



**INTERNACIONALNI UNIVERZITET TRAVNIK U  
TRAVNIKU**

**FAKULTET POLITEHNIČKIH NAUKA**

**TRAVNIK U TRAVNIKU**

**ZAVRŠNI RAD**

**GENERATORSKE ZAŠTITE**

Mentor:

Prof.dr.sc Miladin Jurošević

Student:

Ehvad Genga

Travnik, 2019.



**INTERNACIONALNI UNIVERZITET TRAVNIK U  
TRAVNIKU**

**FAKULTET POLITEHNIČKIH NAUKA**

**TRAVNIK U TRAVNIKU**

**ZAVRŠNI RAD**

**GENERATORSKE ZAŠTITE**

Mentor:

Prof.dr.sc Miladin Jurošević

Student:

Ehvad Genga

Travnik, 2019.

## **SADRŽAJ:**

UVOD.....	5
1 GENERATOR.....	6
1.1 Istosmjerni generator .....	8
1.2 Izmjenični generator .....	9
1.3 Sinhroni generator.....	9
2 GENERATORSKE ZAŠTITE .....	12
2.1 Statorska zaštita od kratkog spoja.....	14
2.2 Zaštita od prenapona .....	16
2.3 Zaštita od zemljospojeva statorskog namota .....	18
2.4 Zaštita od zemljospoja u uzbudnom namotaju.....	19
2.5 Zaštita od gubitka uzbude .....	20
2.6 Strujna neravnoteža.....	21
2.7 Protu – motorna zaštita .....	22
2.8 Naduzbudna zaštita .....	23
2.9 Zaštita od neravnoteže napona .....	24
2.10 Rezervna mrežna zaštita .....	25
2.11 Zaštita od ispadanja iz sinhronizma.....	26
2.12 Zaštita od slučajne pobude.....	27
2.13 Zaštita od povratne snage.....	28
2.14 Kvar generatorskog prekidača .....	30
2.15 Pravila isključenja generatora .....	30
2.16 Kvarovi i nenormalna stanja u pogonu generatora .....	31
2.17 Protupožarna zaštita generatora .....	32
2.18 Zaštita od preopterećenja generatora .....	32
2.19 Zaštita od asinhronog rada generatora .....	33

2.20 Zaštita od prevelikog broja obrtaja .....	34
2.21 Zaštita od pregrijavanja generatora.....	35
2.22 Diferencijalna zaštita generatora .....	36
2.22.1 Merz – nagradni cirkulacijski sistem.....	38
2.22.2 Priključak za sistem diferencijalne zaštite.....	39
2.22.3 Problem povezan sa sistemom diferencijalne zaštite .....	39
2.22.4 Modificirana shema sistema diferencijalne zaštite .....	39
2.22.5 Diferencijalna zaštita za statorske kratke spojeve .....	40
2.23 Praktičan primjer – hidrogenerator .....	41
ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA .....	46
Popis slika.....	47

## UVOD

Generatori su najvažniji i najskuplji elementi elektroenergetnog sistema te njihovoj zaštiti treba posvetiti posebnu pažnju. Kvar generatora iziskuje velika finansijska sredstva za popravak, no više od toga finansijski gubitak nastaje dugotraјnim zastojem u proizvodnji električne energije.

Gotovo 50% od svih nastalih kvarova nastaju na izolacijskom sistemu kako rotorskog tako i statorskog namota. Uprkos ispravnom projektovanju i dimenzionisanju izolacije i ostalih parametara elektroenergetnog sistema, kao i pažljive izgradnje i redovnog održavanja, u pogonu se mora računati sa mogućnošću pojave kvara na praktično svakom elementu sistema.

Svaki generator štiti se sa 10 – 20 zaštitnih uređaja od unutarnjih i vanjskih kvarova. Kvarovi mogu nastati uslijed mehaničkih, termičkih i električkih naprezanja nastalih uglavnom zbog pojave različitih sila koje djeluju na rotor.

Također, imamo i pogonska stanja koja mogu prouzročiti oštećenje generatora: prevelika struja, prevelika struja u mreži koju napaja generator, previsok napon, nesimetrično opterećenje, asinhroni rad generatora, rad u motorskom području, prevelik broj okretaja, nedozvoljeno zagrijavanje.

Zadatak zaštite generatora je da svojim djelovanjem svede minimum štetne posljedice uslijed kvarova te da upozori i otkloni opasna stanja koja dovode do kvarova.

Diferencijalna zaštita za generator je uglavnom za zaštitu statorskih namota generatora od zemljospoja i faznih kvarova. Kvarovi namotaja statora vrlo su opasni i uzrokuju znatna oštećenja generatora. Za zaštitu statorskog namotaja generatora, sistem diferencijalne zaštite koristi se za uklanjanje kvara u najkraćem mogućem vremenu radi smanjenja opsega oštećenja.

Rad je sistematizovan u nekoliko dijelova.

U prvom dijelu rada objašnjen je pojam generatora, vrste generatora, kao i najvažnije osobine svakog od njih.

Drugi dio nosi naziv „Generatorske zaštite“ gdje su objašnjene sve vrste zaštita koje svojim djelovanjem štite generator.

Poseban osvrt je na diferencijalnoj zaštiti.

# 1 GENERATOR

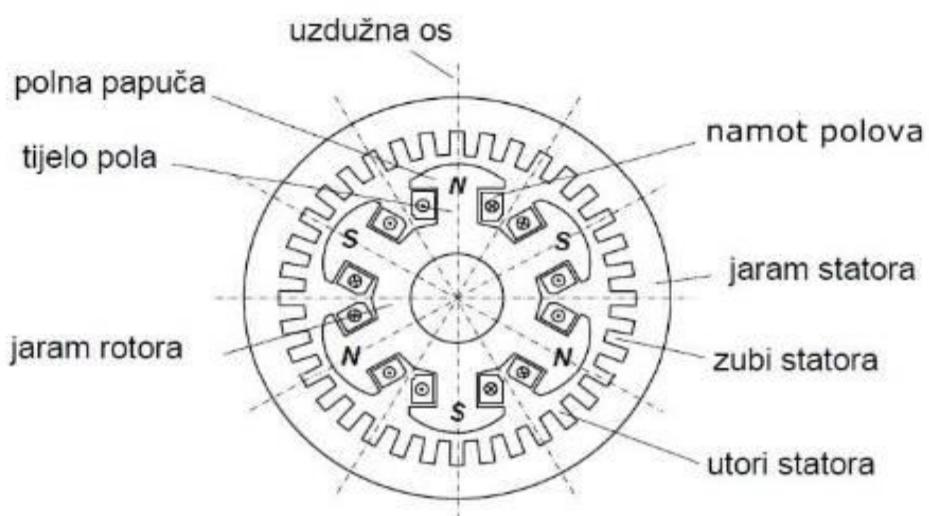
Generatori su električni strojevi koji mehaničku energiju pretvaraju u električnu energiju. Najzastupljenija je izvedba generatora kao rotacijskog stroja, koji se sastoji od nepokretnog vanjskog dijela (statora) unutar kojeg se nalazi okretni dio (rotor) koji se okreće vanjskim pogonskim strojem.

Prema vrsti električne struje koju proizvode mogu biti istosmjerni (koji proizvode istosmjernu električnu struju) i izmjenični (koji proizvode izmjeničnu električnu struju).

Izmjenični generatori se dodatno dijele na asinhrone i sinhronе, te također na jednofazne i višefazne izmjenične generatore.

Pretvaranje električne energije nije i ne može biti savršeno, jer svu energiju koju dovodimo u električnu mašinu ne možemo nikada pretvoriti u drugi (željeni) oblik. Korisna energija jest ona koju u mašini pretvorimo u željeni oblik. Razlika između dovedene i korisne energije jesu gubici električne energije. Oni se redovno u električnim mašinama pretvaraju u toplotnu energiju, koja se predaje okolini i koja je izgubljena za dalje korištenje.

Jednostavni generator se sastoji od izvora magnetskog polja (magneta ili elektromagneta), te vodiča koji se kreće kroz to magnetno polje tako da siječe silnice magnetskog polja. Pri tome se u vodiču inducira elektromotorna sila (napon), koja je razmjerna gustoći magnetnog polja (tj. magnetnoj indukciji) i brzini vodiča, a ovisna je i o uglu po kojim vodič siječe magnetske silnice. Kako bi se postigli veći inducirani naponi umjesto pojedinačnog vodiča se koristi zavojnica, dakle niz serijski spojenih vodiča koji se vrte kroz nejednoliko magnetsko polje.<sup>1</sup>



Slika 1. Osnovni sastav sinhronе električne mašine<sup>2</sup>

<sup>1</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

<sup>2</sup> <https://www.scribd.com/document/257571077/Za%C5%A1ita-generatora-u-postrojenjuMaturski-Rad>

U sinhronoj električnoj mašini uzbudno magnetno polje rotira, a vodiči u kojima se indukuje napon, tzv. armaturni vodiči ili armaturni namot, miruju i nalaze se na nepokretnom dijelu maštine, tj. na statoru.

Prema mjestu upotrebe generatore dijelimo na:

- hidrogeneratore, koji se upotrebljavaju u hidroelektranama, i
- turbogeneratore, koji se upotrebljavaju u termoelektranama.

Turbogeneratori su brzohodni strojevi, izvedeni s cilindričnim rotorom. Pogone se parnim ili plinskim turbinama koje imaju veliku brzinu vrtnje. Izvode se isključivo s horizontalnom osovinom.



Slika 2. Turbogenerator<sup>3</sup>

Hidrogeneratori su najčešće sporohodni strojevi, izvedeni s istaknutim polovima. Pogoni ih vodna turbina, po čemu su i dobili naziv. Brzina vrtnje turbine jako ovisi o količini vode i pritisku (pad vode) i obično se kreće 50 –1000 o/min.



Slika 3. Hidrogenerator<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>4</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

Dizelski generatori su strojevi za široki raspon brzina. To su strojevi manjih snaga nego turbogeneratori i hidrogeneratori (do najviše 50 MVA), a najčešće se rade s istaknutim polovima. Pogoni ih dizelski motor. Najčešće rade kao samostalne jedinice za napajanje vlastite mreže (brodovi, pričuvni izvori u poslovnim zgradama i robnim kućama i slično).



Slika 4. Dizel generator<sup>5</sup>

Prema brzini okretanja generatore dijelimo na:

- brzohodne, kod kojih brzina obično iznosi 3000 obr./min (rjeđe 1500 obr./min) i
- sporohodne, kod kojih brzina obično iznosi manje od 1000 obr./min.<sup>6</sup>

## 1.1 Istosmjerni generator

Istosmjerni generator je najstarija izvedba rotacijskog električnog generatora. Kod njega je stator izvor magnetskog polja, dakle u stotoru se nalazi magnet ili elektromagnet, dok se na rotoru nalazi zavojnica koja se vrti i u kojoj se inducira električni napon.

Gledano iz perspektive zavojnice, ona naizmjence siječe silnice pred svakim polom magneta, dakle u njoj se inducira izmjenični napon. Stoga se njeni krajevi ne spajaju izravno na trošilo, već se spajaju na komutator, što je niz međusobno izoliranih isječaka prstena od vodljivog materijala (obično bakrene slitine, čime se želi postići mali električni otpor uz veću otpornost na mehaničko habanje).

Prikљučci generatora su spojeni na četkice, što su kontakti pritisnuti na komutator. Svaka pojedina četkica stoga nije trajno spojena na pojedini izvod zavojnice rotora, već se vrtnjom rotora stalno prespaja čime se na priključku dobija istosmjerni, iako pulsirajući napon.

<sup>5</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>6</sup> <https://www.scribd.com/document/257571077/Za%C5%A1ita-generatora-u-postrojenjuMaturski-Rad>

Za smanjenje pulsiranja se obično na rotoru niže nekoliko zavojnica, svaka je spojena na dva nasuprotna isječka komutatora. Stoga se komutator sastoji od dva puta više isječaka nego što ima zavojnica. Komutator je ujedno najveća maha istosmjernog generatora, budući da je na njemu stalno prisutno iskrenje, koje uz mehaničko trljanje, čini komutator potrošnim dijelom generatora, te ujedno mjestom električnih gubitaka. Upravo to iskrenje i gubici na komutatoru su navodno bili nadahnuće Nikoli Tesli da stvori bolji i učinkovitiji stroj, što ga je u konačnici dovelo do konstrukcije izmjeničnog generatora, te višefaznog sistema.<sup>7</sup>

## 1.2 Izmjenični generator

Izmjenični generator u rotoru ima izvor magnetskog polja, dok su na statoru zavojnice u kojima se inducira električni napon. Izvodi zavojnica na statoru su ujedno izvodi generatora, i kako rotor naizmjence prelazi suprotnim magnetskim polovima preko zavojnica, u njima se inducira izmjenični napon.

Ako stator ima samo jednu zavojnicu, tada se radi o jednofaznom generatoru. Obično se zapravo radi o dvije zavojnice nasuprotno smještene, čije se osi poklapaju, i koje su zajedno spojene (bilo paralelno ili serijski). Ali i dalje taj par zavojnica ima dva izvoda, i možemo ga gledati kao jednu jedinstvenu zavojnicu. Dva izvoda ujedno znače i da se radi o jednofaznom generatoru.

Ako se na stator naniže nekoliko takvih zavojnica odnosno pari zavojnica, tada se radi o višefaznom generatoru, koji stoga proizvodi niz vremenski pomaknutih izmjeničnih napona. Taj vremenski pomak se naziva i fazni pomak, stoga se svaki od tih proizvedenih napona naziva i faza. Velika prednost višefaznih generatora jest da svaka faza proizvodi jednak energije, iako se u generator uložio samo dodatni par zavojnica (i njihovih željeznih jezgri i popratnih dijelova), ali su svi ostali dijelovi generatora ostali isti. Dakle višefazni generator u usporedbi s jednofaznim generatorom iste snage je manji, lakši, i ima manju cijenu uloženog materijala.

