

Metode za izračun ravnotežnih stanj sinhronskega stroja

Marcel Topler, Jožef Ritonja, Boštjan Polajžer

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru,
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: marcel.topler@um.si

Methods for calculation of equilibrium states of the synchronous machine

Abstract. *The synchronous machines (SM) are among the most frequently used sources of electrical energy. Consequently, there is a great interest and need for static and dynamic mathematical SM models for the analysis of operating states. The mathematical model should precisely describe the static and dynamic properties of the SM while being as simple as possible. Furthermore, the quantities of the mathematical model should be easily obtained and their calculation should be possible from the basic construction data or from basic tests of SM.*

Most of the time the SM operates in the vicinity of equilibrium state, therefore there is a great interest in methods for calculation of equilibrium states of the SM. The problem in the article is limited to SM connected to an infinite bus of constant amplitude and frequency through a transmission line i. e. single machine infinite bus (SMIB). The article presents different methods of equilibrium states calculation that are: mixed boundary conditions, infinite bus conditions and SM conditions. After determining the voltages, stator current, active and reactive power, the remaining SM quantities of equilibrium states are calculated using the classical SM phasor diagram.

1 Uvod

Sinhronski stroji (SS) spadajo med najpogostejše in najpomembnejše proizvajalce električne energije. Posledično obstaja veliko zanimanje in potreba po statičnih in dinamičnih matematičnih modelih SS za analizo obratovalnih stanj. Pri izbiri matematičnega modela si želimo, da le ta čim natančneje opiše statične in dinamične lastnosti SS, pri tem pa naj bo model čim enostavnejši. Veličine matematičnega modela naj bodo enostavno določljive, njihov izračun pa naj bo možen iz osnovnih konstrukcijskih podatkov ali nezahtevnih preizkusov SS [1].

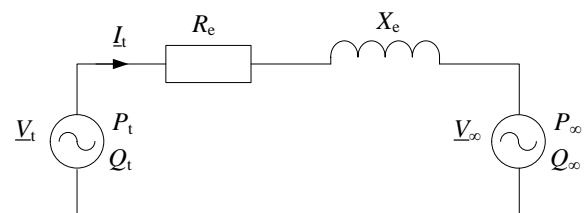
V literaturi [2] in [3] obstaja veliko število modelov SS, ki se med seboj razlikujejo v natančnosti opisa in v zahtevnosti predstavitve modela SS. Med najenostavnejše modele spada t. i. klasični model, kjer je model SS predstavljen z omrežjem konstantne napetosti in serijske reaktance. Nasprotno je najpodrobnejši in hkrati najzahtevnejši model SS t. i. nelinearni d - q model sedme stopnje, kjer so magnetne sklopjenosti statorskih, vzbujalnih in dušilnih navitij odvisne od položaja in nasičenja rotorja [4], [5] in [6]. Med ta dva »skrajna« modela lahko umestimo več modelov SS, ki se razlikujejo v stopnji zahtevnosti. Posebej pomemben je

t. i. linearen model tretje stopnje (Heffron - Phillipsov), ki temelji na nekaterih predpostavkah in poenostavitvah, kljub temu pa pravilno opiše dinamiko SS, vendar le v okolici ravnotežnega stanja [7].

Nelinearni modeli SS omogočajo natančno dinamično analizo SS, če poznamo natančne vrednosti veličin SS, ki pa v večini primerov niso poznane. Za njihov izračun so potrebne zahtevne in dolgotrajne meritve SS, zato je uporaba nelinearnih modelov SS zelo omejena. Odpravo omenjenih pomanjkljivosti omogoča poenostavitev in linearizacija nelinearnih modelov SS. Razlog za to predstavlja način delovanja SS v sinhronizmu, ki večino časa obratuje v okolici ravnotežnega stanja. Zaradi tega je brez bistvenega zmanjšanja uporabnosti smiselno linearizirati model SS za izbrano ravnotežno stanje [1] in [2]. Ravnotežna stanja lahko izračunamo z različnimi metodami; v članku so obravnavane tri. Najbolj zahtevna je metoda mešanih robnih pogojev, pri kateri so podane vrednosti fazorja napetosti togega omrežja, ter vrednosti delovne in jalove moči SS. Ostali dve metodi temeljita bodisi na podanih vrednostih fazorja napetosti ter delovne in jalove moči togega omrežja, bodisi na podanih vrednostih fazorja napetosti ter delovne in jalove moči SS.

