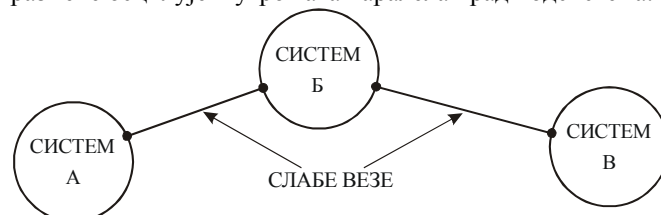


СТАБИЛНОСТ БРЗИНЕ СИНХРОНЕ МАШИНЕ КОЈА НАПАЈА ПОТРОШАЧ ТИПА КОНСТАНТНЕ СТРУЈЕ И ТИПА КОНСТАНТНЕ СНАГЕ

Милорад Бједов, *Електротехничка школа "Никола Тесла", Београд*
 Миленко Ђурић, *Електротехнички факултет, Београд*

Садржај – Рад анализира стабилност брзине синхроног генератора који напаја пасивну потрошњу типа константне струје и поседује двоканални регулатор побуде по напону и брзини као и генератора који напаја пасивну потрошњу типа константне снаге. За први случај су изведене релације које повезују момент електромагнетских сила генератора, брзину генератора и основне параметре побудног регулатора. Оне омогућавају избор параметара побудног регулатора којим се постиже стабилна брзина генератора. Значај изведених релација огледа се у могућности њихове примене у реалним вишемашинским системима, са slabим везама, за анализу стабилности брзине генератора и избор параметара побудних регулатора којима се брзине машина стабилизују, а тиме и цео електроенергетски систем. Иста анализа је спроведена и у случају потрошача типа константне снаге.

чак немогућ. Стабилност брзине машина у сваком од повезаних подсистема (сл.1) битно утиче на рад целог система, јер слаба међусобна веза не обезбеђује довољне синхронизационе моменте, те кроз спојне водове снага размене осцилује и угрожава паралелан рад подсистема.



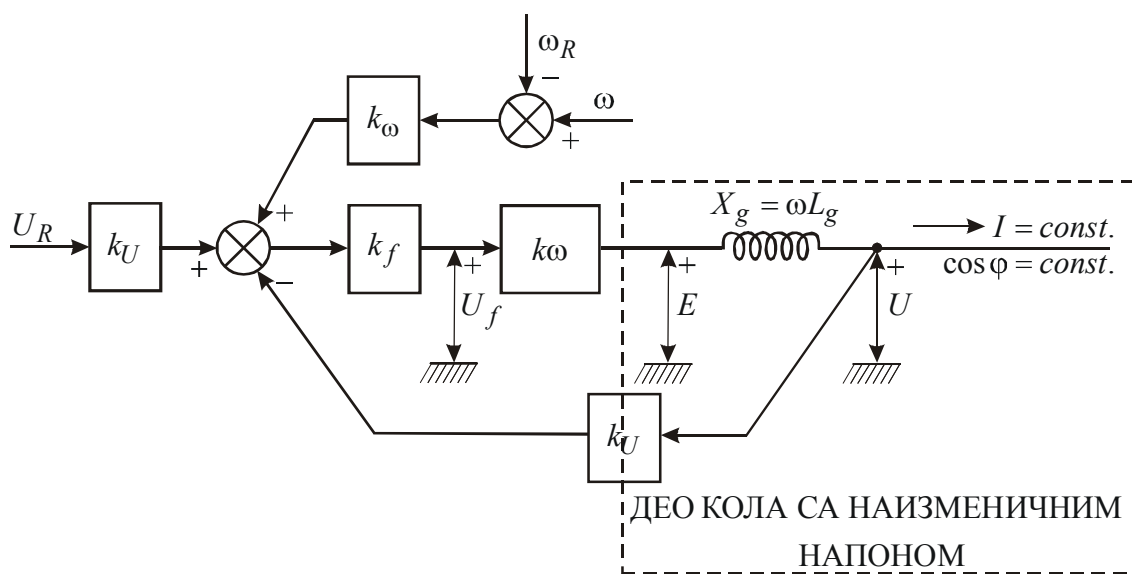
Сл.1. Електроенергетски систем који се састоји од три слабо повезана подсистема