Izvor magnetskog polja u rotoru može biti stalni magnet, elektromagnet, ili kavezni rotor.<sup>8</sup>

## 1.3 Sinhroni generator

Sinhroni generator je onaj u kojem je rotor stalni magnet ili elektromagnet. Naziva se sinhronim, budući da svaki pojedini okret rotora izaziva uvijek isti i cjelobrojni broj perioda inducirane napone, dakle inducirani napon se sinhrono mijenja skladno zakretanju osovine rotora. Manji generatori obično imaju stalni magnet u rotoru, budući da je to jednostavno i jeftino za proizvesti (npr. generator na biciklu). No kako stalni magneti

<sup>7</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

<sup>8</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

proizvode magnetno polje ograničene gustoće, u velikim generatorima se u rotor ugrađuje elektromagnet, kojeg jasno treba napajati strujom, pa su stoga njegovi izvodi napravljeni kao neprekinuti klizni prstenovi na koje se naslanjaju četkice koje dovode struju iz vanjskog izvora. Kako se radi o neprekinutim kliznim prstenovima, na njima nema izraženog iskrenja niti habanja kakvo postoji kod komutatora, iako neko manje habanje uvijek postoji. Druga prednost elektromagneta na rotoru je da se njegova jakost može regulirati promjenom iznosa električne struje kojom se napaja.

Sinhroni generator može sam napajati svoj rotor (kroz prikladni ispravljač), no da bi takav generator kod pokretanja uopće počeo proizvoditi ikakav napon potrebno je da u željeznoj jezgri rotora ipak postoji nešto stalnog magnetizma (bilo kao ugrađeni stalni magnet, bilo kao remanentni magnetizam željezne jezgre). Takva izvedba se obično ugrađuje u automobile (automobilski alternator ili „dinamo“ je uobičajeno trofazni sinhroni izmjenični generator s ispravljačem, dakle to nije istosmjerni generator; razlog jest trajnost, manja masa, veličina te stoga i cijena).

Veliki sinhroni generatori obično traže vanjski izvor električnog napajanja za pogon svojih elektromagneta u rotorima. Taj vanjski izvor je obično manji generator montiran često na istu osovinu, i naziva se uzbudnik.

Sinhroni generator može na rotoru imati jedan magnet (ili elektromagnet), dakle to je rotor s dva magnetna pola, odnosno s jednim parom polova, a može imati i nekoliko magneta, dakle nekoliko pari polova. Što je veći broj pari polova, to je sporije potrebno okretati generator da se postigne isti izlazni napon i frekvencija. Ovisno o vanjskom pogonu kojim se generator vrti određuje se broj pari polova, a ujedno i oblik generatora.



Slika 5. Izmjenični sinkroni električni generator s četiri para polova na rotoru<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

Za brze pogone, poput parnih i plinskih turbina, planira se generator brzo okretati, tipično 3000 okretaja u minuti za 50 Hz mrežu. U tom slučaju rotor ima samo jedan par polova, te se također rotor izvodi čim manjeg promjera kako bi se ograničila naprezanja zbog centrifugalne sile. Rotor se izvodi odgovarajuće izduženiji kako bi nadoknadio prostor izgobljen smanjenjem promjera. Takvi generatori se nazivaju turbogeneratori.



Slika 6. Primjer ranog turbogeneratora, lijevo se vidi i uzbudnik (GanzGenerator u Zwevegemu, Belgija)<sup>10</sup>

Za spore pogone, poput Kaplanove turbine u hidroelektranama se očekuje mali broj okretaja, stoga rotor generatora mora imati odgovarajuće veliki broj pari polova, često i preko 30 pari. Takav rotor se obično izvodi širokog promjera, kako bi smjestio sve polove, a ujedno je rotor kratak, i ta izvedba sporog generatora se zbog primjene u hidroelektranama naziva hidrogenerator.



Slika 7. Hidrogeneratori s početka 20. stoljeća, u dvorani hidroelektrane, izrađeni u Budimpešti<sup>11</sup>

<sup>10</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

<sup>11</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

Izmjenični generator u kojem je rotor izведен kao kavezni rotor jest asinhroni generator. U asinhronom generatoru se rotor mora okretati brže od okretnog magnetnog polja (dakle brže od rotora odgovarajućeg sinhronog generatora), čime se postiže da se i unutar samog rotora inducira napon, koji stoga uzrokuje protjecanje struje kroz kavezni rotor i time rotor počinje proizvoditi magnetno polje kao i u svakom drugom izmjeničnom generatoru.

Asinhroni generator dakle traži da je priključen na mrežu u kojoj već postoji izmjenični napon, dakle on ne može samostalno napajati mrežu.<sup>12</sup>

## 2 GENERATORSKE ZAŠTITE

Generator se, kao najvažniji i najskuplji element u mreži, štiti različitim kombinacijama zaštitnih uređaja kako bi se što ranije detektiralo opasno stanje i na vrijeme aktivirala signalizacija za isključenje u slučaju kvara. Svaki generator štiti se sa 10 – 20 zaštitnih uređaja od unutarnjih i vanjskih kvarova. Kvarovi mogu nastati uslijed mehaničkih, termičkih i električkih naprezanja nastalih uglavnom zbog pojave različitih sila koje djeluju na rotor. Uslijed mehaničkih naprezanja moguće su povećane vibracije, pojave dinamičkih sila koje djeluju na rotor, povećane centrifugalne sile i slično. Kod ovakvih vrsta naprezanja redovito je moguće oštećenje izolacije generatora, pri čemu postoji mogućnost kvara stroja zbog pojave međufaznih kratkih spojeva između pojedinih namota (statorski i rotorski).

Izolacija generatora izložena je u pogonu raznovrsnim naprezanjima. Postoje tri osnovne vrste naprezanja:

- Mehaničko naprezanje - Ono nastaje uslijed centrifugalnih sila u normalnom pogonu, dinamičkih sila kratkog spoja, vibracija ili pak zbog diletizacija.
- Termičko naprezanje - Protjecanje struje kroz namotaje razvija toplinu, prilikom čega hemijske reakcije dovode stroj do ubrzanog starenja.
- Električna naprezanja - Odnose se na visoke napone, tj prenapone. Električna naprezanja dijele se na atmosferske i unutarnje. Svako naprezanje može dovesti do probroja izolacije i kvara. Naprezanje može biti jednog od navedenih oblika ili pak njihova kombinacija.

Kvarovi izolacije dijele se po mjestu njegova nastanka te imamo, prema :

- kratki spoj statorskog namota,
- kratki spoj statorskog namota i mase,
- zemljospoj uzbudnog namota,

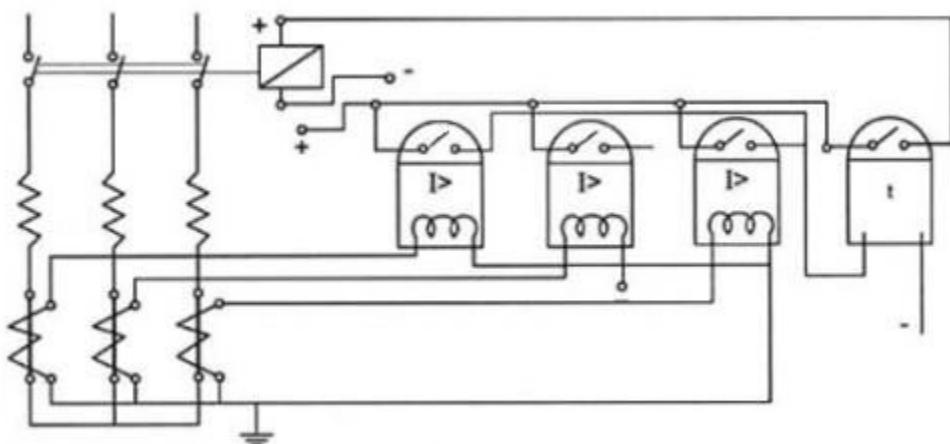
---

<sup>12</sup> [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_generator](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_generator)

- kratki spoj između zavoja iste faze,
- kratki spoj među zavojima uzbude.

U ovakvim uvjetima nadstrujna zaštita, kao osnovna zaštita, nije pogodna kada se uzmu u obzir kriteriji struje kratkog spoja i vremena djelovanja. Kod unutarnjih kvarova na generatoru uslijed kratkih spojeva, struja kratkog spoja doseže vrijednost višestruko veću od nazivne, pa bi nadstrujna zaštita reagirala na povećanje struje s obzirom na podešenu vrijednost. Vrijeme djelovanja nadstrujnog člana je reda 2 – 4 s, te zbog stepenovanja ostalih zaštita u mreži nije moguće brže isključenje generatora. Prema tom kriteriju, nadstrujnu zaštitu je moguće primijeniti u svrhu zaštite od struja zemljospoja. U modelu aktivne distribucijske mreže struje zemljospoja su niskog iznosa, reda nekoliko mA, pa se mogu zanemariti i takva zaštita neće biti razmatrana.<sup>13</sup>

Od vanjskih kvarova generator je moguće štititi nadstrujnom zaštitom od velikih struja koje dolaze iz mreže ako dođe do kratkog spoja na nekom njenom dijelu. Primjerice, ako dođe do kratkog spoja na sabirnicama elektrane ili mreže, generator će proizvoditi veliku struju kratkog spoja i potrebno ga je isključiti. Vrijeme djelovanja nadstrujne zaštite u takvom slučaju je ranije navedeno, pa i u ovom slučaju nadstrujna zaštita služi kao rezerva ako zakaže diferencijalna zaštita generatora ili distantna zaštita na vodovima. Za adekvatnu nadstrujnu zaštitu koriste se tri nadstrujna releja s vremenski neovisnom karakteristikom koji se spajaju preko SMT-a u zvjezdničtu generatora i mjere struje u zvjezdničtu generatora. Shema nadstrujne zaštite s neovisnom vremenskom karakteristikom u zvjezdničtu generatora prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 8. Nadstrujna zaštita s neovisnom vremenskom karakteristikom u zvjezdničtu generatora<sup>14</sup>

<sup>13</sup> <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1095/preview>

<sup>14</sup> <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1095/preview>

Kod pojave prevelike struje u zvjezdici generatora, relej će reagirati na osnovu podešene vrijednosti struje te dati signal vremenskom članu koji će, ovisno o vremenskom podešenju, narediti isključenje prekidača. Za isklop prekidača potreban je DC izvor napajanja.

Također, imamo i pogonska stanja koja mogu prouzročiti oštećenje generatora: prevelika struja, prevelika struja u mreži koju napaja generator, previšok napon, nesimetrično opterećenje, asinhroni rad generatora, rad u motorskom području, prevelik broj okretaja, nedozvoljeno zagrijavanje.

Zadatak zaštite generatora je da svojim djelovanjem svede minimum štetne posljedice uslijed kvarova te da upozori i otkloni opasna stanja koja dovode do kvarova.<sup>15</sup>

## 2.1 Statorska zaštita od kratkog spoja

Kratki spojevi koji ugrožavaju stator generatora mogu biti:

- vanjski, odnosno oni kratki spojevi koji nastaju izvan statora, npr. negdje na mreži i
- unutrašnji, odnosno oni kratki spojevi koji nastaju na samom statorskem namotu.

Zbog toga će jedan zaštitni uređaj okidati samo kod vanjskih, a drugi samo kod unutrašnjih kratkih spojeva.

Kao zaštitni uređaj generatora od vanjskih spojeva služe prekostrujni vremenski neovisni releji, kod kojih se proradna struja podešava na 1.4 do 1.8 nazivne struje.

Okidno vrijeme ovih releja mora biti jednu sekundu duže od okidnog vremena sljedećeg prekostrujnog vremenskog neovisnog releja.

Prekostrujni vremenski neovisni releji ne mogu zadovoljiti kao zaštita od unutrašnjih kratkih spojeva generatora, jer je njihovo okidno vrijeme, kao što je već rečeno, veoma veliko, što bi se moglo veoma štetno odraziti na generator. Takva zaštita bi dopustila da kroz namote generatora teku dugo vremena najveće moguće struje kratkog spoja.

Međufazni kratki spoj može nastati između vodiča različitih faza ili kod probroja izolacije pojedinih faza na glavama namotaja što uzrokuje velike struje kvara. Kroz mjesto kvara teče struja:

- koju proizvodi generator  $I_{kg}$ ,
- koja dolazi iz mreže  $I_{km}$ .

---

<sup>15</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

Kako su nominalne struje generatora vrlo velike (reda 5-15kA i više), a struja kratkog spoja kod kvara u generatoru znatno veća od nominalne, vidi se da kroz mjesto kvara teku ogromne struje kratkog spoja.

Zbog nastalog električnog luka, na mjestu kvara nastaje jako razaranje namotaja i okolnog željeza. Naročito teške posljedice bi imali kvarovi kod kojih bi došlo do izgaranja aktivnog željeza, jer bi to zahtijevalo izradu novog statora generatora. Zbog toga se postavlja zahtjev da se generator u slučaju pojave unutrašnjeg kratkog spoja što je moguće brže odvoji od mreže, razbudi i zaustavi.

Kao kriterij za djelovanje zaštite bi mogla poslužiti povećana struja kratkog spoja. Kada bismo prekostrujne releje priključili na strujne transformatore u zvezdištu generatora, oni bi mogli djelovati na isključenje i demagnetizaciju generatora.

Međutim, ovo rješenje nije prihvatljivo, jer prekostrujna zaštita generatora mora imati dovoljno veliko vremensko zatezanje djelovanja (2–4)s, zbog potrebnog vremenskog stepenovanja ostalih zaštita u mreži. Pored toga, prekostrujna zaštita bi morala biti podešena na proradnu struju veću od nominalne struje generatora, što bi je moglo učiniti nedovoljno osjetljivom kod kratkih spojeva preko prelaznog otpora u blizini zvezdišta.

