

Algoritam za detekciju gubitka pobude sinhronog generatora sa admitantnom karakteristikom u vremenskom domenu

MLADEN M. OSTOJIĆ, „Elektromreža Srbije“ AD, Beograd
MILENKO B. ĐURIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 621.313.322
DOI: 10.5937/tehnika18068190

Zaštita od gubitka pobude ima zadatak da detektuje gubitak pobude kod sinhronog generatora i isključi generator sa mreže pre nego što on izgubi stabilnost i ispadne iz sinhronizma. U radu je prikazan novi algoritam za detekciju gubitka pobude sinhronog generatora sa admitantnom karakteristikom reagovanja koja je realizovana u vremenskom domenu. Algoritam koristi ulazne signale koji su formirani tako da karakteristika reagovanja bude usklađena sa pogonskim dijagramom sinhronog generatora. Testiranje algoritma izvršeno je na modelu mreže formiranom u programskom paketu MATLAB/Simulink. Dobijeni rezultati pokazali su da algoritam pouzdano detektuje gubitak pobude pri različitim radnim režimima sinhronog generatora i da algoritam ne reagovanje pri pojavi ljuljanja snage.

Ključne reči: *sinhroni generator, gubitak pobude, fazni komparator*

1. UVOD

Gubitak pobude kod sinhronog generatora nije česta pojava, ali ako do njega dođe može izazvati ozbiljne probleme na samom generatoru. Posledica gubitka pobude može biti narušavanje stabilnosti sinhronog generatora, a poremećaj se može proširiti i na ostatak elektroenergetskog sistema (EES). Do gubitka pobude može doći zbog različitih abnormalnih stanja kao što su kvarovi ili poremećaji u pobudnim kolima i sistemu automatske regulacije napona ili zbog pogrešne manipulacije.

Ako je generator vezan na EES i opterećen aktivnom snagom, pri gubitku pobude skoro uvek gubi sinhronizam, povećava mu se brzina i prelazi u asinhroni režim rada. U asinhronom režimu rada, generator daje aktivnu snagu u mrežu, a iz mreže uzima reaktivnu snagu potrebnu za magnećenje. Ostali generatori koji su vezani na EES moraju nadoknaditi reaktivnu snagu koju je do momenta gubitka sinhronizma proizvodio generator u kvaru i reaktivnu snagu za njegovo magnećenje. Ukoliko je generator priključen na slab EES može doći do preopterećenja preostalih generatora i značajnog smanjenja napona i na taj način do ugrožavanja

stabilnosti EES. Zbog magnetske nesimetrije rotora, u asinhronom režimu rada generatora, dolazi do znatnih varijacija aktivne i reaktivne snage što je naročito izraženo kod hidrogenatora. Generator kod koga je došlo do gubitka pobude izložen je opasnosti od preopterećenja statora jer je struja statora vektorska suma radne struje i struje magnećenja. U asinhronom režimu rada generatora u namotajima i magnetnom kolu rotora indukuju se struje koje dodatno zagrevaju rotor i kod dužeg rada mogu prouzrokovati teža oštećenja rotora.

Najčešće primenjivana metoda za detekciju gubitka pobude bazirana je na izračunavanju impedanse, na osnovu merenja struja i napona na sabirnicama generatora. Karakteristika reagovanja realizovana je u R-X ravni i zaštita detektuje pojavu gubitka pobude kada radna tačka uđe u oblast reagovanja. Impedantna metoda uglavnom koristi kružnu karakteristiku reagovanja sa jednom ili dve oblasti reagovanja [1, 2, 3]. Iako impedantna metoda ima najčešću primenu u praksi, pri pojavi kratkih spojeva u mreži dolazi do pojave stabilnog ljuljanja snage, a kao posledica navedene pojave može doći do nepotrebnog reagovanja zaštite. Zbog toga se uvodi dodatno vremensko kašnjenje.

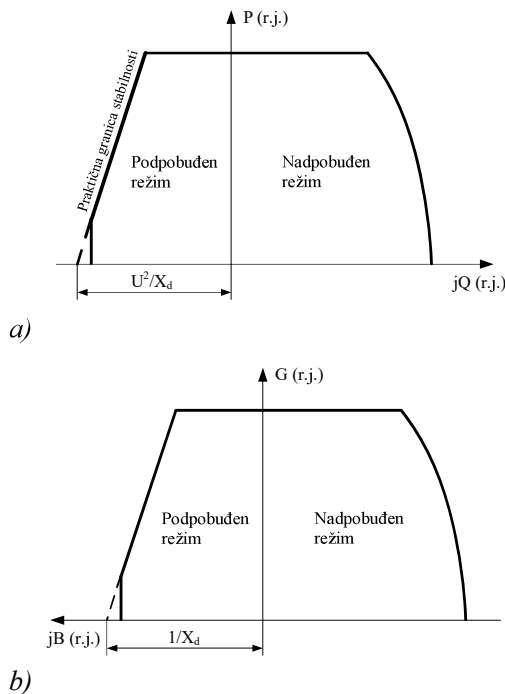
Na osnovu prethodnih razmatranja mogu se izvesti osnovni zahtevi koje zaštita od gubitka pobude mora da ispuni. Zaštita od gubitka pobude mora da detektuje gubitak pobude sinhronog generatora pri svim radnim režimima generatora, pre nego što on izgubi stabilnost i ispadne iz sinhronizma. Neke metode imaju problem

