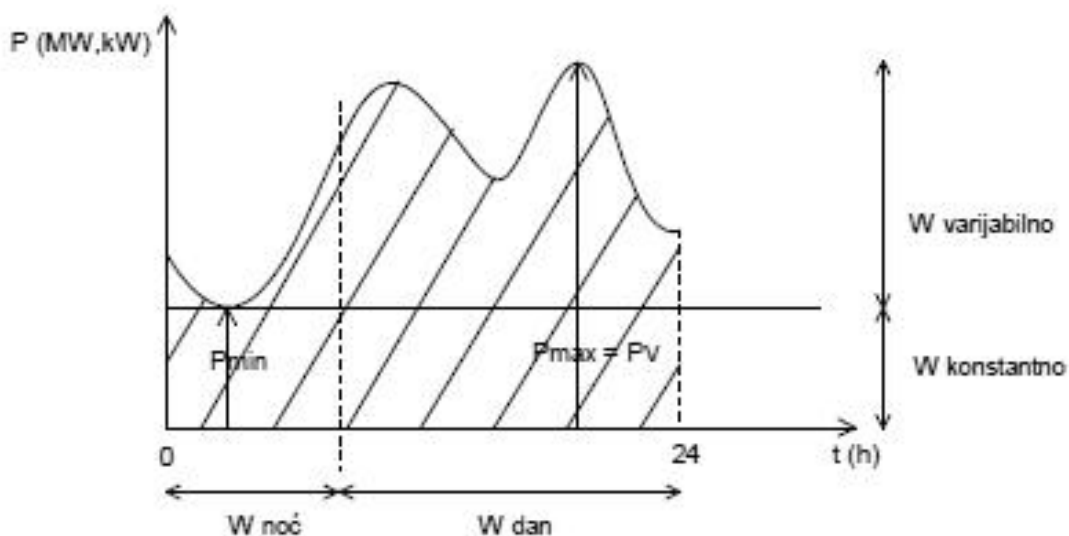
Slika 7-2 Dijagram toka metode za određivanje vjerojatnosti događaja otkoćnog pogona elektrane s dijelom mreže

8. PRIKAZ VARIJABLI SNAGE OPTEREĆENJA LOKALNOG DIJELA MREŽE ODGOVARAJUĆOM FUNKCIJOM GUSTOĆE VJEROJATNOSTI VARIJABLE SNAGE

8.1. Dijagrami snage opterećenja

Kako bi odredili očekivanu vjerojatnost događaja da snaga potrošnje i snaga proizvodnje u određenom dijelu mreže budu uravnoteženi, u određenom vremenskom periodu, potrebno je znati kako se ponašaju (kakve se očekuju) vrijednosti snage potrošnje u tom dijelu mreže u promatranom periodu i vrijednosti snage proizvodnje. U ovom poglavlju prvo razmatramo varijable snage opterećenja mreže.

Uobičajeni prikaz kretanja (radne) snage potrošnje zove se „dnevni dijagram opterećenja“ i prikazan je na Slici 8-1 [53]. Prikaz dnevnih dijagrama jalove snage nije uobičajen u praksi.



Slika 8-1 Tipični dnevni dijagram (radne snage) opterećenja (potrošnje) u nekoj distributivnoj mreži

Dnevni dijagram opterećenja (tipičnog oblika prema prikazanom na Slici 8-1) predstavlja promjenu snage nekog potrošača tijekom dana pri čemu snaga (opterećenje) u pojedinom trenutku ovisi o brojnim faktorima, kao što su:

- struktura potrošača/trošila,

- doba dana/godine,
- klimatski uvjeti (geografska lokacija), itd.

Dnevni dijagram opterećenja izrađuje se kako za cijeli elektroenergetski sustav, tako i za pojedine točke istoga (npr. regije, distributivnog područja, velike transformatorske stanice), te se najčešće odnosi na potrošnju koja je pridružena jednoj trafostanici (tj. potrošnju snage svih potrošača koji se napajaju iz trafostanice), nekog šireg potrošačkog područja [53].

Zahtjevi za električnom energijom od strane potrošača stalno se mijenjaju tokom jednog dana, tjedna, mjeseca, sezone, godine. Varijacije tijekom dana prvenstveno su vezane za noć/dan, dok su varijacije tijekom tjedna vezane za radni/neradni dan. Mjesečne, odnosno sezonske varijacije potrošnje prvenstveno ovise o električnoj energiji koja se koristi za grijanje i hlađenje te rasvjetu. Potrošnja većine industrijskih potrošača je neovisna o sezoni, dok je potrošnja električne energije za rasvjetu, grijanje ili pak kondicioniranje zraka u znatnoj mjeri ovisna o godišnjem dobu.

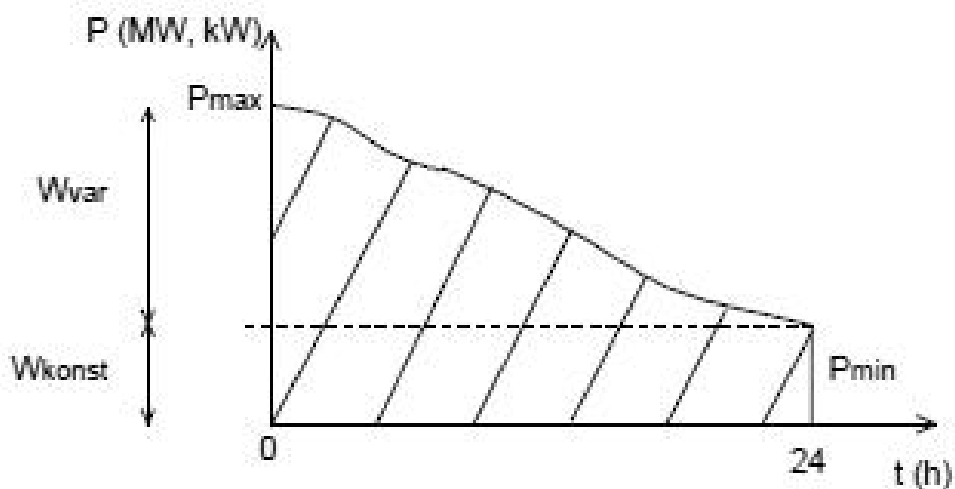
Da se uvažavaju te sezonske i tjedne varijacije, čest je prikaz dijagrama opterećenja sa dva karakteristična dnevna dijagrama: tipičnim ljetnim i tipičnim zimskim dnevnim dijagramom opterećenja, ili čak sa četiri dijagrama: za tipičnu zimsku srijedu i zimsku nedjelju, te za tipičnu ljetnu srijedu i ljetnu nedjelju. Za sve je dijagrame karakteristično da imaju minimalnu dnevnu snagu (P_{min}) i maksimalnu vršnu dnevnu snagu (P_{max}) između kojih varira opterećenje u pojedinim dijelovima dana.

Dnevni dijagram opterećenja u distributivnoj mreži moguće je dakle izraditi za bilo koju pojedinu točku opterećenja. Za SN mrežu to bi tipično bila razina jedne distributivne potrošačke transformatorske stanice SN/NN, tj. 10(20)/0,4 kV [54]. Na razini takve distributivne transformatorske stanice oblik dnevnog dijagrama opterećenja je karakterističan za tu točku.

Uobičajeno se prikazuju dijagrami radne snage. Dijagrami se mogu izraditi na više načina:

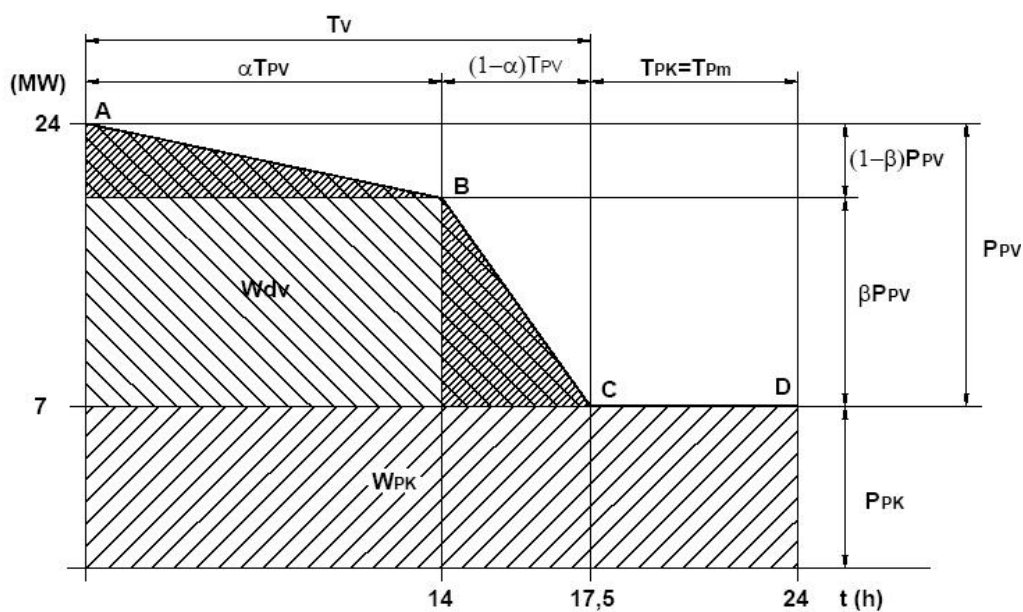
- ako su za određenu točku mreže dostupni dugotrajni mjerni podaci, jednostavnom obradom tih podataka izradi se i prosječni dnevni dijagram opterećenja,
- ako postoje podaci o potrošačima dijela mreže, postojećim i/ili planiranim, tada se mjerenjem ili iz deklariranih podataka, sumacijom po potrošačima može izraditi očekivani dnevni dijagram opterećenja u toj točki mreže
- ako postoji izrađen dnevni dijagram za određenu točku mreže, tada se, u nedostatku boljih podataka, za dijelove te mreže mogu ekstrapolirati dnevni dijagrami iz dostupnog dijagrama.

Iz dnevnih dijagrama moguće je napraviti i krivulju trajanja snage opterećenja. Na Slici 8-2 prikazana je dnevna krivulja trajanja snage opterećenja, za dnevni dijagram opterećenja sa Slike 8-1 [53].



Slika 8-2 Krivulja trajanja snage opterećenja

Često se, pri razmatranjima krivulje trajanja snage opterećenja, koristi metoda aproksimacije dnevne krivulje trajanja opterećenja s tri pravca [55]. Takva aproksimacija prikazana je na Slici 8-3 [55]. Način konstrukcije aproksimirane krivulje opisan je u navedenoj literaturi.



Slika 8-3 Aproksimacija dnevne krivulje trajanja opterećenja s tri pravca [55]

8.2. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable snage opterećenja

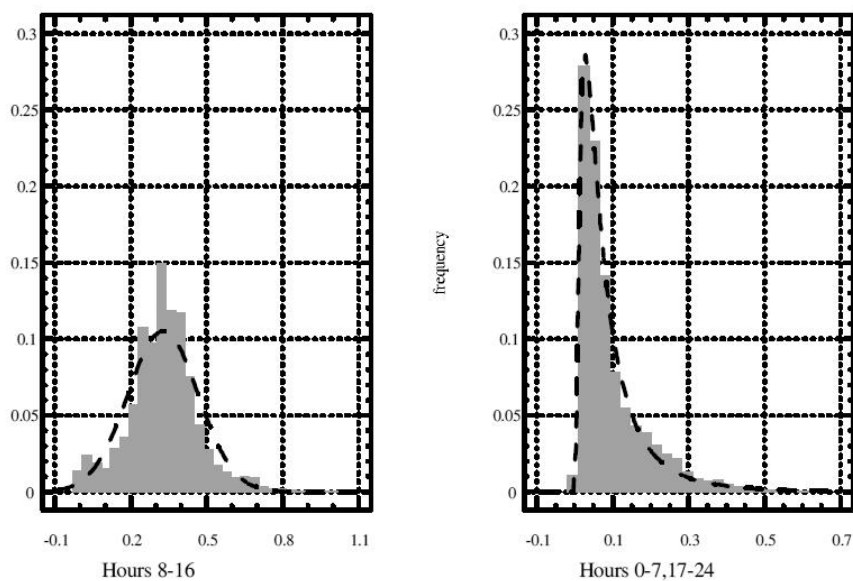
Bez problema možemo zaključiti da je također moguće dijagramom prikazati raspodjelu vrijednosti snaga opterećenja. Takva raspodjela (krivulja) prikazivala bi gustoću vjerojatnosti varijable snage opterećenja u promatranoj točki mreže. Kad bi za istu odredili matematički izraz, tada bi to bila „funkcija gustoće vjerojatnosti varijable opterećenja“.

Ono što je preduvjet za određivanje funkcije koja bi opisivala gustoću vjerojatnosti varijable opterećenja je da je dostupan dnevni dijagram snage opterećenja. Definitivno se može pretpostaviti da su u različitim točkama mreže dnevni dijagrami opterećenja različiti, ne samo u veličinama, nego i u oblicima krivulja dnevnih dijagrama. Samim time, za očekivati je i da su raspodjele vrijednosti snaga opterećenja različitih oblika krivulja, tj. da funkcija koja opisuje te gustoće vjerojatnosti nije univerzalna, već se razlikuje u ovisnosti o promatranoj točki mreže.

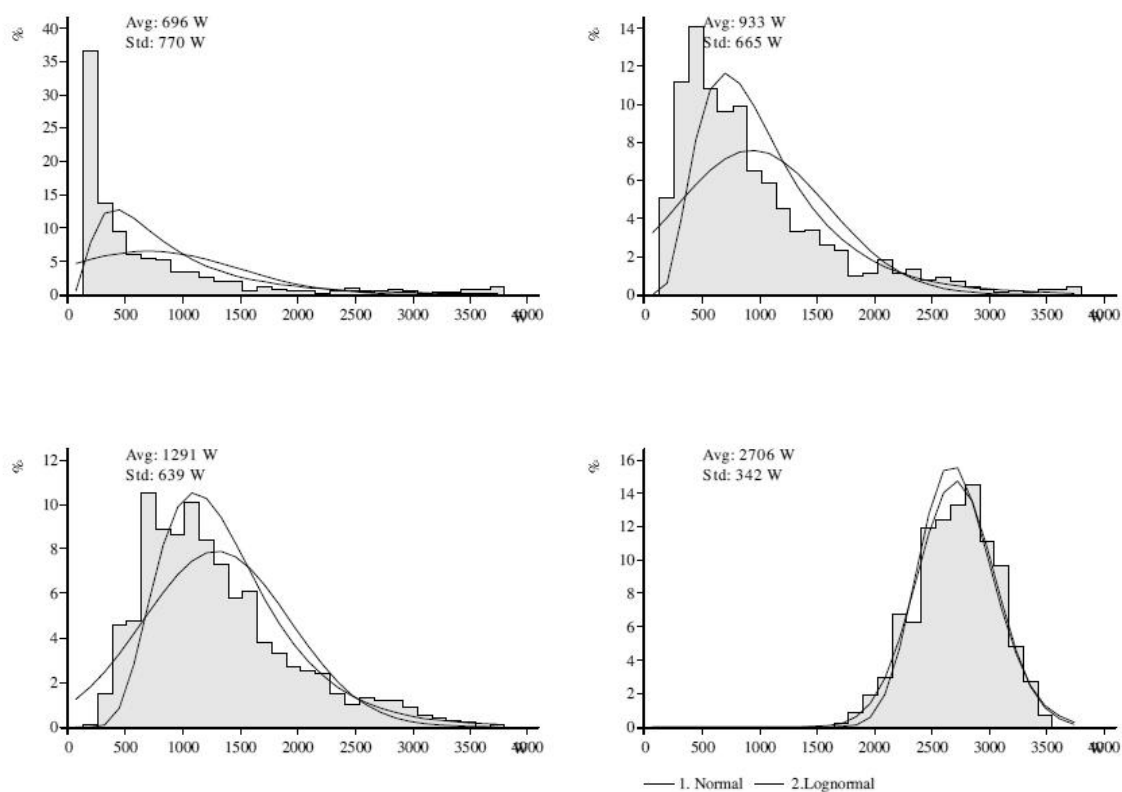
Različita istraživanja provedena su u smjeru statističkog (vjerojatnosnog) opisivanja snage opterećenja u mrežama. U ovom radu nije fokus na dubinu proučavanja ovog dijela, jer to područje samo za sebe je dovoljno široko da se bavi isključivo njime. Stoga u ovom dijelu, na temelju relevantnih istraživanja, cilj je samo dati smjernicu mogućeg modeliranja funkcije gustoće vjerojatnosti snage koja nam je potrebna za daljnju razradu problema koji je predmet ovog rada.

Obično se u statistici, kad nisu dovoljno dobro poznate funkcije distribucije varijabli, pretpostavlja normalna razdioba, pa se tako i za razdiobu snaga često pretpostavlja normalna razdioba [52, 56]. Neka istraživanja pokazala su da općenito statistička razdioba varijable snage opterećenja ne prati niti jednu od uobičajenih funkcija razdiobe koje se koriste za matematičko opisivanje prirodnih fenomena [57]. S druge strane, istraživanja bazirana na modeliranju po određenim dijelovima dnevnog dijagrama opterećenja pokazuju mogućnost primjene normalne razdiobe i log-normalne razdiobe za vjerojatnosno modeliranje, što je prikazano na Slici 8-4 [58].

Isto istraživanje pokazuje da je za potrošačke klase potrošača u kategoriji domaćinstva moguće zaključiti da se snage mogu aproksimirati normalnom ili log-normalnom razdiobom, ali ne jednoznačno, već u ovisnosti o zabilježenim prosječnim angažiranim snagama, pa se za niže prosječne snage razdiobe mogu prikazati krivuljom log-normalne razdiobe, a za više snage razdioba se približava normalnoj razdiobi. Slika 8-5 prikazuje aproksimirane krivulje za snage nekih primjera klasa potrošača iz navedenog istraživanja [58].



Slika 8-4 Primjer razdiobe snaga potrošača određene klase (određenih karakteristika) koja se može reprezentirati normalnom razdiobom (lijevo) i log-normalnom razdiobom (desno) u pojedinim dijelovima dana [58]



Slika 8-5 Primjer razdiobe varijable snage različitih potrošača kategorije kućanstva i zadovoljavajućeg modeliranja normalnom i log-normalnom razdiobom varijable [58].

8.3. Modeliranje uz malo dostupnih podataka

8.3.1. Nepotpuni podaci o snazi opterećenja po točkama mreže

Za određeno vjerojatnosno modeliranje te za dalje proračune potrebni su podaci o snagama opterećenja (kretanju snaga opterećenja) po pojedinim točkama mreže. Te točke su mjesta sklopnih uređaja na kojima može doći do prekida veze između lokalnog dijela mreže i ostatka sustava. Problem je nedostatak podataka po svim točkama koje ćemo promatrati, što se sa sigurnošću može zaključiti.

Podaci sa mjernih uređaja u srednjenaponskoj mreži uglavnom su dostupni na početku odvoda iz pojne transformatorske stanice VN/SN, tj. može se očekivati da se podaci po odvodima kao cjelini mogu pribaviti. Na početku odvoda nalazi se vodno polje s prekidačem i mjernim transformatorima. Za ostatak mreže (u dubinu SN mreže), na mjestima gdje su uglavnom u vodnim poljima postrojenja (SN postrojenja za sekundarnu distribuciju tj. RMU postrojenja) rastavne sklopke, bez mjernih transformatora, te podatke nemamo.

Na distributivnim transformatorskim stanicama SN/NN obično mjerenja postoje na NN strani transformatora, pa je snaga opterećenja same distributivne transformatorske stanice poznata (potrebno je ocijeniti i gubitke na transformatoru). Podaci koji nas zanimaju su zapravo koliko snage prolazi iz ulaznog vodnog polja u izlazno vodno polje na SN razini, pa se taj podatak može ocijeniti oduzimanjem opterećenja distributivnih transformatorskih stanica koje se nalaze prije promatrane točke od opterećenja cijelog izvoda za koje podatke imamo. Takav način, sumacija dnevnih dijagrama po pojedinim točkama, izrazito je obiman i zahtijevan posao. Cilj ovog rada je na jednostavniji način dobiti relativno pouzdan model.

Kao jednostavniji način, naravno manje precizan, ali mnogo manje zahtijevan za prikupljanje podataka, moguće je odlučiti da se uzme samo određene parametre, one koji su lako dobavljivi ili sigurno dostupni, te prema njima procijeni veličine koje su nam potrebne i iz kojih možemo dobiti potrebne aproksimacije funkcija razdiobe snage opterećenja po promatranim točkama.

Lako dobavljivi podaci su sljedeći:

- Srednja, minimalna i maksimalna postignuta opterećenja izvoda iz pojne transformatorske stanice VN/SN ili SN/SN,
- Prosječni faktor snage po izvodu, tj. $\cos\varphi$ za osnovni harmonik,
- Nazivne snage distributivnih transformatorskih stanica SN/NN po izvodima,

- Srednja, minimalna i maksimalna postignuta radna snaga opterećenja pojedine distributivne transformatorske stanice SN/NN, na niskonaponskoj strani.

Navedeni podaci su za određeno vrijeme koje se promatra. Kako je prije navedeno, postoje dnevne i sezonske varijacije, ali godišnji periodi se ciklički ponavljaju, pa je stoga sve navedeno moguće dobiti za jedan godišnji period, ili prosječne godišnje veličine za višegodišnje periode. Ili se isti podaci mogu procijeniti za neko buduće stanje prema planiranju novih priključenja itd.

Kao zaključak, iako su kompletni potrebni podaci za točno modeliranje funkcija razdiobe nedostupni, određene podatke možemo prikupiti. Cilj je pomoću tih podataka pokušati aproksimirati potrebne razdiobe snaga.

8.3.2. Pogodna funkcija razdiobe za modeliranje iz dostupnih podataka

Ono što je sada bitno naglasiti, u skladu s raznim istraživanjima opisanim u [58], snage opterećenja po vrstama potrošača / dijelovima mreže imaju određenu vjerojatnosnu razdiobu, te vjerojatnost pojave sigurno nije jednaka za sve snage koje su u mogućem rasponu. Isto je vidljivo npr. na Slici 8-5. U istraživanju [58] autori su dijagrame razdioba snaga za kategorije potrošača aproksimirali normalnim i log-normalnim razdiobama (Slika 8-5).

Za određivanje karakteristika tih razdioba (srednje vrijednosti i standardnog odstupanja kod normalne razdiobe) ili karakteristika neke druge razdiobe potrebno je dosta podataka. Kako je navedeno u poglavlju 8.3.1., ono što se može očekivati kao lako dostupno najčešće je podatak o postignutim srednjoj, minimalnoj i maksimalnoj snazi.

Navedena tri podatka su jako malo, međutim iz njih znamo tri karakteristične točke. U takvim slučajevima u vjerojatnosnim istraživanjima najčešće se koristi trokutasta ili triangularna razdioba [59]. Kao brza potvrda da je smisleno koristiti trokutastu razdiobu i u ovom slučaju, dovoljno je pogledati oblike razdiobi snaga sve četiri različite kategorije potrošača iz provedenog istraživanja [58] sa Slike 8-5, gdje se odmah uočava da se sve razdiobe mogu prilično dobro aproksimirati i trokutastim krivuljama.

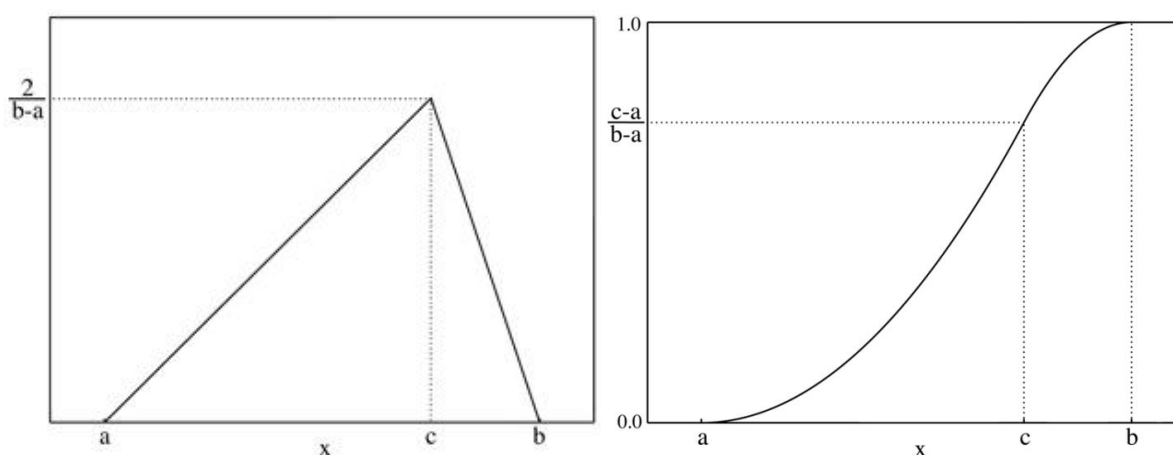
Ako se osvrnemo i na priznati način aproksimacije dnevne krivulje trajanja opterećenja s tri pravca (prikazano na Slici 8-3) može se uočiti da takav prikaz odgovara trokutastoj razdiobi, tj funkciji gustoće vjerojatnosti varijable snage trokutastog oblika, nesimetričnog općenitog oblika.

8.3.3. Trokutasta ili triangularna razdioba

U teoriji vjerojatnosti i statistici, trokutasta ili triangularna razdioba se tipično koristi kao subjektivan opis skupova podataka za koje postoji samo ograničeni broj uzoraka. Temelji se dakle na poznavanju minimuma i maksimuma i očekivane veličine (tj. procijenjene očekivane veličine ako ona nije točno poznata, obično iskustvenom procjenom ili pogađanjem, što se u literaturi naziva i engleskim izrazom „*inspired guess*“ [60]). Stoga se trokutasta razdioba često naziva i „*lack of knowledge*“ razdiobom (razdiobom u situaciji nedostatnog poznavanja skupa).

Trokutasta ili triangularna razdioba je dakle kontinuirana razdioba vjerojatnosti s donjom granicom vrijednosti a , gornjom granicom vrijednosti b i očekivanom vrijednosti c , gdje vrijedi da je $a < b$ i $a \leq c \leq b$.

Na Slici 8-6 prikazane su funkcija gustoće vjerojatnosti i kumulativna funkcija razdiobe za varijablu čija razdioba je trokutasta. Za varijablu koja ima triangularnu razdiobu vrijede u nastavku navedene osnovne relacije koje će biti od koristi u nastavku rada.



Slika 8-6 Funkcija gustoće vjerojatnosti, PDF, (lijevo) i kumulativna funkcija razdiobe, CDF, (desno) za varijablu koja se ponaša po trokutastoj razdiobi

Za osnovne parametre vrijedi:

$$\begin{aligned} a &: a \in (-\infty, \infty) \\ b &: a < b \\ c &: a \leq c \leq b \end{aligned} \quad (43)$$

gdje su:

a - donja granica mogućih vrijednosti varijable,

b - gornja granica mogućih vrijednosti varijable,
 c - očekivana vrijednost varijable (*mode*).

Za funkciju gustoće vjerojatnosti (PDF) vrijedi:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , \text{za } x < a \\ \frac{2 \cdot (x-a)}{(b-a) \cdot (c-a)} & , \text{za } a \leq x < c \\ \frac{2}{(b-a)} & , \text{za } x = c \\ \frac{2 \cdot (b-x)}{(b-a) \cdot (b-c)} & , \text{za } c < x \leq b \\ 0 & , \text{za } b < x \end{cases} \quad (44)$$

Za kumulativnu funkciju razdiobe (CDF) vrijedi:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & , \text{za } x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (c-a)} & , \text{za } a < x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-c)} & , \text{za } c < x < b \\ 1 & , \text{za } b \leq x \end{cases} \quad (45)$$

Srednja vrijednost varijable (*mean*) je:

$$\bar{x} = \frac{a+b+c}{3} \quad (46)$$

8.3.3.1. Prilagodba dostupnim podacima

U poglavlju 8.3.1. navedeni sigurno očekivani dostupni podaci su srednja ($\bar{x}$), minimalna (a) i maksimalna (b) postignuta opterećenja. Da bi iz navedenih dobili treću potrebnu točku triangularne distribucije, očekivanu vrijednost (c), koristimo sljedeću relaciju.

$$c = 3 \cdot \bar{x} - a - b \quad (47)$$

Odgovarajuće prilagođena funkcija gustoće vjerojatnosti prema relaciji (44) sada jest:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ za } x < a \\ \frac{2 \cdot (x-a)}{(b-a) \cdot (3 \cdot \bar{x} - 2 \cdot a - b)} & , \text{ za } a \leq x < c \\ \frac{2}{(b-a)} & , \text{ za } x = c \\ \frac{2 \cdot (b-x)}{(b-a) \cdot (2 \cdot b - 3 \cdot \bar{x} + a)} & , \text{ za } c < x \leq b \\ 0 & , \text{ za } b < x \end{cases} \quad (48)$$

8.3.3.2. Ograničenje

Ograničenje koje trokutasta distribucija ima u prikazivanju gustoće vjerojatnosti varijable snage vidljivo je iz relacije (46). Srednja vrijednost u bilo kojem slučaju nalazi se u srednjoj trećini raspona između najmanje (a) i najveće (b) vrijednosti, tj. u srednjoj trećini raspona između minimalne i maksimalne postignute snage.

Takvo ograničenje u većini slučajeva nije posebno restriktivno, jer će uobičajeno ovo ograničenje biti zadovoljeno, tj. za očekivati je da srednja vrijednost snage opterećenja i bude u tom rasponu. U ostalim slučajevima pri modeliranju lako je detektirati problem jer će relacija (47) dati rezultat $c < a$ ili $c > b$. U takvim slučajevima potrebno je istražiti detaljnije karakteristiku potrošnje i vrste potrošača, te razlog zbog kojeg srednja vrijednost teži jednoj od graničnih vrijednosti.

Detaljnijim pregledom podataka, eventualne ekstreme koji su posljedica pogrešaka u mjerenju ili događaja koji nisu uobičajeni može se izostaviti, pa s novim ulaznim podacima modelirati odgovarajuću trokutastu razdiobu gustoće vjerojatnosti.

8.4. Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja

8.4.1. Modeliranje uz poznate ulazne podatke

Što se tiče radne snage opterećenja, iz tri poznate vrijednosti sada nije problem funkciju gustoće vjerojatnosti varijable snage aproksimirati matematičkom funkcijom za trokutastu razdiobu.

Navedene tri vrijednosti potrebno je pribaviti u točkama gdje je to moguće, a izračunati ili ocijeniti na svim onim točkama gdje nema točnih egzaktnih podataka, tj. gdje se nalaze

rasklopni uređaju, a na kojima nema mjernih uređaja i odgovarajućih podataka već se iz posredno poznatih podataka tražene tri vrijednosti mogu izračunati ili procijeniti.

8.4.2. Modeliranje uz ekstrapolirane ulazne podatke

Ako to ima opravdanja, prvenstveno prema dugotrajnom pogonskom iskustvu, kao moguće pojednostavljenje i ubrzanje metodologije može se pretpostaviti da na istom izvodu snaga opterećenja SN izvoda raspodijeljena linearno po pojedinim transformatorskim stanicama SN/NN sukladno nazivnim snagama njihovih transformatora. To bi značilo da po pojedinim promatranim točkama funkcija gustoće vjerojatnosti snage opterećenja ima isti oblik, a apsolutno se mijenja u relativnim vrijednostima, u odnosu na preostalu nazivnu snagu transformatora SN/NN iza točke za koju se promatra. Kako na početku izvoda imamo nesporne mjerene podatke, a znamo i sve nazivne snage distributivnih transformatorskih stanica na tom izvodu, za sve ostale promatrane točke na tom izvodu vrlo brzo dobijemo odgovarajuće funkcije gustoće vjerojatnosti, prema omjerima nazivnih snaga.

