
Елементи електроенергетских система

Предавач: Ивана Влајић-Наумовска

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

За трансформисање напона у електр енергетици користе се енергетски трансформатори.

Трансформатор је електрични уређај који трансформише енергију из једног кола у друго посредством магнетне спреге, без икаквих покретних делова.

Трансформатор се састоји од два (или више) спрегнута намотаја или једног намотаја са више извода и у већини случајева, магнетног језгра које концентрише магнетни флукс. Наизменична струја у једном намотају ће индуковати струју у другим намотајима. Трансформатори се користе да подижу или спуштају напон, да мењају импедансу и да обезбеде електричну изолацију између кола.

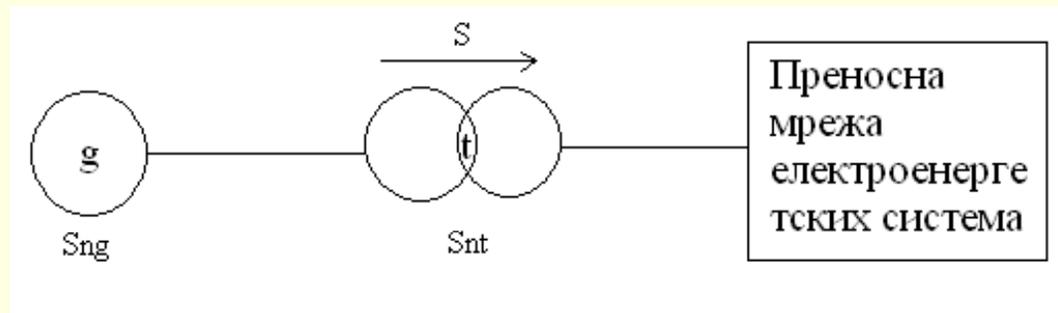
У електроенергетским системима трансформатор се појављује у три карактеристичне тачке по којима су добили специфичне називе.

То су:

- Блок трансформатори;
- Интерконективи трансформатори;
- Дистрибутивни трансформатори.

Блок трансформатори , у електранама који служе за подизање генераторског напона на ниво напона преносне мреже (слика 1).

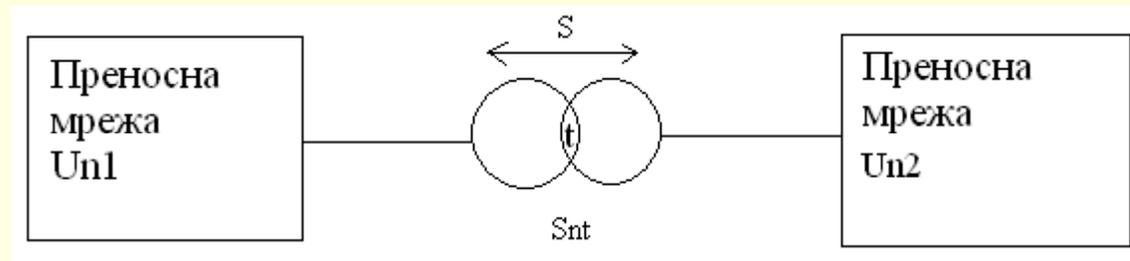
Генератори као обртне машине са номиналним напонима изнад 21kV били су претерано скупи.



Слика 1. Блок трансформатор

Назив “блок трансформатори“ потиче од чињенице да такав трансформатор ради у тандему са својим генератором и на њега се не могу везивати други генератори. Назначена привидна снага блок трансформатора је идентична номиналној снази генератора или се незнатно разликује од ње.

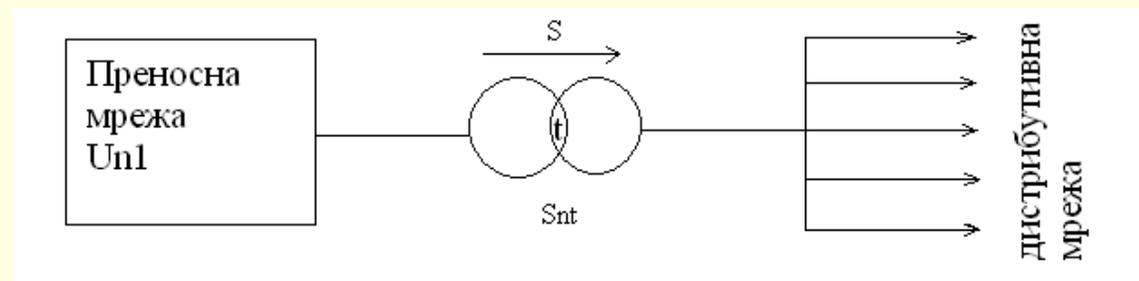
Интерконективи трансформатори у преносној мрежи електроенергетског система служи за повезивање преносних мрежа различитих напонских нивоа, као на слици 2.



Слика 2. Интерконективни трансформатор

Смерови активних и реактивних снага кроз интерконективни трансформатор нису једнозначни и зависе од радних режима мрежа које су њиме повезане.

Дистрибутивни трансформатори повезују преносне и дистрибутивне мреже или се налазе у дистрибутивним мрежама и служе за снижавање напона преносних мрежа на ниво погодан за дистрибуцију електричне енергије или за снижавање напона дистрибутивних мрежа на ниво погодан за поједине врсте потрошача. Дистрибутивне мреже су по правилу без извора тако да су активне и реактивне снаге кроз трансформатор усмерене од преносне ка дистрибутивној мрежи или од дистрибутивне мреже ка потрошачу, као на слици 3.