Adresa autora: Mladen Ostojić, AD „Elektromreže Srbije“, Beograd, Kneza Miloša 11
e-mail: ostojic1985@gmail.com
Rad primljen: 10.08.2018.
Rad prihvaćen: 07.11.2018.

da detektuju gubitak pobude pri malim opterećenjima generatora ili problem da detektuju gubitak pobude pri radu generatora u kompenzatorskom režimu. Takođe, jedan od najvećih izazova sa kojim se susreće zaštita od gubitka pobude jeste uticaj poremećaja u mreži. Ovo je naročito karakteristično za pojavu stabilnog ljuljanja snage i gubitak koraka jer tada može doći do lažne prorade zaštite i nepotrebnog isključenja generatora sa mreže. U takvim režimima zaštita od gubitka pobude ne sme da reaguje.

2. KARAKTERISTIKA REAGOVANJA U ADMITANTNOJ RAVNI

Za formiranje karakteristike reagovanja u admitantnoj ravni neophodno je izvršiti konverziju pogonskog dijagrama sinhronog generatora iz P - Q ravni u G - B ravan. Na slici 1 prikazan je pogonski dijagram sinhronog generatora u P - Q i G - B ravni [4].



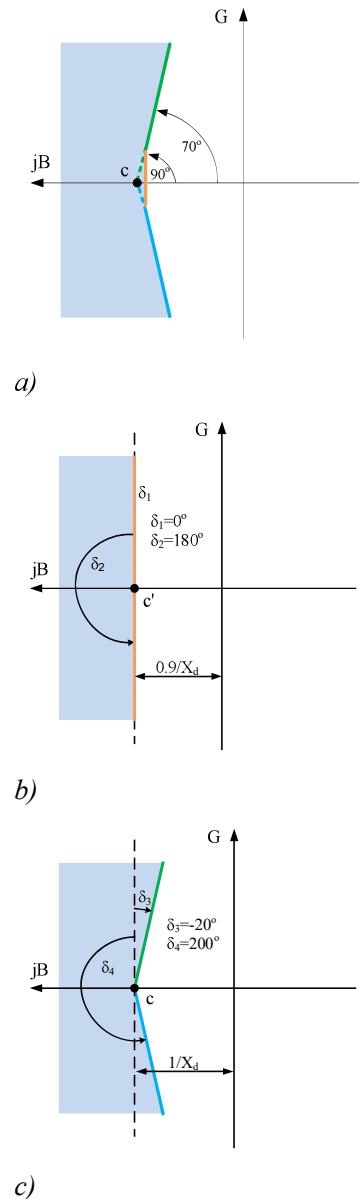
Slika 1 - Pogonski dijagram sinhronog generatora prikazan u a) P - Q ravni i b) G - B ravni

Veza između admitanse i aktivne i reaktivne snage može se napisati na sledeći način:

$$Y = G + jB = \frac{I}{U} \cdot \frac{U^*}{U^*} = \frac{S^*}{U^2} = \frac{P}{U^2} - j \frac{Q}{U^2} \quad (1)$$

Na osnovu prethodne jednačine može se videti da će u podpobuđenom režimu susceptansa imati pozitivnu vrednost. Karakteristika reagovanja u admitantnoj ravni prikazana je na slici 2(a). Formiranje karakteristike reagovanja izvršeno je tako da ona bude usklađena sa pogonskim dijagramom sinhronog generatora. Glavnu karakteristiku reagovanja prikazanu na

slici 2(a) čine dve karakteristike reagovanja. Prvu karakteristiku prikazanu na slici 2(b) ograničava prava koja je paralelna sa realnom osom i pomerena od koordinatnog početka po imaginarnoj osi za $0.9/X_d$. Drugu karakteristiku ograničava prava koja je pomerena po imaginarnoj osi od koordinatnog početka za $1/X_d$ i sa imaginarnom osom zatvara ugao od 70° . Da bi bio detektovan gubitak pobude kada sinhrona mašina radi u motornom režimu karakteristika reagovanja je preslikana i u treći kvadrant.



Slika 2 – a) Glavna karakteristika reagovanja u admitantnoj ravni, b) karakteristika reagovanja paralelna sa realnom osom i c) karakteristika reagovanja nagnuta na imaginarnu osu pod uglom od 70°

Pri realizaciji karakteristike reagovanja polazi se od opštih jednačina fazne komparacije [5]:

$$\underline{V}_I = \underline{k}_1 \underline{U}_r + \underline{k}_2 \underline{I}_r, \quad (2)$$

$$\underline{V}_{II} = \underline{k}_3 \underline{U}_r + \underline{k}_4 \underline{I}_r, \quad (3)$$

gde su \underline{U}_r i \underline{I}_r ulazni signali napona i struje mereni na mestu ugradnje releja, a koeficijenti \underline{k}_1 do \underline{k}_4 su konstante koje definišu karakteristiku reagovanja i nezavisne su od ulaznih signala napona i struje.