Kao efikasna zaštita od unutrašnjih kratkih spojeva upotrebljava se diferencijalna zaštita.



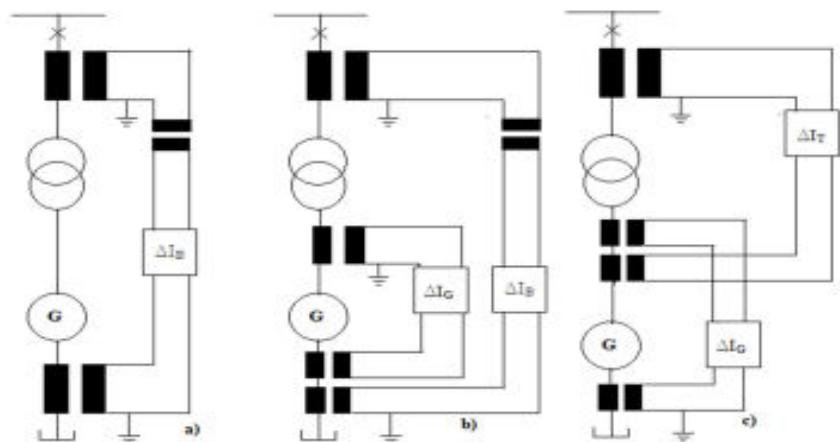
Slika 9. Zaštita od kratkog spoja<sup>16</sup>

Diferencijalni releji se priključuju na strujne transformatore u zvezdištu i ispred generatora.

Podešavaju se na minimalnu proradnu struju reda (10-20)% nominalne struje, što osigurava dovoljnu osjetljivost kod svih vrsta kratkih spojeva. Pretjerano visoka osjetljivost releja reda 5%  $I_n$  zahtijeva savršeno prilagođavanje strujnih transformatora i krije u sebi opasnost od nepotrebnih djelovanja kod kratkih spojeva u mreži.

Generatori se u većini slučajeva priključuju na mrežu preko blok transformatora, tako da se diferencijalna zaštita može vezati na različite načine.

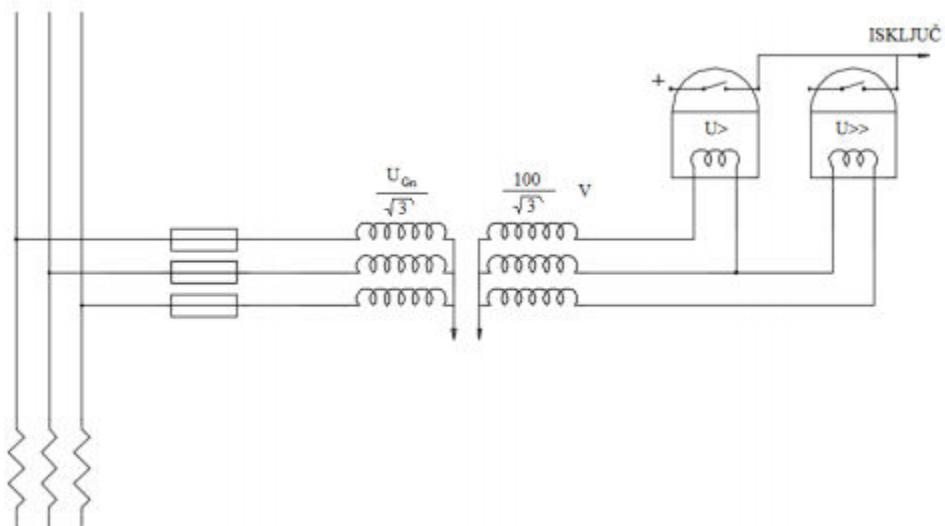
<sup>16</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf



Slika 10. Načini vezivanja diferencijalne zaštite<sup>17</sup>

## 2.2 Zaštita od prenapona

Do visokog napona na generatoru može doći zbog atmosferskih i sklopnih prenapona kao i zbog pogonskih povišenja koje proizvodi sam generator. Generatori spojeni direktno na mrežu ugroženi su od mrežnog prenapona. Takvi generatori štite se odvodnicima prenapona. Za prenapone nastale pogonskim uvjetima koristimo prenaponske releje.



Slika 11. Zaštita od prenapona<sup>18</sup>

<sup>17</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

<sup>18</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

Pogonsko isključenje napona moguće je:

- uslijed ispada drugih generatora,
- uslijed ubrzanja generatora,
- uslijed samouzbude.

Proradni napon iznosi:

$$U_{pr} > \frac{K_s U_{maxpog}}{ap_n}$$

$$p_n = \frac{\frac{U_{Gn}}{\sqrt{3}}}{\frac{100}{\sqrt{3}}}$$

gdje su:

$K_s$  – koeficijen sigurnosti,  $a$  – omjer opuštanja,  $p_n$  – prijenosni omjer,  $U_{maxpog}$  – maksimalni pogon do kojeg ne želimo reagiranje.

Osnovna zaštita je regulator napona generatora, no i uz njegovo ispravno djelovanje dolazi do povećanja napona u slučaju rasterećenja zbog tromosti regulatora i ograničenja opsega regulacije. Ako se u obzir uzme vjerojatnost da će regulator zakazati, dobije se razlog za upotrebu prenaponske zaštite. Do povišenja napona može doći kod ispada generatora pri punom opterećenju, tada iznos prenapona dostiže vrijednosti do 140% nazivnog napona. Također kod samouzbudnih generatora, kada ispadne neki od drugih generatora na mreži, na generatoru koji ostaje raditi dolazi do prenapona. Kod pojave visokog prenapona u mreži također može doći i do prenapona na samom generatoru no ova situacija najviše pogađa generatore direktno spojene na mrežu.

Za zaštitu koristi se naponski relej. Koriste se kombinacije s vremenskim relejem radi izbjegavanja krivog isključenja s obzirom na mogućnost kratkotrajnog povišenja napona. Relej je izведен tako da mu je prividni otpor što manje ovisan o frekvenciji, što se postiže tako da mjerni krug ima relativno visok djelatni otpor. Napon prorade prenaponskog releja proizlazi iz zahtjeva da zaštita ne bude osjetljiva na maksimalno dozvoljeni pogonski napon. Vremensko zatezanje podešava se tako da u slučaju porasta napona omogući odziv

regulatora napona i snage kod naglog rasterećenja generatora. Naponski relej se priključuje na naponske transformatore na generatorskim stezaljkam. Radi veće sigurnosti ne priključuje se na istu fazu ili na iste naponske transformatore na koje je priključen i regulator napona. Zaštita mora djelovati na zatvaranje pare turbini, isključenje uzbude i demagnetizaciju rotora i isključenje generatorskog prekidača.<sup>19</sup>

### 2.3 Zaštita od zemljospojeva statorskog namota

Zaštita od zemljospojeva uvelike ovisi o tipu uzemljenja generatora. Uzemljenje je nužno izvesti preko neke impedancije u cilju smanjenja veličine struje uslijed faznog zemljospoja. S direktnim generatorskim uzemljenjem, te struje dostižu razorne vrijednosti. Kako bi to izbjegli, poželjna je mala impedancija uzemljenja sastavljanja od otpora i reaktancije. Visoka impedancija distributivnog transformatora sa otporom spojenim na sekundarne namote ograničiti će iznos struje faznog zemljospoja na nekoliko primarnih ampera.

Najčešća i najmanja zaštita od statorskog zemljospoja sa visokoimpedantnom shemom uzemljenja je prenaponska komponenta spojena na sekundar uzemljenog transformatora. Za kvarove vrlo blizu zvjezdištu generatora, prenaponska komponenta neće reagirati zato što naponski nivo će biti ispod naponskog nivoa na koji komponenta reagira. U cilju 100% zaštite statorskih namota, dvije tehnike su dostupne:

1. korištenje trećeg harmonika nastalog u zvjezdištu i generatorskim priključcima;
2. tehnika injekcije napona.

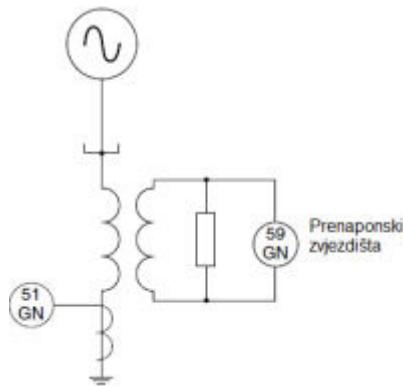
Mali iznos trećeg harmonika napona proizvodi se u generatorima najviše u njihovim zvjezdištima i priključcima. Iznos ovog trećeg harmonika napona ovisi o radnoj tački generatora. Oni će biti veći pri punom opterećenju. Ako kvar nastane blizu zvjezdišta, treći harmonik zvjezdišta imati će vrijednost nula i porasti će napon priključaka. Međutim, ako se kvar razvije u blizini priključaka, treći harmonik napona priključka će biti nula i napon zvjezdišta će porasti.

Na temelju ovoga, razvijene su tri moguće sheme. Moguće je odabratitri raspoloživa releja:

1. Korištenje trećeg harmonika podnapona u zvjezdištu. (reagira na kvar u zvjezdištu).
2. Korištenje trećeg harmonika prenaponsa na priključcima (reagira na kvar blizu zvjezdišta).
3. Korištenje diferencijalnih releja koji prate omjer trećeg harmonika u zvjezdištu i priključcima.

---

<sup>19</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>



Slika 12. Spoj prenaponskog releja zaštite statora od zemljospoja<sup>20</sup>

## 2.4 Zaštita od zemljospoja u uzbudnom namotaju

Zemljospoj u uzbudnom namotaju je relativno čest kvar u pogonu generatora.

Do zemljospoja može doći zbog:

- probaja oštećene ili ostarjele izolacije rotorskog namotaja,
- probaja ili onečišćenja izolacije kliznih prstenova i spojnih vodova.

Zemljospoj u jednoj tački ne predstavlja kvar opasan po generator, jer kroz mjesto kvara ne teče struja i generator bi mogao ostati u pogonu bez štetnih posljedica.

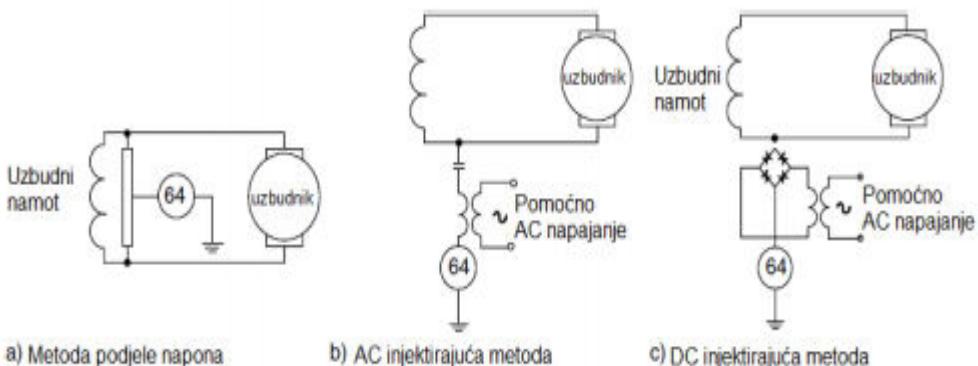
Međutim, postoji opasnost od pojave još jednog zemljospoja, koji bi doveo do kratkog spajanja izvjesnog broja zavojskog rotorskog namotaja što za posljedicu ima pojavu velikih struja, te neravnomjerno zagrijavanje i razaranje rotora. Također, kratkim spajanjem određenog broja zavoja narušava se simetričnost proizvedenog magnetnog toka što dovodi do jakih vibracija cijelog agregata.

Da bi se spriječila pojava drugog zemljospoja, upotrebljava se zaštita koja signalizira pojavu prvog zemljospoja.

Uzbudni krug generatora je DC krug koji ne treba biti uzemljen. Ako se pojavi prvi dozemni kvar, neće teći struja i rad generatora neće biti ugrožen. Ako se pojavi drugi zemljospoj na drugom mjestu, proteći će struja koja je dovoljno velika da izazove oštećenja rotora i uzbudnika. Ako je veliki dio uzbudnog namota kratko spojen, jaka neravnoteža zbog nenormalnog toka zračnog raspora rezultirati će silama koje djeluju na rotor sa mogućnošću ozbiljnih mehaničkih kvarova. U cilju sprječavanja ove situacije, postoje brojni tehnike zaštite.

---

<sup>20</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>



Slika 13. Tehnike zaštite od zemljospaja u uzbudnom namotaju<sup>21</sup>

Prva tehnika uključuje spajanje otpora u paralelu sa uzbudnim namotom. Središnja tačka otpornika je spojena na zemlju preko strujno osjetljivog releja. Ako se tačka uzbudnog namota uzemlji, relek će reagirati na iznos struje koji protječe kroz njega. Glavni nedostatak ove tehnike je da ne registriraju kvarove ako se središnja tačka uzbudnog namota uzemlji.

Druga tehnika uključuje priključen AC napon preko jedne tačke uzbudnog namota. Ako se uzbudni namot uzemlji na istom mjestu, AC struja će teći kroz relek i uzrokovati njegovo reagiranje.

Treća tehnika uključuje injektiranje DC napona umjesto AC napona. Posljedica ostaje ista ako se uzbudni namot uzemlji u istoj tački.

Najbolja zaštita od zemljospaja u uzbudnom namotaju jest stavljanje generatora izvan pogona odmah nakon što se detektira prvi zemljospoj.<sup>22</sup>

## 2.5 Zaštita od gubitka uzbude

Gubitak uzbude na generatoru se pojavljuje ako nestane napajanje uzbudne struje. Situacija može biti potaknuta različitim prilikama i tada nastaju sljedeće situacije:

1. Kada se ukloni napajanje uzbudom, stvarna snaga generatora će se zadržati skoro konstantnom tijekom nekoliko sljedećih sekundi. Zbog pada u uzbudnom naponu, izlazni napon generatora opada postupno. Za kompenzaciju pada u naponu treba struju proporcionalno povećavati.
2. Generator tada postaje poduzbuđen i uzimati će sve više negativne reaktivne snage.

