

REGULACIJA NAPONA SINKRONOG GENERATORA POMOĆU FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA

Varvodić, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:638980>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetika

Karlo Varvodić

ZAVRŠNI RAD

**REGULACIJA NAPONA SINKRONOG GENERATORA
POMOĆU FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA**

Split, srpanj 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Elektroenergetika

Predmet: Električni strojevi I

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: Karlo Varvodić

Naslov rada: Regulacija napona sinkronog generatora pomoću frekvencijskog pretvarača

Mentor: Višnja Troskot

Split, srpanj 2022.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	4
SUMMARY	4
UVOD	5
2. POVIJEST VJETROAGREGATA	6
2.1. Vjetroagregati u Hrvatskoj	8
3. VJETROAGREGATI.....	9
3.1. Podjela vjetroagregata	9
3.2. Dijelovi vjetroagregata	11
4. SINKRONI GENERATOR U VJETROAGREGATU	17
4.1. Sinkroni stroj	17
4.2. Dijelovi sinkronog stroja	18
4.3. Način rada sinkronog stroja.....	21
5. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ.....	23
5.1. Struktura i princip rada frekvencijskog pretvarača.....	24
5.2. Ispravljач	25
5.3. Istosmjerni međukrug (filter).....	27
5.4. Izmjenjivač	28
5.5. Ukupna shematska struktura frekvencijskog pretvarača	30
6. PSIM PROGRAM.....	32
7. REGULACIJA NAPONA I FREKVENCIJE SINKRONOG GENERATORA POMOĆU FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA	37
8. ZAKLJUČAK	44
LITERATURA.....	45
POPIS SLIKA	46
TABLICE	48

SAŽETAK

Regulacija napona sinkronog generatora pomoću frekvencijskog pretvarača

U ovom radu analizirana je povijest vjetroagregata, dijelovi vjetroagregata te se posebno piše o sinkronom generatoru koji se nalazi u vjetroagregatu. Upravljanje napona se vrši uz pomoć frekvencijskog pretvarača, koji ima glavnu ulogu u sustavu. Cijeli sustav je napravljen u PSIM programu, koji omogućuje prikaz sustava u vjetroagregatu.

Ključne riječi: sinkroni generator, frekvencijski pretvarač, PSIM program.

SUMMARY

Voltage regulation of a synchronous generator by means of a frequency converter

This paper analyzes the history of wind turbines, parts of wind turbines, and is specifically written about the synchronous generator located in the wind turbine. Voltage control is performed with the help of a frequency converter, which has a major role in the system. The entire system is made in the PSIM program, which allows the display of the system in the wind turbine.

Keywords: synchronous generator, frequency converter, PSIM program.

1. UVOD

Ekonomska i radna učinkovitost su sve više tražene te je sve veća potreba za uređajima koji olakšavaju radni proces i uklanjaju mogućnost pogreške u radnom procesu. U mnogim elektroenergetskim sustavima potrebno je precizno regulirati napon i frekvenciju. Sve više procesa je automatizirano, uklanjajući faktor ljudske pogreške. Jedan od tih uređaja u automatizaciji je i frekvencijski pretvarač, koji služi za upravljanje naponom i frekvencijom.

Frekvencijski pretvarači su elektronički uređaji koji služe za pretvorbu izmjeničnog napona određene efektivne vrijednosti i frekvencije u napon željene efektivne vrijednosti i frekvencije. U završnom radu govorit će se o povijesti vjetroelektrana, o dijelovima vjetroagregata, o sinkronim strojevima, o upotrebi frekventnog pretvarača, načinu rada i upravljanju njima.

Nakon frekvencijskih pretvarača bit će objašnjeno upravljanje naponom i frekvencijom. Promjena napona i frekvencije na kraju će biti prikazana putem naponsko-frekvencijske regulacije.

2. POVIJEST VJETROAGREGATA

Najraniji slučaj korištenja energije vjetra za pokretanje stroja putem rotora je Heronov vjetroagregat koji je pokretao orgulje za vrijeme 1. stoljeća.

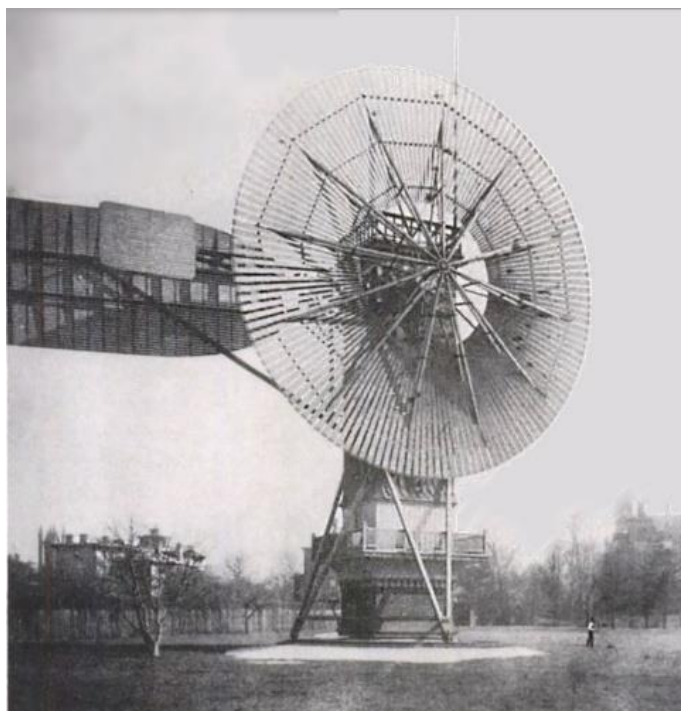
Prvi vjetroagregati za praktičnu primjenu bili su u upotrebi u Afganistanu i Iranu, najranije u 9. stoljeću, a moguće već i u 7. stoljeću. To su bili vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje i pravokutnim lopaticama s jedrima, a upotrebljavali su se za mljevenje i pumpanje vode. Njihova uporaba je bila raširena u srednjoj Aziji i na Bliskom istoku.

Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje su ušli u širu primjenu u sjeverozapadnoj Europi početkom 1180-tih godina i bili su korišteni za mljevenje. Mnogi stari nizozemski vjetroagregati i danas postoje. U to doba vjetroagregati su se također koristili i za pumpanje morske vode za dobivanje soli u Kini i na Siciliji.

Prvi vjetroagregat za proizvodnju električne energije je izradio prof. James Blyth u Škotskoj u srpnju 1887. Takva vrsta vjetroagregata, visine 10 m s platnenim jedrima, bila je postavljena u vrtu njegove vikendice i punio je akumulatore koji su davali energiju za osvjetljenje njegove kuće. Time je to postala prva kuća na svijetu koja se napajala električnom energijom proizvedenom iz energije vjetra.

Godine 1887. u Clevelandu (SAD) je Charles Brush dizajnirao i konstruirao veći i bolji vjetroagregat, koji je izradila njegova tvrtka, te ga postavila kod njegove kuće i koji je radio sve do 1900 godine. Vjetroagregat je imao rotor promjera 17 metara i bio je postavljen na 18 m visoki stup, no, unatoč veličini, razvijao je maksimalnu snagu od samo 12 kW, a okretao se relativno sporo i imao je 144 lopatice. Priključeni generator je punio akumulatorske baterije te pokretao do 100 žarulja ili neki od strojeva u Bushovom laboratoriju. Vjetroagregat je napušten 1908., nakon što je 1900. proradila centralna elektrana za proizvodnju električne energije u Clevelandu. [1]

Slika 1. prikazuje vjetroagregat iz 1888. godine koji se koristio za dobivanje električne energije.



Slika 1. Vjetroagregat iz 1888 godine [1]

Od početka 20. stoljeća do 1970-tih razvoj vjetroagregata i industrije vjetra je bio ograničen i usporen zbog dostupnosti i niske cijene drugih izvora energije, posebice nafte i ugljena. U Danskoj je energija vjetra bila bitan dio decentralizirane elektrifikacije u prvoj četvrtini 20. stoljeća, dobrim dijelom i zbog vjetroagregata u Askovu. Do 1908. bilo je postavljeno 72 vjetroagregata snage 5 do 25 kW. Najveći od njih su imali stup visine 24 m i promjer lopatica 23 m. [1]

Godine 1927. u SAD-u je osnovana tvrtka Jacobs Wind, koja je proizvodila vjetroagregate za korištenje na farmama. Oni su pretežno bili korišteni na farmama koje su bile udaljene od najbliže elektroenergetske mreže za punjenje akumulatora i osvjetljenje. U 30 godina proizvedeno ih je oko 30 000 i bili su korišteni i u zabačenim dijelovima Afrike, čak i na Antarktici. Ovakav način korištenja vjetra prepoznali su i mnogi drugi proizvođači opreme, a snage tih vjetroagregata su bile od nekoliko stotina W do nekoliko kW.

Godine 1957. Johannes Juul je postavio vjetroagregat s promjerom rotora 24 m u Geiseru koji je bio u pogonu 10 godina. Bio je to vjetroagregat s tri lopatice, horizontalnom osi vrtnje, okrenut u smjeru vjetra i s pasivnom regulacijom snage, sličan onima koji se danas koriste u komercijalnim vjetroelektranama. Takvi vjetroagregati su usavršeni te im je povećavan stupanj

iskorištenja, zbog serijske proizvodnje, a kao praktična posljedica toga danas svi komercijalni vjetroagregati slične tom danskom tipu vjetroagregata. [1]

2.1. Vjetroagregati u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je tvrtka Končar 1988. postavila prvi vjetroagregat u Uljaniku, koji se i danas tamo nalazi. Danas tvrtka Končar ima postavljen prvi prototip svog modernog vjetroagregata na lokaciji Pometeno brdo u blizini Konjskog elektroenergetskog postrojenja i pokušava uhvatiti korak s ostalim poznatim proizvođačima vjetroagregata. Promatrajući karakteristike vjetra na prostoru Hrvatske može se zaključiti da Hrvatska ima na desetke područja koja imaju zadovoljavajući vjetropotencijal za izgradnju vjetroelektrana. Mjerenja određenih karakteristika vjetra (brzina, smjer, učestalost) pokazala su da je za iskorištavanje energije vjetra povoljnije područje Jadrana od kontinentalnog dijela Hrvatske. Stoga su prve hrvatske vjetroelektrane izgrađene upravo na tom području koje je vjetrovito. [1]

Za projekte vjetroelektrana je do sada iskazano najviše interesa na područjima Ličko-senjske, Zadarske, Šibensko-kninske, Splitsko-dalmatinske i Dubrovačko-neretvanske županije. [1]

3. VJETROAGREGATI

Vjetroagregat je rotirajući energetski pogon koji pretvara kinetičku energiju vjetra u mehanički rad te se mehanički red pretvara u električnu energiju. Vjetroagregati koje se nalaze u vjetroparku Ogorje su Danskog proizvođača marke Vestas, ukupno instalirane snage od 42 MW. [2][5]

Slika 2. prikazuje vjetroagregat marke Vestas.



Slika 2. Vjetroagregat marke Vestas V112 [5]

3.1. Podjela vjetroagregata

Vjetroagregati mogu se podijeliti na više načina, i to:

- prema vrsti generatora,
- prema brzini vrtnje,
- prema osi vrtnje vjetroagregata.

Prema vrsti generatora razlikuju se vjetroagregati s istosmjernim, sinkronim ili asinkronim generatorima. Vezano uz podjelu prema vrsti generatora, koristi se nekoliko osnovnih tipova trofaznih generatora. Asinkroni generatori se dijele na kavezne te na generatore s namotanim rotorom i kliznim prstenovima. Sinkroni generatori mogu biti s namotanim rotorom ili s

permanentnim magnetom. Istosmjerni generator je rotacijski energetska stroj kod kojeg je stator izvor magnetskog polja, dakle u statoru se nalazi magnet ili elektromagnet, dok se na rotoru nalazi namot koji se vrti i u kojem se inducira električni napon. Oni se dijele na serijske, paralelne, nezavisne i kompaundne istosmjerne generatore.