Relacija koja opisuje ovo ekstrapoliranje je:

$$F_{opti_i} = F_{izvod} \cdot \frac{\sum_{j=1}^i S_{n_j}}{\sum_{j=1}^n S_{n_j}} \quad (49)$$

gdje je:

F_{opti_i} - funkcija gustoće vjerojatnosti snage opterećenja na mjestu i-tog sklopnog uređaja,

F_{izvod} - funkcija gustoće vjerojatnosti snage opterećenja cijelog izvoda iz TS VN/SN,

S_{n_j} - nazivna snaga j-te transformatorske stanice SN/NN na izvodu,

n - broj transformatorskih stanica SN/NN na izvodu.

U nedostatku boljih ulaznih podataka, ovakav način je temeljen na dostupnim parametrima, pa se svakako preporuča.

8.5. Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja

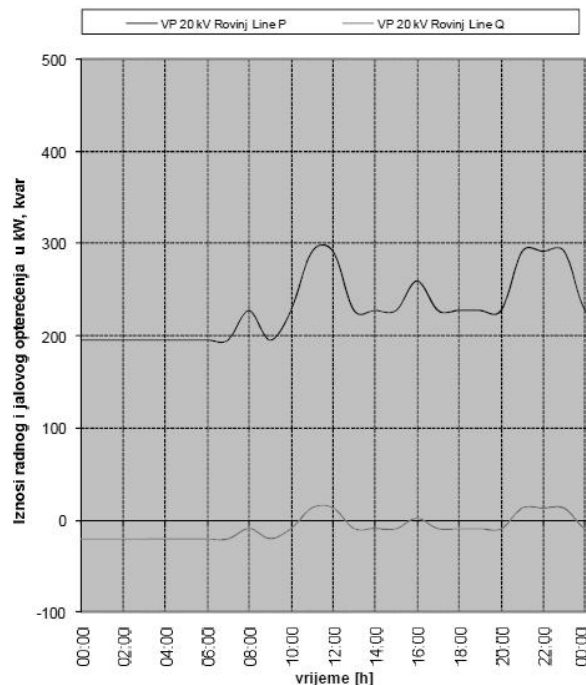
Za jalovu snagu opterećenja također želimo izvršiti aproksimaciju odgovarajućom funkcijom gustoće vjerojatnosti. Jalova snaga može biti kapacitivnog karaktera ili induktivnog karaktera. Ovdje je potrebno naglasiti da induktivne jalove snage opterećenja predstavljamo s pozitivnim predznakom, a kapacitivne jalove snage opterećenja s negativnim predznakom (obrnuto nego kad smo razmatrali jalovu snagu proizvođača energije, elektrane, u poglavlju 6.6.1).

8.5.1. Dnevna krivulja jalove snage opterećenja

U skladu s Mrežnim pravilima [9], faktor snage kod instalacija kupaca koji se priključuju na distributivnu mrežu treba biti od $\cos \varphi = 0,95$ induktivno do $\cos \varphi = 1$. Tako bi se moglo zaključiti da je i faktor snage bilo koje skupine potrošača u tom rasponu, tj. da je snaga opterećenja induktivnog karaktera. Međutim, cilj upravljanja pogonom distributivne mreže je i smanjenje gubitaka te mreže, pa operateri distributivnih mreža na određenim mjestima ugrađuju kompenzacijske uređaje, kako bi se jalova energija proizvodila što bliže mjestu gdje se troši. Takvi kompenzacijski uređaji ugrađuju se u pravilu na NN strani u svim transformatorskim stanicama SN/NN radi kompenzacije induktivnih gubitaka na transformatoru. Te kompenzacije obično su fiksne, a uz to i tipskih iznosa u ovisnosti o nazivnim snagama transformatora SN/NN. U periodima niskih opterećenja, dolazi do nadkompenzacije, tj. takve distributivne transformatorske stanice u tom slučaju imaju jalove snage kapacitivnog karaktera, tj. $\cos \varphi$ u kapacitivnom području. Također, ako su SN mreže izvedene kabelskim vodovima u većim duljinama, oni doprinose kapacitivnom karakteru ukupne snage opterećenja. Uz to, u slučajevima induktivnih karaktera snaga opterećenja, česta je i centralna kompenzacija na SN strani transformatorske stanice VN/SN. To nije od velikog značaja u ovim razmatranjima, osim u slučaju kad analiza pokaže da je moguće da promatrana elektrana u otvorenom radu ostane s cijelim razvodom pojne transformatorske stanice ili čak s dijelom mreže veće naponske razine, kada i takve centralne kompenzacije treba uzeti u obzir. Stoga nije moguće zaključiti da se snaga opterećenja promatranog dijela mreže jednoznačno nalazi u induktivnom području.

Ono što se može zaključiti jest da oblik dnevne krivulje jalove snage opterećenja prati oblik dnevne krivulje radne snage opterećenja [61]. Jedino što se vrijednost jalove snage opterećenja može kretati i u rasponima negativne vrijednosti (kapacitivni karakter) i pozitivne

vrijednosti (induktivni karakter). Ilustracija navedenog vidljiva je na Slici 8-7 na primjeru jednog stvarnog mjerenja opterećenja slabo opterećenog kratkog SN izvoda jedne transformatorske stanice VN/SN.



Slika 8-7 Opterećenje izvoda VP Rovinj TS 110/20 kV Vin čent prije priključenja SE Kanfanar [62]

8.5.2. Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja

Obzirom da dnevna krivulja jalove snage opterećenja oblikom prati oblik dnevne krivulje radne snage opterećenja, slično se ponaša i krivulja gustoće vjerojatnosti jalove snage u odnosu na krivulju gustoće vjerojatnosti radne snage. Stoga je moguće primijeniti istu logiku za aproksimaciju krivulje gustoće vjerojatnosti kao što je napravljeno za radnu snagu opterećenja, tj. aproksimirati krivulju gustoće vjerojatnosti funkcijom gustoće vjerojatnosti za trokutastu razdiobu varijable.

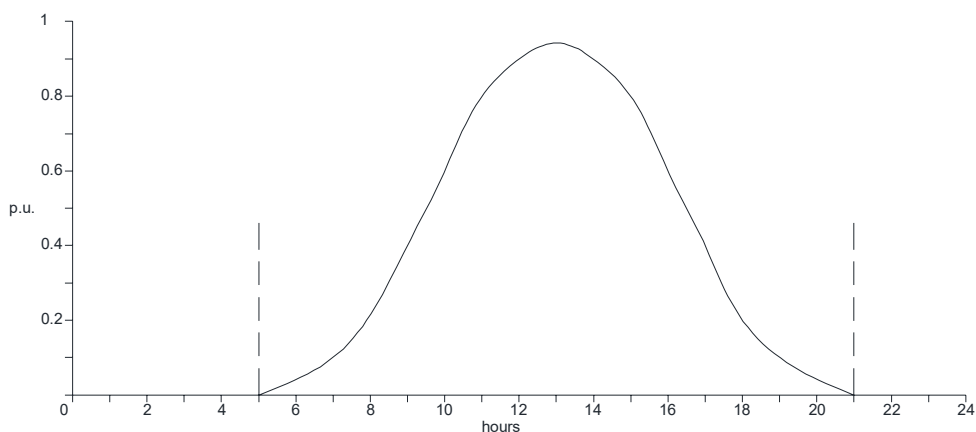
Ako pretpostavimo da su nam od dostupnih podataka poznati minimalna, maksimalna i prosječna mjerena vrijednost jalove snage opterećenja, tada sukladno opisanom u poglavlju 8.3.3. imamo sve potrebne podatke za modeliranje trokutaste funkcije gustoće vjerojatnosti (lijevi graf na Slici 8-6).

U nedostatku svih potrebnih mjerenih podataka, također je moguće primijeniti ekstrapoliranje poznatih podataka za modeliranje svih potrebnih funkcija. I ovdje se može iskoristiti relacija (49).

9. PRIKAZ VARIJABLI SNAGE PROIZVODNJE ELEKTRANE ODGOVARAJUĆOM FUNKCIJOM GUSTOĆE VJEROJATNOSTI VARIJABLE SNAGE

9.1. Dijagrami snage proizvodnje fotonaponske elektrane

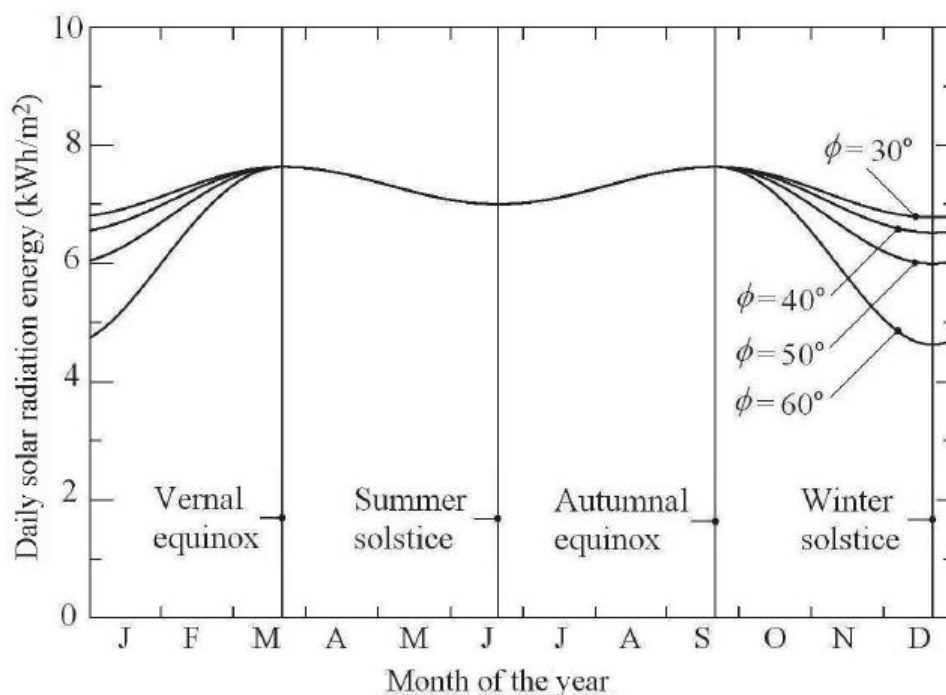
O proizvodnji snage od strane u ovom radu proučavanog tipa elektrana već je bilo riječi u prethodnim poglavljima. Na Slici 6-6 tako su prikazani mjereni podaci dnevnog kretanja radne i jalove snage stvarne elektrane u jednom zimskom danu. Uobičajeni dnevni dijagram proizvodnje radne snage za jedan sunčan ljetni dan prikazan je ovdje na Slici 9-1.



Slika 9-1 Tipični dnevni dijagram (radne snage) proizvodnje fotonaponske elektrane ljeti

Može se primijetiti razlika između dijagrama na Slikama 6-6 i 9-1, o kojoj je također već bilo govora. Ljetni elektrana proizvodi u duljem vremenskom razdoblju nego zimi, što je jasno, jer dan (točnije vrijeme od izlaska do zalaska Sunca) ljeti traje duže nego zimi. Dnevni dijagram proizvodnje, dakle, kroz godinu je promjenjiv.

Ne samo trajanje, već i dozačena energija dnevnog sunčevog zračenja po površini podloge (fotonaponskih panela) sezonski se razlikuje. Maksimalna ukupna energija sunčevog zračenja kroz cjelokupnu godinu dobije se na površini položenoj pod kutem koji odgovara geografskoj širini na kojoj se nalazi. Stoga je uobičajeno fotonaponske panele montirati na taj način. Još bolja učinkovitost dobije se s osno pomičnim panelima koji prate gibanje Sunca. Na Slici 9-2 prikazana je jedan primjer krivulja kretanja veličine dnevne dozačene sunčeve energije na površinu pod kutem kroz jednu godinu [63].



Slika 9-2 Krivulja kretanja veličine dnevne doza čene sunčeve energije na površinu pod kutem kroz jednu godinu [63]

Za svrhu ovog vjerojatnosnog modeliranja, kako je navedeno u Poglavlju 7.4 ovog rada, zanimaju nas primarno godišnji periodi. Ako promatramo godinu, ono što je za modeliranje dobro je da se prosječnim godišnjim dnevnim dijagramom eliminiraju sezonske oscilacije.

9.1.1. Prosječni godišnji dnevni dijagram

Prosječni godišnji dnevni dijagram ima trajanje proizvodnje od 6 sati do 18 sati, a u ostatku dnevnog dijagrama je noćno razdoblje u kojem nema proizvodnje. Jednu polovinu vremena (godine) je dakle elektrana bez proizvodnje.

Osim toga poznato je da se snaga kreće od minimalne do maksimalne, o čemu možemo pribaviti podatke, bilo u fazi pripreme i planiranja elektrane ili iz mjerenja za vrijeme eksploatacije elektrane.

Isto tako, uvijek je moguće ocijeniti podatak o prosječnoj godišnjoj proizvodnji, tj. o prosječnoj godišnjoj snazi elektrane. Taj podatak također je moguće dobiti ili mjerenjem kroz eksploataciju elektrane ili računanjem iz drugih dostupnih podataka (sunčeva zračenje po jedinici površine na lokaciji, karakteristike ugrađene opreme, konfiguracija elektrane itd.), ako se ovo modeliranje vrši u pripremnoj fazi izgradnje elektrane. I bez ove svrhe, taj podatak (i

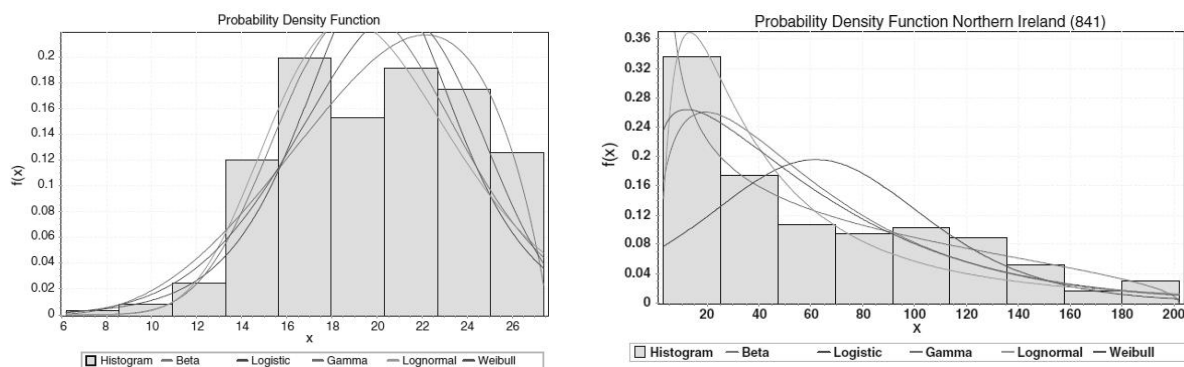
očekivani godišnji dijagram proizvodnje) je jedan od osnovnih podataka pri procjeni investicije u izgradnju elektrane, pa je uvijek sigurno dostupan.

9.2. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje elektrane

Ono što nam je potrebno za daljnje proučavanje jest funkcija gustoće vjerojatnosti varijable snage elektrane za promatrano godišnje razdoblje. Tu funkciju dobije se aproksimacijom krivulje raspodjele vrijednosti snaga proizvodnje.

Kako je već i kod određivanja gustoće vjerojatnosti varijabli snage opterećenja napomenuto, u ovom radu nije fokus na dubini proučavanja ove tematike, jer to područje samo za sebe je dovoljno široko, pa je cilj samo, uz referiranje na druga provedena relevantna istraživanja, dati smjernicu mogućeg modeliranja funkcije gustoće vjerojatnosti snage koja nam je potrebna za daljnju razradu problema vjerojatnosti pojave otočnog rada elektrane koji je predmet ovog rada.

Istraživanja provedenih u specifičnom smjeru statističkog (vjerojatnosnog) opisivanja snage proizvodnje fotonaponske elektrane nema mnogo u dostupnoj literaturi [64], ali je mogućnost vjerojatnosnog modeliranja veličine dozračenog sunčevog zračenja na zemljinoj površini, za različite potrebe, istraživana od strane više istraživača [65, 66, 67].



Slika 9-3 Primjer aproksimacije razdiobe gustoće vjerojatnosti veličine sunčevog zračenja na jedinicu površine, za lokaciju Abuja, Nigerija (lijevo) i Belfast, UK (desno) pomoću različitih funkcija razdiobe (beta, logistička, gama, log-normalna, Weibullova) [68]

Kako je snaga proizvodnje elektrane u direktnoj korelaciji s količinom dozračenog sunčevog zračenja na površinu fotonaponskih panela, karakteristični oblik funkcije gustoće

vjerojatnosti snage proizvodnje u godišnjem periodu odgovarat će obliku funkcije gusto će vjerojatnosti veličine dozračenog sunčevog zračenja na jedinicu površine (na istoj lokaciji). Na Slici 9-3 prikazan je primjer iz literature [68] za aproksimaciju razdiobe gusto će vjerojatnosti veličine sunčevog zračenja na jedinicu površine, za dvije lokacije, Abuju u Nigeriji i Belfast u Ujedinjenom Kraljevstvu. Korištene su sljede će funkcije razdiobe: beta, logisti čka, gama, log-normalna i Weibullova. Po autorima rada beta distribucija pokazuje najbolju koincidenciju s mjerenim podacima.

Kako je u istraživanju pri izradi ovog rada provedeno prikupljanje nekih dostupnih mjerenja za stvarnu elektranu (SE Kanfanar), u sljede ćem poglavlju će se iz tih prikupljenih mjerenja pokušati donijeti neki dodatni zaklju čci vezani uz mogućnost modeliranja funkcije gustoće vjerojatnosti varijable snage.

9.3. Mjerni podaci pribavljeni kroz istraživanje pri izradi ovog rada

Mjerenja snage elektrane SE Kanfanar prikupljena za svrhu istraživanja u ovom radu vršena su u razdoblju od 1.1.2014. do 23.6.2014. Mjerenja sadržavaju prosje čne zabilježene snage u satnim vremenskim razdobljima u tom periodu. Detaljniji opis mjerenja nalazi se u Prilogu 2 ovog rada.

9.3.1. Manjkavosti korištenih mjernih podataka

Ova mjerenja nisu napravljena kao planski eksperiment s ciljem vjerojatnosnog modeliranja već su to bila dostupna mjerenja iz sustava nadzora elektrane [69] koja se koriste kao jedan od elemenata za donošenje ovdje navedenog zaklju čka. Stoga se mora napomenuti da mjerenja nisu reprezentativna, ali smatram da ukazuju na opravdanost određene mogućnosti modeliranja, što će biti objašnjeno u nastavku rada.

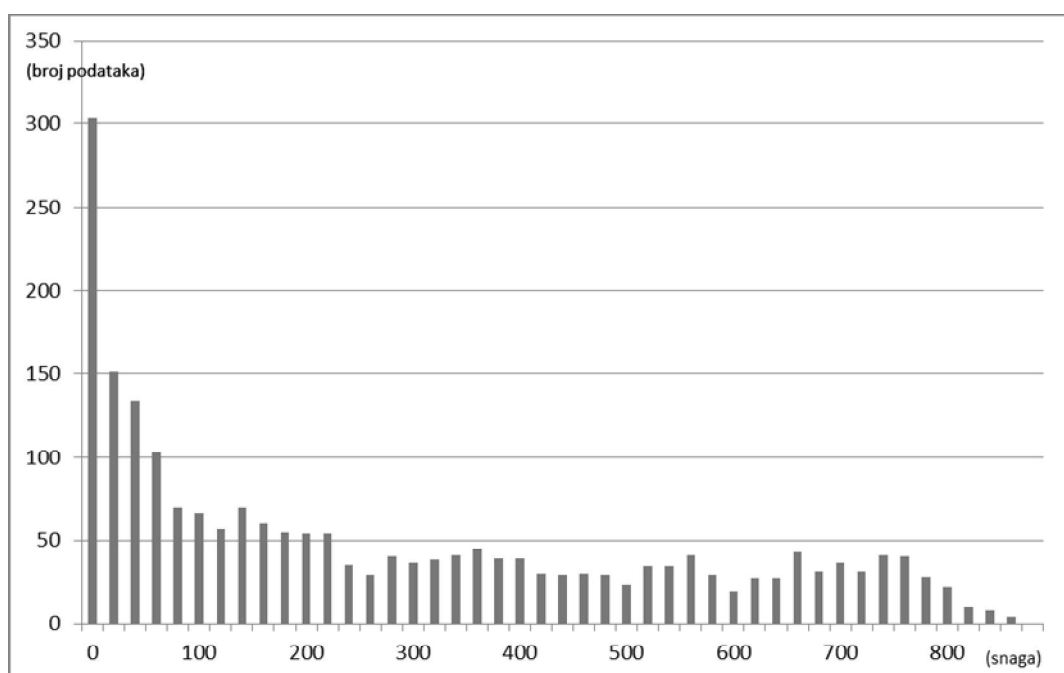
Prvi razlog nereprezentativnosti mjerenja je period u kojem su vršena. Kako nas zanima nadomjesni godišnji dnevni dijagram proizvodnje, bilo bi poželjno imati mjerenja kroz period barem jedne kompletne godine. Me đutim, period mjerenja pokriva gotovo u potpunosti cijeli polugodišnji period od zimskog do ljetnog solsticija (bez samo prvih 10 dana), pa time za ovu svrhu zadovoljavaju će reprezentira jednu od dvije polovice godine (i to u odgovaraju ćem razdoblju što se sun čeve aktivnosti ti će, jer je druga polovica, od ljetnog do zimskog solsticija,

očekivano zrcalno simetrična, što je vidljivo npr. sa Slike 9-2). Time se s ovom polovicom godine mogu reprezentirati godišnji očekivani podaci.

Druga manjakavost mjerenja je što pribavljeni mjerni podaci predstavljaju prosječne satne vrijednosti snage elektrane u svim satnim periodima. Kako u istraživanju modeliramo funkciju gustoće vjerojatnosti trenutne vrijednosti snage elektrane, to su ovi satni podaci neodgovarajući, tj. rezultirajuća krivulja gustoće vjerojatnosti iz dostupnih podataka prikazivat će razdiobu gustoće vjerojatnosti prosječne satne snage, a ne razdiobu gustoće vjerojatnosti trenutne vrijednosti snage. Međutim, svakako i ovakvi podaci daju određenu korisnu sliku ponašanja varijable snage elektrane.

9.3.2. Grafički prikaz pribavljenih mjernih podataka

Na Slici 9-4 prikazana je grafička raspodjela prethodno opisanih prikupljenih mjernih podataka, na način da izrađeni dijagram odgovara oblikom dijagramu gustoće vjerojatnosti snage elektrane. Visine prikazanih stupaca odgovaraju količini zabilježenih mjernih podataka za veličinu vrijednosti snage elektrane u pojedinom rasponu. Svaki raspon odgovara 20 kVA (prvi raspon je od 0 do 20 kVA, drugi od 20 kVA do 40 kVA itd.). Os apscisa predstavlja vrijednost snage (pojedine raspone od 20 kVA), a os ordinata broj zabilježenih mjerenja prosječne satne snage (u svakom pojedinom rasponu).



Slika 9-4 Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona snaga elektrane (SE Kanfanar)

9.3.3. Komentar prikazanih mjernih podataka

Prikaz na dijagramu na Slici 9-4 uključuje samo mjerne podatke za razdoblje u kojem elektrana radi kao proizvođač, tj. za razdoblje od izlaska do zalaska sunca. Od ukupnog broja mjernih podataka 47,3% podataka prosječne snage elektrane je negativno, tj. elektrana radi kao potrošač (pokriva se vlastita potrošnja izmjenjivača, gubici isl.). Kako su podaci prosječne satne snage, tako za one sate u tijeku kojih izlazi sunce prosječna snaga prijeđe nulu, nisu apsolutno korektni.

Stoga se može zaključiti da je, po očekivanju, elektrana 50% vremena proizvođač (režim u dnevnom razdoblju dana), a 50% vremena godišnje potrošač (vrlo mali) električne energije (režim u noćnom razdoblju dana).

Također, može se za prvih dva-tri stupca na dijagramu sa Slike 9-4 zaključiti da su donekle nepouzdati, jer su izmjereni za sate u kojima je djelimično uključeno noćno razdoblje dana, pa je prosječna snaga manja nego što je samo za dnevni dio tog perioda. Iz toga se može pretpostaviti da bi za kraće periode mjerenja prosječne snage, visina prvog stupca bila niža, a slijedećih nekoliko stupaca nešto malo viša.

9.3.4. Moguća aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti za prikupljena mjerenja

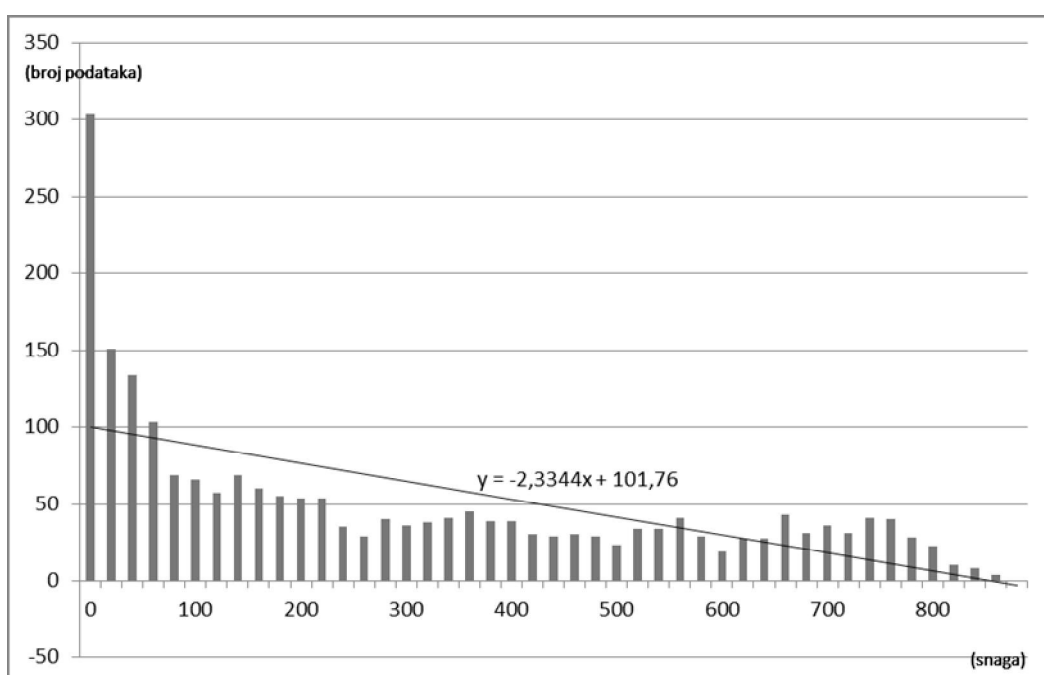
Kako je navedeno u poglavlju 9.2, neka istraživanja ukazuju na to da je distribucija gustoće vjerojatnosti sunčevog zračenja na površinu (koje je direktno povezano sa snagom proizvodnje fotonaponske elektrane) najbliža beta distribuciji [68]. Daljnjim istraživanjima vjerojatno bi bilo moguće povezati model takve funkcije koja bi opisivala tu beta razdiobu s ulaznim parametrima o kojima ovisi varijabla, npr. o geografskoj širini ili dostupnim podacima o količini sunčevog zračenja na mikro/makrolokacijama.

Pristup u ovom radu je dati jednu od mogućnosti za aproksimaciju krivulje gustoće vjerojatnosti, a svakako, tu krivulju moguće je aproksimirati i na druge načine, što bitno ne utječe na metodologiju (izračunavanja vjerojatnosti otocnog rada elektrane) predloženu ovim radom.

I u slučaju snage proizvodnje, kao i kod modeliranja gustoće vjerojatnosti snage opterećenja predstavljenog u poglavlju 8, cilj je iz malo ulaznih podataka, na jednostavan način modelirati funkciju koja će oslikavati gustoću vjerojatnosti varijable snage proizvodnje. Od strane autora ovog rada u prvim razmatranjima mogućnosti izračuna vjerojatnosti pojave otocnog rada fotonaponske elektrane priključene na SN mrežu korištena je normalna razdioba

za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti snage proizvodnje [52], koja nije odgovarajuća. Na primjeru dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona snaga elektrane za SE Kanfanar (na Slici 9-4) može se uočiti da linearna razdioba oslikava gustoću vjerojatnosti varijable snage, svakako bolje nego normalna razdioba, uniformna razdioba ili pak bilo koja od simetričnih razdioba.

Na Slici 9-5 prikazan je isti dijagram sa Slike 9-4 s dužinom koja linearno aproksimira trend mjerene varijable snage proizvodnje (prosječne snage u satnim periodima). Takva aproksimacija može se jednostavno opisati jednadžbom pravca koja je naznačena na slici za ovaj slučaj.



Slika 9-5 Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona snaga elektrane SE Kanfanar s ucrtanim linearnim trendom koji aproksimira krivulju funkcije gustoće vjerojatnosti

Može se također primjetiti da je ovakva linearna razdioba varijable funkcija samo na rasponu od a do b , tj. od točke najmanje ($a=0$) do točke najveće (b =maksimalna snaga elektrane) vrijednosti varijable.

Također, ovakva linearna razdioba predstavlja granični slučaj trokutaste razdiobe, opisane u poglavlju 8.3.3., za koji je očekivana vrijednost jednaka najmanjoj mogućoj vrijednosti varijable ($c=a$).

Jedan od načina kako (na primjeru SE Kanfanar) promotriti koliko dobro zapravo granična trokutasta razdioba sa svojim karakteristikama odgovara poznatim karakteristikama

elektrane jest da provjerimo kako poznata srednja vrijednost varijable snage elektrane odgovara ovakvoj razdioba gustoće vjerojatnosti. Korištenjem relacije (46) dobijemo za srednju vrijednost:

$$\bar{x} = \frac{a+b+c}{3} = \frac{0+b+0}{3} = \frac{b}{3} \quad (50)$$

Ako je srednja vrijednost snage elektrane jednaka trećini maksimalne vrijednosti, ovakva granična trokutasta razdioba odgovarala bi po ovom kriteriju. Iz dostupnih mjerenja provedenih na SE Kanfanar (Prilog 2) srednja vrijednost zabilježenih prosječnih satnih snaga elektrane u periodu mjerenja je bila 150,41 kVA. Kako taj period uključuje i noćna razdoblja koja uzimaju polovicu vremena može se zaključiti da je prosječna snaga elektrane, računajući samo periode od izlaska do zalaska sunca, bila otprilike 301 kVA. Kako je maksimalna, tj. nazivna snaga elektrane (instalirana snaga svih izmjenjivača u elektrani) 912 kVA, vidimo da zahtjev iz relacije (50) za slučaj SE Kanfanar skoro odgovara, tj. vrijedi $\bar{x} = 301 \approx 304 = \frac{b}{3}$. Razlika ove dvije vrijednosti je manja od 1%.