<sup>21</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>22</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

- Zbog toga što omjer generatorskog napona i struje postaje manji i manji sa prethođenjem fazne struje faznom naponu, pozitivni redoslijed generatorske impedancije mjerene na njihovim priključcima postavit će impedantnu ravninu u drugi kvadrant.

Najpopularnija zaštita od gubitka uzbude koristi pomični mho relj, koji se napaja sa priključaka generatora. Spregnut je s vremenskim relejom. Mnogi moderni digitalni releji koriste pozitivni redoslijed napona i struje za procjenu pozitivnog redoslijeda impedancije koja se vidi na generatorskim priključcima.<sup>23</sup>

## 2.6 Strujna neravnoteža

Strujnu neravnotežu u statoru sa popratnom proizvodnjom negativnog redoslijeda struje uzrokovat će dvostruko frekventne struje na površini rotora. To može uzrokovati preveliko pregrijavanje rotora i izazvati značajna termička i mehanička oštećenja. Razlozi privremene ili trajne strujne neravnoteže su brojni, prema:

- mrežna nesimetrija,
- neuravnoteženo opterećenje,
- neuravnoteženi mrežni kvarovi ili otvoreni krugovi,
- jednopolno isključenje sa pratećim uklopom.

Energija dovedena rotoru teče potpuno termičkim zakonom i proporcionalna je kvadratu negativnog redoslijeda struje. Stoga, termičko ograničenje K se dostiže kada se riješi sljedeća integralna jednadžba:

$$K = \int_0^t I_2^2 dt$$

Gdje su:

K – konstanta ovisna o konstrukciji i veličini generatora,  $I_2$  – efektivna vrijednost negativnog redoslijeda struje, t – vrijeme.

Integralna jednadžba može se izraziti kao inverzna vrijeme-struja karakteristika gdje je maksimalno vrijeme dato kao varijabla negativnog redoslijeda struje:

$$t = \frac{K}{I_2^2}$$

---

<sup>23</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

U ovom izrazu veličina negativnog redoslijeda struje se unosi uglavnom kao postotak nizivne fazne struje i integracija dolazi do izražaja kada mjereni negativni redoslijed struje postaje veći nego granični postotak.

Termička konstanta K je eksperimentalno određena kod proizvođača generatora tako što se narine negativni redoslijed struja na stroj na koji su strateški instalirani termo parovi te se zabilježe temperaturni porasti.

Ovi releji mogu biti primijenjeni u sve tri tehnologije (elektromehaničke, statičke, ili digitalne). Idealno se može mjeriti negativni redoslijed struja u efektivnim vrijednostima. Mogu se koristiti i drugi mjerni principi. Digitalni releji također mjeru osnovnu komponentu negativnog redoslijeda struje zato što je ona osnovni princip za fazorsko mjerjenje.<sup>24</sup>

## 2.7 Protu – motorna zaštita

Postoje brojni slučajevi gdje se generator može koristiti kao motor:

- Uklonjen pogonski stroj generatora koji napaja mrežu na sinkronoj brzini sa normalnom uzbudom. Energetska mreža će u tom slučaju pogoniti generator kao motor.
- Generator spojen nepropisno na energetsku mrežu. Generatorski prekidač nenamjerno zatvoren na nekoj brzini manjoj od sinkrone brzine.
- Priključena oprema za rotaciju, te generator usporava do mirovanja, ili je dostigao mirovanje.
- Generatorsko nenamjerno pobuđivanje.

Motorni rad izazvati će štetne posljedice, osobito u slučaju parnih turbina. Osnovna pojava je da rotacija rotora turbine i lopatica u parnom okruženju uzrokuju gubitke zbog trenja zraka. Gubici zbog trenja zraka su funkcija promjera rotora, dužine lopatica i direktno su proporcionalni gustoći obuhvaćene pare. U bilo kojem slučaju gdje je gustoća pare velika mogu se pojaviti štetni gubici zbog trenja zraka. Možemo zaključiti da je protu-motorna zaštita više zaštita pogonskog stroja nego zaštita generatora.

Mnogo lakše detektiranje motornog režima je praćenje toka djelatne snage u generatoru. Ako taj tok postane negativan ispod radnog nivoa, tada je detektiran motorni režim. Osjetljivost i postavke releja snage ovise o energiji potrošenoj pogonskim strojem razmatranim kao motorom.<sup>25</sup>

---

<sup>24</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>25</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

## 2.8 Naduzbudna zaštita

Kada generator ili blok transformator željezne jezgre postanu zasićeni više od nazivnog, magnetni rasipni tok će biti uključen u neslojevite komponente. Ove komponente nisu konstruirane da vode tok i nadalje brzo se mogu pojaviti termička ili dielektrična oštećenja.

U dinamičkim magnetskim krugovima, generiraju se naponi po Lentzovom zakonu:

$$V = K \frac{d\phi}{dt}$$

Mjereni napon se integrira u cilju procjene toka. Prepostavljajući sinusni napon  $V_p$  i frekvenciju  $f$ , integriranje preko pozitivnog ili negativnog intervala poluperiode daje tok proporcionalan vrijednosti vršnog napona po frekvenciji, kako slijedi:

$$\phi = \frac{1}{K} \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin(\omega t + \theta) dt = \frac{V_p}{2\pi f K} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\frac{T}{2}}$$

Ovaj tip zaštite se stoga naziva volt/hercu.

$$\phi \approx \frac{V_p}{f}$$

Procijenjena vrijednost toka može tada biti upoređena s maksimalnom graničnom vrijednošću. Sa statičkom tehnologijom, volt/hercu releji tada zapravo integriraju praćeni napon preko pozitivne ili negativne (ili obje) poluperiode vremena i daju vrijednost koja je odgovara toku. Kod digitalnih releja, budući da je moguće mjerenje frekvencije zajedno sa veličinom faznog napona, koristi se direktni omjer za izračun.

Jedan od osnovnih zahtjeva volt/herc releja je da moraju mjeriti obje veličine i napon i frekvenciju preko širokog opsega frekvencija.<sup>26</sup>

---

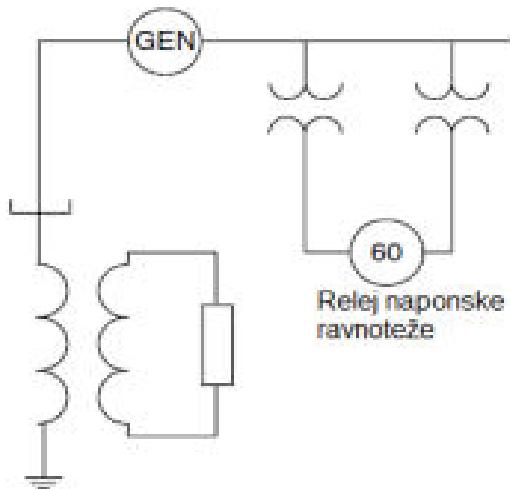
<sup>26</sup> <https://repositorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

## 2.9 Zaštita od neravnoteže napona

Gubitak signala faznog napona može biti zbog brojnih razloga. Primarni razlog ovoj smetnji je pregaranje osigurača u krugu naponskog transformatora. Drugi razlog može biti kvar vodiča, kvar naponskog transformatora, otvaranje kontakata, pogrešno djelovanje tijekom održavanja, itd.

Uloga naponskih transformatora je davanje naponskih signala za zaštitne releje i regulatore napona, a izravni učinak gubitka signala naponskoga transformatora će biti pogrešno djelovanje nekih zaštitnih releja i prouzrokovati će preuzbuđenje generatora.

Uobičajena praksa za velike generatore je da koriste dvije grupe naponskih transformatora za zaštitu, regulaciju napona, i mjerena. Najčešće, za detektiranje gubitka signala naponskog transformatora koristi se relj ravnoteže napona na svakom paru sekundarnog faznog napona. Kada pregori osigurač veza napona postane neuravnotežena i releji prorade. Obično se naponska ravnoteža postavi na oko 15%.



Slika 14. Relej naponske ravnoteže<sup>27</sup>

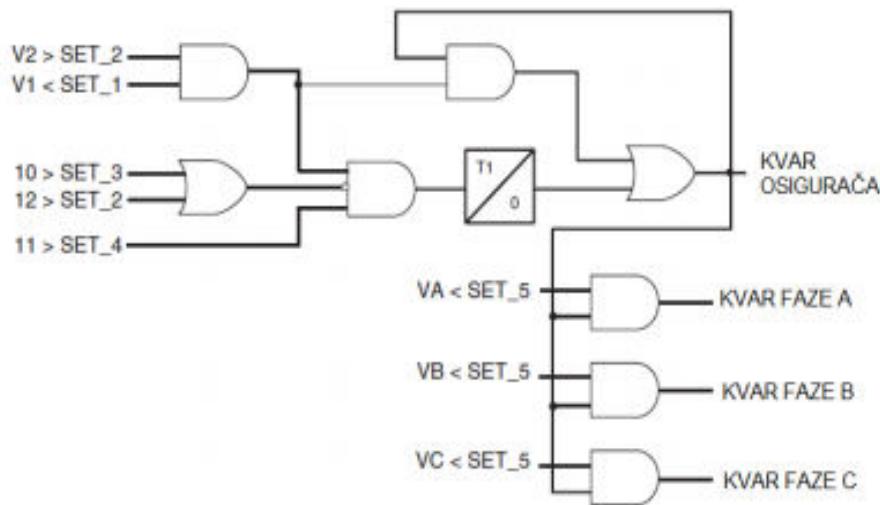
Pojavljivanje digitalnih releja omogućava korištenje složenih algoritama temeljenih na simetričnim komponentama za detektiranje gubitka signala naponskog transformatora. Kada dođe do gubitka jednog ili više signala naponskog transformatora nastaju sljedeći slučajevi:

- Propad u pozitivnom redoslijedu napona popraćen povećanjem jakosti napona u negativnom redoslijedu.

<sup>27</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

- Gubitak signala naponskog transformatora.

Svi gornji slučajevi sadržani su u kompleksnoj logičkoj shemi za određivanje da li je doista nastupio slučaj gubitka signala naponskog transformatora ili kvar. Sljedeća slika prikazuje logičku primjenu jednostrukog i dvostrukog kvara osigurača naponskog transformatora na simetričnim komponentama.<sup>28</sup>



Slika 15. Komponente za detektiranje kvara osigurača<sup>29</sup>

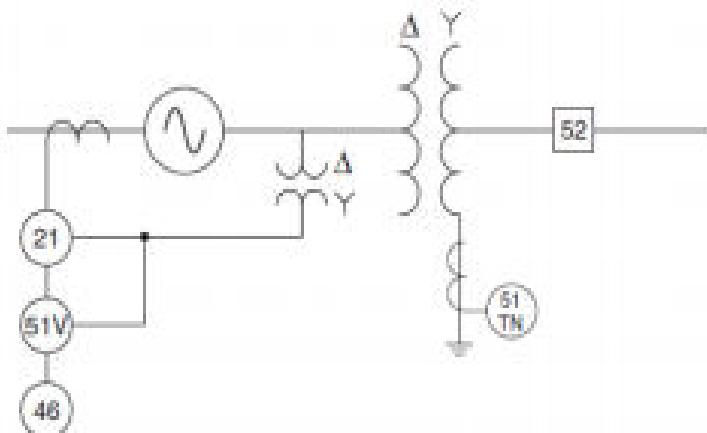
## 2.10 Rezervna mrežna zaštita

Rezervna zaštita generatora ne djeluje na kvarove generatora, ali djeluje na mrežne kvarove koji nisu otklonjeni u vremenu primarne mrežne zaštite, a koji zahtijevaju odvajanje generatora u cilju otklanjanja kvara. Po definiciji su to zaštitne funkcije s vremenskom zadrškom koje moraju biti uskladene sa primarnom mrežnom zaštitom.

Rezervna mrežna zaštita mora osigurati zaštitu i za fazne kvarove i za dozemne kvarove. U cilju zaštite od faznih kvarova najčešće se koriste dvije vrste releja: korištenje nadstrujnih releja sa bilo naponskim ograničenjem bilo naponskom kontrolom, ili impedantni tipovi releja.

<sup>28</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>29</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>



Slika 16. Osnovna šema rezervne zaštite<sup>30</sup>

Osnovni princip načela nadziranja napona nadstrujnim relejima je da kvarovi izvan generatora i u mreži imaju za posljedicu smanjenje napona na priključnicama generatora. Pojava se koristi u oba tipa nadstrujnih primjena. Napon kontroliran nadstrujnim relejom blokirati će nadstrujni element dok napon ne padne ispod postavljene vrijednosti, i naponsko ograničenje nadstrujnog elementa će imati njegovu struju reagiranja smanjenu za iznos proporcionalan smanjenju napona.<sup>31</sup>

## 2.11 Zaštita od ispadanja iz sinhronizma

Ako postoji ravnoteža između proizvodnje i opterećenja u električnoj mreži, mrežna frekvencija će biti stabilna i unutarnji ugao generatora će se zadržati konstantnim. Ako se pojavi neravnoteža, unutarnji ugao generatora će pretrpjeti neke promjene i mogu nastati dvije situacije. Novo stabilno stanje biti će dostignuto nakon što poremećaj potpuno iščezne ili unutarnji ugao generatora se ne stabilizira i generator će se kretati sinhrono u odnosu na ostatak mreže. Zato se uvodi zaštita od ispada iz sinhronizma kako bi detektirala taj slučaj.

Taj princip može se vizualizirati razmatranjem dvostrukog napajanja mreže.