Ako se sa ϕ_1 i ϕ_2 označe granični uglovi faznog komparatora, oblast reagovanja može se predstaviti skupom tačaka kompleksne ravni u kojima važi:

$$\phi_1 \leq \arg \left\{ \frac{\underline{V}_I}{\underline{V}_{II}} \right\} \leq \phi_2. \quad (4)$$

Analiza se dalje olakšava uvođenjem pomoćnih veličina:

$$a = -\frac{\underline{k}_1}{\underline{k}_2}, \quad (5)$$

$$b = -\frac{\underline{k}_3}{\underline{k}_4}, \quad (6)$$

$$\alpha = \arg \left\{ \frac{\underline{k}_2}{\underline{k}_4} \right\}. \quad (7)$$

Ako je b neka tačka u beskonačnosti dobija se $\underline{k}_4=0$, pa se nejednačina (4) može napisati na sledeći način:

$$\phi_1 \leq \arg \left\{ \frac{\underline{k}_1 \underline{U}_r + \underline{k}_2 \underline{I}_r}{\underline{k}_3 \underline{U}_r} \right\} \leq \phi_2. \quad (8)$$

Nakon sređivanja, prethodna nejednačina dobija konačan oblik:

$$\phi_1 - \beta \leq \arg \{Y - c'\} \leq \phi_2 - \beta, \quad (9)$$

gde je:

$$c' = -\frac{\underline{k}_1}{\underline{k}_2}, \quad (10)$$

$$\beta = \arg \left\{ \frac{\underline{k}_2}{\underline{k}_3} \right\}, \quad (11)$$

$$Y = \frac{\underline{I}_r}{\underline{U}_r}. \quad (12)$$

Sa slike 2(b) i 2(c) vidljive su vrednosti za tačke c i c' :

$$c' = j \frac{0.9}{X_d}, \quad (13)$$

$$c = j \frac{1}{X_d} \quad (14)$$

Ako se nejednačina (9) izjednači sa graničnim vrednostima dobija se uslov reagovanja za prvu karakteristiku prikazanu na slici 2(b):

$$\arg \{Y - c'\} = \phi_1 - \beta = \delta_1 = 0^\circ, \quad (15)$$

$$\arg \{Y - c'\} = \phi_2 - \beta = \delta_2 = 180^\circ. \quad (16)$$

Za drugu karakteristiku reagovanja prikazanu na slici 2(c) moraju da budu ispunjeni sledeći uslovi:

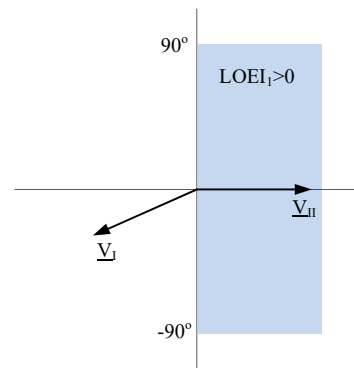
$$\arg \{Y - c\} = \phi_3 - \beta = \delta_3 = -20^\circ, \quad (17)$$

$$\arg \{Y - c\} = \phi_4 - \beta = \delta_4 = 200^\circ. \quad (18)$$

Ako se za koeficijente uz referentni signal usvoje vrednosti $\underline{k}_1 = 1 \angle 0^\circ$ i $\underline{k}_3 = 1 \angle 0^\circ$, na osnovu (13) za koeficijent \underline{k}_2 u tački c' dobija se vrednost $\underline{k}_2 = -X_d / 0.9 \angle -90^\circ$. Na analogan način može se odrediti vrednost koeficijenta \underline{k}_4 u tački c .

Dalje, na osnovu jednačine (11) za ugao β dobija se $\beta = -90^\circ$. Zamenom vrednosti za β u jednačine (15) do (18) dobijaju se granični uglovi za realizaciju prve karakteristike reagovanja $\phi_1 = -90^\circ$ i $\phi_2 = 90^\circ$, dok za drugu karakteristiku reagovanja imamo granične uglove $\phi_3 = -110^\circ$ i $\phi_4 = 110^\circ$.

Za realizaciju prve karakteristike reagovanja prikazanu na slici 2(b) koristi se jedan fazni komparator sa graničnim uglovima $\phi_1 = -90^\circ$ i $\phi_2 = 90^\circ$. Ovo je ilustrovano na slici 3.