Mogućnost općenitije primjene linearne (trokutaste) razdiobe za aproksimaciju funkcije gustoće vjerojatnosti snage proizvodnje fotonaponske elektrane diskutirat će se u narednom poglavlju.

9.4. Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje fotonaponske elektrane funkcijom gustoće vjerojatnosti za trokutastu razdiobu

9.4.1. Općenita primjenjivost trokutaste razdiobe

Iako je u prethodnom poglavlju za specifičan slučaj SE Kanfanar pokazano kako granična trokutasta razdioba na rasponu od a do b zadovoljavajuće aproksimira krivulju gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje elektrane, u općenitom slučaju to neće biti tako.

Može se zaključiti da u slučaju da je prosječna snaga proizvodnje elektrane u dnevnom periodu otprilike jednaka trećini nazivne snage, da granična trokutasta razdioba korektno reprezentira razdiobu gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje elektrane.

Ako je prosječna snaga elektrane veća od jedne trećine nazivne snage, tada imamo mogućnost da krivulju prezentiramo klasičnom trokutastom razdiobom, gdje iz podatka o

prosječnoj snazi izračunamo očekivanu vrijednost snage, c , pomoću relacije (47). Dalje postupamo na sličan način kao kod modeliranja razdiobe gustoće vjerojatnosti snage opterećenja opisan ranije da bi dobili funkciju koja opisuje gustoću razdiobe. Trokutastu razdiobu moguće je primjenjivati, prema kriteriju prosječne vrijednosti varijable, ako je prosječna vrijednost u rasponu između jedne i dvije trećine minimalne i maksimalne vrijednosti. Kod fotonaponskih elektrana prosječna snaga u dnevnom periodu ne prelazi dvije trećine nigdje na svijetu [70]. Kao primjer, na dijagramu na lijevoj strani na Slici 9-3 može se vidjeti da bi trokutasta razdioba mogla otprilike aproksimirati razdiobu gustoće vjerojatnosti na lokaciji Abuja, Nigerija, za koju je prosječna snaga sigurno veća od jedne trećine nazivne snage.

Ako je prosječna snaga elektrane manja od jedne trećine nazivne snage, tada i uz graničnu trokutastu razdiobu (linearnu) odmah radimo grešku. U takvim slučajevima, razdioba je više obrnuto proporcionalna, tj. vjerojatnost očekivane minimalne vrijednosti snage je veća nego za graničnu trokutastu razdiobu, dok je vjerojatnost većih snaga manja. Kako je očekivano da je manja srednja vrijednost snage povezana i s periodima neproizvodnje radi lošeg vremena (oblaka), možemo i ovdje primijeniti graničnu trokutastu razdiobu, ali proporcionalno umanjenu za faktor omjera prosječne snaga i jedne trećine nazivne snage. Ostatak razdiobe pridijelimo minimalnoj vrijednosti, tj. vremenu bez proizvodnje. Time dobijemo korektno definirnu očekivanu srednju vrijednost varijable i u ovom slučaju. Kao primjer, na dijagramu na desnoj strani na Slici 9-3 može se vidjeti da bi granična trokutasta razdioba mogla otprilike aproksimirati razdiobu gustoće vjerojatnosti na lokaciji Belfast, UK, za koju je prosječna snaga sigurno manja od jedne trećine nazivne snage.

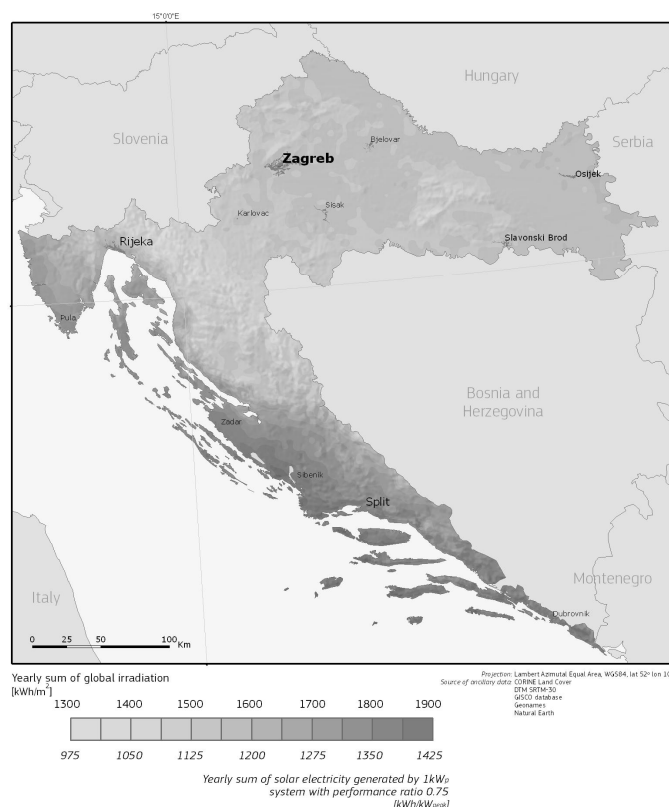
9.4.2. Dostupnost ulaznog podatak o prosječnoj snazi za funkciju aproksimacije

Kao i kod snage opterećenja i ovdje je cilj iz ograničenih dostupnih podataka modelirati razdiobu gustoće vjerojatnosti varijable snage proizvodnje. Osim dostupnih podataka o minimalnoj snazi elektrane i maksimalnoj ukupnoj snazi na izlazu izmjenjivača u elektrani, koji su poznati, potreban je podatak o prosječnoj (godišnjoj) snazi elektrane.

Prosječna (srednja) snaga elektrane je jedan od osnovnim podataka koji se često koristi i računa u procjenama i računanju isplativosti elektrane (i kod izgradnje i u pogonu). Taj podatak je uvijek dobavljiv. Jedan od načina je iz pogonskih mjerenja, ako je elektrana duže u pogonu. Drugi način je procjena, koja je moguća iz literature ili uz upotrebu dostupnih online baza podataka, poput PVGIS-a [70] ili *software*-skih paketa [71].

9.4.3. Očekivana prosječna snaga za elektrane na području Hrvatske

Prema dostupnim podacima na području Hrvatske očekivane godišnje proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane s panelima nagnutim pod optimalnim kutem kreću se od 975 kWh/kW_{peak} za određene dijelove unutrašnjosti zemlje do 1425 kWh/kW_{peak} za područje Dalmacije i južnih dijelova Istre [72]. Veličine su dane kao očekivana godišnja proizvodnja električne energije (kWh) u odnosu na vršnu instaliranu snagu fotonaponske elektrane (kW_{peak}). Na karti na Slici 9-6 prikazane su očekivane vrijednosti za područje RH.



Slika 9-6 Karta s prikazom očekivane godišnje proizvodnje električne energije (kWh) u odnosu na vršnu instaliranu snagu fotonaponske elektrane (kW_{peak}) za RH [72]

Područja koja su najatraktivnija za izgradnju fotonaponskih sustava u RH nalaze se u zoni očekivane prosječne proizvodnje električne energije oko 1400 kWh/kW_{peak} što odgovara omjeru srednje i instalirane snage od 0,32. Dakle, očekivana prosječna snaga otprilike je jednaka jednoj trećini nazivne snage pa se može zaključiti da u slučaju tih područja RH možemo uz dovoljnu preciznost koristiti jednostavniji model granične trokutaste (linearne) razdiobe gustoće vjerojatnosti snage (koji ćemo koristiti i u „*case study*“ modelu za SE Kanfanar. Isto se slaže i s prethodno opisanim mjerenim podacima.

9.5. Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage proizvodnje

9.5.1. Ulazni podaci

Kao ulazne podatke za modeliranje funkcije koja opisuje gustoću vjerojatnosti radne snage proizvodnje fotonaponske elektrane koristimo:

- Minimalnu radnu snagu elektrane, za koji podatak dogovorno uzimamo vrijednost nula ($a=0$). Stvarna minimalna radna snaga ide zapravo neznatno u negativno, potrošačko područje. U poglavlju 6.8.1 pokazano je za promatranu elektranu da je snaga negativna u relativnom omjeru od -0,31 % u odnosu na instaliranu snagu izmjenjivača u toj elektrani. Za predmetne proračune u svrhu otčnog rada irelevantno je da li samo nema proizvodnje ili je elektrana potrošač u nekom iznosu.
- Maksimalnu radnu snagu elektrane ($b=P_{uk(max)}$), koju možemo izračunati prema relaciji (18) objašnjenjnoj prethodno u ovom radu. S dovoljnom točnošću moguće je uzeti i da je ona otprilike jednaka ukupnoj maksimalnoj instaliranoj snazi svih izmjenjivača u elektrani (izmjenjivači rade s faktorom snage 1), čime zanemarujemo radne gubitke i vlastitu potrošnju elektrane. U poglavlju 6.8.1 pokazano je za promatranu elektranu da je razlika samo 1,53%.
- Srednju (prosječnu) snagu elektrane ($\bar{x}$) za periode od izlaska do zalaska sunca, na godišnjoj razini. Ovaj podatak pribavimo na neki od načina opisanih u poglavlju 9.4.2.

9.5.2. Primijenjive formule funkcije gustoće vjerojatnosti

Kada na ulazne podatke primijenimo relacije za trokutastu razdiobu varijable, dobijemo funkcije koje opisuju gustoću vjerojatnosti. Važno je napomenuti da u funkciji gustoće vjerojatnosti moramo uzeti u obzir i noćno vrijeme (kao polovicu ukupnog vremena godišnje), kako bi ukupna kumulativna funkcija bila jednaka 1.

Usporedbom prosječne i maksimalne snage elektrane dobijemo tri mogućnosti, u skladu s navedenim u poglavlju 9.4.1.:

- (i) da je srednja vrijednost zamjetno veća od trećine maksimalne vrijednosti snage ($\bar{x} > \frac{b}{3}$),
- (ii) da je srednja vrijednost približno jednaka trećine maksimalne vrijednosti snage ($\bar{x} \approx \frac{b}{3}$),
- (iii) da je srednja vrijednost zamjetno manja od trećine maksimalne vrijednosti snage ($\bar{x} < \frac{b}{3}$).

9.5.2.1. Slučaj kad je srednja vrijednost zamjetno veća od trećine maksimalne vrijednosti

U ovom slučaju primjenjujemo klasičnu trokutastu razdiobu, a očekivanu vrijednost (c) izračunamo prema relaciji (47). Za funkciju gustoće vjerojatnosti trokutaste razdiobe iz općenite relacije (48) primijenjene na ovaj slučaj za ovaj slučaj vrijedi:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ za } x < 0 \\ 0,5 & , \text{ za } x = 0 \\ 0,5 \cdot \frac{2 \cdot x}{b \cdot (3 \cdot \bar{x} - b)} & , \text{ za } 0 < x \leq c \\ 0,5 \cdot \frac{2 \cdot (b-x)}{b \cdot (2 \cdot b - 3 \cdot \bar{x})} & , \text{ za } c < x \leq b \\ 0 & , \text{ za } b < x \end{cases} \quad (51)$$

Faktor 0,5 uveden je da se vrednuje činjenica što polovicu vremena na razini jedne godine predstavlja vrijeme od izlazaka do zalazaka sunca, a polovicu ostalo, tj. noćno vrijeme.

Dio ove funkcije koji se odnosi na noćno vrijeme možemo zanemariti, jer u proračunima vjerojatnosti otočnog rada taj dio nema utjecaja. Takvu funkciju možemo napisati kao:

$$f'_{(i)}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{ za } x < 0 \\ \frac{x}{b \cdot (3 \cdot \bar{x} - b)} & , \text{ za } 0 \leq x \leq c \\ \frac{b-x}{b \cdot (2 \cdot b - 3 \cdot \bar{x})} & , \text{ za } c < x \leq b \\ 0 & , \text{ za } b < x \end{cases} \quad (52)$$

Gdje je f' dio funkcije razdiobe f koja obuhvaća samo razdiobu varijable u „dnevnom“ dijelu godišnjeg perioda. Ukupna kumulativna funkcija za funkciju f' jednaka je 0,5.

9.5.2.2. Slučaj kad je srednja je srednja vrijednost približno jednaka trećine maksimalne vrijednosti

U ovom slučaju primjenjujemo graničnu trokutastu razdiobu, gdje je očekivana vrijednost jednaka minimalnoj vrijednosti varijable ($c=a=0$). Za funkciju gustoće vjerojatnosti f' može se izvesti da vrijedi:

$$f'_{(ii)}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{za } x < 0 \\ \frac{b-x}{b^2} & , \text{za } 0 \leq x \leq b \\ 0 & , \text{za } b < x \end{cases} \quad (53)$$

9.5.2.3. Slučaj kad je srednja vrijednost zamjetno manja od trećine maksimalne vrijednosti

U ovom slučaju također primjenjujemo graničnu trokutastu razdiobu, gdje je očekivana vrijednost jednaka minimalnoj vrijednosti varijable ($c=a=0$), ali dodatno uvodimo faktor r koji je jednak omjeru srednje vrijednosti snage i jedne trećine maksimalne vrijednosti snage, u skladu s pojašnjenjem u poglavlju 9.4.1.:

$$r = \frac{\bar{x}}{\frac{b}{3}} = \frac{3 \cdot \bar{x}}{b} \quad (54)$$

Ukupna kumulativna funkcija za funkciju f' jednaka je $r \cdot 0,5$. Za funkciju gustoće vjerojatnosti f' može se izvesti da vrijedi:

$$f'_{(iii)}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{za } x < 0 \\ r \cdot \frac{b-x}{b \cdot (2 \cdot b - 3 \cdot \bar{x})} & , \text{za } 0 \leq x \leq b \\ 0 & , \text{za } b < x \end{cases} \quad (55)$$

9.6. Aproksimacija funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage proizvodnje

Za jalovu snagu proizvodnje također želimo izvršiti aproksimaciju odgovarajućom funkcijom gustoće vjerojatnosti. Jalova snaga može biti kapacitivnog karaktera ili induktivnog karaktera. Ovdje je potrebno naglasiti da induktivne jalove snage proizvodnje predstavljamo s negativnim predznakom, a kapacitivne jalove snage proizvodnje s pozitivnim predznakom (obrnuto nego kod snaga opterećenja).

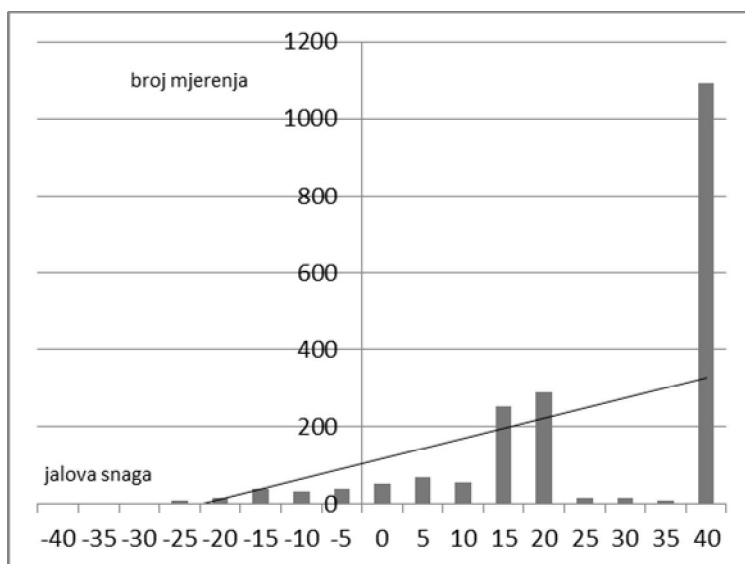
Za aproksimaciju funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage proizvodnje pogledajmo prvo P-Q dijagram mogućih radnih točaka elektrane. Metodologija izrade dijagrama predložena

je u poglavlju 6 ovog rada. Na dijagramu na Slici 6-9 vidljive su karakteristične točke minimalne i maksimalne jalove snage elektrane.

Važno je primjetiti da se minimalna moguća jalova snaga (maksimalna induktivna snaga elektrane) može pojaviti samo u isto vrijeme kad i najveća radna snaga elektrane. Također, maksimalna jalova snaga (maksimalna kapacitivna snaga elektrane) može se pojaviti samo u isto vrijeme kad i najmanja radna snaga elektrane. Međutim, i za maksimalnu i za minimalnu radnu snagu elektrane postoji cijeli raspon mogućih vrijednosti jalove snage, tj. ona nije fiksna za danu radnu snagu.

Samo ponašanje jalove snage nije u izravnoj korelaciji samo s radnom snagom. Ono što je intuitivno jest ipak da noćni režim rada (s maksimalnom kapacitivnom snagom) prevladava jer čini barem 50% vremena godišnje. Time znamo da je očekivana vrijednost varijable jalove snage maksimalna kapacitivna snaga.

Razdioba vjerojatnosti ostalih vrijednosti varijable nije intuitivna, te ju je eventualno moguće dobiti iz dugotrajnijih mjerenja jalove snage elektrane u pogonu. Međutim, u nedostatku takvih podataka, i u ovom slučaju primjenit ćemo trokutastu (graničnu trokutastu) razdiobu gustoće vjerojatnosti varijable, koja se, kako je i navedeno u poglavlju 8.3.3. gdje je ista opisana, pretežno i koristi u situacijama nedostatnog poznavanja skupa.



Slika 9-7 Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona jalove snage elektrane SE Kanfanar s ucrtanim trendom koji aproksimira trokutastu razdiobu gustoće vjerojatnosti (dijagram nije reprezentativan jer su mjerenja izvršena u kratkom periodu)

Mjerenja jalove snage provedena na „case study“ elektrani (Prilog 1) nisu reprezentativna jer su provedena u kratkom razdoblju, a na Slici 9-7 prikazan je dijagram

gustoće pojavnosti pojedinih raspona jalovih snaga elektrane u tom kratkom vremenskom periodu od 11 dana, od 15. veljače 2013. do zaključno 26. veljače 2013. godine, s ucrtanom linearnim trendom koji aproksimira oblik granične trokutaste funkciju razdiobe.

9.6.1. Ulazni podaci

Za određivanje ulaznih podataka potrebnih za modeliranje funkcije gustoće razdiobe za jalovu snagu proizvodnje potrebno je prvo prikupiti podatke o pojedinim elementima elektrane. Potrebni podaci opisani su prilikom definiranja modela izrade P-Q dijagrama mogućih radnih točaka elektrane u poglavlju 6 ovog rada.

Za izračun dviju krajnjih točaka raspona jalove snage (minimalne i maksimalne jalove snage elektrane) koristi se relacija (31), uvrštavanjem potrebnih vrijednosti. Te su dvije točke krajnje točke trokutaste razdiobe (a i b). Treću karakterističnu točku za trokutastu razdiobu jalove snage, očekivana vrijednost jednaka je točki maksimalne snage ($c=b$).

9.6.2. Primijenjive formule funkcije gustoće vjerojatnosti

U ovom slučaju primjenjujemo graničnu trokutastu razdiobu, gdje je očekivana vrijednost jednaka maksimalnoj vrijednosti varijable ($c=b$). Za funkciju gustoće vjerojatnosti može se izvesti da vrijedi:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , \text{za } x < a \\ \frac{2 \cdot (x-a)}{(b-a)^2} & , \text{za } a \leq x \leq b \\ 0 & , \text{za } b < x \end{cases} \quad (56)$$

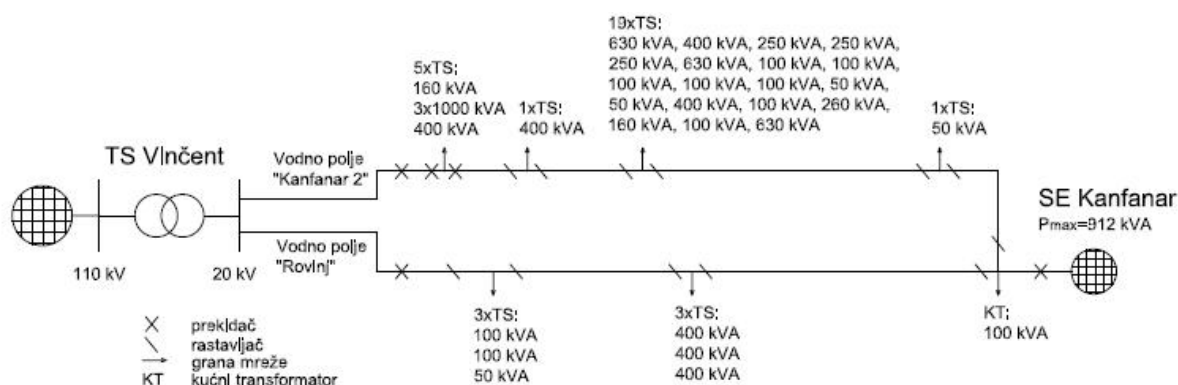
10. FUNKCIJE GUSTOĆE VJEROJATNOSTI VARIJABLI SNAGE PROIZVODNJE I POTROŠNJE LOKALNE MREŽE NA PRIMJERU SE KANFANAR I LOKALNE MREŽE U SKLADU S OPISANOM METODOLOGIJOM

10.1. Spoj SE Kanfanar na elektroenergetsku mrežu

Na primjeru SE Kanfanar prikazat će se primjena opisane metodologije za aproksimaciju krivulja razdiobe varijabli s funkcijom gustoće vjerojatnosti za trokutaste razdiobe opisane u prethodnom poglavlju.

Principna shema koja prikazuje moguću pogonsku konfiguraciju mreže na koju je spojena SE Kanfanar [73], tj. dva moguća načina na koje elektrana može davati energiju u lokalnu mrežu, prikazana je na Slici 10-1. Shema prikazuje i moguća mjesta sklapanja između glavne pojne točke, TS 110/20 kV Vinčent, i mjesta priključka elektrane, na kojima se mreža i elektrana mogu odvojiti i tako kreirati lokalni dio mreže koji ostaje u otočnom pogonu s elektranom. Također su na shemi naznačene nazivne snage transformatora svih distribucijskih trafostanica SN/NN priključenih na odvođe na izravnoj liniji između krajnjih točaka, pojne transformatorske stanice i mjesta priključka elektrane. Preferirano pogonsko stanje od strane Operatora distributivnog sustava je priključak na odvodu „Rovinj“, dok je priključak preko odvoda „Kanfanar 2“ rezervna opcija koja će se koristiti samo u izvanrednim stanjima [74].

Konfiguracija mreže je takva da je na direktnim odvodima na koje može biti spojena elektrana spojeno više TS SN/NN ili grana mreže uglavnom preko klasičnih RMU postrojenja sa rastavnim sklopkama.



Slika 10-1 Nadomjesna shema konfiguracije mreže prikazom mogućih pogonskih stanja na koje elektrana SE Kanfanar može napajati lokalnu mrežu

10.2. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage proizvodnje elektrane

Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable radne snage elektrane opisana je u poglavlju 9.5. Ulazni podaci za SE Kanfanar koji su nam potrebni za aproksimaciju funkcijom gustoće vjerojatnosti trokutaste razdiobe varijable radne snage su slijedeći:

- Minimalna radna snaga se uzima da je jednaka 0 kW,
- Maksimalna radna snaga izračunata je u poglavlju 6.8.1. i iznosi 898 kW. Kako je u poglavlju 9.5 navedeno, neznatnu ulogu imalo bi korištenje ukupne instalirane snage izmjenjivača (912 kW) umjesto detaljno izračunate snage koja uključuje gubitke na elementima elektrane.
- Prosječna radna snaga koju možemo uzeti iz dostupnih mjerenja (Prilog 2) ili iz dostupnih procjena [70]. U oba slučaja opisano je već (vidi poglavlje 9.3.4.) da je očekivana prosječna snaga ove elektrane u dnevnom periodu jednaka otprilike jednoj trećini maksimalne snage elektrane.

Upotrebom navedenih ulaznih podataka primjenjujemo graničnu trokutastu razdiobu za koju je očekivana vrijednosti jednaka minimalnoj vrijednosti varijable, opisanu u poglavlju 9.5.2.2., i prema relaciji (53) funkcija koja aproksimira gustoću vjerojatnosti varijable radne snage elektrane SE Kanfanar jest:

$$f(x_p) = \begin{cases} 0 & , \text{ za } x < 0 \\ \frac{898 - x_p}{806404} & , \text{ za } 0 \leq x \leq 898 \\ 0 & , \text{ za } 898 < x \end{cases} \quad (57)$$

gdje je:

x_p – varijabla radne snage proizvodnje elektrane,

$f(x_p)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage proizvodnje elektrane.

Grafički prikaz funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage SE Kanfanar prikazan je na Slici 10-2 (graf na slici lijevo).

10.3. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage proizvodnje elektrane

Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage elektrane opisana je u poglavlju 9.6. Primjenjujemo graničnu trokutastu razdiobu za koju je očekivana vrijednosti

jednaka maksimalnoj vrijednosti varijable, opisanu u poglavlju 9.6.2. Ulazni podaci za SE Kanfanar koji su nam potrebni za aproksimaciju funkcijom gustoće vjerojatnosti trokutaste razdiobe varijable jalove snage su slijedeći:

- Minimalna jalova snaga, iznosa -64 kVAr,
- Maksimalna jalova snaga, iznosa 38 kVAr.

Obe navedene snage obrađene su za slučaj SE Kanfanar pri izradi pogonske karte, tj. P-Q dijagrama mogućih radnih točaka, u poglavlju 6, te računata relacijom (32). Sa Slike 6-10 vidljivo je da minimalna očekivana moguća jalova snaga (maksimalna induktivna jalova snaga) elektrane SE Kanfanar u točki priključka na SN mrežu iznosi (-)64 kVAr, a maksimalna očekivana moguća jalova snaga (maksimalna kapacitivna jalova snaga) iznosi (+)38 kVAr.

Upotrebom navedenih ulaznih podataka, prema relaciji (56) funkcija koja aproksimira gustoću vjerojatnosti varijable jalove snage elektrane SE Kanfanar jest:

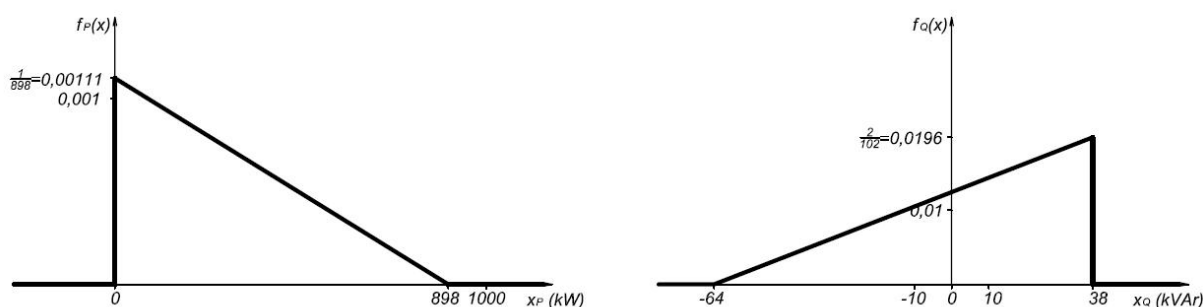
$$f(x_Q) = \begin{cases} 0 & , \text{ za } x < -64 \\ \frac{x_Q + 64}{5202} & , \text{ za } -64 \leq x \leq 38 \\ 0 & , \text{ za } 38 < x \end{cases} \quad (58)$$

gdje je:

x_Q – varijabla jalove snage proizvodnje elektrane,

$f(x_Q)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage proizvodnje elektrane.

Grafički prikaz funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage SE Kanfanar prikazan je na Slici 10-2 (graf na slici desno).

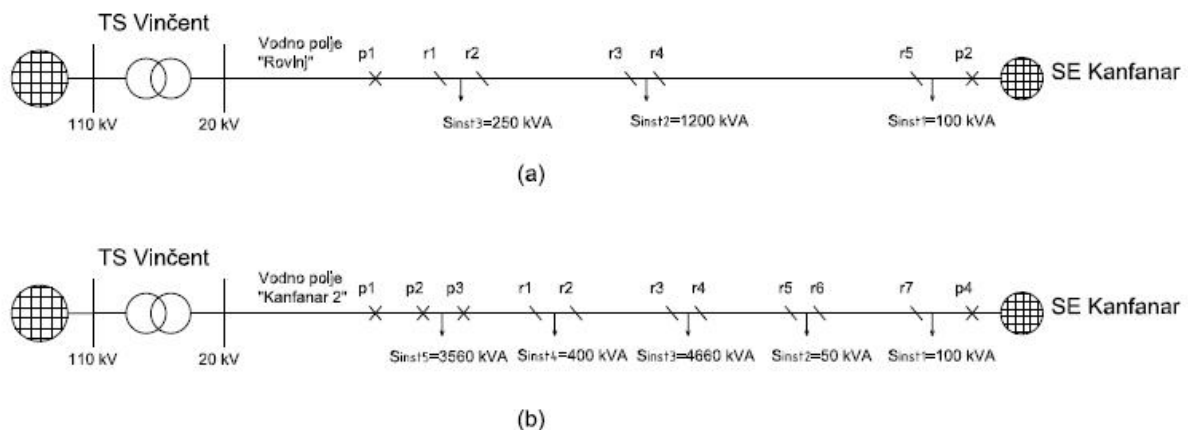


Slika 10-2 Grafički prikazi funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage (lijeva strana) i jalove snage (desna strana) SE Kanfanar

10.4. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage opterećenja za moguće lokalne dijelove mreže

Aproksimacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable radne snage opterećenja opisana je u poglavljima 8.3. i 8.4.

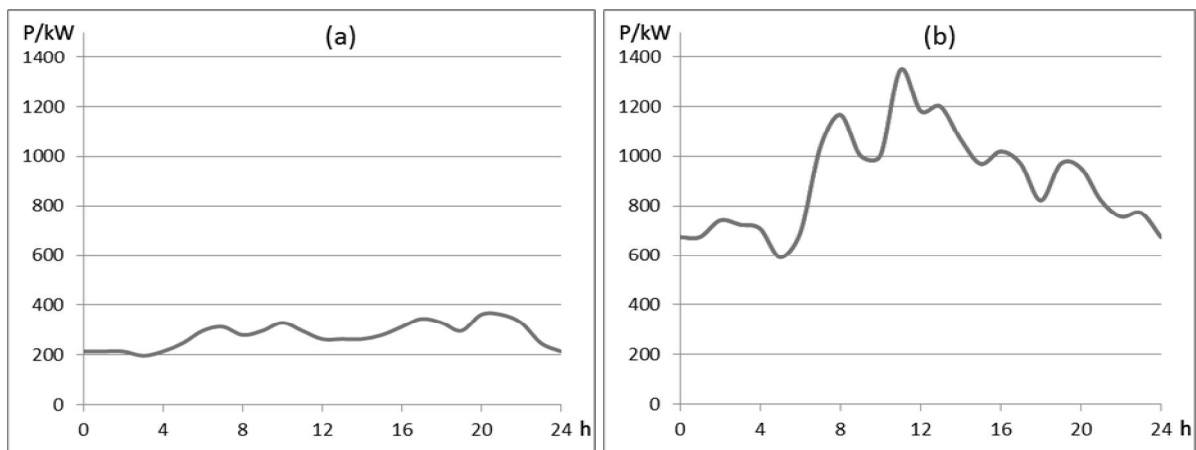
U poglavlju 10.1 pojašnjeno je na koji način elektrana može biti spojena na mrežu, što je prikazano na Slici 10-1. Dva vodna polja TS 110 kV Vincent na koja SE Kanfanar može biti spojena kao krajnja točka su vodno polje Kanfanar 2 i vodno polje Rovinj. Naglašeno je da je priključak na odvodu „Rovinj“ uobičajeno pogonsko stanje, dok je priključak preko odvoda „Kanfanar 2“ izvanredno pogonsko stanje. Na Slici 10-3 prikazane su nadomjesne sheme za svaki od odvoda pojedinačno.



