Detekcija gubitka sinkronizma hidrogeneratora izravnim mjerenjem kuta opterećenja

Višić, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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:168:943409

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory







Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

IVAN VIŠIĆ

DETEKCIJA GUBITKA SINKRONIZMA HIDROGENERATORA IZRAVNIM MJERENJEM KUTA OPTEREĆENJA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

IVAN VIŠIĆ

DETEKCIJA GUBITKA SINKRONIZMA HIDROGENERATORA IZRAVNIM MJERENJEM KUTA OPTEREĆENJA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ante Marušić

Zagreb, 2020.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

IVAN VIŠIĆ

DETECTION OF HYDRO GENERATOR LOSS OF SYNCHRONISM BY DIRECT LOAD ANGLE MEASUREMENT

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Professor Ante Marušić, PhD

Zagreb, 2020

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

Mentor: prof.dr.sc. Ante Marušić

Doktorski rad ima: 95 stranica

Doktorski rad br.:_____

ŽIVOTOPIS MENTORA

Ante Marušić rođen je u Dubrovniku 1952. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao u polju elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu (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 2005. godine izabran je u zvanje redovitog profesora. Sada je i gostujući profesor na Sveučilištu u Mostaru (BiH). Sudjelovao je na tri znanstvena projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH i tri projekta Hrvatske zaklade za znanost. Voditelj je jednog međunarodno financiranog istraživačko-razvojnog projekta. Objavio je više od sto radova u časopisima i zbornicima konferencija u području relejne zaštite i automatike elektroenergetskog sustava, te projektiranja električnih postrojenja.

Prof. dr. sc. Ante Marušić član je stručnih udruga IEEE, CIGRÉ, IASTED, HKIE, MIPRO, EDZ i KoREMA. Sudjeluje u radu 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 Bedjanič" u Ljubljani (SLO) za posebno istaknutu magistarsku radnju. Godine 2017. primio je nagradu za životno djelo u stvaranju i radu Hrvatskog ogranka Međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave (HRO CIGRÉ).

SUPERVISOR'S BIOGRAPHY

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.

He has been working at the Department of Energy and Power Systems at the FER since March 1977. He was a visiting professor at the University of Rijeka, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek and University of Tuzla (The Republic of Bosnia and Herzegovina). He was promoted to Full Professor in December 2005. Additionally, he is currently a visiting professor at the University of Mostar (The Republic of Bosnia and Herzegovina). He participated in three scientific projects financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia and three projects financed by the Croatian Science Foundation. He is the head of an internationally funded research and development project. He published more than hundred papers in journals and conference proceedings in the fields of power system protection and automation and design of electrical facilities.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Anti Marušiću na korisnim savjetima i dragocjenoj pomoći tijekom poslijediplomskog studija.

Zahvalnost dugujem i kolegama iz tvrtke VESKI koji su mi pomogli pri realizaciji izravnog mjerenja kuta opterećenja na njihovom sustavu za monitoring hidrogeneratora te pri razvoju algoritama zaštite na sklopovskoj platformi.

Osobito se zahvaljujem kolegi dr.sc.Ivanu Strnadu na svekolikoj pomoći tijekom rada na disertaciji.

Hvala mojoj obitelji na razumijevanju i potpori.

DETEKCIJA GUBITKA SINKRONIZMA HIDROGENERATORA IZRAVNIM MJERENJEM KUTA OPTEREĆENJA

Sažetak

Prilikom većih poremećaja u elektroenergetskom sustavu može doći do gubitka sinkronizma između njegovih pojedinih dijelova. Zadatak zaštite od gubitka sinkronizma, odnosno zaštite od ispada iz koraka je izolirati asinkrona područja prije nego dođe do oštećenja generatora i daljnjih ispada u sustavu.

U doktorskom radu će biti predložen algoritam zaštite sinkronog hidrogeneratora od gubitka sinkronizma na temelju izravnog mjerenja kuta opterećenja generatora. U tu svrhu razvijen je algoritam za izravno mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu. Za potrebe ispitivanja funkcionalnosti predloženog modela implementirana je razvojna okolina koja se sastoji od sklopovske opreme i programa. Ispitivanje funkcionalnosti algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja provedeno je u stvarnom okruženju na hidrogeneratoru dok je algoritam za detekciju gubitka sinkronizma ispitan u laboratorijskom okruženju. Osim toga, za potrebe primjene kuta opterećenja generatora u drugim sustavima, analizirana je i mogućnost publiciranja kuta opterećenja na procesnu komunikacijsku mrežu primjenom norme IEEE C37.118 za sinkrofazorska mjerenja. U radu su prikazani rezultati publiciranja kuta opterećenja na komunikacijsku sabirnicu primjenom te iste norme.

Rezultati istraživanja prikazani u ovom radu pokazuju da je moguća primjena izravnog mjerenja kuta opterećenja za detekciju gubitka sinkronizma hidrogeneratora. Mogućnost publiciranja kuta opterećenja na komunikacijsku mrežu primjenom norme za sinkrofazorska mjerenja otvara nove perspektive istraživanja o korištenju kuta optrerećenja za analizu i očuvanje stabilnosti sustava.

Ključne riječi:

Stabilnost elektroenergetskog sustava (EES), sinkroni hidrogenerator, kut rotora, kut opterećenja, gubitak sinkronizma, ispad iz koraka generatora, sinkrofazorska mjerenja

DIRECT LOAD ANGLE MEASUREMENT APPLICATION FOR HYDRO GENERATOR LOSS OF SYNCHRONISM DETECTION

Abstract

Power system stability is crucial for normal, reliable and safe power system operation. System disturbances that lead to power system oscillations, such as short circuits, can harm synchronous generators but can also cause a part or the entire power system to black out. It is necessary to protect the power system and the generators from these faults which can cause considerable damage.

Power system stability is defined in literature as the ability to regain an equilibrium state after being subjected to a physical disturbance. The quantities important for power system operation are the load angles of generators and the load angles, frequency and voltages of the nodes in the network. Consequently, the stability is divided into rotor angle stability, frequency stability and voltage stability.

Decades ago, the electrical centers of power systems were located in the transmission networks whose protections detected the losses of synchronism without the need of shutting down generators. Over the years, transmission networks got stronger, so did the generator and block-transformer impedances and the rotors' inertia got reduced. This resulted in moving electrical centers of the system all the way to unit-transformers and generators, thus rising the strains of the mentioned system components. The consequence is that the critical fault times for the fault on power plant high voltage busbars also reduced. If the fault time is short enough the power swings following the disturbances can be stable. Otherwise, the loss of synchronism occurs. In such a system, the loss of synchronism will not be detected by network protections, and the need for the loss of generator synchronism protection emerged. The existing generator protections, such as the differential protection or the overcurrent protection will not work in such situations. The loss of excitation detection function can detect some loss of synchronism, but will not work in all situations in the system.

The term "loss of synchronism" is closely tied to the term "transient generator stability". Transient stability deals with the issue of equalized processes through the phenomenon of attenuated oscillations of the angular rotor speed of synchronous machines, such as sudden load changes, changes of switching state and short circuits in the network. Transient stability is maintained if the oscillations are attenuated and the drive is returned to normal. In the case of

transient stability, as well as static stability, there is a mutual dependence on the power transmitted and the generator load angle. In normal drive situations, this angle is constant and it depends on the load. In power swing situations, the angle oscillates, and when the loss of synchronism occurs, the angle can vary between 0 and 180 degrees.

The generator protection device is one of the key parts of every power plant. It uses measurements, signals and built-in algorithms to protect the generator from faults in auxiliary generator systems, faults in the grid and internal generator faults. One of the functions with a leading role in generator protection is the out of step protection function, whose role is to detect the generator loss of synchronism. When the loss of synchronism occurs, like during important power line outages and short circuits, the asynchronous areas must be isolated before the generator is damaged and other outages start occurring all over the system. This happens because high amplitude currents cause strains in generator windings as well as mechanical strains that can lead to generator and turbine damages. Generator faults caused by such malfunctions often bring significant financial costs, like expensive repairs and revenue loss due to production interruptions, so it is important to detect the fault and shut down the turbine and generator as soon as possible.

In the majority of modern numeric relays, the loss of synchronism function is realized through the measurement of impedance change in time. In the algorithms of this protection function, the passing of impedance vectors through the polygonal impedance characteristics is observed. The impedance is calculated from the positive sequence fundamental frequency components of the three voltages and currents. The typical loss of synchronism detection characteristic is a polygon that is symmetrical about its vertical axis. The origin of the coordinate system represents the point of measurement of currents and voltages. The characteristic is defined by generator reactances in one direction and unit transformer and network impedances in the other directions. Depending on the electrical centre of the power swing, the impedance vector is moving through the characteristic. When the condition for the loss of synchronism is fulfilled, that is, when the impedance vector passes through the polygonal characteristic, a counter is activated and the stimulus for the loss of synchronism protection is activated. After the set number of passes of the impedance vector through the polygonal characteristic is exhausted, the command to switch off the circuit breaker is activated. The disadvantage of the methods based on impedance measurement is that they require extensive transient stability studies which cannot easily cover all possible disturbances in the system.

A new model for hydro generator loss of synchronism protection based on direct measurement of the power angle is proposed in the doctoral thesis. The basis for this model is

the possibility to measure the load angle directly in real time. Generally, the load angle is determined by the terminal voltage signal of one phase and by the information on rotor position. Since the information on rotor position can be obtained in several different ways, different methods for determining the load angle also exist. The quality of the load angle measurements corresponds to the accuracy of determining the rotor position, and the rotor position is usually determined in practice by different methods like the incremental encoder, inductive sensor and the capacitive air gap sensor. The published results suggest that the methods for determining the rotor position based on the incremental encoder and inductive sensor are very sensitive to vibrations and precession of the generator shaft.

The capacitive air gap sensor method for determining the rotor position, or in other words for measuring the load angle, was developed to overcome these problems.The capacitive air gap sensor measures the distance between the stator and rotor poles. The measurement of the distance between the stator and rotor poles is contactless and based on the capacitive flat-shaped probe which is mounted by simply being glued onto stator laminations. The load angle measurements require the air gap sensor signal to be tightly bound to the rotor position. If the rotor position correlates with the induced EMF, it can be used to determine the value of the load angle together with a terminal voltage signal. It can also be said that the phase shift of the capacitive air gap sensor signal towards the terminal voltage signal represents the load angle.

The capacitive air gap sensor method has been used, so far, but mainly in the generator monitoring systems. This means that the measured values are stored and then processed afterwards. A very precise and reliable measurement of the load angle must be provided in order to ensure its application for generator protection purposes, e.g., out of step protection function. So, one of the aims of the research was to realize precise real time load angle direct measurement. The goal was to develop a method for measuring the load angle in real time which will provide a stable calculation or measurement of the load angle every 20 ms, i.e., after each period (for a 50 Hz system frequency). A new functionality that takes into consideration the rotor imperfection has been developed in the algorithm. The rotor imperfection can be explained as a geometrical imperfection which directly influences the precision of the air gap width measurement, and later the load angle value. The imperfection is specific to every rotor and it is constant in time, meaning it is possible to correct the air gap width measurement for that specific imperfection. The above mentioned facts were all taken into consideration in the algorithm for measuring the load angle in real time.

The testing environment has been developed for testing the real time load angle measurement algorithm. It includes the functions for the acquisition and processing of signals

from sensors as well as the real time load angle measurement algorithm. The testing environment acquires input signals through analog inputs, where three inputs are used for generator terminal voltages, three inputs for generator currents, three inputs for capacitive air gap sensor signals and one input for the keyphasor sensor signal.

The functional testing of the real time load angle measurement algorithm in the real environment was conducted on a hydrogenerator of the Dubrava hydropower plant (HPP). Three capacitive air gap sensors and one keyphasor sensor are a part of the hydrogenerator's monitoring system. The signals from the sensors are connected to the cabinet of the monitoring system. Analog generator terminal voltages and generator current signals are also available in the same cabinet. Therefore, the testing environment was connected to the cabinet of the monitoring system where the analog signals from the air gap sensors, the keyphasor sensor and the terminal voltages and currents of the generator were all available. The results clearly demonstrate that the proposed method gives satisfiying resutls and that rotor imperfection correction improves precision and stability of the measurement.

The load angle measurement has been implemented in the proposed loss of synchronism detection model, which is one of the research objectives. The model was developed in the described testing platform where it is possible to define all key parameters of the algorithm through the configuration file. In this way the parameters can be adjusted for specific machine and system conditions. The software ETAP was used to make transient simulation which are the input data for testing of loss of synchronism detection algorithm. For this purpose, the northern part of the Croatian power system was modelled in the software. The points of interest were hydro generators in Dubrava HPP, Čakovec HPP and Varaždin HPP. Units in Dubrava HPP and Čakovec HPP were of particular interest since they might be subjected to the loss of synchronicity. The main reason for that is because the generator rotors have very low mass and consequently a low inertia moment.

The testing of proposed hydro generator out of step detection model has been performed on the testing environment in the laboratory. The results presented in the thesis show that the proposed algorithm can be used for loss of synchronism detection. The algorithm can distinguish between stable and unstable swings. However, the knowledge of particular generator behaviour during and after disturbances is required since the algorithm depends on the user defined parameters.

The real time load angle measurement can be used for other purposes, not only for generator loss of synchronism detection. The applications or the systems that might use this measurement can be implemented in some other device in the same power plant or even on some other

location. This means that measurement publication and exchange mechanisms have to be defined and ensured. The possibility of load angle publication on the communication bus using IEEE C37.118 standard for synchrophasor measurement has been analyzed, which was one of the aims of the research. The developed functionality has been tested in the real conditions and the results are presented in the thesis. The results demonstrate that it is possible to publish real time load angle measurements and synchrophasor measurements, at the same time.

Other details and facts which fall within the scope of the conducted research are presented in the doctoral thesis. A chapter by chapter outline of the thesis follows.

The first chapter entails an introduction to the doctoral thesis and a description of the considered problem.

The transient stability of a hydro generator, mathematicaly described with swing equations, has been introduced in the second chapter. The possibility of analyzing transient stability through equal area criterion has been described, as well.

The overview of the existing methods for hydro generator loss of synchronism detection has been presented in the third chapter. This chapeter gives the definition of the load angle with an overview of the methods used for direct load angle measurement.

In the fourth chapter the transient stability simulation model is presented. The northern part of the Croatian Utility System was modeled and used in the simulation.

Chapter five presents the developed real time direct load angle measurement algorithm. The new hydro generator out of step detection alghoritm is described, as well.

The tests performed on a real generator which prove the functionality of the real time direct load angle measurement algorithm are presented in chapter six. This chapter also gives the results of the loss of synchronism detection algorithm testing which was performed in the laboratory.

The seventh chapter shows the results of the load angle publication on the communication bus using the IEEE C37.118 standard for synchrophasor measurement.

The final, chapter eight, gives a comprehensive review of the portrayed results and the claims made in the doctoral thesis, and a clear overview of the achieved scientific contributions of the thesis. The last part of the chapter suggests guidelines for further enhancement of the algorithms as well as future research directions.

The following expected scientific contributions are presented in this doctoral thesis:

- the real time load angle measurement method with the simultaneous publication on the communication network,

- the hydro generator loss of synchronism detection model based on the direct load angle measurement.

The results published in the doctoral thesis demonstrate that the direct load angle measurement can be used for hydro generator loss of synchronism detection. The possibility of load angle publication on the communication bus using IEEE C37.118 standard for synchrophasor measurement opens the perspectives of hydro generator load angle usage for power system stability protection and analyisis.

Keywords:

Power system stability, Synchronous hydro generator, Rotor angle, Load angle; Loss of synchronism, Generator out of step, Synchrophasor measurement

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. POJAM STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA 4

3. PREGLED POSTOJEĆIH METODA DETEKCIJE GUBITKA SINKRONIZMA I DEFINICIJA KUTA OPTEREĆENJA 17

3.1. Postojeće metode za detekciju gubitka sinkronizma generatora 17

3.2. Definicija i metode mjerenja kuta opterećenja 21

4. MODEL I ANALIZA STABILNOSTI SUSTAVA 29

4.1. Opis modela elektroenergetske mreže za potrebe simulacija stabilnosti sustava 29

4.1.1. Definiranje hidrogeneratora unutar modela elektroenergetske mreže 34

4.2. Rezultati analize stabilnosti elektroenergetskog sustava 36

5. MODEL DETEKCIJE GUBITKA SINKRONIZMA GENERATORA NA OSNOVI IZRAVNOG MJERENJA KUTA OPTEREĆENJA 49

5.1. Algoritam za izravno mjerenje kuta opterećenja 50

5.2. Algoritam za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja 53

6. REZULTATI ISPITIVANJA ALGORITMA ZA MJERENJE KUTA OPTEREĆENJA I ALGORITMA ZA DETEKCIJU GUBITKA SINKRONIZMA 60

6.1. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja 61

6.2. Rezultati ispitivanja algoritma za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja 65

7. PUBLICIRANJE MJERENJA KUTA OPTEREĆENJA NA PROCESNU KOMUNIKACIJSKU MREŽU 71

7.1. Komunikacijski protokoli za razmjenu podatka u realnom vremenu u EE postrojenjima 72

7.2. Distribucija kuta opterećenja primjenom IEEE C37.118 norme 73

8. ZAKLJUČAK 80

LITERATURA 82

POPIS SLIKA 86

POPIS TABLICA 90

ŽIVOTOPIS AUTORA 91

AUTHOR'S BIOGRAPHY 95

1. UVOD

Zaštita generatora je jedan od ključnih elemenata svakog elektroenergetskog sustava koja na temelju ulaznih parametara i ugrađenih algoritama štiti generator od kvarova koji mogu nastupiti unutar samog generatora, u elektroenergetskom sustavu ili u pomoćnim sustavima generatora. Zaštita generatora sadrži više različitih funkcija ili algoritama koji štite generator od različitih vrsta kvarova, odnosno poremećaja. Ti algoritmi implementiraju se u numeričkim relejima koji osim izvršavanja algoritama imaju ulogu prikupljanja i obrade ulaznih podataka te ovisno o rezultatima djeluju prema ostalim sustavima u svrhu sprečavanja kvarova na generatoru. Sustav zaštite mora imati veliku raspoloživost i pouzdanost kako bi se osigurala neprestana zaštita generatora tijekom njegovog rada.

U određenim pogonskim situacijama, npr. kod ispada važnih dalekovoda ili kratkih spojeva, u elektroenergetskom sustavu može doći do poremećaja koji će prouzrokovati gubitak sinkronizma između dijelova elektroenergetskog sustava ili između međusobno povezanih sustava. Ako dođe do gubitka sinkronizma generatora rezultirajuće struje velikih amplituda uzrokuju naprezanja u namotima generatora i mehanička naprezanja koja mogu dovesti do oštećenja generatora i turbine i daljnjih ispada u sustavu. Oštećenja generatora nastala uslijed takvih kvarova u pravilu uzrokuju velike financijske troškove te je zbog toga potrebno što prije djelovati na isključenje generatora.

U većini suvremenih numeričkih releja funkcija zaštite od gubitka sinkronizma realizira se mjerenjem promjene impedancije u vremenu na izvodima generatora. Promatra se prolazak vektora impedancije kroz poligonalnu impedantnu karakteristiku. Kada dođe do prepoznavanja uvjeta gubitka sinkronizma, odnosno kada vektor impedancije prođe kroz poligonalnu karakteristiku aktivira se brojač i dolazi do aktiviranja poticaja zaštite od gubitka sinkronizma. Nakon podešenog broja prolazaka vektora impedancije kroz poligonalnu karakteristiku aktivira se nalog za isklop prekidača. Nedostatak spomenute metode detekcije ispada iz koraka generatora je to što je za podešavanja parametara funkcije, tj. granica poligonalne karakteristike potrebno napraviti detaljne simulacije prijelazne stabilnosti mreže za različita uklopna stanja. Iz tog razloga rađena su istraživanja primjene nekih drugih metoda detekcije ispada iz sinkronizma, kao što su primjena kriterija jednakih površina ili sinkrofazorskih mjerenja.

Pojam gubitka sinkronizma neposredno je povezan s pojmom prijelazne stabilnosti generatora koja se bavi problematikom utjecaja poremećaja na kutnu stabilnost rotora sinkronih strojeva. Kod prijelazne stabilnosti, kao i kod stacionarne stabilnosti postoji direktna ovisnost prenesene snage o kutu opterećenja generatora. Kut opterećenja generatora je kut između

napona polnog kotača generatora i napona na izvodima generatora. U normalnim pogonskim situacijama ovaj kut ovisi o opterećenju i konstantan je. Prilikom njihanja snage kut opterećenja oscilira i pri gubitku sinkronizma može varirati između 0 i 180 stupnjeva. Kut opterećenja generatora vrlo je važan pokazatelj stabilnosti rada generatora i on predstavlja kvalitetnu informaciju koja se može koristiti u zaštiti generatora. Zbog složenog postupka mjerenja ta se fizikalna veličina u algoritmima zaštite generatora estimira.

U radu će biti predstavljena primjena izravnog mjerenja kuta opterećenja generatora u realnom vremenu u zaštiti od gubitka sinkronizma generatora. Analizirana je i mogućnost publiciranja kuta opterećenja na komunikacijsku mrežu u realnom vremenu kako bi ta veličina bila dostupna svim tehničkim sustavima za nadzor i vođenje pogona generatora.

U drugom poglavlju opisana je problematika stabilnosti hidrogeneratora s naglaskom na prijelaznu stabilnost koja je matematički opisana jednadžbom njihanja. Također je prezentiran i kriterij jednakih površina koji prijelaznu stabilnost opisuje grafičkim putem.

Pregled postojećih metoda koje se koriste za detekciju gubitka sinkronizma generatora dan je u trećem poglavlju. U ovom poglavlju prezentirana je definicija kuta opterećenja i pregled postojećih metoda njegovog određivanja kod sinkronih generatora.

Četvrto poglavlje prikazuje model sjeverozapadnog dijela elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske koji je korišten za simulacije prijelazne stabilnosti hidrogeneratora. Osim toga, definiran je i model hidrogeneratora koji se koristi u analizi. Nadalje, u ovom poglavlju dani su rezultati analize prijelazne stabilnosti promatranog sustava. U tu svrhu napravljene su simulacije tropolnog kratkog spoja na pragovima tri hidroelektrane HE Dubrava, HE Čakovec i HE Varaždin.

U petom poglavlju prezentiran je algoritam koji je razvijen za izravno mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu. Na temelju tog algoritma predložen je novi način detekcije gubitka sinkronizma generatora. Za potrebe ispitivanja navedenih algoritama i ispitivanja funkcionalnosti predloženog modela realizirana je razvojna okolina koja se sastoji od sklopovske opreme i programa.

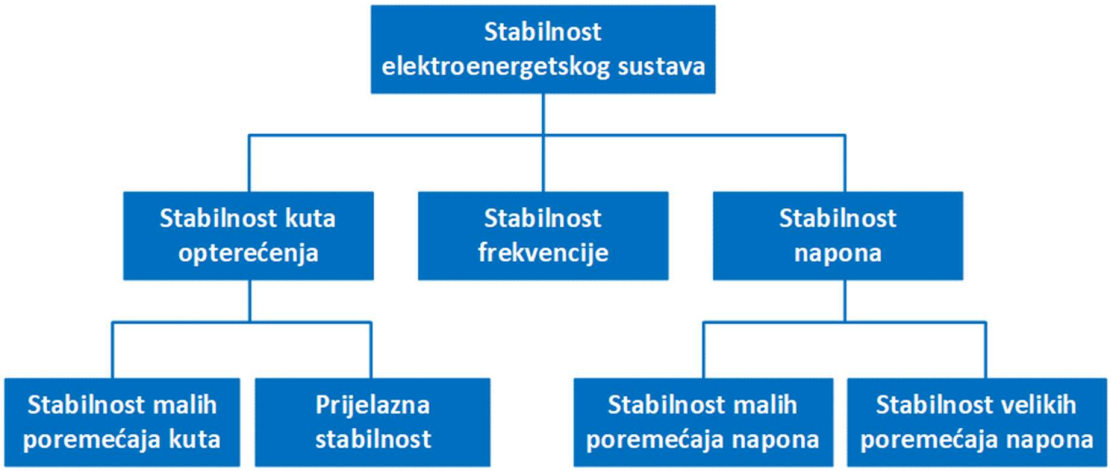
Ispitivanje funkcionalnosti algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja, prikazano u šestom poglavlju, provedeno je u stvarnom okruženju na hidrogeneratoru u hidroelektrani Dubrava. Za potrebe ispitivanja iskorišten je postojeći monitoring sustav agregata koji je nadograđen za potrebe izravnog mjerenja kuta opterećenja. Algoritam za detekciju gubitka sinkronizma nije bilo moguće ispitati u pogonskim uvjetima pa je ono obavljeno u laboratorijskom okruženju, te su rezultati prezentirani u ovom poglavlju.

U sedmom poglavlju obrađeno je publiciranje kuta opterećenja na procesnu komunikacijsku mrežu. Dan je pregled komunikacijskih protokola koji se koriste za razmjenu podataka u realnom vremenu u elektroenergetskim postrojenjima. Za potrebe primjene kuta opterećenja generatora u drugim sustavima, kao što su aplikacije za analizu i očuvanje stabilnosti sustava, odabrana je IEEE C37.118 norma za sinkrofazorska mjerenja te su prikazani rezultati publiciranja kuta opterećenja na komunikacijsku sabirnicu primjenom te iste norme

U zaključku rada prezentiran je konačan osvrt na rezultate istraživanja i jasan pregled znanstvenih doprinosa ovog rada. Na kraju poglavlja navedene su smjernice za daljnja istraživanja.

2. POJAM STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Stabilnost elektroenergetskog sustava presudna je za njegov pouzdan i siguran pogon. Poremećaji u sustavu, kao npr. kratki spojevi koji mogu dovesti do oscilacija, mogu uzorkovati oštećenja na sinkronim generatorima, ali mogu dovesti i do ispada dijelova EES-a. Stabilnost EES-a je u literaturi definirana kao sposobnost sustava da zadrži ravnotežno stanje nakon što je došlo do poremećaja u sustavu. Fizikalne veličine koje su važne za rad generatora, ali i ostalih dijelova sustava su kutovi opterećenja generatora i naponskih čvorova u mreži te frekvencija i napon čvorova u mreži. Posljedično, stabilnost u EES-u može se podijeliti na stabilnost kuta rotora ili opterećenja generatora te naponsku i frekvencijsku stabilnost što je prikazano na slici 2.1. [1]. S obzirom da je EES nelinearan sustav njegova stabilnost ovisi o početnim uvjetima i o veličini poremećaja pa se i stabilnost kuta rotora može podijeliti na stabilnost malih signala i prijelaznu stabilnost.



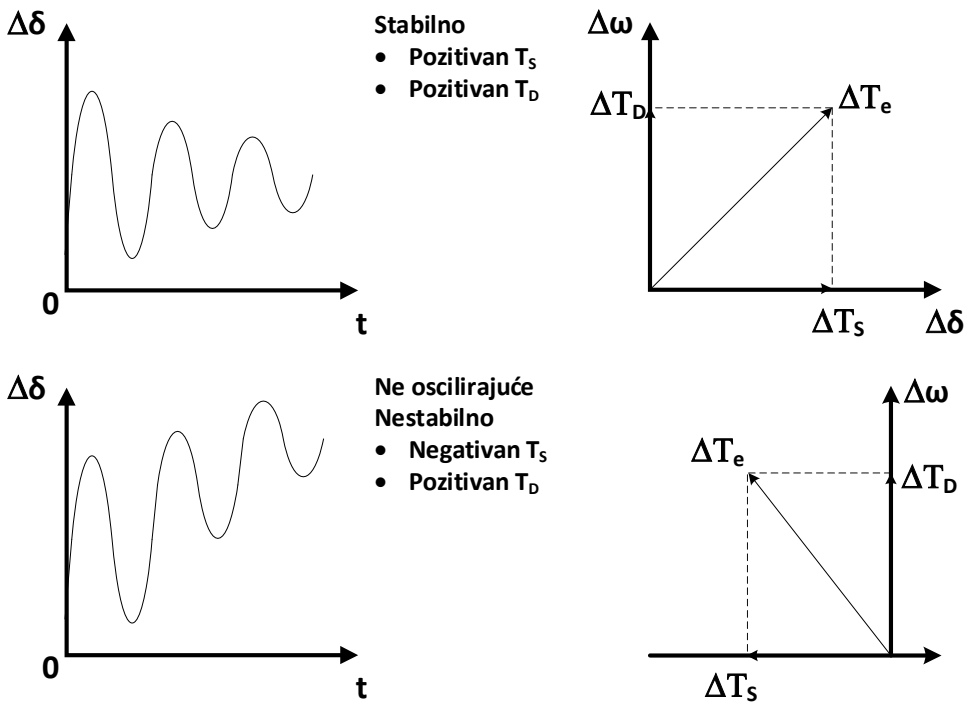
Slika 2.1. Klasifikacija stabilnosti EES-a (temeljeno na izvještaju CIGRE broj 325) [1]

Stabilnost malih poremećaja kuta je sposobnost EES-a da ostane u sinkronizmu pri malim poremećajima. Do ovakvih poremećaja dolazi stalno zbog varijacija u proizvodnji i potrošnji. Poremećaji se smatraju dovoljno mali za linearizaciju jednadžbi sustava kako bi ih se moglo analizirati. Nestabilnost koja se javlja prilikom ovakvih poremećaja može biti povećanje kuta rotora zbog nedostatka sinkronog momenta ili rastuće oscilacije kuta rotora zbog nedostatka prigušnog momenta:

$$\Delta T_e = T_s \Delta\delta + T_D \Delta\omega \tag{2.1}$$

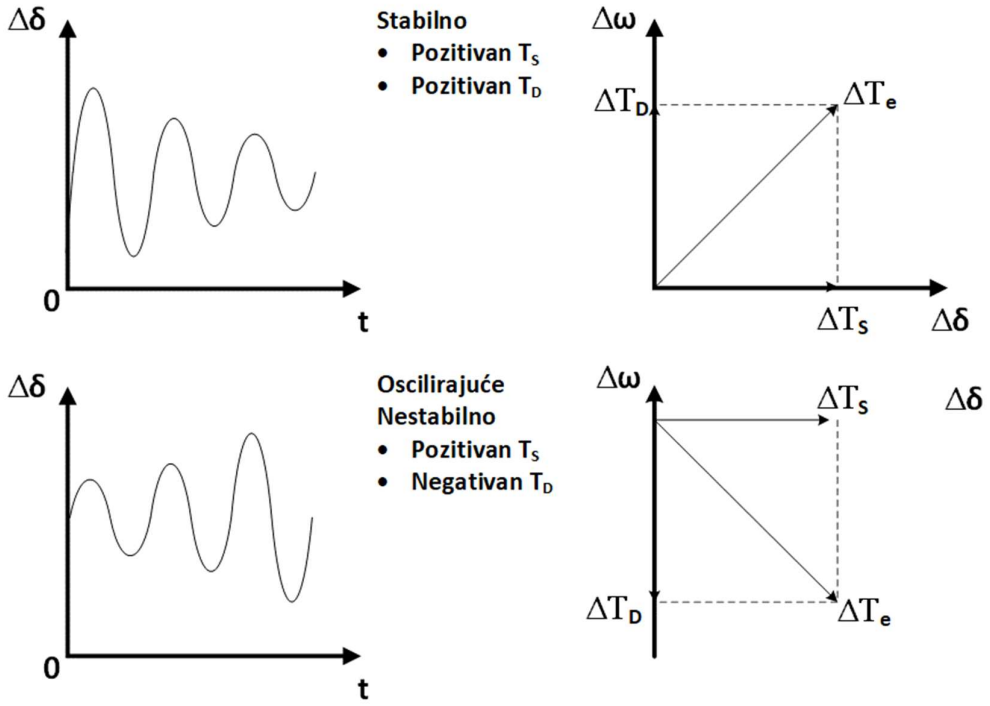
$T_S \Delta\delta$ je komponenta promjene okretnog momenta koja je u fazi s promjenom kuta opterećenja $\Delta\delta$ i naziva se sinkrona komponenta okretnog momenta, gdje je T_s sinkroni koeficijent. $T_D \Delta\omega$ je komponenta okretnog momenta koja je u fazi s promjenom brzine $\Delta\omega$ i naziva se prigušna komponenta momenta, a T_D je koeficijent prigušenja.

Stabilnost sustava ovisi o prisutnosti obje komponente okretnog momenta kod svakog od sinkronih strojeva. Nedostatak sinkrone komponente okretnog momenta dovodi do nestabilnosti kroz aperiodsko povećanje kuta opterećenja. Nedostatak prigušne komponente momenta dovodi do oscilirajuće nestabilnosti. Priroda odgovora sustava na male poremećaje ovisi o nizu faktora uključujući početne radne uvjete, snagu prijenosnog sustava i tip uzbude generatora koja se koristi. Za generator koji je vezan radijalno na veliki EES, a koji nema automatsku regulaciju napona (tj. napon uzbude je konstantan), nestabilnost se javlja zbog nedostatka sinkronog momenta. Na slici 2.2. je prikazana takva vrsta poremećaja sa stabilnim i nestabilnim kutom opterećenja [2].



Slika 2.2. Stabilna i nestabilna promjena kuta opterećenja prilikom poremećaja pri konstantnom naponu uzbude [2]

Ako su automatski regulatori napona u funkciji do nestabilnosti može doći zbog nedostatka prigušnog momenta. U tom slučaju dolazi do oscilacija kojima se povećava amplituda. Takav slučaj prikazan je na slici 2.3. [2].



