

Kontrola napona trofaznog samopobuđenog asinhronog generatora

Jordan Radosavljević, Miroljub Jevtić i Dardan Klimenta.

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

Kosovska Mitrovica, Srbija

jordan.radosavljevic@gmail.com

Sadržaj — Napon i frekvencija samopobuđenog asinhronog generatora (SPAG) su nelinearno zavisni od brzine i reaktanse magnećenja generatora, kapacitivnosti pobudnog kondenzatora i impedanse opterećenja. Kontrola napona SPAG se može ostvariti promenom pobudne kapacitivnosti ili promenom brzine generatora u skladu sa promenom opterećenja. Za to je neophodna efikasna metodologija za izračunavanje promenljivih stacionarnog stanja, kako bi se utvrdila zakonitost promene kontrolnih promenljivih sa promenom opterećenja. U ovom radu se predlaže jedan postupak koji se bazira na primeni genetičkog algoritma (GA). Određivanje promenljivih stacionarnog stanja i utvrđivanje karakteristika kontrole napona se vrši minimizacijom multi-objektivne funkcije, koju čini uslov samopobuđivanja i uslov kontrole napona, primenom MATLAB realizacije genetičkog algoritma. Postupak je opšti, jer se može upotrebiti za različite vrste konekcija, što je pokazano na primeru kontrole napona 2,2 kW SPAG pri trofaznoj simetričnoj, prostoj jednofaznoj i C-2C konekciji.

Ključne reči – asinhroni generator; samopobuđivanje; kontrola napona; nesimetrično opterećenje; genetički algoritam.

I. UVOD

Porast distribuirane proizvodnje električne energije praćena je primenom asinhronih generatora (AG) [1]. Asinhroni generatori mogu raditi paralelno sa distributivnom mrežom ili samostalno. Samostalni rad AG moguć je zahvaljujući efektu samopobuđivanja [2]-[4]. Trofazni SPAG se najčešće koristi u malim obnovljivim izvorima energije, kao što su hidro i vetro elektrane koje samostalno napajaju potrošače. Takvi autonomni izvori predstavljaju alternativu izgradnji komercijalne distributivne mreže do malih potrošača u udaljenim područjima.

Napon i frekvencija SPAG su nelinearne funkcije brzine, reaktanse magnećenja, kapacitivnosti pobudnog kondenzatora i opterećenja. Za normalni stacionarni rad potrošača potrebne su stabilne vrednosti napona i frekvencije. Bilo koja strategija regulacije napona i frekvencije SPAG, između ostalog podrazumeva primenu efikasne metodologije za izračunavanje frekvencije i reaktanse magnećenja (napona) AG za date vrednosti brzine rotora, kapacitivnosti pobudnog kondenzatora i snage potrošača.

U literaturi postoji veliki broj radova koj se bave analizom rada i kontrolom napona i frekvencije trofaznih SPAG u uslovima simetrične pobudne i opterećenja [4]-[14]. Sistem AG

– kondenzator – potrošač se u tim radovima predstavlja pomoću ekvivalentne impedanse, odnosno ekvivalentne admitanse. Iz dobijenog ekvivalentnog kola, izvodi se uslov samopobuđivanja, koji se obično izražava u formi relativno složene nelinearne algebarske jednačine. Ova jednačina se rešava primenom metoda za rešavanje nelinearnih algebarskih jednačina [4]-[7] ili optimizacionih procedura [8]-[14]. Na taj način se određuju nepoznate promenljive stanja i parametri kontrole napona SPAG.

Nesimetrični režim rada trofaznog SPAG može nastupiti iz više razloga. Najčešći razlog je dominantno prisustvo jednofaznih potrošača u trofaznom sistemu. Pored toga, kod udaljenih objekata koji se napajaju iz autonomnih izvora sa SPAG, najčešće se primenjuje jednofazni sistem instalacija, zbog manje cene, lakšeg održavanja i jednostavnije zaštite. Nesimetrija se može javiti i usled odstupanja stvarnih od naznačenih karakteristika potrošača i pobudnih kondenzatora, kvara na pobudnim kondenzatorima i potrošačima u pojedinim fazama ili njihovog isključenja.