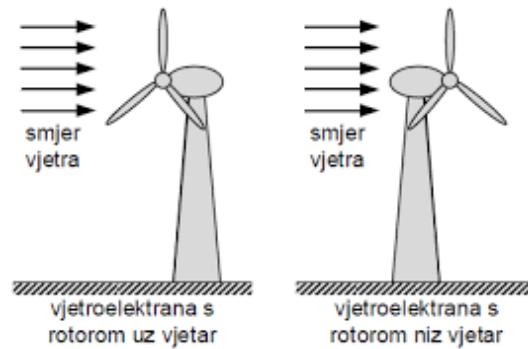
Prema brzini vrtnje vjetroagregati se dijele na one sa stalnom brzinom vrtnje te na vjetroagregate promjenjive brzine vrtnje.

Prednost izvedbe vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje je mogućnost izravnog priključenja na mrežu i korištenje jednostavnih generatora, čija je brzina vrtnje određena frekvencijom mreže. Nedostatak je optimalan rad samo za jedan omjer brzine vrha elise i brzine vjetra.

Prednost vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje je da je postignut optimalan rad za sve brzine vjetra. Ovakvi vjetroagregati na godišnjoj razini postižu čak i do 30% veći iznos predane električne energije od onih sa stalnom brzinom vrtnje. Kod ovakvih vjetroagregata, koji se spajaju na mrežu, potreban je frekvencijski pretvarač. Također su mnogo složeniji i skuplji u odnosu na vjetroagregate s jednom brzinom vrtnje.

Podjela vjetroagregata prema osi vrtnje podrazumijeva vjetroagregate prema načinu na koji je postavljena os vrtnje, odnosno osovina. Postoje vjetroagregati s horizontalnom i okomitom osi vrtnje. Vjetroagregati, odnosno rotor vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje mogu se međusobno razlikovati po više kriterija, a to su broj lopatica, način zakretanja gondole, postavljanje uz ili niz vjetar te postoji li difuzor ili ne. Konvencionalni vjetroagregati veće snage koriste isključivo rotor s tri lopatice postavljen prije stupa vjetroagregata tj. uz vjetar. [2]

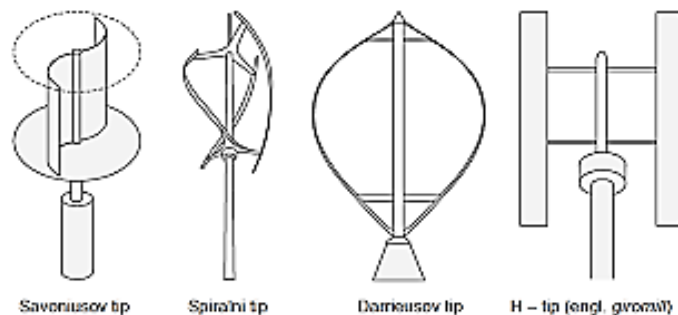
Slika 3. prikazuje vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje.



Slika 3. Vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje [2]

Postavljanjem osi vrtnje okomito dobiva se prednost u vidu iskorištenja vjetra iz svih smjerova te je sustav za zakretanje nepotreban. Ovakvi vjetroagregati su pogodni za naseljenija mjesta jer su tiši, imaju manju brzinu vrtnje i neovisni su o smjeru vjetra. Stupanj djelovanja je niži nego kod onih s horizontalnom osi vrtnje. Postoji nekoliko osnovnih tipova ovih vjetroagregata, kao što su Darrieusov tip, spiralni tip, Savoniusov tip i H-tip.

Slika 4. prikazuje podjelu vjetroagregata prema osi okomitoj smjeru vrtnje.



Slika 4. Vjetroagregat s okomitom osi vrtnje [2]

3.2. Dijelovi vjetroagregata

Osnovni dijelovi vjetroagregata su temelj, stup, kućište, rotor, multiplikator, generator.

Temelj vjetroagregata je element koji služi za prenošenje opterećenja na tlo, tj. za prenošenje opterećenja izazvanim vjetrom, koji djeluje na stup vjetroagregata. Kako bih temelj izdržao

tako velika opterećenja, u njega se ugrađuje posebni čelik (armatura), koji mu daje bolja svojstva prenošenja opterećenja na tlo te ga očvršćuje. Na armaturu se postavlja beton, koji omogućuje da temelj bude komponiran u jednu cjelinu te povećava težinu temelja, kako ne bi došlo do prevrtanja vjetroagregata. [2]

Slika 5. prikazuje temelj, tj. njegovu glavnu formu prije montiranja vjetroagregata.



Slika 5. Temelj vjetroagregata [2]

Stup vjetroagregata je najčešće cjevaste izvedbe, ali može biti i rešetkaste izvedbe. U unutrašnjosti stupa se nalaze ljestve, a kod novijih izvedbi ugrađuje se dizalo. Transformator koji povezuje vjetroagregat sa elektroenergetskom mrežom, kontrolna i mjerna jedinica nalaze se u podnožju stupa. Danas se najčešće koristi vjetroagregat cjevaste konstrukcije, a prednost mu je visoka čvrstoća i veća otpornost na vibracije. [2]

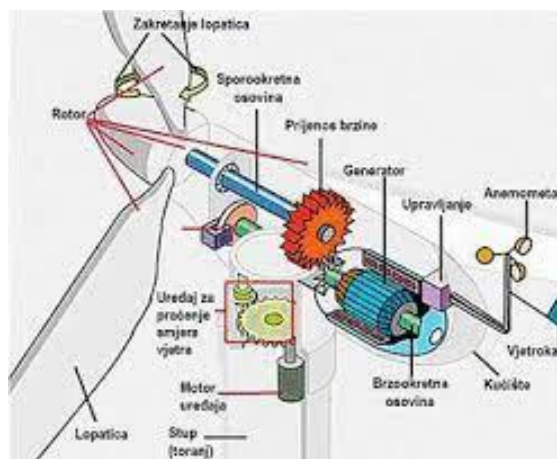
Slika 6. prikazuje stup vjetroagregata.



Slika 6. Stup vjetroagregata [2]

Kućište (gondola) vjetroagregata se nalazi na vrhu stupa. Kućište vjetroagregata ima dvije funkcije. Štiti generator od utjecaja okoliša te štiti okoliš od buke, koju sustav proizvodi. Njegovi najbitniji dijelovi su: elementi za uležištenje sporohodnog vratila, zupčanički, prijenosnik, brzohodno vratilo s disk kočnicom, generator, kontrolna jedinica, rashladni sustav, motorni pogon za zakretanje kabine s kočnicom i hidraulički pogon. Na kućištu vjetroagregata nalaze se elise, koje su spojene na rotor. Ispod kućišta se nalazi sustav zakretanja gondole, koji ima ulogu da se zakrene vjetroagregat u smjeru vjetra koji je pogodan za rad. Elise služe za pokretanje rotora, a rade na principu razlika tlakova. Broj elisa je obično tri ili pet po jednom vjetroagregatu. [2]

Slika 7. prikazuje kućište vjetroagregata s njegovim osnovnim dijelovima.



Slika 7. Kućište vjetroagregata [2]

Rotor se sastoji od glavčine i lopatica. Ovisno o regulaciji snage, rotor može biti izveden na dva načina. Regulacija kuta rotora tijekom rada vrši se zakretanjem lopatica. Lopatice se zakreću tako da se namjeste u optimalni položaj, koji im omogućuje bolje iskorištavanje vjetra. Takva regulacija vrste je složena i skupa. S promjenom brzine vjetra dolazi do poremećaja okretanja brzohodnog vratila vjetroagregata. Lopatice imaju visok stupanj pretvorbe energije vjetra u mehanički rad. Zbog najpraktičnije i najisplativije konfiguracije koriste se tri lopatice. S obzirom na izvedbu, lopatice se dijele na lopatice sa zakretnim vrhovima ili na lopatice s krilcima. Način rada lopatica s krilcima je takav da se krilca odvajaju od površine pa se smanjuju aerodinamičke karakteristike. Izvedbe lopatica s vrhovima i krilcima su također sekundarni sustavi za kočenje. Oni stvaraju moment kočenja u slučaju otkazivanja primarnog sustava za kočenje. [2]

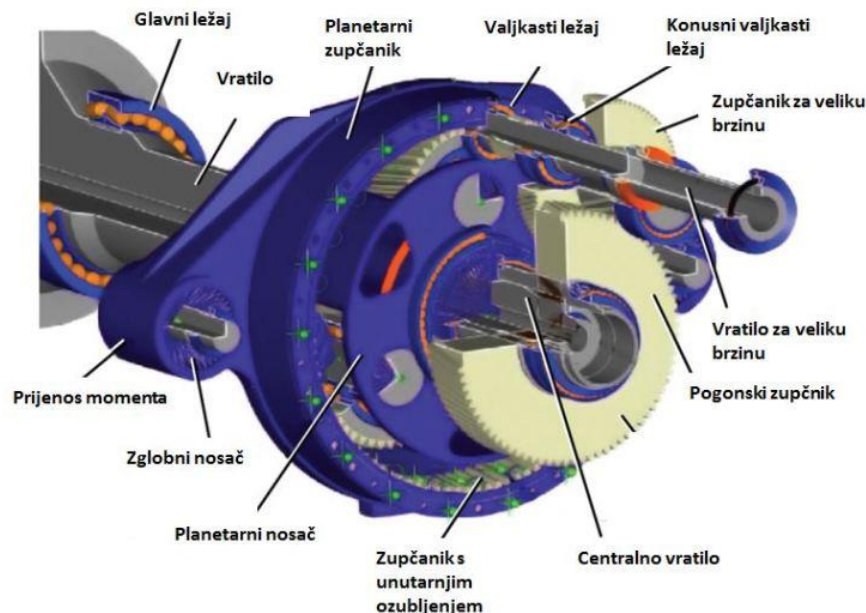
Na Slici 8. se vidi rotor vjetroagregata.



Slika 8. Rotor vjetroagregata [2]

Multiplikator vjetroagregata ima funkciju prilagođavanja niže brzine vrtnje vratila vjetroagregata višoj brzini vrtnje vratila električnog generatora. Zupčanički prijenosnik povećava brzinu vrtnje prijenosnim omjerom od 30 do 60 puta. On je povezan s brzohodnim vratilom, koje pokreće generator. Ako su generatori višepolni niskobrzinski i po mogućnosti sinkroni s uzбудnim namotom ili uzбудnim permanentnim magnetima, mehanički prijenosnik nije potreban (što je slučaj kod vjetroagregata novijeg dizajna). Iako se čini da su vjetroagregati sporohodni, multiplikator omogućuje bržu vrtnju vratila koji je spojen na generator, da bi se postigla nazivna brzina generatora za normalan rad vjetroagregata, kako bi isporučivao napon pogodan za elektroenergetski sustav. [2]

Na Slici 9. se prikazuje multiplikator vjetroagregata.