2 Predpostavke in omejitve

V normalnem obratovanju elektroenergetskega sistema (EES) nas zanima delovanje SS v okolici ravnotežnega stanja. Za potrebe obravnave SS v EES predpostavimo, da je SS preko povezovalnega voda priključen na omrežje sinusne napetosti konstantne amplitude in frekvence. To je t. i. sistem z enim SS, ki je priključen na togo omrežje oz. neskončne zbiranke, kar v angleščini označimo kot SMIB (single machine infinite bus) in je prikazan na sliki 1 [8], kjer \underline{V}_t označuje fazor napetosti na statorskih sponkah, P_t in Q_t delovno in jalovo moč, ki ju SS oddaja v povezovalni vod. \underline{I}_t označuje fazor toka statorskega navitja, R_e in X_e upornost in reaktanco povezovalnega voda, \underline{V}_∞ fazor napetosti togega omrežja, P_∞ in Q_∞ delovno in jalovo moč, ki ju togo omrežje prejema preko povezovalnega voda.



Slika 1: SS priključen na togo omrežje oz. neskončne zbiranke.

3 Predstavitev metod za izračun ravnotežnih stanj

Pri matematičnih modelih SS so potrebni začetni pogoji sistema, zato je potrebno izračunati ravnotežno stanje SS, za kar obstaja več metod. Izbira metode za izračun ravnotežnega stanja SS je odvisna od podanih veličin SS, ki je preko povezovalnega voda priključen na neskončne zbiralke. Obravnavali bomo tri različne metode.

3.1 Mešani robni pogoji: P_t , Q_t in \underline{V}_∞

Določitev veličin ravnotežnega stanja iz mešanih robnih pogojev, kjer so podane vrednosti fazorja napetosti togega omrežja (1), delovne moči (2) in jalove moči (3), ki ju SS oddaja v povezovalni vod, spada med zahtevnejše primere.

$$\underline{V}_\infty = V_{\infty, re} + jV_{\infty, im} \quad (1)$$

$$P_t = \Re\{\underline{V}_t \underline{I}_t^*\} \quad (2)$$

$$Q_t = \Im\{\underline{V}_t \underline{I}_t^*\} \quad (3)$$

Iz \underline{V}_∞ , P_t in Q_t lahko ob upoštevanju upornosti R_e in reaktance X_e povezovalnega voda določimo potreben fazor napetosti na statorskih sponkah (4) in fazor toka statorskega navitja (5).

$$\underline{V}_t = V_{t, re} + jV_{t, im} \quad (4)$$

$$\underline{I}_t = I_{t, re} + jI_{t, im} \quad (5)$$

Izhodišče predstavlja kazalčni diagram, prikazan na sliki 2, na podlagi katerega zapišemo fazor napetosti na statorskih sponkah (6).

$$\underline{V}_t = \underline{V}_\infty + \underline{I}_t R_e + j\underline{I}_t X_e \quad (6)$$

Za primer na sliki 2, ob upoštevanju (1) in (4) – (6), zapišemo realno (7) in imaginarno (8) komponento fazorja napetosti na statorskih sponkah.

