# HE ZLATOLIČJE – SINHRONIZACIJA AGREGATA NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM

## Aleš KIRBIŠ

## POVZETEK

Clanek v začetku podaja pomen in teoretične osnove sinhronizacije generatorja na elektroenergetsko omrežje. Uvodni teoriji sledi izdelava simulacijskega modela elektrarne v programskem paketu Matlab/Simulink in s pomočjo izvedenih simulacij analiza različnih vklopnih pogojev sinhronizacije generatorja na omrežje.

## ABSTRACT

Introducing part of this article explain meaning and theoretical basis of the synchronization of the synchronous generator to the electrical grid. On the basis of theoretical introduction the mathematical model of hydro power plant in Matlab/Simulink will be created. With the model the different switching conditions of synchronization on grid will be simulated and analyzed.

## 1. UVOD

Elektroenergetski sistem (EES) je sistem ali funkcionalna celota, ki ga tvorijo medsebojno funkcionalno povezani elementi sistema kot so: elektrarne, transformatorske postaje, stikališča, daljnovodi ter porabniki. Primarna dejavnost vsake elektrarne oziroma v njej vgrajenih agregatov je proizvodnja električne energije, ki jo preko transformacije pošiljamo v električno omrežje. Da lahko proizvedeno energijo pošiljamo v EES je elektrarno oziroma agregate z elektroenergetskim sistemom potrebno povezati oziroma sinhronizirati.

Vse elektrarne v elektroenergetskem sistemu obratujejo vzporedno, enako velja tudi za posamezne generatorje znotraj elektrarn. Dandanes skoraj ne srečamo več generatorjev, ki bi obratoval na svoji mreži, če pa že, so to generatorji malih moči, tako imenovani dizel agregati, ki služijo kot rezervno napajanje v primeru izrednih dogodkov.

Za razumevanje postopka sinhronizacije se bomo v nadaljevanju osredotočili samo na sinhronizacijo enega agregata na elektroenergetski sistem konstantne napetosti in frekvence, torej tako imenovano »togo« omrežje. Prikazani bojo pogoji, potrebni za varno in zanesljivo sinhronizacijo in način kako to zagotoviti. V teoretičnem delu bomo predstavili zahtevane pogoje sinhronizacije, podkrepljene s simulacijami v programskem orodju Matlab/Simulink. Na koncu bomo s pomočjo simulacijskega modela simulirali še različne nedovoljene pogoje sinhronizacije in pogledali kaj se dogaja v trenutku vklopa generatorskega odklopnika z generatorskimi tokovi in navorom.

Za izvedbo simulacijskega modela bomo uporabili parametre in priključitev kot velja za HE Zlatoličje, ki je priključena v 110 kV elektroenergetski sistem preko enega dvosistemskega daljnovoda v RTP Cirkovce.

# 2. SINHRONIZACIJA GENERATORJA NA OMREŽJE

Sinhronizacija generatorja je postopek, kjer se izvede paralelna priključitev sinhronskega generatorja na elektroenergetsko omrežje ali priključitev dveh ali več generatorjev med seboj. Gre za proces priključitve generatorja z njegovimi nazivnimi parametri (nazivno napetostjo in frekvenco) na sistem elektroenergetskega omrežja, kot nam to prikazuje poenostavljena shema na sliki 2.1:



Slika 2.1: Poenostavljena shema vključitve agregata na omrežje

Za vključitev agregata na elektroenergetsko omrežje je le-tega potrebno najprej zavrteti na nazivne vrtljaje  $n_N$ , ki jih podaja enačba (2.1) in vzbuditi z vzbujalnim tokom v skladu z enačbo (2.2):

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \tag{2.1}$$

$$i_f = \frac{v_f}{R_f} \quad , \tag{2.2}$$

kjer je:

f – frekvenca generatorja (s<sup>-1</sup>),

- p število polovih parov,
- $i_f$  enosmerni vzbujalni tok (A),
- $v_f$  enosmerna vzbujalna napetost (V).