Slika 17. Dvostruko napajana mreža<sup>32</sup>

<sup>30</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>31</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>32</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

Ako je ugao između dva izvora  $\theta$  i omjer između iznosa napona je  $n=EG/ES$ , tada pozitivni redoslijed impedancija će biti:

$$Z_R = \frac{n(Z_G + Z_T + Z_S)(1 - j \cot \frac{\theta}{2})}{2} - Z_G$$

Impedantna krivulja mjesto opisana jednadžbom je ravna linija, okomita na modul kompleksnog broja  $Z_S+Z_T+Z_G$  i siječe ga u njegovoj srednjoj tački. Ako je  $n$  različit od 1, krivulje mjesto postaju kružnice. Ugao  $\theta$  između dva izvora je ugao između dva segmenta pridružujući  $Z_R$  bazi  $Z_G$  i vrhu  $Z_S$ . Naravno, ugao će imati malu vrijednost. U slučaju gubitka sinhronizma, on će poprimiti veću vrijednost i kada dosegne  $180^\circ$ , presijeca modul kompleksnog broja  $Z_S+Z_T+Z_G$  u njegovoj središnjoj tački.

Zbog inercije stroja impedancija  $Z_R$  se polagano mijenja. Pojava može biti korisna i slučaj gubitka sinhronizma se pretežno detektira kombinacijom mho releja i dva zaslona. Stanje gubitka sinhronizma pretpostavlja se kada impedantna krivulja mjesto ulazi u mho krug i zadržava se između dva zaslona u vremenskom intervalu dužem od postavljenog konačnog vremenskog kašnjenja. Ugao između dva izvora raste kada  $Z_R$  prelazi zaslon. Ostvarenje zaštite od gubitka sinhronizma zahtjeva neke pažljive studije i eventualno može zahtjevati simulacije stabilnosti u cilju objašnjenja krivulje mjesto stabilnosti i njihanja nestabilnosti. Jedan od najviših zahtjeva zaštite od gubitka sinhronizma je ne isključiti generator u slučaju stabilnih uvjeta.<sup>33</sup>

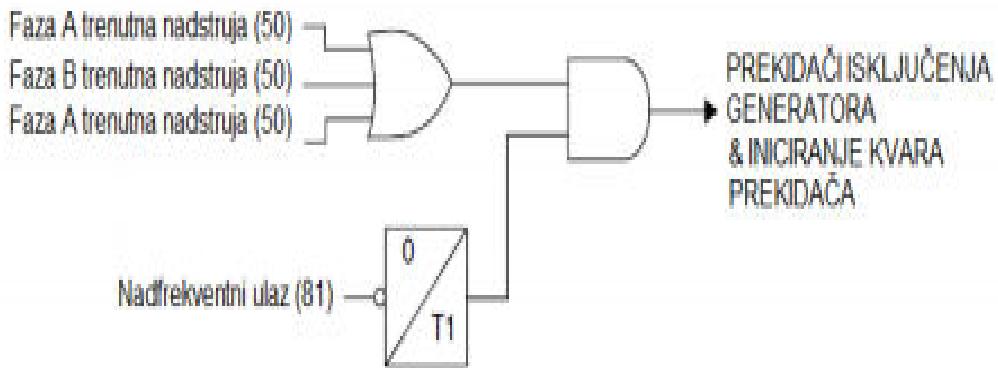
## 2.12 Zaštita od slučajne pobude

U prošlosti su nastali brojni katastrofalni kvarovi ako su sinhroni generatori bili slučajno pobuđeni za vrijeme mirovanja. Među razlozima za takve događaje bile su ljudske greške, zapaljenje prekidača, ili greška u radu kontrole strujnog kruga.

Osmisljene su brojne zaštitne sheme da zaštite generator od slučajne pobude. Osnovni princip je praćenje izvan radnih uvjeta i detektiranje slučajne pobude koja neposredno prati to stanje. Kao na primjer, sljedeća slika prikazuje primjer korištenja nadfrekventnog releja u nadziranju tri jednofazna trenutna nadstrujna elementa.

---

<sup>33</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>



Slika 18. Frekvencijski nadzirana nadstrujna zaštita od slučajne pobude<sup>34</sup>

Ako se generator stavi van pogona ili ispadnu nadfrekventni elementi tada reagira timer. Ako se pojavi slučajna pobuda, reagirati će nadfrekventni element, te zbog timerske zadrške ispada trenutni nadstrujni elementi će imati vremena da započnu otvaranje generatorskih prekidača. Nadziranje također može biti ostvareno korištenjem naponskih releja.

Slučajna pobuda uzrokovana jednofaznim ili trofaznim zapaljenjem prekidača koje se pojavljuje tijekom procesa sinkroniziranja generatora neće biti detektirano logikom na slici. U takvom slučaju, u vremenu generatorskog postizanja sinhronne brzine, izlazi nadstrujnih elemenata trebaju biti blokirani.<sup>35</sup>

## 2.13 Zaštita od povratne snage

U slučaju nestanka pogonske energije turbini, ista prestaje da daje pogonsku snagu generatoru. Sinhroni generator prelazi u motorno područje rada, te kao sinhroni motor pokreće turbinu, uzimajući za to potrebnu aktivnu snagu iz mreže.

Ovakav režim rada je opasniji po turbinu nego za generator, pri čemu dolazi do povećanja frekvencije.

Ako su regulatori broja okretaja ispravni i podešeni da djeluju na promjenu frekvencije, može se desiti da se potpuno zaustavi dovod pare i na taj način uzrokuje povratna energija. Kako u turbinu ne dolazi svježa para, gubici trenja i ventilacije u njoj se troše na zagrijavanje preostale pare, pa temperatura lopatica može dostići nedozvoljeno visoke vrijednosti, što dalje može dovesti do njihovog iskrivljenja, struganja rotorskih o statorskog lopatice i težak kvar cijele turbine.

<sup>34</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>35</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

Zbog svega navedenog, postavlja se zahtjev da se generatori opreme zaštitom koja bi ga, u slučaju pojave povratne snage, odvojila generator od mreže.

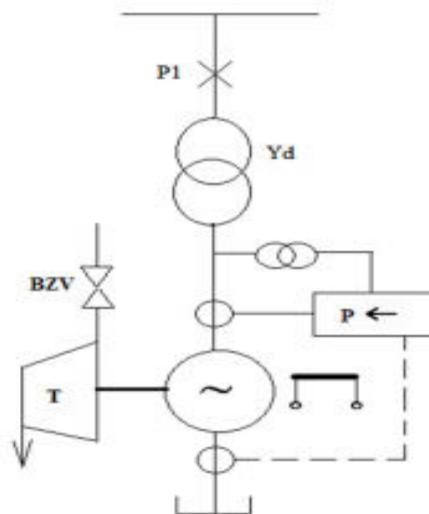
Kao kriterij za djelovanje zaštite uzima se snaga koju generator uzima iz mreže. Ta snaga iznosi oko (0,5-5)% nominalne snage generatora. U skladu s tim najčešće se primjenjuje dovoljno osjetljiv vatmetarski relej  $\cos\phi$  tipa, koji će u slučaju povratne snage djelovati na isključenje generatorskog prekidača.

Ovi releji trebaju imati određeno vremensko zatezanje, oko (3-15)s, da bi se izbjeglo nepotrebno djelovanje zaštite kod kratkotrajnih pojava povratne snage.

Djelovanje vatmetarskog releja može se usloviti i položajem brzog zapornog ventila turbine. Ako je on zatvoren, što je slučaj kod kvara u turbinskom postrojenju, zaštita može da djeluje brzo (1-5)s, a ako je povratna snaga posljedica djelovanja sistema regulacije, djelovanje zaštite se zateže (5-15)s ili više.

Često se koristi izvedba sa dva nezavisna vatmetarska releja, posebno kod velikih generatora. Jedan djeluje na povratnu snagu sa nešto većim vremenskim zatezanjem, dok drugi, dvostepeni relej, djeluje u I stepenu sa malim zatezanjem ako je zatvoren brzi zaporni ventil.

Ako on nije zatvoren, tada zaštita djeluje na signalizaciju i eventualno jako usporeno djelovanje na isključenje, reda (20-60)s. Na taj način ostvarena je 100%-tna rezerva u slučaju zatajenja ili ispitivanja jednog releja.



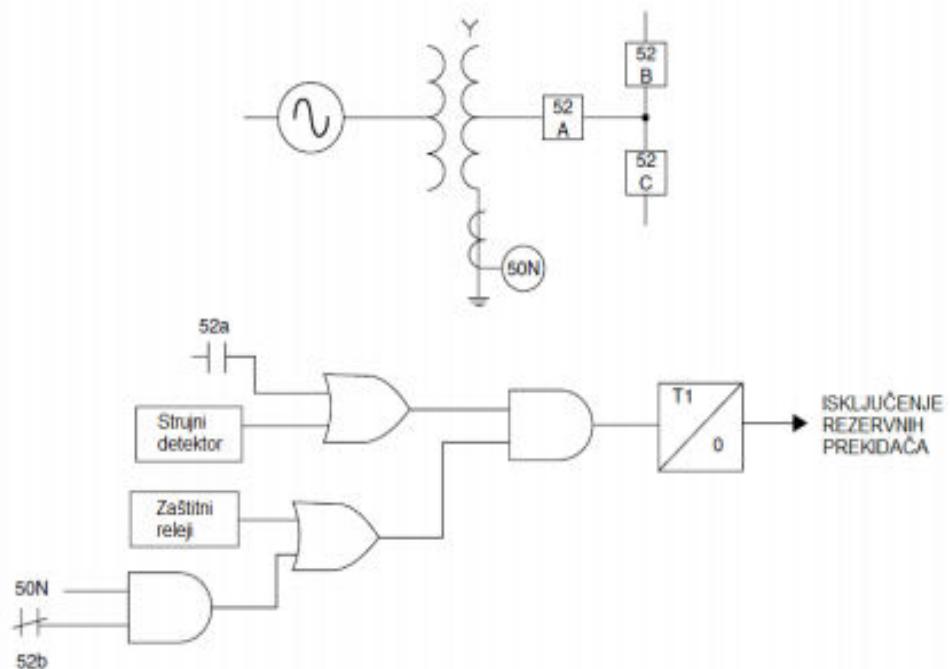
Slika 19. Zaštita od povratne sprege<sup>36</sup>

---

<sup>36</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

## 2.14 Kvar generatorskog prekidača

Kvar generatorskog prekidača također koristi osnovnu zakonitost. Kada zaštitni uređaji detektiraju kvar, timer će dalje kontrolirati otklanjanje kvara. Ako nakon vremenskog zatezanja kvar još uvijek nije otklonjen nameće se zaključak da se prekidači nisu otvorili i biti će poslan signal za otvaranje rezervnih prekidača.



Slika 20. Logika kvara prekidača sa zaštitom od zapaljenja<sup>37</sup>

Slika prikazuje dijagram kvara prekidača gdje je zaliha dodana da detektira pojavljivanje zapaljenja prije sinhroniziranja generatora. U dodatku detektiranja kvara zaštitnim relejima, stanje zapaljivosti je detektirano korištenjem trenutnih nadstrujnih releja instaliranih u zvjezdištu blok transformatora. Ako ovi releji reagiraju te položaj kontakta prekidača (52b) je zatvoren (a prekidač je otvoren), tada je uspostavljeno stanje zapaljenja i nastao je kvar prekidača.<sup>38</sup>

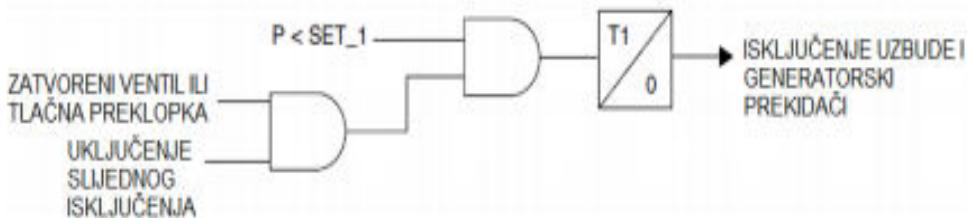
## 2.15 Pravila isključenja generatora

Stvorene su brojne metode za izoliranje generatora kada se pojavi kvar. One spadaju u četiri grupe prema:

<sup>37</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>38</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

- Istovremeno isključenje - Zahtjeva isključenje pogonskog stroja zatvaranjem njegovih ventila i otvaranje uzbudnog i generatorskog prekidača. Ova tehnika je vrlo preporučljiva za opasne unutarnje kvarove generatora.
- Isključenje generatora - Zahtjeva istovremeno otvaranje i uzbudnog i generatorskog prekidača.
- Odvajanje generatora - Zahtjeva otvaranje samo generatorskog prekidača.
- Slijedno isključenje - Primjenjivo za parne turbine i zahtjeva prvo isključenje turbinskih ventila u cilju sprječavanja bilo kojeg prevelikog ubrzanja. Stoga, uzbudni i generatorski prekidači su otvoreni. Sljedeća slika prikazuje moguće logičke sheme za ostvarenje funkcije slijednog isključenja. Ako su ispunjena sljedeća tri uvjeta, djelatna snaga je ispod negativne postavljene granice SET\_1, parni ventil ili preklopnik izjednačenja tlaka je zatvoren, funkcija slijednog isključenja je uključena, tada će biti signal isključenja poslan generatorskim i uzbudnim prekidačima.<sup>39</sup>



Slika 21. Provedba funkcije slijednog isključenja<sup>40</sup>

## 2.16 Kvarovi i nenormalna stanja u pogonu generatora

Izolacija generatora izvrgnuta je u pogonu raznim naprezanjima i uticajima. Na nju djeluju mehanička naprezanja zbog centrifugalnih sila, dinamičkih sila kratkih spojeva, zbog vibracija, dilatacija kod grijanja i sl. Osnovni zahtjev za diferencijalnu zaštitu generatora je velika brzina djelovanja ( $15 * 40$  ms), pored zahtjeva za dovoljnom osjetljivošću zaštite ( $15 * 20\%$  In).<sup>41</sup>

Takoder, u mreži koju generator napaja, prilikom raznih kvarova i poremećaja, mogu se pojaviti pogonska stanja, koja ne predstavljaju kvar u generatoru, ali dovode do nedozvoljeno visokih termičkih, električnih ili mehaničkih naprezanja generatora.