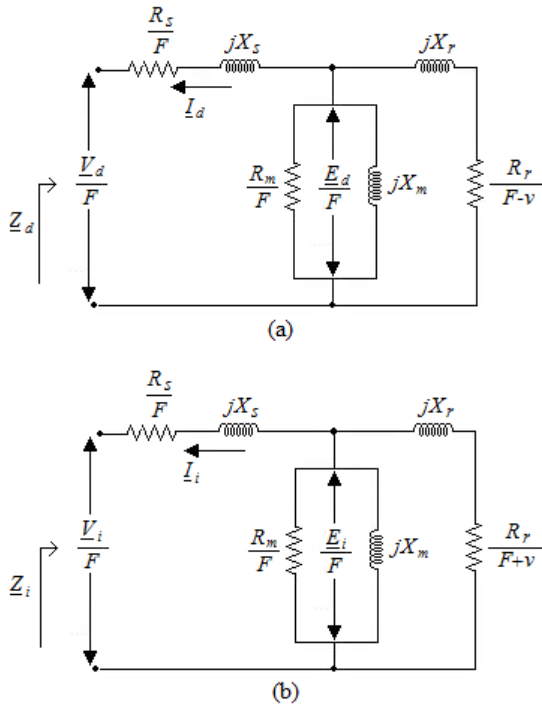
Poslednjih desetak godina se pojavilo nekoliko radova koji se bave analizom stacionarnog stanja i kontrolom napona trofaznih SPAG u uslovima nesimetričnog opterećenja [15]-[19]. Osnova ovih metodologija je svođenje kompleksnog nesimetričnog sistema AG-kondenzatori-potrošači na prostije ekvivalentno kolo iz koga se izvodi uslov samopobuđivanja, na osnovu koga se zatim izračunavaju nepoznate promenljive stanja. U referenci [15] se primenjuje optimizaciona pretraživačka metoda Hooke i Jeeves. U referenci [16] se uvode određene pretpostavke i vrši uprošćavanje ekvivalentnih šema direktnog i inverznog redosleda AG. Kod [17] se analiza vrši pomoću ekvivalentne šeme AG direktnog i inverznog redosleda u kojoj su uvaženi nesimetrični naponi i struje usled nesimetričnog opterećenja, dok se u [18] ceo sistem, uključujući AG, pobudni kondenzator i potrošač modeluju korišćenjem Parkove transformacije. U [19] je određivanje stacionarnog stanja SPAG postavljeno kao optimizacioni problem, koji se rešava primenom GA.

U ovom radu je primenjen postupak iz [19] za određivanje karakteristika kontrole napona SPAG. Kontrola napona se ostvaruje promenom pobudne kapacitivnosti pri konstantnoj brzini generatora i promenom brzine generatora pri konstantnoj pobudnoj kapacitivnosti.

II. MODEL ASINHRONOG GENERATORA

Polazi se od pretpostavke da SPAG predstavlja jedan trofazni nesimetričan sistem. Za analizu trofaznog AG u uslovima nesimetričnog stacionarnog stanja koristi se metod simetričnih komponenti. Na slici 1 su date ekvivalentne šeme AG direktnog i inverznog redosleda [2]. Parametri i veličine na ekvivalentnim šemama su u relativnim jedinicama. Pretpostavlja se da su svi parametri konstantni i nezavisni od zasićenja, izuzev reaktanse magnećenja X_m .

Namotaji statora AG se sprežu u trougao ili neuzepljenu zvezdu, čime se eliminišu veličine nultog redosleda u uslovima nesimetričnog opterećenja. Ekvivalentne impedanse (admitanse) AG direktnog i inverznog redosleda se mogu lako odrediti, shodno ekvivalentnim šemama na slici 1(a) i 1(b), respektivno.



Slika 1. Ekvivalentna šema AG za direktni (a) i inverzni (b) redosled.

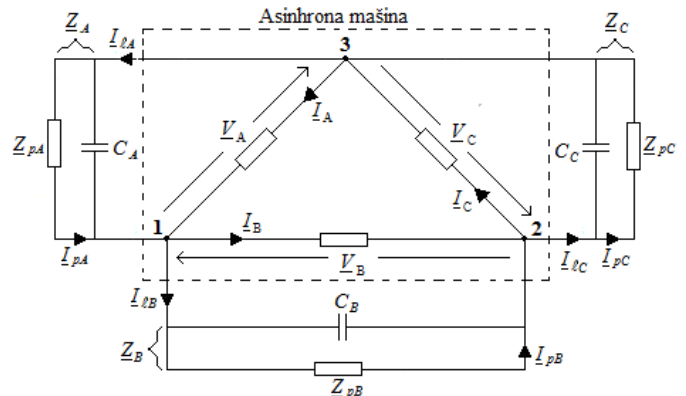
Gde su:

R_s, R_r - aktivni otpor statora i rotora u (r.j.);
 X_s, X_r - reaktansa rasipanja statora i rotora u (r.j.);
 R_m, X_m - aktivni otpor i reaktansa u grani magnećenja u (r.j.);
 I_d, I_i - struja statora direktnog i inverznog redosleda u (r.j.);
 E_d, E_i - elektromotorna sila AG direktnog i inverznog redsleda u (r.j.);
 V_d, V_i - napon na krajevima AG direktnog i inverznog redsleda u (r.j.);
 F, v - frekvencija napona i brzina rotora AG u (r.j.);
 Z_d, Z_i - ekvivalentna impedansa AG direktnog i inverznog redosleda.