Enosmerni vzbujalni tok preko drsnih obročev in rotorskih ščetk pošiljamo v rotorsko navitje generatorja in s tem ustvarjamo elektromagnetno polje, ki v statorskem navitju tvori izmenično magnetno polje, posledica katerega je izmenična napetost  $e_f$  v vseh treh fazah statorskega navitja:

$$e_f(t) = E_{fm} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_f) \quad (2.3)$$

kjer je:

 $E_{fm}$  – maksimalna izmenična inducirana napetost (V),  $\omega$  – krožna frekvenca oz. električna kotna hitrost (s<sup>-1</sup>),  $\varphi$  – fazni kot generatorske napetosti (rad).

Enako lahko zapišemo tudi za trenutno vrednost omrežne napetosti frekvence:

$$f_s = \frac{\omega_s}{2\pi} \tag{2.4}$$

in efektivne napetosti

$$v_s(t) = V_{sm} \cdot \sin(\omega_s t + \varphi_s) \quad , \tag{2.5}$$

kjer sta  $V_{sm} = \sqrt{2}V_s$  in  $E_{fm} = \sqrt{2}E_f$ .

Če želimo sinhronizirati generator z omrežjem ne da bi prišlo do tokovnega sunka, mora biti trenutna vrednost inducirane napetosti generatorja (2.3) enaka trenutni vrednosti napetosti omrežja (2.5).

Na osnovi te predpostavke lahko definiramo štiri pogoje, ki so potrebni za pravilno (idealno) sinhronizacijo generatorja na omrežje, in sicer:

- a) enaki vrednosti efektivnih napetosti  $E_f = V_s$ ,
- b) enaki frekvenci  $\omega_f = \omega_s$ ,
- c) enak fazni kot  $\varphi_f = \varphi_s$  oziroma  $\delta = 0$  in
- d) enak smisel vrtenja vrtilnih polj obeh sistemov (isto fazno zaporedje).

Sinhronizacija generatorja na omrežje se lahko izvede ročno ali avtomatsko, v obeh primerih pa je potrebno upoštevati zapisane pogoje oziroma težiti k doseganju le-teh, saj v nasprotnem primeru lahko pride do velikih izenačevalnih tokov in torzijskih navorov, ki lahko povzročijo deformacijo navitja in ukrivljenje ali celo lom generatorske osi.

Ob predpostavki, da gre za idealne razmere, lahko sliko 2.1 ponazorimo z nadomestnimi reaktancami in napetostnimi izvori, kot to prikazuje slika 2.2:



Slika 2.2: Električna shema vključitve agregata na omrežje

kjer so:

 $E_f$  – nazivna napetost generatorja (V),

- $V_S$  nazivna napetost omrežja (V),
- $X_d''$  subtranzientna reaktanca generatorja ( $\Omega$ ),
- $X_T$  nadomestna reaktanca transformatorja ( $\Omega$ ),
- $X_S$  nadomestna reaktanca omrežja ( $\Omega$ ),
- Q0 generatorski odklopnik.

Električno vezavo na sliki 2.2 v skladu z literaturo [1] poenostavimo s pomočjo Theveninovega theorema in napetostjo  $\Delta V$ , ki steče skozi generatorski odklopnik in nadomestno reaktanco, kot jo vidimo z mesta generatorskega odklopnika ob predpostavki, da je R = 0 in  $X_d^{"} = X_a^{"}$ .

Velikost električnega toka, ki steče v trenutku sinhronizacije lahko izračunamo s pomočjo napetosti  $\Delta V$  in nadomestnega kazalčnega diagrama na sliki 2.3:



Slika 2.3: Kazalčni diagram nadomestne vezave

Rezultirajočo napetost  $\Delta \underline{V}$  med napetostjo generatorja  $E_f$  in napetostjo omrežja  $V_s$  razdelimo na komponenti  $\underline{V_a}$  in  $\underline{V_b}$ , kot to prikazuje slika 2.3. Ker smo predpostavili, da je nadomestno vezje brez ohmskih upornosti, bo tok prehiteval napetost za  $\pi/2$ , kar pomeni, da bo napetost  $\Delta V_a$  v osi *a* povzročila tok komponente  $I_b$  v osi *b* in obratno.