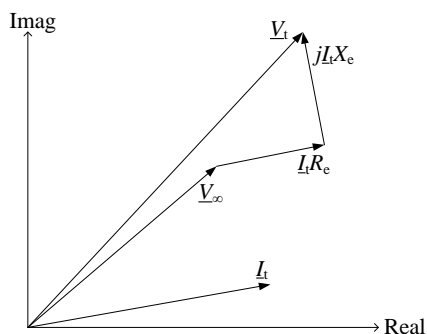
$$V_{t, re} = V_{\infty, re} + I_{t, re} R_e - I_{t, im} X_e \quad (7)$$

$$V_{t, im} = V_{\infty, im} + I_{t, im} R_e + I_{t, re} X_e \quad (8)$$

Podobno ob upoštevanju (2) – (5) zapišemo delovno (9) in jalovo (10) moč, ki ju SS oddaja v povezovalni vod.

$$P_t = V_{t, re} I_{t, re} + V_{t, im} I_{t, im} \quad (9)$$

$$Q_t = V_{t, im} I_{t, re} - V_{t, re} I_{t, im} \quad (10)$$



Slika 2: Kazalčni diagram fazorja statorske napetosti in fazorja statorskega toka.

Ob upoštevanju (7) in (8) v (9) in (10) lahko enačbi preuredimo ju zapišemo kot (11) in (12).

$$R_e I_{t, re}^2 + R_e I_{t, im}^2 + V_{\infty, re} I_{t, re} + V_{\infty, im} I_{t, im} - P_t = 0 \quad (11)$$

$$X_e I_{t, re}^2 + X_e I_{t, im}^2 + V_{\infty, im} I_{t, re} - V_{\infty, re} I_{t, im} - Q_t = 0 \quad (12)$$

Geometrično predstavlja (11) krožnico s polmerom r_1 in središčem $S_1(x_1, y_1)$ (13) ter (12), krožnico s polmerom r_2 in središčem $S_2(x_2, y_2)$ (14), kot je prikazano na sliki 3.

$$r_1 = \sqrt{\left(\frac{V_{\infty, re}}{2R_e}\right)^2 + \left(\frac{V_{\infty, im}}{2R_e}\right)^2} - \frac{P_t}{R_e} \quad (13)$$

$$x_1 = -\frac{V_{\infty, re}}{2R_e}, \quad y_1 = -\frac{V_{\infty, im}}{2R_e}$$

$$r_2 = \sqrt{\left(\frac{V_{\infty, im}}{2X_e}\right)^2 + \left(-\frac{V_{\infty, re}}{2X_e}\right)^2} + \frac{Q_t}{X_e} \quad (14)$$

$$x_2 = -\frac{V_{\infty, im}}{2X_e}, \quad y_2 = -\frac{V_{\infty, re}}{2X_e}$$

Oddaljenost med središčema krožnic označimo z S_{12} (15), kot je prikazano na sliki 3.

$$S_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (15)$$

Sistem enačb (11) in (12) lahko ima nič, eno ali dve rešitvi:

- Nič rešitev: $x_1 = x_2$ in $y_1 = y_2$.
- Ena rešitev: $r_1 + r_2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.
- Dve rešitvi: $S_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.

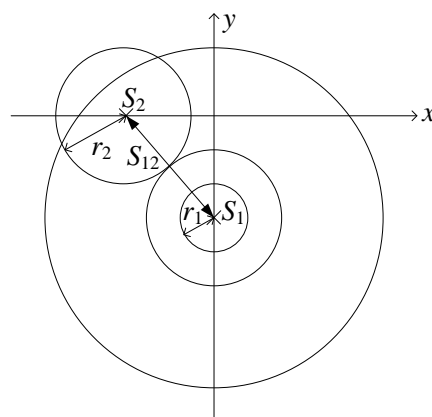
Na podlagi tega lahko sklenemo, da ima sistem eno ali dve rešitvi, ko so izpolnjeni pogoji (16).

$$r_1 + r_2 \geq S_{12} \wedge r_1 < r_2 + S_{12} \wedge r_2 < r_1 + S_{12} \quad (16)$$

V primeru, ko ima fazor napetosti togega omrežja \underline{V}_∞ realno komponentno $V_{\infty, re} = 1$ in imaginarno komponento $V_{\infty, im} = 0$, lahko enačbi (11) in (12) poenostavimo v (17) in (18).

$$R_e I_{t, re}^2 + R_e I_{t, im}^2 + I_{t, re} - P_t = 0 \quad (17)$$

$$X_e I_{t, re}^2 + X_e I_{t, im}^2 - I_{t, im} - Q_t = 0 \quad (18)$$



Slika 3: Geometrična predstavitev s krožnicami.