Ekvivalentna admitansa AG direktnog i inverznog redosleda je $Y_d = 1/Z_d$ i $Y_i = 1/Z_i$.

III. JEDNAČINE STACIONARNOG STANJA SPAG

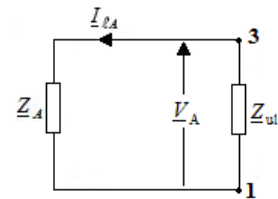
Na slici 2 je prikazana opšta ekvivalentna šema trofaznog SPAG. Izborom odgovarajućih vrednosti impedansi potrošača (Z_{pA}, Z_{pB} i Z_{pC}) i kapacitivnosti pobudnih kondenzatora (C_A, C_B i C_C) može se simulirati bilo koja konekcija SPAG.



Slika 2. Opšta ekvivalentna šema trofaznog SPAG.

Zbog veze namotaja statora AG u trougao, simetrične komponente nultog redosleda su jednake nuli. AG sa namotajem statora vezanim u neuzepljenu zvezdu može se svesti na ekvivalentnu šemu na slici 2 primenom transformacije zvezda-trougao. Na isti način se postupa i kada su potrošači i kondenzatori spregnuti u neuzepljenu zvezdu. Za opterećenja koja zahtevaju četvorožični sistem (kombinacija trofaznih i jednofaznih potrošača) postavlja se transformator između AG i potrošača, sa spregom namotaja u trougao na strani AG i spregom namotaja u zvezdu ka potrošačima. Ovim se eliminiše struja nultog redosleda na AG i obezbeđuje napajanje trofaznih i jednofaznih potrošača. Odgovarajućim transformacijama impedansi i ovakav sistem se može svesti na opštu ekvivalentnu šemu datu na slici 2.

Kako u kolu na slici 2 nema aktivnog izvora napona, SPAG se može predstaviti kao pasivno kolo posmatrano između bilo koje dve priključne tačke statora [15]. Ako se usvoji da je faza A referentna, ulazna impedansa SPAG se određuje između tačaka 1 i 3. Na taj način se ekvivalentna šema sa slike 2 može transformisati u prosto kolo na slici 3.



Slika 3. Uprošćena šema trofaznog SPAG.

Ulazna impedansa SPAG (Z_{ul}) se određuje polazeći od osnovnih jednačina prema I i II K.Z. za kolo na slici 2 i jednačina simetričnih komponenti za sistem vezan u trougao [19]:

$$Z_{ul} = \frac{(A + D) - (B + C)}{BC - AD} \quad (1)$$

$$\text{gde su: } \underline{A} = (\underline{a}^2 - 1)\underline{Y}_d + \underline{a}^2 \underline{Y}_B; \quad \underline{B} = (\underline{a} - 1)\underline{Y}_i + \underline{a} \underline{Y}_B; \\ \underline{C} = (\underline{a} - 1)\underline{Y}_d + \underline{a} \underline{Y}_C; \quad \underline{D} = (\underline{a}^2 - 1)\underline{Y}_i + \underline{a}^2 \underline{Y}_C;$$

Admitanse $\underline{Y}_d$ i $\underline{Y}_i$ su funkcije od X_m i F , tako da se ulazna impedansa može iskazati kao funkcija ove dve veličine:

$$\underline{Z}_{ul} = R_{ul}(X_m, F) + jX_{ul}(X_m, F) \quad (2)$$

Jednačina naponske ravnoteže za kolo na slici 3 je:

$$\underline{Z}_{pt} \underline{I}_{\ell A} = 0 \quad (3)$$

gde je: $\underline{Z}_{pt} = \underline{Z}_{\ell A} + \underline{Z}_{ul}$

Kako je pri radu SPAG $\underline{I}_{\ell A} \neq 0$, sledi da je:

$$\underline{Z}_{pt} = 0 \quad (4)$$

Izraz (4) predstavlja uslov samopobuđivanja asinhronog generatora.

Napon SPAG je nelinearna funkcija pobudne kapacitivnosti, brzine AG i impedanse potrošača. To znači da se kontrola napona na krajevima SPAG, odnosno potrošača, može vršiti promenom pobudne kapacitivnosti ili promenom brzine rotora AG. Sa praktičnog stanovišta, važno je da napon na potrošaču ima stabilnu vrednost, sa tolerancijom odstupanja u definisanim okvirima. Potrebno je dakle pronaći zakonitost promene kontrolnih promenljivih (pobudne kapacitivnosti ili brzine) sa promenom opterećenja, tako da se vrednost napona na krajevima SPAG, tj potrošača, održava na unapred zadatoj vrednosti. Ovaj uslov se može iskazati pomoću relacije:

$$|V_{spec} - V| = 0 \quad (5)$$

gde je V_{spec} – zadata vrednost napona; V - aktuelna vrednost napona na potrošaču ($V = |\underline{V}_A|$).