Z upoštevanjem Theveninovega teorema in nadomestne vezave lahko tok  $i_{bm}$ , ki ga povzroči napetost  $V_a$  zapišemo kot:

$$i_{bm} = \frac{\Delta V_a}{x_d^{"}} = \frac{V_{sm} cos\delta - E_{fm}}{x_d^{"}} , \qquad (2.6)$$

kjer je  $x_d^{"} = X_d^{"} + X_T + X_S$ . Če opazujemo kazalčni diagram na sliki 2.3 vidimo, da napetost  $\Delta V_a$  deluje v a - osi.

Izmenična komponenta faznega toka  $I_b$  povzroči magnetno silo, ki se vrti s hitrostjo rotorja in je v fazi z magnetno silo vzbujalnega sistema. Ker sili delujeta v isto smer med njima ni faznega zamika, kar pomeni, da ne prihaja do elektromagnetnega navora.

Drugače je z enosmerno komponento faznega toka, ki nam povzroča stacionarno magnetno polje, ki deluje v nasprotni smeri rotorja. Posledično prihaja do faznega zamika med magnetnim pretokom rotorja in magnetnim poljem statorja, kar nam povzroči pulzirajoči električni navor.

$$\tau_I = -\frac{3}{2} \frac{1}{\omega} E_{fm} i_{bm} sin\omega t = -\frac{3}{\omega} \frac{E_f}{x_a} (V_s cos\delta - E_f) sin\omega t \quad .$$
(2.7)

Enako lahko zapišemo tudi za tok  $i_{am}$ , ki ga povzroči napetost  $V_b$  in deluje v b - osi:

$$i_{am} = \frac{\Delta V_b}{x_d^{"}} = \frac{V_{sm} sin\delta}{x_d^{"}} .$$
(2.8)

Tok  $\underline{i_{am}}$  povzroči elektromagnetno silo, ki se vrti skupaj z rotorjem in je usmerjena v smeri osi a. Rezultirajoča sila med silo, povzročeno zaradi toka  $\underline{i_{am}}$  in silo zaradi vzbujalnega magnetnega pretoka, nam da konstantni električni navor:

$$\tau_{II} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega} E_{fm} i_{bm} = \frac{3}{\omega} \frac{E_f \cdot V_s}{x_d} sin\omega t \quad .$$
(2.9)

Enosmerna komponenta faznega toka, ki ga povzroči komponenta napetosti  $\Delta V_b$ , nam povzroči konstantni magnetni pretok, premaknjen za  $\pi/2$  glede na magnetni pretok, ki ga povzroča napetostna komponenta  $\Delta V_a$  in skupaj tvorita pulzirajoči električni navor:

$$\tau_{III} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega} E_{fm} i_{bm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{3}{\omega} \frac{E_f \cdot V_s}{x_d^*} \sin\delta \cdot \cos\omega t \quad .$$
(2.10)

Omeniti velja, da ima izenačevalni tok v času sinhronizacije podobno obliko kot tok v primeru trifaznega kratkega stika s to razliko, da je lahko rezultirajoča subtranzientna reaktanca  $x_d^{"}$  dosti večja ali manjša od tiste pri trifaznem kratkem stiku, kar pa je odvisno od dejanskih vrednosti  $X_T$ ,  $X_S$  in  $\delta$ . Zapisano pomeni, da je lahko sinhronizacijski navor drugačen v primerjavi z navorom, ki nastopi pri trifaznem kratkem stiku, kar je predvsem posledica vpliva komponentne napetosti  $\Delta V_b$ .