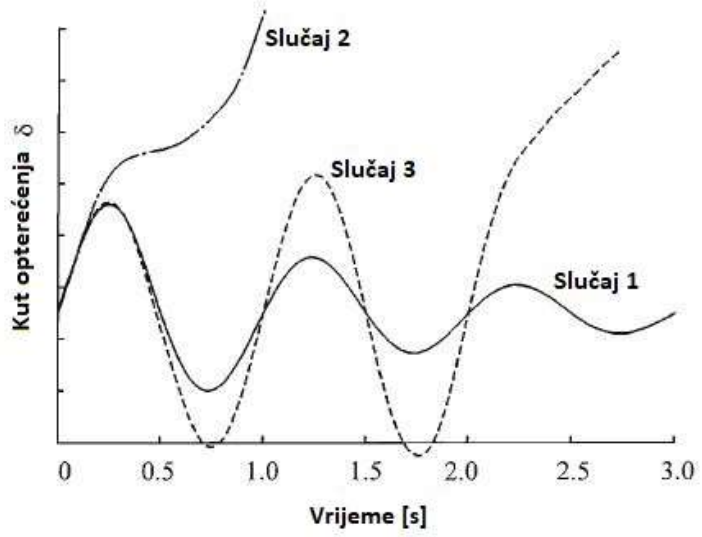
Slika 2.3. Stabilna i nestabilna promjena kuta opterećenja prilikom poremećaja s regulacijom napona uzbude [2]

U današnjim elektroenergetskim sustavima uzrok problema vezanih uz stabilnost malih poremećaja najčešće leži u nedovoljnom prigušenju oscilacija koje mogu biti:

- lokalnog tipa (generator u odnosu na EES), a povezan je s njihanjem generatora u jednom objektu i odnosu na ostatak sustava,
- međupodručnog tipa, a povezan je s njihanjem više generatora u jednom dijelu sustava s generatorima u drugom dijelu sustava,
- upravljačkog tipa, povezan je sa sustavima upravljanja generatora i ostalih sustava upravljanja, a najčešći uzorci nestabilnosti su loše ugođeni sustavi uzbude ili turbinski regulatori,
- torzionalnog tipa, a povezan je s rotirajućim komponentama sustava turbina – generator.

Prijelazna stabilnost je sposobnost EES-a da zadrži sinkronizam kod pojave jakog prijelaznog poremećaja. Rezultirajući odgovor sustava uključuje velika njihanja kuta opterećenja, što je povezano s nelinearnom ovisnošću snage i kuta. Stabilnost ovisi o početnim uvjetima u sustavu i o veličini poremećaja. Ako rezultirajuća razlika kutova između generatora u sustavu ostane u okviru određenih granica, sustav će zadržati sinkronizam. Gubitak sinkronizma zbog problema prijelazne nestabilnosti, ako do njega dođe, vidjet će se unutar nekoliko sekundi nakon inicijalnog poremećaja. Najčešće dolazi do promjena u sustavu tako da se stabilno stanje nakon poremećaja razlikuje od onog prije poremećaja.

Elektroenergetski sustav je projektiran i vođen tako da ostane stabilan prilikom različitih poremećaja. Prilikom analiza najčešće se uzimaju u obzir kratki spojevi različitih tipova (jednopolni sa zemljom, dvopolni sa zemljom ili tropolni). Pretpostavka je da do njih može doći na dalekovodima, ali ponekad i na sabirnicama ili na samim transformatorima.



Slika 2.4. Odziv kuta opterećenja prilikom poremećaja u sustavu [2]

Na slici 2.4. je prikazano ponašanje sinkronog generatora za različite događaje [2]. Prikazani su odzivi kuta opterećenja za jedan stabilni i dva nestabilna slučaja. U stabilnom slučaju (slučaj 1) kut opterećenja raste do maksimuma, a onda opada i prigušuje se u oscilacijama sa smanjenjem amplitude. U slučaju 2 kut opterećenja raste kontinuirano dok ne dođe do gubitka sinkronizma. Ova vrsta nestabilnosti naziva se nestabilnost prvog njihaja i rezultat je nedovoljnog sinkronog momenta. U trećem slučaju sustav je stabilan kod prvog njihaja, ali postaje nestabilan zbog rastućih oscilacija. Do ovakve nestabilnosti dolazi kada je

stabilno stanje nakon poremećaja nestabilno na male poremećaje i nije nužno rezultat prijelaznog poremećaja. U velikim elektroenergetskim (EE) sustavima prijelazna nestabilnost se ne mora uvijek pojaviti kao nestabilnost prvog njihaja. Može biti rezultat superpozicije različitih tipova oscilacija koje uzrokuju velike promjene kuta opterećenja nakon prvog njihaja. U studijama prijelazne stabilnosti vrijeme u kojem se prati poremećaj je 3 do 5 sekundi nakon samog poremećaja, iako se može produžiti i na 10 sekundi za velike EES-ove s dominantnim oscilacijama među područjima.

Promotrimo sustav turbina - generator kod kojeg je ukupna inercija rotirajućih masa jednostavan zbroj pojedinačnih inercija. Svaki dodatni moment koji djeluje na rotor rezultirat će ubrzanjem ili usporenjem sustava rotirajući masa prema drugom Newtonovom zakonu:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} + D_d\omega_m = T_t - T_e \tag{2.2}$$

gdje je J ukupni moment inercije rotora turbina - generator izražen u kgm^2, ω_m je brzina rotora izražena u mehaničkim rad/s, T_t je moment kojeg proizvodi turbina izražen u Nm, T_e je elektromagnetski moment koji se protivi mehaničkom momentu izražen u Nm, a D_d je koeficijent momenta prigušenja izražen u Nms.

U stabilnom stanju kutna brzina rotora je jednaka sinkronoj brzini ω_{sm}, dok je okretni moment turbine T_t jednak sumi elektromagnetskog okretnog momenta T_e i momenta prigušenja $D_{d\omega sm}$ pa vrijedi:

$$T_t = T_e + D_d\omega_{sm} \tag{2.3}$$

ili drugačije zapisano:

$$T_m = T_t - D_d\omega_{sm} = T_e \tag{2.4}$$

gdje je T_m neto mehanički moment vratila, što je okretni moment turbine umanjen za gubitke vrtnje pri $\omega_m=\omega_{sm}$.

Ako se zbog nekog poremećaja dogodi da je $T_m>T_e$ rotor će ubrzavati, a ako je $T_m<T_e$ rotor će usporavati. Ranije smo definirali da je kut rotora δ, kut koji definira poziciju rotora u odnosu na rotirajuću naponsku referencu pa se brzina rotora može izraziti kao:

$$\omega_m = \omega_{sm} + \Delta\omega_m = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \tag{2.5}$$

gdje je δ_m kut rotora izražen u mehaničkim radijanima, a $\Delta\omega_m$ promjena brzine izražena u mehaničkim radijanima u sekundi. Uvrstimo li izraz (2.5) u izraz (2.2) dobit ćemo:

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} + D_d(\omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt}) = T_t - T_e \tag{2.6}$$

ili drugačije zapisano:

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} + D_d\frac{d\delta_m}{dt} = T_m - T_e \tag{2.7}$$

Pomnožimo li zadnji izraz sa sinkronom brzinom ω_{sm} dobit ćemo:

$$J\omega_{sm}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} + \omega_{sm}D_d\frac{d\delta_m}{dt} = \omega_{sm}T_m - \omega_{sm}T_e \tag{2.8}$$

Budući da je snaga umnožak kutne brzine i momenta, desna strana izraza se može izraziti preko snage što nam daje:

$$J\omega_{sm}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} + \omega_{sm}D_d\frac{d\delta_m}{dt} = \frac{\omega_{sm}}{\omega_m}P_m - \frac{\omega_{sm}}{\omega_m}P_e \tag{2.9}$$

gdje je P_m neto mehanička snaga na vratilu generatora, a P_e električna snaga, sve izraženo u Wattima. Za vrijeme poremećaja je brzina generatora približno jednaka sinkronoj brzini pa (2.9) možemo izraziti kao:

$$J\omega_{sm}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} + \omega_{sm}D_d\frac{d\delta_m}{dt} = P_m - P_e \tag{2.10}$$

Koeficijent $J\omega_{sm}$ je kutni moment rotora pri sinkronoj brzini i ako ga zapišemo kao M_m izraz (2.10) možemo zapisati kao:

$$M_m\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e - D_m\frac{d\delta_m}{dt} \tag{2.11}$$

gdje je $D_m=\omega_{sm}D_d$ koeficijent prigušenja.

Izraz (2.11) je jednadžba njihanja i osnovni je izraz koja opisuje dinamiku rotora. Uobičajena je praksa da se kutni moment rotora M_m izrazi preko normalizirane konstante inercije. Ova konstanta definirana je simbolom H, a definirana je kao spremljena kinetička energija u mega džulima pri sinkronoj brzini podijeljeno s nazivnom snagom generatora u mega voltamperima tako da vrijedi:

$$H = \frac{0{,}5J\omega_{sm}^2}{S_n} \tag{2.12}$$

$$M_m = \frac{2HS_n}{\omega_{sm}} \tag{2.13}$$

H se izražava u sekundama i označava kinetičku energiju rotora pri sinkronoj brzini izraženo u broju sekundi potrebnih da generator osigura ekvivalentnu količinu električne energije pri nazivnoj snazi na izvodima generatora.

Ako se umjesto mehaničkih veličina izrazi kut opterećenja i kutna brzina u električnim radijanima i električnim radijanima u sekundi tako da zamijenimo $\delta=2\delta_m/p$ i $\omega_s=2\omega_{sm}/p$, gdje je p broj pari polova i uvedemo konstantu inercije H u izraz (2.11) dobit ćemo:

$$\frac{2HS_n}{\omega_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} + D\frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e \tag{2.14}$$

gdje je $D=2D_m/p$ koeficijent prigušenja. Izraz možemo racionalizirati ako uvedemo koeficijent inercije M, i snagu prigušenja P_D tako da vrijedi:

$$M = \frac{2HS_n}{\omega_s} \tag{2.15}$$

i

$$P_D = D\frac{d\delta}{dt} \tag{2.16}$$

pa izraz njihanja možemo zapisati kao:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D \tag{2.17}$$

Ako se uzme da je derivacija kuta rotora $d\delta/dt = \Delta\omega = \omega\text{-}\omega_s$, promjena brzine rotora u električnim radijanima u sekundi možemo zamijeniti diferencijalnu jednadžbu drugog reda (2.17) s dvije jednadžbe prvog reda:

$$M\frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P_e - P_D \tag{2.18}$$

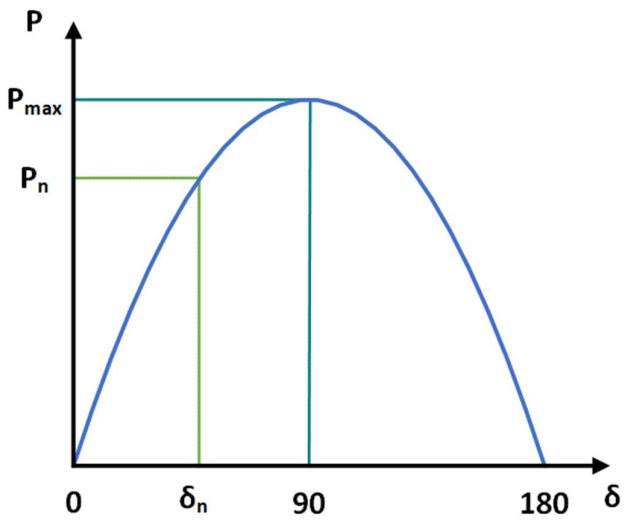
$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \tag{2.19}$$

U ovom radu analizirano je ponašanje kuta opterećenja kod prijelazne nestabilnosti. Budući je subtranzijentni period vrlo kratak u usporedbi s periodom njihanja rotora, zanemarit ćemo subtranzijentni period kod razmatranja elektromehaničke dinamike. Ovo nam omogućuje da primijenimo klasični model generatora kod razmatranja problema prijelazne stabilnosti [1].

Svi generatori u povezanom EES-u rade s istom frekvencijom i mehanička brzina njihovih rotora je sinkronizirana s tom frekvencijom. U tehničkoj terminologiji kaže se da su generatori „u koraku“. Električna veza među sinkronim generatorima je elastična i dozvoljava oscilacije kutova među njima. Nakon određenih poremećaja, kao što su kratki spojevi koji uzrokuju ispade dalekovoda, rotori nekih generatora će početi oscilirati. Sposobnost nekog generatora unutar EES-a da za vrijeme oscilacija ostane u sinkronizmu sa sustavom, povezana je s pojmom kutne stabilnosti rotora [3]. Prije pojave kratkog spoja u sustavu postoji ravnoteža između mehaničke snage na turbini i električne snage koju generator isporučuje u EES. Nakon što relejna zaštita isklopi kvar, u EES-u dođe do brze promjene opterećenja. Promjena mehaničke snage na vratilu generatora je puno sporija što uzrokuje razliku između momenta uzrokovanog mehaničkom snagom na vratilu i elektromagnetskog momenta uzrokovanog električnim opterećenjem u mreži. Posljedično, dolazi do promjene kuta rotora generatora, odnosno kuta opterećenja generatora. Pojednostavljeni izraz koji prikazuje ovisnost električne snage koju generator isporučuje u sustav o kutu opterećenja generatora glasi:

$$P = \frac{E_g \cdot U_S}{X}\sin\delta \tag{2.20}$$

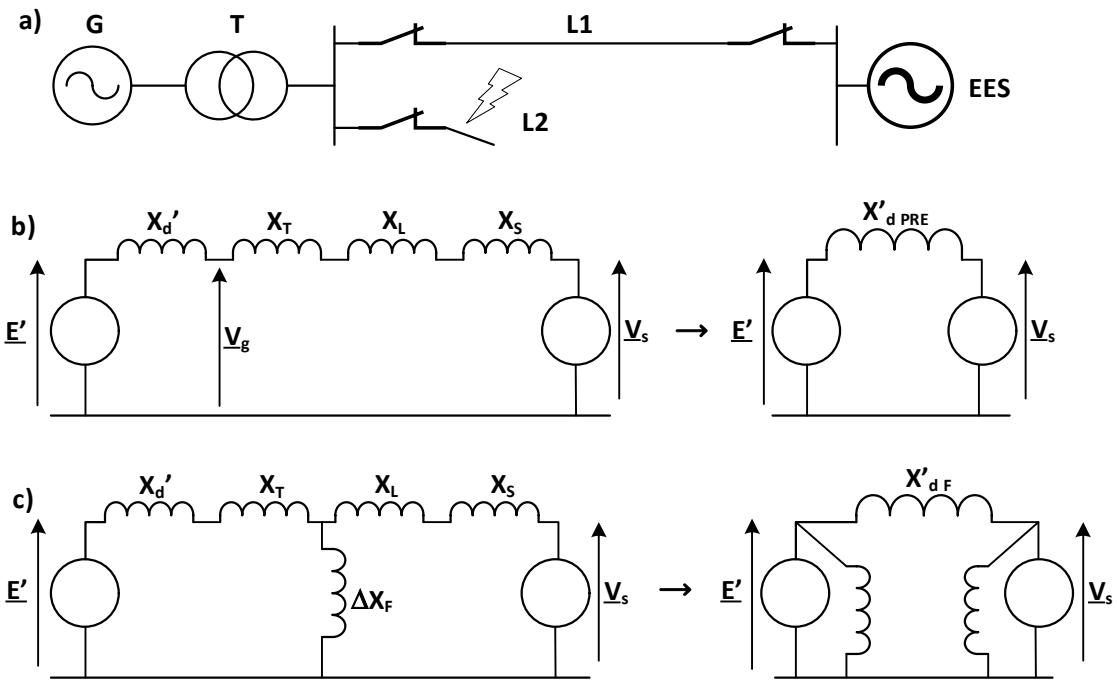
gdje je E_g inducirani napon generatora, U_s napon na izvodima generatora, X reaktancija generatora i δ kut između spomenutih napona, odnosno kut opterećenja. Grafička reprezentacija ove nelinearne jednadžbe prikazana je na slici 2.5. Radi se o idealiziranoj jednadžbi i reprezentaciji koja se može iskoristiti da se opiše ponašanje generatora.



Slika 2.5. Krivulja opterećenja

Iz slike 2.5. vidi se da snaga isporučena u mrežu raste s povećanjem kuta, ali samo do određene točke. Pri kutu od 90 stupnjeva isporučena snaga je maksimalna i ona će opadati s daljnjim povećanjem kuta. Može se reći da se radi o maksimalnoj isporučenoj snazi u uvjetima stacionarne stabilnosti.

Na slici 2.6. prikazana je jednostavna mreža koja se sastoji od generatora koji je priključen na krutu mrežu preko voda *L1*. Vod *L2* je energiziran, ali nije priključen na mrežu. Ako do kvara dođe na vodu *L2* i ako se taj kvar otkloni isklopom prekidača na generatorskoj strani, impedancije prije i nakon kvara ostaju iste. Za vrijeme većih kvarova, kao što su kratki spojevi, ekvivalentna reaktancija x_d' će se mijenjati pa će se i električna snaga na izvodima generatora mijenjati. To će dovesti do neravnoteže u sustavu i transfera energije između generatora što će proizvesti oscilacije rotora. Obično postoje tri stanja s tri različite vrijednosti prijelazne reaktancije generatora x_d' i to: stanje prije samog kvara s reaktancijom $x_d' = x_d'_{PRE}$, kvarno stanje s reaktancijom $x_d' = xd'_F$ i stanje nakon kvara kad je $x_d' = x_d'_{POST}$. Pretpostavimo li da je kvar otklonjen bez promjene u impedanciji mreže imamo $x_d'_{POST} = x_d'_{PRE}$.



Slika 2.6. Primjer kvara s jednakom impedancijom prije i nakon kvara: a) shematski prikaz mreže, b) ekvivalentni krug prije i nakon kvara, c) ekvivalentni krug za vrijeme kvara [1]

Ekvivalentni krug za promatrani sustav prikazan je na slici 2.6. b). Generator je opisan klasičnim modelom s konstantnom prijelaznom *EMS E'* iza prijelazne reaktancije X_d'. Elektroenergetski sustav prikazan je konstantnim naponom V_s iza ekvivalentne reaktancije X_s. Reaktancije transformatora i voda *L1* su X_T i X_L. Reaktancija prije kvara $x_{d'PRE}$ cijelog prijenosnog puta iznosi:

$$x'_{dPRE} = X'_d + X_T + X_L + X_S \tag{2.21}$$

Upotreba simetričnih komponenti omogućava nam da se bilo koji tip kvara prikaže u direktnom sustavu s reaktancijom kvara ΔX_F, koja je spojena između točke kvara i neutralnog vodiča, kao što je to prikazano na slici 2.6. c). Vrijednost reaktancije kvara ovisi o tipu kvara i za tropolni kratki spoj koji će se razmatrati u našem slučaju iznosi nula. Korištenjem transformacija zvijezda - trokut, mreža se može transformirati kako je to prikazano na slici 2.6. c), tako da su naponi *E*' i V_s direktno spojeni na ekvivalentnu reaktanciju kvara. Vrijedi:

$$x'_{dF} = X'_d + X_T + X_L + X_S + \frac{(X'_d + X_T)(X_L + X_S)}{\Delta x_F} \tag{2.22}$$

Vidljivo je da vrijednost reaktancije jako ovisi o vrijednosti reaktancije kvara ΔX_F. Nakon otklanjanja kvara ekvivalentni krug je jednak onom prije kvara pa je $x_d'_{POST} = x_d'_{PRE}$.

Za detaljniju analizu utjecaja tropolnog kratkog spoja na stabilnost sustava koristit će se poznati kriterij jednakih površina. Radi jednostavnosti, zanemarit će se prigušenje P_D, a pretpostavit će se da je mehanička snaga na vratilu P_M konstantna. Kod tropolnog kvara Δx_F je jednak nuli, pa je prema izrazu (2.22) $x_{dF}' = \infty$. Iz toga se može zaključiti da je prijenos snage iz generatora u sustav potpuno blokiran zbog kvara. Za vrijeme kvara električna snaga padne s vrijednosti prije kvara na nulu, što je prikazano linijom 1-2 na slici 2.7. i ostaje na toj vrijednosti dok ne dođe do isključenja kvara. Za to vrijeme rotor će ubrzati, a njegova akceleracija ε može se dobiti iz izraza njihanja (2.18) i (2.19) tako da se obje strane podijele s M, i uvede da je P_E i P_D jednako nula. Izraz glasi:

$$\epsilon = \frac{d^2\delta'}{dt^2} = \frac{P_m}{M} = konst. \tag{2.23}$$

Integrira li se dva puta prethodni izraz uz uvjet da je $\delta\ (t=0) = \delta_0'$, a $\Delta\omega\ (t=0) = 0$ dobit će se izraz za krivulju kuta opterećenja:

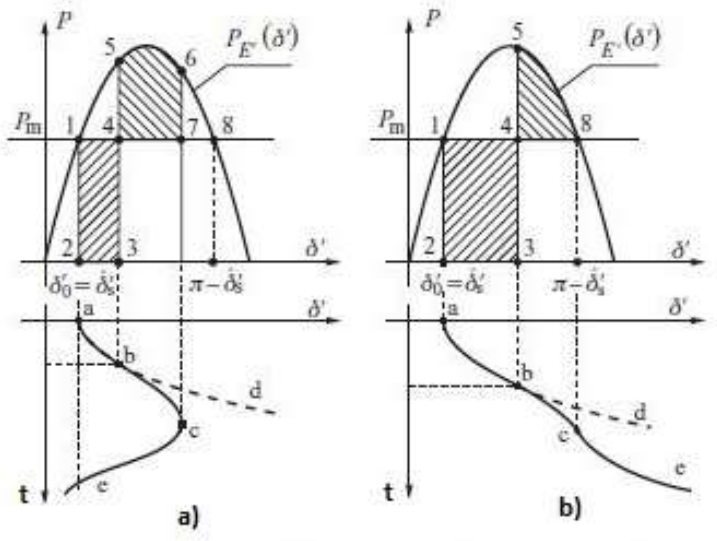
$$\delta' = \delta_0' + \frac{\varepsilon t^2}{2} \tag{2.24}$$

ili ako se napiše drugačije:

$$\Delta\delta' = \delta' - \delta_0 = \frac{\varepsilon t^2}{2} \tag{2.25}$$

Posljednji izraz odgovara paraboli a-b-d koja je prikazana na slici 2.7. a). Prije nego dođe do otklanjanja kvara rotor se giba od točke 2 prema točki 3 na krivulji snage i akumulira kinetičku energiju koja je proporcionalna površini 1-2-3-4. Nakon otklanjanja kvara rotor se nastavlja gibati prema karakteristici $P_E(\delta')$ u skladu s reaktancijom iz izraza (2.21) pa će se radna točka pomaknuti iz točke 3 u točku 5. Rotor će započeti s usporavanjem s amplitudom koja je proporcionalna dužini 4 - 5. No, zbog momenta inercije kut opterećenja će se nastaviti povećavati dok se rad obavljen za vrijeme usporenja proporcionalan površini 4-5-6-7, ne izjednači s kinetičkom energijom pohranjenom za vrijeme ubrzanja, površina 1-2-3-4. Rotor će ponovo postići sinkronu brzinu u točki 6 kada se izjednače spomenute površine. S obzirom da

je prigušenje zanemareno ciklusi se ponavljaju i rotor sinkrono oscilira oko točke 1. U ovom slučaju generator neće izgubiti sinkronizam i sustav ostaje stabilan.



Slika 2.7. Kriterij jednakih površina: a) kratko vrijeme otklanjanja kvara, b) dugo vrijeme otklanjanja kvara [1]

U slučaju prikazanom na slici 2.7. b) situacija je slična, ali je vrijeme trajanja kvara značajno duže. U tom slučaju je kinetička energija akumulirana za vrijeme ubrzanja, a koja je proporcionalna površini 1-2-3-4, značajno veća nego u slučaju 2.7. a). Kao rezultat toga, rad za vrijeme usporavanja, koji je proporcionalan površini 4-5-8, ne može "potrošiti" kinetičku energiju akumuliranu za vrijeme ubrzavanja. Nakon točke 8, električna snaga $P_E(\delta')$ je manja od mehaničke snage P_m i rotor dobiva ubrzanje što dodatno povećava njegov kut pa dolazi do gubitka sinkronizma. Iz ovog razmatranja moguće je izvući dva važna zaključka:

1) Generator gubi stabilnost ako prilikom njihanja radna točka na karakteristici prođe točku 8, što odgovara kutu opterećenja (π-δ_s'), gdje je δ_s' vrijednost kuta opterećenja na prijelaznoj karakteristici u točki stabilne ravnoteže. Područje 4-5-8 na slici 2.7. b) je raspoloživa površina usporavanja s kojom se zaustavlja njihanje rotora generatora. Da bi se zadržala prijelazna stabilnost naznačena površina mora biti veća od površine ubrzavanja određene kvarom. Iz ovog razmatranja može se definirati faktor koji određuje *marginu prijelazne stabilnosti*:

$$K_{pov} = \frac{površina\ 6-7-8}{površina\ 4-5-8} \tag{2.26}$$

2) Vrijeme otklanjanja kvara je najvažniji čimbenik koji određuje stabilnost generatora. Ovo je vidljivo iz izraza (2.25) prema kojem je površina ubrzavanja 1-2-3-4 proporcionalna kvadratu vremena otklanjanja kvara. Najduže vrijeme otklanjanja kvara pri kojem generator ostaje u sinkronizmu naziva se *kritično vrijeme otklanjanja kvara*, kao što je već spomenuto na početku poglavlja. Relativna razlika između kritičnog vremena otklanjanja kvara i stvarnog vremena otklanjanja kvara predstavlja drugu mjeru za granicu prijelazne stabilnosti:

$$K_t = \frac{t_{kr} - t_{st}}{t_{kr}} \tag{2.27}$$

gdje su t_{kr} kritično vrijeme otklanjanja kvara, a t_{st} stvarno vrijeme otklanjanja kvara.

Iz prethodnih razmatranja može se zaključiti da na prijelaznu stabilnost utječe više različitih faktora kao što su:

a) opterećenje generatora,
b) što generator daje u mrežu za vrijeme kvara, ovisno o tipu i mjestu kvara,
c) vrijeme otklanjanja kvara,
d) reaktancija sustava nakon kvara,
e) reaktancija generatora (niža reaktancija povećava maskimalnu snagu i smanjuje početni kut opterećenja),
f) inercija samog generatora (veća inercija znači manju brzinu promjene kuta opterećenja što reducira kinetičku energiju koja se akumulira za vrijeme kvara, odnosno površina 1-2-3-4 se smanjuje),
g) amplituda internog napona generatora (E') koja je ovisna o uzbudi generatora,
h) amplitudi napona sustava V_s.

U ovom poglavlju predstavljen je osnovni koncept stabilnosti kroz analizu jednostavne konfiguracije mreže koja je predstavljena jednostavnim modelom, što je omogućilo analizu stabilnosti grafičkim pristupom. Na slikama su prikazane krivulje promjene kuta opterećenja u vremenskoj domeni. Praktični elektroenergetski sustavi imaju kompleksne strukture mreže te precizna analiza prijelazne stabilnosti zahtijeva detaljno modeliranje generatora i ostale opreme.

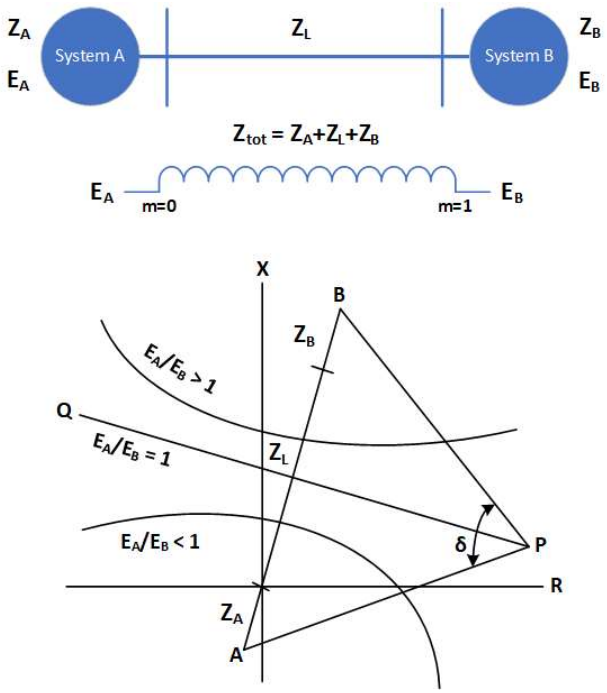
3. PREGLED POSTOJEĆIH METODA DETEKCIJE GUBITKA SINKRONIZMA I DEFINICIJA KUTA OPTEREĆENJA

U ovom poglavlju dan je pregled postojećih metoda koje se koriste za detekciju gubitka sinkronizma generatora. Također, dana je definicija kuta opterećenja i pregled postojećih metoda njegovog određivanja kod sinkronih generatora.

3.1. Postojeće metode za detekciju gubitka sinkronizma generatora

Generator je jedan od najvažnijih dijelova svake elektrane pa tako i cijelog elektroenergetskog sustava. Shodno tome generatorska zaštita je jedan od najvažnijih elemenata sekundarnog sustava. Ona na temelju ulaznih veličina, napona, struja i signala iz postrojenja, štiti generator od unutarnjih kvarova, kvarova u pomoćnim sustavima i kvarova u mreži. Današnji numerički multifunkcionalni releji za zaštitu generatora sadržavaju velik broj različitih funkcija među kojima važnu ulogu ima i zaštita od ispada iz koraka čiji je zadatak detekcija gubitka sinkronizma s mrežom. Kada dođe do gubitka sinkronizma, prilikom kratkih spojeva u mreži ili ispada vodova, asinkroni dio mreže treba što prije izolirati da ne dođe do oštećenja generatora i do daljnjih ispada u mreži. Do toga može doći jer struje velikih amplituda uzrokuju naprezanja u generatorskim namotima, kao i ostala mehanička naprezanja koja mogu izazvati oštećenja generatora i turbine [3]. Zaštita od ispada iz koraka direktno je vezana za stacionarnu i prijelaznu stabilnost elektroenergetskog sustava. Problem stabilnosti može se javiti u mreži sa najmanje dva sinkrona stroja u paralelnom radu. Električna veza između sinkronih strojeva je elastična te je zbog toga snaga koja se može prenositi ograničena. Ona je definirana izrazom (2.20), odnosno krivuljom snage prikazanoj na slici 2.5. Poremećaj sinkronizma u uskoj je vezi s poremećajem stabilnosti. Sinkronizam se definira s jednakim relativnim položajem svih rotora sinkronih strojeva u električnom smislu u mreži. Sam gubitak sinkronizma dovodi do velikih poremećaja u mreži. Naponi u pojedinim dijelovima mreže se smanjuju, dok struje dostižu vrijednosti struja kratkog spoja. Takvi kvarovi i oštećenja mogu rezultirati znatnim financijskim izdacima kao što su skupi popravci i troškovi zbog neisporučene električne energije. Zato je važno što prije detektirati kvar i isključiti generator s mreže [4]. Standardna zaštita u sustavu neće selektivno djelovati zbog oscilacija tih struja i

napona. U današnjoj praksi funkcija ispada iz koraka u numeričkim relejima najčešće se ostvaruje praćenjem monotonosti, kontinuiteta i uniformnosti promjene impedancije na izvodima generatora [5], [6]. Ova promjena impedancije je funkcija napona u sustavu i kutne razlike između sustava. Krivulja impedancije ovisi o vrsti pogonskog stroja, tipu uzbudnog sustava i vrsti događaja koja je inicirala njihanje.



Slika 3.1. Impedantna karakteristika jednostavnog elektroenergetskog sustava [7]

Princip detekcije gubitka sinkronizma može se objasniti na jednostavnom primjeru mreže koja se sastoji od dva sustava *A* i *B* s odgovarajućim impedancijama Z_A i Z_B te impedancijom voda koji ih povezuje Z_L. Takav sustav prikazan je na slici 3.1. U slučaju jednakih napona E_A i E_B, odnosno E_A/E_B=1 impedantna karakteristika prikazana je s dužinom *PQ*. Kut δ između dužina *AP* i *BP* predstavlja kut između dvaju sustava. Dužina *AB* predstavlja ukupnu impedanciju sustava. Ako uzmemo da je sustav *B* referentni sustav i pretpostavimo da E_A prethodi u kutu E_B, impedancija se pomiče od točke *P* prema točki *Q*. U trenutku kada impedancija presječe ukupnu impedanciju sustava, kut među naponima iznosi 180°. Ta je točka impedantni i električni centar sustava. Kako se točka električnog centra sustava pomiče prema lijevo od impedancije voda kutna razlika povećava se iznad 180°, te na kraju dosiže točku u kojoj su sustavi opet u fazi. Ako ne dođe do razdvajanja sustava cijeli ciklus se ponavlja. U trenutku kad se točka električnog centra sustava vrati na isto mjesto odakle je i krenula, kažemo

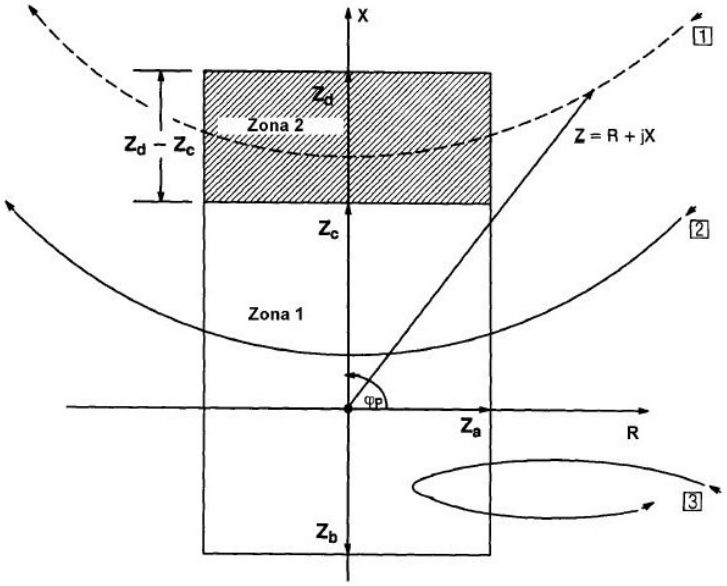
da je završen jedan ciklus klizanja. Ako sustav *A* usporava u odnosu na sustav *B* dogodit će se ista pojava, ali će se točka električnog centra sustava pomicati u suprotnom smjeru. Kad je odnos napona E_A/E_B različit od jedan, impedantna karakteristika bit će krivulje sa centrom na pravcu na kojem se nalazi impedancija voda *AB*. Za slučaj $E_A/E_B>1$ električni centar nalazit će se iznad a za $E_A/E_B<1$ ispod impedantnog centra. Na slici 3.1 prikazane su impedantne karakteristike za spomenute slučajeve. Valja primjetiti da električni centri sustava nisu fiksne točke. Lokacije ovih centara ovise o promjeni impedancije sustava i promjenama generatorskog napona [7]. Da bi se odredila impedantna krivulja sustava potrebno je uzeti u obzir promjene u stanju sustava te odrediti krivulju za svaki slučaj posebno.