IV. METODOLOGIJA IZRAČUNAVANJA NEPOZNATIH

Ako se uslov samopobuđivanja iskazan jednačinom (4) i uslov kontrole napona koji je iskazan jednačinom (5) posmatraju kao objektivne funkcije, a frekvencija, reaktansa magnećenja, pobudna kapacitivnost i brzina, kao upravljačke promenljive u okvirima unapred zadatih granica, tada se određivanje parametara stacionarnog stanja i kontrole napona SPAG može svesti na multi-objektivni optimizacioni problem. Shodno tome, jednačina (4) se može izraziti na sledeći način:

$$f_1 = |\underline{Z}_{pt}| = 0 \quad (6)$$

dok se uslov kontrole napona može napisati u formi objektivne funkcije:

$$f_2 = \{V_{spec} - V\} = 0 \quad (7)$$

U zavisnosti od konkretnog problema, pomoću f_1 i f_2 se formira multi-objektivna funkcija čijom minimizacijom se određuju nepoznate promenljive stacionarnog stanja. Nepoznate promenljive stanja, čije se vrednosti “optimiziraju” mogu biti reaktansa magnećenja (X_m), frekvencija (F), pobudna kapacitivnost (C) i brzina AG (v). To pruža mogućnost da se pojedine promenljive stanja, na čije vrednosti se može direktno uticati (npr. C ili v), proglase upravljačkim promenljivim stanja i na taj način njihovim “optimiziranjem” dobije željeno stacionarno stanje sistema.

Evolutivni algoritmi su veoma pogodni za rešavanje multi-objektivnih optimizacionih problema, zato što istovremeno operišu sa skupom mogućih rešenja (tzv. populacijom). Jedna od najviše korišćenih evolutivnih optimizacionih metoda je GA [20]. GA radi sa populacijom jedinki. Populacija jedinki je skup rešenja datog optimizacionog problema. Svaka jedinka je potencijalno rešenje. Jedinka se može opisati kao skup upravljačkih promenljivih čije vrednosti se optimiziraju. Kvalitet jedinke se kvantifikuje preko vrednosti fitnes funkcije koja predstavlja ekvivalent objektivnoj funkciji optimizacionog problema. Nova populacija se dobija kroz niz GA operacija koje se primenjuju nad jedinkama iz prethodne populacije. Ove operacije se odvijaju sekvencijalno po iteracijama na principu prirodne evolucije: selekcija, ukrštanje i mutacija.

U ovom radu je primenjena MATLAB realizacija GA, čiji su parametri dati u Tabeli I.

TABELA I. PARAMETRI GA

Generacija	100
Veličina populacije	20
Početa populacija	Feasible population
Funkcija skaliranja	Top, Quantity: 0.4
Selekcija	Tournament, Tournament K: 4
Ukrštanje	Heuristic, Ratio: 1.2
Mutacija	Adaptive feasible
Kriterijumi konvergencije	Max generation: 100 Terminat. toler. on the function value: 10^{-6}

A. Osnovni proračun

Kada su vrednosti pobudnih kapacitivnosti (C_A, C_B, C_C), impedansi potrošača ($\underline{Z}_{pA}, \underline{Z}_{pB}, \underline{Z}_{pC}$), brzine generatora (v) i parametara asinhronne mašine poznate, nepoznate promenljive stanja reaktansa magnećenja (X_m) i frekvencija (F), se određuju rešavanjem sledećeg optimizacionog problema:

$$\min Fobj = \min\{f_1\} \quad \text{P.O.: } \begin{cases} X_m^{\min} \leq X_m \leq X_m^{\max} \\ F^{\min} \leq F \leq F^{\max} \end{cases}$$

Nakon određivanja X_m i F , sledeći korak je izračunavanje normalizovane vrednosti elektromotorne sile E_d / F na osnovu karakteristike magnećenja, koja predstavlja zavisnost $E_d / F = f(X_m)$. Karakteristika magnećenja asinhronne mašine se dobija eksperimentalno u ogledu praznog hoda. Ona se može analitički predstaviti linearnim jednačinama po segmentima ili preko odgovarajućeg polinoma koji se dobija fitovanjem

eksperimentalno dobijenih tačaka. Nakon toga se primenom I i II K.Z. na ekvivalentnim šemama sa slike 1 i 2, i relacija između faznih vrednosti i simetričnih komponenata, mogu odrediti struje, naponi i snage na svim elementima u kolu na slici 2. Time je stacionarno stanje SPAG u potpunosti određeno [19].