<sup>39</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>40</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>41</sup> <https://www.scribd.com/doc/97267830/ZA%C5%A0TITA-GENERATORA>

Ukoliko se takvo stanje blagovremeno ne ukloni, može doći do težeg oštećenja i pojave kvara na generatoru. Abnormalna pogonska stanja generatora, su:

- Preveliko strujno opterećenje generatora zbog preopterećenja radnom ili jalovom snagom;
- Prevelika struja kod kratkih spojeva u mreži koju napaja generator;
- Nenormalno visoki naponi koji naprežu i ugrožavaju izolaciju uređaja;
- Preniski naponi koji otežavaju ili potpuno onemogućavaju normalan rad potrošača;
- Asinhroni rad generatora;
- Previsoke temperature uslijed preopterećenja ili kvarova u sistemu hlađenja;
- Nesimetrična opterećenja generatora;
- Prevelik broj obrtaja.

## **2.17 Protupožarna zaštita generatora**

Mogućnost pojave vatre u generatoru su danas vrlo male, jer se izolacija danas izvodi od slabo gorivih materijala. Relejna zaštita od unutrašnjih kvarova generatora je vrlo osjetljiva i djeluje vrlo brzo tako da je razvijanje vatre teško moguće. Veliki generatori hlađe se danas vodonikom što onemogućava gorenje jer nema kiseonika.

U slučaju pojave vatre u generatoru otvaraju se ventili za puštanje CO<sub>2</sub> u krug hlađenja generatora. Postoje i izvedbe predviđene za gašenje generatora vodom.<sup>42</sup>

## **2.18 Zaštita od preopterećenja generatora**

Preopterećenje generatora javlja se kod ispada iz pogona pojedinih generatora ili kod ispada kompletne elektrane, koje paralelno napajaju zajedničko potrošačko područje, ili kod ispada prenosnih vodova.

Mogućnost preopterećenja generatora aktivnom snagom je vrlo mala jer je ograničena maksimalnom snagom koju može proizvesti turbina. Moguće preopterećenje reaktivnom jalovom snagom je znatno veće. Uzimajući u obzir radnu komponentu struje moguća su preopterećenja reda 1.6 puta nominalne snage generatora.

Zbog dosta velikog toplotnog kapaciteta generatora kod polaganog zagrijavanja strujama preopterećenja, ne postavlja se zahtjev za brzim isključenjem generatora iz pogona, jer bi se to negativno odrazilo na rad sistema u kojem već ionako postoji manjak snage. Zaštitni releji trebali bi da isključe generator nešto prije nego što namotaj dostigne maksimalnu dozvoljenu temperaturu.

---

<sup>42</sup><https://www.scribd.com/doc/97267830/ZA%C5%A0TITA-GENERATORA>

Zaštita od preopterećenja generatora uglavnom djeluje na signalizaciju, a ne na brzo isključenje generatora sa mreže, jer on ima veliki toplinski kapacitet pri laganom zagrijavanju strujama preopterećenja, te bi se samo isključenje generatora sa mreže negativno odrazilo na rad sistema u kome i onako postoji manjak snage.

Zaštitni releji bi trebali da isključe generator sa mreže nešto prije nego što namotaj dostigne maksimalno dozvoljenu temperaturu. Zbog toga se najčešće koriste termički prekostrujni releji, koji isključuju generator iz pogona sa vremenskim zatezanjem koje ovisi o iznosu struje. Kod izbora termičkih releja treba voditi računa o tome da konstanta zagrijavanja releja treba da bude što sličnija vremenskoj konstanti zagrijavanja štićenog generatora. Uglavnom je vrijednost termičke konstante (25-50) min kod normalno hlađenih generatora, (15-30) min kod generatora hlađenih vodikom ili forsirano na neki drugi način, a kod velikih generatora s efikasnim sistemima hlađenja vremenska konstanta se kreće od (5-15)min.

Kako je opterećenje simetrično, termički relaj je dovoljno priključiti na strujni transformator u jednoj fazi. Relaj djeluje na signalizaciju odmah po nastupanju preopterećenja, dok nakon isteka potrebnog vremena zatezanja djeluje na isključenje. Član za signalizaciju se podešava na struju nešto višu od nominalne i treba da djeluje sa vremenskim zatezanjem većim od vremena djelovanja dalekovodnih zaštita, kako ne bi dolazilo do nepotrebnih signalizacija kod kvarova u mreži.

Potrebno je i uzbudni krug štititi od strujnog preopterećenja određenim termičkim reljem, s obzirom na to da su uzbudni sistemi generatora predimensionisani u odnosu na nominalne uslove, te dozvoljavaju određenu kratkotrajnu naduzbudu.<sup>43</sup>

## 2.19 Zaštita od asinhronog rada generatora

Generator radi u asinhronom režimu ako mu nestne pobude ili ako iz bilo kojeg razloga ispadne iz sinhronizma. Do podpobude generator može doći zbog prekida pobudnog kruga, kvara automatskog regulatora napona, isпадa uzbudne sklopke itd.<sup>44</sup>

Ukoliko je generator u trenutku gubitka uzbude opterećen aktivnom snagom tako da je pogonski moment turbine veći od momenta reakcije, generator isпадa iz sinhronizma, povećava mu se broj okretaja i prelazi u režim rada asinhronog generatora.

Povećanje broja okretaja ovisi o izvedbi i karakteristikama generatora.

Kod hidrogeneratora asinhroni protumoment nije velik, tako da se ravnoteža javlja kod klizanja rotora reda (3-5)%.

Turboagregati razvijaju vrlo jak asinhroni protumoment, tako da se ravnoteža nazivnom momentu pojavljuje već kod vrlo malog klizanja rotora, reda (0,3-0,6)%.

<sup>43</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

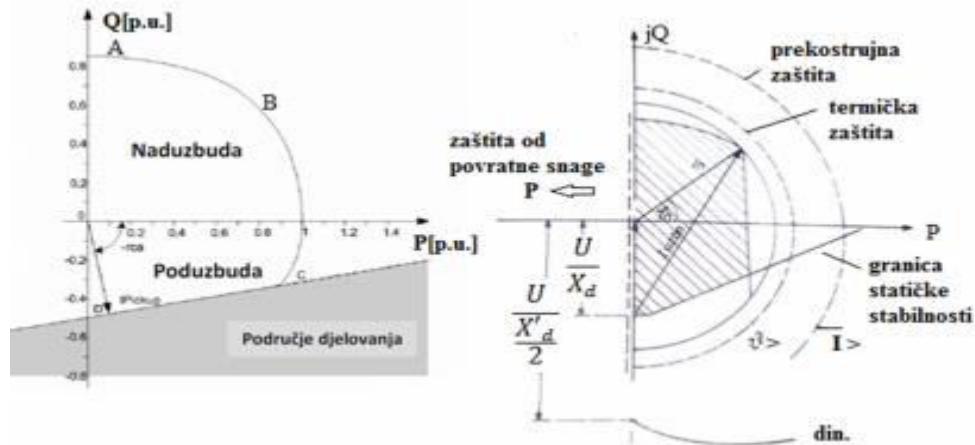
<sup>44</sup> <https://www.scribd.com/doc/97267830/ZA%C5%A0TITA-GENERATORA>

Nestanak uzbude generatora ima negativne posljedice i za EES sistem. Generator počinje da uzima iz mreže jalovu snagu  $Q$  potrebnu za magnetiziranje, koja kod nominalnog napona iznosi  $(0,6-1,25)In$ . Ako generator daje u mrežu i aktivnu snagu ova struja može narasti i do  $2In$ .

Ukoliko sistem nije dovoljno jak da izdrži nominalni napon, tj. ako nema dovoljno obrtne rezerve za proizvodnju potrebne jalone snage, dolazi do opadanja napona u sistemu.

Pored toga, zbog magnetne nesimetrije rotora javlja se njihanje aktivne i reaktivne snage, što se može negativno odraziti na rad ostalih generatora u sistemu.

Područje rada generatora je prikazano u P - Q dijagramu gdje su ucrtane proradne karakteristike zaštite od preopterećenja generatora, kao i zaštite od struja kratkih spojeva u napajanoj mreži.



Slika 22. P – Q dijagram<sup>45</sup>

## 2.20 Zaštita od prevelikog broja obrtaja

Kod naglog rasterećenja generatora, energija vode ili pare se ne može predati u mrežu, nego se troši na ubrzavanje okretnih dijelova turbine i generatora. Parne turbine su snadbevene brzim zapornim ventilima koji djeluju na zatvaranje pare kada broj okretaja premaši  $(108-110)\%$  nn, pa se može smatrati da turbogeneratori ne mogu postići previšok broj okretaja kod zatajenja turbinskog regulatora broja obrtaja.

U hidroelektranama se mora računati na mogućnost bijega turbine kod zatajenja regulatora broja okretaja. Iako su turbina i generator konstruisani tako da izdrže slobodan broj okretaja, u pogonu se izbjegava takvo suvišno naprezanje generatora. Zbog toga se postavlja zahtjev za zaštitom koja bi djelovala kod  $(120-140)\%$  nn.

<sup>45</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

Zaštita se izvodi kao mehanička i kao električna.

U prvom slučaju se radi o jednostavnom okidaču koji djeluje na porast centrifugalne sile.

Kod električnih zaštita može se koristiti napon za pogon regulatora snage (koji je proporcionalan broju okretaja) ili frekvencija proizvedenog napona pomoćnog generatora vezanog za osovinu agregata.<sup>46</sup>

## 2.21 Zaštita od pregrijavanja generatora

Dio mehaničke snage, koju turbina predaje generatoru, troši se na gubitke u generatoru. Oni su:

- gubici u bakru statorskog i rotorskog namotaja,
- gubici u željezu zbog vrtložnih struja i histereze,
- gubici trenja i ventilacije.

Kod normalnog rada generatora, toplina proizvedena gubicima se odvodi pomoću rashladnog zraka ili drugog medija za hlađenje (hlađenje vodom, ili vodikom).

Do povećanog i nedozvoljeno visokog zagrijavanja pojedinih dijelova generatora može doći zbog:

- povećanog strujnog opterećenja generatora,
- dodatnih induciranih struja u rotoru,
- povećanih gubitaka trenja i ventilacije.
- kvara u sistemu za hlađenje generatora.

Pojedini generatori su posebno osjetljivi na povećanje temperature. Najosjetljivija je izolacija namotaja.

Propisima su dozvoljene maksimalne nadtemperature za pojedine dijelove generatora.

Za signalizaciju nedozvoljeno visokog zagrijavanja pojedinih dijelova generatora, na odgovarajuća mjesta u generatoru se postavljaju sonde s nelinearnim otporom. Na osnovu promjene otpora sa temperaturom, vrši se mjerjenje ili signalizacija opasne temperature.

Pored mjernih instrumenata postavljaju se i osjetljivi releji koji kod niže temperature signaliziraju, a kod nešto više temperature djeluju na isključenje generatora iz pogona.<sup>47</sup>

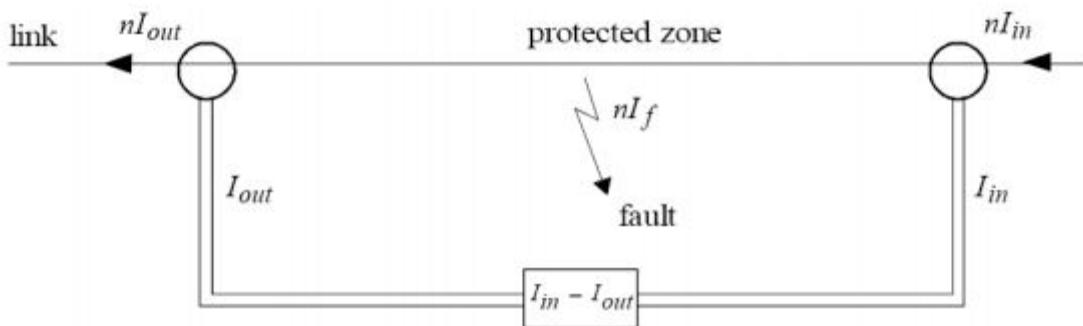
---

<sup>46</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

<sup>47</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%202018.pdf

## 2.22 Diferencijalna zaštita generatora

Princip diferencijalne zaštite se zasniva na poređenju dvije struje iste faze koje su inače jednake. Ako je struja koja ulazi u zonu štićenja različita od struje koja izlazi iz zone štićenja tada razlika te dvije struje definiše vrijednost struje kvara.



Slika 23. Blok dijagram diferencijalne zaštite<sup>48</sup>

Sekundari strujnih mjernih transformatora su podešeni tako da struja teče iz jednog udrug, pri čemu su struje suprotnog faznog stava i u normalnim uslovima rad su jednake.

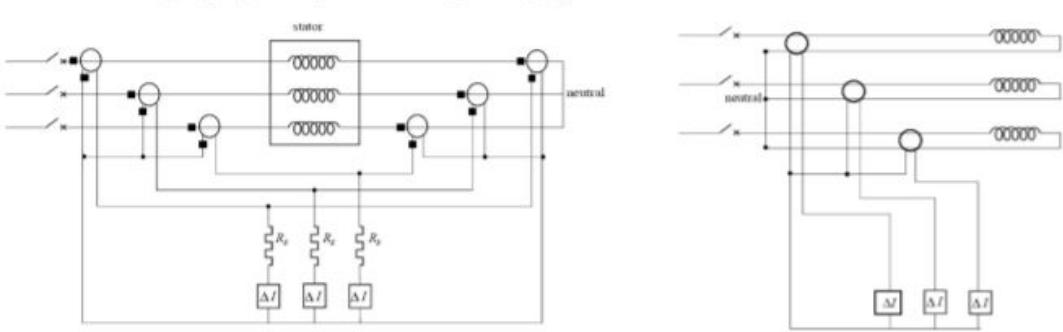
Struja mjerena u diferencijalnoj grani je približno nula pri normalnim uslovima rada ili u slučaju kada se kvar desio izvan zone štićenja.