1. УВОД

Стабилност електроенергетских система у смислу одржања синхронизма, обрађена је у великом броју референци. Али, стабилност брзине генератора који ради у острвском режиму и напаја потрошњу типа константне струје слабо је анализирана у литератури. Овај тип стабилности машине, на први поглед изгледа неважан, јер мале промене брзине, у таквом режиму, не изазивају никакве практичне проблеме. Али, када у електроенергетском систему са slabим везама неке машине имају нестабилне брзине, унутар својих подсистема, паралелан рад целог система је отежан или

2. МОМЕНТ ГЕНЕРАТОРА СА ПОБУДНИМ РЕГУЛАТОРОМ КОЈИ НАПАЈА ПОТРОШАЧ КОНСТАНТНЕ СТРУЈЕ

Ради једноставније анализе посматра се турбогенератор (g) (јер се може еквивалентирати само синхроним реактансом) који напаја потрошач константне струје. Случај када (g) напаја потрошач константне импедансе обрађен је у [1] и [2]. Овде се анализира (g) са двоканалним побудним регулатором, који побуду регулише по напону и брзини (сл.2). Основна претпоставка је да се посматра (g) са променљивом брзином, која се може разликовати од синхроне, али која се мења веома споро (због малих момената убрзања и велике инерције обртних маса агрегата). Зато се (g) може заменити синхроним реактансом а побудни регулатор чистим појачањима у одговарајућим каналима.



Сл.2. Генератор са побудним регулатором који напаја потрошач константне струје

На сл.2 су:

$I = const.$, и $\cos \varphi = const.$ (претпостављено је да су струја и фактор снаге потрошача константни и независни од напона и фреквенције) при чему је $I = \sqrt{3}I_f$ рачунска струја а I_f – фазна струја,

ω – угаона учестаност,

U – међуфазни напон (g) и потрошача,

X_g, L_g – синхрона реактанса и индуктивност (g),

E – међуфазна ЕМС (g),

k_U – појачање у грани повратне спреге по напону,

$$k\omega = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{M_d}{R_f} \omega \text{ – напонско појачање (g),}$$

M_d – међусобна индуктивност побуда–статор,

R_f – отпор побудног намотаја,

k_f – појачање побудног регулатора,

U_f – побудни напон,

U_R – референтни напон,

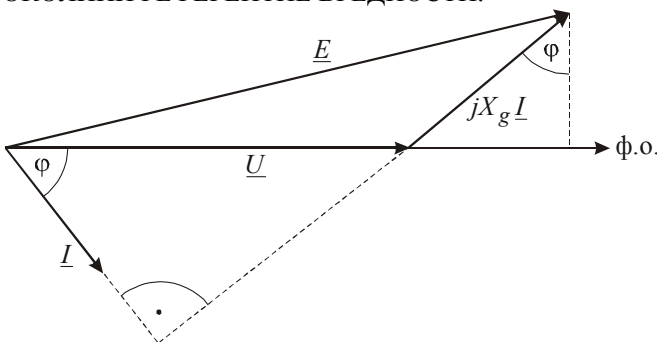
ω_R – референтна брзина (угаона учестаност),

k_ω – појачање у грани повратне спреге по брзини.

Електромоторна сила (g) је:

$$E = k\omega U_f = k\omega k_f [k_U(U_R - U) + k_\omega(\omega - \omega_R)]. \dots \dots \dots (1)$$

Повратна спрега по (ω) у пракси није крута, већ се остварује преко диференцијалног ускладника са великом временском константом (10–15)s. Зато члан $k_\omega(\omega - \omega_R)$ не утиче на стационарну вредност електромоторне силе. Када се посматра спора промена (ω) важи релација (1) али САМО ЗА УЗАК ОПСЕГ ПРОМЕНЕ (ω) У ОКОЛИНИ РЕФЕРЕНТНЕ ВРЕДНОСТИ.