B. Kontrola napona promenom pobudne kapacitivnosti

Dobro je poznato da se kontrola napona SPAG može vršiti promenom pobudne kapacitivnosti pri konstantnoj vrednosti brzine generatora. Zadatak koji treba rešiti je određivanje zakonitosti promene C sa promenom opterećenja u određenom opsegu, tako da se napon održava na zadatoj vrednosti. U ovom slučaju se nepoznate promenljive stanja (X_m , F i C) određuju minimizacijom multi-objektivne funkcije:

$$\min F_{obj} = \min\{f_1 + f_2\} \quad \text{P.O.:} \begin{cases} X_m^{\min} \leq X_m \leq X_m^{\max} \\ F^{\min} \leq F \leq F^{\max} \\ C^{\min} \leq C \leq C^{\max} \end{cases}$$

C. Kontrola napona promenom brzine generatora

Promenom brzine generatora, pri konstantnoj vrednosti pobudne kapacitivnosti, može se ostvariti kontrola napona SPAG. U ovom slučaju je upravljačka promenljiva stanja brzina generatora (v). Nepoznate promenljive stanja (X_m , F i v) se određuju minimizacijom objektivne funkcije:

$$\min F_{obj} = \min\{f_1 + f_2\} \quad \text{P.O.:} \begin{cases} X_m^{\min} \leq X_m \leq X_m^{\max} \\ F^{\min} \leq F \leq F^{\max} \\ v^{\min} \leq v \leq v^{\max} \end{cases}$$

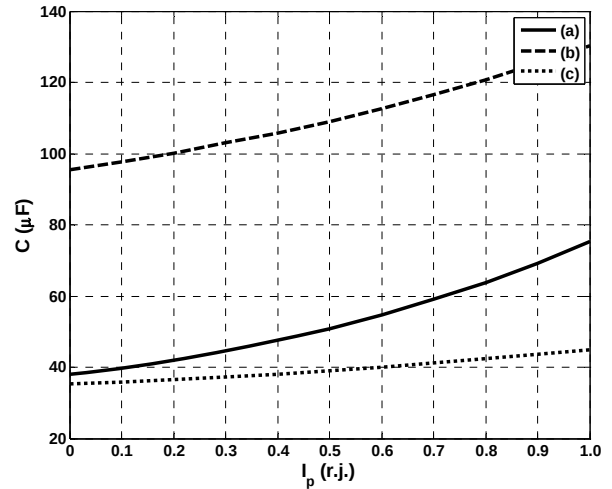
V. TEST PRIMERI I DISKUSIJA

Predložena metodologija je primenjena za određivanje karakteristika kontrole napona trofazne, četvoropolne asinhronne mašine sa kaveznim rotorom, nominalne snage 2,2 kW, napona 230 V, frekvencije 50 Hz, sa namotajima statora vezanim u trougao. Parametri ekvivalentne šeme i karakteristika magnećenja asinhronne mašine, kao i prikazi analiziranih konekcija SPAG, dati su u dodatku.

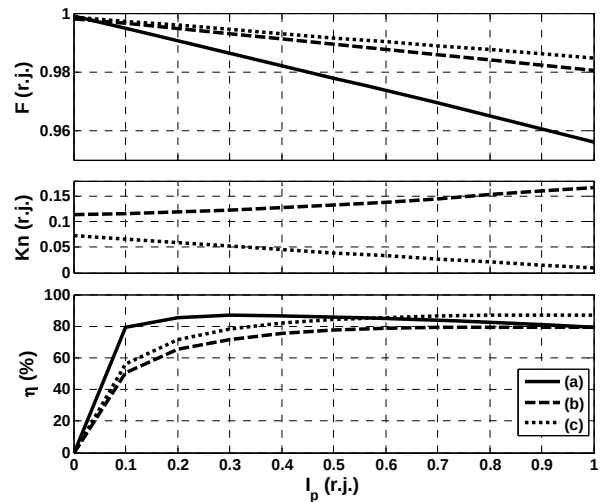
A. Kontrola napona SPAG promenom pobudne kapacitivnosti

Određena je zakonitost promene pobudne kapacitivnosti sa promenom opterećenja, pri konstantnoj brzini ($v=1$ r.j.), za konstantnu vrednost napona ($V=1$ r.j.). Na slici 4 je prikazana promena pobudne kapacitivnosti sa promenom struje opterećenja, za tri različite konekcije. U sva tri slučaja se konstantna vrednost napona na potrošaču održava kontinualnom promenom pobudne kapacitivnosti u skladu sa promenom opterećenja. Opseg promene kapacitivnosti zavisi od tipa konekcije. Analizirana su tri karakteristična slučaja: (a) trofazna simetrična konekcija; (b) prosta jednofazna konekcija i (c) C-2C konekcija. Za trofaznu simetričnu konekciju, pobudna kapacitivnost se menja od 38 μF u praznom hodu (kada je generator neopterećen) do 75 μF pri nominalnom

opterećenju (struja opterećenja je 1 r.j.). Kod proste jednofazne konekcije, zahteva se promena pobudne kapacitivnosti od 96 μF do 130 μF , a pri C-2C konekciji pobudna kapacitivnost se menja u opsegu od 35 μF do 45 μF .