Poenostavijo se enačbe (13) – (15) v (19) – (21).

$$r_1 = \frac{1}{R_e} \sqrt{\frac{1}{4} + P_t R_e}, x_1 = -\frac{V_{\infty, re}}{2R_e} \quad (19)$$

$$r_2 = \frac{1}{X_e} \sqrt{\frac{1}{4} + Q_t X_e}, y_2 = -\frac{V_{\infty, re}}{2X_e} \quad (20)$$

$$S_{12} = \sqrt{(x_1)^2 + (-y_2)^2} \quad (21)$$

Sistem enačb (17) in (18) ima običajno dve rešitvi, ki sta lahko enaki ali različni, če so izpolnjeni pogoji (22).

$$r_1, r_2, S_{12} > 0 \wedge r_1 + r_2 \geq S_{12} \wedge r_1 \geq r_2 + S_{12} \wedge r_2 \geq r_1 + S_{12} \quad (22)$$

Sistem enačb (17) in (18) preoblikujemo v (23), velja tudi (24).

$$\left[\left(\frac{R_e}{X_e} \right)^2 + 1 \right] I_{t, im}^2 + \left[2 \frac{R_e}{X_e} \left(\frac{R_e}{X_e} Q_t - P_t \right) - \frac{1}{X_e} \right] I_{t, im} + \left(\frac{R_e}{X_e} Q_t - P_t \right)^2 - \frac{Q_t}{X_e} = 0 \quad (23)$$

$$I_{t, re} = - \left(\frac{R_e}{X_e} Q_t + \frac{R_e}{X_e} I_{t, im} - P_t \right) \quad (24)$$

Iz kvadratne enačbe (23) izračunamo tok $I_{t, im}$, katere rešitev sta dve vrednosti, običajno negativna in pozitivna. Izberemo ustrežnejšo, to je pozitivno. S pomočjo toka $I_{t, im}$ lahko iz (24) izračunamo $I_{t, re}$. Po določitvi I_t in \underline{V}_t izračunamo ostale veličine SS v ravnotežnem stanju s pomočjo klasičnega kazalčnega diagrama SS na način, ki je opisan v poglavju 3.4.

3.2 Pogoji togega omrežja: P_{∞}, Q_{∞} in \underline{V}_{∞}

Podane imamo vrednosti togega omrežja, ki so delovna (25) in jalova (26) moč, ki ju prejema togo omrežje ter fazor napetosti togega omrežja (1). V primerjavi z mešanimi robnimi pogoji je sedaj določitev veličin ravnotežnega stanja precej enostavna.

$$P_{\infty} = \Re \left\{ \underline{V}_{\infty} I_t^* \right\} \quad (25)$$

$$Q_{\infty} = \Im \left\{ \underline{V}_{\infty} I_t^* \right\} \quad (26)$$

Iz $\underline{V}_{\infty}, P_{\infty}$ in Q_{∞} lahko ob upoštevanju upornosti R_e in reaktance X_e povezovalnega voda določimo potreben fazor napetosti na statorskih sponkah (4) in fazor toka statorskega navitja (5). Izhodišče predstavlja kazalčni diagram, prikazan na sliki 2, na podlagi katerega zapišemo fazor napetosti na statorskih sponkah (7). Ob upoštevanju (1), (25) in (26) zapišemo delovno (27) in jalovo (28) moč, ki ju prejema togo omrežje.

$$P_{\infty} = V_{\infty, re} I_{t, re} + V_{\infty, im} I_{t, im} \quad (27)$$

$$Q_{\infty} = V_{\infty, im} I_{t, re} - V_{\infty, re} I_{t, im} \quad (28)$$

Enačbe (7), (8), (27) in (28) predstavljajo linearen sistem štirih enačb s štirimi neznankami. Ob upoštevanju (29) izrazimo iz enačb $I_{t, re}, I_{t, im}, V_{t, re}$ in $V_{t, im}$ in jih zapišemo v matrični obliki (30).