Сл.3. Векторски дијаграм генератора

Вежа између комплексних вредности напона и електромоторне силе (g) је:

$$\underline{E} = \underline{U} + jX_g \underline{I} = U + jX_g (I \cos \varphi - jI \sin \varphi) = U + X_g I \sin \varphi + jX_g I \cos \varphi$$

Вежа између модула напона и електромоторне силе је:

$$E^2 = (U + X_g I \sin \varphi)^2 + (X_g I \cos \varphi)^2 = (U + \omega L_g I \sin \varphi)^2 + (\omega L_g I \cos \varphi)^2 \dots \dots \dots (2)$$

Квадрирањем (1) и заменом у (2) добија се:

$$F(U) = (U + \omega L_g I \sin \varphi)^2 + (\omega L_g I \cos \varphi)^2 - k^2 k_f^2 \omega^2 [k_U(U_R - U) + k_\omega(\omega - \omega_R)]^2 = 0 \dots \dots \dots (3)$$

односно, након сређивања:

$$F(U) = (a^2 \omega^2 - 1)U^2 - 2[a(aU_R + b\Delta\omega)\omega + L_g I \sin \varphi] \omega U + [(aU_R + b\Delta\omega)^2 - L_g^2 I^2] \omega^2 = 0 \dots \dots \dots (4)$$

где је: $a = k k_f k_U$, $b = k k_f k_\omega$, и $\Delta\omega = \omega - \omega_R$. Решавањем

(4) по (U) добија се зависност $U(\omega)$:

$$U(\omega) = \frac{1}{a^2 \omega^2 - 1} \left\{ \omega [a(aU_R + b\Delta\omega)\omega + L_g I \sin \varphi] \pm \sqrt{(aU_R + b\Delta\omega + \omega L_g I \sin \varphi)^2 + (a^2 \omega^2 - 1)(L_g I \cos \varphi)^2} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

Активна снага (g) је: $P(\omega) = U(\omega)I \cos \varphi \dots \dots \dots (6)$

Момент електромагнетских сила је:

$M(\omega) = P(\omega)/\omega = U(\omega)I \cos \varphi / \omega$, односно,

$$M(\omega) = \frac{1}{a^2 \omega^2 - 1} \left\{ \omega [a(aU_R + b\Delta\omega)\omega + L_g I \sin \varphi] \pm \sqrt{(aU_R + b\Delta\omega + \omega L_g I \sin \varphi)^2 + (a^2 \omega^2 - 1)(L_g I \cos \varphi)^2} \right\} I \cos \varphi \dots (7)$$

Због раније објашњених разлога напон (U) из (5) може се одређивати само за брзине (ω) које се мало разликују од референтне. Такође, постоји још једно ограничење. Струја потрошача НЕ МОЖЕ БИТИ ВЕЋА ОД СТРУЈЕ КРАТКОГ СПОЈА ГЕНЕРАТОРА, односно, мора бити: $E > \omega L_g I$ или $k k_f [k_U(U_R - U) + k_\omega(\omega - \omega_R)] > L_g I$, тј., $I < k k_f [k_U(U_R - U) + k_\omega(\omega - \omega_R)] / L_g$. Разматрамо два случаја: (g) без регулације побудног напона (са константним побудним напоном) и (g) са регулацијом побудног напона. Код (g) без регулације побудног напона је: $E = k\omega U_f$, те се (3) своди на:

$$F(U) = (U + \omega L_g I \sin \varphi)^2 + (\omega L_g I \cos \varphi)^2 - k^2 \omega^2 U_f^2 = 0,$$

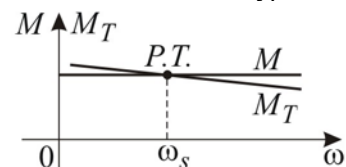
одакле следи:

$$U(\omega) = \omega \left[\sqrt{k^2 U_f^2 - I^2 L_g^2} + I^2 L_g^2 \sin^2 \varphi - I L_g \sin \varphi \right].$$

Момент машине, за $U_f = const.$, је:

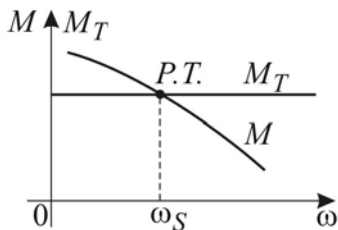
$$M(\omega) = P(\omega)/\omega = U(\omega)I \cos \varphi / \omega = \left[\sqrt{k^2 U_f^2 - I^2 L_g^2} + I^2 L_g^2 \sin^2 \varphi - I L_g \sin \varphi \right] I \cos \varphi,$$