Če združimo vse tri električne navore, opisane z enačbami (2.7), (2.9) in (2.10), dobimo skupni električni navor, ki je enak:

$$\tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} = \frac{3}{\omega} \left[ \frac{E_f \cdot V_s}{x_d^*} \sin\delta(1 - \cos\omega t) - \frac{E_f}{x_d^*} (V_s \cos\delta - E_f) \sin\omega t \right] .$$
(2.11)

Če namesto  $cos\delta$  pišemo  $1 - sin\delta \cdot tan \frac{\delta}{2}$ , lahko rezultirajoči navor iz enačbe (2.11) zapišemo kot:

$$\tau = \frac{3}{\omega} \left[ \frac{E_f \cdot V_s}{x_d} \sin\delta \left( 1 - \cos\omega t + \tan\frac{\delta}{2} \cdot \sin\omega t \right) + \frac{E_f (E_f - V_s)}{x_d} \sin\omega t \right] , \qquad (2.12)$$

pri čemer je

 $\tau$  – rezultirajoči električni navor (Nm).

Če pogledamo enačbo (2.12), lahko razberemo, da je velikost električnega navora zelo odvisna od trenutka vklopa generatorskega odklopnika oziroma od faznega kota  $\delta$  med generatorsko in omrežno napetostjo na sliki 2.3.

V primeru, da je generatorska napetost  $E_f \approx V_s$ , je drugi del enačbe (2.12) enako nič in električni navor nam opisuje trigonometrična enačba:

$$T_{\delta}(t) = \sin\delta\left(1 - \cos\omega t + \tan\frac{\delta}{2} \cdot \sin\omega t\right) \quad . \tag{2.13}$$

Iz (2.13) vidimo, da je navor  $T_{\delta}(t)$  dejansko odvisen samo od fazne razlike med generatorsko in mrežno napetostjo.

Zapišimo enačbo (2.12) v odvisnosti od časa v programskem paketu Matlab, kot je to prikazano v prilogi A te naloge. S pomočjo zapisanega programa dobimo izrise na sliki 2.4, ki nam prikazujejo različne vrednosti navora pri različnem kotu  $\delta$  v skladu s sliko 2.3.

Iz slike 2.4 je razvidno, da maksimalni navor ustreza fazni razliki med mrežno in generatorsko napetostjo za kot  $\delta = 2\pi/3$  in ne za kot  $\delta = \pi$ , ko nastopajo maksimalni tokovi. Navor v odvisnoti kota  $\delta$ 



Slika 2.4: Električni navor v odvisnosti od kota  $\delta$ 

Slika 2.4 nam dokazuje odvisnost električnega navora od kolesnega kota  $\delta$  v skladu s sliko 2.3. Iz slike vidimo, da največji navor nastopi v primeru, če so fazne napetosti med seboj zamaknjene za  $\delta = 120^{\circ}$  električnih stopinj in ne v trenutku, ko je kot med napetostjo generatorja in mreže maksimalen torej  $\delta = 180^{\circ}$ .

Razlog, da je temu tako, je v komponentah rezultirajočega toka (2.6) in (2.8), ki se glede na kot med omrežno in generatorsko napetostjo med sabo seštevata ali odštevata.

## 2.1 Analiza sinhronizacije generatorja na omrežje

Za simulacijo sinhronizacije generatorja na omrežje pri različnih vklopnih pogojih generatorskega odklopnika –Q0 na osnovi enopolne sheme elektrarne na sliki 2.5 izdelajmo simulacijski model v programskem orodju Matlab/Simulink, kot nam to prikazuje slika 2.6.