Ukupna impedancija elektroenergetskog sustava prikazanog na slici 3.1 sastoji se od impedancije sustava *A*, Z_A, impedancije sustava *B*, Z_B i od impedancije voda koji povezuje sustave Z_L.

Uobičajeno je da relej za zaštitu generatora određuje impedanciju na temelju mjerenja na izvodima generatora. Ukupna impdencija sustava koju vidi zaštitni relej dijeli se na $m \cdot Z_{tot}$ i $(1 - m) \cdot Z_{tot}$ [8]. Impedancija se može izračunati iz sljedećeg izraza:

$$Z(m) = \left[\frac{1}{1 - \frac{E_B}{E_A} \cdot e^{-j\delta}} - m \right] \cdot Z_{tot} \tag{3.1}$$

Impedancija se računa iz vrijednosti osnovnog harmonika napona i struja direktnog sustava. Na slici 3.2. prikazana je tipična karakteristika zaštite od ispada iz koraka. Karakteristika je pravokutnog oblika određenog impedancijama Z_a, Z_b *i* Z_c te je simetrična u odnosu na vertikalnu os. Ishodište koordinatnog sustava predstavlja točku mjerenja struja i napona. Karakteristika se sastoji od dvije zone. Prva zona uključuje impedanciju generatora Z_b i impedanciju bloktransformatora Z_c. Druga zona određena je impedancijom mreže Z_d do čije vrijednosti relej može detektirati poremećaj. Ovisno o tome gdje se nalazi električni centar sustava kod poremećaja, vektor impedancije će proći kroz jednu od zona. Ispad iz sinkronizma se detektira time što impedantni vektor ulazi u karakteristiku na jednoj strani i izlazi na drugoj, kao što je to prikazano u slučajevima 1 i 2 na slici 3.2. S druge strane, moguće je da vektor impedancije uđe i izađe iz karakteristike, kao što je to u slučaju 3. U ovoj situaciji njihanje snage se stabilizira i relej ne isklapa. Nalog za isključenje nakon što je detektiran ispad iz koraka ne mora biti dan za prvi završen ciklus klizanja, već se mogu dopustiti višestruki ciklusi klizanja, pogotovo ako je centar poremećaja negdje u sustavu.



Slika 3.2. Primjer impedantne karakteristike funkcije za detekciju ispada iz koraka generatora [7]

Postoje i neke druge sheme štićenja generatora koje se temelje na sličnom principu kao što su shema s jednostrukim (*engl. single blinder*) i dvostrukim zaslonima (*engl. double blinder*), sheme s koncentričnim karakteristikama i sheme s paralelnim pravcima [4]. Zajednička karakteristika svih gore spomenutih shema je da zahtijevaju detaljne studije prijelazne stabilnosti koje će odrediti karakteristike gubitka sinkronizma, maksimalno klizanje generatora, karakteristike stabilnih njihaja te očekivane iznose struja. To je jedan od razloga zašto je napravljen velik broj istraživanja s ciljem razvoja drugih metoda detekcije gubitka sinkronizma. Generalno, metode se mogu podijeliti u one koje koriste lokalna mjerenja i druge koje koriste mjerenja iz više izvora (*engl. wide area measurement*) za detekciju ispada iz koraka. Autori u [9] predlažu metodu koja koristi brzinu promjene napona električnog centra sustava (*engl. SCV-swing center voltage*). Metoda ne zahtijeva detaljne analize sustava, ali koristi određene aproksimacije za određivanje SCV-a. Pristup koji kombinira vremensku analizu u Klarkovoj domeni i SCV metodu prikazan je u [10]. Algoritam koji koristi kriterij jednakih površina prezentiran je u [11] i [12]. U ovom algoritmu koriste se izračuni jalove snage, radne snage i promjene radne snage u svrhu predviđanja gubitka sinkronizma. No, budući se podešavanje promjene radne snage temelji na maksimalno dozvoljenom klizanju, podešavanje zahtijeva detaljne simulacije prijelaznih pojava [13]. Kriterij jednakih površina u kombinaciji s metodom najmanjih kvadrata koristi se u [14]. Algoritam koji se temelji na istom kriteriju, ali primjenjen

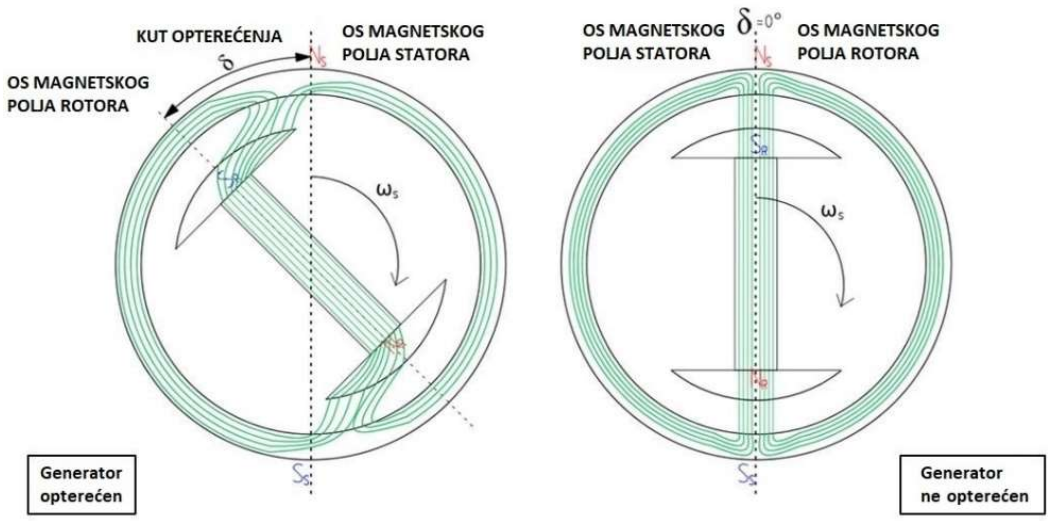
u vremenskoj domeni opisan je u [15]. Članak [16] prikazuje R-Rdot algoritam koji mjeri otpor i promjenu otpora na izvodima generatora te na osnovu toga detektira nestabilna njihanja. Nedostatak ove sheme je što nema kontrolu nad kutom pri kojem se vrši isklapanje. S razvojem tehnologija koje koriste sinkrofazorska mjerenja, predlažu se neke metode koje koriste ovu vrstu mjerenja [17]. Treba napomenuti da spomenute metode zahtijevaju primjenu komunikacijskih tehnologija za ostvarivanje komunikacije između uređaja koji koriste sinkrofazorska mjerenja (PMU), a koji trebaju biti instalirani na svim relevantnim lokacijama u sustavu. Zanimljiv pristup koji koristi sinkronizirana mjerenja i identifikaciju koherentnosti generatora u realnom vremenu opisan je u [18]. Zajednička karakteristika spomenutih metoda je indirektno predviđanje i/ili detekcija promjene kuta opterećenja nakon poremećaja u sustavu.

3.2. Definicija i metode mjerenja kuta opterećenja

Hidrogeneratori i turbogeneratori mogu se opisati sa standardnim dvoosnim matematičkim modelom. Kako bi se sinkroni generator mogao opisati sa spomenutim matematičkim modelom nužno je poznavati parametre generatora. Kut opterećenja je jedan od glavnih parametara sinkronog generatora, a precizno mjerenje kuta opterećenja je ključno za određivanje matematičkog modela. Kut opterećenja se većinom koristi u monitoring sustavima generatora, no njegovo mjerenje u takvim sustavima se ne provodi u realnom vremenu [19]. Motivacija ovog rada je bila istražiti mogu li se mjerenja kuta opterećenja, koja se provode u realnom vremenu, koristiti za zaštitu generatora te za analizu i predviđanje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Međutim, da bi se kut opterećenja mogao koristi u prethodno opisanim slučajevima, potrebno ga je mjeriti u realnom vremenu i to u stacionarnim i prijelaznim režimima rada generatora.

Električni kut opterećenja δ je kut između inducirane elektromotorne sile (EMS) i napona generatora, odnosno kut između magnetskog polja rotora i statora. Magnetsko polje rotora sinkronog generatora rotira sinkronom brzinom i inducira rotirajuće magnetsko polje u statoru.

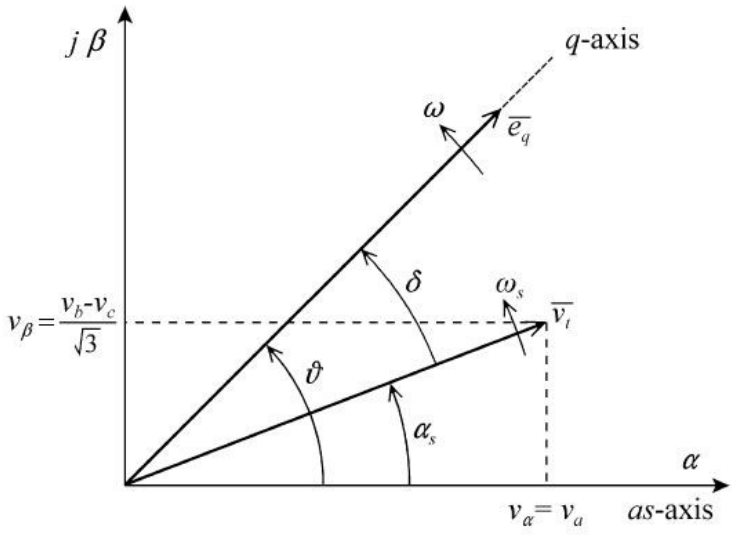
Slika 3.3. prikazuje odnos pozicije rotora, magnetskog polja i kuta opterećenja. Snaga generatora izravno je proporcionalna sinusu vrijednosti kuta opterećenja.



Slika 3.3. Grafički prikaz odnosa pozicije rotora, magnetskog polja i kuta opterećenja

Kut opterećenja izravno predstavlja torzijsku krutost magnetskog polja unutar zračnog raspora, kao i stabilnost generatora. Kada se kombinira s on-line pogonskom kartom generatora, mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu (stacionarni i dinamičko) postaje jako bitno za određivanje stvarnih radnih parametara generatora. Nadalje, kut opterećenja je ključan parametar za razumijevanje torzijske dinamike generatora gdje krutost magnetskog polja utječe na dinamički odziv generatora.

Kao što je već navedeno, hidrogeneratori i turbogeneratori se mogu opisati sa standardnim dvoosnim matematičkim modelom. Vektorski dijagram prikazan na slici 3.4. i izrazi od (3.2) do (3.5) temelje se na prije spomenutom *dq* matematičkom modelu sinkronog generatora [19]. U ovom je prikazu kut opterećenja definiran kao električni kut između vektora napona uzbude generatora $\bar{e}_q$ i vektora napona statora $\bar{v}_t$. Pošto $\bar{e}_q$ leži na pozitivnoj q osi, kut opterećenja se može definirati kao električni kut između q osi i vektora napona statora $\bar{v}_t$. U stanju bez opterećenja generatora, $\bar{e}_q$ i $\bar{v}_t$ su identični i kut opterećenja je jednak nuli.



Slika 3.4. Vektorski dijagram koji predstavlja definiciju kuta opterećenja [19]

Rezultirajući vektor $\overline{v_t}$ je definiran u koordinatnom sustavu statora $\alpha\beta$ gdje realna os ovog sustava odgovara osi namota statora *as*. Kada su poznate trenutne vrijednosti faznog napona generatora, vektor $\overline{v_t}$ se može izračunati iz izraza (3.2) i (3.3). Temeljem toga, kut α_s koji je kut između vektora $\overline{v_t}$ i osi *as* je definiran izrazom (3.4) [19], [20]:

$$\overline{v_t} = v_\alpha + jv_\beta = \sqrt{2}v_t e^{j\alpha_s} \tag{3.2}$$

$$v_t = \frac{1}{3}\sqrt{v_{ab}^2 + v_{bc}^2 + v_{ca}^2} \tag{3.3}$$

$$\alpha_s = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}v_{bc}}{v_{ab} - v_{ca}}\right) \tag{3.4}$$

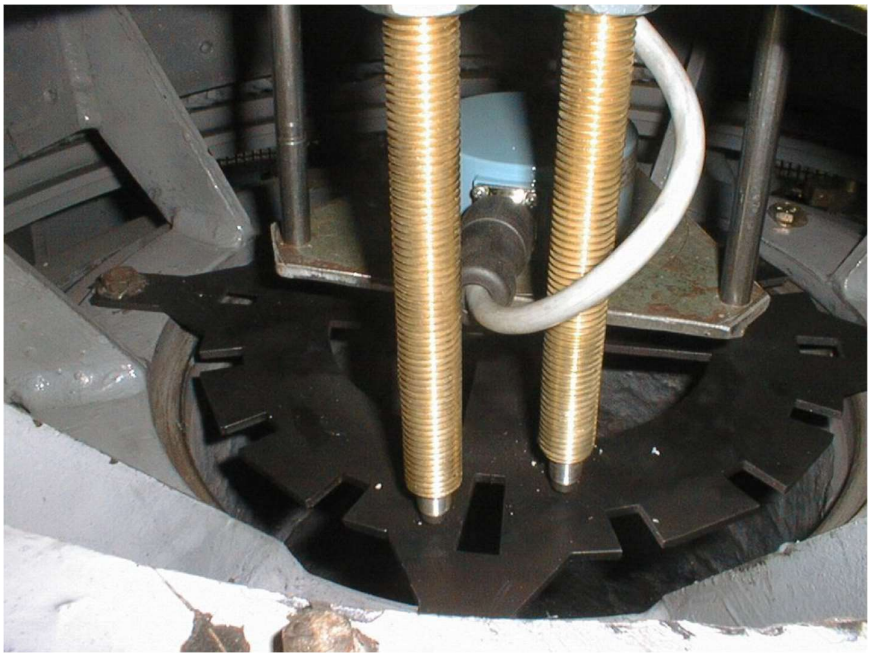
$$\delta = \vartheta - \alpha_s \tag{3.5}$$

Pod uvjetom da su fazni naponi simetrični, pozicija $\overline{v_t}$ se može odrediti pomoću faznog kuta bilo kojeg faznog napona. Drugim riječima, kut opterećenja se može odrediti kroz mjerenje pomaka referentne osi rotora prema osnovnoj komponenti faznog napona (onaj koji je određen kao referentni) i to u uvjetima kada je generator pod opterećenjem i u praznom hodu, kao što je to definirano s izrazom (3.5).

Kut opterećenja je određen signalom napona jedne faze i informacijom o poziciji rotora. Budući da se informacije o položaju rotora mogu dobiti na nekoliko različitih načina, postoje i različite metode za određivanje kuta opterećenja. Kvaliteta mjerenja kuta opterećenja odgovara

točnosti određivanja položaja rotora, a položaj rotora se obično u praksi određuje različitim metodama pa stoga imamo više metoda za mjerenje kuta opterećenja. Najpoznatije su metode koje koriste inkrementalni enkoder, induktivni senzor i senzor zračnog raspora.

Princip po kojem se mjeri kut opterećenja pomoću induktivnog senzora je korištenje induktivnog senzora za snimanje prolaza zubaca zupčanika koji su montirani na vratilu generatora. Broj zubaca zupčanika jednak je broju pari polova generatora, što znači da se u svakom periodu pojavljuje jedan impuls iz senzora. Signal približno sinusnog oblika generira se na izlazu induktivnog senzora te se taj signal dalje frekvencijski modulira brzinom vrtnje rotora.



Slika 3.5. Prikaz izvedbe mjerenja kuta opterećenja pomoću induktivnog senzora [20]

Mjerenje kuta opterećenja koristeći inkrementalni enkoder temelji se na mjerenju vremenske razlike između referentnog markera i pozitivnog prolaza signala linijskog napona kroz nulu.

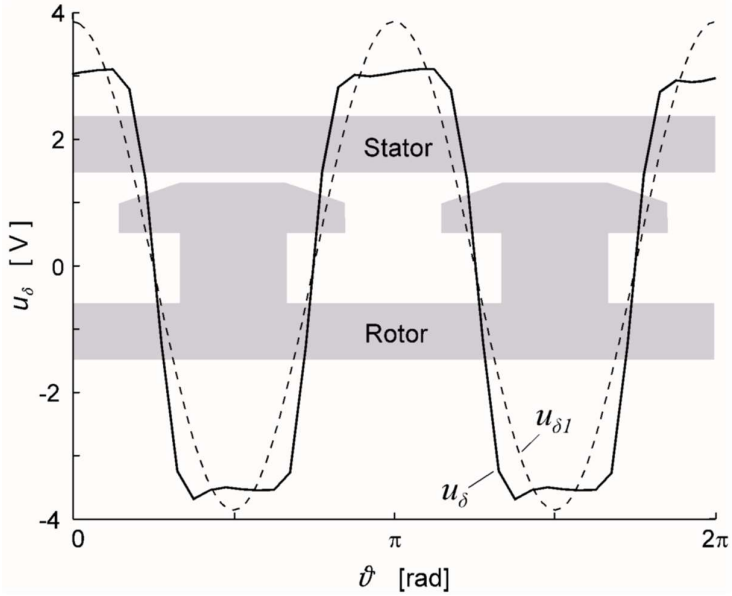
Rezultati prikazani u [20] sugeriraju da su metode za određivanje položaja rotora na temelju inkrementalnog enkodera i induktivnog senzora vrlo osjetljive na vibracije i opletanje osi vrtnje generatora. Da bi se smanjio utjecaj navedenih problema razvijena je metoda koja koristi kapacitivni senzor zračnog raspora za određivanje položaja rotora, ili drugim riječima za mjerenje kuta opterećenja.

Kapacitivni senzor zračnog raspora mjeri udaljenost između polova statora i rotora. Mjerenje udaljenosti između polova statora i rotora je beskontaktno i temelji se na kapacitivnoj sondi plosnatog oblika koja se montira jednostavnim lijepljenjem na statorski paket. Kapacitivni senzor zračnog raspora za mjerenje širine zračnog raspora je zapravo mjerni lanac koji se sastoji od sonde i linearizacijskog modula [21], [22]. Primjer izvedbe kapacitivnog senzora zračnog raspora prikazan je na slici 3.6. [23].



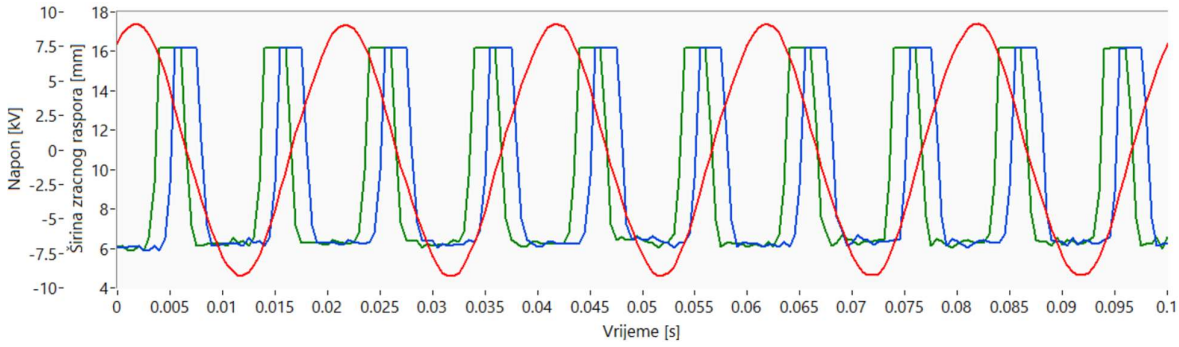
Slika 3.6. Primjer kapacitivnog senzora zračnog raspora [23].

Sonda je pomoću triaxial kabela povezana s linearizacijskim modulom i preko njega modul šalje sondi signal visoke frekvencije. Pomoću promjene faze tog signala mjeri se kapacitet koji je direktno ovisan o širini zračnog raspora. Lienearizacijski modul napaja se izmjeničnim naponom. Na izlazu se generira signal čija je frekvencija dvostruko veća od frekvencije mreže i koja je dobar prikaz pozicije rotora. Nakon što se signal obradi u linearizacijskom modulu, dobiva se izlazni analogni strujni signal (4 do 20 mA). Taj je izlazni signal proporcionalan širini zračnog raspora generatora. Slika 3.7. prikazuje signal u_δ snimljen pri konstantnoj brzini rotora i skicu konfiguracije širine zračnog raspora [19]. Signal $u_{\delta 1}$ je osnovna komponenta signala u_δ i oba su signala izražena u voltima, dok je kut ϑ izražen u radijanima. Mjerenje kuta opterećenja zahtijeva da signal senzora zračnog raspora bude čvrsto vezan za položaj rotora. Budući da je položaj rotora u koorelaciji s induciranom EMS, može se koristiti za određivanje vrijednosti kuta opterećenja zajedno sa signalom faznog napona. Također se može reći da fazni pomak signala iz kapacitivnog senzora zračnog raspora prema signalu faznog napona predstavlja kut opterećenja.



Slika 3.7. Signal iz senzora zračnog raspora nakon obrade u odnosu na položaj rotora

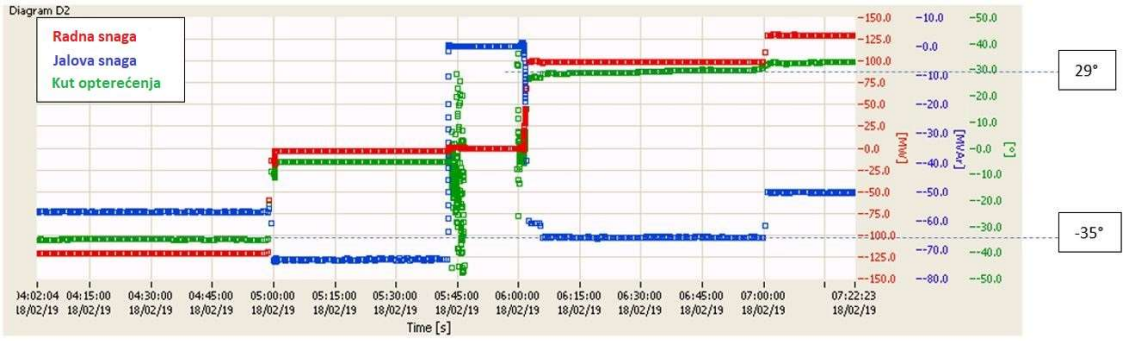
Slika 3.8. prikazuje rezultate mjerenja i odnos između signala napona i signala iz senzora zračnog raspora. Kako se kut opterećenja povećava, signal senzora zračnog raspora počinje prethoditi signalu napona, što je jasno prikazano na slici 3.8. Plava krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator uzbuđen ali nije opterećen. U ovom su režimu rada vrijednosti radne snage i kuta opterećenja jednaki nuli. Zelena krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator opterećen i kada su vrijednosti radne snage i kuta opterećenja veći od nule.



Slika 3.8. Odnos signala napona i signala zračnog raspora kod promjene kuta opterećenja. Crvena krivulja predstavlja signal napona generatora, plava krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator neopterećen, a zelena krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator opterećen.

U usporedbi s metodom koja koristi induktivni senzor, metoda sa senzorom zračnog raspora daje stabilnije i točnije podatke o položaju rotora jer se u prvom slučaju koristi mali radijus u odnosu na radijus rotora. Zbog toga je izračun kuta opterećenja kod korištenja senzora zračnog raspora precizniji [24]–[27]. Također se pokazalo da je metoda senzora zračnog raspora prikladnija za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu. Rezultati istraživanja prikazanog u [19] potvrđuju da je metoda senzora zračnog raspora najpouzdaniji, najtočniji i najjeftiniji način izračuna kuta opterećenja. U ovom se istraživanju metoda senzora zračnog raspora koristi za mjerenje kuta opterećenja i na njoj se bazira algoritam za izravno mjerenje kuta opterećenja opisan u poglavlju 5.1.

Slika 3.9. potvrđuje da ova metoda daje stabilne rezultate jer pokazuje promjenu kuta opterećenja generatora jedne reverzibilne hidroelektrane kroz tri režima rada: kompezacijski, pumpni ili motorski i generatorski, s različitim vrijednostima radne i jalove snage. Mjerenja prikazana na slici 3.9. preuzeta su iz monitoring sustava agregata reverzibilne HE Velebit. Slika prikazuje vrijednosti radne snage, jalove snage i kuta opterećenja u periodu od 3 sata i 20 minuta. Ovisnost vrijednosti kuta opterećenja o vrijednostima radne i jalove snage jasno je vidljiva. U periodu od 4:02 do 5:00 sati agregat radi u pumpnom režimu rada i zato su vrijednosti kuta opterećenja manje od nule. Od 5:00 do 5:45 sati agregat radi kao sinkroni kompenzator (radna snaga je 0 MW, a jalova snaga je oko -75 MVAr). U tom režimu kut opterećenja iznosi približno 0 stupnjeva jer nema opterećenja. U 5:45 sati agregat je zaustavljen te je ponovno pokrenut u 6:00 sati. Kod zaustavljana i pokretanja agregata izračun kuta opterećenja gubi stabilnost u trenutcima kada je uzbuda isključena, što je vidljivo na slici u vremenskom intervalu od 5:45 do 6:00 sati. Nakon 6:00 sati agregat radi u generatorskom režimu. U tom režimu vrijednosti kuta opterećenja su veće od nule. Kod povećanja radne snage u 7:00 sati povećava se i kut opterećenja.



Slika 3.9. Promjena kuta opterećenja sukladno promjeni radne i jalove snage kroz različite režime rada agregata

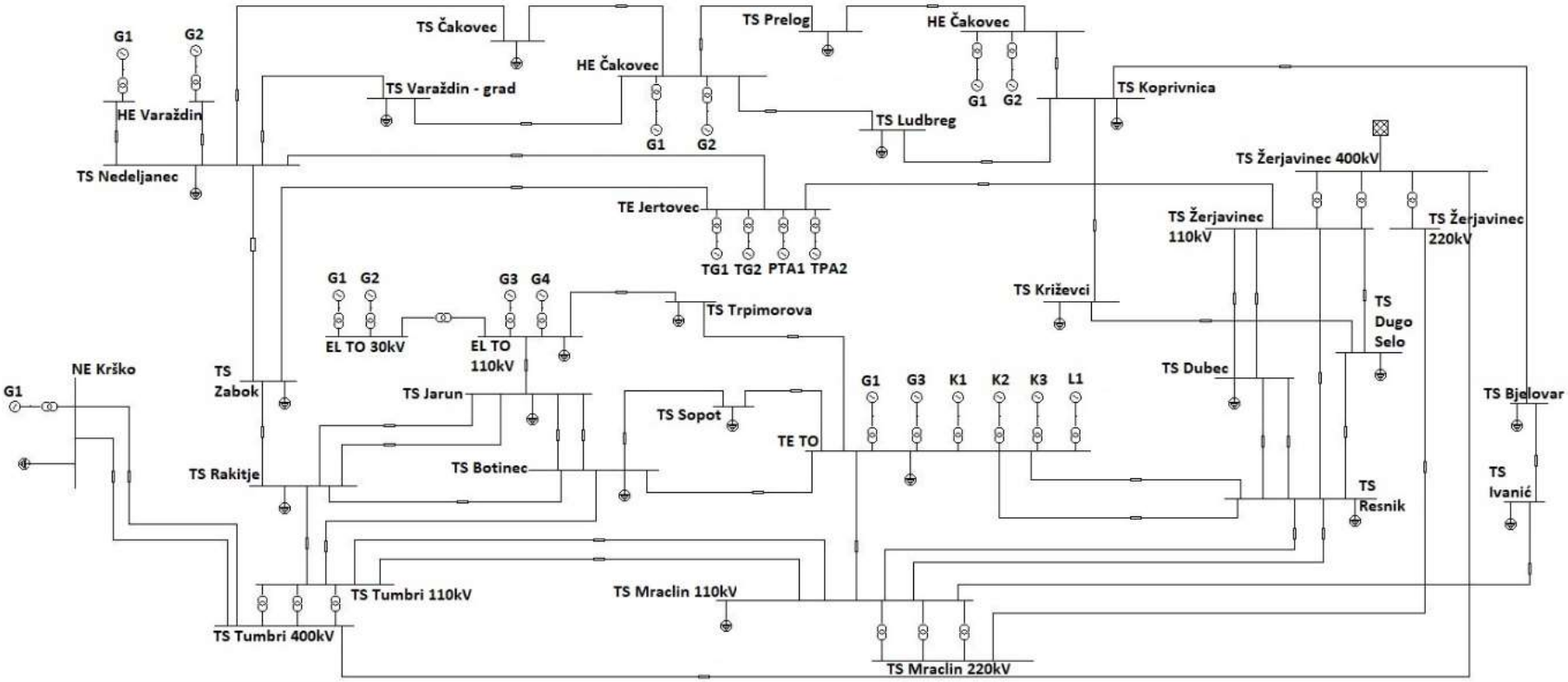
Mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu je relativno novi postupak kojeg treba dodatno istražiti, te se puni potencijal ovog parametra sinkronog generatora još ne koristi dovoljno u praksi. Danas se mjerenje kuta opterećenja uglavnom koristi u monitoring sustavima generatora. Za mjerenje kuta opterećenja koriste se različite vrste senzora, a kako su ta mjerenja vrlo specifična, ne postoji jedno univerzalno rješenje.

4. MODEL I ANALIZA STABILNOSTI SUSTAVA

4.1. Opis modela elektroenergetske mreže za potrebe simulacija stabilnosti sustava

Za potrebe analize stabilnosti sustava korišten je programski paket ETAP verzije 12.6.0H. Ovaj program namijenjen je analizi dinamičkih odziva i granica stabilnosti EES-a prije, za vrijeme i nakon promjena ili poremećaja u sustavu. U programskom paketu se modeliraju dinamičke karakteristike sustava te se interaktivno rješavaju jednadžbe mreže i diferencijalne jednadžbe generatora kako bi se dobili odzivi sustava i generatora (ili drugih strojeva) u vremenskoj domeni. U ovom slučaju ETAP je korišten za analizu prijelazne stabilnosti hidrogeneratora te je u tu svrhu modeliran sjeverozapadni dio elektroenergetskog sustava Hrvatske koji je prikazan na slici 4.1.

Modelirani prijenosni sustav se sastoji od 400, 220 i 110 kV vodova i povezan je sa elektroenergetskim sustavima Slovenije, Madžarske, Bosne i Hercegovine i Srbije. Veza s okolnim sustavima predstavljena je naponskim čvorom u trafostanici TS Žerjavinec 400/110 kV. U ovom dijelu elektroenergetskog sustava postoji jedan nuklearni generator, nekoliko termogeneratora i generatora kombiniranog ciklusa te šest hidrogeneratora. Upravo su ovi hidrogeneratori predmet analize s obzirom da su neki od njih, zbog svojih karakteristika, skloniji ispadu iz koraka, odnosno gubitku sinkronizma. Gubitku sinkronizma posebno su izloženi generatori u HE Dubrava i HE Čakovec zbog svoje relativno male mase, a time i momenta tromosti. Radi se o poznatoj problematici o kojoj je napisano više različitih studija i radova [7], [28], [29]. U tablicama 4.1., 4.2. i 4.3. dani su parametri generatora u HE Dubrava, HE Čakovec i HE Varaždin korišteni u simulacijama.