Slika 3 - Fazni komparator sa graničnim uglovima $\phi_1 = -90^\circ$ u $\phi_2 = 90^\circ$ i oblast reagovanja za $LOEI_1$

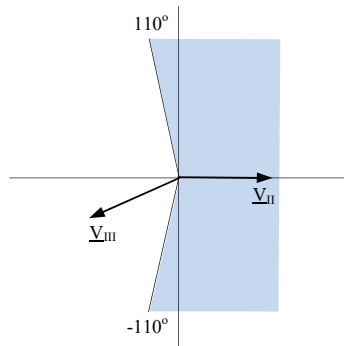
Konačno za ulazne signale faznog komparatora za realizaciju karakteristike reagovanja prikazane na slici 3 dobija se:

$$\underline{V}_I = -\underline{U}_r + \frac{X_d}{0.9} \cdot \underline{I}_r \angle -90^\circ, \quad (19)$$

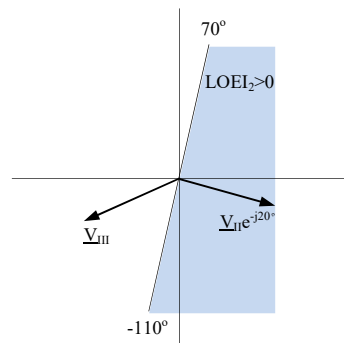
$$\underline{V}_{II} = \underline{U}_r \quad (20)$$

Da bi u normalnom radnom režimu signal \underline{V}_I bio izvan osenčene oblasti prikazane na slici 3 izvršeno je njegovo množenje sa -1, odnosno zarotiran je za 180. Isto je učinjeno i sa signalom \underline{V}_{III} , koji je prikazan u nastavku.

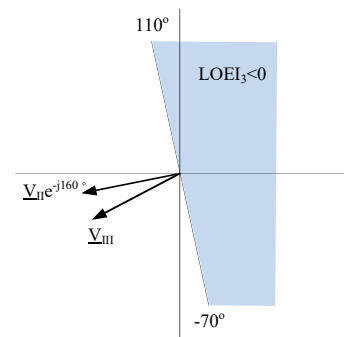
Druga karakteristika reagovanja prikazana je na slici 2(c) i realizovana je sa dva fazna komparatora koji zajedno pokrivaju oblast sa graničnim uglovima $\phi_3 = -110^\circ$ i $\phi_4 = 110^\circ$.



a)



b)



c)

Slika 4 - a) Fazni komparator sa graničnim uglovima $\phi_3 = -110^\circ$ i $\phi_4 = 110^\circ$, b) oblast reagovanja za $LOEI_2$ i c) oblast reagovanja za $LOEI_3$

Ovo je ilustrovano na slici 4(a). Da bi fazni komparator imao granične uglove $\pm 90^\circ$ potrebno je da referentni signal \underline{V}_{II} bude normalan u odnosu na graničnu pravu karakteristike reagovanja. Da bi se ovo postiglo

neophodno je izvršiti pomeranje vektora \underline{V}_{II} za -20° kod prvog faznog komparatora prikazanog na slici 4(b). Kod drugog faznog komparatora potrebno je vektor \underline{V}_{II} pomeriti za -160° , kao što je ilustrovano na slici 4(c).

Na osnovu slike 4(b) može se primetiti da pomeranjem vektora \underline{V}_{II} za 20° u drugom slučaju on takođe postaje normalan u odnosu na graničnu pravu. Međutim, ovo nije moguće praktično realizovati jer bi to bio neki vektor u budućnosti, za razliku od prethodnih koji kasne u odnosu na trenutni signal. Pomeranjem ovih vektora unosi se dodatno kašnjenje u rad algoritma i ono je izraženije što je pomeraj veći. Međutim, ako se uzme u obzir činjenica da se zaštita od gubitka pobude ubraja u spore zaštite čije vreme detekcije je par sekundi, ovo kašnjenje je zanemarljivo. Kod realizacije brzih zaštita svakako treba optimizovati karakteristiku kako bi se kašnjenje svelo na minimalnu vrednost.

Ulazni signali faznih komparatora za realizaciju karakteristike prikazane na slici 4(a) mogu se napisati na sledeći način:

$$\underline{V}_{III} = -\underline{U}_r + X_d \cdot \underline{I}_r \angle -90^\circ \quad (21)$$

$$\underline{V}_{IV} = \underline{U}_r \angle -20^\circ \quad (22)$$

$$\underline{V}_{V} = \underline{U}_r \angle -160^\circ \quad (23)$$

3. REALIZACIJA KARAKTERISTIKE REAGOVANJA U VREMENSKOM DOMENU

Nakon formiranja jednačina (19)-(23) koje opisuju ulazne signale, neophodno je izvršiti njihovu konverziju u diskretni oblik. Iz navedenih jednačina vidljivo je da su određeni sabirci u odnosu na referentni signal fazno pomereni, a pomeraj je izražen u obliku ugla. Fazne pomeraje potrebno je napisati u obliku odbiraka na taj način što će se u originalni signal uneti kašnjenje sa odgovarajućim brojem odbiraka.