односно, не зависи од брзине. Код (g) са константним побудним напоном може се нацртати крива момента $M(\omega)$ у функцији брзине за велики опсег промене брзине (од 0 до брзине знатно веће од синхроне) слично као у [1]. Момент реалних турбина обично благо опада са порастом брзине. Зато је брзина у радној тачки агрегата стабилна ако (g) без побудног регулатора напаја потрошач константне струје (сл.4). У сваком конкретном случају стабилност брзине агрегата зависи од карактеристике момента погонске турбине.



Сл.4. Радна тачка (g) и турбине код које момент опада са порастом брзине

У случају (g) са регулацијом побудног напона приказивање криве момента $M(\omega)$, односно, функције (7) за шири опсег брзине (ω), нема смисла, јер се при брзинама знатно различитим од синхроне, јављају неприхватљиво велики сигнали грешке у побудном регулатору. Њих би, у реалним условима, кола за ограничење свела на дозвољену меру. Зато анализа релације (7), без узимања кола за ограничење у обзир, има смисла само у уском опсегу промене брзине у околини синхроне. Од интереса је утврдити промену момента (7), при промени брзине (ω) блиској ω_S . Као критеријум не можемо користити знак првог извода релације (7), као што је то учињено у [1] и [2], из разлога сложености добијеног израза за први извод. Промену момента ћемо одредити заменом вредности за (ω) у (7) које су блиске ω_S при $\omega_R = \omega_S$ (јер је канал по брзини активан само ако брзина одступи од синхроне), одакле следи $\Delta\omega_S = \omega_S - \omega_R = 0$ и потом израчунавањем одговарајућих вредности за $M(\omega)$. Ради тога задајемо параметре машине и потрошача: $L_g = 1,7$ r.j., $k = 1000$ r.j., $I = 1$ r.j., $\cos\varphi = 0,9$ и $k_U = 0,002$ r.j. При $\omega = \omega_S$ и $U = U_n = 1$ r.j. добијамо заменом у (2) $E = 2,32$ r.j. Из (1), при $\omega = \omega_S$ ($\omega_R = \omega_S$) следи $k_f = E/[k\omega_S k_U (U_R - U)]$ па усвајајући $U_R = 1,1$ r.j. добијамо да је $k_f = 11,6$ r.j. Разматраћемо следеће вредности за (ω): $\omega = \omega_S$, $\omega = 0,98\omega_S$ и $\omega = 1,02\omega_S$ као довољно блиске ω_S . Заменом у (7) одређујемо: $M(\omega_S) = 1,0862$ r.j., $M(0,98\omega_S) = 1,1091$ r.j. и $M(1,02\omega_S) = 1,0642$ r.j. Цртањем добијених зависности добијамо график зависности $M(\omega)$ за вредности (ω) које су блиске ω_S као на сл.5.



Сл.5. Радна тачка (g) и турбине кад момент опада са порастом брзине

Приликом ових израчунавања ограничење по струји није нарушено јер је $I = 1$ r.j. $< k k_f [k_U (U_R - U) + k_\omega (\omega - \omega_R)] / L_g = 1000 \cdot 1,6 \cdot [0,002(1,1 - 1)] / 1,7 = 1,365$ r.j.

Видимо да је $dM/d\omega < 0$, односно, при повећању (ω) момент машине се смањује, те је ПРИГУШНИ МОМЕНТ НЕГАТИВАН, односно, пригушење је негативно, што значи да је брзина агрегата нестабилна ако је погонски момент приближно константан (сл. 5).