$$|\underline{V}_{\infty}|^2 = V_{\infty, re}^2 + V_{\infty, im}^2 \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} I_{t, re} \\ I_{t, im} \\ V_{t, re} \\ V_{t, im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{\infty, re}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & \frac{V_{\infty, im}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & 0 & 0 \\ \frac{V_{\infty, im}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & -\frac{V_{\infty, re}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & 0 & 0 \\ \frac{R_e V_{\infty, re} - X_e V_{\infty, im}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & \frac{R_e V_{\infty, im} + X_e V_{\infty, re}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & 1 & 0 \\ \frac{R_e V_{\infty, im} + X_e V_{\infty, re}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & \frac{-R_e V_{\infty, re} + X_e V_{\infty, im}}{|\underline{V}_{\infty}|^2} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\infty} \\ Q_{\infty} \\ V_{\infty, re} \\ V_{\infty, im} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Po določitvi \underline{V}_t in I_t izračunamo ostale veličine SS v ravnotežnem stanju s pomočjo klasičnega kazalčnega diagrama SS na način, ki je opisan v poglavju 3.4.

3.3 Pogoji SS: P_t, Q_t in \underline{V}_t

Podane imamo vrednosti SS, ki so delovna (2) in jalova (3) moč, ki ju SS oddaja v povezovalni vod in fazor napetosti na statorskih sponkah (6). V primerjavi z mešanimi robnimi pogoji je sedaj določitev veličin ravnotežnega stanja precej enostavna. Iz \underline{V}_t, P_t in Q_t ob upoštevanju upornosti R_e in reaktance X_e povezovalnega voda določimo fazor napetosti togega omrežja (1) in fazor toka statorskega navitja (5). Ponovno predstavlja izhodišče kazalčni diagram, prikazan na sliki 2, na podlagi katerega zapišemo fazor napetosti togega omrežja (31).

$$\underline{V}_{\infty} = \underline{V}_t - I_t R_e - j I_t X_e \quad (31)$$

Ob upoštevanju (4), (5) in (31) zapišemo realno (32) in imaginarno (33) komponento napetosti togega omrežja.

$$V_{\infty, re} = V_{t, re} - I_{t, re} R_e + I_{t, im} X_e \quad (32)$$

$$V_{\infty, im} = V_{t, im} - I_{t, im} R_e - I_{t, re} X_e \quad (33)$$

Ob upoštevanju (1), (2) in (3) zapišemo delovno (9) in jalovo (10) moč SS. Enačbe (9), (10), (32) in (33) predstavljajo linearen sistem štirih enačb s štirimi neznankami. Ob upoštevanju (34) izrazimo iz enačb $I_{t, re}, I_{t, im}, V_{\infty, re}$ in $V_{\infty, im}$ in jih zapišemo v matrični obliki (35).

$$|\underline{V}_t|^2 = V_{t, re}^2 + V_{t, im}^2 \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} I_{t, re} \\ I_{t, im} \\ V_{\infty, re} \\ V_{\infty, im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{t, re}}{|\underline{V}_t|^2} & \frac{V_{t, im}}{|\underline{V}_t|^2} & 0 & 0 \\ \frac{V_{t, im}}{|\underline{V}_t|^2} & -\frac{V_{t, re}}{|\underline{V}_t|^2} & 0 & 0 \\ \frac{-R_e V_{t, re} + X_e V_{t, im}}{|\underline{V}_t|^2} & \frac{-R_e V_{t, im} - X_e V_{t, re}}{|\underline{V}_t|^2} & 1 & 0 \\ \frac{-R_e V_{t, im} - X_e V_{t, re}}{|\underline{V}_t|^2} & \frac{R_e V_{t, re} - X_e V_{t, im}}{|\underline{V}_t|^2} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ Q_t \\ V_{t, re} \\ V_{t, im} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Po določitvi \underline{V}_{∞} in I_t izračunamo ostale veličine SS v ravnotežnem stanju s pomočjo klasičnega kazalčnega diagrama SS na način, ki je opisan v poglavju 3.4.