Ako se kvar desio unutar zone štićenja, ova struja je proporcionalna struji kvara.

Diferencijalna zaštita za generator je uglavnom za zaštitu statorskih namota generatora od zemljospoja i faznih kvarova. Kvarovi namotaja statora vrlo su opasni i uzrokuju znatna oštećenja generatora. Za zaštitu statorskog namotaja generatora, sistem diferencijalne zaštite koristi se za uklanjanje kvara u najkraćem mogućem vremenu radi smanjenja opsega oštećenja.<sup>49</sup>

<sup>48</sup> [https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja\\_2014/Predavanje4.DIFERENCIJALNA\\_ZASTITA.pdf](https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja_2014/Predavanje4.DIFERENCIJALNA_ZASTITA.pdf)

<sup>49</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>



Slika 24. Diferencijalna zaštita<sup>50</sup>

Ova zaštita se može primjenjivati samo kad se može pristupiti izvodima svakog od namota statora. Maksimalna struja za koju zaštita ne smije reagovati jeste struja kratkog spoja generatora. Reagovanje zaštite je skoro trenutačno (nema zadrške), i struja kratkog spoja koja treba da se uzme u obzir jeste ona koja teče za vrijeme prelaznog perioda koja je približno 5 do 10  $I_n$ . Uslov koji mora biti zadovoljen da se izbegne nepotrebna prorada zaštite jeste:

$$R_s \geq (R_w + R_{ct}) \frac{I_{gsc}}{I_{set}}$$

$I_{gsc}$  – struja generatora u kratkom spoju

Uzmimo npr.:

$$R_s = (R_w + R_{ct}) \frac{I_{gsc}}{I_{set}}$$

$R_s$  – uključuje i otpor releja

Uslov koji mora da se zadovolji kod odabira strujnog transformatora je:

$$V_k \geq 2R_s I_{set} \text{ (ako uzmemo } k=2)$$

pa prema tome:

$$V_k \geq 2(R_w + R_{ct})I_{gsc}$$

Ako je  $I_{gsc} = 10I_n$ , onda je:

<sup>50</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

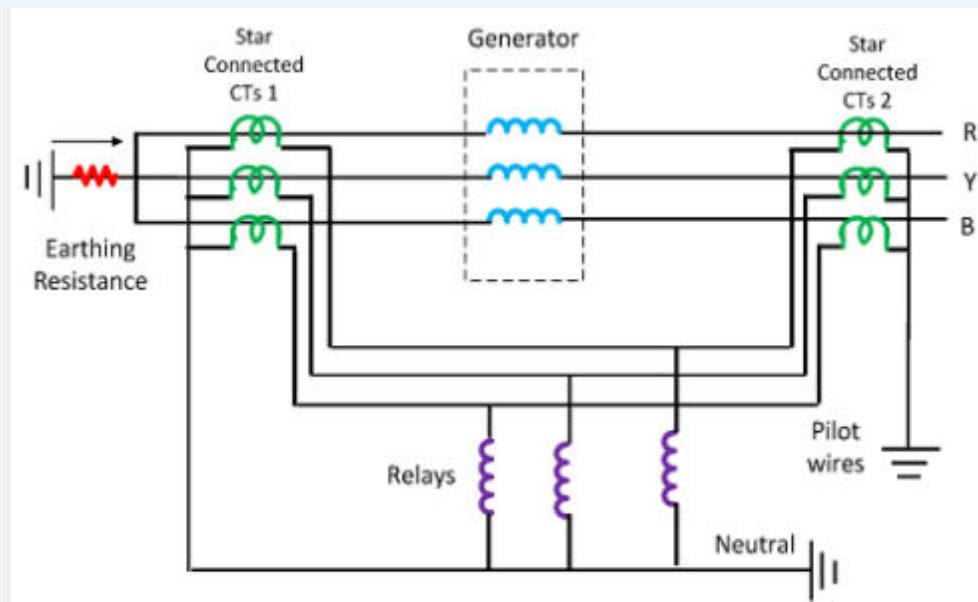
$$V_k \geq 2(R_w + R_{ct}) \times 10I_n$$

Tada je minimalna struja kvara koja može biti registrovana:

$$I_f = n(2I_m + I_{RN} + I_{set})^{51}$$

### 2.22.1 Merz – nagradni cirkulacijski sistem

Kada je sistem u normalnom radnom stanju, jakost struja jednaka je na sekundarnim namotima strujnih transformatora. U slučaju pojave smetnji struja kratkog spoja struji kroz sistem i jačina struje se razlikuje. Ova razlika struje u uvjetima kvara provodi se kroz strujni svitak releja.



Slika 25. Merz – nagradni cirkulacijski sistem<sup>52</sup>

Relej zatim zatvara svoje kontakte i čini osigurač isključenim i time izolira zaštitu od sistema. Takav se sistem naziva cirkulirajući trenutni sistem Merz-Prize. Vrlo je učinkovit za zemljane smetnje i kvarove između faza.<sup>53</sup>

<sup>51</sup> [https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja\\_2014/Predavanje4.DIFERENCIJALNA\\_ZASTITA.pdf](https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja_2014/Predavanje4.DIFERENCIJALNA_ZASTITA.pdf)

<sup>52</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

<sup>53</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

### **2.22.2 Priključak za sistem diferencijalne zaštite**

Sistem zaštite zahtjeva dva identična transformatora koji su montirani na obje strane zaštitne zone. Sekundarni priključci strujnih transformatora povezani su u zvijezde, a njihove krajnje stezaljke su povezane preko pilotske žice. Zavojnice releja povezane su u deltu. Neutralni strujni transformator i reley priključena su na zajednički priključak.

Reley je spojen preko ekvipotencijalih tačaka tri pilot žice tako da je opterećenje na svaki strujni transformator isto. Ekvipotencijalna tačka pilotske žice je njezino središte, tako da se reley nalazi na središnjoj tački pilotskih žica.

Za pravilan rad diferencijalne zaštite sistema, neophodno je locirati zavojnice releja uz strujni transformator u blizini glavnog kruga. To se može postići umetanjem otpora uravnoteženja u seriju s pilotskim žicama kako bi se napravile ekvipotencijalne tačke smještene blizu glavnog prekidača.<sup>54</sup>

### **2.22.3 Problem povezan sa sistemom diferencijalne zaštite**

Žica neutralnog otpora koristi se u sistemu diferencijalne zaštite za izbjegavanje štetnog utjecaja struje zemljospoja. Kada se zemljospo dogodi u blizini neutralne, to će uzrokovati malu struju kratkog spoja koja protjeće kroz neutralnu tačku zbog male emf. Ova struja se dodatno smanjuje zbog otpora neutralnog uzemljenja. Tako će mala struja teći kroz reley. Ova mala struja neće raditi svitak releya, i stoga generator dobiva oštećenja.<sup>55</sup>

### **2.22.4 Modificirana shema sistema diferencijalne zaštite**

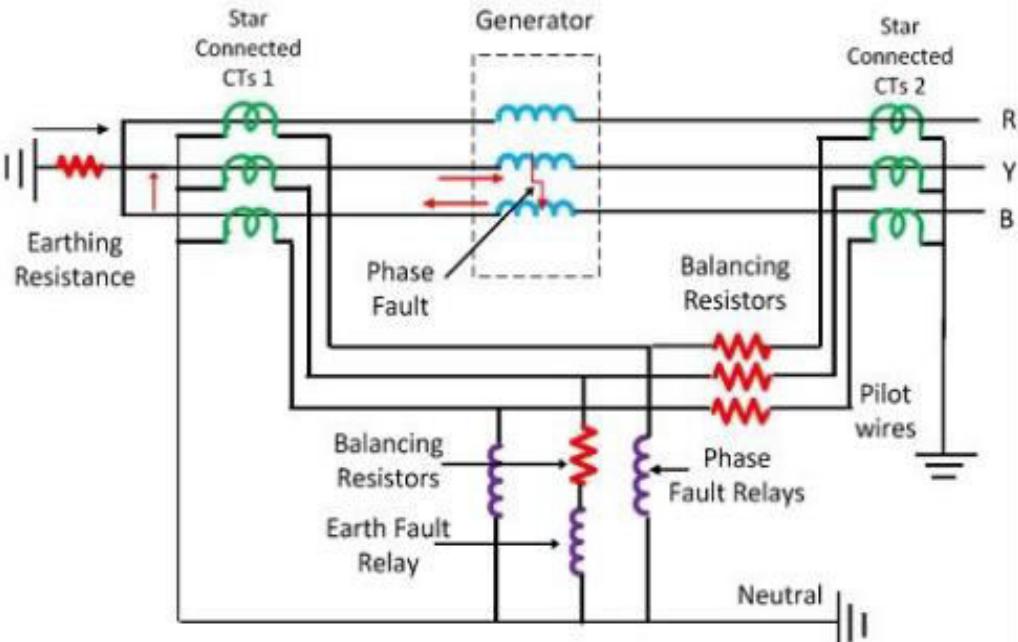
Kako bi se riješio navedeni problem, razvijena je modificirana shema. U ovoj shemi su postavljena dva elementa, jedan za zaštitu fazne smetnje i drugi za zaštitu od zemljospoja.

Fazni elementi povezani su u zvijezde s otpornikom. Reley zemljospoja se nalazi između zvijezde i neutralnog položaja. Dvofazni elementi zajedno s balansnim otpornikom povezani su u zvijezdu, a reley uzemljenja je spojen između zvijezde i neutralne pilotske žice.<sup>56</sup>

<sup>54</sup> Isto

<sup>55</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

<sup>56</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

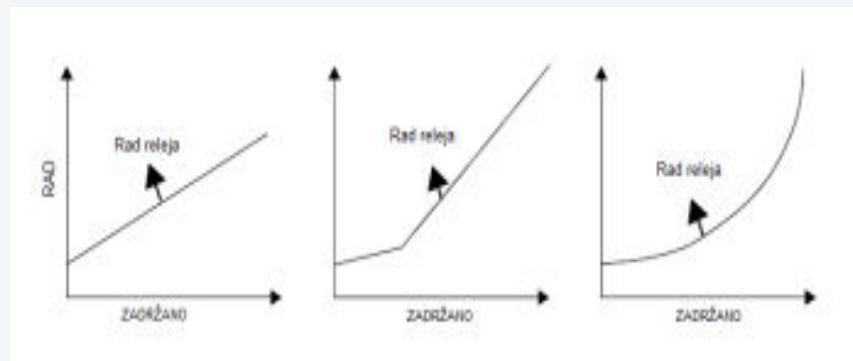


Slika 26. Modificirana shema sistema diferencijalne zaštite<sup>57</sup>

### 2.22.5 Diferencijalna zaštita za statorske kratke spojeve

Ova zaštita izvodi se visokobrzinskim diferencijalnim relejima po sve tri faze odvojeno, svi fazni (faza – faza) kratki spojevi uglavnom su obuhvaćeni ovim tipom zaštite. Kvarovi faza – zemlja, uzemljeni preko velike impedancije neće biti obuhvaćeni. U tom slučaju fazna struja će biti niža od potrebne proradne struje releja.

Najuobičajeniji tip diferencijalne statorske zaštite je postotna diferencijalna zaštita, čija je osnovna karakteristika prikazana na sljedećoj slici:



Slika 27. Jednostruki, dvostruki, i promjenjivi nagib karakteristike postotne diferencijalne zaštite<sup>58</sup>

<sup>57</sup> <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html>

Za statorske namote, iznos struje zadržanja će biti apsolutna suma dolazne i odlazne struje kao:

$$I_{\text{zadržanja}} = \frac{|IA_u| + |IA_{iz}|}{2}$$

gdje je iznos radne struje:

$$I_{\text{radno}} = |IA_u - IA_{iz}|$$

Relej će davati pogrešku kada je zadovoljena jednakost:

$$I_{\text{zadržanja}} \geq K \cdot I_{\text{radno}}$$

gdje je K postotak diferencije. Dvostruka i promjenjiva nagibna karakteristika će bez reagiranja releja dopustiti zasićenje strujnog transformatora zbog vanjskog kvara.

Alternativa postotnom diferencijalnom releju je visokoimpedantni diferencijalni relej, koji će svladati bilo koje zasićenje strujnog transformatora. Za unutrašnje kvarove, obje struje bit će usmjerenе u visokoimpedantni naponski relej. Diferencijalni relej će reagirati kada napon na naponskom elementu pređe iznad visoko postavljene granice. Za vanjske kvarove sa zasićenjem strujnog transformatora, zasićeni strujni transformator će činiti niskoimpedantni put kroz koji će teći struja od drugog strujnog transformatora, zaobilazeći visokoimpedantni naponski element koji tada neće reagirati.

Rezervna zaštita za statorske namote u većini slučajeva čini transformatorski diferencijalni relej sa harmonijskim ograničenjima, čija će zona pokriti i generator i blok transformator.

Impedantni element koji djelomično ili potpuno pokriva generatorsku zonu također pruža rezervnu zaštitu za statorske izvode.<sup>59</sup>

## 2.23 Praktičan primjer – hidrogenerator

Hidrogenerator je električni generator, redovito trofazni sinhroni, tjeran vodnom turbinom. Sinkrona brzina vrtnje određena je vrstom vodne turbine i ovisi o hidrauličnim prilikama (o količini vode i visini pada). Kod malih padova i velikih snaga često je potrebno, zbog

<sup>58</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

<sup>59</sup> <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview>

svojstava turbine, graditi hidrogeneratore za male brzine vrtnje, s velikim brojem magnetnih polova. Osovina (vratilo) hidrogeneratora obično je okomita, a vrlo rijetko vodoravna. U takozvanoj cijevnoj izvedbi (za male padove vode) generator i turbina čine cjelinu, jer je generator ugrađen u posebno kućište (takozvano kruška) ispred turbine, koje je u vodoravnom položaju potopljeno u vodotok.