Slika 2.5: Poenostavljena enopolna shema elektrarne HE Zlatoličje



Slika 2.6: Simulacijski model za izvedbo analize sinhronizacije agregata na omrežje

Za analizo različnih zapisanih pogojev sinhronizacije izhajajmo iz predpostavk za idealno sinhronizacijo, kot smo že zapisali zgoraj in sicer:

- e) enaki vrednosti efektivnih napetosti  $E_f = V_s$ ,
- f) enaki frekvenci  $\omega_f = \omega_s$ ,
- g) enak fazni kot  $\varphi_f = \varphi_s$  oziroma  $\delta = 0$  in
- h) enak smisel vrtenja vrtilnih polj obeh sistemov (isto fazno zaporedje)

Za doseganje različnih simulacijskih pogojev bomo spreminjali veličine kot so napetost  $V_s$ , frekvenca  $\omega_s$  in fazni kot  $\varphi_s$  v bloku omrežja na sliki 2.7, ter generatorske napetosti  $E_f$  v generatorskem bloku na sliki 2.8. Na osnovi različnih vhodnih parametrov bomo nato opazovali vklopne veličine generatorske napetosti, toka in navora v trenutku vklopa odklopnika –Q0.

Block Parameters: RTP Cirkovce 110 kV 4913 MVA X				
Three-Phase Source (mask) (link)				
Three-phase voltage source in series with RL branch.				
Parameters	Load Flow			
Phase-to-phase rms voltage (V):				
117e3				
Phase angle of phase A (degrees):				
120				
Frequency (Hz):				
50				
Internal connection: Yg				
Specify impedance using short-circuit level				
3-phase short-circuit level at base voltage(VA):				
4913e6				
Base voltage (Vrms ph-ph):				
117e3				
X/R ratio:				
3.387				
	ОК	Cancel	Help	Apply

Slika 2.7: Blok 110 kV omrežja

📔 Block Parameters: Sinhronski generator 85 MVA 10 kV, cosfi=0,9 4908 A 🛛 🗙				
Synchronous Machine (mask) (link)				
Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.				
Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.				
Configuration Parameters Advanced Load Flow				
Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]:				
[85E6 10000 50]				
Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl ] (pu):				
[ 1.13, 0.332, 0.234, 0.69, 0.269, 0.251 ]				
d axis time constants: Short-circuit				
q axis time constants: Short-circuit				
Time constants [ Td' Td'' Tq'' ] (s):				
[1.63 0.06 0.023]				
Stator resistance Rs (pu):				
0.00359				
Inertia coeficient, friction factor, pole pairs [ H(s) F(pu) p()]:				
[3.4 0.16 24]				
Initial conditions [ dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu) ]:				
[0000001]				
Simulate saturation				
OK Cancel Help Apply				

Slika 2.8: Blok sinhronskega generatorja HE Zlatoličje

### Idealna sinhronizacija

O idealni sinhronizaciji govorimo, ko so izpolnjeni pogoji  $E_f = V_s$ ,  $\omega_f = \omega_s$ ,  $\varphi_f = \varphi_s$  kar pomeni, da je kot  $\delta$  med napetostima  $E_f = V_s$  enak 0° in v skladu z enačbama (2.6) in (2.8) ne pride do nobenih izenačevalnih tokov oz. bodo le-ti zanemarljivo majhni. Če želimo doseči zapisane pogoje, je potrebno v simulacijska bloka na sliki 2.7 in 2.8 vpisati nazivne podatke, in sicer  $E_f = 10$  kV,  $V_s = 117$  kV,  $\omega_f = \omega_s = 50$  Hz,  $\varphi_f = \varphi_s = 0^\circ$ . Ker lahko fazni zamik na simulacijskem modelu simuliramo v samo v bloku omrežja slik 2.7, je potrebno zaradi narave modela transformatorskega bloka na sliki 2.6, v polje bloka omrežja »Phase angle of phase A« vpisati vrednost 120°, da bosta imeli napetosti generatorja in omrežja na 10 kV strani isti fazni zamik.