Slika 4. Promena pobudne kapacitivnosti sa promenom opterećenja ($\cos\varphi=1$) za održavanje napona na konstantnoj vrednosti od $V=1$ r.j. (a) Trofazna simetrična konekcija; (b) Prosta jednofazna konekcija; (c) C-2C konekcija.



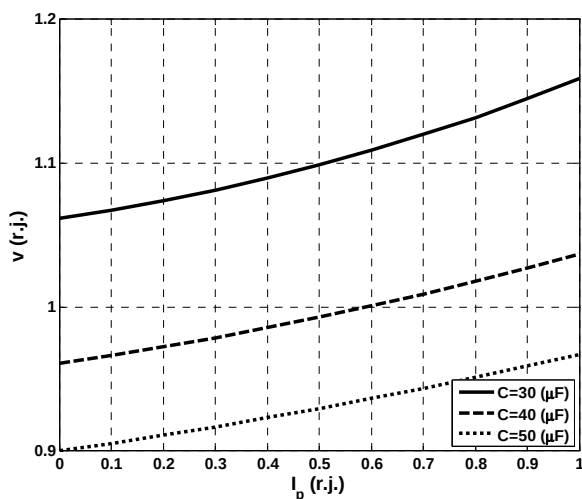
Slika 5. Promena frekvencije, koeficijenta nesimetrije i stepena iskorišćenja sa promenom opterećenja. (a) Trofazna simetrična konekcija; (b) Prosta jednofazna konekcija; (c) C-2C konekcija.

Na slici 5 su prikazane odgovarajuće promene frekvencije, koeficijenta nesimetrije i stepena iskorišćenja, koje odgovaraju promenama pobudnih kapacitivnosti sa slike 4. Kod simetričnog režima, frekvencija se smanjuje sa povećavanjem opterećenja, i kreće u opsegu od 0.9991 (prazan hod) do vrednosti 0.9561 (nominalno opterećenje). Za jednofazno opterećenje samopobuđenog SPAG, opseg promene frekvencije je nešto veći u slučaju proste jednofazne konekcije u odnosu na C-2C konekciju, ali je u oba slučaja znatno manji u odnosu na simetrični režim. Kod simetričnog trofaznog režima se ima najveća snaga opterećenja (opterećene su sve tri

faze), tako da je i promena frekvencije veća u odnosu na druga dva slučaja, kada se ima jednofazno opterećenje. Kod proste jednofazne konekcije faktor nesimetrije raste u opsegu od 0.1135r.j. do 0.1672r.j., dok se u slučaju C-2C konekcije smanjuje sa povećanjem opterećenja, i to u opsegu od 0.0732r.j. do 0.0092r.j. Step en iskorišćenja je veći u slučaju C-2C konekcije u odnosu na prostu jednofaznu konekciju. Može se zaključiti da C-2C konekcija ima bolje performanse u odnosu na prostu jednofaznu konekciju, što je i očekivano jer je i razvijena sa ciljem da poboljša performanse trofaznog SPAG kada je jednofazno opterećen.

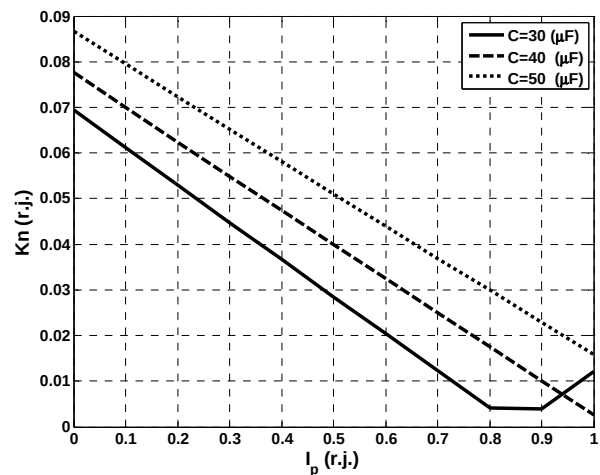
B. Kontrola napona SPAG promenom brzine generatora

Drugi način kontrole napona SPAG je promena brzine pri konstantnoj vrednosti pobudne kapacitivnosti. Ovde su date karakteristike kontrole napona za C-2C konekciju SPAG. Proračuni su izvršeni za tri različite vrednosti pobudne kapacitivnosti. Na slici 6 su prikazane karakteristike promene brzine sa promenom struje potrošača za održavanje konstantne vrednosti napona ($V=1$ r.j.). Brzina generatora se povećava sa povećavanjem opterećenja. Za istu vrednost opterećenja, pri manjim vrednostima brzine potrebne su veće vrednosti pobudne kapacitivnosti.