Za frekvenciju odabiranja usvojena je vrednost $f_{od} = 3.6 \text{ kHz}$, pa jednoj periodi signala odgovaraju 72 odbirka ($m = f_{od}/f$, $f_{od} = 3.6 \text{ kHz}$, $f = 50 \text{ Hz}$). Uglu od 90° odgovara kašnjenje od 18 odbiraka jer je $90^\circ \cdot 72/360 = 18$. Analogno se izračunava broj odbiraka i za ostale uglove, pa uglu od 20° odgovaraju 4 odbirka, a uglu od 160° odgovaraju 32 odbirka. Ulazni signali algoritma napisani u diskretnom obliku opisani su sledećim jednačinama:

$$v_I(n) = -u_r(n) + \frac{X_d}{0.9} \cdot i_r(n-18) \quad (24)$$

$$v_{II}(n) = u_r(n) \quad (25)$$

$$v_{III}(n) = -u_r(n) + X_d \cdot i_r(n-18) \quad (26)$$

$$v_{II}(n) = u_r(n-4), \quad (27)$$

$$v_V(n) = u_r(n-32). \quad (28)$$

Kao pokazatelj gubitka pobude uveden je indeks gubitka pobude (Loss Of Excitation Index - *LOEI*) koji predstavlja integral trenutne snage proizvoda ulaznih signala na intervalu jednakom polovini periode ulaznih signala. Dakle, fazni komparator ne računa ugao između ulaznih signala, nego na osnovu znaka integrala trenutne snage procenjuje radni režim sinhronog generatora. Kao što je prethodno prikazano ulazni signali formirani su tako da sva tri fazna komparatora imaju granične uglove $\pm 90^\circ$. Iz navedenog može se zaključiti da granica reagovanja faznih komparatora iznosi 0, jer je $\cos(\pm 90) = 0$. Primena digitalne fazne komparacije za realizaciju algoritama za zaštitu sinhronih generatora prikazana je u [6, 7, 8].

Za realizaciju karakteristike reagovanja prikazanu na slici 2(a) koriste se tri fazna komparatora, pa su u skladu sa tim definisana tri indeksa gubitka pobude:

$$LOEI_1 = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} v_I(n) \cdot v_{II}(n) \cdot \frac{1}{V_I \cdot V_{II}}, \quad (29)$$

$$LOEI_2 = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} v_{III}(n) \cdot v_{IV}(n) \cdot \frac{1}{V_{III} \cdot V_{IV}}, \quad (30)$$

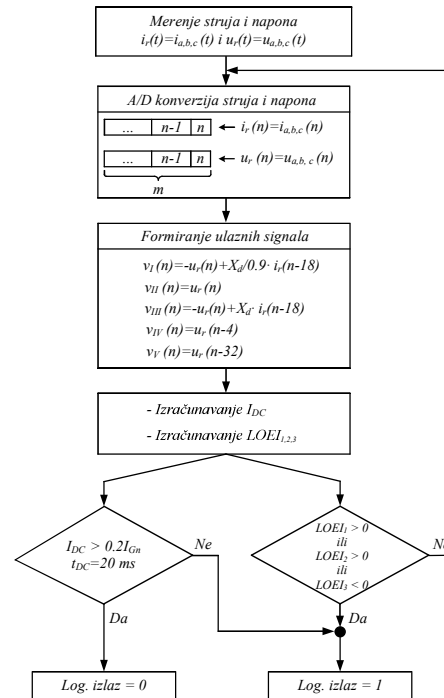
$$LOEI_3 = \frac{2}{m} \sum_{n=1}^{m/2} v_{III}(n) \cdot v_V(n) \cdot \frac{1}{V_{III} \cdot V_V}. \quad (31)$$

Da bi algoritam generisao logički izlaz za isključenje generatora neophodno je da bar jedan od pokazatelja *LOEI* zadovoljava uslov reagovanja: $LOEI_1 > 0$, $LOEI_2 > 0$ ili $LOEI_3 < 0$. Kada generator radi pri većim opterećenjima prvo će biti zadovoljen uslov reagovanja za $LOEI_2$ jer je njegova granična prava nagnuta prema realnoj osi, dok će pri manjim opterećenjima reagovati $LOEI_1$. U motornom režimu rada $LOEI_3$ će prvi ispuniti uslov reagovanja, dok je za manja opterećenja situacija analogna kao pri radu u generatorskom režimu.

Pri pojavi eksternih kratkih spojeva u blizini sabirnica generatora dolazi do pojave ljuljanja snage koje može izazvati pogrešno reagovanje algoritma. Da bi se eliminisalo pogrešno reagovanje algoritma pri navedenoj pojavi koristi se DC komponenta u faznoj struji koja je podešena na vrednost $I_{DC} > 0.2I_{Gn}$. Kada dođe do gubitka pobude DC komponenta u faznoj struji je jednaka nuli i algoritam detektuje gubitak pobude na osnovu vrednosti *LOEI*. Pri pojavi kratkih

spojeva u blizini generatora u faznoj struji se pojavljuje DC komponenta i kada pređe podešenu vrednost u trajanju od 20 ms, DC element šalje impuls za blokiranje logičkog izlaza algoritma.