Slika 10-3 Nadomjesna shema konfiguracije lokalne mreže s naznačenim instaliranim snagama po granama, pojedinačno za pogonska stanja spoja elektrane na vodna polja u TS 110/20 kV Vincent: vodno polje Rovinj (a) i vodno polje Kanfanar 2 (b)

Prema podacima prikupljenim i danim u [62] o karakterističnim zimskom i ljetnom dnevnom dijagramu opterećenja za svako od navedena dva vodna polja TS Vincent, moguće je prikazati prosječni godišnji dnevni dijagram opterećenja za ta vodna polja. Dijagrami su prikazani na Slici 10-4. Dostupni su također podaci o srednjem, minimalnom i maksimalnom opterećenju za svaki od ta dva odvoda. Podaci su navedeni u Tablici 10-1.

Svi navedeni podaci su prikupljeni za stanje prije priključenja SE Kanfanar na mrežu. Vidljivo je da su oba vodna polja relativno slabo opterećena u odnosu na instaliranu snagu opterećenja na njima.



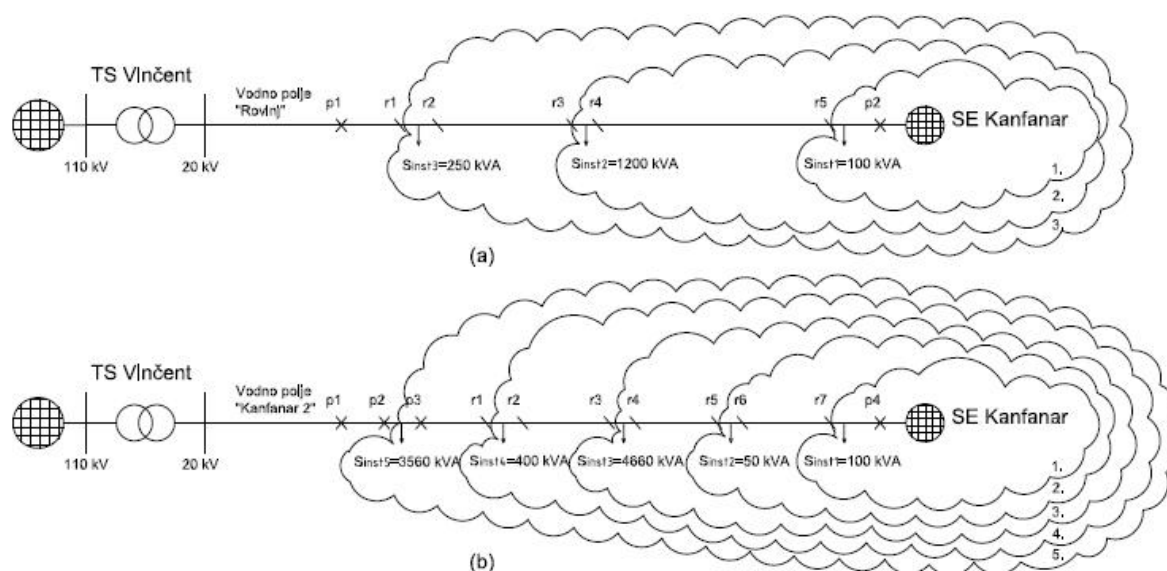
Slika 10-4 Prosječni godišnji dnevni dijagram opterećenja vodnih polja u TS 110/20 kV
Vincent: vodno polje Rovinj (a) i vodno polje Kanfanar 2 (b)

Tablica 10-1 Podaci o radnim snagama opterećenja odvoda VP Rovinj i VP Kanfanar u
TS 110/20 kV Vincent

Parametri opterećenja	VP Rovinj	VP Kanfanar 2
Instalirana snaga opterećenja	1450 kVA	8670 kVA
Srednje opterećenje	282 kW	911 kW
Omjer srednjeg opterećenja i instalirane snage odvoda	0,19	0,11
Maksimalno zabilježeno opterećenje	410 kW	1512 kW
Omjer maksimalnog opterećenja i instalirane snage odvoda	0,28	0,17
Minimalno zabilježeno opterećenje	197 kW	526 kW
Omjer minimalnog opterećenja i instalirane snage odvoda	0,14	0,06

Podaci o opterećenjima pojedinih podgrana razmatrane lokalne mreže ili pojedinih transformatorskih stanica SN/NN nisu poznati, pa se za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti koristi ekstrapoliranje funkcije gustoće vjerojatnosti varijable snage opterećenja cijelog izvoda, na način opisan relacijom (49). Lokalni dijelovi mreže s kojima elektrana može ostati u otočnom pogonu prikazani su na Slici 10-5, za svaki od odvoda posebno. Moguće izolirane lokalne mreže označene su zasebnim oblačićima i numerirane rednim brojevima.

Na primjeru VP Rovinj sa Slike 10-5 (a) vidljivo je da u slučaju isklopa rastavnih sklopki označenih na slici s $r4$ ili $r5$ u otočnom radu može ostati lokalna mreža označena rednim brojem 1., u slučaju isklopa rastavnih sklopki označenih na slici sa $r2$ ili $r3$ u otočnom radu može ostati lokalna mreža označena rednim brojem 2., a u slučaju isklopa rastavne sklopke ili prekidača označenih na slici sa $r1$ i $p1$ u otočnom radu može ostati lokalna mreža označena rednim brojem 3. Analogno za slučaj pogona elektrane preko VP Kanfanar 2 postoji pet različitih dijelova lokalne mreže s kojima elektrana može ostati u otočnom pogonu.



Slika 10-5 Lokalni dijelovi mreže s kojima elektrana može ostati u otočnom pogonu, u slučaju pogonskog stanja spoja elektrane na mrežu u VP Rovinj (a) ili u VP Kanfanar 2 (b)

Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja za svaki lokalni dio mreže s kojim elektrana može ostati u otočnom radu dani su u Tablici 10-2 za odvod VP Rovinj, a u Tablici 10-3 za odvod VP Kanfanar 2. Na Slici 10-6 prikazani su oblici krivulje funkcije gustoće vjerojatnosti varijable radne snage opterećenja u relativnim omjerima ukupne instalirane snage opterećenja na odvodima VP Rovinj i VP Kanfanar 2. Krivulje su primjenjive za sve dijelove mreže odgovarajućeg odvoda, s uvrštavanjem apsolutnih parametara iz tablica 10-2 i 10-3.

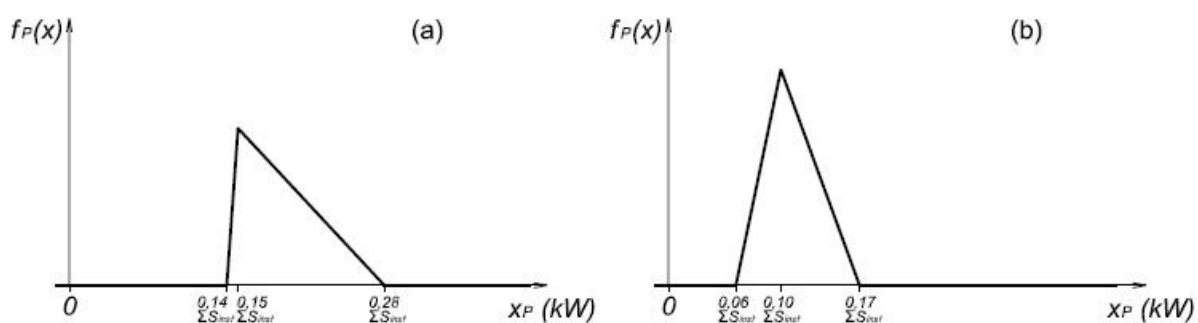
Za matematički oblik funkcije gustoće vjerojatnosti (PDF) varijable radne snage opterećenja svakog pojedinog dijela lokalne mreže potrebno je podatke iz odgovarajućeg stupca iz Tablica 10-2 i 10-3 uvrstiti u relaciju (44).

Tablica 10-2 Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Rovinj u TS 110/20 kV Vinčent

Lokalni dio mreže:	1.	2.	3.
Instalirana snaga ($\sum S_{inst}$) / relacija	$S_{inst1.}$	$S_{inst1.} + S_{inst2.}$	$S_{inst1.} + S_{inst2.} + S_{inst3.}$
Instalirana snaga ($\sum S_{inst}$) / kVA	100	1300	1550
srednja vrijednost varijable $\bar{x}$ (srednja vrijednost opterećenja, 19% instaliranog)	19	247	294,5
donja granica mogućih vrijednosti varijable a (minimalno opterećenje, 14% instaliranog)	14	182	217
gornja granica mogućih vrijednosti varijable b (maksimalno opterećenje, 28% instaliranog)	28	364	434
očekivana vrijednost varijable c ($c = 3 \cdot \bar{x} - a - b$)	15	195	232,5

Tablica 10-3 Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Kanfanar 2 u TS 110/20 kV Vinčent

Lokalni dio mreže:	1.	2.	3.	4.	5.
Instalirana snaga ($\sum S_{inst}$) / kVA	100	150	481	521	877
srednja vrijednost varijable $\bar{x}$ (srednja vrijednost opterećenja, 19% instaliranog)	11	16,5	529,1	573,1	964,7
donja granica mogućih vrijednosti varijable a (minimalno opterećenje, 14% instaliranog)	6	9	288,6	312,6	526,2
gornja granica mogućih vrijednosti varijable b (maksimalno opterećenje, 28% instaliranog)	17	25,5	817,7	885,7	1490,9
očekivana vrijednost varijable c ($c = 3 \cdot \bar{x} - a - b$)	10	15	481	521	877



Slika 10-6 Grafički prikaz funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja na odvodima VP Rovinj (a) i VP Kanfanar 2 (b) TS 110/20 kV Vinčent

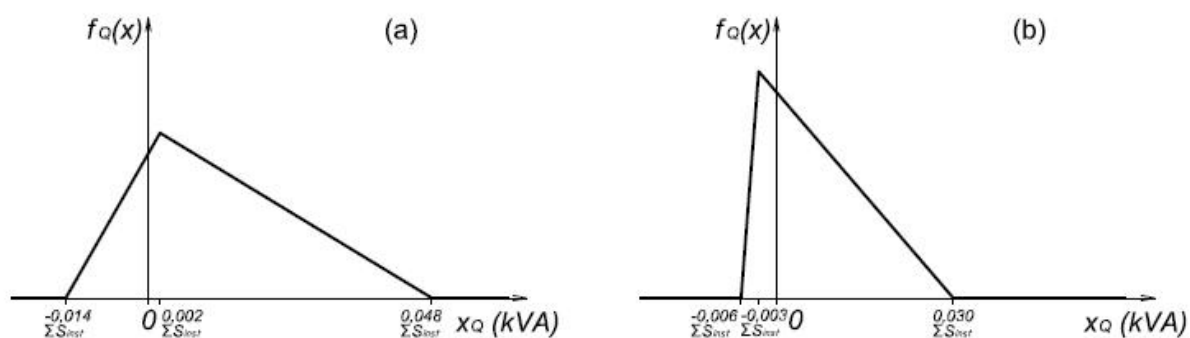
Mala nelogičnost koja se ovdje pojavila je u slučaju opterećenja transformatora SN/NN u TS susretnog postrojenja elektrane u kojoj je priključno mjesto elektrane na SN mrežu. To opterećenje je u oba slučaja označeno kao opterećenje mogućeg 1. lokalnog dijela mreže. Opterećenje te trafostanice u slučaju pogonskog spoja u VP Rovinj modeliramo jednom funkcijom gustoće, a u slučaju pogonskog spoja u VP Kanfanar 2 drugom funkcijom gustoće vjerojatnosti. Međutim, obzirom da točnu funkciju za to opterećenje ne znamo (to je novo opterećenje za koje mjerenja nismo imali), možemo pretpostaviti da ni u slučaju jedne ni u slučaju druge funkcije vjerojatnosti neće mnogo pogriješiti, tj. pretpostavljamo da su oba modela za ovu svrhu zadovoljavajuća.

10.5. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage opterećenja za moguće lokalne dijelove mreže

Aproximacija krivulje gustoće vjerojatnosti varijable radne snage opterećenja opisana je u poglavlju 8.5. Ekvivalentno postupku za model funkcije vjerojatnosti varijable radne snage, dostupni podaci za jalovu snagu opterećenja za oba promatrana odvoda su u Tablici 10-4.

Tablica 10-4 Podaci o jalovim snagama opterećenja odvoda VP Rovinj i VP Kanfanar u TS 110/20 kV Vinčent

Parametri opterećenja	VP Rovinj	VP Kanfanar 2
Instalirana snaga opterećenja	1450 kVA	8670 kVA
Srednja jalova snaga	18 kVA	58 kVA
Omjer srednje jalove snage i instalirane snage odvoda	0,012	0,007
Maksimalna zabilježena jalova snaga (induktivna)	69 kVA	256 kVA
Omjer maksimalne jalove snage i instalirane snage odvoda	0,048	0,030
Minimalna zabilježena jalova snaga (maksimalna kapacitivna)	- 20 kVA	- 53 kVA
Omjer minimalne jalove snage i instalirane snage odvoda	- 0,014	- 0,006



Slika 10-7 Grafički prikaz funkcija gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja na odvodima VP Rovinj (a) i VP Kanfanar 2 (b) TS 110/20 kV Vin čent

Tablica 10-5 Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Rovinj u TS 110/20 kV Vinčent

Lokalni dio mreže:	1.	2.	3.
Instalirana snaga ($\sum S_{inst}$) / kVA	100	1300	1550
srednja vrijednost varijable $\bar{x}$ (srednja vrijednost opterećenja, 1,2% instaliranog)	1,2	15,6	18,6
donja granica mogućih vrijednosti varijable a (minimalno opterećenje, - 1,4% instaliranog)	- 1,4	-18,2	-21,7
gornja granica mogućih vrijednosti varijable b (maksimalno opterećenje, 4,8% instaliranog)	4,8	62,4	74,4
očekivana vrijednost varijable c ($c = 3 \cdot \bar{x} - a - b$)	0,2	2,6	3,1

Tablica 10-6 Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Kanfanar 2 u TS 110/20 kV Vinčent

Lokalni dio mreže:	1.	2.	3.	4.	5.
Instalirana snaga ($\sum S_{inst}$) / kVA	100	150	4810	5210	8770
srednja vrijednost varijable $\bar{x}$ (srednja vrijednost opterećenja, 0,7% instaliranog)	0,7	1,1	33,7	36,5	61,4
donja granica mogućih vrijednosti varijable a (minimalno opterećenje, - 0,6% instaliranog)	0,6	-0,9	-28,9	-31,3	-52,6
gornja granica mogućih vrijednosti varijable b (maksimalno opterećenje, 3,0% instaliranog)	3,0	4,5	144,3	156,3	263,1
očekivana vrijednost varijable c ($c = 3 \cdot \bar{x} - a - b$)	0,3	-0,5	-14,4	-15,6	-26,3

Podaci o opterećenjima pojedinih podgrana razmatrane lokalne mreže ili pojedinih transformatorskih stanica SN/NN nisu poznati, pa se za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti pojedinog dijela odvoda koristi ekstrapoliranje funkcije gustoće vjerojatnosti varijable snage opterećenja cijelog izvoda, na isti način kao i za radnu snagu, korištenjem relacije (49). Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja za svaki lokalni dio mreže s kojim elektrana može ostati u otvorenom radu dani su u Tablici 10-5 za odvod VP Rovinj, a u Tablici 10-6 za odvod VP Kanfanar 2. Na Slici 10-7 prikazani su oblici krivulje funkcije gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage u relativnim omjerima ukupne instalirane snage opterećenja na odvodima VP Rovinj i VP Kanfanar 2. Krivulje su primjenjive za sve dijelove mreže odgovarajućeg odvoda (sa Slike 10-5, uz odgovarajuće jalove snage), s uvrštavanjem apsolutnih parametara iz Tablica 10-5 i 10-6.

Za matematički oblik funkcije gustoće vjerojatnosti (PDF) varijable radne snage opterećenja svakog pojedinog dijela lokalne mreže potrebno je podatke iz odgovarajućeg stupca iz Tablica 10-5 i 10-6 uvrstiti u relaciju (44).

10.6. Funkcija gustoće vjerojatnosti varijabli radne i jalove snage proizvodnje u slučaju nekog drugog tipa elektrane

U razmatranjima u ovom radu naglasak je stavljen na metodologiju za izračun vjerojatnosti otvorenog rada točno određenog tipa distribuiranog izvora, većih fotonaponskih elektrana više mrežnih izmjenjivačkih jedinica koje se priključuju na srednjenaponsku mrežu. Međutim, kako je i prethodno navedeno, metodologija je primjenjiva i za izračun vjerojatnosti pojave otvorenog rada drugih tipova elektrana. Ono što je potrebno definirati u tom slučaju su funkcije gustoće vjerojatnosti varijabli radne i jalove snage tog drugog promatranog tipa elektrane.

Za slučajeve intermitirajućih izvora energije funkcije gustoće vjerojatnosti varijabli snage modelirat će se na sličan način kao za obrađene fotonaponske izvore. Istraživanja PDF-a za npr. snagu vjetra moguće je pronaći u dostupnoj literaturi [75], a određena istraživanja npr. zaključuju da razdiobu najbolje opisuje Weibullova razdioba [76].

U ostalim slučajevima, kada se radi o distribuiranim izvorima čiji pogonski energent nije intermitirajuće prirode, funkcija gustoće vjerojatnosti varijabli snage ovisi o planu proizvodnje pojedinog operatera elektrane, tj o voznom redu elektrane. Razlike postoje od slučaja do slučaja, najviše u kogeneracijskim postrojenjima. Međutim, radi prirode poslovnih investicija i poticajne naknade za proizvodnju električne energije većine takvih distribuiranih

izvora, često sve takve elektrane rade na punoj električnoj snazi uz vrlo male oscilacije cijelo vrijeme osim kad su periodi remonta elektrana, tj. kad je elektrana van pogona [77].

U svakom slučaju su krivulje funkcije gustoće vjerojatnosti mnogo jednostavnijeg oblika nego u slučaju intermitirajućih energenata. U ovom radu nije namjera dublje ulaziti u ovu problematiku.

Međutim, zanimljivo bi bilo usporediti vjerojatnosti pojave fotočnog pogona u ovom radu razmatranog tipa elektrana (fotonaponske elektrane s mrežnim izmjenjivačima) s klasičnom elektranom čiji je izvor električne energije npr. sinkroni generator. Stoga, za usporedbe koje će biti izvršene u nastavku rada pretpostaviti ćemo da elektrana sa sinkronim generatorom, iste instalirane snage kao i razmatrana fotonaponska elektrana s izmjenjivačima, radi priključena na istu točku na mreži punom snagom, s nazivnim faktorom snage, u cjelokupnom godišnjem periodu.

U slučaju takve pretpostavke, za takvu elektranu, radna i jalova snaga proizvodnje nisu varijable već konstante, ili slučajne varijabla koja poprimaju samo jednu vrijednost. U teoriji vjerojatnosti, takve varijable se nazivaju „konstantna slučajna varijabla“ ili „gotovo sigurno konstantna slučajna varijabla“. Razlika je u tome što gotovo sigurno konstantna slučajna varijabla može poprimiti i druge vrijednosti, međutim je vjerojatnost takvog događaja jednaka nuli [78].

Stoga, za takve varijable vrijedi da je vjerojatnost da ta slučajna varijabla X poprimi točno određenu vrijednost x_{konst} :

$$P(X = x_{konst}) = 1 \quad (59)$$

U tom slučaju, vjerojatnost prvog inicijalnog događaja opisanog u poglavlju 7.3.1. ovog rada koja je dana relacijom (39) prelazi u:

$$\begin{aligned} P_{il} &= P(x_{\min} < X < x_{\max}, X - \Delta x_- < Y < X + \Delta x_+) = \\ &= P(X = x_{konst}, x_{konst} - \Delta x_- < Y < x_{konst} + \Delta x_+) = 1 \cdot \int_{x_{konst} - \Delta x_-}^{x_{konst} + \Delta x_+} f_Y(y) dy = \\ &= \int_{x_{konst} - \Delta x_-}^{x_{konst} + \Delta x_+} f_Y(y) dy \end{aligned} \quad (60)$$

gdje su:

P_{il} - vjerojatnost prvog inicijalnog događaja iz i-tog para inicijalnih događaja, tj. vjerojatnost da su ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i opterećenja lokalne mreže,

x_{konst} - nazivna snaga (radna, jalova) elektrane.

Relacija (60) vrijedi i za radnu i za jalovu snagu u slučaju pretpostavljene elektrane, s tim da za radnu snagu vrijedi da je:

$$x_{konst} = P_{naz} = S_{naz} \cdot \cos \varphi_{naz} \quad (61)$$

dok za jalovu snagu vrijedi da je:

$$x_{konst} = Q_{naz} = S_{naz} \cdot \sin \varphi_{naz} \quad (62)$$

gdje su:

P_{naz} , Q_{naz} , S_{naz} i $\cos \varphi_{naz}$ odgovarajući nazivni podaci pretpostavljene elektrane.

11. ZONA NEDETEKCIJE ZAŠTITNIH METODA OD OTOČNOG RADA

11.1. Odabrane zaštitne funkcije

Zona neprepoznavanja (nedetekcije) otočnog pogona primjenjene zaštitne funkcije opisana je ukratko u poglavlju 4.2 ovog rada. Zona nedetekcije zaštite ima ključan utjecaj na pojavu otočnog rada. Ovisno o primijenjenoj metodi (funkciji) zaštite zone nedetekcije se razlikuju. Ovdje će se za odabrane zaštitne metode definirati zona neprepoznavanja otočnog rada, izražena kao disbalans radne (ΔP) i/ili jalove (ΔQ) snage, tj. raspon ΔP i ΔQ u kojem otočni rad neće biti prepoznat od strane primjenjene zaštitne funkcije.

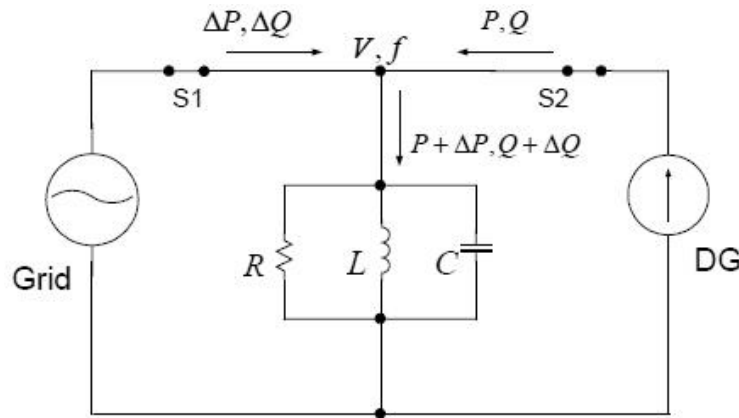
Među zemljama koje imaju najdulja iskustva priključenja malih elektrana na mrežu je sigurno UK, čije razvijene inženjerske prakse služe kao vodič mnogim zemljama pri izradi vlastitih pravilnika [79]. Prema njihovim preporukama (kolokvijalno poznata kao preporuka G59/3) za priključak elektrana na distributivnu mrežu, preporučene zaštitne funkcije koje operatori mreže zahtijevaju kod distribuiranih izvora koji se priključuju na njihovu mrežu se slijedeće [80]:

- Podnaponska (UV),
- Nadnaponska (OV),
- Podfrekvencijska (UF),
- Nadfrekvencijska (OF),
- Zaštita od gubitka mreže (*Loss of Mains*, LOM).

Zaštita od gubitka mreže obavezna je za sve elektrane snage manje od 50 MW, dok se za veće elektrane umjesto ove zaštite zahtijeva *intertripping* zaštita, koja zahtjeva značajna ulaganja, ali koja jedina nema zonu neprepoznavanja, kako je opisano ranije u ovom radu. Kao zaštita od gubitka mreže (LOM) ponuđen je odabir neke od slijedećih funkcija: detekcija faznog skoka napona, detekcija harmoničkog izobličenja napona ili detekcija brzine promjene frekvencije (ROCOF). Preporučena funkcija je ROCOF, posebno za elektrane manje veličine. Sve navedene su pasivne zaštitne funkcije. Aktivne zaštite navedene su samo kao mogućnost eventualne dodatne zaštite.

Metodologija za izračun vjerojatnosti u ovom radu s metodom primjenjiva je na navedene funkcije podnaponske, nadnaponske, podfrekvencijske, nadfrekvencijske i funkciju detekcije brzine promjene frekvencije. Stoga će za navedene funkcije u nastavku biti obrađena zona neprepoznavanja otočnog rada.

Za izračun zone neprepoznavanja pogledajmo nadomjesnu shemu mreže s elektranom na Slici 11-1. Opterećenje lokalne mreže predstavljeno je sa RLC paralelnim trošilom. U normalnom pogonu elektrana predaje u mrežu konstantne snage P, Q , koje se disipiraju na trošilu, a iz čvrste mreže dolaze (ili u mrežu odlaze) razlike snaga $\Delta P, \Delta Q$, tako da su na mjestu priključenja elektrane iznosi napona i frekvencije V i f .



Slika 11-1 Nadomjesna shema mreže i elektrane prije pojave otočnog pogona

Uz pojednostavljenje (faktor snage u mreži je 1, tj. $Q=0$) za karakteristike opterećenja vrijede i slijedeće relacije:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (63)$$

$$L = \frac{V^2}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot Q_f \cdot P} \quad (64)$$

$$C = \frac{Q_f \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot V^2} \quad (65)$$

$$f = f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (66)$$

$$Q_f = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (67)$$

gdje su:

R - efektivni radni otpor opterećenja,

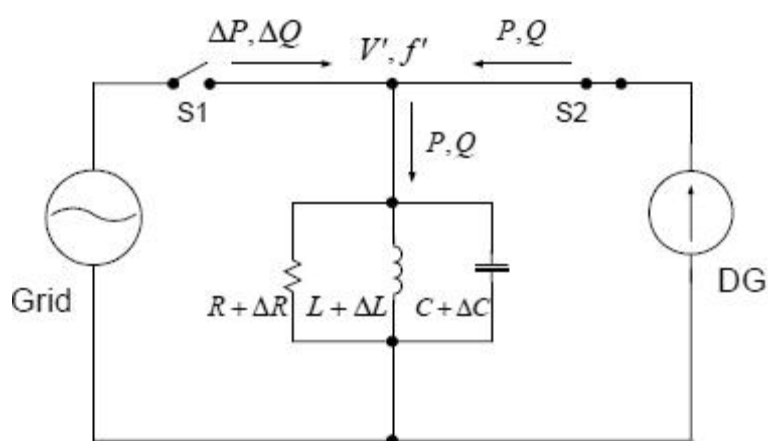
C - efektivni kapacitet opterećenja,

L - efektivni induktivitet opterećenja,

P - radna snaga,

Q_f - faktor dobrote opterećenja,
 f_0 - rezonantna frekvencija opterećenja,
 f - frekvencija mreže.

Na Slici 11-2 prikazana je ista nadomjesna shema mreže nakon isključenja sklopnog uređaja između mreže i elektrane i ostanka elektrane u otočnom pogonu s dijelom lokalne mreže.



Slika 11-2 Nadomjesna shema mreže i elektrane nakon pojave otočnog pogona

Debalans opterećenja lokalne mreže u odnosu na snagu elektrane prikazan je u karakteristikama opterećenja kao $R + \Delta R$, $L + \Delta L$, $C + \Delta C$. Kako elektrana daje konstantnu snagu, vrijednosti napona i frekvencije nakon pojave otočnog pogona promijenit će se na V' i f' . Ako je debalans ΔP i ΔQ dovoljno velik, V' i f' bit će izvan granica zone neprepoznavanja i izazvati prorađu odgovarajućih zaštita, i suprotno, ako nisu dovoljno veliki, pojavit će se otočni pogon dijela mreže s elektranom [81].

11.2. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita

Na Slici 11-2, nakon odspajanja lokalnog dijela od čvrste mreže, nova rezonantna frekvencija opterećenja jest:

$$f_0' = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L + \Delta L) \cdot (C + \Delta C)}} \quad (68)$$

Može se izvesti slijedeće:

$$\frac{f_0 - f}{f} = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L + \Delta L) \cdot (C + \Delta C)}} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}} = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{\sqrt{(L + \Delta L) \cdot (C + \Delta C)}} - 1 \quad (69)$$

Ako su podešenja frekvencijskih zaštita f_{min} i f_{max} , vrijedi:

$$\frac{f_{min} - f}{f} \leq \frac{\sqrt{L \cdot C}}{\sqrt{(L + \Delta L) \cdot (C + \Delta C)}} - 1 \leq \frac{f_{max} - f}{f} \quad (70)$$

Uz aproksimaciju da je $\Delta L \cdot \Delta C = 0$, relacija (70) može se pojednostavniti:

$$\left(\frac{f}{f_{max}} \right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \leq \left(\frac{f}{f_{min}} \right)^2 - 1 \quad (71)$$

Odnos između ΔL , ΔC i ΔQ je izveden u nastavku:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= V^2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L + \Delta L)} - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (C + \Delta C) \right) = \\ &= V^2 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right)} - 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C} \right) \right) = \frac{Q_L}{1 + \frac{\Delta L}{L}} - Q_C \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C} \right) \end{aligned} \quad (72)$$

Uz početnu pretpostavku, da je faktor snage jednak 1, vrijedi:

$$Q_L = Q_C = Q_f \cdot P \quad (73)$$

I proizlazi da za normalizirani ΔQ vrijedi slijedeća relacija:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{P} &= \frac{Q_f}{1 + \frac{\Delta L}{L}} - Q_f \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C} \right) = Q_f \cdot \frac{1 - \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C} \right)}{1 + \frac{\Delta L}{L}} \approx \\ &\approx Q_f \cdot \frac{-\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta C}{C}}{1 + \frac{\Delta L}{L}} \approx -Q_f \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \end{aligned} \quad (74)$$

Uz slijedeće dvije aproksimacije:

$$\Delta L \cdot \Delta C \approx 0 \quad (75)$$

$$1 + \frac{\Delta L}{L} \approx 1 \quad (76)$$

uvrštenjem relacije (74) u relaciju (71) proizlazi da za zonu nedetekcije podfrekvencijske i nadfrekvencijske zaštite vrijedi slijedeća relacija:

$$Q_f \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2\right) \leq \frac{\Delta Q}{P_{DG}} \leq Q_f \cdot \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2\right) \quad (77)$$

Vrijedi dakle:

$$\Delta Q_- = \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2\right) \cdot Q_f \cdot P_{DG} \quad (78)$$

$$\Delta Q_+ = \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2\right) \cdot Q_f \cdot P_{DG} \quad (79)$$

gdje su:

$f_{\max}$ - podešenje nadfrekvencijske zaštitne funkcije,

$f_{\min}$ - podešenje podfrekvencijske zaštitne funkcije,

ΔQ_- - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost Q_{load} manju od Q_{DG} ,

ΔQ_+ - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost Q_{load} veću od Q_{DG} .