Slika 6. Promena brzine sa promenom opterećenja i pobudne kapacitivnosti za konstantni napon ($V=1$ r.j.). pri C-2C konekciji.

Na slici 7. je data promena faktora nesimetrije napona u analiziranim slučajevima. Faktor nesimetrije se smanjuje kako se povećava opterećenje. Za dato opterećenje, faktor nesimetrije je manji ukoliko je i pobudna kapacitivnost manja. To implicira da se za svako opterećenje može naći kombinacija brzine i pobudne kapacitivnosti, tako da se ostvari najmanja moguća nesimetrija napona. Tako je, npr. u analiziranom slučaju, za opterećenje $I_p=0.9$ r.j., minimalni faktor nesimetrije pri $C=30 \mu F$ i odgovarajućoj brzini ($v=1.1449$ r.j.).



Slika 7. Promena faktora nesimetrije napona sa promenom opterećenja i pobudne kapacitivnosti za konstantni napon ($V=1$) i odgovarajuće brzine sa slike 6., pri C-2C konekciji.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen postupak za određivanje karakteristika kontrole napona trofaznog SPAG. Postupak je opšti jer se može primeniti za praktično sve tipove konekcija i vrste opterećenja. Primenom teorije simetričnih komponenta se relativno složen sistem AG-pobudni kondenzatori-potrošači transformiše na jednostavno pasivno kolo, iz kojeg se izvodi uslov samopobuđivanja AG. Ovaj uslov, zajedno sa kriterijumom kontrole napona se koristi za formiranje multi-objektivne funkcije, čijom minimizacijom se primenom GA određuju nepoznate promenljive stanja sistema. Na taj način se, za dato opterećenje, pored parametara stacionarnog stanja (frekvencije i reaktanse magnećenja) mogu izračunati i vrednosti upravljačkih promenljivih, tj. pobudne kapacitivnosti ili brzine, tako da se ostvari zadata vrednost napona. U radu je pokazana primena predloženog postupka na primeru kontrole napona jednog trofaznog SPAG pri različitim konekcijama i vrstama opterećenja. Rezultati pokazuju da predložena metodologija može biti od velike koristi pri planiranju i eksploataciji autonomnih izvora električne energije, kakvi su npr. MHE u izolovanom radu, koje koriste SPAG.

DODATAK

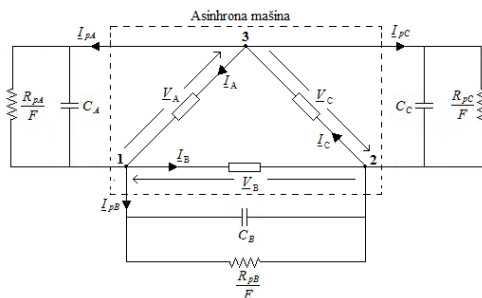
Podaci o asinhronom generatoru:

$P_n = 2,2$ kW; $V_n = 230$ V; $I_n = 8,6$ A; $R_s = 0,07224$ r.j.;
 $R_r = 0,03795$ r.j.; $X_s = X_r = 0,10459$ r.j.
 Bazne vrednosti: $V_b = 230$ V; $I_b = 4,96$ A; $Z_b = 46,37 \Omega$;
 $S_b = 3422,4$ VA; $f_b = 50$ Hz; $C_b = 68,68 \mu F$; $n_b = 1500$ o/min.

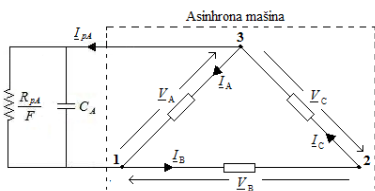
Karakteristika promene elektromotorne sile direktnog redosleda sa promenom reaktanse magnećenja:

$$\begin{aligned} X_m < 1.77464 & E_d / F = 1.49744 - 0.007 X_m \\ 2.06096 > X_m \geq 1.77464 & E_d / F = 2.02226 - 0.01338 X_m \\ 2.32904 > X_m \geq 2.06096 & E_d / F = 2.52129 - 0.0186 X_m \\ X_m \geq 2.32904 & E_d / F = 0 \end{aligned}$$

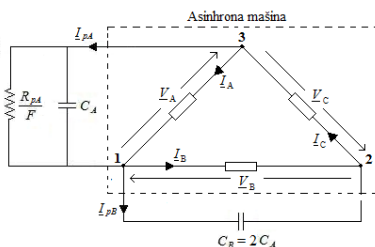
Prikazi analiziranih konekcija SPAG:



Slika D.1 Trofazna simetrična konekcija.



Slika D.2 Prosta jednofazna konekcija.



Slika D.3 C-2C konekcija.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete i nauke Republike Srbije na finansiranju projekta TR 33046 u okviru koga je nastao ovaj rad.