Slika 4.1. Model elektroenergetskog sustava sjeverozapadnog dijela RH korišten za potrebe simulacije

Tablica 4.1. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Dubrava za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika

Podatak	Simbol	Jedinica	Generator 1	Generator 2
Nazivna prividna snaga	S_n	MVA	42	42
Nazivna djelatna snaga	P_n	MW	39.9	39.9
Nazivni napon	U_{Gn}	kV	6.3 ± 7.5%	6.3 ± 7.5%
Nazivni faktor snage	$cos\varphi_n$		0.95	0,95
Nazivna brzina vrtnje	n	rpm	125	125
Nazivna frekvencija	f_n	Hz	50	50
Konstanta tromosti agregata	T_A	s	1.05	1.05
Moment inercije agregata	$J(I)$	t m^2	1150	1150
Rezistencija namota statora	r_a	p.u.	0,00597	0,00597
Rasipna reaktancija statora	x_{as}	p.u.	0,328	0,328
d-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d''	s	0,029	0,029
Subtranzijentna reaktancija	x_d''	p.u.	0,33	0,33
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d'	s	0,55	0,55
Tranzijentna vremenska konstanta u praznom hodu	T_{d0}'	s	1,65	1,65
Tranzijentna reaktancija	x_d'	p.u.	0,45	0,45
Sinkrona reaktancija	x_d	p.u.	1,35	1,35
q-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q''	s	0,035	0,035
Subtranzijentna reaktancija	X_q''	p.u.	0,37	0,37
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q'	s		
Tranzijentna reaktancija	X_q'	p.u.	0,94	0,94
Sinkrona reaktancija	X_q	p.u.	0,94	0,94

Tablica 4.2. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Čakovec za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika

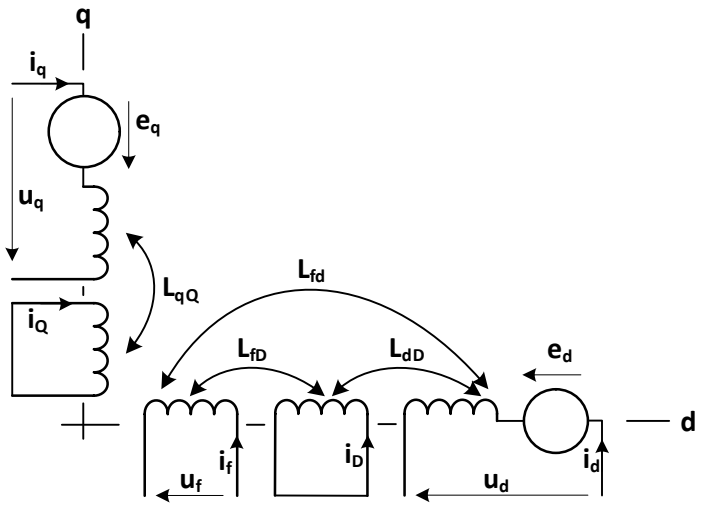
Podatak	Simbol	Jedinica	Generator 1	Generator 2
Nazivna prividna snaga	S_n	MVA	42	42
Nazivna djelatna snaga	P_n	MW	39.9	39.9
Nazivni napon	U_{Gn}	kV	6.3 ± 7.5%	6.3 ± 7.5%
Nazivni faktor snage	$cos\varphi_n$		0.95	0,95
Nazivna brzina vrtnje	n	rpm	125	125
Nazivna frekvencija	f_n	Hz	50	50
Konstanta tromosti agregata	T_A	s	1.05	1.05
Moment inercije agregata	$J(I)$	t m^2	1150	1150
Rezistencija namota statora	r_a	p.u.	0,00604	0,00604
Rasipna reaktancija statora	x_{as}	p.u.	0,35	0,35
d-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d''	s	0,028	0,028
Subtranzijentna reaktancija	x_d''	p.u.	0,33	0,33
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d'	s	0,84	0,84
Tranzijentna vremenska konstanta u praznom hodu	T_{d0}'	s	2,98	2,98
Tranzijentna reaktancija	x_d'	p.u.	0,42	0,42
Sinkrona reaktancija	x_d	p.u.	1,49	1,49
q-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q''	s	0,035	0,035
Subtranzijentna reaktancija	X_q''	p.u.	0,37	0,37
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q'	s		
Tranzijentna reaktancija	X_q'	p.u.	0,94	0,94
Sinkrona reaktancija	Xq	p.u.	0,94	0,94

Tablica 4.3. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Varaždin za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika

Podatak	Simbol	Jedinica	Generator 1	Generator 2
Nazivna prividna snaga	S_n	MVA	53,5	50
Nazivna djelatna snaga	P_n	MW	47	47
Nazivni napon	U_{Gn}	kV	10.5 ± 7%	10.5 ± 7%
Nazivni faktor snage	$cos\varphi_n$		0.85	0,85
Nazivna brzina vrtnje	n	rpm	125	125
Nazivna frekvencija	f_n	Hz	50	50
Konstanta tromosti agregata	T_A	s	3	3
Moment inercije agregata	$J(I)$	t m^2	7000	7000
Rezistencija namota statora	r_a	p.u.	0,0075	0,0075
Rasipna reaktancija statora	x_{as}	p.u.	0,157	0,157
d-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d''	s	0,08	0,024
Subtranzijentna reaktancija	x_d''	p.u.	0,238	0,24
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_d'	s	1,27	0,95
Tranzijentna vremenska konstanta u praznom hodu	T_{d0}'	s	4,59	3,09
Tranzijentna reaktancija	x_d'	p.u.	0,34	0,35
Sinkrona reaktancija	x_d	p.u.	1,23	1,14
q-os				
Subtranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q''	s	0,035	0,035
Subtranzijentna reaktancija	X_q''	p.u.	0,27	0,27
Tranzijentna kratkospojna vremenska konstanta	T_q'	s		
Tranzijentna reaktancija	X_q'	p.u.	0,7	0,7
Sinkrona reaktancija	X_q	p.u.	0,72	0,72

4.1.1. Definiranje hidrogeneratora unutar modela elektroenergetske mreže

U prethodnim poglavljima spomenuta je dvoosna teorija električnih strojeva prema kojoj se jednadžbe višefaznog simetričnog stroja uvijek mogu svesti na ekvivalentni dvofazni sustav na statoru i rotoru, bez obzira na broj faza. Važno je da pri tome ostaje sačuvana vjernost opisa stroja glede elektromagnetskog momenta, a struje u stvarnim namotima mogu se izraziti kao linearne kombinacije struja dvofaznog sustava. Odgovarajućom transformacijom varijabli dvofaznog modela moguće je uvesti jedinstveni koordinatni sustav za varijable statora i rotora. Transformacijom varijabli svi namoti stroja, od kojih su neki stvarni, a neki mogu biti fiktivni, smještaju se u dvije međusobno okomite osi. Na rotoru sinkronog stroja u većini slučajeva postoji prigušni namot koji se može nadomjestiti s dva međusobno okomita namota, jedan u uzdužnoj, a drugi u poprečnoj osi stroja. Na slici 4.2. dan je shematski prikaz stroja s istaknutim polovima i prigušnim namotom u obje osi. Varijable na slici označene su uobičajenim indeksima: *d,q* – armatura, *f*-uzbuda, *D,Q* – prigušni namot [30].



Slika 4.2. Shematski prikaz sinkronog stroja s prigušnim namotom u rotorskom koordinatnom sustavu [30]

Naponske jednadžbe u uzdužnoj osi stroja glase:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \tag{4.1}$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \tag{4.2}$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \tag{4.3}$$

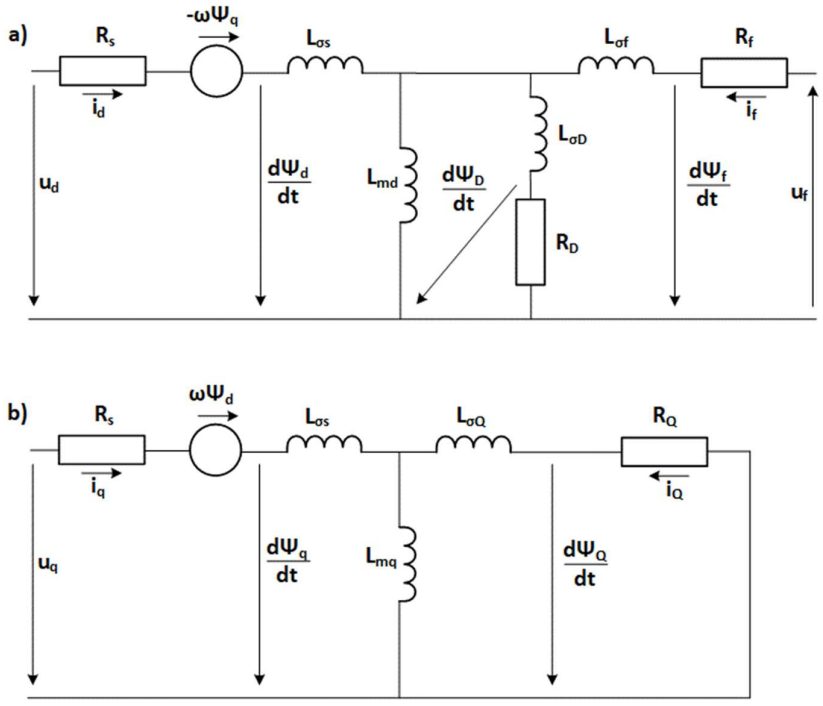
gdje je R_s otpor (rezistencija) namota statora, ψ_d ulančeni tok d-osi, ψ_q ulančeni tok q-osi, R_f otpor rotorskog namota, R_D otpor prigušnog namota u d-osi, u_f napon uzbude, u_d komponenta napona armature u d-osi i u_q komponenta napona armature u q-osi.

Jednadžba za ulančene tokove u matričnom obliku glasi:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_f \\ \psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & L_{df} & L_{dD} \\ L_{df} & L_f & L_{fD} \\ L_{dD} & L_{fD} & L_D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

gdje je L_{df} međuinduktivitet namota statora i rotora u d-osi i L_{fD} međuinduktivitet uzbudnog i prigušnog namota u d-osi.

Prema [30] može se uzeti da vrijedi L_{df}=L_{dD}=L_{md} i L_{df}=L_{fD}=L_{md}+ $L_{\sigma md}$. Zbog male razlike u iznosu zanemarena je i razlika između L_{md} i L_{fD}. U skladu s tim pretpostavlja se da su svi međuinduktiviteti u uzdužnoj osi jednaki L_{md}. Na slici 4.3a prikazana je nadomjesna shema za uzdužnu os stroja.



Slika 4.3. Nadomjesna shema sinkronog stroja s prigušnim namotom u prijelaznom stanju: a) za uzdužnu os, b) za poprečnu os [30]

Naponske jednadžbe u rotorskom koordinatnom sustavu za poprečnu os stroja glase:

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \tag{4.5}$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \tag{4.6}$$

gdje je R_Q otpor prigušnog namota u q-osi rotorskog namota, $L_{\sigma s}$ rasipni induktivitet namota statora, L_{mq} međuinduktivitet namota statora i rotora u q-osi, $L_{\sigma D}$ rasipni induktivitet prigušnog namota u d-osi, $L_{\sigma f}$ rasipni induktivitet uzbudnog namota i $L_{\sigma Q}$ rasipni induktivitet prigušnog namota u q-osi.

Jednadžba za ulančene tokove u matričnom obliku glasi:

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & L_{mq} \\ L_{mq} & L_Q \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

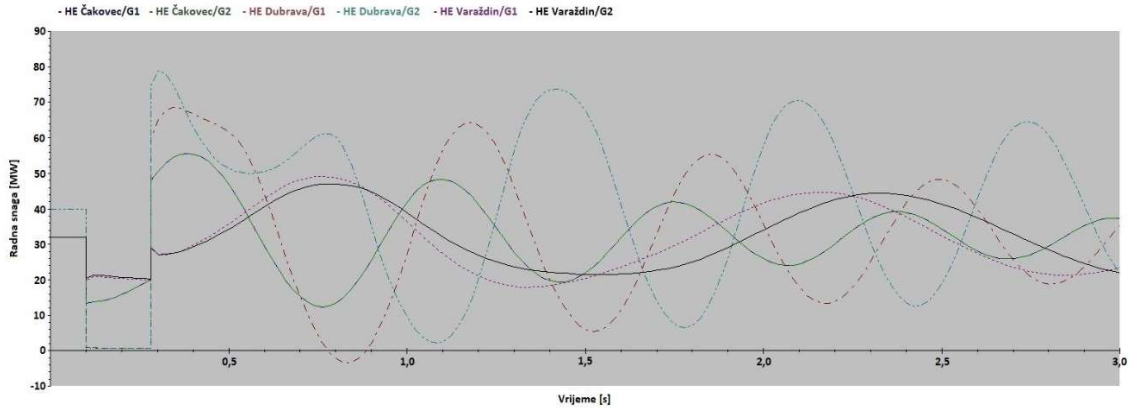
Nadomjesna shema za poprečnu os stroja prikazana je na slici 4.3b. Jednadžbe koje su navedene u ovom poglavlju i nadomjesne sheme generatora koje proizlaze iz njih osnova su za modeliranje generatora u prijelaznim režimima u programskom paketu ETAP.

4.2. Rezultati analize stabilnosti elektroenergetskog sustava

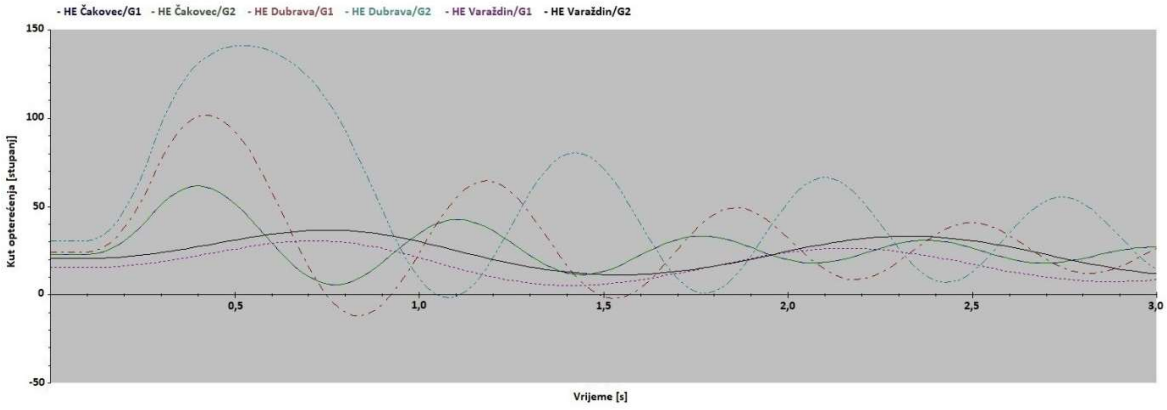
Za potrebe analize kuta opterećenja, brzine i ostalih varijabli generatora napravljene su različite simulacije. Najkritičnija situacija za generator, što se tiče njihanja snage, je pojava tropolnog kratkog spoja na pragu elektrane. Za svaku od elektrana analiziran je takav događaj. S obzirom da su generatori u elektranama isti (s izuzećem HE Varaždin) simulacija je rađena za jedan generator po elektrani. Treba napomenuti da su sve simulacije rađene s konstantnom uzbudom (bez regulacije napona) i bez djelovanja turbinske regulacije za vrijeme trajanja simulacije.

Na slikama 4.4., 4.5. i 4.6. prikazano je ponašanje generatora 2 u HE Dubrava za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama elektrane. Kvar se dogodio u t = 100 ms i isključen je u t = 282 ms. Dakle, kvar je trajao 182 ms i radi se o kritičnom vremenu trajanja kvara pri nazivnoj radnoj snazi generatora 2 i pri naponu od 104 % nazivnog napona na izvodima generatora. Generator 1 u HE Dubrava kao i ostala 4 generatora u HE Varaždin i HE Čakovec radili su sa smanjenom radnom snagom od 32 MW. Na slikama su prikazani vremenski dijagrami radne snage, kuta opterećenja i brzine vrtnje svih 6 generatora. Nakon kvara, radna

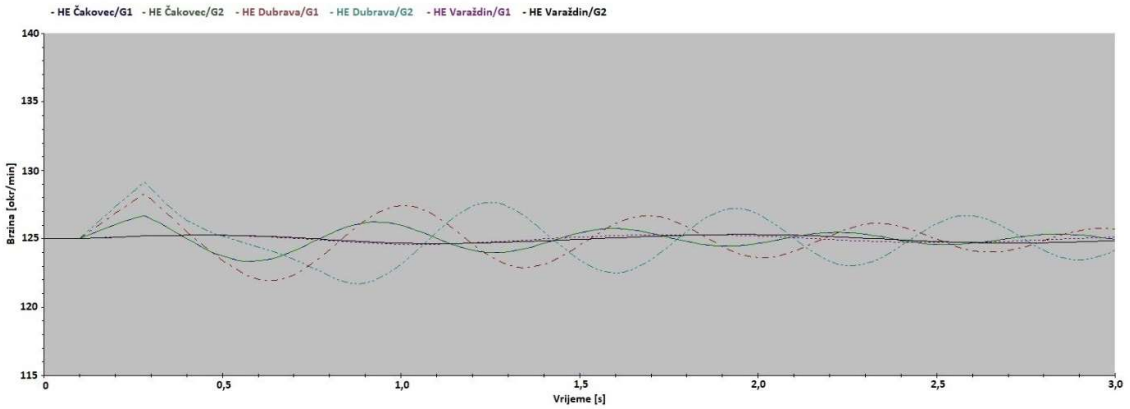
snaga generatora 2 pada praktično na nulu zbog tropolnog kratkog spoja na sabirnicama elektrane nakon čega kratkotrajno postiže vrijednost veću od nazivne te se u oscilacijama smiruje na vrijednosti prije samog kvara. Prema izrazu za njihanje (2.18) i (2.19) i u skladu s krivuljom snage prikazanoj na slici 2.5. generator ubrzava jer je mehanička snaga na vratilu generatora nepromijenjena. Brzina, očekivano, svoj maksimalni iznos postiže nakon što je otklonjen kvar u t = 282 ms, ali zbog akumulirane energije kut opterećenja nastavlja rasti. U trenutku prije kvara kut opterećenja iznosi 30,36° te dostiže nakon 423 ms, u trenutku t = 0,523 ms, dostiže svoj maksimalni iznos od 141,23°. Nakon ove vrijednosti kut opterećenja opada te se u oscilacijama smiruje na početnoj vrijednosti. U skladu s kriterijem jednakih površina prikazanim na slici 2.7. vrijeme trajanja kvara je dovoljno kratko da se rad za vrijeme usporenja izjednači s kinetičkom energijom akumuliranom pri ubrzanju rotora te da generator ostane u sinkronizmu s mrežom.



Slika 4.4. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms

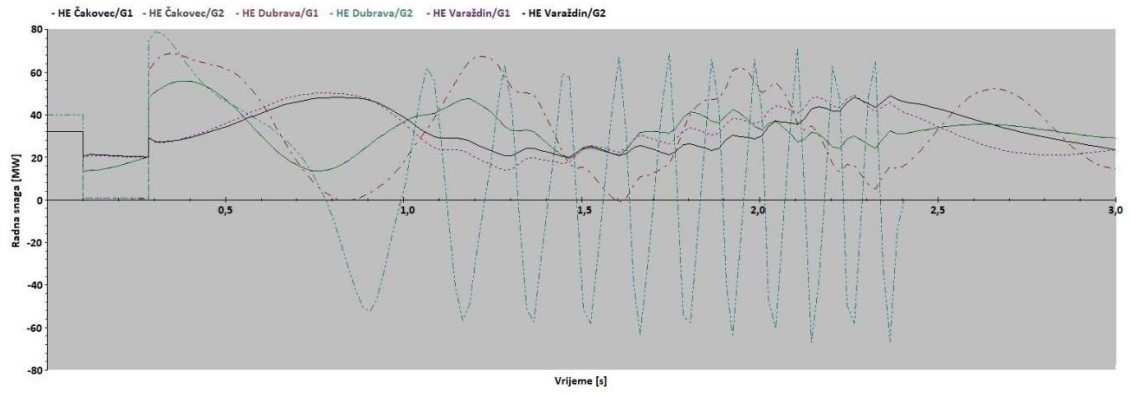


Slika 4.5. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms

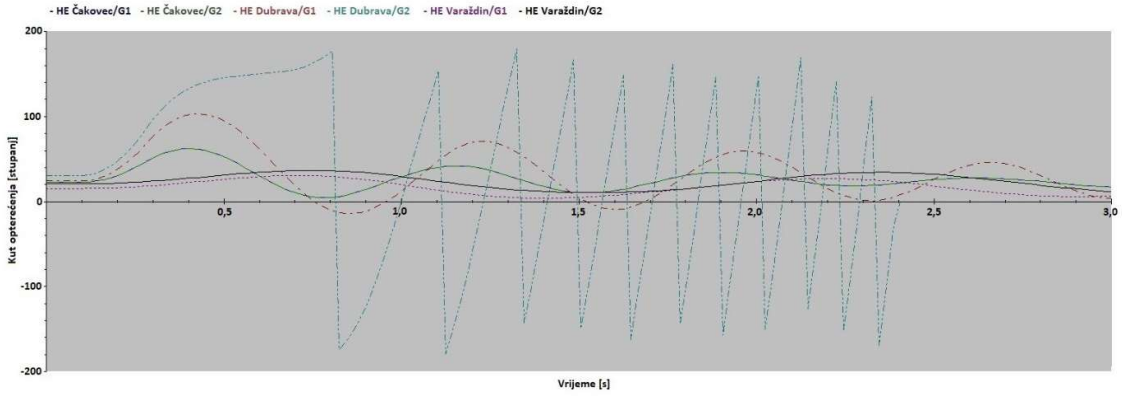


Slika 4.6. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms

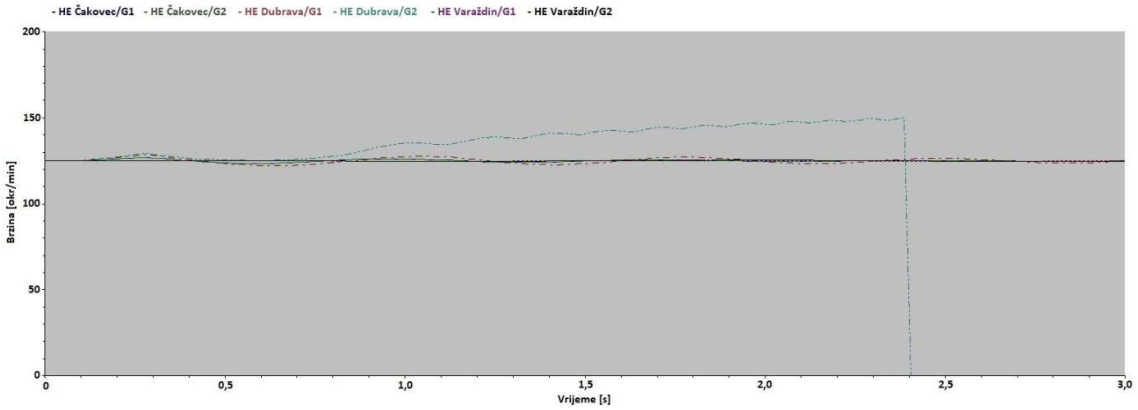
Produži li se vrijeme trajanja kvara za samo 2 ms ono će proći kritičnu točku nakon koje generator gubi sinkronizam. Takav slučaj, za generator 2 u HE Dubrava, prikazan je na slikama 4.7., 4.8. i 4.9. Kvar se dogodio u t = 100 ms i isključen je u t = 284 ms. Početni uvjeti rada svih generatora su identični kao u prethodnoj simulaciji. U trenutku t = 184 ms, kada je kvar otklonjen generator počinje usporavati no nakon 500 ms, pri kutu opterećenja od 150° počinje ponovo rasti. Prema kriteriju jednakih površina, prikazanom na slici 2.7., generator je prošao točku nakon koje dobiva ubrzanje što dodatno povećava kut opterećenja, a to dovodi do gubitka sinkronizma s mrežom. Iz dijagrama za stabilno i nestabilno njihanje vidljivo je da je utjecaj tropolnog kratkog spoja na generatore u HE Varaždin i HE Čakovec manji, odnosno promjena snage, brzine i kuta oprerećenja generatora je manja. Razlog tome je reakatancija mreže između HE Dubrava, HE Čakovec i HE Dubrava koja smanjuje taj utjecaj.



Slika 4.7. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms

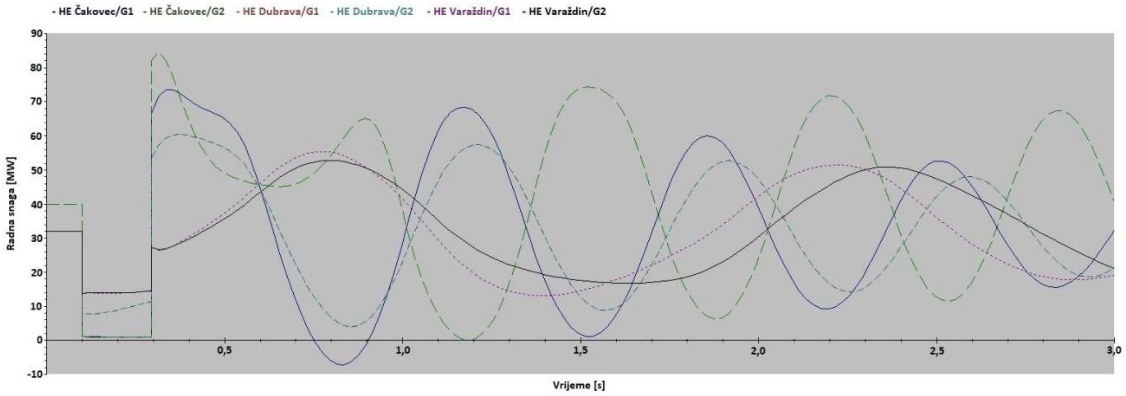


Slika 4.8. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms

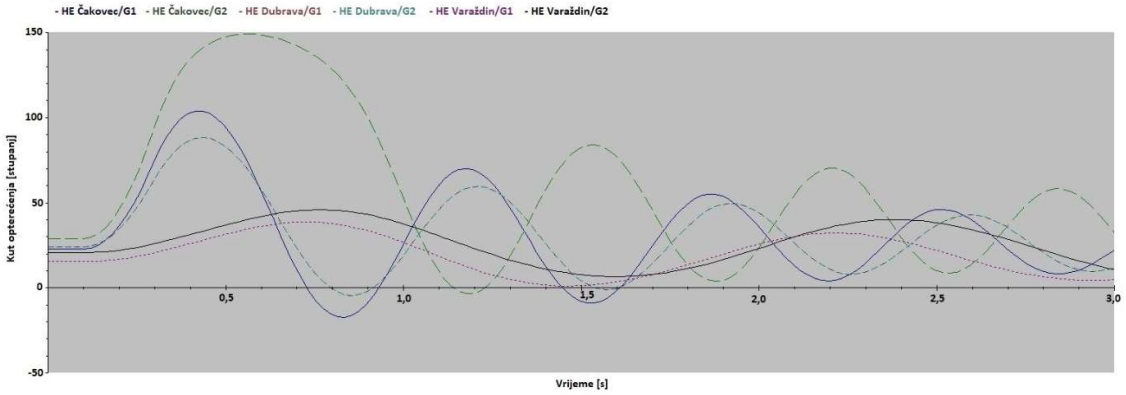


Slika 4.9. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms

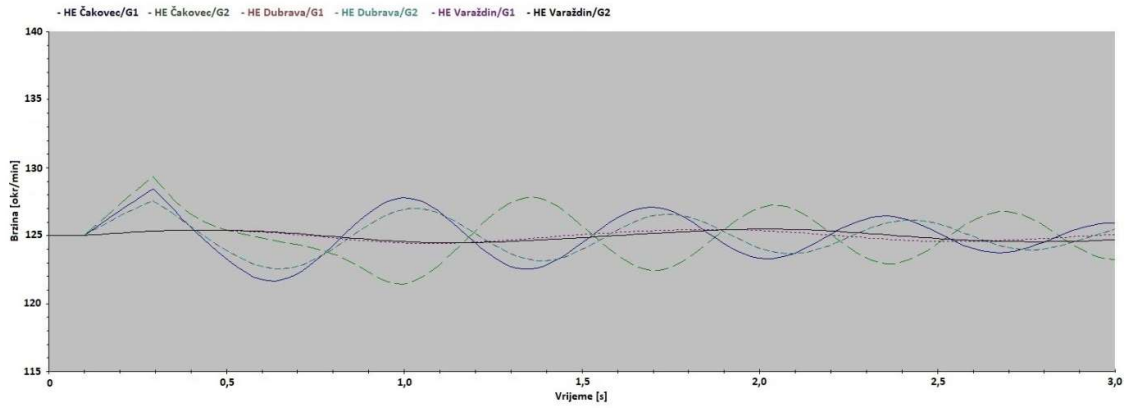
Vrlo slično ponašanje dobije se kod generatora 2 u HE Čakovec prilikom kvara na sabirnicama elektrane. Na slikama 4.10., 4.11. i 4.12. prikazano je ponašanje generatora 2 u HE Čakovec za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama elektrane. Kritično vrijeme trajanja kvara za generator 2 pri nazivnoj radnoj snazi i pri naponu od 104 % nazivnog napona generatora iznosi 194 ms. Ostali generatori radili su sa smanjenom radnom snagom od 32 MW. S obzirom da se radi o sličnim agregatima očekivano je da je kritično vrijeme, pri istim uvjetima, vrlo slično. Kut opterećenja, u trenutku prije kvara, iznosi 28,88° te dostiže u trenutku t = 555 ms, dostiže svoj maksimalni iznos od 149,11°. Nakon ove vrijednosti kut opterećenja opada te se u oscilacijama smiruje na početnoj vrijednosti a generator ostaje u sinkronizmu s mrežom.



Slika 4.10. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms

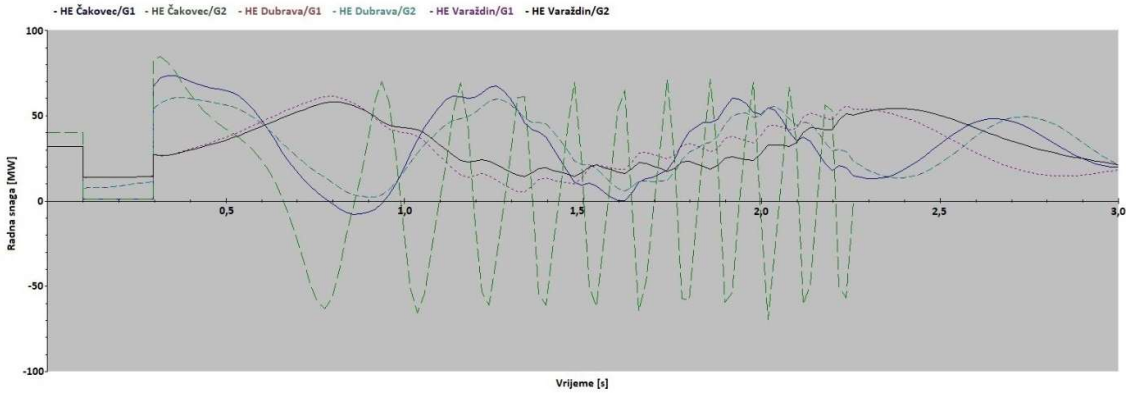


Slika 4.11. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms

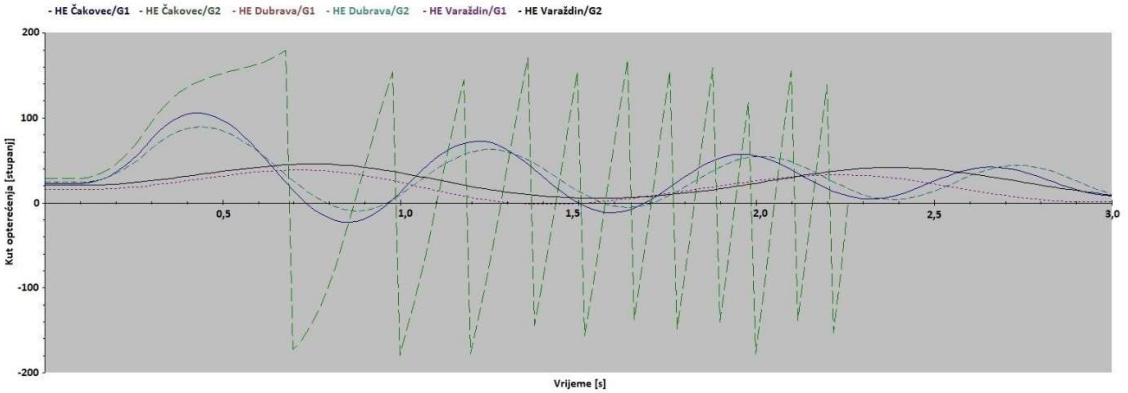


Slika 4.12. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms

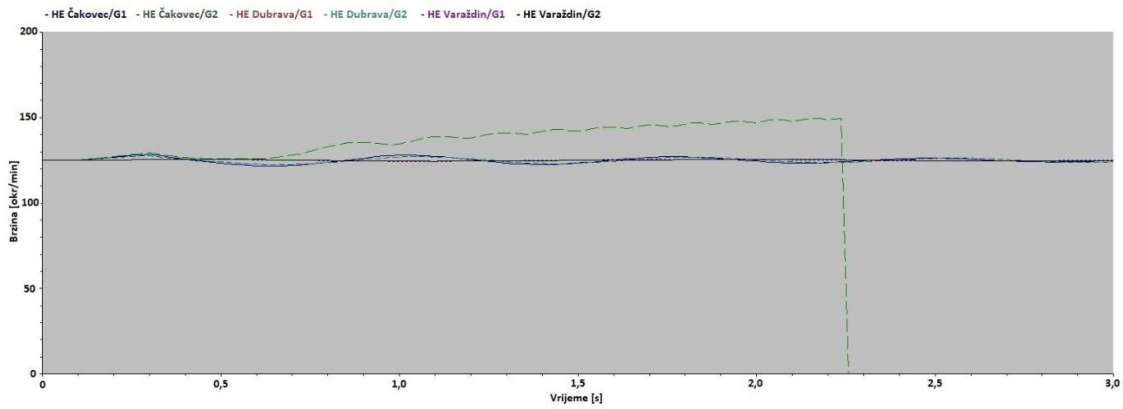
S produženjem trajanja kvara generator prolazi kritično vrijeme. Takav slučaj, za generator 2 u HE Čakovec prikazan je na slikama 4.13., 4.14. i 4.15. Trajanje kvara je 196 ms. Početni uvjeti rada svih generatora su identični kao u prethodnoj simulaciji. I u ovom slučaju, kao kod nestabilnog njihanja u HE Dubrava, generator počinje usporavati nakon otklanjanja kvara, no zbog prevelike kinetičke energije akumulirane za vrijeme ubrzavanja, generator gubi sinkronizam.