Slika 9. Multiplikator vjetroagregata [2]

Kada električni generator "ispadne" iz mreže ili kad brzina vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost vjetroagregata, dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja. Zato mora postojati kočni sustav vjetroagregata, kako bi rasteretio reduktor vjetroagregata, odnosno zaustavio vratilo na koje je spojen rotor vjetroagregata. Zadatak kočnog sustava vjetroagregata je održati brzinu vrtnje nazivnom, odnosno osigurati sustav da ne dođe do kvara i drugih troškova. Disk kočnica je najčešća izvedba kočnog sustava (kojom se na suvremenim strojevima upravlja

mikroprocesorski), a smještena je na sporijem vratilu kola prije reduktora ili na brzom vratilu generatora. Djelovanje im može biti elektromagnetsko ili hidrauličko, a aktiviraju se signalom generatora (zbog ispada iz mreže, dakle prekida strujnog kruga) ili signalom uređaja kojim se mjeri brzina vrtnje generatora. [2]

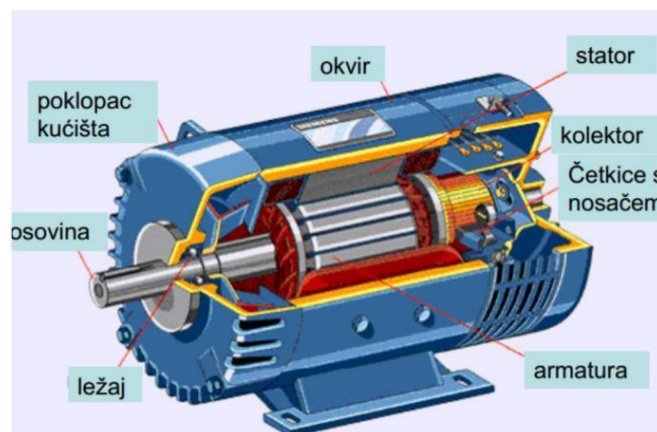
4. SINKRONI GENERATOR U VJETROAGREGATU

Generator je dio vjetroagregata kojim se stvara električna energija, koja je potrebna za elektroenergetski sustav. Ovisno o vrsti generatora, vjetroagregati mogu biti istosmjerni, izmjenični sinkroni ili asinkroni generatori. Istosmjerni generatori se zbog problema s pouzdanosti rijetko primjenjuju pa se zato uglavnom primjenjuju sinkroni generatori. Istosmjerni generatori nisu namijenjeni za duže trase radi gubitaka koji se stvaraju, čemu je glavni razlog velika potrošnja četkica na komutatoru, preko koji se šalje napon u mrežu. Sinkroni generatori se dijele prema tome da li je uzbuda na rotoru spojena na istosmjernu struju ili ima stalne (permanentne) magnete. [3] [4]

4.1. Sinkroni stroj

Sinkroni stroj je električni stroj čiji se rotor vrti brzinom jednakom brzini okretnog magnetskog polja koje ga pokreće. Sinkroni stroj može raditi u motorskom i generatorskom režimu rada. U generatorskom režimu osovinu stroja okreće vanjski izvor mehaničkog rada, primjerice parna turbina, dizel motor, hidro turbina, vjetroagregat, a na statoru se inducira izmjenični električni napon, čime se mehanička energija pretvara u električnu energiju. U motorskom režimu je stator stroja priključen na trofaznu ili jednofaznu mrežu, a izmjenična električna struja stvara okretno magnetsko polje u jezgri elektromotora, zbog kojeg se rotor počinje okretati, jer rotor ima svoje magnetsko polje, pretvarajući električnu energiju u mehaničku. [3] [4]

Slika 10. prikazuje sinkroni stroj sa njegovim dijelovima.



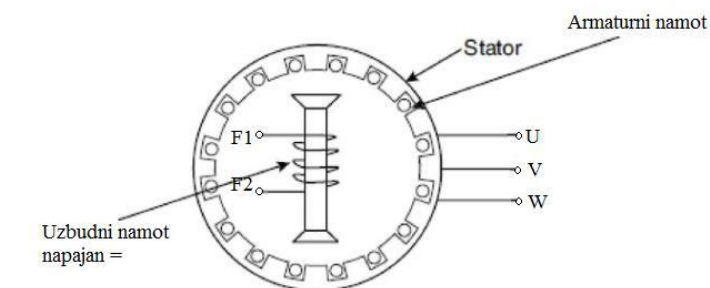
Slika 10. Dijelovi sinkronog stroja [4]

4.2. Dijelovi sinkronog stroja

Magnetski krug sinkronog stroja sastoji se, kao i kod svih rotirajućih električnih strojeva od statora, armaturnog namota, rotora, uzbude sinkronog stroja.

Stator sinkronog stroja je vanjski, nepomični dio stroja, na kojeg je namotan armaturni namot, šuplji valjak sastavljen od tankih magnetskih limova s ravnomjernim utorima (prostori za vodiče) i zubima (prostori između susjednih utora) na unutarnjoj strani i složenih u oklopu statora. Faze armaturnog namota su prostorno razmaknute u trofaznoj mreži za 120 električnih stupnjeva. Armaturni namot inducira elektromagnetsko polje, koje djeluje na rotor sinkronog stroja te mu omogućuje okretanje vratila, koji predaje određenu snagu, moment i brzinu radnom mehanizmu, prilikom rada u motorskom režimu. [3] [4]

Slika 11. prikazuje stator i elementarni namot sinkronog stroja.

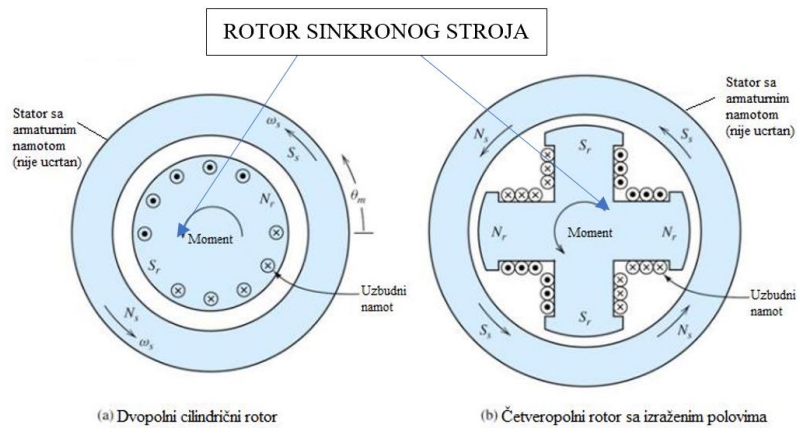


Slika 11. Stator i elementarni namot sinkronog stroja [4]

Rotor sinkronog stroja je dio motora koji se okreće. Na njega je namotan uzbudni namot, kojim teče istosmjerna, uzbudna struja, koja stvara magnetsko polje za pokretanje rotora sinkronog stroja. Ponekad se umjesto uzbudnog namota koriste stalni (permanentni) magneti. Uzbudni namot nalazi se na rotoru sinkronog stroja. Postoje dvije izvedbe rotora:

- rotor cilindrična oblika,
- rotor sa istaknutim polovima.

Slika 12. prikazuje vrste rotora sinkronog stroja.



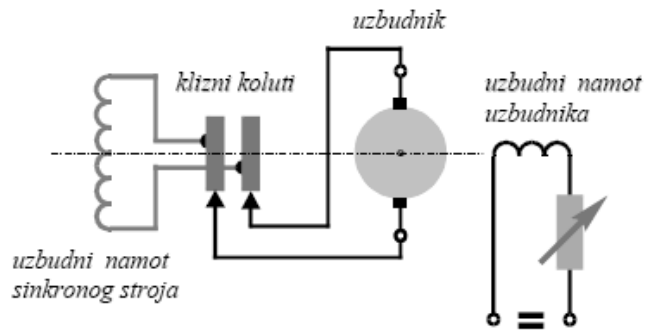
Slika12. Rotor sinkronog stroja [4]

Uzbuda sinkronog stroja služi da bi se stvorilo magnetsko polje, koje omogućuje pokretanje vratila kada stroj radi u režimu motora, a kada radi u režimu generatora, koje inducira na armaturi (statoru) sinkronog stroja izlazne napone. Struja koja teče uzbudnim namotom je istosmjerna. Posebni vodiči se omataju oko rotora, kako bi se kreirali električni magneti sa svojim polovima magnetskim tokom, koje je potrebno za rad sinkronog stroja.

Uzbuda sinkronog stroja se može izvesti kao dinamički sustav uzbude, statički sustav uzbude, beskontaktni sustav uzbude

Dinamički sustavi uzbude su sustavi kojima se uzbudni namot sinkronog stroja napaja pomoću generatora istosmjerne struje. Istosmjerni uzbudnik ima svoj armaturni namot, koji je omotan oko rotora uzbudnika i koji stvara istosmjernu struju. S armature istosmjernog uzbudnika struja se prenosi na klizne kolute uzbudnog namota sinkronog stroja. Uzbudnik koji proizvodi istosmjernu struju električki je spojen na rotor sinkronog stroja, tj. na uzbudni namot. Rotor sinkronog stroja se sastoji od vodiča koji su namotani na način da tvore magnetske polove, odnosno imaju svrhu stvaranja magnetskog polja. Na armaturi sinkronog stroja se inducira elektromotorna sila, odnosno napon. Prilikom rada u generatorskom režimu električna energija se predaje mreži. Slaba je strana ovog rješenja u kolektoru uzbudnika. [3] [4]

Slika 13. prikazuje dinamički sustav uzbude sinkronog generatora.

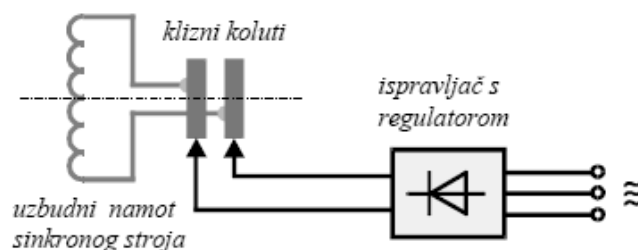


Uzбудni sistem s istosmjernim uzбудnikom

Slika 13. Dinamički sustav uzbuđe [4]

Statički sustavi uzbuđe se koriste u slučaju kad je izvor istosmjerne struje pretvarač energetske elektronike, koji se sastoji od poluvodičkih dijelova, kao što su diode, regulatori napona, otpornici. Izvor koji dolazi na ispravljač je trofazna struja, fazno razmaknuta za 120 električnih stupnjeva, koja se ispravlja u istosmjernu struju pomoću poluvodičkih dioda. Istosmjerna struja odvodi se sa ispravljača na klizne kolute, ali prije koluta provodi se kroz regulator napona, kojim se kontrolira napon uzbuđe. Klizni koluti predstavljaju plus i minus te se tako određuje smjer struje koja napaja rotor sinkronog stroja, kako bi se postiglo magnetsko polje za rad sinkronog stroja. [3] [4]

Slika 14. prikazuje statičku uzbuđu sinkronog stroja.

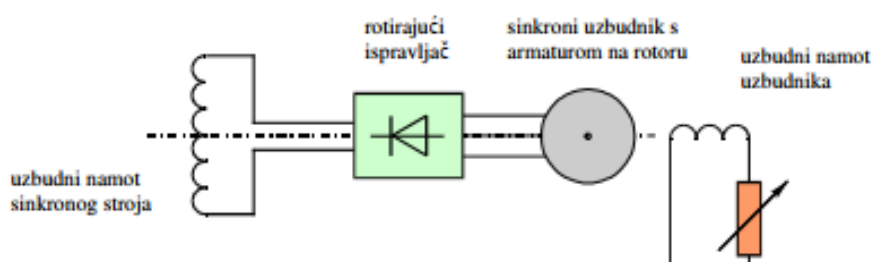


Statička uzbuđa

Slika 14. Statička uzbuđa sinkronog stroja [4]

Beskontaktna uzbuda sinkronog stroja je vrsta uzbude koja koristi mali sinkroni generator koji ima uzbudu na statoru, a armaturni namot na rotoru sinkronog generatora koji napaja. Uzbudnik (pomoćni generator) je zajedno s ispravljačkim uređajem montiran na osovinu sinkronog stroja i s njim se zajedno vrti. Armatura uzbudnika je preko ispravljačkog uređaja spojena s uzбудnim namotom sinkronog stroja. Regulacija uzbudne struje se postiže regulacijom uzbude pomoćnog generatora. Prednost je ovog rješenja to što ne zahtijeva ni kolektor ni klizne prstene pa traži manje održavanja. Koristi se za uzbudu manjih sinkronih strojeva koji rade samostalno na vlastitoj mreži, npr. male hidroelektrane, manji industrijski pogoni. [3] [4]

Slika 15. prikazuje beskontaktnu uzbudu sinkronog stroja.