3.4 Določitev ostalih veličin SS

Ko imamo podane in izračunane vse potrebne veličine ravnotežnega stanja SS, ki so $\underline{V}_t, P_t, Q_t, I_t, R_e, X_e, \underline{V}_{\infty}, P_{\infty}$ in Q_{∞} , izračunamo še ostale veličine SS v ravnotežnem stanju s pomočjo klasičnega kazalčnega diagrama SS, ki je prikazan na sliki 4 [2].

Najprej izračunamo kolesni kot (36), kjer sta posamezni komponenti napetosti $E_{qa, im}$ in $E_{qa, re}$ določeni s (37) in (38).

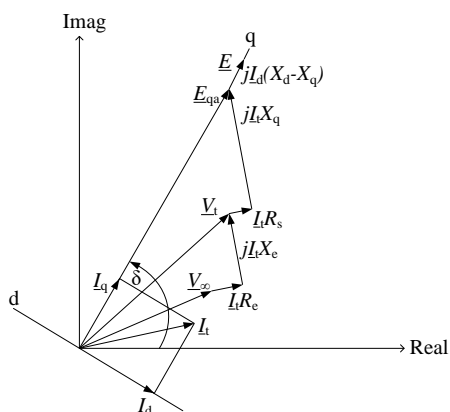
$$\delta = \frac{E_{qa, im}}{E_{qa, re}} \quad (36)$$

$$E_{qa, im} = V_{t, im} + R_s I_{t, im} + X_q I_{t, re} \quad (37)$$

$$E_{qa, re} = V_{t, re} + R_s I_{t, re} - X_q I_{t, im} \quad (38)$$

Skupna efektivna inducirana napetost statorja E_{qa} je določena z (39).

$$E_{qa} = \sqrt{E_{qa, re}^2 + E_{qa, im}^2} \quad (39)$$



Slika 4: Klasični kazalni diagram SS.

Skupno efektivno inducirano napetost zračne reže E zapišemo s (40), kjer sta posamezni komponenti E_{re} in E_{im} določeni z (41) in (42). Inducirane napetosti $E_{qa,im}$, $E_{qa,re}$, E_{qa} , E , E_{re} in E_{im} so posledica magnetne sklopljenosti SS.

$$E = \sqrt{E_{re}^2 + E_{im}^2} \quad (40)$$

$$E_{re} = E_{qa,re} - I_d (X_d - X_q) \cos \delta \quad (41)$$

$$E_{im} = E_{qa,im} - I_d (X_d - X_q) \sin \delta \quad (42)$$

Toka I_q in I_d izrazimo v matrični obliki (43).

$$\begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{t,re} \\ I_{t,im} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Podobno izrazimo tudi napetosti V_q in V_d (44).

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t,re} \\ V_{t,im} \end{bmatrix} \quad (44)$$

4 Primer izračuna ravnotežnega stanja SS

Obravnavan je SS s podatki iz tabele 1, kjer so: P_t in Q_t delovna in jalova moč SS, V_∞ napetost togega omrežja, R_e in X_e upornost in reaktanca povezovalnega voda, X_d in X_q reaktanci d in q osi SS, X_d' in X_d'' prehodna (tranzientna) in začetna (subtranzientna) reaktanca d osi SS, l_d in l_q sklopljeni reaktanci d in q osi SS, R_s , R_F , R_D in R_Q upornosti statorskega, vzbujalnega in dušilnega navitja d in q osi SS, H vztrajnostna konstanta, D dušenje, T_{d0}' prehodna časovna konstanta v praznem teku, ω_s električna sinhronska hitrost in $\cos \varphi$ faktor moči.