11.3. Podnaponska i nadnaponska zaštita

Na sli čan na čin kao kod frekvencijskih zaštita, može se za naponske zaštite izvesti odnos između iznosa napona i radne snage [82]. Prije pojave otočnog rada (Slika 11-1), vrijedi:

$$P_{DG} = \frac{V^2}{R} \quad (80)$$

Nakon pojave otočnog rada (Slika 11-2), vrijedi:

$$P_{DG} = \frac{V'^2}{R + \Delta R} \quad (81)$$

Distribuirani izvor (elektrana) daje konstantnu snagu, pa vrijedi:

$$\frac{V'^2}{R + \Delta R} = \frac{(V + \Delta V)^2}{R + \Delta R} = \frac{V^2}{R} \quad (82)$$

Relacija (82) se može pojednostaviti pa dođemo do sljedećeg:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot \frac{\Delta V}{V} + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \quad (83)$$

Prije pojave otočnog pogona s mrežom se razmjenjuje razlika u radnoj snazi:

$$\Delta P = \frac{V^2}{R + \Delta R} - \frac{V^2}{R} \quad (84)$$

Za normalizirani P vrijedi sljedeće:

$$\frac{\Delta P}{P_{DG}} = \frac{\frac{V^2}{R + \Delta R} - \frac{V^2}{R}}{\frac{V^2}{R}} = -\frac{\Delta R}{\Delta R + R} = -\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta R}{R} + 1} \quad (85)$$

Uvrštenjem (83) u (85) dobijemo:

$$\frac{\Delta P}{P_{DG}} = \frac{2 \cdot \frac{\Delta V}{V} + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2}{2 \cdot \frac{\Delta V}{V} + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + 1} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta V}{V} + 1 \right)^2} - 1 = \frac{1}{\left(\frac{V + \Delta V}{V} \right)^2} - 1 = \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^2 - 1 = \left(\frac{V}{V'} \right)^2 - 1 \quad (86)$$

Pretpostavimo li da je veličina napona mreže u trenutku prije isklopa lokalnog dijela mreže, jednaka nazivnom naponu mreže V_n , tada za granice zona neprepoznavanja otočnog pogona nadnaponske i podnaponske funkcije zaštite dolazimo do relacije (4), napisane ovdje na malo drugačiji način:

$$\Delta P_- = \left(\frac{V_n^2}{V_{\max}^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} \quad (87)$$

$$\Delta P_+ = \left(\frac{V_n^2}{V_{\min}^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} \quad (88)$$

gdje su:

$V_{\max}$ - podešenje nadnaponske zaštitne funkcije,

$V_{\min}$ - podešenje podnaponske zaštitne funkcije,

ΔP_- - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} manju od P_{DG} ,

ΔP_+ - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} veću od P_{DG} .

11.4. Detekcija brzine promjene frekvencije

Da bi odredili zonu neprepoznavanja otločnog rada zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije potrebno je prvo konstatirati neke osnove o kinetičkoj energiji pohranjenoj u elektroenergetskom sustavu.

11.4.1. Kinetička energija i konstanta tromosti (sustava)

Na frekvencijsku stabilnost sustava velik utjecaj ima količina kinetičke energije pohranjene u sustavu. Ta količina je posljedično direktno povezana s konstantom tromosti pojedinih proizvodnih jedinica. Smanjenje kinetičke energije u sustavu (isklopom dijela proizvodnih jedinica) ima za posljedicu manju stabilnost sustava [83].

Kinetička energija rotacijske mase s određenim momentom tromosti koja rotira nekom kutnom brzinom jednaka je:

$$\varepsilon_{kin} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (89)$$

gdje je:

ε_{kin} – kinetička energija

J - moment tromosti,

ω - kutna brzina.

Konstanta tromosti (inercije) H je omjer kinetičke energije na nominalnoj brzini (koja odgovara nominalnoj frekvenciji sustava od 50Hz) i nazivne snage proizvodne jedinice [84]:

$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \omega_0^2}{S_{naz}} \quad (90)$$

gdje je:

H - konstanta tromosti (inercije),

S_{naz} - nazivna snaga,

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ - kutna brzina,

f_0 - nazivna frekvencija sustava.

Konstanta tromosti za električne motore (potrošače s pohranjenom kinetičkom energijom) može se definirati na isti način.

Ukupna količina kinetičke energije u sinkronom sustavu jednaka je sumi kinetičke energije svih pojedinih rotacijskih strojeva:

$$\varepsilon_{tot} = \sum_i \varepsilon_i = \sum_i S_i \cdot H_i \quad (91)$$

gdje je:

ε_{tot} - ukupna kinetička energija u sistemu.

S_i - nazivna snaga i -tog rotacijskog stroja,

H_i - konstanta tromosti (inercije) i -tog rotacijskog stroja.

Konstanta tromosti cijelog sustava je definirana na isti način kao i za pojedinačne jedinice:

$$H_{tot} = \frac{\varepsilon_{tot}}{S_{tot}} = \frac{\sum_i S_i H_i}{S_{tot}} \quad (92)$$

gdje je:

H_{tot} - konstanta tromosti sustava,

S_{tot} - ukupna nazivna snaga sustava (bazna snaga).

Odabir bazne snage S_{tot} ima važnu ulogu. Odabire se u ovom slučaju ukupna nazivna snagu (potrošača) u sustavu.

Ono što je za proučavanje specifično za ovaj rad bitno naglasiti jest slijedeće. Izmjenjivači, tj. elektronički pretvarači, preko kojih se na mrežu spajaju fotonaponske elektrane, nemaju rotacijske mase ni moment tromosti. Shodno tome, u slučaju kad su proizvodne jedinice na mrežu spojene elektroničkim pretvaračima, one ne doprinose kinetičkoj energiji sustava. Konstanta tromosti takve jedinice (izmjenjivača) je nula.

U odnosu na sinkroni ili asinkroni generator kao pogonski stroj proizvodne jedinice identične snage, utjecaj mnogo manje konstante tromosti sustava u otvorenom radu s takvom proizvodnom jedinicom (izmjenjivačem) dovodi do toga da su odgovarajuće brzine promjene frekvencije mnogo veće, za iste uvjete debalansa snaga.

Tablica 11-1 Vrijednosti za konstante tromosti za motore i male generatore prema podacima dostupnim iz literature [19]

Tip generatora	Veličina (snaga)	Konstanta tromosti (s)
Sinkroni motor		1-5
Asinkroni motor		3
Asinkroni motor	4,3MVA	2,0
Asinkroni motor	94kVA–4,7MVA	0,45-1,98
Sinkroni generator	1,5-5MVA	0,5-2
Mali diesel generator		0,8-1,5
Elektrana na biootpad		3
Elektrana na biomasu		3
Mala hidroelektrana		1,5-4
Vjetroturbina	2 MW	2,4-6,8
Vjetroturbina		2,2-4,3
Kogeneracija CCGT		4-6
Kogeneracija HRSG		3,5
Kogeneracija GT		6
Kogeneracija s motorom na unutarnje izgaranje		1,7
Kogeneracija ST		3

U skladu s prethodno navedenim, zone nedetekcije ove funkcije zaštite od otočnog pogona, kod elektrana spojenih preko izmjenjivača na mrežu, bit će značajno smanjene u odnosu na zonu nedetekcije u slučaju elektrana s drugačijim tipom pogonskog stroja [85].

U ovom slučaju, u obzir treba uzeti koeficijente tromosti ostalih elemenata u sustavu (potrošača), tj. primarno doprinos sinkronih i asinkronih motora koji su potrošači u tom dijelu sustava. Teoretski, kad takvih potrošača nema, brzina promjene frekvencije je beskonačno velika [86], tj. promjena je trenutna, skokovita.

Pregled koeficijenata tromosti za različite motore i male generatore [19], s podacima prikupljenim iz različitih izvora dan je u Tablici 11-1.

11.4.2. Zona neprepoznavanja otočnog pogona

Frekvencijska stabilnost elektroenergetskog sustava (i dijela sustava) određena je balansom između proizvodnje i opterećenja u sinkronom sustavu. Svaki debalans rezultirat će promjenama frekvencije, u skladu sa sljedećom relacijom [87]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2} f_n \frac{P_{gen} - P_{load}}{SH} = \frac{1}{2} f_n \frac{\Delta P}{SH} \quad (93)$$

gdje je:

$\frac{df}{dt}$ - brzina promjene frekvencija u sustavu,

f_n - nazivna frekvencija sustava,

P_{gen} - ukupna snaga proizvodnje,

P_{load} - ukupna snaga opterećenja,

$SH = \sum_i S_i H_i$ - ukupna kinetička energija rotirajućih masa priključenih na lokalni sustav koji je odvojen od čvrste mreže.

U slučaju jednog distribuiranog izvora koji nakon isklapanja sklopnog uređaja ostaje u otočnom pogonu s dijelom lokalne mreže P_{gen} je jednako P_{DG} , a vrijede slijedeće relacije za granice zona neprepoznavanja otočnog pogona zaštitnom funkcijom detekcije brzine promjene frekvencije:

$$\Delta P_- = -2 \cdot \frac{SH}{f_n} \cdot \left(\frac{df}{dt} \right)_{set} \quad (94)$$

$$\Delta P_+ = 2 \cdot \frac{SH}{f_n} \cdot \left(\frac{df}{dt} \right)_{set} \quad (95)$$

gdje su:

$\left(\frac{df}{dt} \right)_{set}$ - podešenje zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije,

ΔP_- - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} manju od P_{DG} ,

ΔP_+ - granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} veću od P_{DG} .

12. PRORAČUN VJEROJATNOSTI OTOČNOG RADA NA PRIMJERU SE KANFANAR I LOKALNE MREŽE PREMA OPISANOJ METODOLOGIJI

Na primjeru stvarnog slučaja (*case study*) SE Kanfanar prikazat će se primjena opisane metodologije za izračun vjerojatnosti pojave otočnog pogona fotonaponske elektrane priključene na srednjenaponsku mrežu s dijelom lokalne mreže.

12.1. Dodatni ulazni podaci koji je još potrebno definirati

Od podataka koji su potrebni za proračun vjerojatnosti otočnog rada predloženom metodom, a koji nisu u prethodnim poglavljima navedeni za slučaj SE Kanfanar, potrebno nam je za ovaj slučaj odrediti ili pretpostaviti slijedeće parametre:

- Učestalost isklopa sklopnih uređaja koji se nalaze u razmatranoj lokalnoj mreži za koju računamo vjerojatnost pojave otočnog rada,
- Faktor dobrote za lokalne dijelove mreže,
- Inerciju zamašnih masa u lokalnoj mreži, koja nam treba za proračun vjerojatnosti nedetekcije otočnog rada u slučaju primjene zaštitne funkcije df/dt .

12.1.1. Učestalost isklopa sklopnih uređaja

U ovom slučaju iz dostupnih podataka SCADA sustava elektrane u dužem vremenskom razdoblju poznat je podatak da u toku jedne godine u točki priključka na mrežu elektrane SE Kanfanar detekcija napona na strani mreže registrira nestanak tog napona prosječno 15 puta [88]. Nestanak napona mreže u točki priključka znači da je došlo do isklopa nekog od sklopnih uređaja koji se nalaze između elektrane i čvrste mreže. Kako je očekivani ispad cijele TS Vincent (pojne transformatorske stanice VN/SN na koju su spojeni odvodi na koje može biti priključena u pogonu SE Kanfanar) manje od jednom godišnje, za ovaj slučaj možemo zaključiti da se svih navedenih 15 isklopa odnosi na sklopne uređaje na samom odvodu na koji je spojena SE Kanfanar.

Uz pretpostavku da je SE Kanfanar cijelo vrijeme bila priključena na odvod vodno polje Rovinj (uobičajeno pogonsko stanje), tih 15 isklopa uključuje sve isklope svih sklopnih uređaja (prekidača na početku izvoda i rastavnih sklopki duž tog izvoda), uključivo pogonske manipulacije uzrokovane namjerom, nenamjerne slučajne isklope, isklope od strane zaštite,

uključivo i uspješne i neuspješne prorade APU-a itd. Na Slici 10-3 (a) prikazana je konfiguracija izvoda Rovinj i položaj sklopnih uređaja duž izvoda.

Sa sigurnošću možemo konstatirati slijedeće:

- prekidač $p2$ (mjesto odvajanja elektrane) nije uključen u ovu statistiku jer je mjerenje napona od strane mreže u mjernom polju prije ovog prekidača. On također nije relevantan za proračune vjerojatnosti otkonog rada s mrežom, jer isključ tog prekidača ne ostavlja elektranu spojenu s nekim dijelom lokalne mreže (samo unutarnja mreža elektrane),
- prekidač $p1$ na po četku odvoda sigurno isklapa najčešće, bilo lokalnim ili daljinskim upravljanjem u slučaju potreba operatera, ili pod djelovanjem neke od zaštita, na prolazne ili trajne kvarove,
- rastavne sklopke duž odvoda ($r1, r2, r3, r4, r5$) mogu biti upravljane jedino ručno i upravljanje njima (isklapanje) vrši se samo u slučaju rekonfiguracija pogonskog stanja mreže.

Nastavno na gore navedeno, a u nedostatku detaljnijih podataka, možemo zaključiti da je isklapanje prekidača na po četku voda višestruko češće od isklapanja rastavnih sklopki duž voda, te stoga pretpostaviti da je učestalost isklopa prekidača deset isklopa godišnje, a učestalost isklopa svake od pet rastavnih sklopki jedan isključ godišnje, što odgovara ukupnom broju od petnaest isklopa.

Naravno, umjesto ovako dobivenih podataka o učestalosti isklopa moguće je koristiti neke druge statističke podatke operatera sustava za pojedine sklopne uređaje, ali takvi nisu bili dostupni. Očekivano je učestalost isklapanja rastavnih sklopki niža od navedene za korištenje u ovom izračunu, a učestalost isklopa prekidača na početku voda viša.

Kako za drugi odvod nemamo mjerenja, iste parametre možemo upotrijebiti i za taj izračun, u slučaju spoja elektrane na odvod vodno polje Kanfanar 2 (Slika 10-3 (b)). Za učestalost isklopa rastavnih sklopki duž odvoda ($r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7$) uzet ćemo kako je navedeno, kao i za prekidače: na po četku odvoda ($p1$) i na otcjepu voda na industrijsko postrojenje ($p2, p3$), gdje ćemo za svaki od njih koristiti isti podatak za učestalost isklopa, bez ulaska u detaljnije proučavanje, iako je vjerojatnije da broj isklopa svakog od njih nije isti.

U Tablici 12-1 dani su parametri o učestalosti isklopa sklopnih uređaja lokalnih mreža s kojima SE Kanfanar može ostati u otkonom radu, u slučaju isklopa istih. Parametri su dani za

oba odvoda TS Vin čent na koja elektrana može biti priključena. Ovi parametri bit će korišteni za proračune vjerojatnosti pojave otočnog rada SE Kanfanar u nastavku ovog poglavlja.

Tablica 12-1 Podaci za učestalost isklopa (broj isklopa godišnje, p_{SUi}) sklopni uređaja lokalne mreže za SE Kanfanar, za proračun vjerojatnosti pojave otočnog rada

Sklopni uređaj (Slika 10-3):	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$	$r1$	$r2$	$r3$	$r4$	$r5$	$r6$	$r7$
VP Rovinj	10- x x 1	1 1 1	1 x x								
VP Kanfanar 2	101010 - 1	1 1 1	1 1 1	1							

12.1.2. Faktor dobrote

Točan podatak o faktoru dobrote lokalne mreže nije poznat. Zahtjev je standarda za ispitivanje sposobnosti detekcije izmjenjivača da prepoznaju otočni rad [41] da se ispitivanja provode na teretu faktora dobrote $Q_f = 1$. Podaci za različite standarde dani su u Tablici 5-1.

Međutim, u ovom slučaju realne mreže, a ne ispitnog sustava, može se zaključiti da u skladu s Mrežnim pravilima [9], faktor snage kod instalacija kupaca koji se priključuju na distributivnu mrežu treba biti od $\cos \varphi = 0,95$ induktivno do $\cos \varphi = 1$, te je uz provođenu kompenzaciju i uz doprinose kabelskih mreža faktor snage u SN mreži najčešće veći od $\cos \varphi = 0,98$. Prema relaciji (8) odgovarajući faktor dobrote za navedeni faktor snage je $Q_f = 0,45$ pa ćemo za bilo koji od dijelova lokalne mreže taj parametar koristiti za ovdje provedene proračune.

12.1.3. Inercija zamašnih masa lokalnih dijelova mreže (za funkciju df/dt)

Referirajući se na navedeno u poglavlju 11.4 gdje je opisana inercija zamašnih masa i njen utjecaj na detekciju otočnog pogona zaštitnom funkcijom df/dt , ovdje navodimo parametre koji će se koristiti u proračunima za SE Kanfanar:

- Konstanta inercije za izmjenjivače jednaka je nuli,
- Bazna snaga za pojedini dio lokalne mreže, za korištenje relacije (92), jednaka je instaliranoj snazi opterećenja pojedinog lokalnog dijela mreže i vidljiva je Slici 10-5 i u Tablici 10-2,
- Pretpostavljamo da je udio u svako vrijeme priključenih rotacijskih strojeva u potrošačima bilo kojeg dijela lokalne mreže jednak otprilike jednoj trećini ukupno instalirane snage potrošača, te u skladu s podacima navedenima u Tablici 11-1 i u skladu

s s navedenim u poglavlju 3.6.2.2., pretpostavljamo da je prosječna konstanta tromosti (inercije) takvih potrošačkih rotacijskih strojeva 0,3 s, dok je konstanta inercije svih ostalih potrošača jednaka nuli.

Vrijedi:

$$H_{tot-i} = \frac{\varepsilon_{tot}}{S_{tot}} = \frac{\sum_i S_i H_i}{S_{tot}} = \frac{\frac{1}{3} \cdot S_{tot} \cdot 0,3s + 0}{S_{tot}} = 0,1s \quad (96)$$

gdje je:

H_{tot-i} – ukupna konstanta tromosti za svaki od dijelova lokalne mreže.

12.2. Proračuni

Na temelju u prethodnom dijelu ovog rada predstavljenog načina izračuna i navedenih dostupnih i pretpostavljenih podataka za primjer *case study* slučaja SE Kanfanar, u nastavku ovog poglavlja izračunate su vjerojatnosti za pojavu otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže, pri primjeni pojedinačno svake od navedenih zaštitnih funkcija.

12.2.1. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita

Granice zone neprepoznavanja otočnog rada podfrekvencijske i nadfrekvencijske zaštite vezane su uz debalans jalovih snaga proizvodnje elektrane i tereta lokalne mreže, te ih izračunamo korištenjem relacija (78) i (79). Za podešenja zaštitne funkcije podfrekvencijske i nadfrekvencijske zaštite uzet ćemo da su podešene na vrijednosti maksimalnog dozvoljenog raspona, prema Tablici 4-1.

$$\Delta Q_- = \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2\right) \cdot Q_f \cdot P_{DG} = \left(1 - \left(\frac{50}{49}\right)^2\right) \cdot 0,45 \cdot P_{DG} = -0,019 \cdot P_{DG} \quad (97)$$

$$\Delta Q_+ = \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2\right) \cdot Q_f \cdot P_{DG} = \left(1 - \left(\frac{50}{51}\right)^2\right) \cdot 0,45 \cdot P_{DG} = +0,017 \cdot P_{DG} \quad (98)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti za jalovu snagu elektrane SE Kanfanar dana je u poglavlju 10.3 ovog rada. Funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja za svaki od

dijelova lokalne mreže dane su u poglavlju 10.5. Parametri za učestalost isklopa pojedinog sklopnog uređaja lokalne mreže dani su u poglavlju 12.1.1.

Uvažavajući konfiguraciju lokalne mreže koja je prikazana na Slici 10-5 i uvrštavajući sve navedene ulazne parametre koje smo definirali, korištenjem relacije (42) možemo izračunati vjerojatnost pojave otočnog pogona SE Kanfanar pri korištenju ove zaštitne funkcije.

Za pogonski spoj elektrane na VP Rovinj, vjerojatnost pojave otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane može se izračunati pomoću:

$$P_{or} = 1 - \prod_{i=1}^n P_i' = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{il})^{P_{sti}} = 1 - \left(1 - \int_{Q_{DGmin}}^{Q_{DGmax}} f(x_{Q_{DG}}) dx_{Q_{DG}} \int_{x_{Q_{DG}} - 0,019 \cdot P_{DG}}^{x_{Q_{DG}} + 0,017 \cdot P_{DG}} f_3(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{r1} + P_{r1}} \cdot \left(1 - \int_{Q_{DGmin}}^{Q_{DGmax}} f(x_{Q_{DG}}) dx_{Q_{DG}} \int_{x_{Q_{DG}} - 0,019 \cdot P_{DG}}^{x_{Q_{DG}} + 0,017 \cdot P_{DG}} f_2(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{r2} + P_{r3}} \cdot \left(1 - \int_{Q_{DGmin}}^{Q_{DGmax}} f(x_{Q_{DG}}) dx_{Q_{DG}} \int_{x_{Q_{DG}} - 0,019 \cdot P_{DG}}^{x_{Q_{DG}} + 0,017 \cdot P_{DG}} f_1(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{r4} + P_{r5}} \quad (99)$$

gdje su:

$x_{Q_{DG}}$ – varijabla jalove snage proizvodnje elektrane,

x_{Q_L} – varijabla jalove snage opterećenja lokalnog dijela mreže,

Q_{DGmin} – minimalna vrijednost jalove snage proizvodnje elektrane,

Q_{DGmax} – maksimalna vrijednost jalove snage proizvodnje elektrane,

$f_i(x_{Q_L})$ – funkcija gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja za i -ti dio lokalne mreže, prema dijelovima mreže na Slici 10-5.

Izračun relacije (99) proveden je programskim paketom Wolfram Mathematica [89].

Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otočnog rada tijekom jedne godine pogona SE Kanfanar, u slučaju pogonskog spoja na VP Rovinj dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,999117$.

Za pogonski spoj elektrane na VP Kanfanar 2, vjerojatnost pojave otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane izračunava se relacijom ekvivalentnoj relaciji (99), samo u ovom slučaju ima pet mogućih dijelova lokalne mreže, a ne tri. Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otočnog rada dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,999914$.

12.2.2. Podnaponska i nadnaponska zaštita

Granice zone neprepoznavanja otoknog rada podnaponske i nadnaponske zaštite vezane su uz debalans radnih snaga proizvodnje elektrane i tereta lokalne mreže, te ih izračunamo korištenjem relacija (87) i (88). Za podešenja zaštitne funkcije podnaponske i nadnaponske zaštite uzet ćemo da su podešene na vrijednosti maksimalnog dozvoljenog raspona, prema Tablici 4-1.

$$\Delta P_- = \left(\frac{V_n^2}{V_{\max}^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} = \left(\frac{1^2}{1,1^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} = -0,174 \cdot P_{DG} \quad (100)$$

$$\Delta P_+ = \left(\frac{V_n^2}{V_{\min}^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} = \left(\frac{1^2}{0,9^2} - 1 \right) \cdot P_{DG} = +0,235 \cdot P_{DG} \quad (101)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti za radnu snagu elektrane SE Kanfanar dana je u poglavlju 10.2 ovog rada. Funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja za svaki od dijelova lokalne mreže dane su u poglavlju 10.4. Parametri za učestalost isklopa pojedinog sklopnog uređaja lokalne mreže dani su u poglavlju 12.1.1.

Uvažavajući konfiguraciju lokalne mreže koja je prikazana na Slici 10-5 i sve navedene ulazne parametre koje smo definirali, korištenjem relacije (42) možemo izračunati vjerojatnost pojave otoknog pogona SE Kanfanar pri korištenju ove zaštitne funkcije.

Za pogon na VP Rovinj, vjerojatnost pojave otoknog rada s dijelom lokalne mreže, tijekom jedne godine pogona elektrane, jest:

$$P_{or} = 1 - \prod_{i=1}^n P_i' = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{i1})^{P_{sti}} = 1 - \left(1 - \int_0^{P_{DG\max}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,174 \cdot P_{DG}}^{x_{P_{DG}} + 0,235 \cdot P_{DG}} f_3(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{p1} + P_{r1}} \cdot \left(1 - \int_0^{P_{DG\max}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,174 \cdot P_{DG}}^{x_{P_{DG}} + 0,235 \cdot P_{DG}} f_2(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r2} + P_{r3}} \cdot \left(1 - \int_0^{P_{DG\max}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,174 \cdot P_{DG}}^{x_{P_{DG}} + 0,235 \cdot P_{DG}} f_1(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r4} + P_{r5}} \quad (102)$$

gdje su:

$x_{P_{DG}}$ – varijabla radne snage proizvodnje elektrane,

x_{P_L} – varijabla radne snage opterećenja lokalnog dijela mreže,

$P_{DG\max}$ – maksimalna vrijednost radne snage proizvodnje elektrane,

$f_i(x_{P_i})$ – funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja za i -ti dio lokalne mreže, prema dijelovima mreže na Slici 10-5.

Izračun relacije (102) proveden je programskim paketom Wolfram Mathematica [89]. Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otkonog rada tijekom jedne godine pogona SE Kanfanar, u slučaju pogonskog spoja na VP Rovinj dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,992122$.

Za pogonski spoj elektrane na VP Kanfanar 2, vjerojatnost pojave otkonog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane izračunava se relacijom ekvivalentnoj relaciji (102), samo u ovom slučaju ima pet mogućih dijelova lokalne mreže, a ne tri. Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otkonog rada dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,976523$.

12.2.3. Detekcija brzine promjene frekvencije df/dt

Granice zone neprepoznavanja otkonog rada zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije vezane su uz deblans radnih snaga proizvodnje elektrane i tereta lokalne mreže, te ih izračunamo korištenjem relacija (94) i (95). Za podešenje zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije uzet ćemo da je podešena na vrijednost 0,3 Hz/s, sukladno navedenom u poglavlju 5.2.1.4. Podatak o vrijednosti konstante tromosti za dijelove lokalnog sustava naveden je u poglavlju 12.1.3. Podaci o ukupnoj instaliranoj snazi po dijelovima lokalne mreže ($\sum S_{inst-i}$) vidljivi su sa Slike 10-5 i iz Tablica 10-5 i 10-6. Apsolutne vrijednosti graničnih snaga zone nedetekcije ove zaštitne metode nisu jedinstvene za cijelu lokalnu mrežu, već ovise o instaliranoj snazi lokalnog dijela mreže na kojem se promatra vjerojatnost nastanka otkonog rada.

$$\Delta P_- = -2 \cdot \frac{(\sum S_{inst-i}) \cdot H_{tot-i}}{f_n} \cdot \left(\frac{df}{dt} \right)_{set} = -2 \cdot \frac{0,1}{50} \cdot 0,3 \cdot (\sum S_{inst-i}) = -0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i}) \quad (103)$$

$$\Delta P_+ = 2 \cdot \frac{(\sum S_{inst-i}) \cdot H_{tot-i}}{f_n} \cdot \left(\frac{df}{dt} \right)_{set} = +0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i}) \quad (104)$$

Funkcija gustoće vjerojatnosti za radnu snagu elektrane SE Kanfanar dana je u poglavlju 10.2 ovog rada. Funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja za svaki od dijelova

lokalne mreže dane su u poglavlju 10.4. Parametri za učestalost isklopa pojedinog sklopnog uređaja lokalne mreže dani su u poglavlju 12.1.1.

Uvažavajući konfiguraciju lokalne mreže koja je prikazana na Slici 10-5 i sve navedene ulazne parametre koje smo definirali, korištenjem relacije (42) možemo izračunati vjerojatnost pojave otočnog pogona SE Kanfanar pri korištenju ove zaštitne funkcije.

Za pogon na VP Rovinj, vjerojatnost pojave otočnog rada s dijelom lokalne mreže, tijekom jedne godine pogona elektrane, jest:

$$P_{or} = 1 - \prod_{i=1}^n P_i' = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{il})^{P_{SLi}} = 1 - \left(1 - \int_0^{P_{DGmax}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,0012(\sum S_{inst-3})}^{x_{P_{DG}} + 0,0012(\sum S_{inst-3})} f_3(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{P1} + P_{P1}} \cdot \left(1 - \int_0^{P_{DGmax}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,0012(\sum S_{inst-2})}^{x_{P_{DG}} + 0,0012(\sum S_{inst-2})} f_2(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{P2} + P_{P3}} \cdot \left(1 - \int_0^{P_{DGmax}} f(x_{P_{DG}}) dx_{P_{DG}} \int_{x_{P_{DG}} - 0,0012(\sum S_{inst-1})}^{x_{P_{DG}} + 0,0012(\sum S_{inst-1})} f_1(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{P4} + P_{P5}} \quad (105)$$

gdje je:

$\sum S_{inst-i}$ – ukupna instalirana snazi i -tog dijela lokalne mreže.

Izračun relacije (105) proveden je programskim paketom Wolfram Mathematica [89]. Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otočnog rada tijekom jedne godine pogona SE Kanfanar, u slučaju pogonskog spoja na VP Rovinj dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,035585$.

Za pogonski spoj elektrane na VP Kanfanar 2, vjerojatnost pojave otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane izračunava se relacijom ekvivalentnoj relaciji (105), samo u ovom slučaju ima pet mogućih dijelova lokalne mreže, a ne tri. Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave otočnog rada dobije se vrijednost od $P_{or} = 0,089642$.

12.3. Komentar proračuna

Izračunate su veličine vjerojatnost da u toku jedne godine dođe do pojave otočnog rada SE Kanfanar s nekim dijelom lokalne mreže, pri primjeni svake od pojedinih zaštitnih funkcija,

na svakom od dva odvoda. U tablici 12-2 dan je prikaz svih izračunatih vjerojatnosti pojave jednog događaja otkoćnog rada tijekom godine dana.

Tablica 12-2 Izračunate vjerojatnosti pojave otkoćnog pogona SE Kanfanar s nekim dijelom lokalne mreže, pri primjeni svake od navedenih zaštitnih funkcija

Primijenjena zaštitna funkcija	$f_{<>}$	$U_{<>}$	df/dt
spoj elektrane na VP Rovinj	99,91%	99,21%	3,56%
spoj elektrane na VP Kanfanar 2	99,99%	97,65%	8,96%

Vidljivo je da je u slučaju primjene frekvencijskih ($f_{<>}$) i naponskih ($U_{<>}$) zaštita vjerojatnost iznimno velika, a nema neke značajne razlike u ovisnosti o izvodu na koji je elektrana spojena u pogonu.

S druge strane, vidljivo je i da bi u slučaju primjene zaštitne metode detekcije brzine promjene frekvencije (df/dt) vjerojatnost pojave događaja otkoćnog pogona drastično pala.

12.4. Usporedba dobivene vjerojatnosti sa slučajem kad bi se radilo o elektrani sa sinkronim generatorom

Kako je navedeno u poglavlju 10.6, zanimljivo bi bilo usporediti dobivene vjerojatnosti sa slučajem kada bi umjesto proučavane fotonaponske elektrane s izmjenjivaćima, na istom mjestu bila priključena elektrana sa sinkronim generatorom. Za takvu elektranu iste instalirane snage kao i razmatrana fotonaponska elektrana s izmjenjivaćima, koja radi priključena na istu točku na mreži konstantno punom snagom, s nazivnim faktorom snage, u cjelokupnom godišnjem periodu, možemo kao ulazne podatke uzeti slijedeće: $S_{naz}=912$ kVA, $\cos \varphi_{naz}=0,85$. U ovom slučaju vjerojatnost prvog inicijalnog događaja računa se prema relaciji (60).