Slika 15. Beskontaktna uzbuda sinkronog stroja [4]

4.3. Način rada sinkronog stroja

U motorskom načinu rada, armaturnim namotom na statoru teče trofazna struja. Prolaskom kroz namote na statoru, izmjenična struja stvara okretno magnetsko polje unutar sinkronog stroja. Na rotoru uzbudni namot stvara statičko magnetsko polje, koje se zbog prisutnosti okretnog polja počinje vrtjeti za njim, pritom za sobom „vuče“ rotor sinkronog stroja. Motor se smatra sinkronim kada se rotor okreće brzinom armaturnog magnetskog polja u nazivnim veličinama. Brzina vrtnje (broj okretaja) n ovisi o frekvenciji električne mreže na koju je elektromotor priključen f , te o broju magnetskih polova motora p , pri čemu je: n - brzina vrtnje (u okretajima u minuti), f - frekvencija električne mreže, a p - broj pari magnetskih polova motora (2 pola = 1 par polova). Kako je broj pari polova prirodan broj, prema formuli (1) brzina vrtnje sinkronog stroja ovisi o broju polova motora. [3] [4]

Formulom je prikazana brzina vrtnje sinkronog stroja:

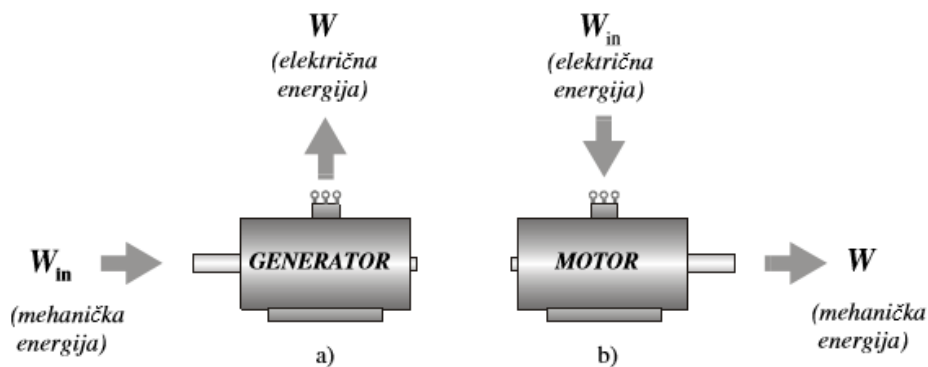
$$n = \frac{60 * f}{p} \quad (1)$$

Tako se dvopolni sinkroni stroj (jedan par polova) priključen na mrežu od 50 Hz okreće brzinom od 3 000 okretaja u minuti, četveropolni (dva para polova) se okreće brzinom 1 500 okr/min. Nije neuobičajeno da sinkroni stroj ima i 30, pa i više pari polova, zbog čega se sinkroni stroj sporo okreće. Takvi strojevi, korišteni kao generatori, najčešće nalaze primjenu u hidroelektranama.

U generatorskom načinu rada se događa obrnut proces u odnosu na motorski režim rada. Rotor je spojen na zajedničku osovinu s izvorom mehaničkog rada, npr. turbinom ili motorom s unutarnjim izgaranjem ili osovinom vjetroturbine. Kako se on vrti, s njim se vrti i njegovo magnetsko polje, kojeg stvara uzбудni namot, kojim teče istosmjerna struja.

Gledano sa položaja statora, to polje je okretno. Zbog toga se na statoru inducira napon koji slijedi polje rotora, a posljedično i struja. Frekvencija struje je određena brzinom vrtnje rotora, odnosno izvora mehaničkog rada te, ako je potrebno, podešava se pomoću frekvencijskog pretvarača te brojem polova sinkronog stroja. [3] [4]

Slika 16. prikazuje načine rada i pretvorbe energije u sinkronom stroju.



Slika 16. Način rada sinkronog stroja. [4]

5. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ

Frekvencijski pretvarač je elektronički pretvarač za promjenu frekvencije i napona izmjenične struje. To je uređaj za promjenu frekvencije izmjenične struje, a time i brzine rotora asinkronog (i sinkronog) električnog stroja. Koriste se kod pokretanja velikih asinkronih motora u kompliciranim sustavima (npr. linija u tvornici, pokretanju strojarskih dijelova, raznih dizelskih motora). On se još koristi u vjetroagregatima kao inverter koji šalje konstantan napon i frekvenciju u mrežu.

Suvremeni frekvencijski pretvarači imaju dobre karakteristike, relativno nisku cijenu, visoku pouzdanost, precizno upravljanje i praćenje procesa te veliku efikasnost. Ovisno o dizajnu, mijenjaju se i naponska razina i broj faza. Oni se najčešće koriste pri pokretanju sinkronih ili asinkronih strojeva, zato što brzina vrtnje stroja ovisi o frekvenciji. Povećavajući frekvenciju povećava se brzina stroja.

Za razliku od drugih pretvarača, frekvencijski pretvarač brzinu vrtnje mijenja postupno, kako bi stroj radio besprijekorno i imao siguran start ili korigira frekvenciju koja je potrebna za rad izmjeničnih strojeva. Takav primjer je sinkroni stroj koji kada se vrti brzinom vrtnje malo većom od sinkrone brzine, stvara frekvenciju iznad nazivne, koja iznosi preko 50 Hz. Takvu frekvenciju je potrebno dovesti na nazivnu frekvenciju mreže. [11]

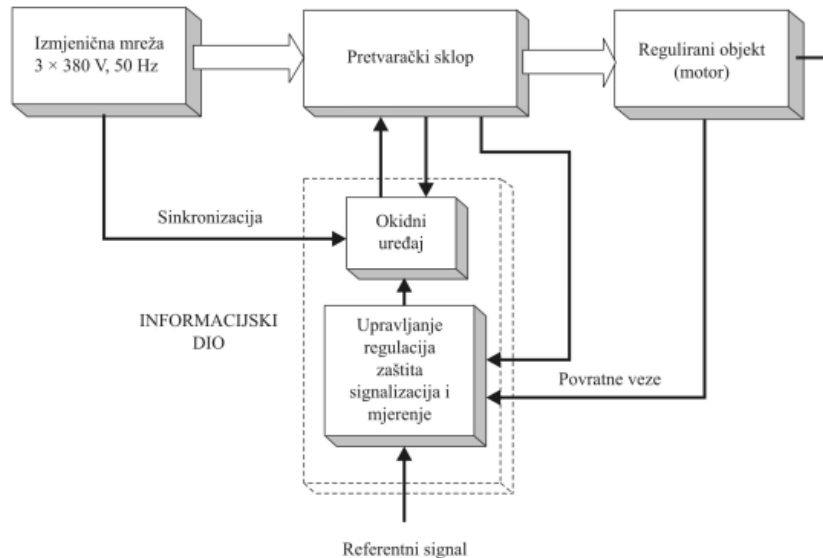
Slika 17. prikazuje frekvencijski pretvarač.



Slika 17. Frekvencijski pretvarač [7]

5.1. Struktura i princip rada frekvencijskog pretvarača

Slika 18. prikazuje sklop s frekvencijskim pretvaračem, na primjeru regulacije motora .



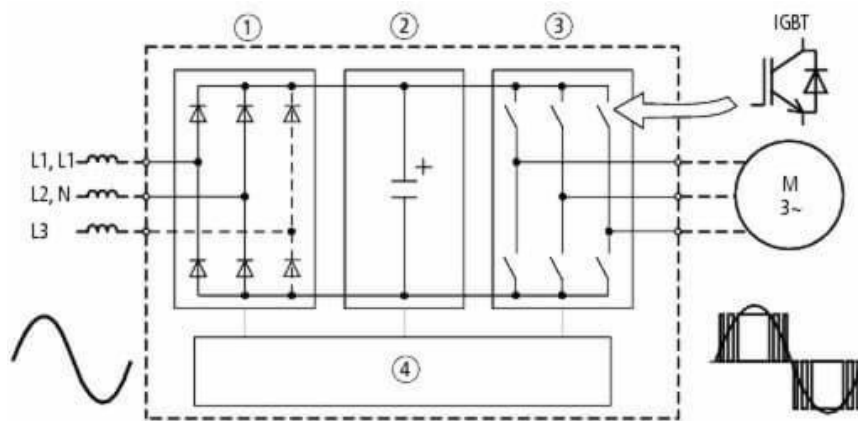
Slika 18. Sklop s frekvencijskim pretvaračem [6]

Frekvencijski pretvarač se sastoji od tri dijela:

- ispravljač,
- međukrug (filter),
- izmjenjivač.

Slika 19. prikazuje shemu frekvencijskog pretvarača, na primjeru motorskog režima rada stroja.

Frekvencijski pretvarač je postavljen između mreže i stroja. Za generatorski režim rada tijekom energije je od stroja prema mreži, za razliku od motorskog režima rada stroja, gdje je obrnuto.



Slika 19. Shema frekvencijskog pretvarača [8]

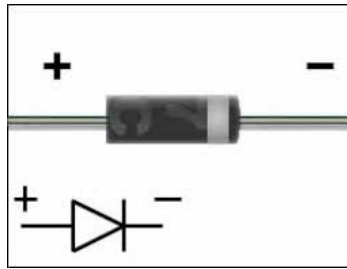
5.2. Ispravljač

Ispravljač je elektronički dio pretvaračkog sklopa i direktno je priključen na napon mreže konstantne amplitude i frekvencije koja najčešće iznosi 50 Hz. U ispravljač se dovodi izmjenični napon, najčešće trofazni napon koji ima vrijednost napona 400 V ili jednofazni koji ima vrijednost napona 230 V. U elektroenergetskim sustavima se koristi trofazni napon dok se monofazni koristi u kućanstvima. U ovom radu predstavljen je trofazni ispravljač, iako se mogu priključiti i na jednofazni napon. Ispravljač može biti napravljen pomoću dioda, tiristora ili njihovih kombinacija. Korištenjem dioda, ispravljač je neupravljiv.

S druge strane, ispravljači koji sadrže tiristore nazivaju se upravljivi ispravljači. Prednost tiristorskih ispravljača je mogućnost vraćanja energije u mrežu, dok je mana to što u odnosu na diodne pretvarače stvaraju veće gubitke. Tiristorski ispravljači su puno bolji nego diodni jer imaju mogućnost upravljanja.