Na osnovu prethodno izvedenih zapažanja na slici 5 prikazan je blok dijagram predloženog algoritma za detekciju gubitka pobude.



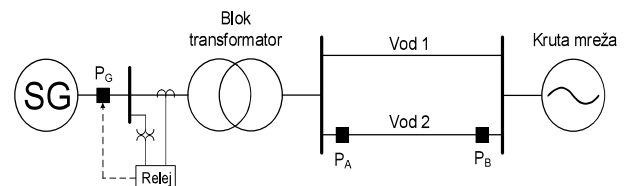
Slika 5 - Algoritam za detekciju gubitka pobude

4. TESTIRANJE ALGORITMA

Za potrebe testiranja predloženog algoritma za detekciju gubitka pobude u programskom paketu MATLAB/Simulink modelovana je test mreža sa sinhronim generatorom na kojem je simulirana pojava gubitka pobude. Jednopolna šema test mreže sa sinhronim generatorom prikazana je na slici 6.

Pri testiranju algoritma vođeno je računa da se obuhvati što realnija situacija koja se može pojaviti u mreži. Predloženi algoritam testiran je za dva karakteristična događaja:

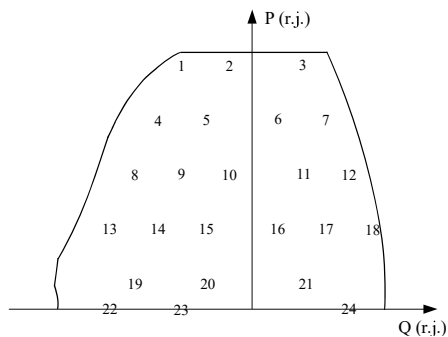
- Gubitak pobude i
- Eksterni kratki spojevi u mreži



Slika 6 - Jednopolna šema test mreže sa sinhronim generatorom

Na slici 7 prikazan je pogonski dijagram sinhronog generatora sa ucrtanim brojevima koji označavaju

različite slučajeve opterećenja generatora pri kojim je izvršeno testiranje algoritma.



Slika 7 - Pogonski dijagram sinhronog generatora

4.1 Gubitak pobude

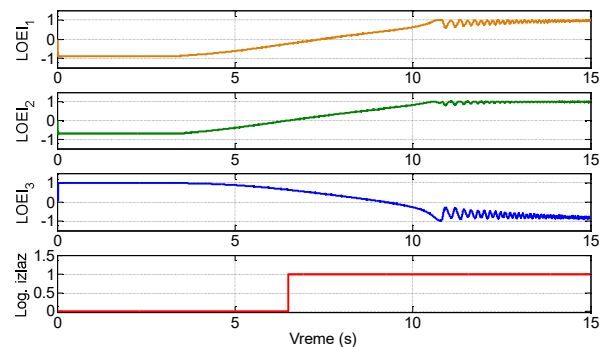
U ovom delu izvršeno je testiranje algoritma za gubitak pobude pri različitim radnim režimima i opterećenjima sinhronog generatora (nadpobuđen, podpobuđen i kompenzatorski režim rada).

Testiranje algoritma izvršeno je za 24 različita slučaja prikazana na slici 7 i u tabeli 1. Gubitak pobude simuliran je u trenutku 3 s.

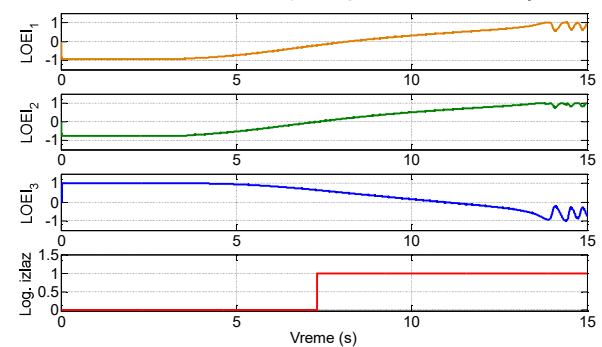
Tabela 1. Rezultati testiranja algoritma

Slučaj	P+jQ, (r.j.)	Vreme reagovanja, (s)	Gubitak sinhronizma, (s)
1	0.9-j0.3	1.303	4.229
2	0.9-j0.1	1.885	4.842
3	0.9+j0.2	2.584	5.536
4	0.7-j0.4	1.424	5.514
5	0.7-j0.2	2.225	6.335
6	0.7+0.1	3.075	7.191
7	0.7+j0.3	3.495	7.612
8	0.5-j0.5	1.565	7.962
9	0.5-j0.3	2.724	9.145
10	0.5-j0.1	3.496	9.925
11	0.5+j0.2	4.304	10.728
12	0.5+j0.4	4.696	11.121
13	0.3-j0.6	1.734	-
14	0.3-j0.4	3.596	-
15	0.3-j0.2	4.634	-
16	0.3+j0.1	5.605	-
17	0.3+j0.3	6.064	-
18	0.3+j0.5	6.434	-
19	0.1-j0.5	4.314	-
20	0.1-j0.2	6.225	-
21	0.1+j0.2	7.480	-
22	0-j0.6	3.175	-
23	0-j0.3	5.955	-
24	0+j0.4	8.120	-