12.4.1. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita

U slučaju pogonskog spoja elektrane na VP Rovinj, za izračun vjerojatnosti pojave otkoćnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane u slučaju ovakve elektrane, relacija (99) prelazi u:

$$P_{or} = 1 - \left(1 - \int_{S_n \cdot (\sin \varphi - 0,019)}^{S_n \cdot (\sin \varphi + 0,017)} f_3(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{p1} + P_{r1}} \cdot \left(1 - \int_{S_n \cdot (\sin \varphi - 0,019)}^{S_n \cdot (\sin \varphi + 0,017)} f_2(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{r2} + P_{r3}} \cdot \left(1 - \int_{S_n \cdot (\sin \varphi - 0,019)}^{S_n \cdot (\sin \varphi + 0,017)} f_1(x_{Q_L}) dx_{Q_L} \right)^{P_{r4} + P_{r5}} \quad (106)$$

Ekvivalentna relacija dobije se i za pet lokalnih dijelova mreže u slučaju spoja elektrane na VP Kanfanar 2.

Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave događaja otočnog rada u slučaju pogona elektrane u spoju na VP Rovinj dobije se vrijednost od $P_{or} = 0$, a u slučaju pogona elektrane u spoju na VP Kanfanar 2 vrijednost od $P_{or} = 0$. U oba slučaja pojava otočnog rada je nemoguća, tj. frekvencijske zaštite detektirat će svako odvajanje od čvrste mreže radi disbalansa jalovih snaga.

12.4.2. Podnaponska i nadnaponska zaštita

U slučaju pogonskog spoja elektrane na VP Rovinj, za izračun vjerojatnosti pojave otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane u slučaju ovakve elektrane, relacija (102) prelazi u:

$$P_{or} = 1 - \left(1 - \int_{S_n \cdot \cos \varphi - 0,826}^{S_n \cdot \cos \varphi - 1,235} f_3(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r1} + P_{r1}} \cdot \left(1 - \int_{S_n \cdot \cos \varphi - 0,826}^{S_n \cdot \cos \varphi - 1,235} f_2(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r2} + P_{r3}} \cdot \left(1 - \int_{S_n \cdot \cos \varphi - 0,826}^{S_n \cdot \cos \varphi - 1,235} f_1(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r4} + P_{r5}} \quad (107)$$

Ekvivalentna relacija dobije se i za pet lokalnih dijelova mreže u slučaju spoja elektrane na VP Kanfanar 2.

Uvrštenjem svih veličina i integracijom funkcija gustoće vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave događaja otočnog rada u slučaju pogona elektrane u spoju na VP Rovinj dobije se vrijednost $P_{or} = 0$, a u slučaju pogona elektrane u spoju na VP Kanfanar 2 vrijednost $P_{or} \approx 1$.

12.4.3. Detekcija brzine promjene frekvencije df/dt

Kod funkcije brzine promjene frekvencije, bitan je utjecaj konstante inercije sustava (lokalne mreže) koji ostaje u otočnom radu. U slučaju rotacijskog stroja kao generatora ona se razlikuje u odnosu na slučaj fotonaponske elektrane s izmjenjivačima.

Pretpostavimo da je za elektranu ove veličine konstanta tromosti reda veličine 1s, što je u skladu s podacima iz literature (tablica 11-1). Sada iz relacije (96) dobijemo:

$$H_{tot-i} = \frac{\varepsilon_{tot}}{S_{tot}} = \frac{\sum_i S_i H_i}{S_{tot}} = \frac{\frac{1}{3} \cdot S_{tot} \cdot 0,3s + S_n \cdot 1s}{S_{tot}} = 0,1s + \frac{S_n}{S_{tot}} \cdot 1s \quad (108)$$

Za granice zone nedetekcije dobije se:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\pm} &= \pm 2 \cdot \frac{(\sum S_{inst-i}) \cdot H_{tot-i}}{f_n} \cdot \left(\frac{df}{dt} \right)_{set} = -2 \cdot \frac{(\sum S_{inst-i}) \cdot \left(0,1 + \frac{S_n}{\sum S_{inst-i}} \cdot 1 \right)}{50} \cdot 0,3 = \\ &= \pm (0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i}) + 0,012 \cdot S_n) \end{aligned} \quad (109)$$

U slu čaju pogonskog spoj elektrane na VP Rovinj, za izra čun vjerojatnosti pojave otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže tijekom jedne godine pogona elektrane u slu čaju ovakve elektrane, relacija (105) prelazi u:

$$\begin{aligned} P_{or} &= 1 - \left(1 - \frac{S_n \cdot (\cos \varphi + 0,012) + 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})}{S_n \cdot (\cos \varphi - 0,012) - 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})} \int f_3(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{p1} + P_{r1}} \cdot \\ &\cdot \left(1 - \frac{S_n \cdot (\cos \varphi + 0,012) + 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})}{S_n \cdot (\cos \varphi - 0,012) - 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})} \int f_2(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r2} + P_{r3}} \cdot \left(1 - \frac{S_n \cdot (\cos \varphi + 0,012) + 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})}{S_n \cdot (\cos \varphi - 0,012) - 0,0012 \cdot (\sum S_{inst-i})} \int f_1(x_{P_L}) dx_{P_L} \right)^{P_{r4} + P_{r5}} \end{aligned} \quad (110)$$

Ekvivalentna relacija dobije se i za pet lokalnih dijelova mreže u slu čaju spoja elektrane na VP Kanfanar 2.

Uvrštenjem svih veli čina i integracijom funkcija gusto će vjerojatnosti, za vjerojatnost pojave doga đaja oto čnog rada u slu čaju pogona elektrane u spoju na VP Rovinj dobije se vrijednost $P_{or} = 0$, a u slu čaju pogona elektrane u spoju na VP Kanfanar 2 vrijednost $P_{or} = 0,82535$.

12.4.4. Komentar

Izračunate su veli čine vjerojatnost da u toku jedne godine do đe do pojave oto čnog rada fiktivne elektrane navedenih karakteristika čija je nazivna snaga jednaka instaliranoj snazi fotonaponske elektrane, pri primjeni svake od pojedinih zaštitnih funkcija, na svakom od dva odvoda. U tablici 12-3 dan je prikaz svih izra čunatih vjerojatnosti pojave jednog doga đaja otočnog rada tijekom godine dana.

Vidljivo je da su ovdje izra čunate vjerojatnosti pokazuju da ne postoji vjerojatnost otočnog rada za spoj takve fiktivne elektrane na VP Rovinj, dok u slučaju spoja na VP Kanfanar vjerojatnost pojave oto čnog rada postoji pri primjeni nekih zaštitnih metoda. Iz izra čunatog se može zaklju čiti da je disbalans snaga proizvodnje i optere ćenja mreže za bilo koji lokalni dio

mreže uvijek veći od graničnih vrijednosti zona nedetkcije u prvom slu čaju, dok u slu čaju spoja preko VP Kanfanar 2 disbalans radnih snaga u slu čaju odre đenih dijelova mreže nije uvijek izvan granice nedetkcije.

Tablica 12-3 Izračunate vjerojatnosti pojave pojave oto čnog pogona fiktivne elektrane (SG) s nekim dijelom lokalne mreže, pri primjeni svake od navedenih zaštitnih funkcija

Primijenjena zaštitna funkcija	$f<>$	$U<>$	df/dt
spoj elektrane na VP Rovinj	0%	0%	0%
spoj elektrane na VP Kanfanar 2	0%	100%	82,54%

Dodatno se može zaključiti da usporedba prou čavane *case study* elektrane SE Kanfanar s ovakvom elektranom nije odgovaraju ća. Naime, realno je prosje čna snaga ove fotonaponske elektrane otprilike jednaka tre ćini njene instalirane snage, pa bi vjerojatno adekvatna usporedba bila s elektranom pogonjenom sinkronim generatorom konstantne snage jednake prosje čnoj snazi fotonaponske elektrane. Stoga ćemo u slijede ćem poglavlju usporediti više scenarija s različitim snagama fiktivnih elektrana.

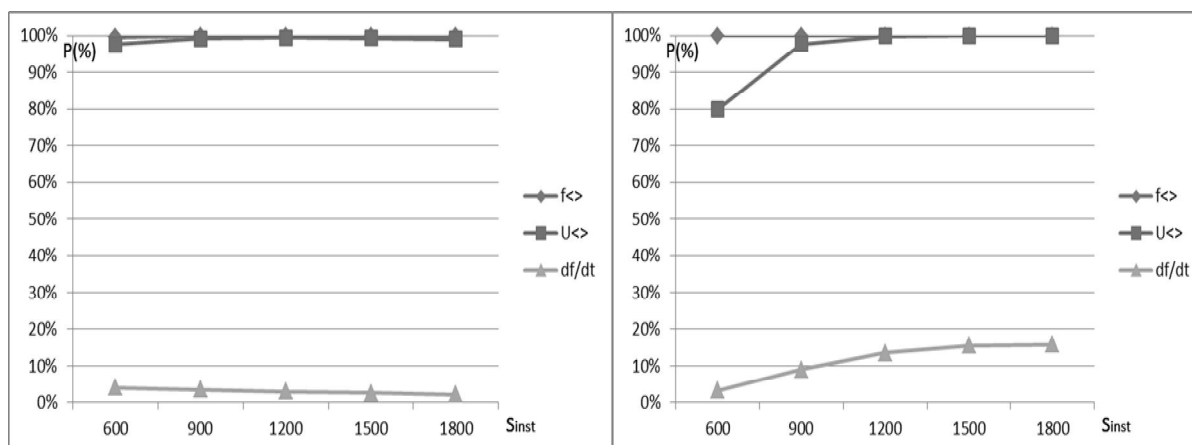
12.5. Usporedba vjerojatnosti izračunatih za elektrane razli čitih vrijednosti snaga spojene na istom mjestu u promatranom slu čaju

U prou čavanom slu čaju (za priklju čenu postoje ću fotonaponsku SE Kanfanar) prethodno su izra đeni modeli vjerojatnosnog ponašanja radnih i jalovih snaga optere ćenja po dijelovima lokalne mreže. Pretpostavit ćemo da se umjesto SE Kanfanar na to mjesto priklju čila elektrana druga čijih karakteristika. Da bi usporedili efikasnost prou čavanih metoda zaštite od otočnog rada ($f<>$, $U<>$, df/dt) u slu čaju fotonaponskih elektrana razli čitih instaliranih snaga i u slu čaju teoretske elektrane sa sinronim generatorom stalne snage, tako ćer razli čitih instaliranih snaga, predloženom metodom izvršeni su prora čuni veličine vjerojatnosti da u toku jedne godine do Će do pojave oto čnog rada za svaku od elektrana navedenih karakteristika (instalirane snage) iz tablice 12-4.

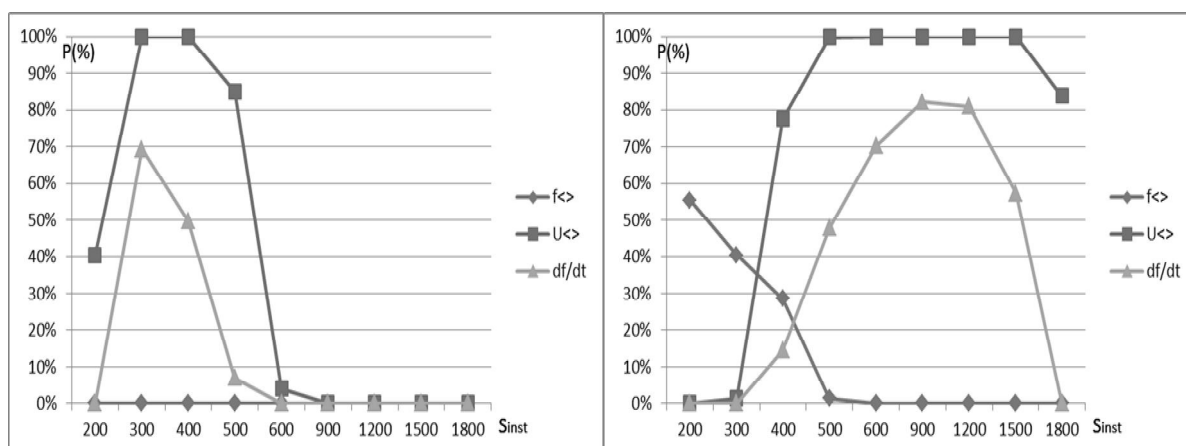
U tablici 12-4 dan je prikaz svih izračunatih vjerojatnosti pojave jednog doga Ćaja otočnog rada tijekom jedne godine, uz iste karakteristike lokalne mreže, ponašanja snaga proizvodnje kod fotonaponske elektrane i iste pretpostavke karakteristika elektrane sa sinkronim generatorom kao u prethodnim prora čunima izvršenim u poglavljima 12.2 i 12.4.

Tablica 12-4 Usporedba vjerojatnosti izražanih za elektrane s fotonaponskom tehnologijom i sa sinkronim generatorom različitih vrijednosti snaga spojene na istom mjestu

zašt.funkc. elektrana	$f_{<>}$		$U_{<>}$		df/dt	
	<i>VP Rovinj</i>	<i>VP Kan.2</i>	<i>VP Rovinj</i>	<i>VP Kan.2</i>	<i>VP Rovinj</i>	<i>VP Kan.2</i>
FN 600 kW	99,62%	99,94%	97,61%	79,81%	4,08%	3,22%
FN 900 kW	99,91%	99,99%	99,22%	97,69%	3,55%	9,00%
FN 1200 kW	99,97%	≈100%	99,43%	99,79%	2,98%	13,48%
FN 1500 kW	99,98%	≈100%	99,27%	99,97%	2,54%	15,46%
FN 1800 kW	99,98%	≈100%	98,99%	99,99%	2,20%	15,70%
SG 200 kVA	0%	55,45%	40,47%	0%	0%	0%
SG 300 kVA	0%	40,40%	100%	1,41%	69,34%	0%
SG 400 kVA	0%	28,60%	99,99%	77,38%	49,78%	14,38%
SG 500 kVA	0%	1,29%	84,96%	99,82%	6,89%	47,78%
SG 600 kVA	0%	0%	4,01%	99,99%	0%	70,23%
SG 900 kVA	0%	0%	0%	100%	0%	82,15%
SG 1200 kVA	0%	0%	0%	100%	0%	80,83%
SG 1500 kVA	0%	0%	0%	99,96%	0%	57,24%
SG 1800 kVA	0%	0%	0%	83,84%	0%	0%



Slika 12-1 Grafički prikaz veličine vjerojatnosti pojave otočnog rada u slučaju priključenja fotonaponske elektrane različitih snaga, pri primjeni različitih zaštitnih metoda detekcije otočnog rada, za slučaj pogona elektrane na VP Rovinj (lijevo) i VP Kanfanar 2 (desno)



Slika 12-2 Grafički prikaz veličine vjerojatnosti pojave otočnog rada u slučaju priključenja elektrane sa sinkronim generatorom različitih snaga, pri primjeni različitih zaštitnih metoda detekcije otočnog rada, za slučaj pogona elektrane na VP Rovinj (lijevo) i VP Kanfanar 2 (desno)

Na Slikama 12-1 i 12-2 dani su grafički prikazi veličine vjerojatnosti pojave jednog događaja otočnog pogona u toku godine dana za slučaj priključenih elektrana različitih instaliranih snaga, na istom mjestu lokalne mreže 20 kV rasplesa TS 110/20 kV Vin čent.

12.6. Komentar

Zaključci koji slijede iz analize rezultata proračuna iz Tablice 12-4 te sa Slika 12-1 i 12-2 navedeni su u nastavku.

Za slučaj fotonaponske elektrane (s izmjenjivačima), u slučaju proučavane lokalne mreže o čito je da se veličina snage opterećenja u nekim dijelovima lokalne mreže prilično podudara s veličinom snage proizvodnje elektrane, tj. nalaze se u istom redu veličine. To vrijedi za cijeli pretpostavljeni raspon instaliranih snaga fiktivnih fotonaponskih elektrana. Podudaranje je prisutno i kod jalovih i kod radnih snaga. Iz tog razloga kod ovog tipa elektrana za cijeli raspon snaga efikasnost zaštitnih funkcija podfrekvencijske i nadfrekvencijske zaštite (ovisi o podudaranju jalovih snaga) i zaštitnih funkcija podnaponske i nadnaponske zaštite (ovisi o podudaranju radnih snaga) je dosta malena, tj. vjerojatnost pojave jednog događaja otočnog rada u toku godine dana je dosta visoka (90 i više posto) bez obzira da li je elektrana priključena na VP Rovinj ili na VP Kanfanar 2.

Što se tiče zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije, ona se pokazuje visokoefikasnom u oba slučaja, pogonskog priključka elektrane na VP Rovinj ili na VP Kanfanar 2, tj. vjerojatnost pojave jednog događaja otočnog rada u toku godine dana je jako malena (manja od 5 % za VP Rovinj, te do 15% za VP Kanfanar 2). Iako i ovdje postoji podudaranje radnih snaga o kojem ovisi efikasnost ove metode, razlog visokoj efikasnosti je nepostojanje inercije kod izmjenjivača preko kojih su fotonaponski paneli priključeni te velika brzina promjene frekvencije i za manja odstupanja radnih snaga proizvodnje i opterećenja lokalne mreže.

Stav je autora da je ova razina vjerojatnosti pojave događaja otočnog pogona prihvatljiva te u slučaju takove vjerojatnosti nije potrebno ulagati u efikasnije metode bazirane na sustavima daljinskog vođenja pogona. Naime, navedena razina vjerojatnosti pojave događaja otočnog pogona istog je reda veličine kao i očekivana vjerojatnost kvara samog mikroprocesorskog zaštitnog releja, kod kojih je vjerojatnost pojave kvara na godišnjoj razini 5%, prema podacima navedenim u dostupnoj literaturi [90, 91]. Dodatni argument prihvatljivosti izračunate razine rizika, iako se na tu temu može i dublje diskutirati, je da su prema literaturi [92] vjerojatnosti između 1 i 10% za događaj kvara u godini dana prihvatljive u slučaju niske razine štete od posljedica takvog kvara ili se mogu tolerirati (ako je takva vjerojatnost svedena na najnižu razumnu praktičnu mjeru) u slučaju umjerene razine posljedičnih šteta. U slučaju znatne moguće štete ili u slučaju mogućih katastrofalnih posljedica, takve vjerojatnosti, prema [92], nisu prihvatljive.

Tablica 12-5 Matrica rizika za evaluaciju prihvatljivosti rizika kod planiranja transformatorskih stanica prema [92]

Posljedice	Vjerojatnost reda veličine pojave kvara u jednoj godini			
	Ne očekuje se	Niska	Umjerena	Visoka
Katastrofalne	Tolerira se	Neprihvatljivo	Neprihvatljivo	Neprihvatljivo
Znatne	Prihvatljivo	Tolerira se	Neprihvatljivo	Neprihvatljivo
Umjerene	Prihvatljivo	Prihvatljivo	Tolerira se	Neprihvatljivo
Male	Prihvatljivo	Prihvatljivo	Prihvatljivo	Tolerira se
Indikativna veličina	1/10000–1/1000	1/1000–1/100	1/100–1/10	>1/10

U stvarnosti su u SE Kanfanar primijenjene samo naponske i frekventne zaštite (integrirane na izmjenjivačima), dok funkcija detekcije brzine promjene frekvencije nije

primjenjena. Mjerenja pri simulacijama pojave otočnog rada u pogonu SE Kanfanar koja su provedena pri ispitivanju i puštanju elektrane u trajni pogon pokazala su da dolazi do pojave otočnog pogona u slučaju balansa snaga proizvodnje i opterećenja lokalnog dijela mreže. U Prilogu 3 ovog rada prikazana su neka mjerenja za vrijeme navedenog pokusa.

Za slučaj elektrane sa sinkronim generatorom (rotacijski stroj), vidljivo je da visoku efikasnost (pri navedenim postavkama rada elektrane) ima podfrekvencijska i nadfrekvencijska metoda zaštite. Razlog tome je različit red veličina jalovih snaga proizvodnje (pretpostavljeni $\cos\varphi$ je 0,85) i opterećenja lokalne mreže. Za veći nazivni faktor snage ove elektrane to bi podudaranje veličina jalovih snaga bilo bliže i ova metoda tada ima manju efikasnost.

Također se može primjetiti da u ovom slučaju zaštitna metoda detekcije brzine promjene frekvencije nema tako veliku efikasnost na cijelom proračunavanom rasponu snaga za pretpostavljenu elektranu. Razlog tome je značajna inercija rotacijskog stroja preko kojeg je elektrana priključena te brzina promjene frekvencije nije značajna za manja odstupanja radnih snaga proizvodnje i opterećenja lokalne mreže.

Može se zaključiti iz navedenog da je metoda detekcije brzine promjene frekvencije (df/dt) svakako preporučljiva metoda zaštite od otočnog pogona (fotonaponskih) elektrana spojenih na mrežu izmjenjivačima.

Preporuka je naravno, u isto vrijeme i metodama prikazanim u ovom radu izračunati očekivanu razinu vjerojatnosti pojave otočnog rada pri primjeni metode detekcije brzine promjene frekvencije, te ocijeniti uklopno stanje za koje je ta vjerojatnost najmanja. U ovisnosti o prihvatljivosti takve razine vjerojatnosti, ulaganje u efikasnije metode bazirane na sustavima daljinskog vođenja pogona ne smatra se prijeko potrebnim.

13. ZAKLJUČAK

Cilj ovog doktorskog rada bio je predložiti metodologiju ocjene rizika od pojave otočnog pogona distribuiranog izvora s dijelom mreže. Od posebnog interesa bilo je specifično pitanje otočnog pogona velikih fotonaponskih sustava, tj. elektrana s izmjenjivačima, priključenih na mrežu srednjeg napona. Jedna od osnovnih postavki je bila da se ocjena rizika ne treba donosti samo i isključivo proučavanjem izvora, već uzimajući u obzir i karakteristike sustava na koji se izvor priključuje.

Proučavanjem literature jasno je da je problem pojave otočnog rada distribuiranog izvora predmet interesa istraživača dugi niz godina, a sve intenzivnije se izučava pojavom sve više manjih distribuiranih izvora koji se priključuju na mrežu operatora distributivnog sustava. Problem zone nedetkcije otočnog rada koju imaju sve pasivne metode zaštite dovodi do predlaganja različitih aktivnih metoda koje imaju svoje nedostatke u vidu unošenja poremećaja u mrežu. Jedine metode koje su apsolutno sigurne su one temeljene na sustavima daljinskog vođenja, koje su zasad, a i u skoroj budućnosti, još uvijek nedostupne na svim dijelovima mreže operatora distributivnog sustava. Stoga je ovaj rad pokušao odgovoriti na pitanje vjerojatnosti pojave neželjenog otočnog rada pri primijenjenima standardnim funkcijama pasivne zaštite, koje su dostupne, lake za izvedbu i na razini pojedinačnog izmjenjivača i na razini elektrane, te bez povratnog utjecaja na ostale korisnike mreže.

Prvi predviđeni izvorni doprinos rada bio je model izrade pogonske karte, tj. P-Q dijagrama na mjestu priključka fotonaponske elektrane, sastavljene od više izmjenjivačkih jedinica, na mrežu srednjeg napona. U skladu s tim ciljem prvo je analizirana struktura tipične fotonaponske elektrane sastavljene od više izmjenjivača koja se priključuju na mrežu srednjeg napona. Elektrana i mreža prikazani su nadomjesnim modelom u kojem nadomjesni izvor obuhvaća cjelokupnu unutarnju mrežu elektrane sa svim izmjenjivačima, niskonaponskim kabelima, transformatorom i sredjenaponskim kabelom do susretnog postrojenja u kojem se priključuje na mrežu operatora sustava. Teoretski je određen doprinos ukupnoj radnoj i jalovoj snazi svakog od elemenata od kojih je elektrana sastavljena. Na temelju teoretskih podloga formiran je matematički model za izradu nadomjesnog modela distribuiranog izvora u točki priključka. Takav model definira pogonsku kartu elektrane, tj. P-Q dijagram s radnim područjem elektrane, koji prikazuje sve moguće radne točke 'radna snaga-jalova snaga' u pogonu elektrane.

Na primjeru stvarne elektrane određen je doprinos pojedinih elemenata, tj. radna snaga proizvodnje na izmjenjivaču i gubici radne snage na elementima te doprinos pojedinih elemenata

ukunjoj jalovoj snazi elektrane. Izračunata je pogonska karta s graničnim krivuljama izračunatim prema pojedinačnim formulama, za tu stvarnu elektranu. Provedena mjerenja na stvarnoj elektrani uspoređena su s teoretski izračunatim i konstruiranim dijagramom., tj. na teoretskoj pogonskoj karti prikazane su i trajektorije kretanja radne točke iz stvarnih mjerenja. Izvršena je dodatna analiza razloga zbog kojih rezultati mjerenja djelomično odstupaju od teoretski izračunatih vrijednosti i predložene korekcije metode koje će uključiti i dodatne realne okolnosti koje utječu na izgled realne pogonske karte. Metodologija i rezultati ovog prvog dijela istraživanja objavljeni su u znanstvenom radu na međunarodnoj konferenciji [93].

Sljedeći ciljani izvorni doprinos ovog rada bio je definiranje metode određivanja vjerojatnosti otočnog pogona na temelju P-Q dijagrama fotonaponske elektrane, konfiguracije mreže te statističkih pogonskih parametara mreže i potrošača. Predložena je metodologija za izračun vjerojatnosti pojave događaja otočnog pogona fotonaponske elektrane priključene na mrežu srednjeg napona. Parovi događaja, uravnoteženost snaga u granicama nedetekcije zaštitne metode i isklop lokalne uravnotežene mreže, čine stablo kvara za određivanje pogonskog slučaja otočnog pogona, a broj parova ovisi o konfiguraciji mreže.

Stablo kvara s višestrukim parovima osnovnih inicijalnih događaja je obrađeno, vjerojatnost inicijalnih događaja je definirana te je predstavljen dijagram toka metode predložene za ovaj izračun. Prethodno definirani P-Q dijagram poslužio je kao jedan od ulaznih podataka za izračun vjerojatnosti pojave otočnog rada proučavanog tipa elektrana. Granične vrijednosti radnih i jalovih snaga određene su tim P-Q dijagramom. Krivulje potrošnje ili određeni podaci o potrošnji za dijelove lokalne mreže mogu se pribaviti analizom dostupnih podataka iz dugoročnih mjerenja operatora sustava.

Funkcije razdiobe vjerojatnosti odgovarajućih varijabli radnih i jalovih snaga proizvodnje i potrošnje po dijelovima mreže trebaju se modelirati za izračun vjerojatnosti, za koju svrhu su na temelju ocjene dostupnih podataka, kao najpovoljnije odabrane trokutaste krivulje razdiobe. Na primjeru stvarne elektrane i lokalne mreže kao primjer izvršeno je modeliranje razdiobe vjerojatnosti varijabli snaga. Analizirani su ostali relevantni faktori vezani uz mrežu: konfiguracija mreže i statistički podaci o sklopnoj opremi.

Granice zona neprepoznavanja otočnog pogona teoretski su definirane za odabrane zaštitne funkcije detekcije otočnog pogona: nadfrekvencijsku i podfrekvencijsku, nadnaponsku i podnaponsku te zaštitnu funkciju detekcije brzine promjene frekvencije. Metodologija i rezultati drugog dijela istraživanja objavljeni su u znanstvenom radu u časopisu [94].

Zadnji predviđeni izvorni doprinos ovog rada je usporedba vjerojatnosti otočnog pogona u ovisnosti o primijenjenoj metodi zaštite od otočnog pogona. Primjena predstavljene metode

prezentirana je na primjeru stvarne elektrane. Izračunate su vjerojatnosti pojave jednog događaja otkočinog rada u vremenskom periodu od jedne godine za tu stvarnu elektranu, za svaku od proučavanih zaštitnih metoda. Potom su isti proračuni izvršeni za zamišljenu elektranu drugog tipa koja bi bila priključena na istom mjestu na proučavanu mrežu, sa sinkronim generatorom kao izvorom električne energije, koji je rotacijski stroj, za razliku od izmjenjivača koji je uređaj energetske elektronike. Uz pretpostavljene nazivne podatke dobivene su vrijednosti vjerojatnosti za ovaj slučaj na temelju čega su izvedeni zaključci. Proračuni su potom provedeni za cijeli niz usporedivih snaga za takva dva tipa elektrana spojenih na istom mjestu priključka na mrežu.

Utvrđena je velika zavisnost vjerojatnosti pojave otkočinog rada o konfiguraciji mreže i podudaranju snaga proizvodnje i potrošnje te je u nekim slučajevima moguća apsolutna učinkovitost pojedine metode, dok u drugom slučaju ista metoda ima jako malu učinkovitost. Međutim, jedan od zaključaka istraživanja je da zaštitna metoda detekcije brzine promjene frekvencije ima veliku efikasnost na cijelom proračunavanom rasponu snaga za pretpostavljene fotonaponske elektrane s izmjenjivačima, a u slučaju elektrana sa sinkronim generatorima visoka efikasnost nije pravilo. Razlog tome je značajna inercija rotacijskog stroja preko kojeg je elektranu priključena te brzina promjene frekvencije nije značajna za manja odstupanja radnih snaga proizvodnje i opterećenja lokalne mreže. U slučaju elektrana s izmjenjivačima koji ne doprinose inerciji u mreži dolazi do brzih kolebanja frekvencije i metoda detekcije brzine promjene frekvencije ima veliku efikasnost, koju smatramo prihvatljivom za preporuku primjene ove metode za takve slučajeve.

LITERATURA

- [1] PV status report 2018, European Commission, Joint Research Centre (JRC) Science for Policy Report, Italy, 2018.
- [2] Global market outlook for solar power / 2015-2019, SolarPower Europe (European Photovoltaic Industry Association), Belgium, 2014.
- [3] Photovoltaics report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Freiburg, 2019
[mrežno, ožujak 2019]
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [4] Trends 2015 in Photovoltaic Applications, 20th edition (2015): Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, International Energy Agency Photovoltaic Power System Programme (IEA PVPS), 2015.
- [5] Recent Facts about Photovoltaics in Germany, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Freiburg, 2015
[mrežno, ožujak 2015]
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>
- [6] Nacionalni akcijski plan za obnovljive izvore energije do 2020. godine, Ministarstvo gospodarstva RH, 2013.
- [7] Povlaštteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 25.2.2016.), HROTE – Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.
[mrežno, ožujak 2016]
http://files.hrote.hr/files/PDF/Sklopljeni%20ugovori/Povlasteni_proizvodjaci_HR_25_02_2016.pdf
- [8] Nositelji projekata s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija postrojenja još nisu puštena u pogon (stanje na dan 25.2.2016.), HROTE – Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.
[mrežno, ožujak 2016]
http://files.hrote.hr/files/PDF/Sklopljeni%20ugovori/Nositelji_projekata_HR_25_02_2016.pdf
- [9] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, Narodne novine 36/06

- [10] Opći uvjeti za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom, Hrvatska energetska regulatorna agencija, 23.7.2015., Narodne novine 85/2015
- [11] Tehnički uvjeti za priključak malih elektrana na EES Hrvatske elektroprivrede, Bilten Vjesnika HEP-a 50/1995
- [12] „Elaborat udešenja zaštite SE Kanfanar“, Končar - Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb, siječanj 2013.
- [13] M. Čavlović: „Nužni koraci korisnika mreže s HEP-ODS-om u postupku priključenja elektrane na distribucijsku mrežu“, 3. savjetovanje CIRED-a, Sveti Martin na Muri, 2012.
- [14] K. Nurul Edhura Ku Ahmad, J. Selvaraj, N. Abd Rahim: „A review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters“, Renewable and Sustainable Energy Reviews 21, Elsevier, 2013.
- [15] R. Goić, D. Jakus, J. Krstulović Opara, I. Zlatunić, I. Penović: „Priključak velikih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu“, 2. savjetovanje CIRED-a, Umag, 2010.
- [16] Network Code on Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators (RfG), final draft, EUROPEAN COMMISSION, Brussels, 2015.
- [17] M. Čavlović: „Problematika otocnog pogona elektrane s dijelom distribucijske mreže“, 5. savjetovanje CIRED-a, Osijek, 2016.
- [18] C. Sh. Chandrakar, B. Dewani, D. Chandrakar: „An assessment of distributed generation islanding detection methods“, International Journal of Advances in Engineering & Technology, Nov. 2012, Vol. 5, Issue 1
- [19] M. Bollen, F. Hassan: „Integration of distributed generation in the power system“, IEEE Press, A John Wiley&sons.inc., Hoboken, New Jersey, 2011.
- [20] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources into Electric Power Systems, IEEE Standard 1547TM, 2013.
- [21] D. Williston, D. Finney: „Consequences of Out-of-Phase Reclosing on Feeders With Distributed Generators“, Williston & Associates Inc. and Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.
- [22] R. A. Walling, N. W. Miller: „Distributed generation islanding implications on power system dynamic performance“, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting vol.1, 2002.