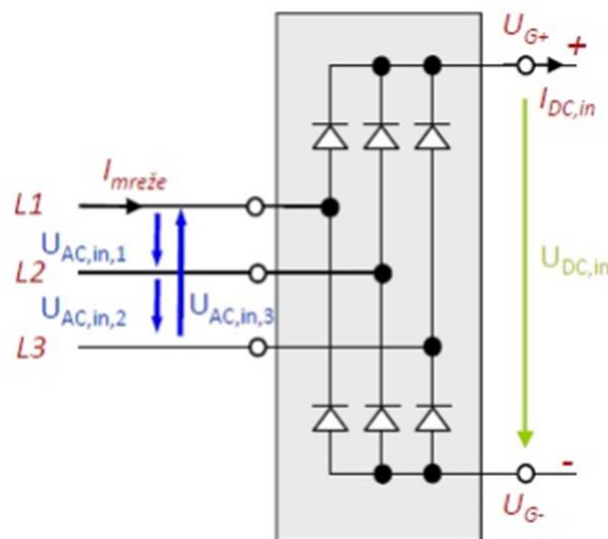
Dioda je poluvodički elektronički element s dvjema elektrodama (anoda i katoda) kojemu smjer vođenja električne energije ovisi o polaritetu električnog napona između elektroda, pa zato propušta električnu struju gotovo samo u jednom smjeru, od smjera plus prema smjeru minus. Dioda se izvode na temelju PN-spoja ili na temelju spoja metal-poluvodič. Dioda se dijele po materijalu po kojem su napravljene (silicij, germanij, galijev arsenid, silicijev karbid) [8] [11] [10]

Slika 20. prikazuje diodu i njen simbol koji se koristi u elektronici



Slika 20. Poluvodička dioda [6]

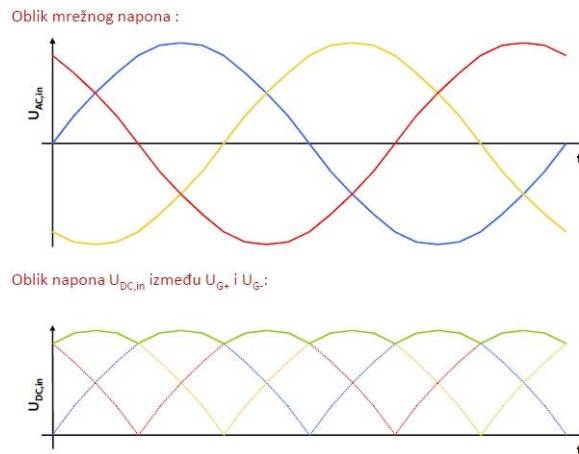
Slika 21. prikazuje diodni spoj koji je spojen na trofaznu mrežu.



Slika 21. Ispravljač [11]

Sa slike 21. se vidi kako u ispravljač ulazi trofazni napon U_{AC} koji se prenosi na diodni mosni spoj, gdje se ispravlja u istosmjerni napon U_G . U ovoj vrsti spoja u kojem se nalazi 6 dioda izlazni napon je šesteropulsni istosmjerni. [8] [11] [10]

Slika 22. prikazuje ulazni napon u ispravljač i izlazni napon iz ispravljača.

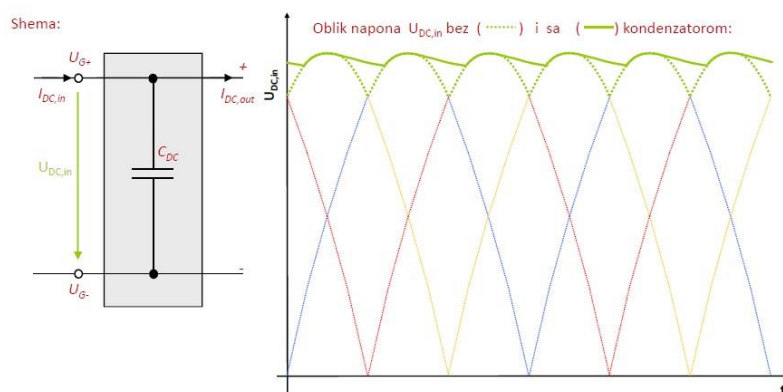


Slika 22. Ulazni i Izlazni napon [11]

5.3. Istosmjerni međukrug (filter)

Istosmjerni međukrug je važan u frekvencijskim pretvaračima jer nije moguće efikasno i direktno pretvarati napon jedne amplitude i frekvencije u napon druge amplitude i frekvencije. Uloga istosmjernog međukruga je "zaglađivanje" istosmjernog napona, koji je na izlazu iz ispravljača pulsirajući. Takvo zaglađivanje napona je nužno za ispravan rad izmjenjivača. Zapravo se radi o vrlo jednostavnom elektroničkom sklopu koji se može sastojati od kondenzatora, zavojnice i otpornika. U ovom se slučaju spaja se samo kondenzator. Kondenzator se spaja paralelno, da "zagladi" ispravljeni pulsirajući napon te još služi kao mali spremnik energije prilikom rada motora u generatorskom režimu rada. Zavojnica se spaja u seriju jer ona održava struju konstantnom. [11] [10]

Slika 23. prikazuje shemu istosmjernog međukruga i oblik "izgladenog" napona .



Slika 23. Istosmjerni međukrug [11]

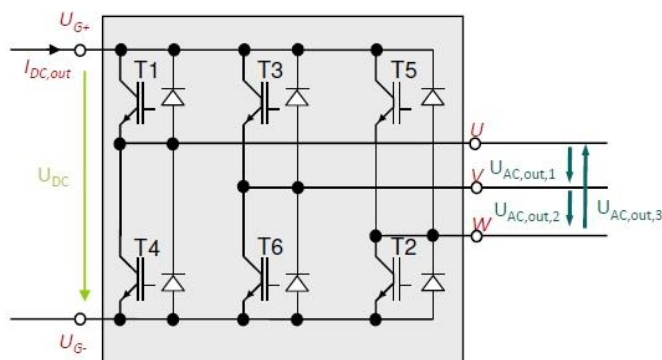
5.4. Izmjenjivač

Izmjenjivač je elektronički sklop koji mijenja frekvenciju i napon te je njegov izlaz direktno spojen na mrežu. Zadatak mu je modifikacija ulaznog istosmjernog napona u trofazni simetrični izmjenični napon tražene frekvencije i amplitude na izlazu. Na ulaz izmjenjivača može se narinuti:

- konstantan DC napon,
- promjenjivi DC napon,
- promjenjiva DC struja.

Izmjenjivač može osigurati promjenjivu frekvenciju i amplitudu izlaznog napona samo ako prima konstantan DC napon. Izmjenjivač je upravljan modulacijom (PWM – Pulse Wide Modulation). Izmjenjivač se sastoji iz 6 IGBT tranzistora koji su spojeni da su im kolektor i emiter spojeni na istosmjerni napon U_G dok je gate spojen na upravljački sklop koji kontrolira sustav uklapanja i isklapanja sklopki. [8] [10]

Slika 24. prikazuje šest IGBT tranzistora koji se nalaze u izmjenjivaču.

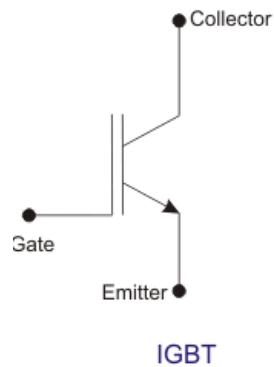


Slika 24. Shema izmjenjivača [11]

IGBT tranzistor je poluvodički uređaj, koji u ovom slučaju služi kao sklopka koja se zatvara dovođenjem pozitivnog izmjeničnog strujnog impulsa. IGBT tranzistor se sastoji od ulaza (gate), emitera i kolektora. Na gate se dovodi izmjenični signal, da poteče struja između emitera i kolektora, koja je dovedena s bloka 2 prema Slici 19., tj. filtera istosmjernog napona. IGBT

tranzistor ima jako malo vrijeme isklapanja i uklapanja, koje iznosi do 400 nanosekundi koje mu omogućuje da radi kao sklopka. [8] [9] [10]

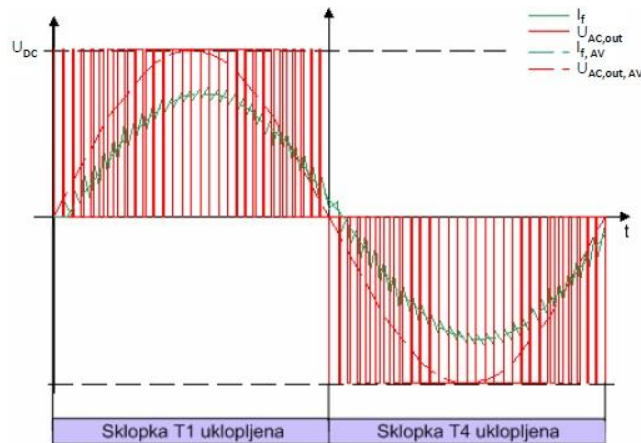
Slika 25. prikazuje IGBT izmjenjivač.



Slika 25. IGBT [7]

Izlazni napon izmjenjivača je pravokutni, a osnovni harmonik napona koji se dovodi na mrežu ima sinusni valni oblik. Srednja vrijednost napona unutar perioda sklapanja ovisi o vremenu i frekvenciji vođenja tranzistorskih sklopki. Uz veću frekvenciju sklapanja sklopki dobiva se preciznija i glađi oblik traženog napona, a nedostatak koji se pritom javlja su povećani gubici u IGBT tranzistoru. [8] [11] [10]

Slika 26. prikazuje izlazni napon iz izmjenjivača.

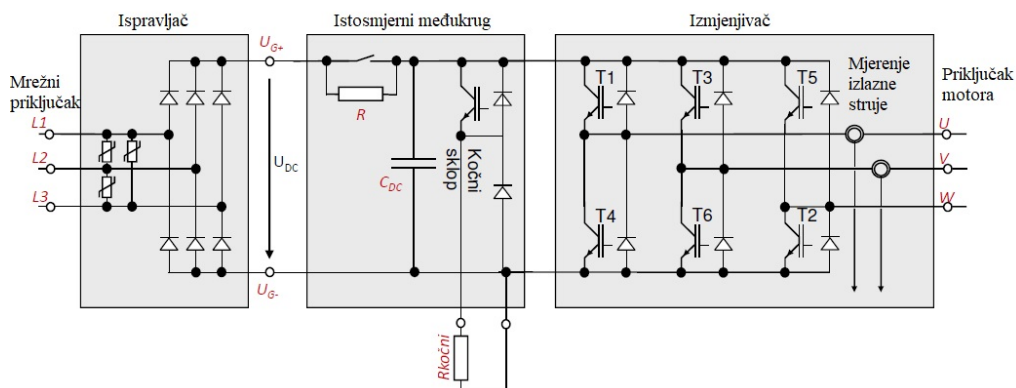


Slika 26. Fazni oblici napona i struje na izlazu izmjenjivača [11]

Sa slike 26. se vidi da je za vrijeme pozitivne poluperiode uključena (uklopljena) sklopka T_1 te ona kontrolira napon i frekvenciju uključivanjem i isključivanjem IGBT sklopke. Za vrijeme negativne poluperiode uključena je sklopka T_4 te se preko nje kontroliraju napon i frekvencija koji se predaju mreži. U ovom slučaju prema slici 26. vidi se samo jedna faza koja se ispravlja na pretvaraču pomoću IGBT tranzistora.

5.5. Ukupna shematska struktura frekventijskog pretvarača

Na Slici 27. prikazana je ukupna shematska struktura frekventijskog sklopa između mreže i stroja.