Нека је потребно ради компензације негативног пригушења, које је изазвано напонском регулацијом одредити појачање (k_ω) у каналу регулатора побуде по брзини. Поменуто појачање одређујемо из следећег услова: $M(\omega_S, k_\omega = 0) = M(\omega_S + \Delta\omega, k_\omega \neq 0)$. У том циљу полазимо од (7). Будући да се у b садржи непозната k_ω

(7) прво решавамо по b претходно стављајући са леве стране $M(\omega) = M(\omega_S)$. Први корак приликом решавања (7) је:

$$\underbrace{\mu(a^2\omega^2 - 1) - a^2U_R\omega - L_g I \sin\varphi}_{\alpha} = ab\omega\Delta\omega - \sqrt{\underbrace{(\omega a L_g I \sin\varphi + aU_R + b\Delta\omega)^2}_{\beta} + \underbrace{(a^2\omega^2 - 1)(L_g I \cos\varphi)^2}_{\gamma}}$$

где су привремено уведене ознаке α , β , γ и

$M(\omega_S)/(I \cos\varphi) = \mu$ у оквиру ознаке за α . Потом следи:

$$\sqrt{(\beta + b\Delta\omega)^2 + \gamma} = ab\omega\Delta\omega - \alpha / 2.$$

Након квадрирања и сређивања добијамо:

$$(\Delta\omega)^2(a^2\omega^2 - 1)b^2 - 2\Delta\omega(\beta + a\alpha\omega)b + \alpha^2 - \beta^2 - \gamma = 0,$$

одакле решавањем долазимо до:

$$b_{1,2} = \frac{\beta + a\alpha\omega \pm \sqrt{(\beta + a\alpha\omega)^2 - (a^2\omega^2 - 1)(\alpha^2 - \beta^2 - \gamma)}}{(a^2\omega^2 - 1)\Delta\omega} \quad (8)$$

Уклањањем ознака за α , β , и γ из (8) долазимо до:

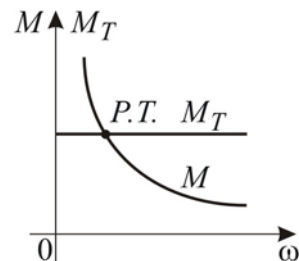
$$b_{1,2} = \frac{1}{\Delta\omega} \left[a(\mu\omega - U_R) \pm \sqrt{L_g^2 I^2 + 2L_g \mu I \sin\varphi + \mu^2} \right]$$

односно након уклањања свих преосталих, претходно уведених ознака (b , a и μ) коначно добијамо:

$$k_{\omega 1,2} = \frac{1}{\Delta\omega} \left[k_U \left(\frac{M(\omega_S)}{I \cos\varphi} \omega - U_R \right) \pm \frac{1}{k k_f} \cdot \sqrt{L_g^2 I^2 + 2L_g M(\omega_S) \text{tg}\varphi + \left(\frac{M(\omega_S)}{I \cos\varphi} \right)^2} \right] \dots \dots \dots (9)$$

3. МОМЕНТ ГЕНЕРАТОРА КОЈИ НАПАЈА ПОТРОШАЧ КОНСТАНТНЕ СНАГЕ

У случају (g) који без регулације побудног напона ($U_f = \text{const.}$), напаја потрошач константне снаге, која не зависи ни од напона (U) ни од брзине (ω) тј. кад је $P = \text{const.} \neq f(U, \omega)$ и $Q = 0$, момент електромагнетских сила генератора је: $M = P/\omega$. Графички приказ зависности $M(\omega)$ дат је на сл.6.



Сл.6. Зависност $M(\omega)$ у случају (g) који напаја потрошач константне снаге

4. ПРАКТИЧАН ЗНАЧАЈ ИЗВЕДЕНИХ ИЗРАЗА

Израз (9) показује да стабилност брзине (g) зависи од параметара самог (g), од параметара потрошача и од параметара побудног регулатора. Знајући вредности

коэффицијената појачања побудног регулатора (k_f и k_U), помоћу (9) може се одредити потребно појачање (k_ω) у каналу побудног регулатора по брзини, којим се компензује негативно пригушење изазвано напонском регулацијом. Значај релација које су изведене у овом раду је много већи за повезане системе, без обзира што су релације изведене за синхронну машину која напаја пасивну потрошњу. Да би се електроенергетски системи повезани славим водовима могли међусобно паралелно спрегнути, неопходно је сваком од њих обезбедити радне режиме са стабилним брзинама. Ако тај услов није испуњен, паралелан рад таквих система није могућ. Слабе везе не дозвољавају генерисање довољно великих синхронизационих момената који би омогућили паралелан рад повезаних система. Са друге стране турбински регулатори имају одређену мртву зону, те нису у стању да „закуцају” брзину генератора на константну вредност, ако је она нестабилна по електромагнетском моменту. Стабилна и константна брзина (без осцилација и варијација) синхроне машине, може се постићи само ако пресек карактеристике момента турбине и електромагнетског момента генератора дефинише стабилну радну тачку.