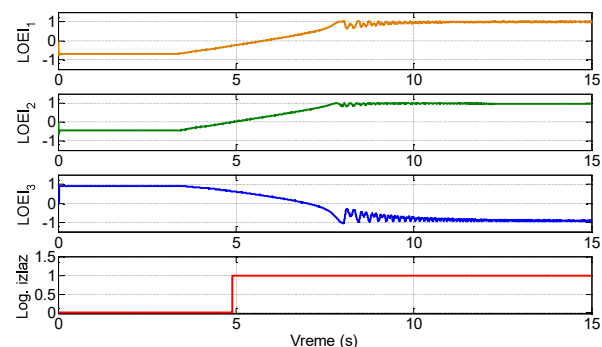
Na slikama 8 i 9 prikazani su rezultati testiranja algoritma kada generator radi u nadpobuđenom režimu, slučajevi 7 i 11 iz tabele 1. Na osnovu dobijenih rezultata može se videti da $LOEI_2$ najbrže ispunjava uslov $LOEI_2 > 0$ i algoritam detektuje gubitak pobude nakon 3.495 s za slučaj 7 i 4.304 s za slučaj 11.



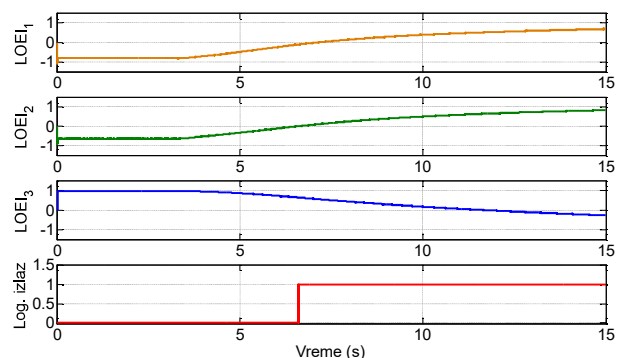
Slika 8 - Rezultati testiranja algoritma za slučaj 7



Slika 9 - Rezultati testiranja algoritma za slučaj 11



Slika 10 - Rezultati testiranja algoritma za slučaj 2



Slika 11 - Rezultati testiranja algoritma za slučaj 14

Na slikama 10 i 11 prikazani su rezultati testiranja algoritma za slučajeve 2 i 14 pri radu generatora u podpobuđenom režimu. U oba slučaja algoritam uspešno detektuje gubitak pobude nakon 1.885 s i 3.596 s.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da algoritam za sve testirane slučajeve uspešno detektuje gubitak pobude, pre nego što generator izgubi stabilnost i ispadne iz sinhronizma. Takođe, može se primetiti da na brzinu detekcije gubitka pobude utiče radni režim i opterećenje generatora koje je prethodilo gubitku pobude.

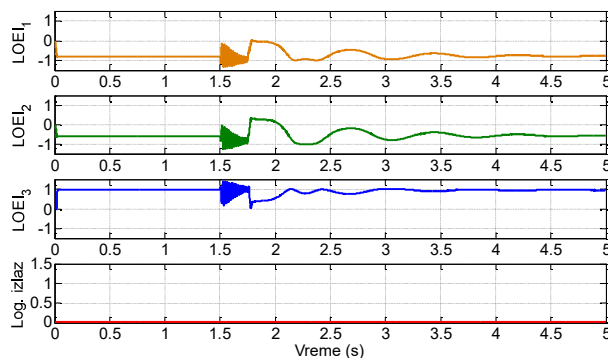
4.2 Eksterni kratki spojevi u mreži

U ovom delu analiziran je rad algoritma pri pojavi eksternih kratkih spojeva u mreži. Stabilnost sinhronog generatora pri pojavi kratkih spojeva u mreži zavisi od lokacije kratkog spoja, tipa kratkog spoja, dužine trajanja kratkog spoja i radnog režima generatora koji je prethodio kratkom spoju. Ukoliko generator izgubi stabilnost i ispadne iz sinhronizma usled kratkog spoja poremećaj će biti detektovan zaštitom od gubitka koraka.

Međutim, pri kratkim spojevima čije vreme isključenja je manje od kritičnog, generator će zadržati stabilnost, ali će doći do pojave stabilnog ljuljanja snage. Kao posledica ljuljanja snage zaštita od gubitka pobude može nepotrebno reagovati i isključiti generator sa mreže.