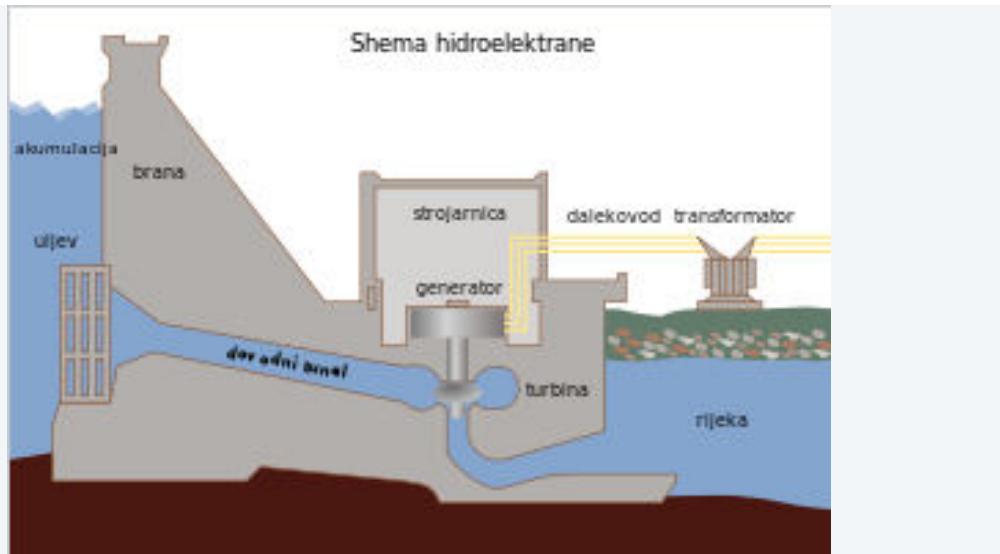
Rotor hidrogeneratora uvijek se izvodi s istaknutim magnetskim polovima. Zbog velikih mjera i mase, hidrogeneratori se u tvornicama grade od više dijelova, koji se nakon prijevoza na mjesto ugradnje spajaju i ispituju prije puštanja u pogon. Hlade se zrakom u zatvorenom krugu s vodnim hladnjacima, a postoje i izvedbe s izravnim hlađenjem namota vodom. Velike brzine pobjega vodnih turbina zahtijevaju visok stupanj sigurnosti mehaničke konstrukcije rotora i provjeru mehaničke ispravnosti pokusom vitlanja.



Slika 28. Vađenje rotora hidrogeneratora kod popravka (remonta)<sup>60</sup>

Hidroelektrana je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te, konačno u električnu energiju u električnom generatoru. Hidroelektranu u širem smislu čine i sve građevine i postrojenja, koje služe za prikupljanje (akumuliranje), dovođenje i odvođenje vode (brana, zahvati, dovodni i odvodni kanali, cjevovodi itd.), pretvorbu energije (vodne turbine, generatori), transformaciju i razvod električne energije (rasklopna postrojenja, dalekovodi) te za smještaj i upravljanje cijelim sistemom (strojarnica i sl).

<sup>60</sup> <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidrogenerator>



Slika 29. Shema hidroelektrane<sup>61</sup>

Što se tiče zaštite hidrogeneratora, pošto je to sinhroni generator za njega vrijede sljedeće zaštite: reljna zaštita, zaštita od prenapona, zaštita od zemljospojeva statorskog napona, zaštita od zemljospaja u uzbudnom namotaju, zaštita od ispadanja iz sinhronizma itd.

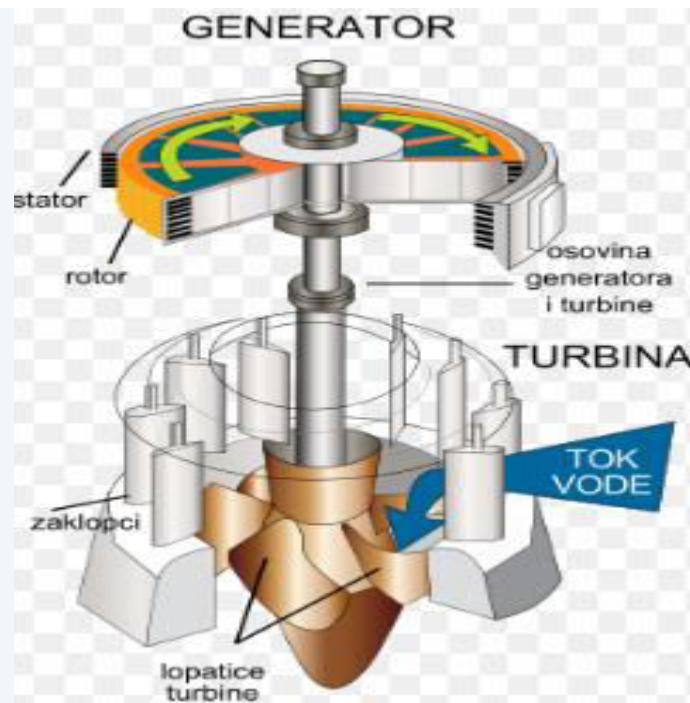
O većini ovih zaštita smo pisali ranije.

Ako postoji ravnoteža između proizvodnje i opterećenja u električnoj mreži, mrežna frekvencija će biti stabilna i unutarnji ugao generatora će se zadržati konstantnim. Ako se pojavi neravnoteža, unutarnji ugao generatora će pretrpjeti neke promjene i mogu nastati dvije situacije. Novo stabilno stanje biti će dostignuto nakon što poremećaj potpuno iščezne ili unutarnji ugao generatora se ne stabilizira i generator će se kretati sinhrono u odnosu na ostatak mreže. Zato se uvodi zaštita od ispada iz sinhronizma kako bi detektirala taj slučaj.

Relj je zaštitni uređaj koji trajno nadzire (mjeri) određenu električnu ili neelektričnu veličinu, te pri unaprijed određenoj vrijednosti izaziva naglu promjenu u jednom ili više komandnih ili signalnih strujnih krugova (isključuje prekidač, isključuje uzbudu generatora, zatvara brzozatvarajući ventil u sistemu za dovod pare turbini, prebacuje vlastitu potrošnju elektrane na drugi izvor napajanja...) Odnosno, njegov zadatak je daisključi dio elektroenergetskog sistema ili da generira signal opasnosti u slučaju pojave kvara ili smetnje u pogonu elektromagnetskog sistema. Za zaštitu sinhronih generatora reljna zeštita se dijeli na: distantna zaštita, termička zaštita, podnaponska zaštita, nadnaponska zaštita, podstrujna zaštita, nadstrujna zaštita itd.<sup>62</sup>

<sup>61</sup> <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana>

<sup>62</sup> <https://energetikaelektrro.files.wordpress.com/2015/04/szu2014-01.pdf>



Slika 30. Vodna turbina<sup>63</sup>

<sup>63</sup><https://www.google.com/search?q=na%C4%8Din+rada+hidrogeneratora&oq=na%C4%8Din+rada+hidrogeneratora&aqs=chrome..69i57j0.11393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

## ZAKLJUČAK

Kroz rad je u nekoliko poglavlja objašnjen pojam generatora, te generatorskih zaštita.

Generatori su električni strojevi koji mehaničku energiju pretvaraju u električnu energiju. Najzastupljenija je izvedba generatora kao rotacijskog stroja, koji se sastoji od nepokretnog vanjskog dijela (statora) unutar kojeg se nalazi okretni dio (rotor) koji se okreće vanjskim pogonskim strojem.

Istosmjerni generator je najstarija izvedba rotacijskog električnog generatora. Kod njega je stator izvor magnetskog polja, dakle u statoru se nalazi magnet ili elektromagnet, dok se na rotoru nalazi zavojnica koja se vrti i u kojoj se inducira električni napon.

Prikљučci generatora su spojeni na četkice, što su kontakti pritisnuti na komutator. Svaka pojedina četkica stoga nije trajno spojena na pojedini izvod zavojnice rotora, već se vrtnjom rotora stalno prespaja čime se na priključku dobija istosmjerni, iako pulsirajući napon.

Sinhroni generator je onaj u kojem je rotor stalni magnet ili elektromagnet. Naziva se sinhronim, budući da svaki pojedini okret rotora izaziva uvijek isti i cjelobrojni broj perioda induciranih napona, dakle inducirani napon se sinhrono mijenja skladno zakretanju osovine rotora.

Sinhroni generator može na rotoru imati jedan magnet (ili elektromagnet), dakle to je rotor s dva magnetna pola, odnosno s jednim parom polova, a može imati i nekoliko magneta, dakle nekoliko pari polova.

Generator se, kao najvažniji i najskuplji element u mreži, štiti različitim kombinacijama zaštitnih uređaja kako bi se što ranije detektiralo opasno stanje i na vrijeme aktivirala signalizacija za isključenje u slučaju kvara. Svaki generator štiti se sa 10 – 20 zaštitnih uređaja od unutarnjih i vanjskih kvarova. Kvarovi mogu nastati uslijed mehaničkih, termičkih i električkih naprezanja nastalih uglavnom zbog pojave različitih sila koje djeluju na rotor. Uslijed mehaničkih naprezanja moguće su povećane vibracije, pojave dinamičkih sila koje djeluju na rotor, povećane centrifugalne sile i slično. Kod ovakvih vrsta naprezanja redovito je moguće oštećenje izolacije generatora, pri čemu postoji mogućnost kvara stroja zbog pojave međufaznih kratkih spojeva između pojedinih namota (statorski i rotorski).

S ciljem što boljeg shvatanja, u radu imamo i prikaz pojedinih primjera vezanih za temu.

## LITERATURA

Knjige:

1. B. Kuhar, *Električne zaštite sinkronih generatora*, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
2. M. Vražić, *Sinkroni strojevi*, FER, Zagreb, 2010.
3. S. Nikolovski, *Zaštita u elektroenergetskom sustavu*, ETF, Osijek, 2007.
4. V. Milardić, I. Uglešić, B. Milešević, *Prenaponska zaštita generatora izravno spojenih na mrežu*, Zavod za visoki napon i energetiku, FER, Zagreb, 2011.

Internet izvori:

1. <https://repozitorij.unios.hr/islandora/object/etfos:1596/preview> (Datum pristupa: 03.05.2019.)
2. <https://illustrationprize.com/hr/630-differential-protection-of-a-generator.html> (Datum pristupa: 09.05.2019.)
3. <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1095/preview> (Datum pristupa: 17.05.2019.)
4. <https://www.scribd.com/document/257571077/Za%C5%A1tita-generatora-u-postrojenjuMaturski-Rad> (Datum pristupa: 25.05.2019.)
5. [https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja\\_2014/Predavanje4.DIFERENCIJAL NA ZASTITA.pdf](https://c2.etf.unsa.ba/file.php/175/Predavanja_2014/Predavanje4.DIFERENCIJAL NA ZASTITA.pdf) (Datum pristupa: 03.06.2019.)
6. <https://www.scribd.com/doc/97267830/ZA%C5%A0TITA-GENERATORA> (Datum pristupa: 11.06.2019.)
7. <file:///C:/Users/User/Downloads/Predavanje%206%20-%20202018.pdf> (Datum pristupa: 14. 06.2019.)
8. <https://energetikaelektrou.files.wordpress.com/2015/04/szu2014-01.pdf> (Datum pristupa: 30.06.2019.)

## **Popis slika**

1. Slika 1. Osnovni sastav sinhrone električne mašine, str.6
2. Slika 2. Turbogenerator, str.7
3. Slika 3. Hidrogenerator, str.7
4. Slika 4. Dizel generator, str.8
5. Slika 5. Izmjenični sinkroni električni generator s četiri para polova na rotoru, str.10
6. Slika 6. Primjer ranog turbogeneratora, lijevo se vidi i uzbudnik (GanzGenerator u Zwevegemu, Belgija), str.11
7. Slika 7. Hidrogeneratori s početka 20. stoljeća, u dvorani hidroelektrane, izrađeni u Budimpešti, str.11
8. Slika 8. Nadstrujna zaštita s neovisnom vremenskom karakteristikom u zvjezdalu generatora, str.13
9. Slika 9. Zaštita od kratkog spoja, str.15
10. Slika 10. Načini vezivanja diferencijalne zaštite, str.16
11. Slika 11. Zaštita od prenapona, str.16
12. Slika 12. Spoj prenaponskog releja zaštite statora od zemljospoja, str.19
13. Slika 13. Tehnike zaštite od zemljospoja u uzbudnom namotaju, str.20
14. Slika 14. Relej naponske ravnoteže, str.24
15. Slika 15. Komponente za detektiranje kvara osigurača, str.25
16. Slika 16. Osnovna šema rezervne zaštite, str.26
17. Slika 17. Dvostruko napajana mreža, str.26
18. Slika 18. Frekvencijski nadzirana nadstrujna zaštita od slučajne pobude, str.28
19. Slika 19. Zaštita od povratne sprege, str.29.
20. Slika 20. Logika kvara prekidača sa zaštitom od zapaljenja, str.30
21. Slika 21. Provedba funkcije slijednog islučenja, str.31
22. Slika 22. P – Q dijagram, str.34
23. Slika 23. Blok dijagram diferencijalne zaštite, str.36
24. Slika 24. Diferencijalna zaštita, str.37
25. Slika 25. Merz – nagradni cirkulacijski sistem, str.38
26. Slika 26. Modificirana shema sistema diferencijalne zaštite, str.40
27. Slika 27. Jednostruki, dvostruki, i promjenjivi nagib karakteristike postotne diferencijalne zaštite, str.40
28. Slika 28. Vađenje rotora hidrogeneratora kod popravka (remonta), str.42
29. Slika 29. Shema hidroelektrane, str.43
30. Slika 30. Vodna turbina, str.44