- [23] M. Ivas: „Oto čni pogon distribuiranih izvora sastavljenih od mrežnih izmjenjiva čkih jedinica“, Kvalifikacijski doktorski ispit, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014.
- [24] R. Bruendlinger, C. Mayr, A. Causebrook, J. Dahmani, D. Nestle, R. Belhomme, C. Duvauchelle, D. Lefebvre: „State of the art solutions and new concepts for islanding protection“, Project Dispower, Austria, 2006.
- [25] R. Teodorescu, M. Lissere, P. Rodriguez, Grid converters for photovoltaic and wind power systems, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2011.
- [26] W. Y. Teoh, C. W. Tan: „An Overview of Islanding Detection Methods in Photovoltaic Systems“, World Academy of Science, Engineering and technology 58, 2011.
- [27] M. Perić, J. Galešić, M. Boras, I. G. Kuliš: „Problematika priklju čenja distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu sa stanovišta prepoznavanja nedozvoljenog oto čnog pogona i zaštite od automatskog ponovnog uklopa“, 5. savjetovanje CIRED-a, Osijek, 2016.
- [28] EN50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems
- [29] M. Čavlović: „Metode detekcije oto čnog pogona“, 5. savjetovanje CIRED-a, Osijek, 2016.
- [30] G. Wang, J. Kliber, G. Zhang, W. Xu, B. Howell, and T. Palladino, „A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators—part ii: field test results,” IEEE Tran. Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007.
- [31] D. Lovreković, B. Brestovec, M. Kovačević, A. Horvatinović: „Sustav procesne informatike za isklju čenje generatora u funkciji zaštite od oto čnog pogona OIE-Slavonija DI“, 5. savjetovanje CIRED-a, Osijek, 2016.
- [32] M. E. Ropp, D. Joshi, S. A. Cozine, D. D. Schutz: „The future role of passive methods for detecting unintentional island formation“, Proceedings of the 48th Minnesota power systems conferece (MiPSYCon), November 2012.
- [33] A. Foss, K. Leppik: „Design and implementation of an anti-islanding protection strategy for distributed generation involving multiple passive protections“, IEEE Canada EPEC 2009.
- [34] D. Persson: „Islanding detection in power electronic converter based distributed generation“, project report, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2007.

- [35] J. Mulhausen, J. Schaefer, M. Mynam, A. Guzman, M. Donolo: „Anti-Islanding Today, Successful Islanding in the Future“, Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers, 2010.
- [36] T. Alinjak, I. Pavić, V. Golob: „Metode za detekciju i zaštitu od otočnog rada sunčanih elektrana“, 11. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2013.
- [37] M. M. Hanif, M. Basu, K. Gaughan, „A Discussion of Anti-islanding Protection Schemes Incorporated in a Inverter Based DG“, School of Electrical Engineering Systems, Arrow@dit, Dublin, Irska, 2011.
- [38] W. Bower, M. Ropp, „Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems“, Sandia national laboratories, SAND2002-3591, New Mexico, 2002.
- [39] M. A. Redfern, O. Usta, G. Fielding: „Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit“, IEEE Transactions on power delivery, 8/1993
- [40] W. Freitas, X. Wilsun, C. M. Affonso, H. Zhenyu: „Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications“, IEEE Transactions on power delivery, 20/2005.
- [41] IEC 62116 Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [42] A. Kardenass, K. Agnossou, M. L. Doumbia: „Islanding Detection Method for Multi-Inverter Distributed Generation“, Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, br. 3, 2009.
- [43] M. A. Eltawil, Z. Zhao: „Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems - A review“, Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010.
- [44] Rješenja o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača, web stranica Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA)
[mrežno, kolovoz 2013]
<http://www.hera.hr/hrvatski/html/rjesenja.html>
- [45] Sunčana elektrana Kanfanar, Izvedbeni projekt br. IZV-15-2011 - elektrotehnički, San Polo d.o.o., Rovinj, 2012.
- [46] SE Kanfanar, Prethodna elektroenergetska suglasnost br. 401102-100287-0011; HEP-ODS d.o.o. Elektroistra Pula, Rovinj, 2011.

- [47] B. Gorgan, S. Busoi, G. Tanasescu, P.V. Notinger: „PV Plant Modeling for Power System Integration using PSCAD Software“, The 9th International Symposium on Advanced topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romania, 2015.
- [48] „Capacitive Leakage Currents - Information on the Design of Transformerless Inverters“, technical information paper, SMA Solar Technology AG
[mrežno, kolovoz 2013]
<http://files.sma.de/dl/7418/Ableitstrom-TI-en-22.pdf>
- [49] F. Bernath: „Power factor compensation of photovoltaic power plants“, Energyspectrum – International e-Journal, 2011.
- [50] M. Ivas: „P-Q Diagram Construction for Multi-inverter Photovoltaic Power Plant Connected to MV Grid“, The 9th International Symposium on Advanced topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romania, 2015.
- [51] „Plan i program ispitivanja paralelnog pogona Sun čane elektrane Kanfanar s distribucijskom mrežom u probnom radu“, Telenerg d.o.o, Zagreb, ožujak 2012.
- [52] M. Ivas: „Probability risk assessment of island operation of grid connected multi-inverter power plant“, Proceedings 24th International Congress „Energy and the Environment“ 2014, Opatija, 2014.
- [53] T. Petković: „O slučajnim varijablama i slučajnim vektorima“, 2009.
[mrežno, svibanj 2017]
http://www.aes.hr/_download/repository/spus_2009_slucajna_varijabla.pdf
- [54] S. Hutter: „Praćenje opterećenja distribucijskih transformatora“, 2. savjetovanje CIRED-a, Umag, 2010.
- [55] „Potrošnja električne energije – Uvod u potrošnju električne energije“, prezentacija, FER – ZVNE, 2015.
[mrežno, lipanj 2017]
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ET08_Potrosnja.pdf
- [56] Z. Fikri: „Statistical load analysis for distribution network planning“, The royal institute of technology, Stockholm, 1975.
- [57] „Selected statistical methods for analysis of load research data“, Synergic resources corporation, SRC report no. 754 prepared for EPRI, 1975.
- [58] A. Seppala: „Load research and load estimation in electricity distribution“, Technical research centre of Finland, VTT publications 289, Espoo, 1996.
- [59] S. Kotz, J. R. Van Dor: „Beyond Beta: „Other Continuous Families of Distributions with Bounded Support and Applications“, World Scientific Publishing Company, 2004.

- [60] R. Hesse: „Triangle Distribution: Mathematica Link for Excel“, Graziadia Graduate School of Business, Pepperdine University, 2000.
- [61] W-K. Chen (urednik): „Electrical engineering handbook“, Elsevier Academic Press, SAD, 2005.
- [62] "Elaborat utjecaja elektrane na mrežu - SE Kanfanar", Končanar - Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb, siječanj 2013.
- [63] C. J. Chen: „Physics of Solar Energy“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, SAD, 2011.
- [64] J. Mikulović, Ž. Đurišić: „Statistička metoda za procenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sistema“, Infoteh-Jahorina, Vol.11, 2012.
- [65] V. Badescu (urednik): „Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface - Recent Advances“, Springer-Verlag, Berlin, Njemačka, 2008.
- [66] M. Chirila: „Selection of Operational Solar Photovoltaic Power Plant Investment Projects based on different approaches to Value“, magistarski rad, Aarhus University, Danska, 2014.
- [67] J. Barton: „A probabilistic method of modelling energy storage in electricity systems with intermittent renewable energy“, Loughborough University, UK, 2017.
- [68] A. Abdulkarim, S. M. Abdelkader, D. J. Morrow: „Statistical Analyses of Wind and Solar Energy Resources for the Development of Hybrid Microgrid“, 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014), Springer Proceedings in Energy, 2015.
- [69] M. Ivas, D. Lovrinović: „SCADA sustav Sunčane elektrane Kanfanar 1MW“, Zbornik radova 7. Dani inženjera elektrotehnike, Zadar, 25-27. rujna 2014.
- [70] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – Interactive maps online database, European Commission, Joint Research Centre Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit
[mrežno, lipanj 2017]
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- [71] Photovoltaic & solar electricity design tools (internetska stranica) [mrežno, lipanj 2017]
<http://www.photovoltaic-software.com/>
- [72] T. Huld, I. Pinedo-Pascua: „Global irradiation and solar electricity potential – Optimally inclined photovoltaic modules – Croatia / Hrvatska“, European Commission, Joint Research Centre Institute for Energy and Transport, Renewable Energy Unit
[mrežno, lipanj 2017]

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_cmsaf_opt/G_opt_HR.png

- [73] „Pogonsko stanje mreže 20 kV pogon Rovinj – stanje 04.02.2013.“, nacrt, HEP-ODS d.o.o. Elektroistra Pula, Pogon Rovinj, 04.02.2013.
- [74] I. Burul, M. Damiani ć, M. Lasi ć, G. Licul: „Puštanje u pogon i ispitivanje u pokusnom radu sun čane elektrane Kanfanar (999 kW)“, 11. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2013.
- [75] W. Sheperd, L. Zhang: „Electricity generation using wind power“, World Scientific Publishing, New Jersey, USA, 2017.
- [76] Z. Salameh: „Renewable energy system design“, Elsevier Inc., 2014.
- [77] S. Posavec, Ž. Ze čić, K. Beljan, N. Šimunovi ć: „Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskoga postrojenja korištenjem drvene sje čke“, Nova mehanizacija šumarstva 37(2016), Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2016.
- [78] D. Stirzaker: „Probability and Random Variables - A Beginner's Guide“, Cambridge University Press, 1999.
- [79] M. Guillot, C. Collombet, P. Bertrand, B. Gotzig: „Protection of embedded generation connected to a distribution network and loss of mains detection“, CIRED, 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (IEE Conf. Publ No. 482), , 2001.
- [80] „Recommendations for the connection of generating plant to the distribution system of licenced distribution network operators - Engineering Recommendation G59, Issue 3, Amendment 1“, Energy Networks Association, August 2014
- [81] Z. Ye, D. Finney, R. Zhou, M. Dame, B. Premerlani, B. Kroposki, Z. Englebreton: „Testing of GE universal interconnection device - Technical report“, National Renewable Energy Laboratory, SAD, 2003.
- [82] M. Yingram, S. Premrudeepreechacharn: „Investigation of Relationship between Voltage and Nondetection Zone of OUV/OUF of Local Islanding Detection Techniques“, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 2, No. 4, October 2014
- [83] A. Ulbig, T. S. Borsche, G. Andersson: „Analyzing Rotational Inertia, Grid Topology and their Role for Power System Stability“, International Federation of Automatic Control (IFAC) - PapersOnLine Volume 48, Issue 30, Elsevier, 2015
- [84] P. Tielens, D. Van Hertem: „The relevance of inertia in power systems“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 55, March 2016
- [85] A. Ulbig, T. S. Borsche, G. Andersson: „Impact of Low Rotational Inertia on Power System Stability and Operation“, IFAC World Congress 2014, Capetown, South Africa

- [86] M. R. Bank Tavakoli, M. Power, L. Rutledge: „Load inertia estimation using white and grey-box estimators for power systems with high wind penetration“, International Federation of Automatic Control (IFAC), Elsevier, 2012
- [87] P. Tielens, D. Van Hertem: „Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables“, Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering edition 6, Nizozemska, April 2012
- [88] SE Kanfanar WebSCADA (events list), podatak iz kronološke liste događaja software-a SCADA sustava elektrane, proizvođača Telenerg d.o.o., 2013.
- [89] Wolfram Mathematica 10, Wolfram Research Inc.
- [90] C. R. Heising, R. C. Patterson: „Reliability Expectations for Protective Relays. Developments in Power Protection“, Fourth International Conference in Power Protection, 11-13 April, 1989, Edinburgh, UK.
- [91] V. Gurevich: „Reliability of Microprocessor-Based Protective Devices Revisited“, Journal of Electrical Engineering, 2009
- [92] T. Krieg, J. Finn J (urednici): „Substations“, CIGRE Green Books, Springer, 2019.
- [93] M. Ivas, A. Marušić, J. G. Havelka, I. Kuzle: „Operation Chart Study of Multi-inverter Photovoltaic Power Plant Connected to Medium Voltage Grid“, 11th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion - MEDPOWER2018, Cavtat, Croatia, November 12-15, 2018
- [94] M. Ivas, A. Marušić, J. G. Havelka, T. Capuder: „Probability risk assessment of island operation event for large scale photo voltaic plant“, Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2018

Popis kratica

Kratica	Engleski	Hrvatski
AC	alternate current	<i>izmjenični sustav (struja)</i>
APU	<i>automatic reclosure</i>	automatski ponovni uklop
CDF	cumulative distribution function (of a variable)	<i>kumulativna funkcija razdiobe (varijable)</i>
CIGRÉ	<i>International Council on Large Electric Systems</i> (od fr. Conseil International des Grands Réseaux Électriques)	<i>Međunarodno vijeće za velike elektroenergetske sustave</i>
CIREĐ	<i>International Conference on Electricity Distribution</i> (od fr. Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution)	<i>Međunarodna elektrodistribucijska konferencija</i>
DC	direct current	<i>istosmjerni sustav (struja)</i>
DI	<i>distributed generation source</i>	distribuirani izvor
EDZ	<i>protection study</i>	elaborat podešenja zaštita
EES ¹⁾	<i>power system</i>	elektroenergetski sustav
EES ²⁾	<i>electrical connection acceptance</i>	elektroenergetska suglasnost
EOTRP	<i>optimal technical connection solution study</i>	elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja
EUEM	<i>power plant grid influence study</i>	elaborat utjecaja elektrane na mrežu
HEP-ODS	<i>Croatian electric utility – distribution system operator</i>	Hrvatska elektroprivreda – operator distribucijskog sustava
FER	<i>Faculty of Electrical Engineering and Computing (Zagreb University)</i>	Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu
FN	<i>photo voltaic</i>	fotonaponski
HRN EN	<i>croatian norm european norm</i>	hrvatska norma europska norma
HROTE	<i>Croatian electrical energy market</i>	Hrvatski operator tržišta električne

	<i>operator</i>	energije
HVDC	high voltage direct current	<i>istosmjerni visokonaponski</i>
IEC	International Electrotechnical Commission	<i>Međunarodna elektrotehnička komisija za standarde</i>
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers	<i>Institut inženjera elektrotehnike i elektronike</i>
LOM	loss of mains (protection)	<i>zaštita od gubitka mreže</i>
NDZ	non detection zone	<i>zona neprepoznavanja</i>
NN	<i>low voltage</i>	niski napon
OIE	<i>renewable energy sources</i>	obnovljivi izvori energije
OIEKPP	<i>(Database of) renewable energy sources, cogeneration and privileged electricity producers</i>	(Registar) obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača
OF	overfrequency (protection)	<i>nadfrekvencijska (zaštita)</i>
OV	overvoltage (protection)	<i>nadnaponska (zaštita)</i>
PDF	probability density function (of a variable)	<i>funkcija gustoće vjerojatnosti (varijable)</i>
PEES	<i>previous electrical connection acceptance</i>	prethodna elektroenergetska suglasnost
PLC	power line communication	<i>komunikacija putem eneretskog voda</i>
P-Q	<i>active power-reactive power</i>	<i>radna snaga-jalova snaga</i>
PV	photo voltaic	<i>fotonaponski</i>
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System	<i>geografski informacijski sustav fotonaponskih podataka</i>
RH	<i>Republic of Croatia</i>	Republika Hrvatska
RLC	<i>resistance-inductivity-capacity</i>	<i>otpor-induktivitet-kapacitet</i>
RMU	<i>ring main unit</i>	rasklopno postrojenje za sekundarnu distribuciju srednjeg napona
ROCOF	rate of change of frequency	<i>brzina promjene frekvencije</i>
SCADA	Supervisory Control and Data aquisition	<i>(sustav za) nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka</i>
SE	<i>solar powerplant</i>	sunčana (solarna) elektrana

SG	<i>synchronous generator</i>	sinkroni generator
SN	<i>medium voltage</i>	srednji napon
THD	total harmonic distortion	<i>ukupno harmoničko izobličenje</i>
TS	<i>substation</i>	transformatorska stanica
UK	United Kingdom	<i>Ujedinjeno kraljevstvo Velike Britanije i Sjeverne Irske</i>
UF	underfrequency (protection)	<i>podfrekvencijska (zaštita)</i>
UV	undervoltage (protection)	<i>podnaponska (zaštita)</i>
VN	<i>high voltage</i>	visoki napon
VP	<i>feeder/bay</i>	vodno polje

Popis oznaka

Oznaka	Značenje
a	donja granica mogućih vrijednosti varijable trokutaste razdiobe
A_{FN}	površina fotonaponskih panela
b	gornja granica mogućih vrijednosti varijable trokutaste razdiobe
c	očekivana vrijednost varijable (<i>mode</i>) trokutaste razdiobe
C	kapacitet potrošača
C_{FN}	parazitni kapacitet FN modula
C_{kab_i}	specifični kapacitet i -tog kabela
C_{kab_SN}	specifični kapacitet SN kabela
C_{kond_bat}	kapacitet kondenzatorske baterije
$\cos\varphi_{naz}$	nazivni faktor snage
$\cos\varphi_{izmj_i}$	podešeni faktor snage pojedinog izmjenjivača u elektrani
d_{FN}	razmak između površina kondenzatora (debljina FN panela)
$\frac{df}{dt}$	brzina promjene frekvencija u sustavu (ili ta zaštitna funkcija)
$\left(\frac{df}{dt}\right)_{set}$	podešenje zaštitne funkcije detekcije brzine promjene frekvencije
f	trenutna vrijednost frekvencije, frekvencija mreže
$f_{<>}$	podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštitna funkcija
$f_i(x_{Pl})$	funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja za i -ti dio lokalne mreže
$f_i(x_{Ql})$	funkcija gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja za i -ti dio lokalne mreže
F_{izvod}	funkcija gustoće vjerojatnosti snage opterećenja cijelog izvoda iz TS VN/SN
f_{max}	podešenje maksimalne dozvoljene vrijednosti frekvencije, podešenje nadfrekvencijske zaštitne funkcije
f_{min}	podešenje minimalne dozvoljene vrijednosti frekvencije, podešenje podfrekvencijske zaštitne funkcije
f_n	nazivna frekvencija sustava
F_{opti_i}	funkcija gustoće vjerojatnosti snage opterećenja na mjestu i -tog sklopnog uređaja

$f_X(x)$	funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable X
$f_{XY}(x,y)$	funkcija gustoće vjerojatnosti dvodimenzionalnog slučajnog vektora sastavljenog od neovisnih varijabli X i Y
$f_Y(y)$	funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable Y
$f(x_P)$	funkcija gustoće vjerojatnosti varijable radne snage proizvodnje elektrane
$f(x_Q)$	funkcija gustoće vjerojatnosti varijable jalove snage proizvodnje elektrane
f_0	rezonantna frekvencija opterećenja
H	konstanta tromosti (inercije)
H_i	konstanta tromosti (inercije) i -tog rotacijskog stroja
H_{tot}	konstanta tromosti sustava
H_{tot-i}	ukupna konstanta tromosti za svaki od dijelova lokalne mreže
i_{izmj}	izlazna stuja izmjenjivača
I_{izmj}	amplituda izlazne struje izmjenjivača
I_{kab_i}	struja koja teče kroz i -ti kabel
I_{kab_SN}	struja koja teče kroz SN kabel
i_0	struja praznog hoda
J	moment tromosti
k	udio radne snage koja teče u nekom trenutku u ukupno mogućoj, nazivnoj radnoj snazi (transformatora, kabela, ...)
L	induktivitet potrošača
l_{kab_i}	duljina i -tog kabela
L_{kab_i}	specifični induktivitet i -tog kabela
l_{kab_SN}	duljina SN kabela
L_{kab_SN}	specifični induktivitet SN kabela
$n^{(1)}$	broj dijelova lokalne mreže na kojima je moguća pojava otočnog rada elektrane
$n^{(2)}$	broj transformatorskih stanica SN/NN na izvodu
$P^{(1)}$	radna snaga
$P^{(2)}$	vjerojatnost za dani događaj
$P_{DG} (P_{gen})$	radna snaga distribuiranog izvora
P_{DGmax}	maksimalna vrijednost radne snage proizvodnje elektrane
P_i	vjerojatnost istovremenog događanja oba inicijalna događaja iz i -tog para događaja

P_i'	vjerojatnost događaja da ne dođe do istovremene pojave oba inicijalna događaja iz i -tog para događaja
P_{il}	vjerojatnost pojave prvog inicijalnog događaja iz i -tog para inicijalnih događaja, tj. vjerojatnost da su ostvareni uvjeti uravnoteženosti snage proizvodnje elektrane i opterećenja lokalne mreže
P_{il}'	vjerojatnost da ne dođe do prvog inicijalnog događaja iz i -tog para inicijalnih događaja
$P_{izm_j_i}$	radna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani
$P_{izm_j_i_naz}$	nazivna radna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani
P_{izm_uk}	ukupna proizvedena radna snaga svih izmjenjivača u određenom trenutku
$P_{izm_uk_max}$	najviša moguća ukupna radna snaga svih n izmjenjivača
P_{kab_i}	vrijednost radne snage koja teče kroz i -ti kabel
$P_{kab_i_naz}$	nazivna radna snaga, najveća za koju se može očekivati da će teći pojedinim kabelom (dionicom kabela)
$P_{kab_SN_naz}$	najveća radna snaga za koju se može očekivati da će teći SN kabelom
P_{ks}	nazivni gubici radne snage u namotima (radni gubici u kratkom spoju)
$P_L (P_{load})$	radna snaga potrošača
$P_{max_elektrana}$	maksimalna radna snaga priključene elektrane
$P_{min_mreža_i}$	minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza i -tog sklopnog uređaja
$P_{min_mreža_n}$	minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza n -tog sklopnog uređaja
$P_{min_mreža_n+1}$	minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza $n+1$ -og sklopnog uređaja
$P_{min_mreža_1}$	minimalna radna snaga opterećenja lokalnog dijela mreže iza prvog sklopnog uređaja
P_{naz}	nazivna radna snaga
P_{or}	vjerojatnost pojave događaja otočnog rada elektrane s dijelom lokalne mreže
p_{SUi}	broj očekivanih isklopa i -tog sklopnog uređaja u promatranom vremenskom periodu
P_{uk}	ukupna radna snaga elektrane u točki priključka na SN mrežu operatera sustava u datom trenutku

P_{vp}	radna snaga potrošača vlastite potrošnje elektrane
P_0	(nazivni) gubitci radne snage zbog magnetiziranja (gubitci u praznom hodu)
Q_C	kapacitivna snaga
$Q_{DG} (Q_{gen})$	jalova snaga distribuiranog izvora
Q_{DGmin}	minimalna vrijednost jalove snage proizvodnje elektrane
Q_{DGmax}	maksimalna vrijednost jalove snage proizvodnje elektrane
$Q_f (q)$	faktor dobrote tereta
Q_{izmj_i}	jalova snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani
Q_{izmj_par}	ukupna kapacitivna jalova snaga svih izmjenjivača zajedno radi utjecaja parazitnih kapaciteta polja fotonaponskih modula
Q_{izmj_uk}	ukupna jalova snaga svih izmjenjivača zajedno
$Q_{izmj_Σ}$	suma proizvedene jalove snage svih izmjenjivača u određenom trenutku
Q_k	jalova snaga transformatora ovisna o teretu
Q_{kab_i}	jalova snaga proizvedena/potrošena na i -tom kabelu
Q_{kab_SN}	jalova snaga SN kabela
Q_{kond_bat}	kapacitivna jalova snaga kondenzatorskih baterija
$Q_L (Q_{load})$	jalova snaga potrošača
Q_L	induktivna snaga
Q_{naz}	nazivna jalova snaga
Q_{tr}	jalova snaga transformatora
Q_{uk}	ukupna jalova snaga elektrane u točki priključka na SN mrežu operatera sustava u datom trenutku
Q_{vp}	jalova snaga potrošača vlastite potrošnje elektrane
Q_0	jalova snaga praznog hoda transformatora
R	radni otpor potrošača
R_{kab_i}	vrijednost radnog otpora i -tog kabela
R_{kab_SN}	vrijednost radnog otpora SN kabela
$R_{spec_kab_i}$	vrijednost specifičnog radnog otpora i -tog kabela
SH	ukupna kinetička energija rotirajućih masa priključenih na lokalni sustav koji je odvojen od čvrste mreže
S_i	nazivna snaga i -tog rotacijskog stroja
$\sin\varphi_{izmj_i}$	sinus kuta faktora snage pojedinog izmjenjivača u elektrani

S_{izmj_i}	prividna snaga pojedinog izmjenjivača u elektrani
S_{kab_i}	snaga koja prolazi i -tim kabelom
S_{kab_SN}	snaga koja prolazi SN kabelom
S_n	nazivna snaga transformatora
S_{naz}	nazivna prividna snaga
$S_{naz_kab_i}$	nazivna snaga (najveća snaga koja može teći kabelom u slučaju maksimalne proizvodnje izmjenjivača) i -tog kabela
S_{n_j}	nazivna snaga j -te transformatorske stanice SN/NN na izvodu
S_{tot}	ukupna nazivna snaga sustava (bazna snaga)
$U_{<>}$	podnaponska i nadnaponska zaštitna funkcija
U_f	fazni napon
u_k	napon kratkog spoja
V	trenutna vrijednost napona
V_{max}	podešenje maksimalne dozvoljene vrijednosti napona, podešenje nadnaponske zaštitne funkcije
V_{min}	podešenje dozvoljene minimalne vrijednosti napona, podešenje podnaponske zaštitne funkcije
V_{par}	vrijednost prenesenog izmjeničnog napona na istosmjerni sustav (<i>ripple voltage</i>)
$\bar{x}$	srednju vrijednost varijable trokutaste razdiobe
$X_{C_kab_i}$	kapacitivna reaktancija i -tog kabela
$X_{C_kond_bat}$	kapacitivna reaktancija kondenzatora
x_{max}	maksimalna moguća snaga elektrane
x_{min}	minimalna moguća snaga elektrane
$X_{L_kab_i}$	induktivna reaktancija i -tog kabela
x_P	varijabla radne snage proizvodnje elektrane
x_{PDG}	varijabla radne snage proizvodnje elektrane
x_{PL}	varijabla radne snage opterećenja lokalnog dijela mreže
x_Q	varijabla jalove snage proizvodnje elektrane
x_{QDG}	varijabla jalove snage proizvodnje elektrane
x_{QL}	varijabla jalove snage opterećenja lokalnog dijela mreže
ΔP	razlika (disbalans)radnih snaga proizvodnje i potrošača u „otoku“
ΔP_{kab_i}	gubitci radne snage na i -tom kabelu (i -toj dionici kabela)

ΔP_{kab_SN}	gubici radne snage na SN kabelu
ΔP_{ks}	gubici u namotima transformatora
ΔP_{tr}	gubici radne snage u transformatoru
ΔP_-	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} manju od P_{DG}
ΔP_+	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost P_{load} veću od P_{DG}
ΔQ	razlika (disbalans) jalovih snaga proizvodnje i potrošača u „otoku“
ΔQ_-	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost Q_{load} manju od Q_{DG}
ΔQ_+	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za vrijednost Q_{load} veću od Q_{DG}
Δx_-	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za snagu vrijednosti X, u negativnom smjeru
Δx_+	granica zone neprepoznavanja zaštitne funkcije za snagu vrijednosti X, u pozitivnom smjeru
ε_0	konstanta permitivnosti vakuuma
ε_r	relativna konstanta permitivnosti stakla (od kojeg su izrađeni FN moduli)
ε_{kin}	kinetička energija
ε_{tot}	ukupna kinetička energija u sistemu
Φ_{izmj}	fazni pomak
$\sum S_{inst-i}$	ukupna instalirana snazi i -tog dijela lokalne mreže
ω	kutna brzina
ω_{izmj}	kružna frekvencija

Popis slika

Slika 2-1	Novoinstalirani i povučeni kapaciteti proizvodnje električne energije prema tipu izvora u 2017. godini [1]	4
Slika 2-2	Rast ukupne instalirane snage u fotonaponskim elektranama od 2005. do 2018. godine s udjelom pojedinih zemalja	5
Slika 2-3	Udjel snage većih fotonaponskih elektrana u ukupno instaliranoj snazi u Njemačkoj	6
Slika 2-4	Broj postrojenja i instalirana snaga sunčanih elektrana u pojedinoj godini.....	7
Slika 2-5	Broj radova na temu zaštite od otočnog rada u časopisima i na konferencijama IEEE u razdoblju 1989-2012.	11
Slika 2-6	Izmjenjivač za više nizova fotonaponskih ćelija	12
Slika 2-7	Načelna shema niskonaponske mreže fotonaponske elektrane i povezivanja s priključnom TS NN/SN preko koje je elektrana priključena na mrežu srednjeg napona	13
Slika 3-1	Nadomjesna shema spoja distribuiranog izvora na mrežu s prikazom tokova snaga za analizu uvjeta otočnog pogona [23].....	25
Slika 3-2	Vremenska promjena napona i frekvencije u sustavu u otčnom radu [24]	27
Slika 3-3	Brzina odziva regulatora prema tipovima pogonskih strojeva [24]	28
Slika 3-4	Utjecaj tokova snaga na profil napona kroz mrežu [24]	31
Slika 4-1	Podjela na vrste metoda detekcije otočnog pogona	35
Slika 4-2	Dijagram toka rada pasivnih metoda	36
Slika 4-3	Dijagram toka rada aktivnih metoda	38
Slika 4-4	Dijagram toka rada hibridne metode	39
Slika 4-5	Zona neosjetljivosti (NDZ) detekcije otočnog pogona	42
Slika 5-1	Principna shema mrežnog izmjenjivača između DC izvora i AC mreže [34]	47
Slika 5-2	Klasifikacija metoda prepoznavanja i zaštite od otočnog pogona distribuiranog izvora izmjenjivačkog tipa.....	49
Slika 5-3	Fazni skok napona u točki priključenja elektrane u slučaju pojave otočnog rada [36]	50
Slika 5-4	Radne krivulje izmjenjivača i RLC tereta [36]	54
Slika 5-5	Prikaz valnog oblika izlazne struje izmjenjivača s aktivnim odstupanjem frekvencije i struje u krutoj mreži [36]	55