LITERATURA

- [1] J. Radosavljević, M. Jevtić, D. Klimenta, "Optimal seasonal voltage control in rural distribution networks with distributed generators," *Journal of electrical engineering (JEEEC)*, Vol. 61, No. 6, pp. 321-331., 2010.
- [2] M.G. Simoes, F.A. Farret, *Renewable Energy Systems – Design and Analysis with Induction Generators*, (CRC Press, 2004).
- [3] L. Shridhar, B. Singh, C. S. Jha and B.P. Singh, "Analysis of self excited induction generator feeding induction motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 2, pp. 390-396., June 1994
- [4] T.F. Chan, "Steady-state analysis of self-excited induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 2, pp. 288-296., June 1994
- [5] T.F. Chan, "Self-excited induction generators driven by regulated and unregulated turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 2, pp. 338-343., June 1996
- [6] C.Chakraborty, S.N.Bhadra, A.K.Chattopadhyay, "Excitation requirements for stand alone three-phase induction generator," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.13, No. 4, pp. 358-365., Dec. 1998.
- [7] S. M. Alghuwainem, "Steady-state analysis of a self-excited induction generator including transformer saturation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 667-672., September 1999.
- [8] A.L. Alolah, M.A. Alkanhal, "Optimization-based steady state analysis of three phase self-excited induction generator," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 15, no. 1, pp. 61-65., March 2000.

- [9] K.A. Nigim, M.M.A. Salama, K. Kazerani, "Identifying machine parameters influencing the operation of the self-excited induction generator," *Electric Power Systems Research*, Vol. 69, pp. 123-128., 2004.
- [10] D. Joshi, K.S. Sandhu, "Performance analysis of three-phase self-excited induction generator using genetic algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 34, pp. 461-470., 2006.
- [11] M.H. Haque, "Comparison of steady state characteristic of shunt, short-shunt and long-shunt induction generators," *Electric Power System Research*, Vol. 79, pp. 1446-1453., 2009
- [12] S. C. Kuo, L. Wang, "Steady-state performance of a self-excited induction generator feeding an induction motor," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 30, pp. 581-593., 2002.
- [13] A.I. Alolah, M.A. Alkanhal, "Analysis of Three Phase Self-Excited Induction Generator under Static and Dynamic Loads," *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International Publication Year: 2007*, Vol. 2, pp. 1783 – 1786.
- [14] S. Vadhera, K. S. Sandhu, "Constant Voltage Operation of Self Excited Induction Generator using Optimization Tools," *International Journal of Energy and Environment*, Issue 4, Vol. 2, pp. 191-198., 2008.
- [15] T.F. Chan, L.L. Lai, "Steady-state analysis and performance of a stand-alone three phase induction generator with asymmetrically connected load impedances and excitation capacitances," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 16, No. 4, pp. 327-333., December 2001.
- [16] S.S. Murthy, B. Singh, S. Gupta, B.M. Gulati, "General steady-state analysis of three-phase self-excited induction generator feeding three-phase unbalanced load/single-phase load for stand-alone applications," *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 150, No. 1, pp. 49-55., January 2003.
- [17] Y.J. Wang, "Analysis of a self-excited induction generator supplying unbalanced loads," *2004 International Conference on Power System Technology – POWERCON 2004*, Singapore, 21-24 Nov. 2004, pp. 1457-1462.
- [18] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua, and A. Tounzi, "Performance of an isolated induction generator under unbalanced loads," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 2, pp. 303-311., June 2010.
- [19] J. Radosavljević, M. Jevtić i D. Klimenta, "Analiza rada trofaznog samopobuđenog asinhronog generatora primenom genetičkog algoritma," *Elektroprivreda br. 3*, str. 199-209., 2010.
- [20] Lee KY, El-Sharkawi MA, *Tutorial on modern heuristic optimization techniques with applications to power systems*, (IEEE Power Engineering Society 2002; IEEE Catalog Number 02TP160).

ABSTRACT

The voltage and frequency variables are nonlinear dependences of the speed, magnetizing reactance, excitation capacitance, and load. Any regulation strategy requires an efficient procedure for computing of the frequency and magnetizing reactance, that is, the frequency and EMF. This paper proposes a genetic algorithm (GA) based approach for determination of unknown variables by minimizing the multi-objective function which includes the self-excitation requirement and voltage control criterion. The procedure is general. It can be used for different types connections of the SEIG. By means of this procedure the voltage control of a 2.2 kW three-phase SEIG is analyzed under three-phase, plain single-phase and C-2C connection.

VOLTAGE CONTROL OF THREE-PHASE SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR

Jordan Radosavljević, Miroljub Jevtić and Dardan Klimenta
Faculty of Technical Sciences,
University of Priština in Kosovska Mitrovica, Serbia