Slika 27. Shematska struktura pretvaračkog sklopa [11]

Uz pretvarački sklop potrebno je imati i jedinicu kojom se upravlja izlaznim naponom i frekvencijom (mikroprocesor), koja ima sljedeće zadatke:

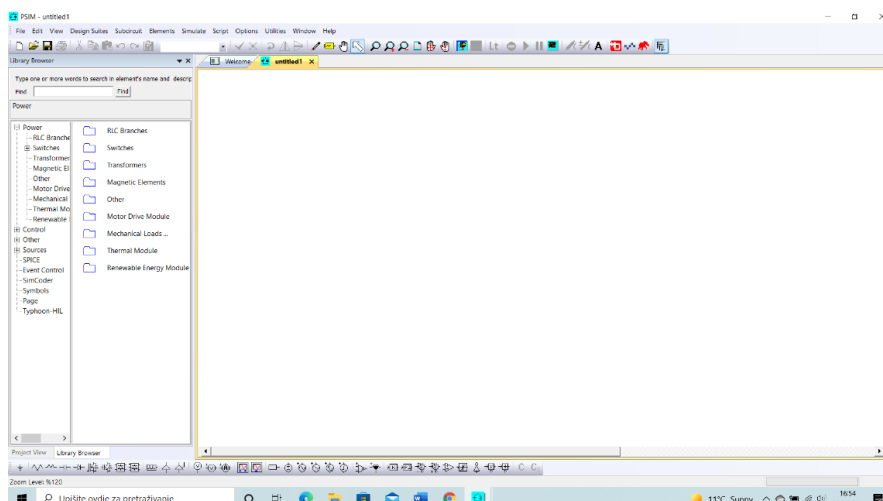
- upravljanje svim poluvodičkim komponentama,
- komunikacija između frekvencijskog pretvarača i okoline,

S razvojem i upotrebom mikroprocesora ekstremno je povećana brzina upravljanja sustavom. Mikroprocesori su u stanju obraditi veliki broj podataka i izvršiti mnogo operacija u malom vremenu, suvremeni frekvencijski pretvarači upravljani mikroprocesorima su u stanju računati vrijeme upravljanja za vanjsku mrežu u svakom trenutku. U mikroprocesoru se vrše svi proračuni koji su važni za korištenje naprednih metoda upravljanja. Mikroprocesor je zadužen i za obradu povratnih signala napona i frekvencije koji se predaju u mreži te analizi njihovih karakteristika i kvalitete signala. [8] [11] [10]

6. PSIM PROGRAM

PSIM je softverski paket za simulaciju elektroničkih krugova, dizajniran posebno za korištenje u simulacijama energetske elektronike i pogona motora, ali se može koristiti za simulaciju bilo kojeg elektroničkog sklopa. PSIM program koristi analizu i integraciju trapeznih pravila kao osnovu svog algoritma za simulaciju. PSIM pruža shematsko sučelje za snimanje i Simview preglednik valnog oblika. PSIM ima nekoliko modula koji proširuju njegovu funkcionalnost na specifična područja simulacije i dizajna krugova uključujući teoriju upravljanja elektromotora, fotonaponskih sustava i vjetroturbine. PSIM program se koristi u industriji za istraživanje i razvoj proizvoda, a koriste ga obrazovne institucije za istraživanje i nastavu. [12]

Slika 28. prikazuje radnu površinu PSIM programa.



Slika 28. Radna površina PSIM programa

Kako bi se krenulo u rad u PSIM programu potrebno je u izborniku koji se nalazi u gornjem lijevom kutu stisnuti bijelu ikonu koja označava novi list.

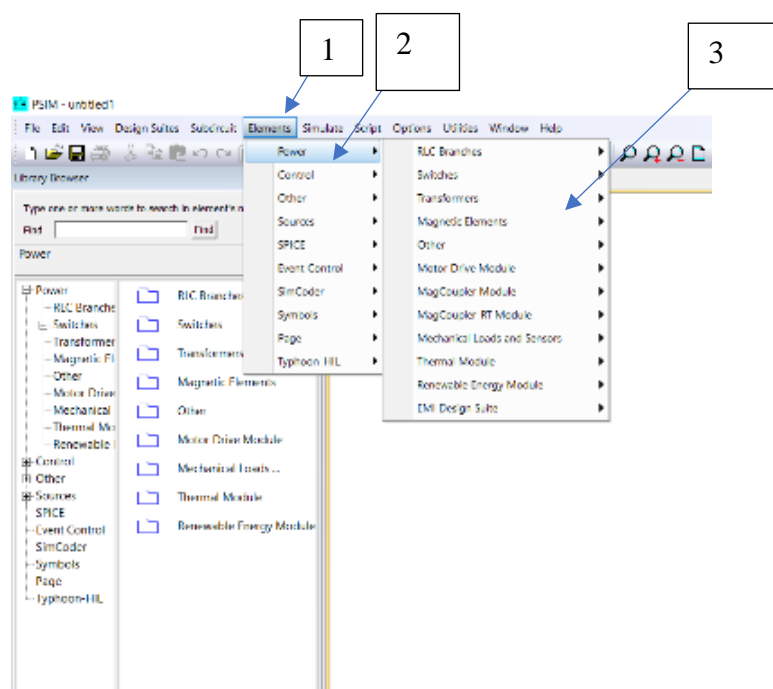
Slika 29. prikazuje izbornik u PSIM programu.



Slika 29. Izbornik alata u PSIM programu

U izborniku se nude mnogi alati koji služe za sastavljanje elektroničkih krugova. U ponudi je alat za spremanje slike, alat za spremanje datoteke, alat za crtanje, alat za pomicanje predmeta, alat za uvećavanje i smanjivanje zaslona, što omogućuje bolji rad, te izbornik za simulacije elektroničkih krugova. Kada se pokreće sastavljanje elektroničkog kruga potrebno je u izborniku te kliknuti ikonu "Elements" te se ponude razne ikone, koje predstavljaju izvore električne energije, sklopke, transformatore, otpornike, kondenzatore, zavojnice, alate za mjerenje napona i struje, itd. Navedeni postupak je prikazan brojevima od 1 do 3, na slici 30.

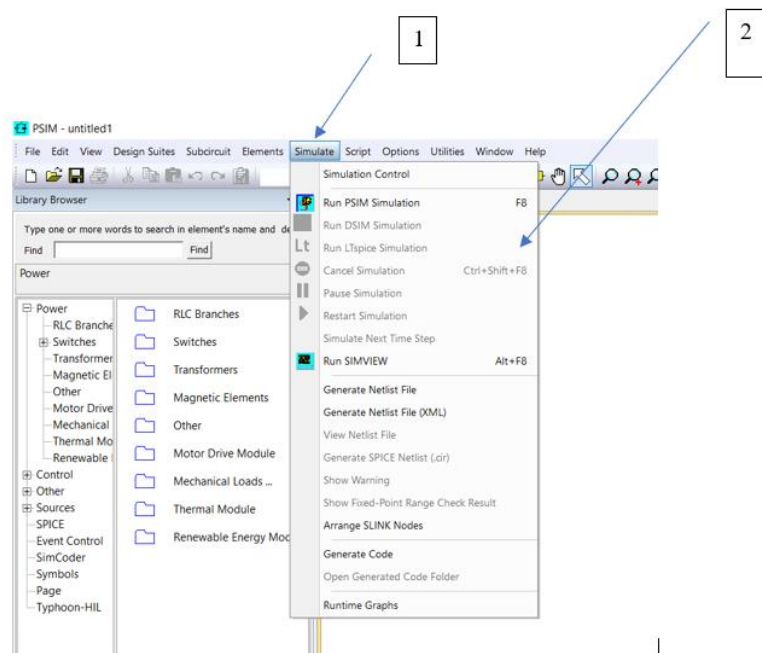
Slika 30. prikazuje elektroničke elemente za spajanje elektroničkih krugova.



Slika 30. Izbornik elemenata u PSIM programu

Kada se napravi određen strujni krug u PSIM radnoj površini potrebno je kliknuti na ikonu "Simulate" te se ponude razne opcije. Za simulaciju strujnog kruga potrebno je kliknuti na opciju "Run PSIM Simulation" te se nudi opcija prikazivanja veličine koja se mjeri.

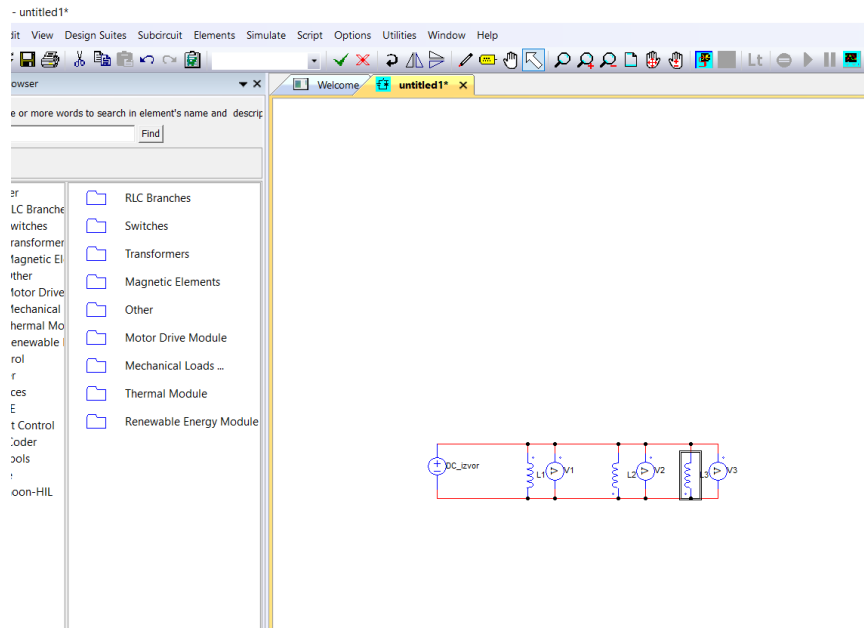
Slika 30. pokazuje proces ulaska u simulaciju elektroničkog kruga.



Slika 30. Prikaz opcije za simulaciju u PSIM - u

Nakon ulaska u simulaciju otvara se opcija prikazivanja grafova , tj. veličina koje su mjerene u programu. Program ima funkciju da prikaže graf u nekom određenom vremenu.

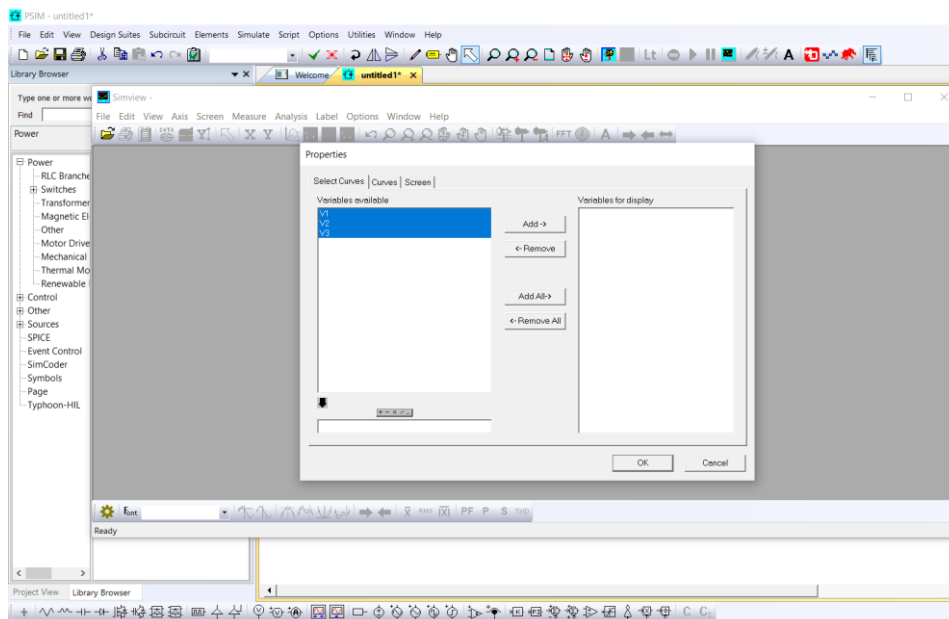
Slika 31. predstavlja jednostavnu shemu koja se mjeri u PSIM- u.



Slika 31. Shema napravljena u PSIM programu

Nakon što je shema sastavljena, potrebno je pokrenuti simuliranje sheme koja je napravljena u PSIM- u. Nakon što se prikaže opcija prikazivanja grafa, potrebno je kliknuti na ikone "V1, V2, V3" te stisnuti na "Add".