Slika 5-6	Principna shema ispitnog strujnog kruga za ispitivanje sposobnosti detekcije otočnog rada izmjenjivača [41]	57
Slika 6-1	Principna shema sunčane elektrane s više mrežnih izmjenjivačkih jedinica priključene na mrežu srednjeg napona [45]	62
Slika 6-2	Primjer krivulje mogućnosti pogona pojedinačnog izmjenjivača deklarirana od strane proizvođača	63
Slika 6-3	Računski konstruirana teoretska pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za sva moguća podešenja faktora snage izmjenjivača	82
Slika 6-4	Računski konstruirana realna pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za podešenje faktora snage izmjenjivača $\cos\varphi=1$	83
Slika 6-5	Računski konstruirana realna pogonska karta elektrane SE Kanfanar u P-Q dijagramu za podešenje faktora snage izmjenjivača $\cos\varphi=1$ (uvećana Q os).....	84
Slika 6-6	1-dnevna krivulja radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) na dan 16. veljače 2013.	86
Slika 6-7	11-dnevna krivulja radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) u periodu od 15. do 26. veljače 2013.....	86
Slika 6-8	11-dnevna trajektorija kretanja radnih točaka radne i jalove snage elektrane SE Kanfanar (na mjestu priključka na SN mrežu) u periodu od 15. do 26. veljače 2013.	87
Slika 6-9	Preklopljena pogonska karta elektrane s dijagramom izmjerenih radnih točaka u periodu mjerenja	88
Slika 6-10	Korigirana pogonska karta elektrane za mogući raspon faktora snage izmjenjivača od $\cos\varphi=0,9995_{kap}$ do $\cos\varphi=0,9995_{ind}$ s dijagramom izmjerenih radnih točaka u periodu mjerenja	90
Slika 7-1	Stablo kvara za događaj otočnog pogona elektrane s dijelom mreže.....	93
Slika 7-2	Dijagram toka metode za određivanje vjerojatnosti događaja otočnog pogona elektrane s dijelom mreže	103
Slika 8-1	Tipični dnevni dijagram (radne snage) opterećenja (potrošnje) u nekoj distributivnoj mreži	104
Slika 8-2	Krivulja trajanja snage opterećenja	106
Slika 8-3	Aproksimacija dnevne krivulje trajanja opterećenja s tri pravca [55].....	106
Slika 8-4	Primjer razdiobe snaga potrošača određene klase (određenih karakteristika) koja se može reprezentirati normalnom razdiobom (lijevo) i log-normalnom razdiobom (desno) u pojedinim dijelovima dana [58]	108

Slika 8-5	Primjer razdiobe varijable snage različitih potrošača kategorije kućanstva i zadovoljavajućeg modeliranja normalnom i log-normalnom razdiobom varijable [58].	108
Slika 8-6	Funkcija gustoće vjerojatnosti, PDF, (lijevo) i kumulativna funkcija razdiobe, CDF, (desno) za varijablu koja se ponaša po trokutastoj razdiobi.....	111
Slika 8-7	Opterećenje izvoda VP Rovinj TS 110/20 kV Vincent prije priključenja SE Kanfanar [62]	116
Slika 9-1	Tipični dnevni dijagram (radne snage) proizvodnje fotonaponske elektrane ljeti .	118
Slika 9-2	Krivulja kretanja veličine dnevne dozračene sunčeve energije na površinu pod kutem kroz jednu godinu [63]	119
Slika 9-3	Primjer aproksimacije razdiobe gustoće vjerojatnosti veličine sunčevog zračenja na jedinicu površine, za lokaciju Abuja, Nigerija (lijevo) i Belfast, UK (desno) pomoću različitih funkcija razdiobe (beta, logistička, gama, log-normalna, Weibullova) [68]	120
Slika 9-4	Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona snaga elektrane (SE Kanfanar) ..	122
Slika 9-5	Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona snaga elektrane SE Kanfanar s ucrtanom linearnim trendom koji aproksimira krivulju funkcije gustoće vjerojatnosti	124
Slika 9-6	Karta s prikazom očekivane godišnje proizvodnje električne energije (kWh) u odnosu na vršnu instaliranu snagu fotonaponske elektrane (kW_{peak}) za RH [72] ..	127
Slika 9-7	Dijagram gustoće pojavnosti pojedinih raspona jalove snage elektrane SE Kanfanar s ucrtanom trendom koji aproksimira trokutastu razdiobu gustoće vjerojatnosti (dijagram nije reprezentativan jer su mjerenja izvršena u kratkom periodu)	131
Slika 10-1	Nadomjesna shema konfiguracije mreže s prikazom mogućih pogonskih stanja na koje elektrana SE Kanfanar može napajati lokalnu mrežu	133
Slika 10-2	Grafički prikazi funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage (lijeva strana) i jalove snage (desna strana) SE Kanfanar	135
Slika 10-3	Nadomjesna shema konfiguracije lokalne mreže s naznačenim instaliranim snagama po granama, pojedinačno za pogonska stanja spoja elektrane na vodna polja u TS 110/20 kV Vincent: vodno polje Rovinj (a) i vodno polje Kanfanar 2 (b)	136
Slika 10-4	Prosječni godišnji dnevni dijagram opterećenja vodnih polja u TS 110/20 kV Vincent: vodno polje Rovinj (a) i vodno polje Kanfanar 2 (b).....	137

Slika 10-5	Lokalni dijelovi mreže s kojima elektrana može ostati u otočnom pogonu, u slučaju pogonskog stanja spoja elektrane na mrežu u VP Rovinj (a) ili u VP Kanfanar 2 (b).....	138
Slika 10-6	Grafički prikaz funkcija gustoće vjerojatnosti radne snage opterećenja na odvodima VP Rovinj (a) i VP Kanfanar 2 (b) TS 110/20 kV Višćent	139
Slika 10-7	Grafički prikaz funkcija gustoće vjerojatnosti jalove snage opterećenja na odvodima VP Rovinj (a) i VP Kanfanar 2 (b) TS 110/20 kV Višćent	141
Slika 11-1	Nadomjesna shema mreže i elektrane prije pojave otočnog pogona	146
Slika 11-2	Nadomjesna shema mreže i elektrane nakone pojave otočnog pogona	147
Slika 12-1	Grafički prikaz veličine vjerojatnosti pojave otočnog rada u slučaju priključenja fotonaponske elektrane različitih snaga, pri primjeni različitih zaštitnih metoda detekcije otočnog rada, za slučaj pogona elektrane na VP Rovinj (lijevo) i VP Kanfanar 2 (desno).....	168
Slika 12-2	Grafički prikaz veličine vjerojatnosti pojave otočnog rada u slučaju priključenja elektrane sa sinkronim generatorom različitih snaga, pri primjeni različitih zaštitnih metoda detekcije otočnog rada, za slučaj pogona elektrane na VP Rovinj (lijevo) i VP Kanfanar 2 (desno).....	169

Popis tablica

Tablica 4-1	Maksimalni rasponi napona i frekvencije mreže prema EN 50160 [28]	41
Tablica 4-2	Usporedba metoda detekcije otočnog pogona	42
Tablica 4-3	Zastupljenost predloženih metoda zaštite od otočnog rada	43
Tablica 5-1	Pregled zahtjeva prema različitim standardima koji obrađuju otočni rad izmjenjivača [14]	58
Tablica 10-1	Podaci o radnim snagama opterećenja odvoda VP Rovinj i VP Kanfanar u TS 110/20 kV Vinčent	137
Tablica 10-2	Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Rovinj u TS 110/20 kV Vinčent	139
Tablica 10-3	Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti radne snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Kanfanar 2 u TS 110/20 kV Vinčent	139
Tablica 10-4	Podaci o jalovim snagama opterećenja odvoda VP Rovinj i VP Kanfanar u TS 110/20 kV Vinčent	140
Tablica 10-5	Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Rovinj u TS 110/20 kV Vinčent	141
Tablica 10-6	Podaci za modeliranje funkcije gustoće vjerojatnosti jalove snage za svaki lokalni dio mreže sa Slike 10-5, za odvod VP Kanfanar 2 u TS 110/20 kV Vinčent	141
Tablica 11-1	Vrijednosti za konstante tromosti za motore i male generatore prema podacima dostupnim iz literature [19]	153
Tablica 12-1	Podaci za učestalost isklopa (broj isklopa godišnje, p_{SUi}) sklopnih uređaja lokalne mreže za SE Kanfanar, za proračun vjerojatnosti pojave otočnog rada	158
Tablica 12-2	Izračunate vjerojatnosti pojave pojave otočnog pogona SE Kanfanar s nekim dijelom lokalne mreže, pri primjeni svake od navedenih zaštitnih funkcija	164
Tablica 12-3	Izračunate vjerojatnosti pojave pojave otočnog pogona fiktivne elektrane (SG) s nekim dijelom lokalne mreže, pri primjeni svake od navedenih zaštitnih funkcija	167
Tablica 12-4	Usporedba vjerojatnosti izračunatih za elektrane s fotonaponskom tehnologijom i sa sinkronim generatorom različitih vrijednosti snaga spojene na istom mjestu	168

Tablica 12-5	Matrica rizika za eveluaciju prihvatljivosti rizika kod planiranja transformatorskih stanica prema [92]	170
--------------	---	-----

PRILOG 1 - KORIŠTENI PODACI O SUNČANOJ ELEKTRANI KANFANAR

Sunčana elektrana Kanfanar u istoimenom mjestu u Istri, snage 999 kW, trenutno je najveća sunčana elektrana u Hrvatskoj i prva sunčana elektrana koja je priključena na srednjem naponu na elektroenergetski sustav HEP-Operatora distribucijskog sustava. Priključena je na 20 kV mrežu Pogona Rovinj Distribucijskog područja Elektroistra Pula. Opći podaci o elektrani nalaze se u Tablici P1-1.

Tablica P1-1 Osnovni podaci SE Kanfanar

Naziv postrojenja	Sunčana elektrana Kanfanar
Investitor	Sunčane elektrane Petrokov d.o.o.
Lokacija	Općina Kanfanar, 52352 Kanfanar
Priključna snaga	999 kW
Tip postrojenja	sunčana elektrana
Proizvođač	Fronius (izmjenjivači), Sharp (FN paneli)
Grupa postrojenja	1.a.3 – sunčane elektrane instalirane snage veće od 30kW
Registarski broj IEKPP	2434695-0135/09
Početak trajnog pogona	6/3/2013

Proizvodna jedinica priključena je na vlastitu transformatorsku stanicu (TS 0,4/20 kV Sunčana elektrana Kanfanar) u kojoj se radi transformacija s nazivnog napona „generatora“ (0,4 kV) na nazivni napon 20 kV, te je povezana na susretno postrojenje (TS 20/0,4 kV Solar Kanfanar) srednjenaponske razdjelne mreže. Dozvoljena priključna snaga na pragu elektrane (na granici razdvajanja s HEP-Operatorom distribucijskog sustava d.o.o.) definirana Prethodnom elektroenergetskom suglasnošću iznosi 999 kW.

Proizvodna jedinica 0,4/20 kV sastoji se od 76 invertera nazivne snage 12 kW spojenih preko 5 sabirnih ormara na 5 dovoda u NN dio TS Sunčana elektrana Kanfanar. NN sabirnica spojena je preko pripadajućeg NN glavnog prekidača nazivne struje 1600 A, energetskog transformatora nazivne prividne snage 1000 kVA priključenog na NN strani kabelima ($14 \times 1 \times 185 \text{ mm}^2$) na NN glavni prekidač. SN strana energetskog transformatora priključena je kabelom XHE49-A $3 \times 1 \times 70 \text{ mm}^2$ na transformatorsko polje =J2 sklopnog bloka SafeRing DeV 24kV proizvodnje „ABB“, te sa istog sklopnog bloka povezan kabelom XHE49-A $3 \times 1 \times 150 \text{ mm}^2$ duljine 300 m na SN blok VDAF 24-DV proizvodnje „KONČAR – EASN“ (vodno polje =J1) u HEP-ODS-ovoj trafostanici TS 20/0,4 kV Solar Kanfanar. Predmetno postrojenje elektrane i SN veze na distribucijsku mrežu prikazano je na principnoj shemi na Slici P1-1.

U Tablici P1-2 navedeni su detaljni podaci korišteni u proračunima u doktorskom radu.

Tablica P1-2 Podaci o elementima SE Kanfanar korišteni u proračunima u doktorskom radu

<i>Karakteristike elementa</i>	<i>oznaka</i>	<i>podatak/vrijednost</i>
Elektrana		
ukupna instalirana snaga fotonaponskih panela	-	999 kW
ukupna instalirana snaga izmjenjivača	-	912 kVA
nazivni napon NN (linijski/fazni)	U_{n_NN}	400V / 230 V
nazivni napon SN (linijski/fazni)	U_{n_SN}	20 kV / 11,56kV
najveća vlastita potrošnja	P_{vp}	1 kW
Fotonaponski paneli		
tip/proizvođač	-	ND-235RIJ/ Sharp
snaga jednog panela	-	235 W
dimenzije jednog panela	-	994x1640x46 mm
ukupan broj panela	-	4225
ukupna površina polja FN panela	A_{FN}	6887 m ²
debljina stakla (razmak elektroda)	d_{FN}	0,012 m
relativna konstanta permitivnosti stakla FN panela	ε_r	6
Izmjenjivači		
tip/proizvođač	-	IG Plus 150 V-3 / Fronius
broj izmjenjivača	n	76
nazivna snaga	S_{izmj}	12 kVA
moгуćnost podešenja faktora snage	$\cos\varphi_{izmj}$	0,75-1 kap/ind
potrošnja radne snage u noćnom radu		1,72 W
napon prenesen na istosmjernu stranu (<i>ripple</i>)	V_{par}	2 V
jalova snaga izlaznog LC filtra u praznom hodu pri nazivnoj frekvenciji (u odnosu na nazivnu snagu)	-	2 %
Niskonaponski kabel 1		
tip	-	5x16
presjek vodiča	-	16 mm ²
specifični otpor	R_{spec_kab}	1,91 Ω /km
specifična kapacitivnost	C_{kab}	0,20 μ F/km
specifični induktivitet	L_{kab}	0,50 mH/km
ukupna duljina svih kabela	l_{kab}	2280 m
broj kablaskih dionica	n_{kab}	76
Niskonaponski kabel 2		
tip	-	4x120
presjek vodiča	-	120 mm ²
specifični otpor	R_{spec_kab}	0,253 Ω /km
specifična kapacitivnost	C_{kab}	0,55 μ F/km
specifični induktivitet	L_{kab}	0,36 mH/km
ukupna duljina svih kabela	l_{kab}	250 m

broj kablskih dionica	n_{kab}	5
Kompenzacija		
nazivna snaga kondenzatorske baterije	-	60 kVAr
Transformator		
tip/proizvođač	-	TNSCOTHR 1000 / ABB
prijenosni omjer	-	20/0,42 kV
nazivna snaga	S_t	1000 kVA
snaga radnih gubitaka u kratkom spoju	P_{ks}	12 kW
snaga radnih gubitaka u praznom hodu	P_0	1,75 kVA
struja praznog hoda	i_0	0,8 %
napon kratkog spoja	u_k	6 %
Srednjenaponski kabel		
tip	-	3x1x150 mm ²
presjek vodiča	-	150 mm ²
specifični otpor	$R_{spec_kab_SN}$	0,21 Ω/km
specifična kapacitivnost	C_{kab_SN}	0,26 μF/km
specifični induktivitet	L_{kab_SN}	0,39 mH/km
duljina kabela	l_{kab_SN}	300 m

Pri izradi ovog rada bili su dostupni sljedeći podaci iz mjerenja provedenih u postrojenju SE Kanfanar:

- 1) Mjerenja provedena u elektrani SE Kanfanar u periodu 11 dana, od 15. veljače 2013. do zaključno 26. veljače 2013. godine. Mjerenje je vršeno na 20 kV sabirnicama na obračunskom mjernom mjestu za Sunčanu elektranu Kanfanar, u susretnom postrojenju TS Solar Kanfanar. Mjerenja su provedena neizravnim posrednim mjerenjem pomoću mjernog instrumenta ION 7650 proizvođača tvrtke Power Measurement, spojenog preko mjernog namota sekundara naponskog transformatora i sekundarne jezgre strujnog transformatora.

Od prikupljenih mjerenja u radu su korištena mjerenja prosječnih 10-minutnih vrijednosti radne i jalove snage, na mjernom mjestu u točki priključka elektrane na mrežu.

Ova mjerenja su u radu korištena za:

- kontrolu i korekciju teoretskog modela izrade pogonske karte elektrane, u poglavlju 6 ovog rada,
- informativni (nereprezentativan) prikaz gustoće distribucije vrijednosti varijable jalove snage proizvodnje elektrane na mjestu priključka na mrežu, u poglavlju 9 ovog rada.

- 2) Mjerenja provedena u elektrani SE Kanfanar u periodu 174 dana, u razdoblju od 1.1.2014. do 23.6.2014. Mjerenja su vršena na 0,4 kV sabirnicama sabirnog postrojenja u SE Kanfanar, prije priključka na 0,4 kV stranu blok-transformatora elektrane. Mjerenja su provedena poluizravnim mjerenjem pomoću mrežnog analizatora fiksno ugrađenog u niskonaponsko postrojenje elektrane, ANR96 proizvođača tvrtke ABB, spojenog preko sekundarne jezgre strujnog transformatora, dok je napon mjeren direktno sa sabirnica.

Od prikupljenih mjerenja u radu su korištena mjerenja prosječne zabilježene snage elektrane u satnim vremenskim razdobljima u tom periodu.

Ova mjerenja su u radu korištena za:

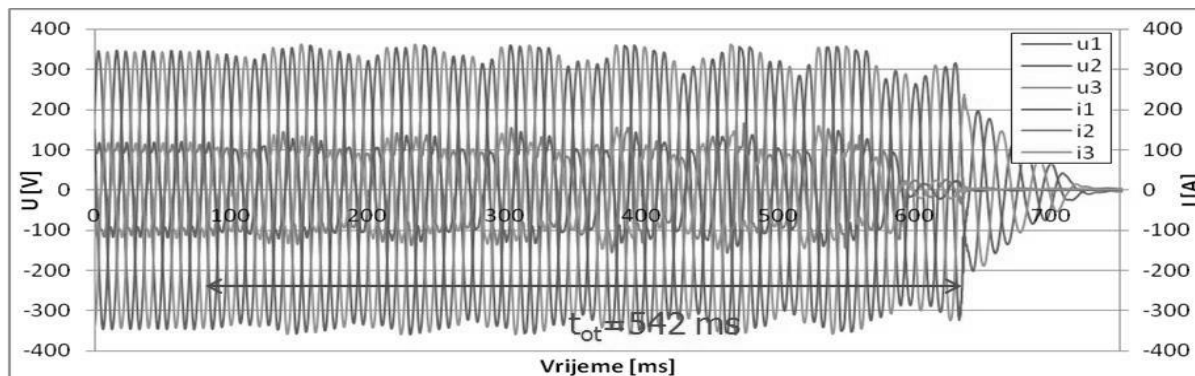
- prikaz gustoće distribucije vrijednosti varijable radne snage proizvodnje elektrane te za potvrdu odgovarajuće funkcije aproksimacije krivulje razdiobe gustoće vjerojatnosti radne snage proizvodnje elektrane u godišnjem razdoblju, u poglavlju 9 ovog rada.

Mjerenja su dostupna u obliku *.xls i *.csv datoteka.

PRILOG 3 - MJERENJA KOD IZVRŠENOG POKUSA INICIRANJA POJAVE OTOČNOG POGONA U POSTROJENJU SUNČANE ELEKTRANE KANFANAR

Pokus iniciranja pojave otočnog rada SE Kanfanar proveden je u sklopu ispitivanja pri puštanju elektrane u trajni pogon s mrežom, dana 15. veljače 2013. [62, 74]

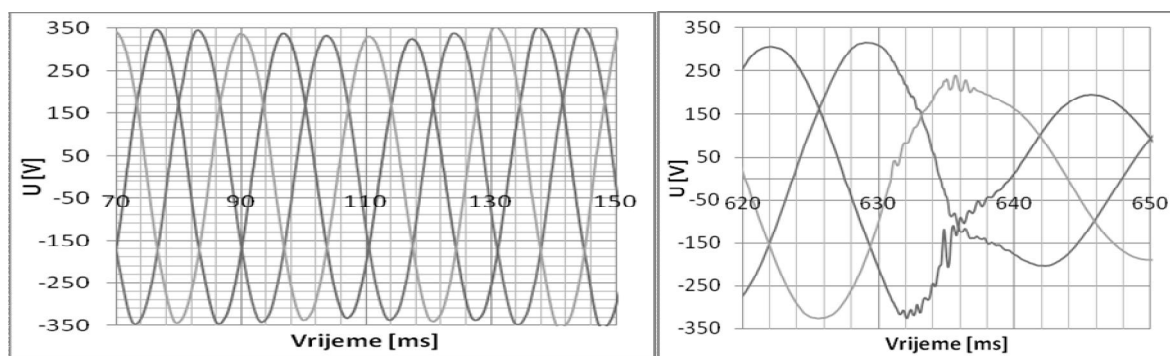
Iniciranje pojave otočnog rada SE Kanfanar s dijelom distribucijske mreže provedeno je na način da je VP Rovinj u TS 110/20 kV Vin čent isključeno s mreže u trenutku kada su se približno izjednačile snaga proizvodnje elektrane i snaga potrošnje konzuma VP Rovinj, odnosno kada je struja vodnog polja postigla minimalnu vrijednost (blisku 0 A). S obzirom da sunčana elektrana proizvodi radnu snagu, a kroz vodno polje teče i određena jalova energija, na čiji iznos nije moguće utjecati, nije moguće uspostaviti takav balans snaga da bi struja vodnog polja bila točno 0 A. Pored toga upitna je i točnost mjerenja pri tako malim vrijednostima struja s obzirom da se mjerenje vrši posredstvom strujnih mjernih transformatora čija je jezgra prilagođena za mjerenje struje kvara, odnosno za djelovanje zaštite vodnog polja. Iz navedenih razloga pokus je bilo potrebno provesti više puta. Pokus je proveden sveukupno četiri puta a na slikama prikazani su rezultati za slučaj kada je elektrana najduže ostala u otočnom pogonu [74].



Slika P3-1 Trajnje otočnog pogona elektrane SE Kanfanar iniciranog za vrijeme ispitivanja

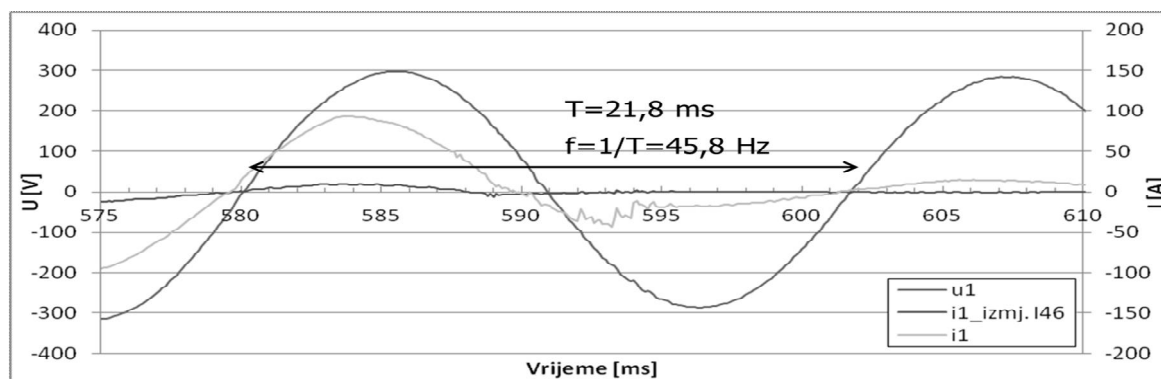
Na Slici P3-1 vidi se da elektrana ulazi u otočni pogon u 90. ms te ostaje u otočnom pogonu do 632. ms. Ukupno vrijeme trajanja otočnog pogona je 542 ms. Može se primjetiti da u trenutku ulaska elektrane u otočni pogon dolazi do trenutnog sniženja mrežnog napona (Slika P3-2, lijevo), što znači da je u tom trenutku radna snaga SE Kanfanar bila manja od potrošnje konzuma VP Rovinj. Međutim, razlika u proizvodnji SE Kanfanar i potrošnje VP Rovinj nije bila dovoljna da izazove prorađivanje podnaponske zaštite pošto se balans snaga uspostavio na naponu koji je unutar dozvoljenog raspona (unutar zone nedetkcije). Nakon uspostave balansa snaga na sniženom naponu izmjenjivači povećavaju izlaznu struju pošto je njihova snaga ostala

ista, a što za posljedicu ima ponovni porast napona. Iako je kretanje struje, a time i napona oscilatorno, napon ni u jednom trenutku ne prelazi podešene vrijednosti podnaponske niti nadnaponske zaštite, tj. ukoliko i prođe, tada to stanje ne traje dovoljno dugo koliko je potrebno za proradu pod(nad)naponske zaštite, pa bi u tim uvjetima, gledajući samo radnu komponentu snage, elektrana ostala u otočnom pogonu do nastupanja promjene u snazi proizvodnje ili potrošnje. Međutim, razlika jalove snage uzrokuje smanjenje frekvencije što vodi ka djelovanju podfrekvencijske zaštite (integrirane u izmjenjivačima), a što je vidljivo na Slici P3-3 [74].



Slika P3-2 Trenutak ulaska u otočni pogon (lijevo) i prestanka otočnog pogona (desno)

Sa Slike P3-3 vidljivo je da u trenutku isključenja izmjenjivača frekvencija iznosi 45,8 Hz što je ispod dozvoljenog praga te podfrekvencijska zaštita isključuje predmetni izmjenjivač, što se događa i na ostalim izmjenjivačima koji se u periodu od 40 ms nasumično isključuju s mreže. Nakon što ga predmetno VP (RLC krug) nastavlja prigušeno titrati na rezonantnoj frekvenciji koja iznosi oko 37 Hz (što potvrđuje da je na frekvenciji od 50 Hz predmetno vodno polje bilo proizvođač jalove energije, tj. ima kapacitivni karakter) [74].



Slika P3-3 Isključenje radi detekcije otočnog pogona od strane podfrekvencijske zaštite ($f <$)

ŽIVOTOPIS

Mihovil Ivas rođen je 1980. godine u Šibeniku. Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu upisao je 1998. godine, a diplomirao 2003. godine na Zavodu za visoki napon i energetiku. 2007. godine stječe stupanj magistra znanosti obranom rada pod naslovom „Lociranje kvara u razdjelnim mrežama“ koji je izradio pod vodstvom prof.dr.sc. Ante Marušića.

Nakon završetka diplomskog studija 2003. godine zapošljava se u HEP - Operator distribucijskog sustava d.o.o. u distributivnom području Elektroprimorje Rijeka gdje se bavi problematikom planiranja i razvoja srednjenaponske razdjelne mreže. 2006. godine prelazi u tvrtku Elektroprojekt d.d. u Zagrebu gdje uglavnom radi na projektiranju električnih sustava u velikim proizvodnim elektroenergetskim postrojenjima, kao projektant na izgradnji novih blokova termoelektrana Zagreb i Sisak. Od 2010. do 2017. godine radi u tvrtki Telenerg d.o.o. kao rukovoditelj odjela te kao projektant i voditelj projekata izgradnji i rekonstrukcija više distributivnih i prijenosnih transformatorskih stanica u Republici Hrvatskoj i u inozemstvu (Republika Irska, Tanzanija, Kosovo). Od 2017. godine radi u kao konzultant u tvrtki Lahmeyer International GmbH (od 2019. godine pod imenom Tractebel Engineering GmbH), Njemačka, na projektima izgradnji i rekonstrukcija transformatorskih stanica visokog napona širom svijeta.

Ovlašteni je projektant i voditelj projekata Hrvatske komore inženjera elektrotehnike i udruge Project Management Institute te član više strukovnih udruženja.

Radovi iz područja istraživanja:

- Mihovil Ivas, Ante Marušić, Juraj George Havelka, Igor Kuzle: „P-Q Capability Chart Analysis of Multi-Inverter Photovoltaic Power Plant Connected to Medium Voltage Grid“, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020 (prihvaćen za objavu)
- Mihovil Ivas, Ante Marušić: „Pogonska karta fotonaponske elektrane s više izmjenjivača i analiza vjerojatnosti nastanka otočnog pogona“, 14. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik, 10-13. studenog 2019. (prihvaćen za objavu)
- Mihovil Ivas, Ante Marušić, Juraj George Havelka, Tomislav Capuder: „Probability risk assessment of island operation event for large scale photo voltaic plant“, Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2019
- Mihovil Ivas, Ante Marušić, Juraj George Havelka, Igor Kuzle: „Operation Chart Study of Multi-inverter Photovoltaic Power Plant Connected to Medium Voltage Grid“, 11th

Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion - MEDPOWER2018, Cavtat, Croatia, November 12-15, 2018

- Mihovil Ivas: „P-Q Diagram Construction for Multi-inverter Photovoltaic Power Plant Connected to MV Grid“ - The 9th International Symposium on Advanced topics in Electrical Engineering - ATEE2015, Bucharest, Romania, May 7-9, 2015
- Mihovil Ivas: „Probability risk assessment of island operation of grid connected multi-inverter power plant“, Proceedings 24th International Congress „Energy and the Environment“ 2014, Opatija, Croatia, October 21-24, 2014
- Mihovil Ivas, Dragan Lovrinović: „SCADA sustav Sunčane elektrane Kanfanar 1MW“, Zbornik radova 7. Dani inženjera elektrotehnike, Zadar, 25-27. rujna 2014.

CURRICULUM VITAE

Mihovil Ivas was born in Šibenik in 1980. He enrolled Faculty of Electrical Engineering and Computing at the University of Zagreb in 1998 and graduated at Department of Energy and Power Systems in 2003. In 2007 he received the Master of science degree with thesis „Fault localization in electrical distribution networks“ written under the supervision of prof. Ante Marušić.

After graduation in 2003 he started to work at HEP-Distribution System Operator in distribution area Elektroprimorje Rijeka where his primary area of work was planning of development for medium voltage distribution grid. In 2006 he had moved to company Elektroprojekt Consulting Engineers in Zagreb where he had worked on design of electrical systems in large power plants, as a design engineer for construction projects of new units in thermal power plants Zagreb and Sisak. From 2010 to 2017 he had been working for company Telenerg as head of power engineering department and also as design engineer and project manager on many construction and reconstruction projects of distribution and transmission substations in Republic of Croatia and abroad (Ireland, Tanzania, Kosovo). Since 2017 he has been working as consulting engineer for company Lahmeyer International GmbH (since 2019 renamed to Tractebel Engineering GmbH), Germany, on transmission and distribution sector projects, worldwide.

He is chartered engineer and project manager registered with Croatian Chamber of Electrical Engineers and Project Management Institute and member of several professional associations.