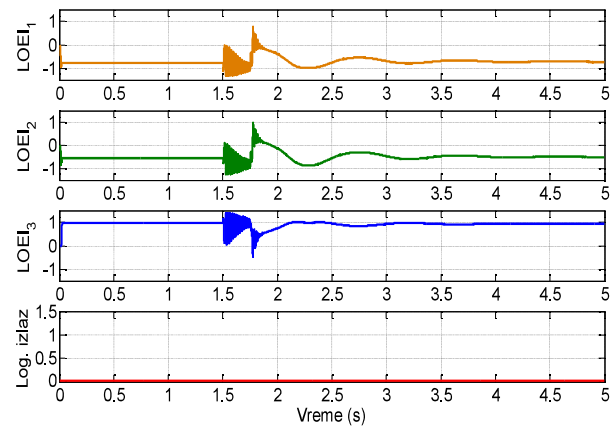
Da bi se proverilo ponašanje algoritma pri navedenom poremećaju izvršeno je njegovo testiranje na modelu sinhronog generatora za sve slučajeve prikazane u tabeli 1. Pojava ljuljanja snage generisana je simulacijom trolejnog kratkog spoja na 5 % dužine voda 2. Kvar je eliminisan nakon 250 ms isključenjem prekidača na početku i kraju voda 2.

Na slikama 12 i 13 prikazani su rezultati testiranja algoritma pri pojavi ljuljanja snage, za slučajeve 3 i 9. Sa navedenih slika se vidi da u oba slučaja LOEI kratkotrajno ulazi u oblast reagovanja, ali algoritam ne generiše logički izlaz za isključenje generatora jer je bio blokiran od strane DC bloka.



Slika 12 - Rezultati testiranja algoritma pri pojavi ljuljanja snage za slučaj 3

Algoritam je takođe testiran i za druge tipove kratkih spojeva, koji su simulirani pri različitim opterećenjima generatora, na različitim lokacijama i sa različitim vremenima isključenja. Za sve testirane slučajeve algoritam je pokazao dobre rezultate.



Slika 13 - Rezultati testiranja algoritma pri pojavi ljuljanja snage za slučaj 9

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan novi algoritam za detekciju gubitka pobude kod sinhronog generatora. Algoritam koristi admitantnu karakteristiku reagovanja koja je realizovana u vremenskom domenu primenom digitalne fazne komparacije. Kao ulazne veličine algoritam koristi fazne napone i struje merene na sabirnicama generatora u sve tri faze. Testiranje algoritma izvršeno je računarskim simulacijama na modelu mreže sa sinhronim generatorom. Testiranje je izvršeno za gubitak pobude pri različitim radnim režimima sinhronog generatora. Takođe, proveren je rad algoritma pri kratkim spojevima u mreži koji izazivaju pojavu ljuljanja snage. Dobijeni rezultati pokazali su da algoritam uspešno detektuje pojavu gubitka pobude pre nego što generator izgubi stabilnost i ispadne iz sinhronizma. Algoritam je takođe pouzdano radio pri pojavi ljuljanja snage.

Prikazani algoritam koristi osnovne matematičke operacije što ga čini jednostavnim za praktičnu realizaciju. Takođe, odlikuje ga i lako podešavanje oblasti reagovanja. S obzirom da algoritam kao ulazne veličine koristi trenutne vrednosti napona i struja može se lako implementirati u multifunkcionalne uređaje relejne zaštite. Na bazi razvijenog algoritma može se realizovati i aplikacija za simulaciju zaštite od gubitka pobude koja bi se koristila u edukativne svrhe.

LITERATURA

- [1] Mason CR. A New Loss of Excitation Relay for Synchronous Generators, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 68, No. 2, pp. 1240-1245, 1949.

- [2] Tremaine RL, Blackburn JL. Loss-of-field protection for synchronous machines, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 73, No. 1, pp. 765-777, 1954.
- [3] Berdy J. Loss of excitation protection for modern synchronous generators, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1457-1463, 1975.
- [4] Herrman HJ, Smit A. Increased Sensitivity of Loss of Field Protection Based on Admittance Measurement, *Western Protective Relay Conference*, Washington, DC, USA, pp. 1-15, 2009.
- [5] Đurić M. *Klasični distantni releji i distantne zaštite*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [6] Ostojić MM, Djurić MB. Out-of-step protection of synchronous generators based on a digital phase comparison in the time domain, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, No. 4, pp. 873-879, 2018.
- [7] Ostojić M, Djurić M. The algorithm for the detection of loss of excitation of synchronous generators based on a digital-phase comparator, *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)*, Vol. 100, No. 2, pp. 1287–1296, 2018.
- [8] Ostojić MM, Djurić MB. The algorithm with synchronized voltage inputs for islanding detection of synchronous generators, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 103, pp. 431–439, 2018.

SUMMARY

THE ALGORITHM FOR THE DETECTION OF LOSS OF EXCITATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH AN ADMITTANCE CHARACTERISTIC IN A TIME DOMAIN

Protection of the loss of excitation has a task to detect the loss of excitation of the synchronous generator and disconnect the generator from the network before it loses stability and out of synchronism. The paper presents a new algorithm for detecting the loss of excitation of the synchronous generator with the admittance response characteristic realized in the time domain. The algorithm uses input signals that are formed so that the response characteristic is aligned with the synchronous generator capability diagram. The algorithm testing was performed on the network model formed in MATLAB / Simulink package. The obtained results showed the good properties of the proposed algorithm.

Key words: *synchronous generator, loss of excitation, phase comparator*