Slika 4.13. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms

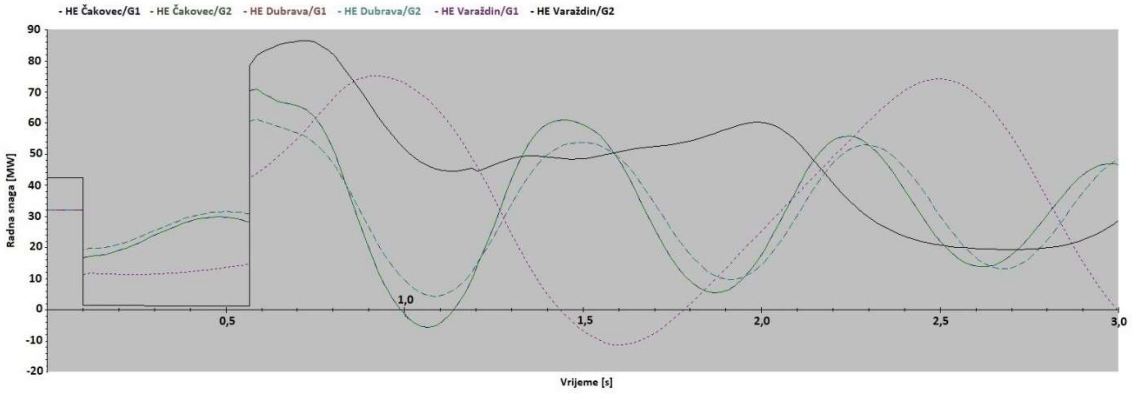


Slika 4.14. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms

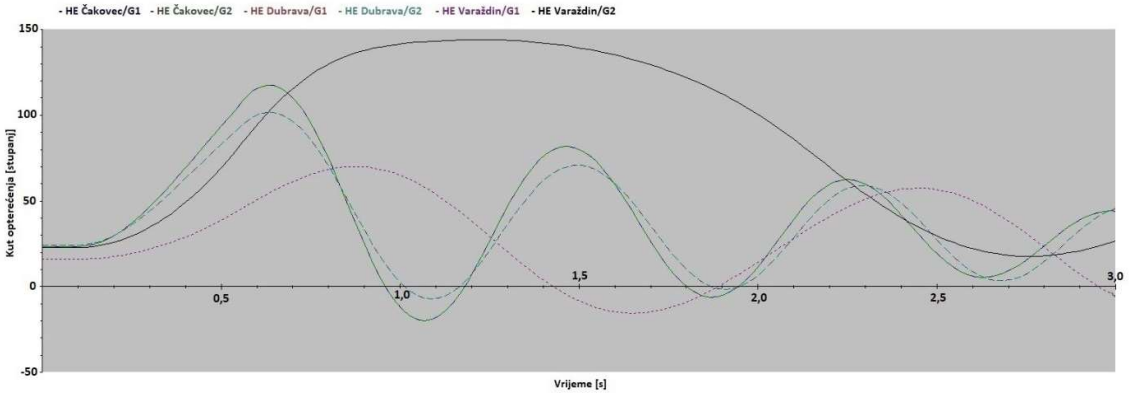


Slika 4.15. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms

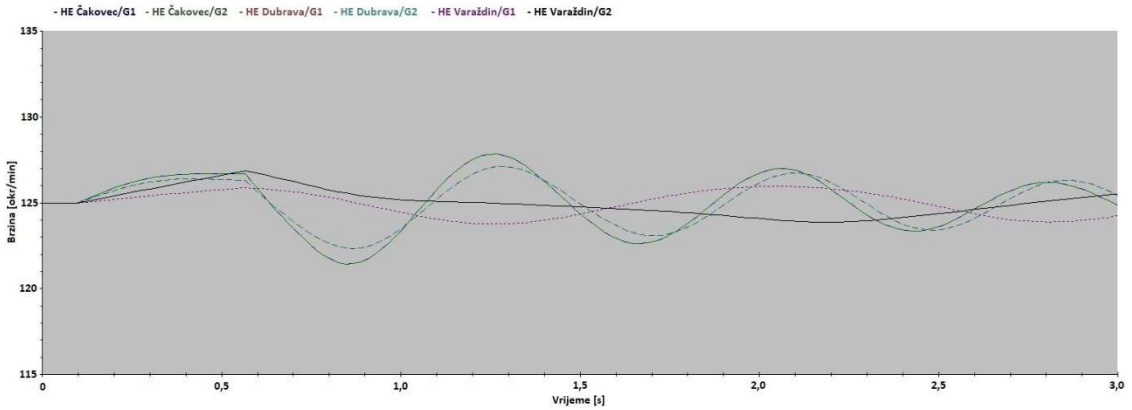
Generatori u HE Varaždin imaju drugačije karakteristike od onih u HE Dubrava i HE Čakovec. Ako se usporede vrijednosti iz tablica 4.1., 4.2. i 4.3. može se primjetiti da generatori u HE Varaždin imaju različitu nazivnu snagu i nazivni napon od onih u HE Dubrava i HE Čakovec. Ipak, najveća razlika koja se može uočiti, a koja ima utjecaja na problematiku stabilnosti generatora, je u vrijednosti momenta inercije. Generatori u HE Dubrava i HE Čakovec imaju moment inercije 1150 tm^2, odnosno $1{,}15x10^6$ kgm^2. Moment inercije generatora u HE Varaždin iznosi 7000 tm^2, odnosno $7x10^6$ kgm^2. Podatak koji se unosi za pojedini generator u programskom paketu ETAP je normalizirana konstanta inercije *H* i ona za generatore 2 u HE Dubrava i HE Čakovec iznosi 2,34 MWs/MVA, dok za generator 2 u HE Varaždin iznosi 11,99 MWs/MVA. Ta je konstanta definirana u drugom poglavlju, izrazom (2.12) i označava pohranjenu kinetičku energiju u MWs pri nazivnoj brzini vrtnje i pri nazivnoj snazi generatora. Očito je da je za ubrzavanje i usporavanje rotora generatora 2 u HE Varaždin potrebna veća količina kinetičke energije, odnosno više vremena. Za slučaj da spomenuti generator radi pri nazivnoj radnoj snazi i da je napon 104 % nazivnog napona generatora kritično vrijeme kvara iznosi 466 ms. Ponašanje generatora 2 pri stabilnom njihanju prikazano je na slikama 4.16., 4.17. i 4.18. Iz prikazanih dijagrama je vidljivo da kut opterećenja i brzina vrtnje agregata rastu puno sporije nego u prethodnim slučajevima. Kut opterećenja dostiže makasimum od 143,98° tek 1,17 s nakon pojave kvara, odnosno 704 ms nakon otklanjanja kvara.



Slika 4.16. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms

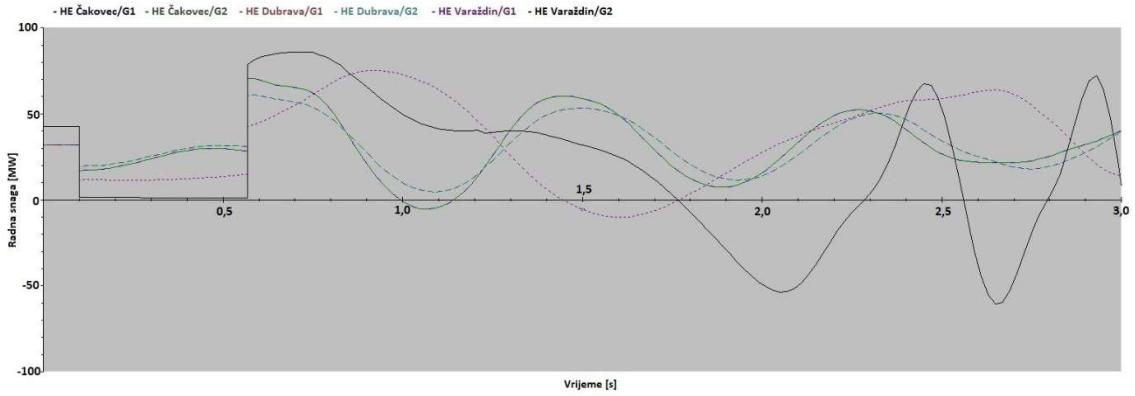


Slika 4.17. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms

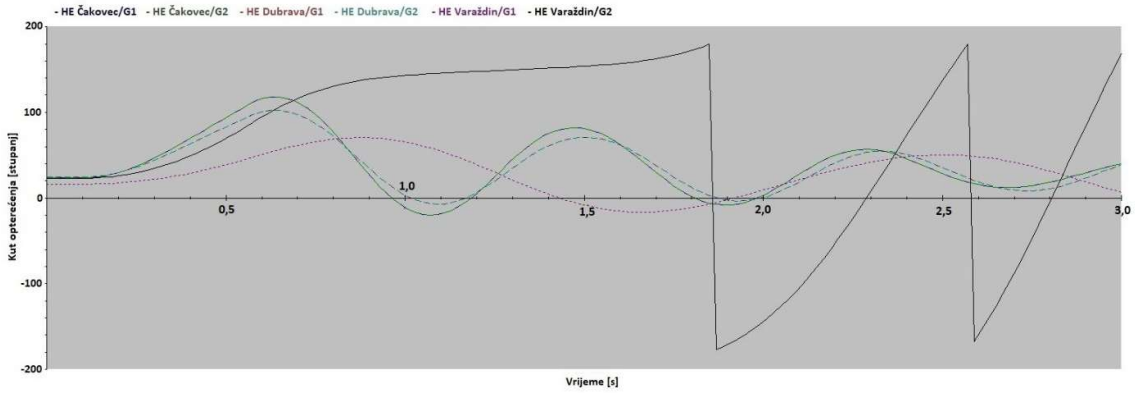


Slika 4.18. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms

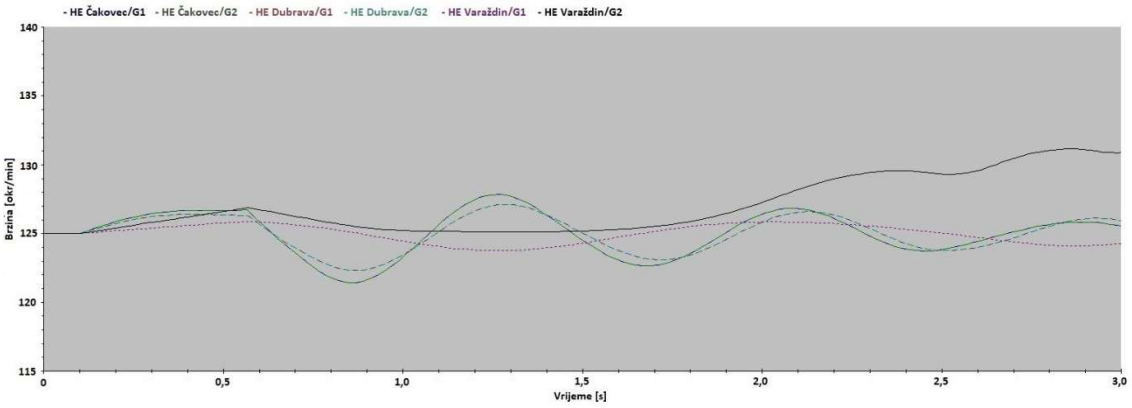
Prekorači li se kritično vrijeme trajanja kvara generator 2 u HE Varaždin neće više moći zadržati sinkronizam te dolazi do ispada iz koraka. Na slikama 4.16., 4.17. i 4.18. prikazani su rezultati simulacije za događaj u kojem je kvar trajao 468 ms. Interesantno je napomenuti da će kut od 150° biti dosegnut tek za 1,269 s od početka kvara, odnosno za 901 ms od prestanka kvara. Isto tako treba primjetiti da kut opterećenja na početku kvara iznosi 22,83° kod stabilnog i nestabilnog njihanja. Prema kriteriju jednakih površina prikazanim na slici 2.7. očekivano je da je kritično vrijeme generatora veće.



Slika 4.19. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms

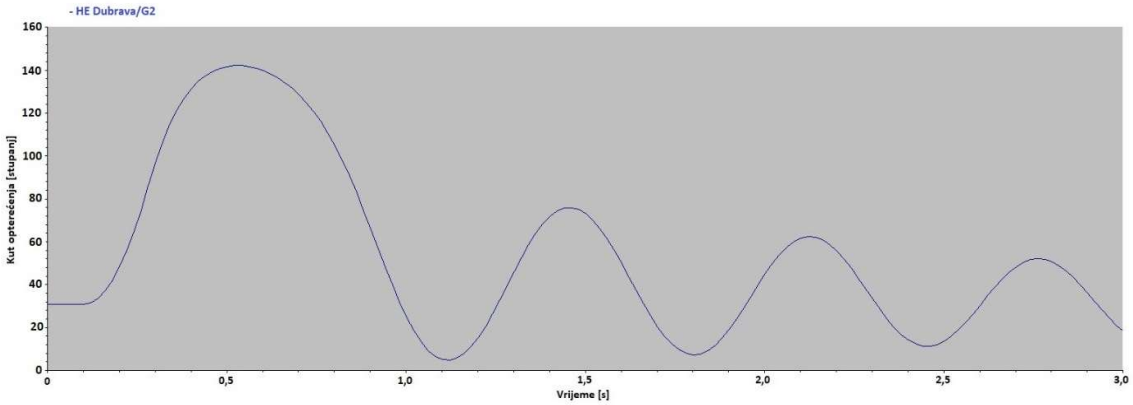


Slika 4.20. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms

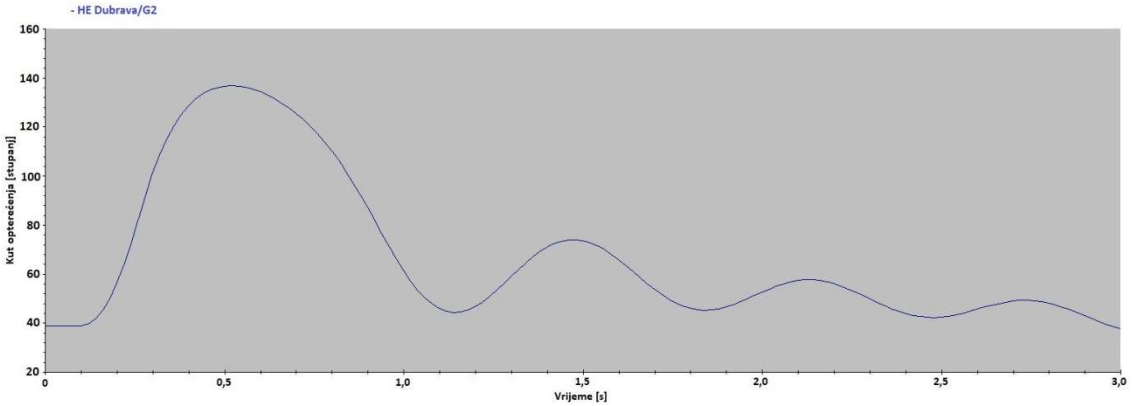


Slika 4.21. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms

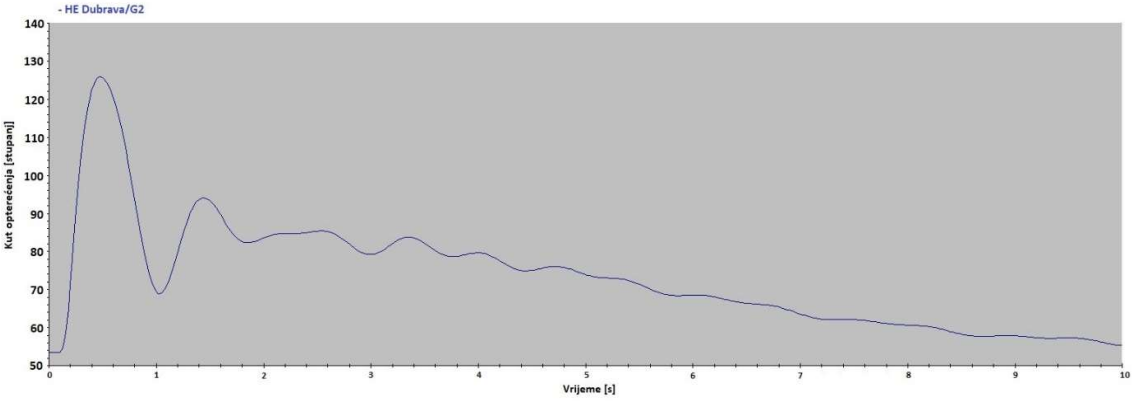
Već je ranije, u poglavlju o pojmu stabilnosti, spomenuto koji sve faktori utječu na prijelaznu stabilnost generatora. U simulacijama za HE Dubrava i HE Čakovec vidljivo je da su kutovi opterećenja koje dostižu identični, ali manje opterećeni generatori, znatno niži pa je pri tim uvjetima i kritično vrijeme kvara niže. U prikazanim simulacijama svi generatori rade sa 104 % nazivnog napona generatora. S obzirom da napon generatora može varirati u dozvoljenom opsegu napravljene su simulacije za prijelaznu stabilnost generatora 2 u HE Dubrava pri naponu 104 %, 100 % i 95 %. Simulacije za stabilno njihanje generatora prikazane su na slikama 4.22., 4.23. i 4.24. Primjetno je da je kut opterećenja na početku kvara najveći kod najnižeg napona, a najmanji kod najvišeg napona generatora. Početni kutovi opterećenja za 95 %, 100 % i 104 % nazivnog napona generatora iznose redom 53,37°, 38,97° i 30,74°. S obzirom da je snaga generatora proporcionalna naponu generatora, prema izrazu (2.20) očekivano je da će pri konstantnoj radnoj snazi generatora, uz niži napon i kut opterećenja biti veći. Može se primijetiti da i maksimalni iznosi kuta opterećenja pri stabilnom njihanju variraju pa postižu maksimalne iznose od 127,28°, 136,92° i 142,03° pri naponu generatora od 95 %, 100 % i 104 % nazivnog napona.



Slika 4.22. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 104 % nazivnog napona generatora – stabilno njihanje

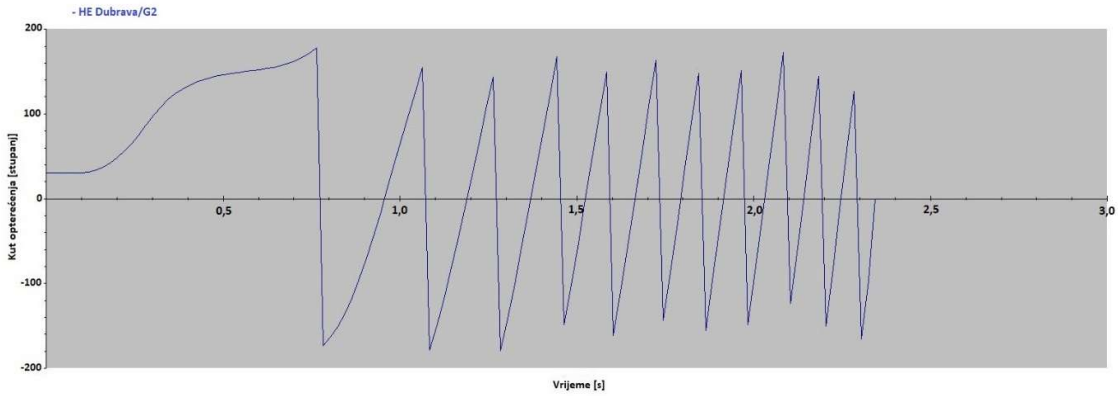


Slika 4.23. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 100 % nazivnog napona generatora – stabilno njihanje

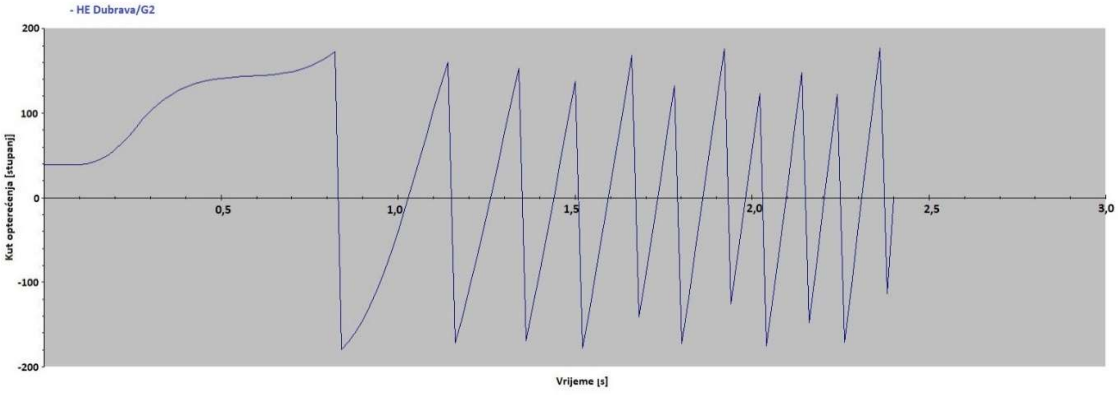


Slika 4.24. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 95 % nazivnog napona generatora – stabilno njihanje

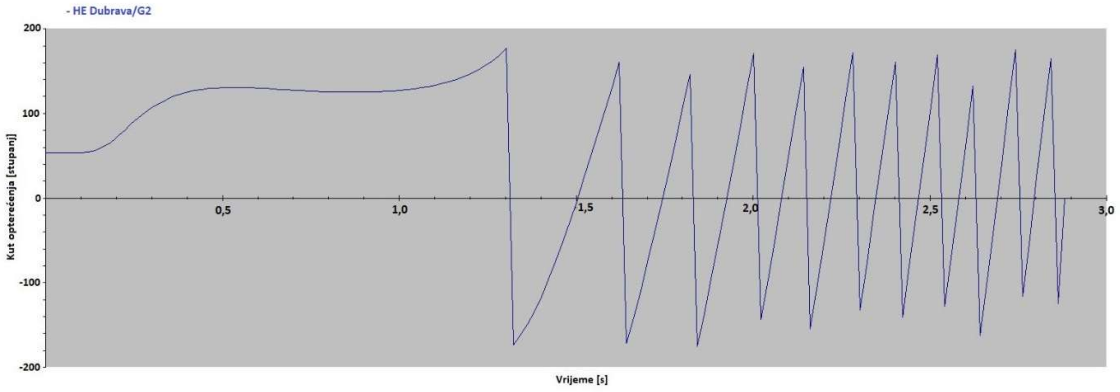
Za generator 2 u HE Dubrava napravljene su simulacije za tri iznosa napona generatora za slučaj da se kritično vrijeme trajanja kvara prekorači i generator izgubi sinkronizam. Kritična vremena trajanja kvara iznose 120 ms, 158 ms i 182 ms pri iznosima napona od 95 %, 100 % i 104 % nazivnog napona generatora. Spomenute simulacije prikazane su na slikama 4.25., 4.26. i 4.27. Iz simulacija je očito da se sa snižavanjem napona povećava vrijeme od pojave kvara do ispada iz sinkronizma pa ono iznosi približno 600 ms, 700 ms i 1,2s pri iznosima napona od redom 104 %, 100 % i 95 % nazivnog napona generatora.



Slika 4.25. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 104 % nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje



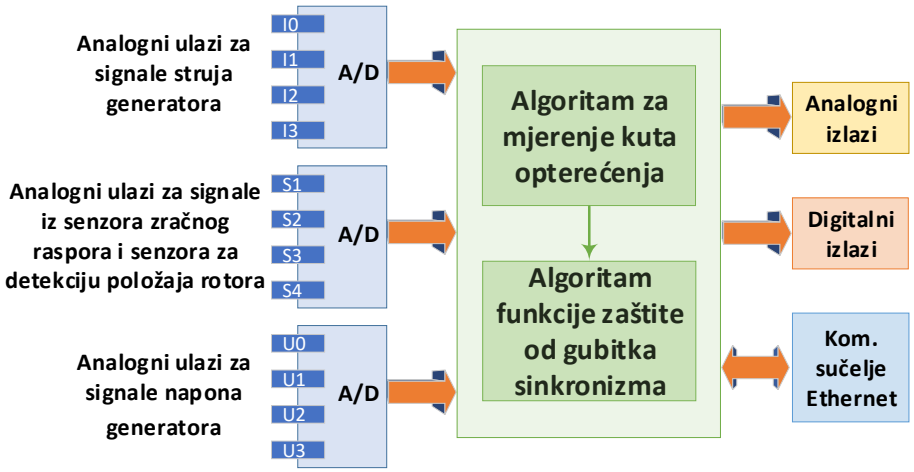
Slika 4.26. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 100 % nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje



Slika 4.27. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 95 % nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje

5. MODEL DETEKCIJE GUBITKA SINKRONIZMA GENERATORA NA OSNOVI IZRAVNOG MJERENJA KUTA OPTEREĆENJA

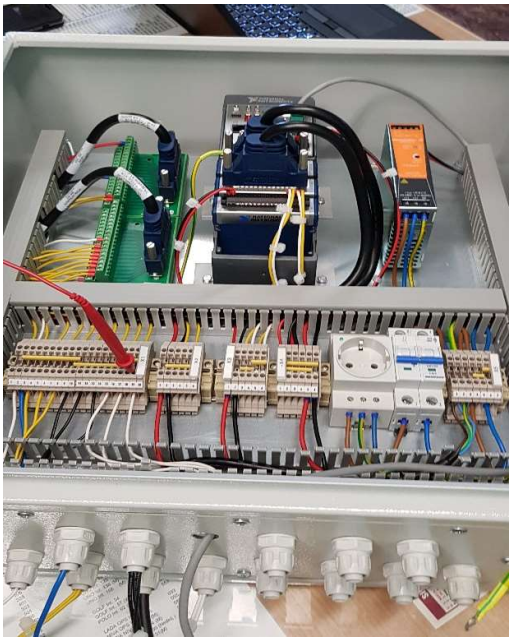
U ovom radu predložen je novi način detekcije gubitka sinkronizma generatora koji se temelji na izravnom mjerenju kuta opterećenja ili mjerenju kuta opterećenja u realnom vremenu [31] - [33]. Kako bi se ovaj pristup detekcije gubitka sinkronizma generatora mogao primijeniti potrebno je osigurati vrlo točno mjerenje kuta opterećenja i sa što većom vremenskom rezolucijom. Prema tome model detekcije gubitka sinkronizma generatora na osnovi izravnog mjerenja kuta opterećenja, koji je opisan u ovom poglavlju, sastoji se od dva dijela ili dvije funkcijske cjeline. Jedan dio je funkcionalnost izravnog mjerenja kuta opterećenja u realnom vremenu, a drugi dio je algoritam zaštite kojim se detektira gubitak sinkronizma. U sklopu istraživanja definirani su algoritam za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu i algoritam zaštite od gubitka sinkronizma generatora. U svrhu ispitivanja navedenih algoritama i ispitivanja funkcionalnosti predloženog modela realizirana je razvojna okolina koja se sastoji od sklopovske opreme i programa. Na slici 5.1. prikazan je implementirani funkcionalni model zaštite generatora od gubitka sinkronizma.



Slika 5.1. Funkcionalni model za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja

Funkcionalni model implementiran je na sklopovskoj platformi *National Instruments* (NI) koja se sastoji od upravljačke jedinice cRIO-9090, modula analognih ulaza NI 9205, modula

digitalnih ulaza i izlaza NI 9375 i modula strujnih izlaza NI 9266. Razvijene funkcionalnosti obrade ulaznih podataka i algoritama implementirane su kroz nekoliko programa. Svi programi ili aplikacije razvijeni su u programskom alatu NI LabVIEW. Na slici 5.2. prikazana je razvojna okolina s NI sklopovskom opremom koja je korištena prilikom ispitivanja modela za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja.



Slika 5.2. Razvojna okolina na kojoj je implementiran model za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja

Kako je prikazano na slikama 5.1. i 5.2., na sklopovskoj platformi implementirane su funkcije za prikupljanje i obradu signala iz senzora, algoritam mjerenja kuta opterećenja u realnom vremenu i algoritam za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja. Sklopovska platforma prikuplja ulazne podatke preko analognih ulaza pri čemu se tri ulaza koriste za napone generatora, tri za struje generatora, tri za signale iz senzora zračnog raspora i jedan za signal iz senzora za detekciju položaja rotora. Kod A/D pretvorbe koristi se frekvencija uzorkovanja od 10 kHz kod svih analognih ulaza.

5.1. Algoritam za izravno mjerenje kuta opterećenja

Da bi se kut opterećenja mogao koristiti u svrhu zaštite generatora mora se osigurati njegovo pouzdano i točno mjerenje. U ovom poglavlju opisan je algoritam za izravno mjerenje kuta

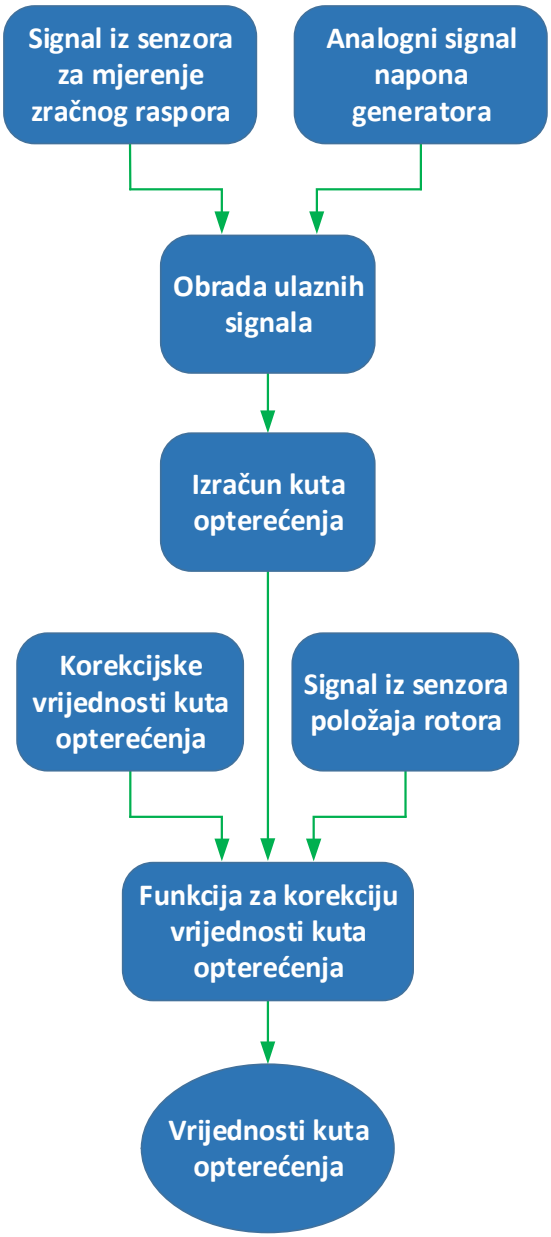
opterećenja sinkronog generatora razvijen u sklopu ovog istraživanja. Algoritam se temelji na metodi mjerenja kuta opterećenja koristeći kapacitivni senzor zračnog raspora.

Funkcionalnosti algoritma za mjerenje kuta opterećenja uključuju mjerenje širine zračnog raspora, mjerenje napona generatora i detekciju pozicije rotora. Glavni je cilj bio razviti algoritam za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu koji će osigurati stabilan proračun ili mjerenje kuta opterećenja svakih 20 ms, tj. nakon svake periode (za frekvenciju sustava od 50 Hz). S obzirom da se vrijednost kuta opterećenja određuje na isti način kao i vrijednost fazora, ovo je najveća moguća vremenska rezolucija u kojoj se može mjeriti. U usporedbi s metodom mjerenja kuta opterećenja prikazanom u poglavlju 3.2, a koja se najviše koristi u praksi, ova metoda uzima u obzir nesavršenost rotora. Nesavršenost rotora može se objasniti geometrijskom nesavršenošću koja izravno utječe na točnost mjerenja širine zračnog raspora, a kasnije i na vrijednost kuta opterećenja. Geometrijska nesavršenost rotora zapravo je strukturne prirode i prisutna je u svakom generatoru. Nesavršenost je specifična za svaki rotor i konstantna je u vremenu, što znači da je moguće korigirati mjerenje širine zračnog raspora za svaku specifičnu nesavršenost. Sve prethodno navedene činjenice su uzete u obzir u razvijenom algoritmu razvijenom za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu.

Dijagram toka razvijenog algoritma za izračun kuta opterećenja u realnom vremenu prikazan je na slici 5.3., a u nastavku će ukratko biti opisane glavne značajke algoritma. Za potpunu funkcionalnost algoritma potrebno je osigurati mjerenja zračnog raspora, napona generatora i signal iz senzora za detekciju položaja rotora. Za osnovnu funkcionalnost algoritma dovoljno je imati jedno mjerenje zračnog raspora i jednog faznog napona generatora, no u tom slučaju nije moguće postići maksimalnu točnost odnosno kvalitetu mjerenja koja se može postići ovim algoritmom. Korištenjem više od jednog senzora zračnog raspora i tri napona generatora (za svaku fazu) osigurava se pouzdanost mjerenja, a da se pri tome znatno ne povećavaju troškovi u odnosu na implementaciju sustava mjerenja s jednim senzorom zračnog raspora. Nakon obrade ulaznih signala dobivenih iz senzora zračnog raspora i mjernih transformatora, izračunava se kut opterećenja s rezolucijom mjerenja od 20 ms ili 50 vrijednosti u sekundi. Tako dobivene vrijednosti predstavljaju izravno izmjerene vrijednosti kuta opterećenja u realnom vremenu..