Ob upoštevanju zgoraj zapisanih pogojev za idealno sinhronizacijo dobimo v trenutku vklopa generatorskega odklopnika t=0.05 s dobili odzive, kot jih prikazuje slika 2.9:



Slika 2.9: Vklop generatorskega odklopnika v času t = 0.05 s

Slika 2.9 nam prikazuje potek napetosti, toka in električnega navora v trenutku vklopa generatorskega odklopnika t=0.05 s. Iz odzivov vidimo, da ne pride do udarnih tokov ali električnega navora. Sicer vidimo rahlo nihanje, vendar pa so vrednoti toka in napetosti predstavljene v tisočinkah enotinih vrednoti. Tak odziv je tudi pričakovan, saj velja  $\Delta V$  med generatorsko in omrežno napetostjo enako nič.

#### Sinhronizacija generatorja pri različni frekvenci

V primeru, da frekvenca generatorja  $f_f$  ni enaka frekvenci omrežja  $f_s$ , bo prišlo med omrežno in generatorsko napetostjo do diferenčne napetosti  $\Delta V$ , ki jo ob upoštevanju ostalih pogojev  $E_f = V_s$ , ,  $\varphi_f = \varphi_s$  in enačb (2.3) in (2.5) lahko zapišemo kot:

$$\Delta \underline{V} = e_f - v_s = 2E_f \cos\left(\pi \frac{f_f + f_s}{2}t\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{f_f - f_s}{2}t\right) \quad . \tag{2.14}$$

Rezultat enačbe (2.14) je rezultirajoča napetost, katere velikost določa produkt nihanja s srednjo frekvenco  $\frac{f_f+f_s}{2}$  in utripanja  $\frac{f_f-f_s}{2}$ . V primeru, da bo  $f_f \neq f_s$  bomo dobili diferenčno napetost enako 2 ·  $E_f$ , kot to prikazuje slika 2.10:



Slika 2.10: Razlika napetosti  $\Delta V = e_f - v_s$  pri sinhronizaciji agregata, če napetosti niso enake

Slika 2.10 nam torej prikazuje potek rezultirajoče napetosti za primer, ko je frekvenca omrežja  $f_s$  za 1 % večja kot je frekvenca generatorja  $f_f$ . Velja tudi obratno.

Simulirajmo sedaj kaj se dogaja v trenutku vklopa generatorskega odklopnika -Q0, ko frekvenca omrežja in frekvenca generatorja nista enaki. Kot smo videli že na sliki 2.10, rezultirajoča napetost niha od vrednosti nič do  $2 \cdot E_f$ , enako velja tudi za rezultirajoči tok, kar pomeni, da bo v primeru, da rezultanta tokov ne bo nič, pride do diference med napetostima in posledično do udarnih tokov, katerih velikost bo odvisna od reaktance  $x_d^{"}$  in velikosti diferenčne napetosti  $\Delta V$ .

Primer, ko frekvenca generatorja ni enaka frekvenci omrežja nam prikazuje slika 2.11.



Slika 2.11: Potek tokov in navora v trenutku vklopa odklopnika, ko je frekvenca generatorja 50,5 Hz

Slika 2.11 prikazuje razmere ko je generatorska frekvenca 50,5 Hz oziroma za 1 % višja od frekvence omrežja. Vidimo, da sta se sedaj tok in napetost povečala in znašata približno polovice nazivnih vrednosti.

Glede na izkušnje pri spuščanju generatorjev v pogon in priporočila iz literature [2] je maksimalna dovoljena meja odstopanja frekvence  $\pm 0,2$  %. Če to mejo vnesemo v simulacijski model, dobimo na sliki 2.12 prikazane še dovoljene udarne tokove in električni navor.