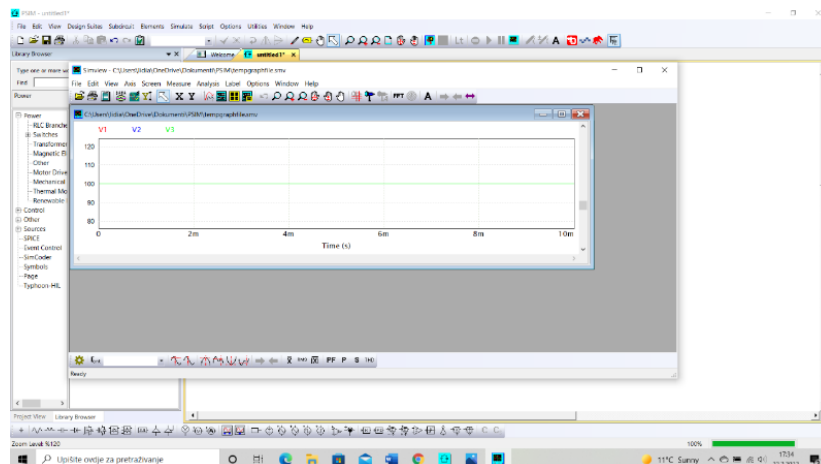
Slika 32. prikazuje opciju prikaza grafa.



Slika 32. Odabir ulaza u graf u PSIM programu

Nakon klikanja ikone "Add", prikaže se graf koji mjeri veličine (u ovom slučaju napon). U slučaju spremanja grafa na računalo potrebno je kliknuti ikonu "Copy to Clipboard" te se slika spremi, nakon toga je spremna za korištenje.

Slika 33. prikazuje graf koji prikazuje mjerene veličine.



Slika 33. Graf u PSIM programu

7. REGULACIJA NAPONA I FREKVENCIJE SINKRONOG GENERATORA POMOĆU FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA

Kao primjer se obrađuje vjetroagregat marke Vestas V112, čiji je proizvođač Danska tvrtka. Ovaj vjetroagregat je visok 84 metara. Vjetroagregat ima 3 elise, duljina jedne elise iznosi 56 metara. Brzina okretanja vratila vjetroagregata kreće se od 510 do 1500 o/min. Vjetroagregat ima sinkroni generator koji na rotoru ima šest pari polova. Vratilo generatora spojeno je na multiplikator tj. na prijenosnik snage. [5]

Nazivni podaci generatora nalaze se u tablici 1.

Tablica 1. Nazivni podaci generatora vjetroagregata. [5]

Vrsta generatora	Sinkroni generator s permanentnim magnetima
Snaga generatora [P_n]	3 [MW]
Nazivni napon [U_n]	1000 [V]
Nazivna frekvencija [f]	145 [Hz]
Prividna snaga [S_n]	3,88 [MVA]
Nazivna brzina vrtnje [n]	1450 [o/min]
Prijenosnik snage- multiplikator	Diferencijal, tri planetarna stupnja
Omjer multiplikatora	1:113,2

Nazivna brzina sinkronog generatora iznosi 1450 okretaja/min, ta je brzina dobivena uz pomoć formule za sinkronu brzinu vrtnje:

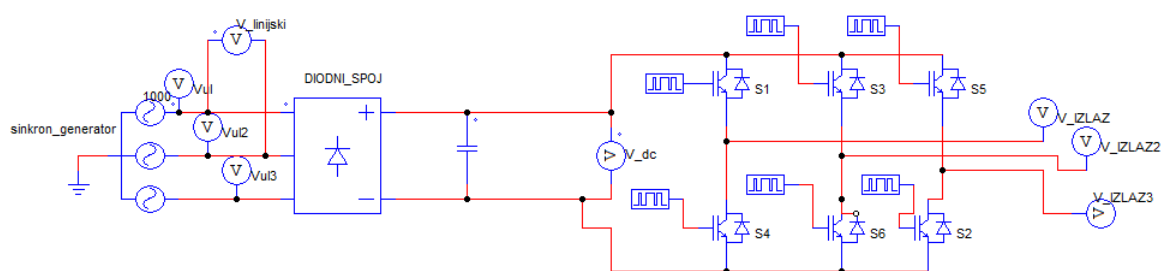
$$n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 145}{6} = \frac{8700}{6} = 1450 \text{ [o/min]} \quad (2)$$

Izlazni napon generatora iznosi 1000 V, prenosi se u frekvencijski pretvarač. Frekvencija nije 50 Hz već iznosi 145 Hz, zato što kad vjetar okreće rotor brzinom vrtnje veće od nazivne brzine sinkronog generatora, povećavaju se frekvencija i napon vjetroagregata. Da bi se isporučilo zahtijevani što kvalitetniji napon i frekvencija, potrebne za rad transformatora, primara

spojenog u zvijezdu, koji se nalazi u sustavu vjetroagregata, koristi se frekvencijski pretvarač. [5]

Za ovaj rad je napravljen primjer sustava vjetroagregata tj. samo dio koji predstavlja sinkroni trofazni generator i frekvencijski pretvarač. Prikaz ovog sinkronog generatora i frekvencijskog pretvarača je napravljen u programu PSIM.

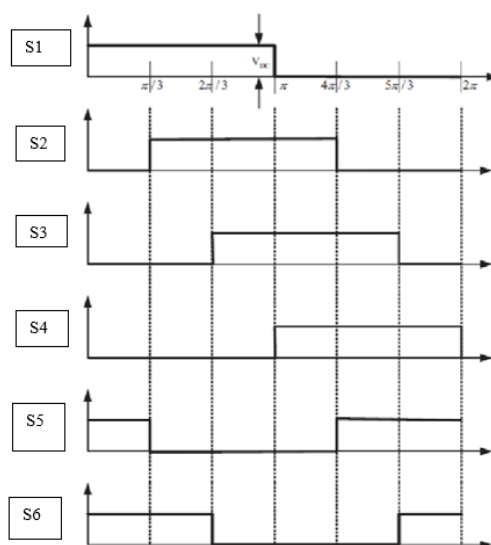
Slika 34. prikazuje PSIM model sinkronog trofaznog generatora i frekvencijskog pretvarača.



Slika 34. PSIM model kontrole vjetroagregata.

PSIM program prikazuje trofazni sinkroni generator kojem je ulazni linijski napon 1000 V i frekvencija 145 Hz. Trofazni napon se predaje ispravljaču, koji ga pretvara u istosmjerni napon istog iznosa. Napon se šalje u frekvencijski pretvarač koji se sastoji od 6 IGBT tranzistora, koji služe kao sklopke koje otvaraju ili zatvaraju u nekom određenom vremenu, za dobivanje kvalitetnog napona i frekvencije. Frekvencija iznosa 50 Hz jednaka je periodu od 20 milisekundi (ms). Period jedne faze je 20 ms, a razmak fazi iznosi 120 električnih stupnjeva, što znači da su sve tri faze razmaknute jedna od druge za 120 električnih stupnjeva, kako bi se dobio trofazni simetrični napon. Da bi potekla struja potrebno je da se sklopke zatvore, kako bi struja potekla u smjeru koji je potreban. Mreža koja je spojena na frekvencijski pretvarač mora biti spojena u zvijezdu tj. primar transformatora mora biti spojen u zvijezdu koji se sastoji od vodiča L1, L2, L3 i N. Vodiči L1, L2, L3 su faze koje su međusobno razmaknute za 120 stupnjeva, a N predstavlja nul vodič kojim teče ukupna struja koja se vraća na izvor. Nul vodič je potreban da bi se napravio negativan napon tj. negativan period koji se vraća na izmjenični izvor.

Slika 35. prikazuje vođenje sklopki te trajanje vođenja.



Slika 35. Prikaz vođenja sklopki te njihov kut vođenja [11]

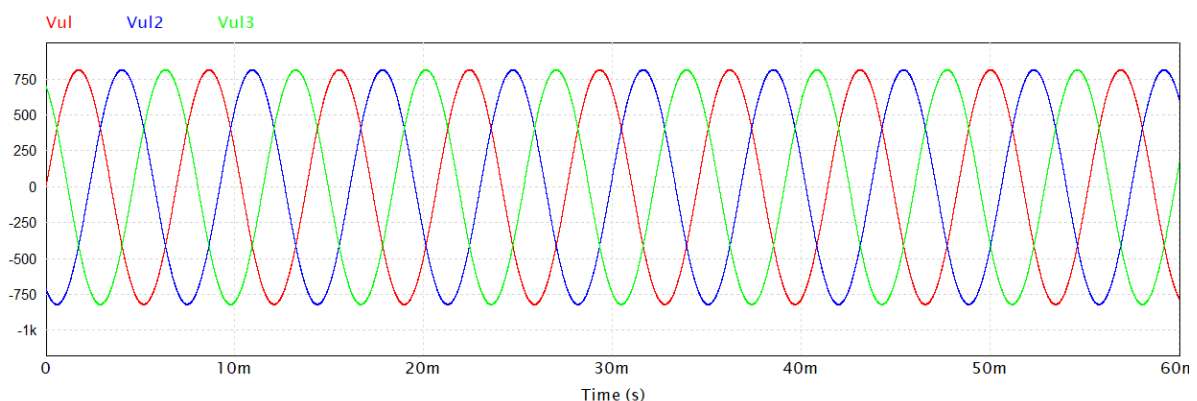
Sa slike 35. se vidi da sklopka vodi neki određen kut. Na slici 35. je prikazan kut vođenja sklopki u radianima, a u PSIM programu je potrebno to prebaciti u stupnjeve. Sa slike 35. se vidi kako π iznosi 180 stupnjeva, a 2π iznosi 360 stupnjeva. Razmak između crtica iznosi 30 stupnjeva. Jedan period faze iznosi 360 stupnjeva, što znači da se pozitivna poluperioda kreće od nula do 180 stupnjeva, a negativna poluperioda od 180 do 360 stupnjeva. U ovom slučaju sklopke S1, S3, S5 uklopljene su u pozitivnoj periodi, a sklopke S2, S4, S6 su u negativnoj poluperiodi što znači da će one biti negativne. Sklopke S1, S3, S4 su razmaknute za 120 stupnjeva kako bi se postigao zahtijevani simetrični trofazni sustav napona.

Tablica 2. Sklopke i njihov kut vođenja

Sklopke	Kut vođenja sklopki (stupnjevi)
S1	0-20 stupnjeva
S2	60-80 stupnjeva
S3	120-240 stupnjeva
S4	180-200 stupnjeva
S5	240-260 stupnjeva
S6	300-320 stupnjeva

Iz tablice 2. se vidi način na koji sklopke vode, odnosno njihov kut vođenja, koji se mijenja po potrebi kada je potreban drukčiji napon. Za izradu ovog rada bilo je potrebno smanjiti kut upravljanja, jer je bio napon od 1000 V te ga smanjiti na linijski napon od 400 V. Za protjecanje prve faze potrebno je da vode sklopka S1 te da se još uklopi sklopka S2 i sklopka S6 kako bi prošao fazni napon koji se podijeli kad poteče kroz sustav spojen u zvijezdu. Zbroj struja tri faze jednak je struji koja teče kroz nulvodič. Ostale sklopke rade na istom principu, samo su fazno razmaknute za 120 električnih stupnjeva. Napon se detaljno obrađuje kako bi se lakše isporučio u elektroenergetski sustav po standardima, koji su potrebni potrošačima za normalan rad.