Kako bi dodatno poboljšali kvalitetu mjerenja kuta opterećenja unutar razvijenog algoritma, implementirana je funkcija za korekciju izravno izmjerenih vrijednosti kuta opterećenja, uzimajući u obzir geometrijsku nesavršenost rotora. Za rad te funkcije potrebno je osigurati korekcijske vrijednosti i podatak o poziciji rotora. Da bi se ovi podaci mogli koristiti u

algoritmu, prvo se mora odrediti položaj rotora. Položaj rotora se jednostavno određuje pomoću signala iz senzora za detekciju položaja rotora pomoću kojeg se detektira jedan okret rotora.



Slika 5.3. Dijagram toka algoritma za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu

Korekcijske vrijednosti određuju se u postupku kalibracije sustava za mjerenje kuta opterećenja. Postupak kalibracije sustava za mjerenje kuta opterećenja potrebno je obaviti samo jednom i to prije puštanja u pogon. Ukoliko se na generatoru u sklopu održavanja ili otklanjanja kvara izvode radovi koji za posljedicu imaju promjenu korekcijskih vrijednosti, potrebno je

ponovno napraviti kalibraciju (npr. promjena položaja senzora zračnog raspora ili mehanički zahvati na rotoru koji mijenjaju geometriju rotora). Korekcija izravno izmjerenih vrijednosti kuta opterećenja radi se na način da se od tih izmjerenih vrijednosti oduzimaju korekcije vrijednosti kuta opterećenja. Kod ovog postupka nužno je osigurati da se točno određena korekcijska vrijednost primjeni na točno određenu izmjerenu vrijednost kuta jer ona ovisi o položaju rotora. Ta usklađenost se postiže korelacijom korekcijskih vrijednosti, izmjerenih vrijednosti kuta opterećenja i signala iz senzora za detekciju položaja rotora.

Vrijednost kuta opterećenja u realnom vremenu dostupna je preko analognih izlaza i kao digitalni podatak iz upravljačke jedinice preko komunikacijske mreže na koju je povezana upravljačka jedinica. Rezultati ispitivanja algoritma za mjerenje kuta opterećenja dani su u poglavlju 6.1.

5.2. Algoritam za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja

Glavna ideja kod realizacije algoritma za detekciju gubitka sinkronizma bila je razviti algoritam koji će na temelju mjerenja kuta opterećenja generatora moći detektirati gubitak sinkronizma, odnosno ispad iz koraka sinkronog generatora. Kako bi se takav algoritam mogao realizirati potrebno je osigurati točno mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu, a što je osigurano algoritmom opisanim u prethodnom poglavlju. Kod implementacije funkcionalnosti algoritma bilo je važno, kod detekcije gubitka sinkronizma, osigurati mogućnost razlikovanja stabilnih od nestabilnih oscilacija. Sam algoritam sastoji se od nekoliko koraka ili funkcijskih cjelina, a na slici 5.4. prikazan je dijagram toka algoritma.

Za detekciju gubitka sinkronizma generatora algoritam kao ulazni podatak koristi mjerenje kuta opterećenja sinkronog generatora. Dodatno se još koriste mjerenja faznih napona generatora gdje se na temelju iznosa napona određuje kada je funkcija zaštite aktivna. Osim mjerenja kuta opterećenja i faznih napona generatora kao ulazni podaci koriste se parametri algoritma, no u sklopu algoritma ne radi se njihova validacija. Parametri algoritma definiraju se unutar konfiguracijske datoteke. Kako je vidljivo na slici 5.4. prvi korak algoritma je provjera ili validacija ulaznih podataka gdje se analiziraju vrijednosti napona generatora i mjerenja kuta opterećenja.



Slika 5.4. Dijagram toka algoritma za detekciju kvara gubitka sinkronizma generatora

Mjerenje kuta opterećenja direktno ovisi o naponu generatora kako je to opisanu u poglavlju 5.1, pa je zbog toga u algoritmu implementirana validacija mjerenja napona generatora jer samo mjerenje kuta prije nego je generator uzbuđen nema smisla. Validacija napona generatora realizirana je na način da se uspoređuje mjerenje napona s postavljenim referentnim naponom U_{isk} čiji iznos mora biti manji ili jednak nazivnom naponu generatora U_n. Ukoliko je iznos bilo kojeg od faznog napona generatora manji od referentnog napona U_{isk} vrijednost varijable statusa funkcije zaštite SF postavlja se u neaktivan prema izrazima (5.1) do (5.7), a preostali uvjeti statusa funkcije vezano uz validaciju mjerenja napona su:

$$U_a < U_{isk} \implies SF = neaktivno \tag{5.1}$$

$$U_a \geq U_{isk} \implies SF = aktivno \tag{5.2}$$

$$U_b < U_{isk} \implies SF = neaktivno \tag{5.3}$$

$$U_b \geq U_{isk} \implies SF = aktivno \tag{5.4}$$

$$U_c < U_{isk} \implies SF = neaktivno \tag{5.5}$$

$$U_c \geq U_{isk} \implies SF = aktivno \tag{5.6}$$

$$U_{isk} \leq U_n \tag{5.7}$$

gdje su U_a, U_b i U_c efektivne vrijednosti faznih napona generatora. Vrijednost referentnog napona U_{isk} postavlja se kao ulazni parametar u konfiguracijskoj datoteci.

Kako je prethodno navedeno mjerenje kuta opterećenja može se realizirati na način da se mjeri samo na jednoj fazi generatora, u dvije ili u sve tri faze. U slučaju da se mjeri kut opterećenja u sve tri faze generatora i u normalnom pogonu generatora kao rezultat mjerenja trebalo bi dobiti tri ista podatka o kutu opterećenja. Za funkcionalnost algoritma dovoljno je jedno mjerenje, a sam algoritam ima mogućnost korištenja od jednog do tri mjerenja kuta opterećenja. Ukoliko se koristi više od jednog mjerenja kuta opterećenja u algoritmu se radi validacija mjerenja kuta opterećenja na način da se međusobno uspoređuju vrijednosti tih mjerenja te se odabire jedno od ispravnih mjerenja. Ova validacija radi se zbog toga što se može dogoditi da se zbog kvara senzora zračnog raspora ili mjerenja napona kao rezultat mjerenja dobiju krivi podaci kuta opterećenja, a što može utjecati na funkcionalnost algoritma za detekciju gubitka sinkronizma. Validacija ulaznih parametara mjerenja kuta opterećenja definira se na sljedeći način:

$$A = |\,\delta_a - \delta_b| \leq \delta_{maxr} \tag{5.8}$$

$$B = |\,\delta_a - \delta_c| \leq \delta_{maxr} \tag{5.9}$$

$$C = |\,\delta_b - \delta_c| \leq \delta_{maxr} \tag{5.10}$$

gdje je δ_a izmjerena vrijednost kuta opterećenja generatora koristeći fazni napon U_a, δ_b izmjerena vrijednost kuta opterećenja generatora koristeći fazni napon U_b, δ_c izmjerena vrijednost kuta opterećenja generatora koristeći fazni napon U_c, i δ_{maxr} maksimalno dozvoljena razlika između dvije izmjerene vrijednosti kuta opterećenja generatora. Da bi funkcija zaštite generatora bila aktivna dva od tri izraza (5.8), (5.9) i (5.10) moraju biti zadovoljeni odnosno istiniti, naravno u slučaju da kao ulazni podaci postoje sva tri mjerenja kuta opterećenja. Ukoliko su zadovoljena dva od tri izraza odabire se jedno od mjerenja kao referentno za funkcionalnost algoritma i to u izrazima u kojima je zadovoljen uvjet da je razlika između izmjerenih vrijednosti kuta opterećenja manja od maksimalno dozvoljene δ_{maxr}, a koja se definira kao ulazni parametar u konfiguracijskoj datoteci. Pregled uvjeta na temelju kojih se

odlučuje vrijednost parametra statusa funkcije zaštite *SF* te koje se mjerenje kuta uzima kao referentno dan je u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Pregled uvjeta na temelju kojih se određuje status funkcije zaštite od gubitka sinkronizma

A	B	C	Status funkcije SF	Korišteno mjerenje kuta opterećenja
0	0	0	neaktivno	-
0	0	1	neaktivno	-
0	1	0	neaktivno	-
0	1	1	aktivno	δ_c
1	0	0	neaktivno	-
1	0	1	aktivno	δ_b
1	1	0	aktivno	δ_a
1	1	1	aktivno	δ_a

Validacija ulaznih parametara realizirana je kao zasebna funkcija koja se ciklički izvršava neovisno o ostalim funkcijskim cjelinama algoritma. Na taj način osigurano je kontinuirano praćenje kvalitete ulaznih podataka i brzo deaktiviranje funkcije za detekciju gubitka sinkronizma kako ne bi došlo do pogrešne detekcije kvara uslijed netočnih ulaznih podataka.

Nakon učitavanja ulaznih parametara algoritma iz konfiguracijske datoteke i validacije ulaznih parametra sljedeći korak je izvršavanje funkcije za detekciju kvara gubitka sinkronizma generatora, a koja će biti detaljnije opisana u nastavku. Funkcija detekcije kvara gubitka sinkronizma ili ispada iz koraka generatora realizirana je na način da na temelju praćenja dinamike kretanja kuta opterećenja može u kratkom vremenskom intervalu detektirati pojavu kvara i izdati nalog za isključenje generatora kako bi se izbjegla eventualna oštećenja generatora. Uvjeti praćenja dinamike promjene kuta opterećenja i generiranja upozorenja i naloga za isključenje generatora definiraju se preko parametara koji se postavljaju u konfiguracijskoj datoteci i učitavaju se kod pokretanja. Unutar funkcije kontinuirano se nadzire iznos mjerenja kuta opterećenja generatora te se na temelju vrijednosti kuta vrše daljnje obrade i generiraju se upozorenja i nalozi za isključenje generatora prema uvjetima definiranim u sljedećim izrazima:

$$0 < \delta < \delta_1 \implies normalno\ pogonsko\ stanje \tag{5.11}$$

$$\delta_1 \leq \delta < \delta_2 \implies upozorenje\ 1.stupanj \tag{5.12}$$

$$\delta_2 \leq \delta < \delta_3 \implies upozorenje\ 2.stupanj \tag{5.13}$$

$$\delta_3 \leq \delta < \delta_4 \implies praćenje\ dinamike\ promjene\ kuta\ opterećenja \tag{5.14}$$

$$\delta \geq \delta_4 \implies nalog\ za\ isključenje\ generatora \tag{5.15}$$

gdje je δ aktualna izmjerena vrijednost kuta opterećenja, δ_1 vrijednost kuta opterećenja nakon koje se generira upozorenje 1. stupnja, δ_2 vrijednost kuta opterećenja nakon koje se generira upozorenje 2. stupnja, δ_3 vrijednost kuta opterećenja nakon koje se prati dinamika promjene kuta opterećenja i δ_4 vrijednost kuta opterećenja kod koje se trenutno generira nalog za isključenje generatora. Ponašanje algoritma u svakom od ovih područja bit će objašnjeno u nastavku. Granične vrijednosti kutova opterećenja δ_1, δ_2, δ_3 i δ_4 definiraju se kao ulazni podaci u konfiguracijskoj datoteci.

Područje u kojem kut opterećenja generatora ima vrijednosti između nula i δ_1 stupnjeva smatra se normalnim pogonskim stanjem. Bez obzira na to, praćenje dinamike promjene kuta opterećenja paralelno se izvršava u svim područjima ili zonama, ali to je praćenje pasivno bez mogućnosti promjene izlaznih podataka. U području kada je izmjerena vrijednost kuta opterećenja δ između vrijednosti δ_1 i δ_2 generira se na izlazu signal upozorenja prvog stupnja koji ukazuje da s obzirom na vrijednost kuta opterećenja, generator više nije u normalnim ili očekivanim pogonskim uvjetima. Kada se iznos kuta opterećenja nalazi između vrijednosti δ_2 i δ_3, isto kao i u prethodnom slučaju generira se upozorenje, ali ovog puta drugog stupnja što dodatno ukazuje da se generator sve više približava granici stacionarne stabilnosti. U oba slučaja prati se stacionarna ili izmjerena vrijednost kuta opterećenja.

Aktivno praćenje dinamike promjene kuta opterećenja generatora odvija se kada iznos kuta opterećenja dosegne iznos δ_3 ili više. Funkcionalnost praćenja dinamike promjene kuta realizirana je na način da se na N_1 uzastopnih uzoraka mjerenja kuta, primjenom linearne regresije temeljene na metodi najmanjih kvadrata, izračunavaju parametri pravca odnosno koeficijent pravca koji predstavlja trend promjene kuta u određenom vremenskom intervalu. Vremenski intervali ili prozor određen je brojem uzoraka N_1 i vremenskoj rezoluciji mjerenja kuta opterećenja f_m prema sljedećem izrazu:

$$T_p = N_1 \cdot f_m \tag{5.16}$$

gdje je T_p širina vremenskog prozora. Na primjer, ukoliko bi se u izračunu koristilo 10 izmjerenih vrijednosti kuta s rezolucijom mjerenja od 20 ms vremenski prozor bio bi širine 200 ms. Kako je broj uzoraka N_1 ulazni parametar koji se definira u konfiguracijskoj datoteci veličina vremenskog

prozora nije fiksna već se definira nakon pokretanja algoritma u fazi učitavanja ulaznih parametara iz konfiguracijske datoteke. Prozor je realiziran kao FIFO (engl. *First In First Out*) red, a izračun trenda promjene izvršava se nakon svake promjene podataka u redu odnosno svakih 20 ms u našem slučaju. Izračun trenda promjene ili koeficijenta pravca k u stupnjevima po sekundi izvršava se kontinuirano bez obzira na iznos kuta opterećenja što dodatno doprinosi brzini detekcije kvara jer su podaci spremni za obradu čim se aktivira praćenje dinamike promjene kuta opterećenja. Nakon aktivacije ove funkcionalnosti izračunate vrijednosti koeficijenta pravca k pohranjuju se u drugi FIFO red. Broj elemenata tog reda definiran je brojem izračunatih koeficijenata pravaca N_2 koji se pohranjuju u red. Nakon što se napuni red sa svih N_2 koeficijenata pravaca k provjerava se iznos posljednjeg elementa tog reda k_{N2}. Ukoliko je posljednji element tog reda veći od nule izdaje se nalog za isključenje generatora, a ukoliko je manji od nule nastavlja se praćenje dok vrijednost kuta opterećenja δ ne padne ispod granične vrijednosti δ_3. Za cijelo vrijeme kada je funkcija praćenja dinamike promjene kuta opterećenja aktivna red se ažurira novim podacima koeficijenata pravaca k. Uvjeti za aktiviranje i deaktiviranje praćenja dinamike promjene kuta i generiranje naloga za isključenje generatora mogu se prikazati sljedećim izrazima:

$$(k_{N2} < 0) \wedge (\delta < \delta_3) \implies praćenje\ promjene\ kuta\ neaktivno \tag{5.17}$$

$$(k_{N2} < 0) \wedge (\delta > \delta_3) \implies nastaviti\ s\ praćenjem\ promjene\ kuta \tag{5.18}$$

$$k_{N2} > 0 \implies generiranje\ naloga\ za\ isključenje\ generatora \tag{5.19}$$

Broj izračunatih koeficijenata pravaca N_2 ulazni je parametar koji se definira u konfiguracijskoj datoteci.

Granična vrijednost kuta opterećenja generatora u dinamičkim uvjetima koja se može dosegnuti prije isključenja generatora definirana je iznosom kuta opterećenja od δ_4. Kada izmjerena vrijednost kuta opterećenja δ dosegne tu vrijednost ili veću odmah se izdaje nalog za isključenje generatora bez vremenskog zatezanja koje postoji u prethodnom području kada je iznos kuta opterećenja između δ_3 i δ_4. Ovaj uvjet implementiran je kao pričuvna zaštita ukoliko se ne izda nalog za isključenje generatora iz prethodnih uvjeta, a kut opterećenja prelazi kritičnu vrijednost ili je dinamika porasta kuta opterećenja prebrza da bi se detektirala kroz funkcionalnost praćenja dinamike promjene kuta opterećenja.

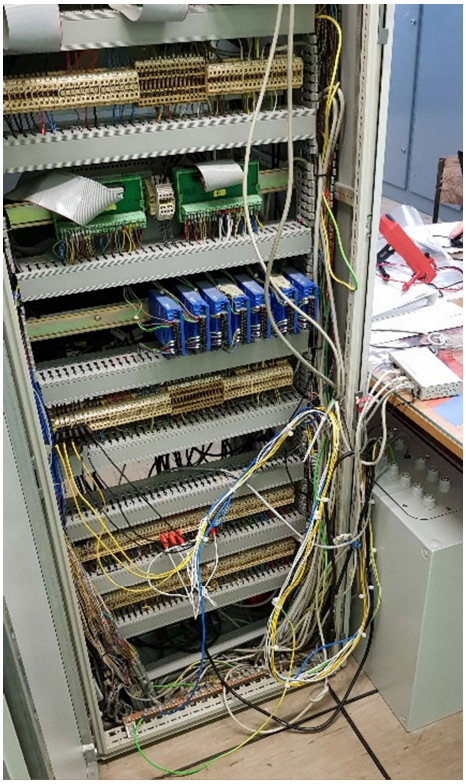
Funkcija zaštite implementirana je na način da omogućava definiranje svih ključnih parametara algoritma kroz konfiguracijsku datoteku kako bi se omogućila što bolja osjetljivost u različitim pogonskim uvjetima generatora.

Izlazni podaci ili rezultati algoritma za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja su signali upozorenja prvog i drugog stupnja, signal ili nalog za isključenje generatora i status funkcije zaštite. Ovi signali dostupni su preko analognih i digitalnih izlaza na sklopovskoj opremi te se na taj način mogu razmjenjivati s drugim sustavima. Isto tako, svi navedeni podaci dostupni su u digitalnom formatu iz upravljačke jedinice preko komunikacijske mreže na koju je povezana.

6. REZULTATI ISPITIVANJA ALGORITMA ZA MJERENJE KUTA OPTEREĆENJA I ALGORITMA ZA DETEKCIJU GUBITKA SINKRONIZMA

Ispitivanje funkcionalnosti algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja provedeno je u stvarnom okruženju na hidrogeneratoru G2 u HE Dubrava. Na generatoru na kojem je obavljeno ispitivanje algoritma, za potrebe monitoring sustava agregata ugrađena su tri senzora zračnog raspora i senzora za detekciju položaja rotora te su ti signali dovedeni u ormar monitoring sustava. Uz njih u ormaru monitoring sustava dovedeni su i analogni signali napona i struja generatora. Prema tome akvizicija potrebnih analognih signala realizirana je na način da je sklopovska platforma povezana u ormar sustava monitoringa u kojem su bili dostupni prethodno navedeni analogni signali. U sklopu monitoring sustava za mjerenje zračnog raspora u generatoru koristi se kapacitivni senzor zračnog raspora. Slika 6.1. prikazuje ormar sustava monitoringa agregata na koji je povezana sklopovska platforma pri čemu se sklopovska platforma nalazi u ormariću s desne strane ormara monitoring sustava. Na taj način je vrlo brzo i jednostavno obavljena instalacija testnog sustava. Nakon instalacije napravljen je postupak kalibracije algoritma u sklopu kojeg se određuje referentni valni oblik iz senzora zračnog raspora kada je kut opterećenja jednak nuli i određuju se korekcijske vrijednosti kuta opterećenja. Postupak kalibracije obavlja se u praznom hodu i pri stabilnoj radnoj snazi generatora.

Algoritam za detekciju gubitka sinkronizma nije bilo moguće ispitati u pogonskim uvjetima jer je za njegovo ispitivanje potrebno provjeriti odziv algoritma kod pojave kvara, što je nemoguće u stvarnom okruženju. Zbog toga je ispitivanje funkcionalnosti algoritma za detekciju gubitka sinkronizma obavljeno u laboratorijskom okruženju. Ispitivanje algoritma izvršeno je na način da se ispitao odziv algoritma na simulirane ulazne vrijednosti kuta opterećenja, a što je dovoljno da bi se donio zaključak o njegovoj funkcionalnosti. Kako bi se moglo izvršiti ispitivanje algoritma na taj način bilo je potrebno prilagoditi funkcionalnost validacije ulaznih podataka gdje je onemogućen dio vezan uz validaciju napona generatora. Ostale funkcionalnosti algoritma koristile su se kako je opisano u poglavlju 5.2. Rezultati funkcionalnog ispitivanja algoritma za detekciju gubitka sinkronizma prikazani su u nastavku.



Slika 6.1. Prikaz povezivanja sklopovske platforme u ormar sustava monitoringa agregata kod ispitivanja u stvarnom okruženju

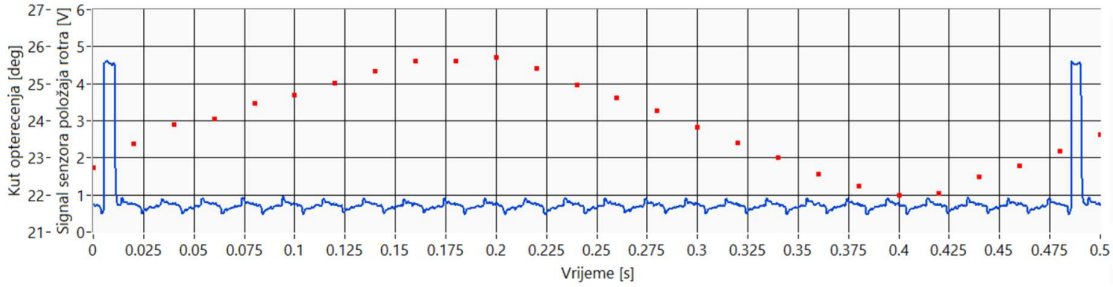
6.1. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja

Sa sklopovskom platformom opisanom u petom poglavlju ispitana je funkcionalnost algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu i to u stvarnim pogonskim uvjetima hidrogeneratora G2. U nastavku su prikazani rezultati provedenog ispitivanja.

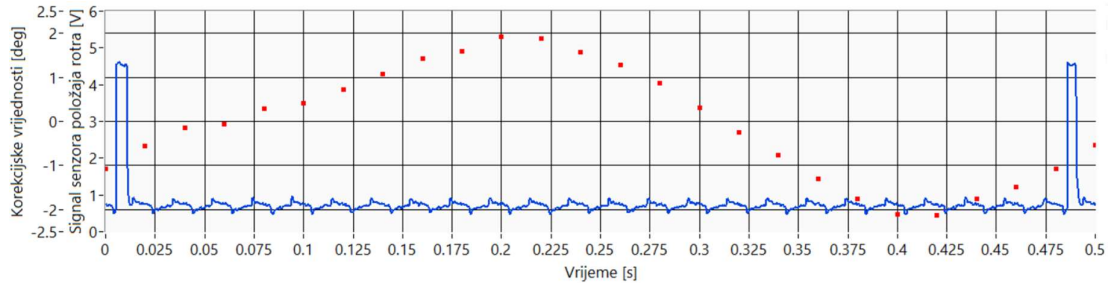
Slike 6.2., 6.3. i 6.4. prikazuju rezultate ispitivanja algoritma gdje se može vidjeti utjecaj korekcijskih vrijednosti na rezultat mjerenja kuta opterećenja. Radi preglednosti ovdje su prikazani rezultati za jedan okret rotora. Slika 6.2. prikazuje rezultate mjerenja kuta opterećenja kada funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja nije primijenjena. Slika 6.3. prikazuje rezultate određivanja korekcijskih vrijednosti u korelaciji sa signalom iz senzora za detekciju položaja rotora koji su dobiveni u sklopu ispitivanja algoritma. Slika 6.4. prikazuje rezultate mjerenja kuta opterećenja kada je funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja primijenjena, odnosno kada su primijenjene korekcijske vrijednosti. Kako je vidljivo na slikama

6.2., 6.3. i 6.4., u jednom okretu generatora postoje 24 izmjerene vrijednosti kuta opterećenja, pa prema tome postoje i 24 korekcijske vrijednosti. Iznos od 24 izmjerene vrijednosti po okretaju generatora proizlazi iz činjenice da jedan okret traje 480 ms jer je nominalna brzina generatora 125 okretaja u minuti, a rezolucija mjerenja kuta opterećenja je 20 ms. S obzirom da korekcijske vrijednosti predstavljaju geometrijsku nesavršenost rotora one su uvijek iste za svaki okret rotora.

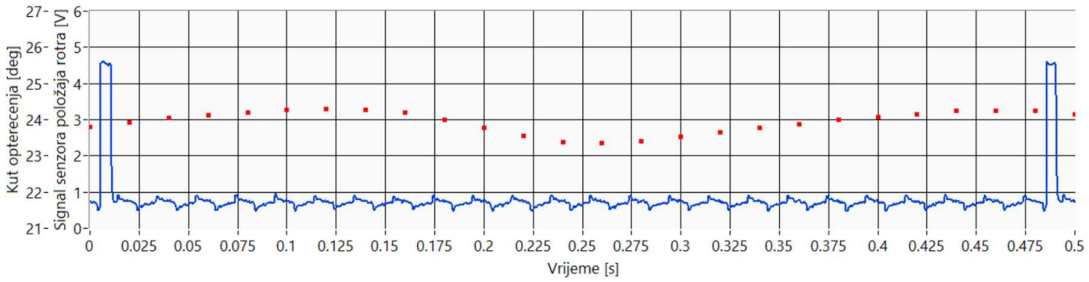
Rezultati jasno pokazuju da korekcija geometrijske nesavršenosti rotora poboljšava točnost mjerenja kuta opterećenja kod sinkronog generatora. Iznosi korekcijskih vrijednosti razlikuju se od generatora do generatora i nije moguće generalno ocijeniti koliko njihova primjena u algoritmu doprinosi poboljšanju mjerenja kuta opterećenja. Kako su te vrijednosti uvijek iste, njihov utjecaj je veći kod manjih iznosa, a manji kod većih iznosa kuta opterećenja. Analizom podataka dobivenih ispitivanjem proizlazi da je za generator na kojem je ispitivan algoritam, primjenom funkcije za korekciju vrijednosti kuta opterećenja u algoritmu prosječno povećana točnost mjerenja kuta opterećenja za 5,4% u odnosu na vrijednosti bez primjene te funkcije.



Slika 6.2. Rezultati mjerenja kuta opterećenja kada funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja nije primijenjena. Crvene točke predstavljaju vrijednosti kuta opterećenja, a plava krivulja signal iz senzora za detekciju položaja rotora.

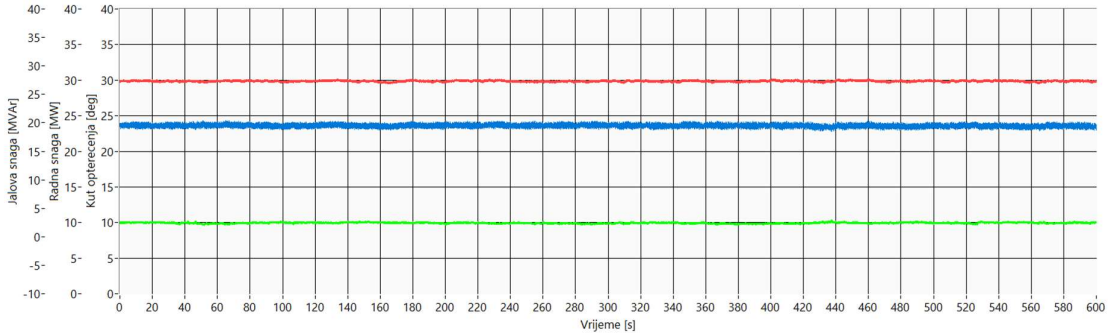


Slika 6.3. Rezultati određivanja korekcijskih vrijednosti u korelaciji sa signalom iz senzora za detekciju položaja rotora dobiveni u sklopu ispitivanja algoritma. Crvene točke predstavljaju korekcijske vrijednosti kuta opterećenja.



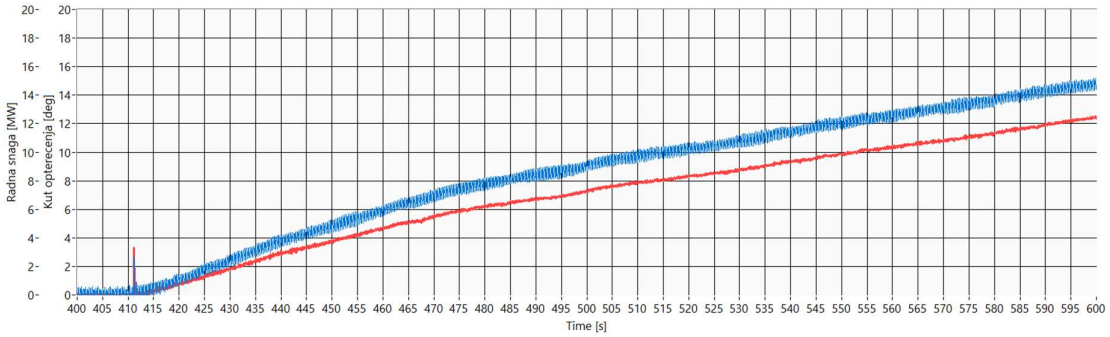
Slika 6.4. Rezultati mjerenja kuta opterećenja kada je funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja primijenjena. Crvene točke predstavljaju korigirane vrijednosti kuta opterećenja.

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja prethodno opisanog algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja u normalnom pogonu generatora. Na slici 6.5. prikazani su rezultati mjerenja kuta opterećenja kod stabilne radne i jalove snage generatora. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da je i mjerenje kuta opterećenja u skladu s očekivanim vrijednostima odnosno da su oscilacije u iznosu kuta opterećenja vidljivo smanjene.



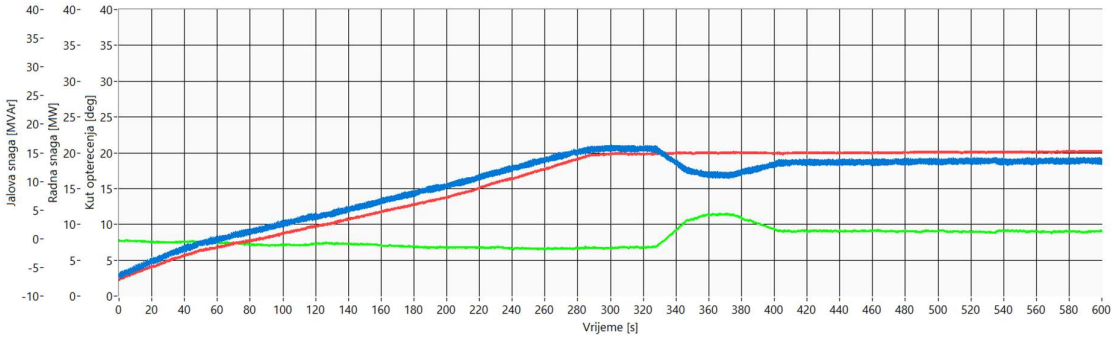
Slika 6.5. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod stabilne radne i jalove snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, zelena krivulja predstavlja mjerenje jalove snage i plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja.

Na slici 6.6. prikazani su rezultati mjerenja kuta opterećenja kod kontinuirane promjene radne snage generatora uz konstantnu jalovu snagu. Kao što se može vidjeti iz prikazanih rezultata, krivulja kuta opterećenja prati krivulju radne snage što ukazuje da algoritam za mjerenje kuta opterećenja daje dobre rezultate. Na slici je prikazan primjer pokretanja generatora.



Slika 6.6. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod kontinuirane promjene radne snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, a plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja.

Kako bi se dodatno potvrdila točnost algoritma za mjerenje kuta opterećenja, na slici 6.7. su prikazani rezultati ispitivanja algoritma za slučaj u kojem postoje promjene radne i jalove snage. Iz rezultata se može vidjeti da kod konstantne jalove snage kut opterećenja prati promjenu radne snage, što je već potvrđeno u prethodnim slučajevima. Takvo ponašanje proizlazi i iz definicije kuta opterećenja. Kada dođe do njihanja snage generatora, promjena radne snage utječe na promjenu vrijednosti kuta opterećenja. Vrijednost kuta opterećenja i u tom slučaju treba pratiti promjenu radne snage. Tijekom perioda u kojem je ispitivan algoritam nije došlo do pojave njihanja snage generatora pa ponašanje algoritma u takvim pogonskim uvjetima nije bilo moguće ispitati. Također je iz prikazanih rezultata vidljivo ponašanje kuta opterećenja kod promjene jalove snage. U primjeru je prikazana promjena jalove snage sinkronog generatora kod konstantne radne snage, a iz rezultata se može vidjeti odziv kuta opterećenja na promjenu jalove snage. Rezultati provedenih ispitivanja potvrđuju da povećanje jalove snage u induktivnom području utječe na smanjene vrijednosti kuta opterećenja, dok smanjenje jalove snage utječe na povećanje vrijednosti kuta opterećenja. Iz prethodno navedenog može se zaključiti da je kut opterećenja u kapacitivnom području veći nego u induktivnom području, odnosno da je stabilnost generatora veća u induktivnom području.



Slika 6.7. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod promjene prvo radne, a zatim i jalove snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, zelena krivulja predstavlja mjerenje jalove snage i plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja.