Slika 2.12: Napetost, tok in navor pri maksimalno dovoljenem odstopanju frekvence ±0,2 %

### Sinhronizacija agregata pri različni napetosti

Ponovno lahko izhajamo iz enačbe (2.14) in ob upoštevanju pogojev  $E_f \neq V_s$ ,  $\omega_f = \omega_s$ ,  $\varphi_f = \varphi_s$  zapišemo, da je:

$$\Delta \underline{V} = e_f - v_s = (E_{fm} - V_{sm}) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad . \tag{2.15}$$

Rezultat enačbe (2.15) je ponovno razlika napetosti, katere velikost je odvisna samo od razlike napetosti obeh sistemov. V večini primerov je razlika med napetostjo generatorja in omrežja relativno mala, zato tudi v primeru, da razlika napetosti presega dovoljene vrednosti  $\pm 1$  %, kot jih priporoča literatura [2], ne bo prišlo do velikih udarnih tokov in posledično tudi ne do velikih navorov.



Slika 2.14: Potek navora in tokov pri fazni razliki napetosti $+10~\%~U_n$ 



Slika 2.15: Potek navora in tokov pri priporočeni fazni razliki napetosti  $+1 \% U_n$ 

Slike 2.13, 2.14 in 2.15 nam prikazujejo udarne tokove in navor za prime, ko je razlika med mrežno in generatorsko napetostjo  $+5 \% U_n$ ,  $+10 \% U_n$  in  $+1 \% U_n$ . Iz slik vidimo, da so tokovi in napetosti pri razliki 1% še relativno mali oziroma v mejah dovoljenega glede na priporočila iz dokumentacije [2], da pa pri razliki 5 % oziroma 10 % narastejo za faktor 5 oziroma 10 krat v primerjavi s tokovi in navorom pri 1% razliki napetosti.

### Sinhronizacija pri različnem faznem kotu

Za simulacijo različnega faznega kota si kot prvo še enkrat poglejmo enačbo (2.12) in upoštevajmo pogoje  $E_f = V_s$ ,  $\omega_f = \omega_s$  in  $\Delta \delta = \varphi_f - \varphi_s$ .

Že na sliki 2.4 smo videli, da maksimalni navor nastopa, ko je fazni kot med omrežno in generatorsko napetostjo enak  $\Delta \delta = 120^{\circ}$ .

Velikost tokov in električni navor pri še dovoljeni fazni razliki  $\Delta \delta = \pm 10^{\circ}$  prikazuje slika 2.16. Poglejmo si še potek in velikost tokov in navora v primeru, ko je fazna razlika  $\Delta \delta = 120^{\circ}$ , kar prikazuje slika 2.17 in fazna razlika  $\Delta \delta = 180^{\circ}$ , kar prikazuje slika 2.18.







Slika 2.17: Potek toka in navora pri fazni razliki med omrežno in generatorsko napetostjo $\Delta\delta{=}{\pm}120^{\circ}$ 



Slika 2.18: Potek toka in navora pri fazni razliki med omrežno in generatorsko napetostjo za  $\Delta \delta = \pm 180^{\circ}$ 

Simulacije na slikah 2.16, 2.17 in 2.18 nam prikazujejo potek udarnih tokov in navora, pri fazni razliki med generatorsko in omrežno napetostjo za 10°, 120° in 180°. Če primerjamo sedaj sliki 2.17 in 2.18 vidimo, da je navor pri 120° približno 8,6 kratnik nazivnega navora medtem ko je navor pri fazni razliki napetosti 180° nekoliko manjši in znaša približno 7,2 pu. Iz navedenega res vidimo, da je najneugodnejši primer sinhronizacije v primeru, ko imamo fazno razlika med generatorsko in omrežno napetostjo 120°, kar potrjuje tudi slika 2.6.

Iz posamezni simulacij je moč videti, da je sinhronizacija agregata ena izmed pomembnejših faz v postopku preizkušanja agregata, saj lahko v primeru napačne vezave opreme ali napačne interpretacije podatkov pripelje do zelo velikih udarnih tokov in navorov, ki nam lahko na navitju statorja ali rotorja naredijo precejšno škodo, lahko pa pripeljejo tudi do loma generatorske gredi.