5. ПРИМЕР

У циљу компензације негативног пригушења, које је изазвано напонском регулацијом, појачање (k_ω) у каналу регулатора побуде по брзини одређујемо заменом конкретних вредности (већ раније наведених) у једначину (9) уз: $\omega = 1,02\omega_S = 1,02$ г.ј. и $\Delta\omega = 1,02\omega_S - \omega_S = 0,02\omega_S = 0,02$ г.ј. ($\omega_R = \omega_S$) и $M(\omega_S) = 0,9$ г.ј. Добијамо две вредности за k_ω и то: $k_{\omega 1} = 0,002$ г.ј. и $k_{\omega 2} = -0,018$ г.ј. од којих одбацујемо другу као физички неутемељену.

6. ЗАКЉУЧАК

У раду је дата анализа пригушења синхроне машине са двоканалним побудним регулатором (регулација побуде по напону и брзини генератора) који напаја потрошач константне струје. Изведена је релација која повезује параметре генератора, потрошача и побудног регулатора, помоћу које се може одредити знак пригушног момента генератора којим се компензује негативан утицај појачања у каналу по напону на пригушење синхроне машине. Правилним избором појачања у каналу побудног регулатора по брзини постиже се стабилност брзине агрегата. Иако је анализа дата за генератор у острвском раду, релација (9) је значајнија за машине које раде у електроенергетским системима повезаним славим везама. Њиховом применом могу се изабрати параметри побудних регулатора у повезаним подсистемима, којима се омогућава њихов паралелан рад, без обзира на слабе везе подсистема.

У случају генератора који напаја потрошач константне снаге карактеристика $M(\omega)$ је врло неповољна, будући да ниједна радна тачка није стабилна по брзини. Разлог лежи у томе да је $M(\omega)$ функција искључиво (P), која је увек стална и не зависи од (ω). Такође увођење регулатора побуде (било само са основним улазом у виду одступања напона на крајевима генератора, било и са додатном улазном променљивом у виду одступања брзине обртања ротора) неће дати резултате, будући да (P) од које зависи $M(\omega)$ не зависи од (ω). У том случају регулацију брзине једино можемо вршити помоћу турбинског регулатора. Тада ћемо имати веће флукуације брзине око радне тачке него у случају када преко побуде делујемо на момент.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миленко Ђурић, Милорад Бједов, Стабилност брзине синхроне машине, ЕТРАН, Игало, 8–13, јун 2003, pp. 375–378.
- [2] Миленко Ђурић, Милорад Бједов, Стабилност брзине синхроне машине са побудним регулатором, ЕТРАН, Чачак, 7–10, јун 2004, pp. 235–238.
- [3] М. Ђурић, Анализа услова за настајање и могућности елиминације негативних пригушења у електроенергетским системима, докторска дисертација, ЕТФ Београд 1985.
- [4] М. Ђурић, Основи регулације напона и фреквенције у ЕЕС–у, Беопрес, Београд, 2003.

Abstract – This paper deals with speed stability of the synchronous generator which feeds constant current and constant power type load. In the case of the constant current type load we consider the generator containing the AVR (automatic voltage regulator), which is two channel regulator. The first is according to terminal voltage and the second is according to speed or frequency. The relations which connect machine torque, speed and AVR parameters are derived. They are useful for AVR parameters tuning. This paper deals with one machine in island regime. But, results developed in the paper are applicable in multi–area power system with weak connections between different parts of system. The same analysis has been conducted in the case of the synchronous generator which feeds constant power type load.

SPEED STABILITY OF THE SYNCHRONOUS MACHINE WHICH FEEDS CONSTANT CURRENT AND CONSTANT POWER TYPE LOAD

Milorad Bjedov, Milenko Djuric