6.2. Rezultati ispitivanja algoritma za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja

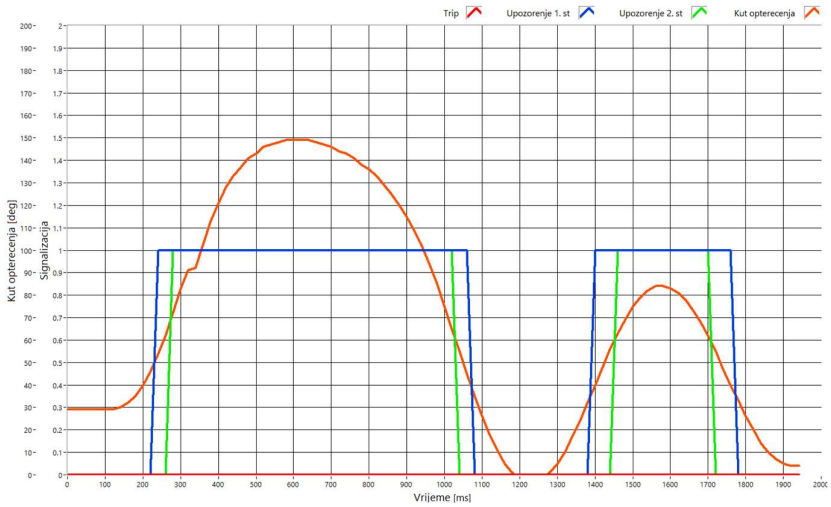
U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja algoritma za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja koji je definiran u poglavlju 5.2. Cilj ovih ispitivanja algoritma je pokazati njegovu funkcionalnost i potvrditi da je ovim postupkom moguće detektirati gubitak sinkronizma. Ispitivanje funkcionalnosti algoritma provedeno je u laboratorijskom okruženju pomoću sklopovske platforme opisane na početku ovog poglavlja na kojoj je uz algoritam za mjerenje kuta opterećenja implementiran i algoritam za detekciju gubitka sinkronizma. Kako algoritam nije ispitan u stvarnom okruženju, kao ulazni podaci koristile su se samo vrijednosti kuta opterećenja sinkronog generatora. Vrijednosti kuta opterećenja generatora korištene u ovim testovima dobivene su simulacijama kvarova u ETAP simulacijskom alatu, a same simulacije su detaljnije opisane u poglavlju 4. Za slučajeve na kojima je provedena analiza stabilnosti EES-a u poglavlju 4.2. napravljeno je ispitivanje algoritma za detekciju gubitka sinkronizma. U svim testovima korišteni su isti parametri algoritma iz razloga da se ispita osjetljivost algoritma za različite slučajeve i različite ulazne podatke i tipove generatora. Kod ispitivanja cilj nije bio prilagoditi parametre algoritma za svaki tip generatora i slučaj koji je analiziran već generalno pokazati njegovu funkcionalnost.

Parametri algoritma koji su korišteni kod simulacija prikazani su u tablici 6.1.

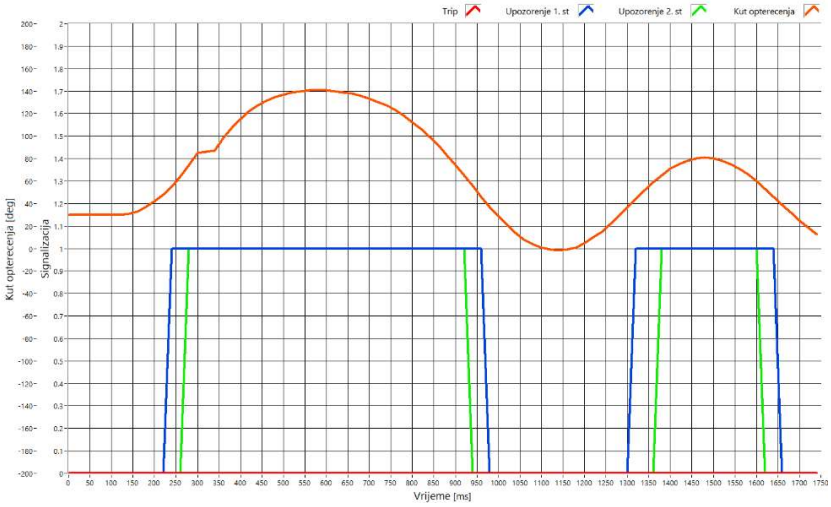
Tablica 6.1. Parametri algoritma za detekciju gubitka sinkronizma korišteni u simulacijama

Parametar	Opis	Jedinica	Vrijednost
δ_1	Upozorenje 1 stupanj	stupanj	50
δ_2	Upozorenje 2 stupanj	stupanj	70
δ_3	Praćenje dinamike promjene kuta opterećena	stupanj	120
δ_4	Isključenje generatora	stupanj	150
N_1	Broj vrijednosti kuta opterećenja u prozoru		5
N_2	Broj koeficijenata pravaca u prozoru		15
f_m	Vremenska rezolucija mjerenja kuta opterećenja	ms	20

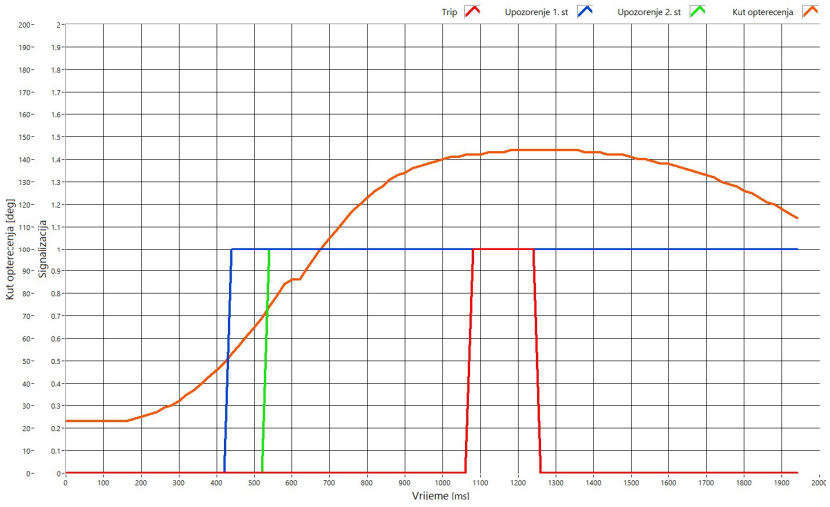
Na slikama 6.8., 6.9. i 6.10. prikazani su rezultati ispitivanja algoritma za tri generatora kod slučajeva stabilnog njihanja uslijed pojave kvara i opisanih u poglavlju 4.2. Iz rezultata možemo vidjeti da na generatorima u HE Čakovec (slika 6.8.) i HE Dubrava (slika 6.9.) osim upozorenja prvog i drugog stupnja nije bilo aktiviranja naloga za isključenje generatora (trip signala) što je ispravno. Kod generatora u HE Varaždin (slika 6.10.) aktivirao se nalog za isključenje generatora i to 300 ms nakon što je aktivirana funkcija praćenja promjene kuta opterećenja. Do aktivacije naloga za isključenje je došlo jer je nakon isteka od 300 ms vrijednost kuta opterećenja i dalje rasla, odnosno promjena kuta bila je pozitivna. Kako bi se izbjeglo isključenje generatora u takvim situacijama potrebno je produžiti vrijeme do aktivacije naloga od početka aktivacije funkcije praćenja promjene kuta. Kod generatora u ostale dvije hidroelektrane ovaj interval od 300 ms se pokazao dovoljan da se ne aktivira nalog za isključenje generatora jer je promjena kuta bila brža nego kod generatora u HE Varaždin. Bez obzira na to možemo zaključiti da je algoritam dao ispravne rezultate s obzirom na njegovu definiciju i postavljene parametre.



Slika 6.8. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Čakovec



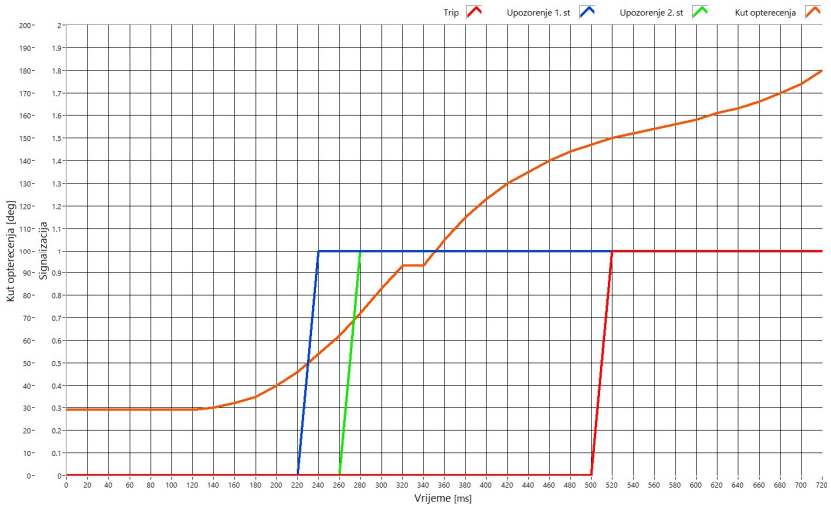
Slika 6.9. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Dubrava



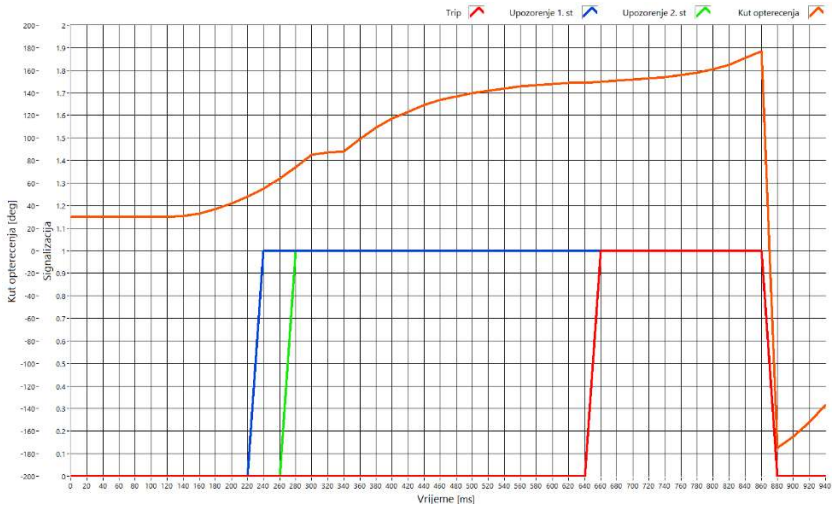
Slika 6.10. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Varaždin

Slike 6.11., 6.12. i 6.13. prikazuju rezultate ispitivanja algoritma za slučajeve nestabilnog njihanja koje se javlja zbog pojave kvara, a slučajevi su detaljnije opisani i analizirani u poglavlju 4.2. Za razliku od stabilnog njihanja kod kojeg ne dolazi do gubitka sinkronizma, kod nestabilnog njihanja dolazi do gubitka sinkronizma generatora te je u tim slučajevima nužno na vrijeme isključiti generator. Iz rezultata je vidljivo da je na svim generatorima algoritam aktivirao nalog za isključenje generatora (trip signal). Nalog za isključenje generatora aktiviran je prije događaja gubitka sinkronizma što ukazuje da je algoritam na vrijeme detektirao gubitak sinkronizma generatora. Prema definiciji algoritma nalog za isključenje generatora aktivira se u dva slučaja.

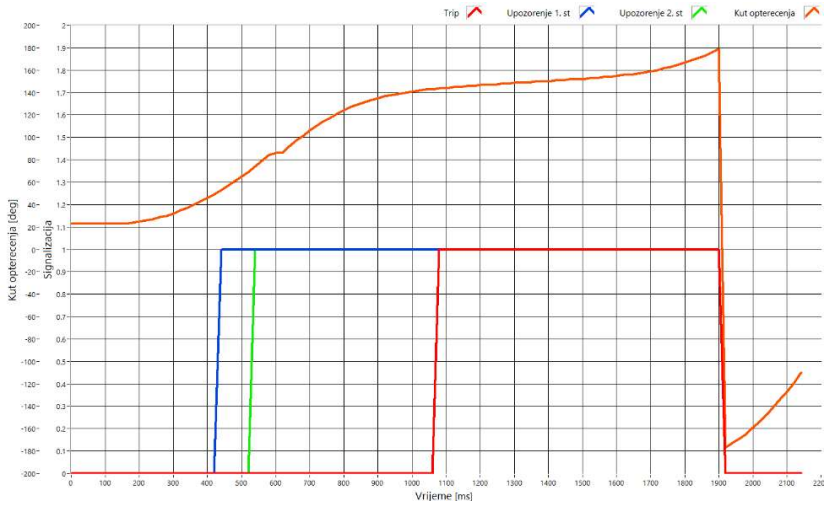
Prvi slučaj je kada se aktivira funkcija praćenja promjene dinamike kuta i nakon određenog vremena (kod ispitivanja algoritma korišteno je vrijeme od 300 ms) ukoliko kut i dalje raste aktivira se nalog za isključenje generatora. Drugi slučaj u kojem se aktivira nalog za isključenje generatora je kada vrijednost kuta opterećenja dosegne određeni iznos. Iz dobivenih rezultata za HE Čakovec (slika 6.11.) i HE Dubrava (slika 6.12.) vidi se da je nalog za isključenje generatora aktiviran jer je vrijednost kuta opterećenja dosegnula najvišu dozvoljenu vrijednost, a u promatranom slučaju to je 150 stupnjeva. Da bi do aktivacije naloga za isključenje došlo iz funkcije praćenja promjene kuta opterećenja, trebalo bi vrijeme praćenja postaviti na 100 ms. Prema slici 6.11 ukoliko bi se i primijenilo vrijeme od 100 ms gotovo kod iste vrijednosti bi došlo do generiranja naloga za isključenje generatora. S druge strane, treba uzeti u obzir da ukoliko je to vrijeme prekratko nalog za isključenje generatora aktivirao bi se i kod stabilnog njihanja, što nije prihvatljivo. Ukoliko se promotri slika 6.8. može se vidjeti da ako se postavi vrijeme praćenja na 100 ms kod stabilnog njihanja dobit će se aktivacija naloga za isključenje. Slična situacija vrijedi i za HE Dubrava što je jasno vidljivo na slikama 6.8. i 6.9. Kod slučaja za HE Varaždin čiji su rezultati ispitivanja prikazani na slici 6.13 vidi se da je do aktivacije naloga za isključenje došlo u funkciji praćenja promjene kuta opterećenja odnosno prije nego je kut opterećenja dosegao kritičnu vrijednost. Kako je u ovom slučaju promjena kuta opterećenja sporija u odnosu na prethodne slučajeve, vrijeme od 300 ms je dovoljno za aktivaciju naloga za isključenje prije nego kut opterećenja dosegne kritičnu vrijednost od 150 stupnjeva. S druge strane, prema slici 6.10. ono je prekratko za detekciju stabilnog njihanja.



Slika 6.11. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Čakovec



Slika 6.12. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Dubrava



Slika 6.13. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Varaždin

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da algoritam za detekciju gubitka sinkronizma generatora daje dobre rezultate i da je metodom predloženom u ovom radu moguće detektirati gubitak sinkronizma generatora. Također, iz rezultata se može zaključiti da funkcionalnost algoritma kod primjene na određenom generatoru ili elektroenergetskom sustavu direktno ovisi o parametrima algoritma koje definira korisnik, a što ukazuje da je vrlo važno dobro poznavati sustav i odziv generatora kod pojave kvara kako bi se funkcionalnost algoritma što bolje prilagodila stvarnim uvjetima.

7. PUBLICIRANJE MJERENJA KUTA OPTEREĆENJA NA PROCESNU KOMUNIKACIJSKU MREŽU

Kut opterećenja generatora realni je pokazatelj stabilnosti generatora i zbog toga postoji veliki potencijal njegove primjene. Danas se mjerenje kuta opterećenja uglavnom koristi u monitoring sustavima agregata pri čemu to mjerenje nije u realnom vremenu i male je rezolucije, obično od jedne minute na više. Specifičnost postupka mjerenja i mala rezolucija mjerenja te činjenica da su monitoring sustavi uglavnom odvojeni od drugih sustava u EE postrojenju, poput sustava zaštite i upravljanja, predstavlja veliku prepreku većoj primjeni kuta opterećenja u drugim sustavima. S druge strane možemo reći da gotovo ne postoje sustavi koji bi koristili kut opterećenja za neku drugu namjenu osim monitoringa, pa je i to jedan od razloga slabe primjene kuta opterećenja. U ovom istraživanju cilj je bio dokazati da se kut opterećenja može točno mjeriti s najvećom mogućom rezolucijom te da se može koristiti za detekciju gubitka sinkronizma generatora ili za funkciju zaštite generatora od ispada iz koraka. Rezultati tih istraživanja prikazani su u prethodnim poglavljima.

Vrijednosti kuta opterećenja dobivene mjerenjem prema algoritmu za izravno mjerenje kuta opterećenja opisanom u poglavlju 5.1, osim za funkciju zaštite od gubitka sinkronizma generatora, mogu se koristiti i u drugim aplikacijama. Te aplikacije ili sustavi ne moraju biti nužno smješteni na istoj sklopovskoj platformi ili uređaju na kojem je implementiran algoritam, već se mogu nalaziti na drugim uređajima u istom elektroenergetskom postrojenju ili izvan njega odnosno na nekoj drugoj lokaciji. Da bi se mjerenje kuta opterećenja moglo koristiti u drugim sustavima potrebno je osigurati način njegove razmjene između uređaja na kojem se mjeri kut i sustava koji ga koriste. Pri tome treba voditi računa da se omogući istovremeni pristup mjerenju kuta za više različitih sustava ili klijenata.

Danas se gotovo sve informacije između uređaja i sustava u elektroenergetskim postrojenjima, ali i između njih razmjenjuju komunikacijskom mrežom temeljenom na Ethernetu. Razvoj tehnologija omogućio je da danas svi uređaji posjeduju barem jedno mrežno komunikacijsko sučelje preko kojeg se uređaj povezuje na procesnu komunikacijsku mrežu. Upravo zbog toga, kao potencijalno rješenje za distribuciju mjerenja kuta opterećenja nameće se njegova publikacija preko komunikacijske mreže temeljene na Ethernetu [34]. Alternativa ovom pristupu bila bi osigurati dostupnost mjerenja kuta opterećenja kao analognu vrijednost preko analognih izlaza uređaja na kojem je implementiran algoritam. Uz današnje komunikacijske mogućnosti koje posjeduju uređaji i sve dobro poznate nedostatke razmjene

podataka analognim signalima takav pristup razmjene mjerenja kuta opterećenja nije razmatran u ovom istraživanju, iako sama sklopovska oprema korištena u istraživanju i opisana u petom poglavlju ima realiziranu tu funkcionalnost. Bez obzira na to u ovom istraživanju nisu obavljena dodatna ispitivanja te funkcionalnosti.

7.1. Komunikacijski protokoli za razmjenu podatka u realnom vremenu u EE postrojenjima

Kako bi se osigurala mogućnost razmjene podataka između različitih uređaja i sustava koriste se različiti tipovi komunikacijskih protokola. Ti komunikacijski protokoli su definirani različitim standardima i ovisno o složenosti pokrivaju različite slojeve OSI (*engl. Open Systems Interconnection*) modela. Uglavnom se radi o komunikacijskim protokolima koji su razvijeni za industrijsku primjenu, a neki od njih su razvijani specifično za primjenu u EE postrojenjima. U nastavku će biti navedeni samo određeni komunikacijski protokoli koji se koriste u EE postrojenjima za razmjenu podataka i koji bi se potencijalno mogli koristiti za distribuciju mjerenja kuta opterećenja. Također, jedan od uvjeta kod odabira komunikacijskih protokola je da može koristiti Ethernet na fizičkom sloju jer se na taj način dodatno olakšava njegova primjena i integracija uređaja za mjerenje kuta opterećenja u postojeće sustave. Iz prethodno navedenog potencijalni komunikacijski protokoli koji bi se mogli primjenjivati za publiciranje ili distribuciju mjerenja kuta opterećenja su:

- IEC 60870-5-104,
- IEC 61850,
- ModBus TCP/IP,
- Profinet,
- DNP 3.

Prethodno navedeni protokoli koriste se u sustavima automatizacije EE postrojenja za razmjenu svih ključnih informacija u svrhu zaštite, nadzora i upravljanja EE postrojenjem. Svi komunikacijski protokoli koriste Ethernet tehnologiju na fizičkom sloju, a na mrežnom sloju IP protokol. S obzirom da se u različitim EE postrojenjima koriste različiti komunikacijski protokoli, a često i više njih, teško je isključivo definirati koji od njih je najbolje rješenje za distribuciju kuta opterećenja. Generalno možemo reći da se svaki komunikacijski protokol koji može osigurati prijenos vrijednosti kuta opterećenja u potrebnoj rezoluciji bez gubitaka informacija, od uređaja za mjerenje kuta do klijenata, može koristiti za njegovu distribuciju.

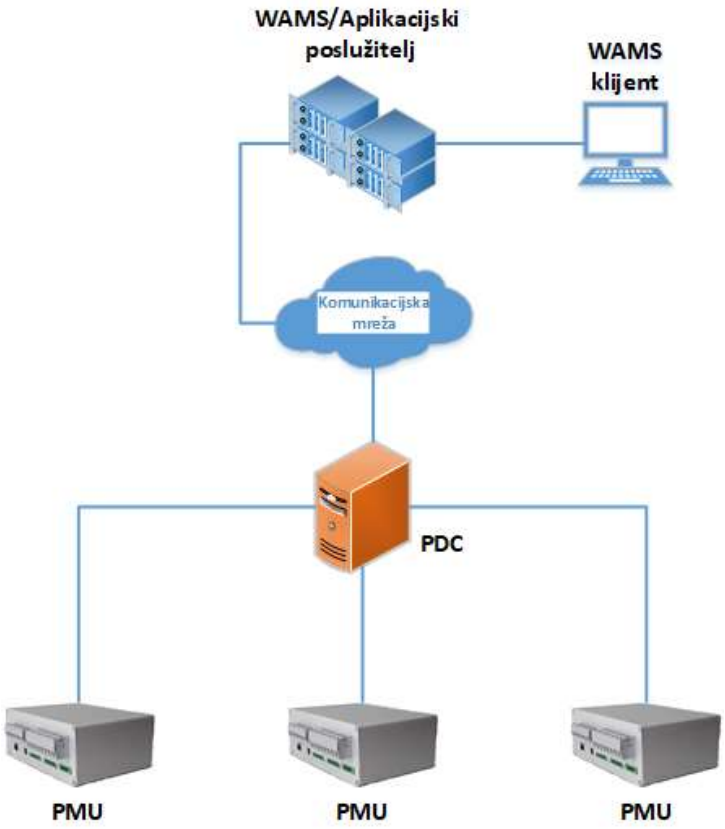
Ovisno o zahtjevanoj vremenskoj rezoluciji mjerenja od strane klijenta ili aplikacije koja koristi mjerenje kuta opterećenja potrebno je odabrati odgovarajući komunikacijski protokol. Prethodno navedeni industrijski protokoli koje se najčešće koriste u EE postrojenjima mogu osigurati distribuciju kuta opterećenja, a koji će se od njih primijeniti isključivo ovisi o zahtjevima vezanim uz komunikaciju i funkcionalnosti za koju se primjenjuje kut opterećenja. Odabir komunikacijskog protokola također ovisi i o lokaciji klijenta, jer nije isto nalazi li se on u istom EE postrojenju ili objektu ili na udaljenoj lokaciji, te ovu činjenicu također treba uzeti u obzir.

Ukoliko se razmotri primjena kuta opterećenja za funkcije zaštite generatora, a što je i predmet ovog istraživanja, potencijalni protokoli za distribuciju mjerenja kuta opterećenja su IEC 61850 i ModBus TCP/IP jer se oni koriste u današnjim sustavima zaštite i upravljanja. Kod korištenja IEC 61850 protokola distribuciju mjerenja kuta opterećenja moguće je realizirati korištenjem GOOSE (*engl. Generic Object Oriented Substation Event*) poruka. GOOSE poruke i mehanizam njihove razmjene definiran je u IEC 61850-8-1 dijelu norme, a detaljnije informacije vezano uz IEC 61850 protokol dostupne su u [35], [36]. Za distribuciju mjerenja kuta opterećenja u realnom vremenu iz EE postrojenja prema udaljenim lokacijama mogu se primijeniti IEC 60870-5-104, DNP 3 i IEC 61850 protokoli. U ovom slučaju kod korištenja IEC 61850 protokola mogu se koristiti MMS (*engl. Manufacturing Message Specification*) poruke. Distribucija kuta opterećenja prema udaljenim lokacijama podrazumijeva slanje mjerenja kuta prema centralnom sustavu poput SCADA (*engl. Substation Control and Data acquisition*) sustava u centru daljinskog nadzora i upravljanja ili specifičnoj aplikaciji.

7.2. Distribucija kuta opterećenja primjenom IEEE C37.118 norme

Uz standardne informacije koje se razmjenjuju u sustavima automatizacije EE postrojenja, danas se sve više koriste i sinkrofazorska mjerenja. Razlog tomu je sve veća primjena naprednih rješenja i aplikacija koje za svoju funkcionalnost koriste sinkrofazorska mjerenja u stvarnom vremenu. Zbog povećanja potrošnje električne energije i sve većeg udjela obnovljivih izvora energije elektroenergetske mreže se sve češće nalaze blizu granice stabilnosti. Veliki udio intermitentnih obnovljivih izvora energije također donosi nove izazove u planiranju i vođenju EES-a, a trenutni pristup procjeni stabilnosti pomoću *off-line* izračuna i SCADA sustava uskoro neće biti dovoljno pouzdan za donošenje odluka u stvarnom vremenu. Najčešće se sinkrofazorska mjerenja koriste za kontrolu tokova snaga i održavanje stabilnosti mreže [37].

Sinkrofazorska mjerenja temelje se na sinkroniziranim mjerenjima napona, struja i frekvencije koja se implementiraju unutar PMU (*engl. Phasor Measurement Unit*) uređaja. Postoji nekoliko normi prema kojima se definira izračun sinkrofazora, a danas je sve popularnija norma IEEE C37.118 koja se sve više primjenjuje u praksi i očekuje se da će se u budućnosti takva mjerenja realizirati prema toj normi. IEEE C37.118 norma sastoji se od dvije cjeline, gdje prva cjelina definira kako se određuju sinkrofazorske veličine, frekvencija, promjena frekvencije (ROCOF) i zahtjevi na preciznost mjerenja [38] i [39], a druga cjelina definira način i format publiciranja tih mjerenja na komunikacijsku mrežu [40]. Sinkrofazorski podaci iz više PMU-u uređaja prikupljaju se ili koncentriraju u PDC (*engl. Phasor Data Concentrator*) uređaje gdje su onda dostupni aplikacijama koje za svoju funkcionalnost koriste takva mjerenja, poput sustava za zaštitu i nadzor mreže. Najpoznatiji sustavi koji za svoju funkcionalnost koriste sinkrofazorska mjerenja su WAMS (*engl. Wide Area Measurement System*) sustavi. Na slici 7.1. prikazana je pricipijelna arhitektura WAMS sustava.



Slika 7.1. Arhitektura WAMS sustava

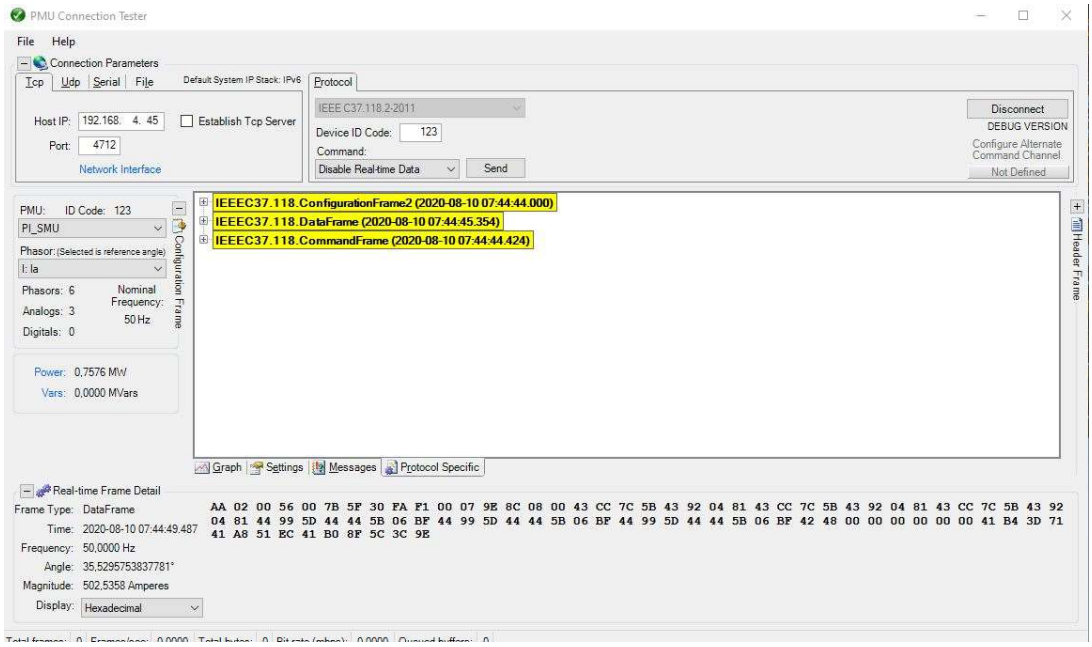
Korištenje WAMS sustava omogućava nadzor cijelog ili velikog dijela EES-a, a glavne prednosti korištenja takvih sustava su mogućnost:

- nadzora faznog kuta i tokova snage na širokom području,
- nadzora frekvencije na širokom području,
- nadzora napona na širokom području,
- podizanja EES-a nakon raspada.

Iz rezultata prikazanih u prethodnim poglavljima može se vidjeti da je kut opterećenja vrlo dobar pokazatelj stabilnosti EES-a, isto kao i sinkrofazorska mjerenja. Mjerenje kuta opterećenja sinkronog generatora prikazano u ovom radu ima istu vremensku rezoluciju mjerenja kao i sinkrofazorska mjerenja definirana IEEE C37.118 normom. Ukoliko se u aplikacije za analizu stabilnosti EES-a uz sinkrofazorska mjerenja doda i podatak o kutu opterećenja generatora zasigurno se može poboljšati kvaliteta te analize i dobiti jasna slika o stabilnosti generatora u sustavu. Način primjene kuta opterećenja generatora u takvim sustavima nije predmet ovog istraživanja. Jedan od ciljeva ovog istraživanja je definirati način dostupnosti kuta opterećenja za različite sustave primjenom standardnih komunikacijskih protokola. U nastavku su dani rezultati istraživanja u kojima je ispitana mogućnost publikacije kuta opterećenja zajedno sa sinkrofazorskim mjerenjima prema IEEE C37.118 normi.

Način razmjene sinkrofazorskih podataka i njihov format definirani su u IEEE C37.118-2 dijelu norme i na temelju tog dokumenta ispitana je mogućnosti publiciranja kuta opterećenja. U IEEE C37.118-2 dijelu norme uz obavezne podatke poput sinkrofazorskih podataka i frekvencije, dana je mogućnost dodavanja korisničkih podataka. U normi su za to definirana dva polja pod nazivima ANALOG i DIGITAL. S obzirom da polje DIGITAL predstavlja digitalnu statusnu riječ u kojoj se mogu zapisati stanja zastavica ili digitalnih ulaza to polje nije bilo moguće koristiti za potrebe publiciranja kuta opterećenja. Zbog toga je korišteno polje ANALOG koje korisniku dozvoljava definiranje bilo kojeg podatka koji se može zapisati u 16-bitnom cjelobrojnom (*engl. integer*) formatu ili IEEE formatu s pomičnim zarezom (*engl. floating point*). Unutar ovog polja korisniku je dozvoljeno definiranje do četiri takva podatka, a što je dovoljno za naše potrebe jer kod mjerenja kuta opterećenja generatora možemo imati najviše tri podatka. Kako iz norme proizlazi da je u istom paketu moguće publicirati sinkrofazorska mjerenja i mjerenje kuta opterećenja, u sklopu istraživanja to je i praktično dokazano, a rezultati su prikazani u nastavku.

Za potrebe ispitivanja korišten je SMU-P2 uređaj koji predstavlja prototip uređaja s funkcionalnostima *Merging Unit* uređaja za publiciranje digitalnih mjernih uzoraka (*engl. Sampled values*) prema IEC 61869-9 normi i PMU uređaja za publiciranje sinkrofazorskih mjerenja prema IEEE C37.118-2 normi. Uređaj nije namijenjen za komercijalnu upotrebu već za laboratorijsko okruženje, a više detalja o uređaju nalazi se u [41], [42]. Da bi se ispitivanje moglo obaviti bilo je potrebno doraditi postojeće programe u uređaju odnosno dodati mjerenja kuta opterećenja u IP paket. Nakon prilagodbe svih programa izvršeno je ispitivanje pomoću PMU Connection Tester aplikacije, koja posjeduje funkcionalnost klijenta koji se povezuje na PMU uređaj, a čija je namjena ispitivanje digitalnog izlaza PMU uređaja prema određenoj normi. Na slici 7.2. prikazano je korisničko sučelje PMU Connection Tester aplikacije u kojem se mogu vidjeti određeni parametri za povezivanje i tipovi paketa prikupljeni iz PMU uređaja.