## 2.2 Načini sinhronizacije

Pred samim procesom sinhronizacije, je zato izjemnega pomena, da preverimo pravilnost vezave celotnega sistema. Predvsem se moramo osredotočiti na pravilno fazno zaporedje obeh sistemov (mreže in generatorja), na pravilno vezavo napetostnih transformatorjev, sinhronizacijske garniture itn. To dosežemo z izvede tako imenovanega sklopnega preizkusa, kjer generator zavrtimo na nazivne vrtljaje, na slika 2.5 vključimo odklopnika –Q0 na 10 kV in 110 kV strani ob izključenem 110 kV ločilniku –Q1 in izvedemo kontrolo vseh merilnih

instrumentov, ki so merodajni za izvedbo kontrole sinhronizacije (sinchrontact in merilno garnituro).

Za doseganje zgoraj omejenih pogojev obstajajo dandanes precej zapletene in avtomatske naprave, ki so dobre tako dolgo dokler so zanesljive. Da pa so lahko zanesljive je potrebno sistem temu primerno pripraviti in preizkusiti.

V praksi še vedno velja pravilo, da se prva sinhronizacija izvede ročno, kar pomeni da je človek tisti, ki izvrši vklop generatorskega odklopnika in sinhronizira generator z omrežjem.

Za uspešno sinhronizacijo je zato potrebno upoštevati zgoraj naštete pogoje; enakih napetosti, frekvenc, faznega kota ter vrtilnega polja. Zadnji pogoj bo vedno izpolnjen če bomo zagotovili enako zaporedje faz generatorske in mrežne napetosti.

To pomeni, če je zaporedje faz mrežne napetosti L1-L2-L3 morajo biti faze generatorja spojene na sledeč način; U-V-W, V-W-U ali W-U-V. Vse te tri vezave dajo enako smer vrtenja generatorskega vrtilnega polja in odgovarjajo smeri vrtenja vrtilnega polja mreže, ki ima fazno zaporedje L1-L2-L3. V primeru, da smeri vrtenja vrtilnih polj nista enaki, je potrebno zamenjati dve fazi med seboj, ki pa sta lahko generatorski ali mrežni.

# 3. VIRI, LITERATURA

- [1] J. Machowski, J. Bialek in J. R. Bumby, Power System Dinamics and Stability, Second Edition, England: JOHN WILLEY & SONS, 2008.
- [2] M. Hardi in W. Zimmerli, Synchrotact 5, SYN5201, Turgi, Schweiz: ABB, 2000.

## NASLOV AVTORJEV

Aleš Kirbiš, univ.dipl.inž.el. Elektronska pošta: kirbis.ales@gmail.com

### Priloga A

% Izračun električnega navora f=50; w=2\*pi\*f

delta=pi/6; delta1=pi/3; delta2=pi/2; delta3=2\*pi/3; delta4=5\*pi/6; delta5=pi;

for x= 1 : 2000 t=x/50000; s(x)=t;

```
\begin{split} T(x) &= \sin(delta)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta/2)^* \sin(w^*t)); \\ T1(x) &= \sin(delta1)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta1/2)^* \sin(w^*t)); \\ T2(x) &= \sin(delta2)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta2/2)^* \sin(w^*t)); \\ T3(x) &= \sin(delta3)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta3/2)^* \sin(w^*t)); \\ T4(x) &= \sin(delta4)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta4/2)^* \sin(w^*t)); \\ T5(x) &= \sin(delta5)^*(1 - \cos(w^*t) + \tan(delta5/2)^* \sin(w^*t)); \\ end \end{split}
```

plot(s,T,s,T1,s,T2,s,T3,s,T4,s,T5)

grid xlabel('t [s]') ylabel('Navor [pu]') title('Velikost navora v odvisnoti kota Delta') legend('tau(pi/6)','tau1(pi/3)','tau2(pi/2)','tau3(2pi/3)','tau4(5pi/6)', 'tau5(pi)