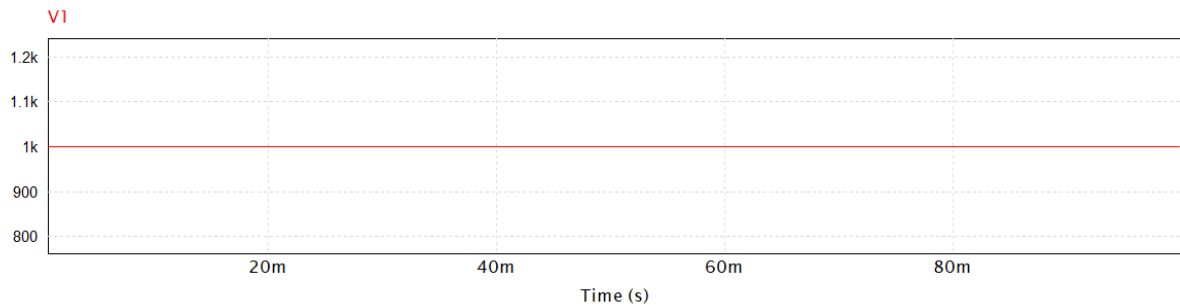
Slika 36. prikazuje fazni ulazni napon od 577,35 volti za sve tri faze razmaknute za 120 električnih stupnjeva.



Slika 36. Linijski naponi generatora.

Trofazni izmjenični linijski napon, iznosa 1000 V, fazno razmaknut za 120 električnih stupnjeva, prenosi se na mosni spoj dioda, koje ispravljaju trofazni izmjenični linijski napon u istosmjerni napon iznosa 1000 V. Istosmjerni napon, prije nego se isporuči izmjenjivaču, šalje se u filter koji će ga izgladiti, odnosno učiniti konstantnim i bez prekida.

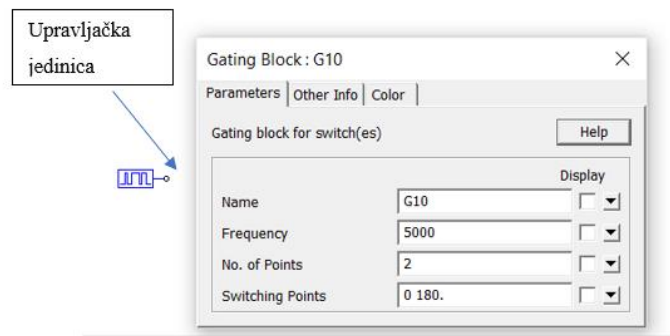
Slika 37. prikazuje ispravljen napon koji je prošao kroz filter.



Slika 37. Ispravljen istosmjerni napon

Ispravljen istosmjerni napon iznosa 1000 V se odvodi na IGBT most, koji je sastavljen iz 6 IGBT tranzistora, koji služe kao sklopke i koji mijenja frekvenciju ulaznog napona, koja iznosi 145 Hz na frekvenciju od 50 Hz. Uz podešavanje iznosa frekvencije, potrebno je podesiti i napon. Izlazni napon i frekvencija se kontroliraju pomoću strujnog impulsa i kuta vođenja sklopki.

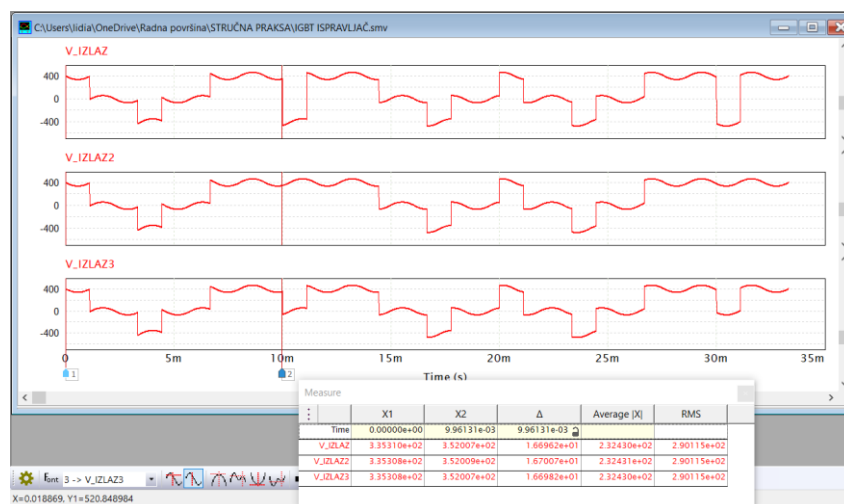
Slika 38. prikazuje upravljačku jedinicu.



Slika 38. Upravljačka jedinica frekvencijskog pretvarača.

Upravljačka jedinica je zapravo jedna vrsta sklopke koje se kontrolira ovisno o kutu vođenja. Sa Slike 37. se vidi na koji način se mogu kontrolirati frekvencija i kut vođenja sklopke. Prvo se može odrediti ime upravljačke jedinice kojom se upravlja sklopka. Ispod se nalazi frekvencija te se može upisati koliko će ona iznositi. Ispod frekvencije se upisuje kut vođenja sklopke, koji može biti od nula do nekog većeg prirodnog broja, koji je pozitivan. [10] [11]

Slika 39. prikazuje izlazni trofazni napon od 230 V koji ima frekvenciju od 50 Hz.



Slika 39. Ispravljen trofazni napon faznog iznosa 230 V i nazivne frekvencije 50 Hz.

Sa Slike 39. se vidi da napon iznosi 230 V plus-minus par posto i da je frekvencija 50 Hz, ovisno o IGBT gubitcima snage koji jako puno utječu na vođenje sustava. Period je jednak 20 ms (mili sekundi) što je jednako električnom kutu od 360 stupnjeva (2π). Ispravljen napon se

šalje na uzlazni transformator, koji mijenja iznos napona, sa 400 V na 10 kV, odnosno na naponski nivo, koji je potreban elektroenergetskom sustavu za kvalitetan rad prema standardima, jer se zna da kada je transformator spojen u zvijezdu za linijski napon vrijedi $U_L = \sqrt{3} * U_f$.

8. ZAKLJUČAK

Još od davnina ljudi su koristili pogodnosti korištenja vjetra. Napretkom tehnologije i ljudskog usavršavanja, korištenje svih obnovljivih izvora u svrhu proizvodnje električne energije postaje sve popularniji i zastupljeniji trend. Zadnjih dvadesetak godina zbog velikog potencijala pretvaranja energije vjetra u električnu energiju, vjetroelektrane doživljavaju svoj najveći procvat.

Sklop koji pretvara energiju vjetra u električnu energiju jest vjetroagregat. Preteča današnjih vjetroagregata bile su vjetrenjače korištene za usitnjavanje plodova ili za pumpanje vode. Vjetar je jedan od prirodnih izvora energije koji će uvijek biti na raspolaganju.

Energija vjetra posljednjih godina zauzima sve veće mjesto u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora te izgleda kao prikladan izvor energije koja će se sve više koristiti u bližoj budućnosti. Proizvodnja električne energije iz energije vjetra nema značajnog štetnog utjecaja na okoliš i ekosustav.

Tehnologija iskorištavanja energije vjetra je sve više dostupna i u velikom je napretku. Zbog sigurnosti obnovljivih izvora energije, javnost ima pozitivno mišljenje o ovakvoj vrsti upotrebe energije. Vjetroagregati za kontrolu napona i frekvencije koriste frekvencijske pretvarače, koji imaju važnu ulogu za prijenos električne energije u mrežu.

U ovom je radu prikazan elementarni sustav pretvaranja napona i frekvencije vjetroagregata, dok u stvarnom sustavu to izgleda puno kompliciranije i zahtjevnije, jer sustav ima više elemenata. Iako su ovakvi pretvarači dosta skupi, oni su neophodni za rad vjetroagregata te bi bez njih bi bilo jako teško prenositi električnu energiju u mrežu.

LITERATURA

[1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrana#Povijest_vjetroelektrana

(pristupljeno 26.06.2022)

[2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrana#Dijelovi_vjetroagregata

(pristupljeno 26.06.2022)

[3] Mandić, I.; Tomljenović, V.; Pužar, M.: Električni strojevi II, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012. (pristupljeno 26.06.2022)

[4] Krčum, M.: Električni strojevi I, skripta, Sveučilište u

Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2009. (pristupljeno 26.06.2022)

[5] <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/V112-3-45-MW>

(pristupljeno 26.06.2022)

[6] Flegar, I.: Elektronički energetska pretvarači, Zagreb, 2010. (pristupljeno 26.06.2022)

[7] https://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/frekventni_regulatori.html

(pristupljeno 26.06.2022)

[8] Terzić, B.; Jadrić, M. : Design and Implementation of the Extended Kalman Filter for the Speed and Rotor Position Estimation of Brushless DC Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001. (pristupljeno 26.06.2022)

[9] Jerkić, L.: Moderni vjetroagregati i pretvorba energije, 2010. (pristupljeno 26.06.2022)

[10] Ban, D.: Predavanja iz kolegija Energetska elektrotehnika, 2005. (pristupljeno 26.06.2022)

[11] Puzak, M.: Osnove frekvencijskih pretvarača, Zagreb, 2010. (pristupljeno 26.06.2022)

[12] https://en.wikipedia.org/wiki/PSIM_Software (pristupljeno 26.06.2022)

POPIS SLIKA

Slika 1. Vjetroagregat iz 1888 godine [1]	7
Slika 2. Vjetroagregat marke Vestas V112 [5]	9
Slika 3. Vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje [2]	11
Slika 4. Vjetroagregat s okomitom osi vrtnje [2]	11
Slika 5. Temelj vjetroagregata [2]	12
Slika 7. Kućište vjetroagregata [2]	14
Slika 8. Rotor vjetroagregata [2]	14
Slika 9. Multiplikator vjetroagregata [2]	15
Slika 10. Dijelovi sinkronog stroja [4]	17
Slika 11. Stator i elementarni namot sinkronog stroja [4]	18
Slika12. Rotor sinkronog stroja [4]	19
Slika 13. Dinamički sustav uzbude [4]	20
Slika 14. Statička uzbuda sinkronog stroja [4]	20
Slika 15. Beskontaktna uzbuda sinkronog stroja [4]	21
Slika 16. Način rada sinkronog stroja. [4]	22
Slika 17. Frekvencijski pretvarač [7]	23
Slika 18. Sklop s frekvencijskim pretvaračem [6]	24
Slika 19. Shema frekvencijskog pretvarača [8]	25
Slika 20. Poluvodička dioda [6]	26
Slika 21. Ispravljač [11]	26
Slika 22. Ulazni i Izlazni napon [11]	27
Slika 23. Istosmjerni međukrug [11]	27
Slika 24. Shema izmjenjivača [11]	28

Slika 25. IGBT [7].....	29
Slika 26. Fazni oblici napona i struje na izlazu izmjenjivača [11].....	30
Slika 27. Shematska struktura pretvaračkog sklopa [11]	30
Slika 28. Radna površina PSIM programa	32
Slika 29. Izbornik alata u PSIM programu.....	33
Slika 30. Izbornik elemenata u PSIM programu	33
Slika 30. Prikaz opcije za simulaciju u PSIM - u.....	34
Slika 31. Shema napravljena u PSIM programu	35
Slika 32. Odabir ulaza u graf u PSIM programu	35
Slika 33. Graf u PSIM programu	36
Tablica 1. Nazivni podaci generatora vjetroagregata. [5]	37
Slika 34. PSIM model kontrole vjetroagregata.	38
Slika 35. Prikaz vođenja sklopki te njihov kut vođenja [11]	39
Tablica 2. Sklopke i njihov kut vođenja.....	40
Slika 36. Linijski naponi generatora.	40
Slika 37. Ispravljen istosmjerni napon	41
Slika 38. Upravljačka jedinica frekvencijskog pretvarača.	42
Slika 39. Ispravljen trofazni napon faznog iznosa 230 V i nazivne frekvencije 50 Hz.	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Nazivni podaci generatora vjetroagregata. [5]	37
Tablica 2. Sklopke i njihov kut vođenja.....	40