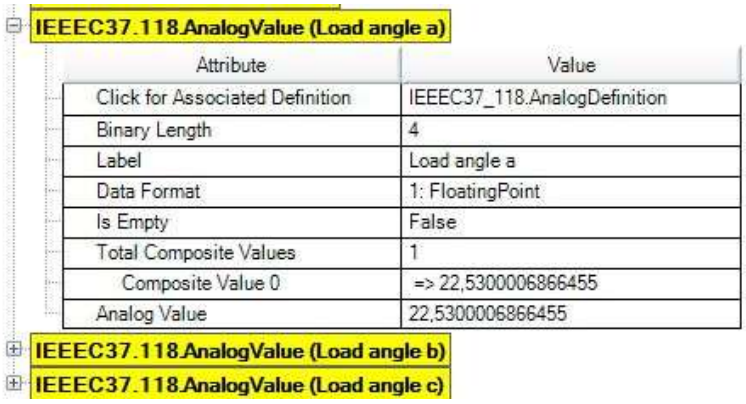
Slika 7.2. Korisničko sučelje PMU Connection Tester aplikacije

Prema slici 7.2. možemo vidjeti da se u komunikaciji između PMU uređaja i klijenta, u ovom slučaju aplikacije, razmjenjuju različiti tipovi paketa, a za nas su ovdje bitni *DataFrame* paketi jer se u njima nalaze podaci sinkrofazorskih mjerenja i mjerenje kuta opterećenja. Na slici 7.3. prikazana je struktura *DataFrame* paketa na kojoj se može vidjeti da se u njemu uz sinkrofazorska mjerenja i frekvencije nalaze i mjerenja kuta opterećenja generatora.



Slika 7.3. Pregled strukture DataFrame paketa

Struktura zapisa jednog mjerenja kuta opterećenja u *DataFrame* paketu prikazana je na slici 7.4. Iz nje je vidljivo da se podatak o kutu opterećenja u paketu zapisuje u IEEE formatu s pomičnim zarezom i da je njegova vrijednost 22,5 stupnjeva.



Slika 7.4. Struktura zapisa jednog mjerenja kuta opterećenja u DataFrame paketu

Da bi se dodatno provjerilo funkcionalnost publiciranja kuta opterećenja napravljeno je ispitivanje komunikacije i analiza paketa u Wireshark aplikaciji. Na slici 7.5. prikazana je struktura *DataFrame* paketa koja potvrđuje prethodno opisane rezultate.

```
> Frame 50: 142 bytes on wire (1136 bits), 142 bytes captured (1136 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: AsustekC_d3:a1:c8 (b0:6e:bf:d3:a1:c8), Dst: GoodWayI_aa:48:44 (00:50:b6:aa:48:44)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.4.45, Dst: 192.168.4.16
> Transmission Control Protocol, Src Port: 4712, Dst Port: 51163, Seq: 5049, Ack: 55, Len: 88
> [2 Reassembled TCP Segments (86 bytes): #49(84), #50(2)]
> IEEE C37.118 Synchrophasor Protocol, Data Frame [correct]
v IEEE C37.118 Synchrophasor Protocol, Data Frame [correct]
  > Synchronization word: 0xaa02
    Framesize: 86
    PMU/DC ID number: 123
    SOC time stamp: Aug 10, 2020 07:46:24.000000000 UTC
  > Time quality flags
    Fraction of second (raw): 29818
  v Measurement data, using frame number 43 as configuration frame
    v Station: "PI_SMU"
      > Flags
      v Phasors (6)
            Phasor #1: "Ia",     502.54A/_  35.53°
            Phasor #2: "Ib",     502.54A/_  35.53°
            Phasor #3: "Ic",     502.54A/_  35.53°
            Phasor #4: "Ua",    1507.61V/_  35.53°
            Phasor #5: "Ub",    1507.61V/_  35.53°
            Phasor #6: "Uc",    1507.61V/_  35.53°
        Actual frequency value: 50Hz
        Rate of change of frequency: 0Hz/s
      v Analog values (3)
            Analog value #1: "Load angle a", 22.530
            Analog value #2: "Load angle b", 21.040
            Analog value #3: "Load angle c", 22.070
    Checksum: 0x4b34 [correct]
    [Checksum Status: Good]
```

Slika 7.5. Struktura DataFrame paketa snimljena Wireshark aplikacijom

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je moguće realizirati istovremeno publiciranje sinkrofazorskih mjerenja i mjerenja kuta opterećenja generatora te se na taj način otvara mogućnost primjene kuta opterećenja generatora u aplikacijama za analizu i očuvanje stabilnosti sustava. Zajedničko publiciranje sinkrofazorskih mjerenja, mjerenja frekvencije i kuta opterećenja za sinkroni generator daje kvalitetniji podatak o stabilnosti i pogonskom stanju generatora.

8. ZAKLJUČAK

Prije nekoliko desetljeća električni centri elektroenergetskih sustava nalazili su se u prijenosnoj mreži čije su zaštite detektirale ispad iz sinkronizma bez potrebe za isključivanjem generatora. S godinama su prijenosni sustavi postali sve robusniji, a povećale su se i impedancije generatora i blok transformatora dok su se konstante inercije generatora smanjile. To je rezultiralo time da su se električni centri sustava pomaknuli do blok transformatora i generatora, povećavajući naprezanja spomenutih komponenti sustava. Kao posljedica toga smanjila su se kritična vremena u kojima je potrebno isklopiti kvar na pragu elektrane prije nego dođe do gubitka sinkronizma s elektroenergetskim sustavom. Njihanja snage, koja se javljaju u sustavu za vrijeme i nakon poremećaja, mogu biti stabilna, ako se kvar dovoljno brzo ukloni. U suprotnom, može doći do gubitka sinkronizma što za posljedicu može imati velike iznose amplitude struja koje uzrokuju naprezanja u namotima generatora kao i mehanička naprezanja koja mogu dovesti do oštećenja generatora i turbine. Zato je neophodno brzo detektirati gubitak sinkronizma i isključiti generator kako bi se spriječilo kaskadna isključenja. Osim toga, zaštita od ispada iz koraka treba razlikovati stabilno od nestabilnih njihanja.

U tu svrhu je u ovom radu predložena metoda detekcije gubitka sinkronizma na temelju izravnog mjerenja kuta opterećenja što je bio jedan od ciljeva istraživanja. Temelj za predloženu metodu detekcije gubitka sinkronizma je mogućnost izravnog mjerenja kuta opterećenja. U dosadašnjoj praksi koristile su se različite metode u tu svrhu, ali uglavnom se radi o mjerenjima koja se naknadno analiziraju u monitoring sustavima. U ovom istraživanju odabrana je metoda mjerenja kuta opterećenja pomoću kapacitivnog senzora zračnog raspora te je pokazano da je ova metoda prikladna za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu. Na osnovi ove metode razvijen je algoritam za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu koji osigurava stabilan izračun kuta opterećenja svakih 20 ms, tj. nakon svake periode (za frekvenciju sustava od 50 Hz). U algoritmu je dodatno razvijena i funkcionalnost koja uzima u obzir neasvršenost rotora za korekciju mjerenja. Algoritam je provjeren u realnom okruženju na postojećem monitoring sustavu agragata u HE Dubrava. Rezultati jasno pokazuju da predložena metoda daje dobre rezultate te da korekcija geometrijske nesavršenosti rotora poboljšava stabilnost i točnost mjerenja kuta opterećenja kod sinkronog generatora.

Podatak o kutu opterećenja u realnom vremenu implementiran je u predloženi model za detekciju gubitka sinkronizma. Model je implementiran na sklopovskoj platformi na način da je moguće definirati sve ključne parametara algoritma kroz konfiguracijsku datoteku kako bi se omogućila što bolja osjetljivost u različitim pogonskim uvjetima generatora. Ispitivanje

predloženog modela obavljeno je u laboratorijskom okruženju. Rezultati pokazuju da algoritam za detekciju gubitka sinkronizma generatora daje dobre rezultate i da je metodom predloženom u ovom radu moguće detektirati gubitak sinkronizma generatora. Osim toga, pokazano je da algoritam razlikuje stabilno od nestabilnog njihanja. Također, može se zaključiti da funkcionalnost algoritma ovisi i o parametrima algoritma koje definira korisnik što zahtijeva dobro poznavanje odziva generatora kod pojave kvara.

Jedan od ciljeva istraživanja bio je i publiciranje kuta izravno izmjerenog kuta opterećenja na komunikacijsku mrežu. S obzirom da mjerenje kuta opterećenja sinkronog generatora prikazano u ovom radu ima istu vremensku rezoluciju mjerenja kao i sinkrofazorska mjerenja definirana IEEE C37.118 normom ista je odabrana za publiciranje mjerenja na komunikacijsku mrežu. Ispitivanje ove funkcionalnosti obavljeno je u realnim uvjetima na stvarnoj opremi. Rezultati istraživanja pokazuju da je moguće realizirati istovremeno publiciranje sinkrofazorskih mjerenja i mjerenja kuta opterećenja generatora.

U ovom doktorskom radu dani su sljedeći očekivani znanstveni doprinosi:

- metoda izravnog mjerenja kuta opterećenja u realnom vremenu s istovremenim publiciranjem na procesnu komunikacijsku mrežu,
- model detekcije gubitka sinkronizma generatora na osnovi izravnog mjerenja kuta opterećenja.

Cilj kod budućih istraživanja je analiza mogućnosti primjene kuta opterećenja generatora u aplikacijama za analizu i očuvanje stabilnosti sustava. Naime, bilo koji dio EES-a, a pogotovo važnije elemente kao što je sinkroni generator, nemoguće je promatrati izolirano. Iz rezultata prikazanih u prethodnim poglavljima očito je da je kut opterećenja vrlo dobar pokazatelj stabilnosti EES-a. Ukoliko se u aplikacije za analizu i očuvanje stabilnosti EES-a uz sinkrofazorska mjerenja doda i podatak o kutu opterećenja generatora zasigurno se može dobiti jasnija slika o stabilnosti generatora i sustava u cjelini. Također, jedan od ciljeva daljnjih istraživanja je poboljšanje algoritma za detekciju gubitka sinkronizma generatora definiranog u ovom radu.

LITERATURA

[1] Machowski, J., Bialek, J.W., Bumby, J.R., „Power System Dynamics, Stability and Control“, John Wiley & Sons Ltd., New Jersey, NJ, USA, 2008.

[2] Kundur, P., „Power System Stability and Control“, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1994.

[3] Abedini, M., Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M., Hashemi, S.M., Iravani, R., „Generator Out-of-Step Prediction Based on Faster-Than Real Tine Analysis: Concepts and Applications“, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, 2018.

[4] Berdy, J., „Out of Step Protection for Generators. General Electric Power Management“, Ontario, ON, Canada, dostupno na: https://store.gegridsolutions.com/FAQ/Documents/CEB/GER-3179.pdf (26. travanj 2020.)

[5] Cheng, S., Sachdev, M.S., „Out of Step Protection Using the Equal Area Criterion“, Proceedings of the 18th Annual Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2005., str. 1488-1491.

[6] Reimert, D., „Protective Relaying for Power Generation Systems“, Taylor & Francis, Abingdon, UK, 2006.

[7] Filipović-Grčić, B., Ivanković, I., Bulat, H., Čerina, Z., „Zaštita od ispada iz koraka generatora”, 5. Savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, Hrvatska, 2001., str. 34-05.

[8] SIPROTEC 4 Generator Protection 7UM62 Manual, Siemens AG, Nürnberg, Njemačka, 2017.

[9] Fischer, N., Benmouyal, G., Hou, D., Tziouvaras, D., Byrne-Finley, J., Smith, B., „Tutorial on Power Swing Blocking and Out-of-Step Tripping“, Proceedings of the 39th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, WA, USA, 2012.

[10] Camarillo-Peñaranda, J. R., Celeita, D., Gutierrez, M., Toro M., Ramos, G., „An Approach for Out-of-Step Protection Based on Swing Center Voltage Estimation and Analytic Geometry Parameters“, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 56, 2020, str. 2402-2408.

[11] Redfern, M.A., Checksfield, M.J., „A New Pole Slip Protection Algorithm for Dispersed Storage and Generation using the Equal Area Criterion“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, 1995, str. 194-202.

[12] Redfern, M.A., Checksfield, M.J., „A Study into a New Solution for the Problems Experienced with Pole Slipping Protection“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, 1998.

[13] Kumar, N., Nagaraja, D.R., Khincha, H.P., „A smart and adaptive scheme for generator out of step protection“ Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), Bangkok, Thailand, 2015.

[14] Alinezhad B., Karegar, H. K., „Out-of-Step Protection Based on Equal Area Criterion“, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, 2017, str. 968-977.

[15] Paudyal, S., Ramakrishna, G., Sachdev, M.S., „Application of Equal Area Criterion conditions in the Time Domain for Out-of-Step Protection“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, 2010, str. 600-609.

[16] Haner, J.M., Laughlin, T.D., Taylor, C.W., „Experience with the RRdot Out of Step Relay“, IEEE Transactions on Power Systems, PWRD-1, 1986, str. 35-39.

[17] Fan, D., Centeno, V., „Adaptive out-of-step protection schemes based on synchropahasors“, Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, Washington, WA, USA, 2014.

[18] Sauhats, A., Utans, A., Antonovs, D., Svalovs, A., „Angle Control-Based Multi-Terminal Out-of-Step Protection System“, Energies, Vol. 10, 2017, str. 308.

[19] Despalatović, M., Jadrić, M., Terzić, B., „Real-time power angle determination of salient-pole synchronous machine based on air gap measurements“, Electric Power Systems Research, Vol. 78, 2008, str. 1873-1880.

[20] Despalatović, M., „Synchronous hydro-generator parameter identification based on on-line measurements“, doktorski rad, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Hrvatska, 2009.

[21] Veski Capacitive air gap sensor, dostupno na: https://www.veski.hr/index.php?page=sensors-ag (13. kolovoz 2020.)

[22] Vibrosystm Air Gap monitoring, dostupno na: https://www.vibrosystm.com/en/product/vm_air_gap (13. kolovoz 2020.)

[23] Iris Power Capacitive air gap sensor, dostupno na: https://irispower.com/products/capacitive-air-gap-sensor (13. kolovoz 2020.)

[24] Orešković, G., Meško, B., „HPP Dubrava—Power Swings and Electromechanical Oscillations of Generator A and B.“, Expert Study, Veski Ltd., Faculty of Electrical Engineering and Computing: Zagreb, Hrvatska, 2004.

[25] Despalatović, M., Jadrić, M., Terzić, B., Macan, J., „On-Line Hydrogenerator Power Angle and Synchronous Reactances Determination Based on Air Gap Measurement.“, Proceedings of the IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, New York, NY, USA, 2004, str. 753–758.

[26] Jadrić, M., Despalatović, M., Terzić, B., Rajković, B., „Methodology for Synchronous Hydrogenerator Parameter Identification Based on Monitoring System Measurement.“, Automatika, Vol. 48, 2007, str. 9–19.

[27] Lopac, N., Bulic, N., Vrkic, N., „Sliding Mode Observer-Based Load Angle Estimation for Salient-Pole Wound Rotor Synchronous Generators.“, Energies, Vol. 12, 2019.

[28] Orešković, G., Bacinger, I., Dvekar, Đ., „Active Power Oscillation cause detection in HPP Dubrava applying generator power angle measurement“, Proceedings of the 7th HRO CIGRE Session, Cavtat, Hrvatska, 2005.

[29] Brezovec, M., Brkljac B., Kuzle, I., „Influence of operating conditions on hydrounit power oscillations“, Proceedings of the Eurocon 2013 Conference, Zagreb, Hrvatska, 2013., str. 1453-1459.

[30] Jadrić, M., Frančić, B., „Dinamika električnih strojeva“, Graphis, Zagreb, Hrvatska, 1997.

[31] Višić, I., Strnad, I., Tonković, T., „Real Time Load Angle Application for Synchronous Generator Protection Purposes.“ Journal of Energy, Vol. 69, 2020, str. 13–17.

[32] Višić, I., Strnad, I., Tonković, T., „Real Time Load Angle Application for Synchronous Generator Protection Purposes“ Proceedings of the 2nd International Colloquium on Intelligent/Smart Grid Metrology 2019—SMAGRIMET, Split, Hrvatska, 2019, str. 66–70.

[33] Višić, I., Strnad, I., Marušić, A., „Synchronous Generator out of Step Detection Using Real Time Load Angle Data“, Energies, Vol. 13, 2020.

[34] Strnad, I., Višić, I., „Komunikacijske mreže i protokoli za digitalne transformatorske stanice“, Proceedings of the 14th HRO CIGRE Session, Šibenik, Hrvatska, 2019.

[35] IEC61850-5, „Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device models", IEC, Ženeva, 2003.

[36] IEC61850-8-1, „Communication networks and systems in substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3", IEC, Ženeva, 2004.

[37] Adamiak, M., Premerlani, W., Kasztenny, B., „Synchrophasors: definition, measurement, and application“, Proceedings of the 59th Annual Georgia Tech Protective Relaying, Atlanta, GA, 2005., str. 27-29.

[38] IEEE C37.118.1, „Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems", IEEE, New York, 2011.

[39] IEEE C37.118.1a, „Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems", IEEE, New York, 2012.

[40] IEEE C37.118.2, „Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems", IEEE, New York, 2011.

[41] Strnad, I., Pregrad, G., Višić, I., Gazivoda, S., „Development and Implementation of the Smart Measuring Unit With MU and PMU Functionalities for Smart Grid Applications“,

Proceedings of the First International Colloquium on Smart Grid Metrology 2018, Split, Hrvatska, 2018.

[42] Strnad, I., Višić, I., Pregrad, G., „Perspectives of the Smart Measuring Unit in Substation Automation Systems – Now and in the Future“, Proceedings of the PAC World Conference 2018, Sofia, Bugarska, 2018.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Klasifikacija stabilnosti EES-a (temeljeno na izvještaju CIGRE broj 325)..... 4

Slika 2.2. Stabilna i nestabilna promjena kuta opterećenja prilikom poremećaja pri konstantnom naponu uzbude 5

Slika 2.3. Stabilna i nestabilna promjena kuta opterećenja prilikom poremećaja s regulacijom napona uzbude..... 6

Slika 2.4. Odziv kuta opterećenja prilikom poremećaja u sustavu 7

Slika 2.5. Krivulja opterećenja..... 12

Slika 2.6. Primjer kvara s jednakom impedancijom prije i nakon kvara: a) shematski prikaz mreže, b) ekvivalentni krug prije i nakon kvara, c) ekvivalentni krug za vrijeme kvara 13

Slika 2.7. Kriterij jednakih površina: a) kratko vrijeme otklanjanja kvara, b) dugo vrijeme otklanjanja kvara..... 15

Slika 3.1. Impedantna karakteristika jednostavnog elektroenergetskog sustava..... 18

Slika 3.2. Primjer impedantne karakteristike funkcije za detekciju ispada iz koraka generatora 20

Slika 3.3. Grafički prikaz odnosa pozicije rotora, magnetskog polja i kuta opterećenja 22

Slika 3.4. Vektorski dijagram koji predstavlja definiciju kuta opterećenja 23

Slika 3.5. Prikaz izvedbe mjerenja kuta opterećenja pomoću induktivnog senzora 24

Slika 3.6. Primjer kapacitivnog senzora zračnog raspora..... 25

Slika 3.7. Signal iz senzora zračnog raspora nakon obrade u odnosu na položaj rotora 26

Slika 3.8. Odnos signala napona i signala zračnog raspora kod promjene kuta opterećenja. Crvena krivulja predstavlja signal napona generatora, plava krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator ne opterećen, a zelena krivulja predstavlja signal iz senzora zračnog raspora kada je generator opterećen. 26

Slika 3.9. Promjena kuta opterećenja sukladno promjeni radne i jalove snage kroz različite režime rada agregata 27

Slika 4.1. Model elektroenergetskog sustava sjeverozapadnog dijela RH korišten za potrebe simulacije 30

Slika 4.2. Shematski prikaz sinkronog stroja s prigušnim namotom u rotorskom koordinatnom sustavu [30]..... 34

Slika 4.3. Nadomjesna shema sinkronog stroja s prigušnim namotom u prijelaznom stanju: a) za uzdužnu os, b) za poprečnu os [30]..... 35

Slika 4.4. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms..... 37

Slika 4.5. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms..... 37

Slika 4.6. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 182 ms..... 38

Slika 4.7. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms *38*

Slika 4.8. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms *39*

Slika 4.9. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava s trajanjem kvara od 184 ms *39*

Slika 4.10. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms *40*

Slika 4.11. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms *40*

Slika 4.12. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 194 ms *40*

Slika 4.13. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms *41*

Slika 4.14. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms *41*

Slika 4.15. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Čakovec s trajanjem kvara od 196 ms *42*

Slika 4.16. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms..... *43*

Slika 4.17. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms..... *43*

Slika 4.18. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 466 ms..... *43*

Slika 4.19. Rezultati simulacija za radnu snagu generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms..... *44*

Slika 4.20. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms..... *44*

Slika 4.21. Rezultati simulacija za brzinu vrtnje generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Varaždin s trajanjem kvara od 468 ms..... *45*

Slika 4.22. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 104% nazivnog napona generatora – stabilno njihanje..... *46*

Slika 4.23. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 100% nazivnog napona generatora – stabilno njihanje..... *46*

Slika 4.24. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 95% nazivnog napona generatora – stabilno njihanje..... *46*

Slika 4.25. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 104% nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje *47*

Slika 4.26. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 100% nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje 47

Slika 4.27. Rezultati simulacija za kut opterećenja generatora 2 za vrijeme tropolnog kratkog spoja na sabirnicama HE Dubrava pri naponu 95% nazivnog napona generatora – nestabilno njihanje 48

Slika 5.1. Funkcionalni model za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja 49

Slika 5.2. Razvojna okolina na kojoj je implementiran model za detekciju gubitka sinkronizma generatora primjenom izravnog mjerenja kuta opterećenja 50

Slika 5.3. Dijagram toka algoritma za mjerenje kuta opterećenja u realnom vremenu 52

Slika 5.4. Dijagram toka algoritma za detekciju kvara gubitka sinkronizma generatora 54

Slika 6.1. Prikaz povezivanja sklopovske platforme u ormar sustava monitoringa agregata kod ispitivanja u stvarnom okruženju. 61

Slika 6.2. Rezultati mjerenja kuta opterećenja kada funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja nije primijenjena. Crvene točke predstavljaju vrijednosti kuta opterećenja, a plava krivulja signal iz senzora za detekciju položaja rotora. 62

Slika 6.3. Rezultati određivanja korekcijskih vrijednosti u korelaciji sa signalom iz senzora za detekciju položaja rotora dobiveni u sklopu ispitivanja algoritma. Crvene točke predstavljaju korekcijske vrijednosti kuta opterećenja. 62

Slika 6.4. Rezultati mjerenja kuta opterećenja kada je funkcija za korekciju vrijednosti kuta opterećenja primijenjena. Crvene točke predstavljaju korekcijske vrijednosti kuta opterećenja. 63

Slika 6.5. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod stabilne radne i jalove snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, zelena krivulja predstavlja mjerenje jalove snage i plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja. 63

Slika 6.6. Rezultati ispitivana algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod kontinuirane promjene radne snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, a plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja. 64

Slika 6.7. Rezultati ispitivanja algoritma za izravno mjerenje kuta opterećenja kod promjene prvo radne, a zatim i jalove snage sinkronog generatora. Crvena krivulja predstavlja mjerenje radne snage, zelena krivulja predstavlja mjerenje jalove snage i plava krivulja predstavlja mjerenje kuta opterećenja. 65

Slika 6.8. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Čakovec 67

Slika 6.9. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Dubrava 67

Slika 6.10. Odziv algoritma kod stabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Varaždin 67

Slika 6.11. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Čakovec 69

Slika 6.12. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Dubrava 69

Slika 6.13. Odziv algoritma kod nestabilnog njihanja na generatoru 2 u HE Varaždin 69

Slika 7.1. Arhitektura WAMS sustava 74

Slika 7.2. Korisničko sučelje PMU Connection Tester aplikacije 76

Slika 7.3. Pregled strukture DataFrame paketa 77
Slika 7.4. Struktura zapisa jednog mjerenja kuta opterećenja u DataFrame paketu 78
Slika 7.5. Struktura DataFrame paketa snimljena Wireshark aplikacijom 78

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Dubrava za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika 31

Tablica 4.2. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Čakovec za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika 32

Tablica 4.3. Ulazni podaci za izradu modela generatora u HE Varaždin za analizu stacionarnih pojava, analize dinamičkih pojava i analize kratkospojnih prilika 33

Tablica 5.1. Pregled uvjeta na temelju kojih se određuje status funkcije zaštite od gubitka sinkronizma 56

Tablica 6.1. Parametri algoritma za detekciju gubitka sinkronizma korišteni u simulacijama 66

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ivan Višić rođen je 1. travnja 1972. godine u Trogiru. Diplomirao je 1995. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu te je na istom fakultetu magistrirao 2003. godine. Doktorirao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu 2020. godine. Njegova područja znanstvenog istraživanja su zaštita, upravljanje i automatizacija u elektroenergetskim postrojenjima.

1997. godine zapošljava se u Končar Montažni inženjering d.d. na poslovima ispitivanja i puštanja u pogon elektroenergetskih i industrijskih postrojenja.

Od 1998. do 2000. godine radi u tvrtki Ekonerg d.o.o. na radnom mjestu inženjera u Odjelu za implementaciju sustava za upravljanje održavanjem gdje radi na projektu implementacije Sustava upravljanja poslovima održavanja u HEP-u.

Od 2000. do 2007. godine zaposlen je u EXOR d.o.o. na poslovima projektiranja, parametriranja, ispitivanja i puštanja u pogon sustava zaštite, upravljanja i automatizacije. Od 2004. vodi ured u Splitu gdje sudjeluje u vođenju različitih projekata zaštite i upravljanja.

2007. godine s nekoliko kolega osniva tvrtku PRO INTEGRIS d.o.o. u kojoj je zaposlen sve do danas. Na početku obavlja funkciju izvršnog direktora, a od 2016. godine je direktor firme. Ivan Višić član je međunarodne organizacije IEEE te redovni član Studijskog odbora B5 – Zaštita i automatizacija hrvatskog ogranka CIGRE. U okviru organizacije CIGRE aktivno sudjeluje u radu nekoliko međunarodnih radnih grupa iz područja zaštite i upravljanja u elektroenergetskim postrojenjima.

Tijekom znanstvenog istraživanja objavio je jedan znanstveni rad u CC časopisu, nekoliko znanstvenih radova u drugim časopisima, nekoliko radova u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom te više stručnih radova na međunarodnim konferencijama iz područja istraživanja i radnog iskustva.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA:

- Dizdarević, Nijaz; Višić, Ivan; Tešnjak, Sejid: „Combined Dynamic and Static Approach in Voltage Collapse Analysis“, Proceedings of 31st Universities Power Engineering Conference 1996 / Papazoglou, T. M. (ur., Iraklio : Technological Educational Institute, Iraklio, 1996. 562-565.

- Višić Ivan, Perkov Mladen, Šargač Mario: „Adaptivna diferencijalna zaštita u složenim topologijama mreže“, Referati 5.savjetovanja HK CIGRE 2001. godine, Oznaka: R34-15
- Perkov Mladen, Višić Ivan, Gamberger Marko: „Automatizacija elektroenergetskih postrojenja LSA I SICAM SEKUNDARNI SUSTAVI – pregled i primjena“, Referati 5.savjetovanja HK CIGRE 2001. godine, Oznaka: R35-11
- Perkov Mladen, Višić Ivan: „Telekomunikacije u prijenosu signala zaštite VN vodova“, Referati 6.savjetovanja HRO CIGRE 2003. godine, Oznaka: D2-15
- Višić, Ivan; Marušić, Ante: „Usporedna analiza visokoomskog i rezonantnog uzemljenja zvjezdišta generatora u blok spoju“, Referati 7. savjetovanja HO CIGRE 2005. godine, Oznaka: B5-10
- Višić, Ivan; Marušić, Ante: „Odabir zaštite od zemljospoja statora generatora s obzirom na uzemljenje zvjezdišta i način spajanja generatora na mrežu“, Referati 7. simpozija o sustavu vođenja elektroenergetskog sistema 2006. godine, Oznaka: 4-14
- Višić Ivan, Pirjać Mario, Rogulj Jakša, Majstrović Marinko, Matić Zoran, Kosor Đani: „Novi sustav automatizacije u TS KONJSKO 400/220/110/10 kV“, Referati 8.savjetovanja HRO CIGRE 2007. godina, Oznaka: B5-02
- Perkov Mladen, Jurasović Damir, Višić Ivan: „Rješenje sekundarnog sustava u RP 400 kV NADAB“, Referati 8.savjetovanja HK CIGRE 2007. godine, Oznaka: B5-03
- Pregrad Goran, Višić Ivan: „Interlocking schema based on GOOSE messages tested with IEC61850 protocol simulator“, PAC World Conference 2011, Oral Papers, Oznaka: THM-11
- Pregrad Goran, Višić Ivan: „Experiences from testing Interlocking Schema with GOOSE message Simulation“, OMICRON IPTS 2011
- Pregrad Goran, Višić Ivan: „Ispitivanje blokada upravljanja realiziranih GOOSE porukama simulacijom IEC61850 protokola“, Referati 10.savjetovanja HRO CIGRE 2011. godine, Oznaka: B5-17
- Bulatović Ivan, Višić Ivan, Poljak Damir: „Testiranje diferencijalne zaštite na 400kV vodu Podgorica 2 – Ribarevina“, Referati 2.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2011. godine, Oznaka: B5-05
- Višić Ivan, Smoljo Stipe, Poljak Damir, Bulatović Ivan, Asanović Ivan, Bukva Denis, Tasić Marko: „Revitalizacija sistema zaštite i upravljanja u 400kV trafostanicama

CGESa“, Referati 3.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2013. godine, Oznaka: B5-01

- Višić Ivan, Perkov Mladen, Bulatović Ivan, Asanović Ivan: „Procesna mreža – temelj modernih sistema automatizacije“, Referati 3.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2013. godine, Oznaka: D2-01
- Pregrad Goran, Višić Ivan: „Analiza značajki i ispitivanje mogućnosti procesne sabirnice u sekundarnim sustavima“, Referati 11.savjetovanja HRO CIGRE 2013. godine, Oznaka: B5-18
- Višić Ivan, Pregrad Goran, Soldić Damir: „Conventional vs. Process Bus Protection System – Performance Comparison“, PAC World Conference 2014, Oral Papers, Oznaka: WEA-02
- Pavičević Ratko, Daković Nikola, Višić Ivan: „Ostvarena redundansa kod rekonstruisanih sistema električnih zaštita u HE Perućica i HE Piva“, Referati 4.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2015. godine, Oznaka: B5-04
- Blagojević Gojko, Todorović Igor, Višić Ivan: „IEC61850 komunikacioni standard u hidroelektranama – Implementacija IEC61850 u HE Piva“, Referati 4.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2015. godine, Oznaka: B5-05
- Višić Ivan: „A View on Digital Substation Testing“, PAC World Conference 2015, Oral Papers, Oznaka: TUA-09
- Višić Ivan, Strnad Ivan, Mirković Mimo, Mugoša Nikola: „Standardizacija kao temelj modernog sekundarnog sistema“, Referati 5.savjetovanja crnogorskog komiteta CIGRE 2017. godine, Oznaka: B5-08
- Strnad Ivan, Pregrad Goran, Višić Ivan, Gazivoda Stevan: „Development and Implementation of Smart Measuring Unit with MU and PMU functionalities for Smart Grid Applications“, First International Colloquium on Smart Grid Metrology (SmaGriMet) 2018, IEEE conference
- Strnad Ivan, Višić Ivan, Pregrad Goran: „Perspectives of the Smart Measuring Unit in the Substation Automation Systems – Now and in the future“, PAC World Conference 2018, Oral Papers, Oznaka: WEA-06
- Višić, I., Strnad, I., Tonković, T., „Real Time Load Angle Application for Synchronous Generator Protection Purposes“ Proceedings of the 2nd International Colloquium on Intelligent/Smart Grid Metrology 2019—SMAGRIMET, Split, Hrvatska, 2019, str. 66–70.

- Višić, I., Strnad, I., Tonković, T., „Real Time Load Angle Application for Synchronous Generator Protection Purposes“ Journal of Energy 69 (2020), 1, str. 13–17.
- Višić, I., Strnad, I., Marušić, A., „Synchronous Generator out of Step Detection Using Real Time Load Angle Data“, Energies, Vol. 13, 2020.

AUTHOR'S BIOGRAPHY

Ivan Višić was born in Trogir, Croatia, on April 1st 1972. He received his Master of Electrical Engineering degree from the Faculty of Electrical Engineering and Computing at the University of Zagreb in 1995 where he received his Master of science degree in 2003. He obtained his doctoral degree from the Faculty of Electrical Engineering and Computing at the University of Zagreb in 2020. His research interests include substation automation, protection and control systems.

In 1997 he was employed by Končar Montažni inženjering p.l.c., as an engineer working on testing and commissioning of various power and industrial plants.

He was employed in the company Ekonerg Ltd. as an engineer in the Maintenance Control System Implementation Department from 1998 till 2000. In Ekonerg, he is focused on the implementation of the maintenance control system in power plants of the Croatian Power Utility (HEP).

From 2000 till 2007 he was employed in EXOR Ltd. working on design, parameterization, testing and commissioning of substation protection, control and automation systems. He was running the company's office in Split from 2004, working on different power automation projects.

In 2007 he started PRO INTEGRIS Ltd with several colleagues. At the beginning he worked as the Chief Operation Officer. From 2016 onwards he is the Chief Executive Officer of this company.

Ivan Višić is a member of IEEE, and an active member of the B5 Study Committee of CIGRÉ. He is actively involved in the activities of several international CIGRE Working Groups dealing with substation protection automation and control systems.

During his scientific research he published one international CC conference research paper, several international conference research papers and several technical papers from his field of research and work experience.