Za obravnavani SS so z metodo mešanih robnih pogojev izračunane veličine ravnotežnega stanja za primer $P_t = 1$ pu in $\cos \varphi = 0,85$. Rezultati so podani v tabeli 2.

Tabela 1: Podane veličine SS.

$P_t = 1$ pu	$Q_t = 0,6197$ pu	$V_\infty = 1$ pu
$R_e = 0,2$ pu	$X_d = 1,7$ pu	$X_q = 1,64$ pu
$X_d' = 0,245$ pu	$X_d'' = 0,185$ pu	$l_d = 0,15$ pu
$R_s = 0,001096$ pu	$T_{d0}' = 5,9$ s	$l_q = 0,15$ pu
$R_F = 0,000742$ pu	$R_D = 0,0131$ pu	$R_Q = 0,054$ pu
$X_e = 0,4$ pu	$D = 2$ pu	$H = 2,37$ s
$\omega_s = 2\pi 50$ s ⁻¹	$\cos \varphi = 0,85$	

Tabela 2: Izračunane veličine ravnotežnega stanja SS.

$V_t = 1,1723$ pu	$I_t = 1,0036$ pu	$\delta = 0,9379$ pu
$V_d = -0,6628$ pu	$V_q = 0,9670$ pu	$I_d = -0,9183$ pu
$I_q = 0,4047$ pu	$E_{re} = 1,4957$ pu	$E_{im} = 2,0388$ pu
$E = 2,5286$ pu	$E_{qa,im} = 1,4631$ pu	$E_{qa,im} = 1,9943$ pu
$E_{qa} = 2,4735$ pu		

5 Zaključek

Pri pregledu literature na področju izračunov ravnotežnih stanj SS nismo zasledili prispevkov, kjer so podrobneje predstavljene in opisane metode za izračun ravnotežnih stanj SS. Tako je glavni prispevek članka pregled in podrobnejši opis metod za izračun ravnotežnih stanj SS, ki so potrebna za natančen opis matematičnih modelov SS za analizo obratovalnih stanj. Obravnava je omejena na SS, priključen na neskončne zbiranke. Glede na podane veličine SS se uporabljajo različne metode za izračun ravnotežnih stanj SS. Ko imamo podane in izračunane vse potrebne veličine ravnotežnega stanja SS, je izveden še izračun ostalih veličin SS s pomočjo klasičnega kazalnega diagrama SS.

Sekundarni prispevek članka je izračun ravnotežnih stanj SS z metodo mešanih robnih pogojev. Reševanje sistema enačb za izračun realne in imaginarne komponente statorskega toka I_t SS je izvedeno s pomočjo dveh enačb krožnic. Rešitev takšnega sistema je odvisna od lege in polmera krožnic.

6 Literatura

- [1] J. Ritonja, M. Petrun: Matematični modeli sinhronskega generatorja. Ventil, let. 21, št. 5, str. 42-48, januar 2015.
- [2] P. M. Anderson, A. A. Fouad: Power System Control and Stability. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA. 1977.
- [3] P. Kundur: Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., New York. 1994.
- [4] J. Ritonja, M. Petrun, J. Černelič, R. Brezovnik, B. Polajžer: Analysis and Applicability of Heffron-Phillips Model. Elektronika in Elektrotehnika, let. 22, št. 4, str. 3-10, 2016.
- [5] J. Ritonja, B. Grčar, B. Polajžer: Mathematical models for design and synthesis of power system stabilizers. Proceedings of the 36th Chinese control conference, str. 2299-2304, Dalian, China, July 26-28, 2017.
- [6] J. Ritonja, B. Grčar: Applicability of linearized model of synchronous generator for power system stability analysis. International journal of energy and power engineering, let. 10, št. 11, str. 1361-1367, 2016.
- [7] W. G. Heffron, R. A. Phillips: Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. AIEE Transactions, let. 71, str. 692-697, 1952.
- [8] J. Ritonja: Izboljšanje dinamične stabilnosti sinhronskega generatorja s pomočjo adaptivnega modelno referenčnega vodenja. Doktorska disertacija, UM-FERI, 1996.