Слика 3. Дистрибутивни трансформатор

НАМОТАЈ означава скуп навојака примара, секундара или терцијера једнофазног трансформатора или једне фазе трофазног трансформатора, док се НАМОТ користи да значи скуп фазних примарних, секундарних или терцијерних намотаја трофазног трансформатора.

Подела трансформатора:

По врсти:

- монофазни
- ~~трофазни~~

По броју намотаја:

- двонамотајни (са примарним и секундарним намотајима)
- тронамотајни (са примаром, секундаром и терцијерним намотајима, у - нормалном раду неоптерећен, за елеминисање виших хармоника)

По галванској повезаности примарног и секундарног намотаја:

- Класичан (са галвански изолованим примаром и секундаром)
- Аутотрансформаторе (са галвански повезаним примаром и секундаром)

По могућности регулације:

- Нерегулациони имају фиксни однос трансформације
- Регулациони

По положају у мрежи електроенергетских система:

- Блок трансформатори
- Дистрибутивни
- Интерконективни

ЗАМЕНСКЕ ШЕМЕ

I_0 - струја празног хода;

I_m - струја магнећња;

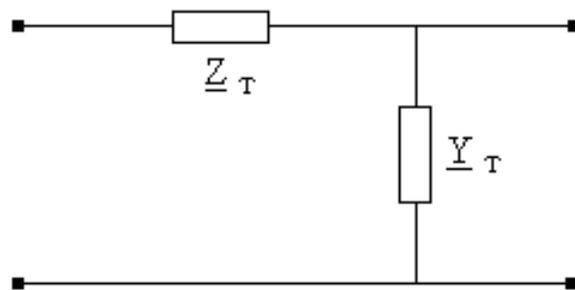
R, X - активна отпорност и реактанса расипања;

X_m - реактанса магнећења;

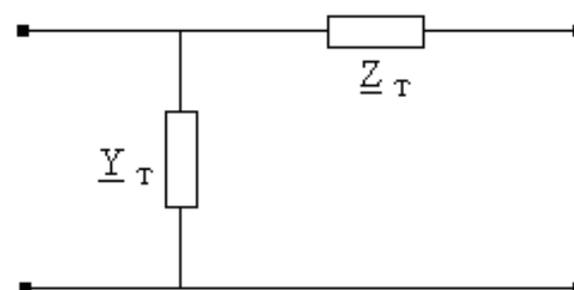
R_{fe} - активна отпорност, којом се еквивалентирају губици активне снаге у магнетном колу трансформатора;

G_T – кондуктанса, $G_T = 1/R_{fe}$;

B_T - сусцептанса, $jB_T = 1/jX_m = -j*(1/X_m) \Rightarrow B_T = -1/X_m$



Обрнуто "Г"



"Г"

Слика 4.

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T$$

$$R_T = R_1 + \omega_T^2 R_2$$

$$X_T = X_1 + \omega_T^2 X_2$$

Редна импеданса једнака је збиру редних импеданси примара и секундара сведене на примарну страну.

Елементи редне импедансе одређују се у опсегу кратког споја.

Оточна адмитанса трансформатора: $\underline{Y}_T = G_T + jB_T = 1/R_{fe} - j \cdot 1/X_m$

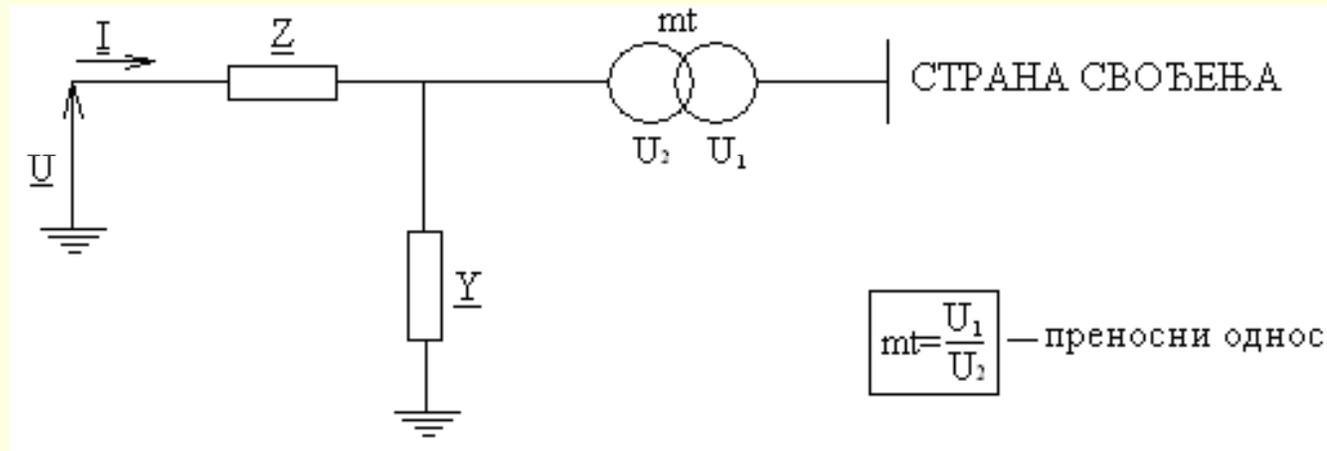
$$G_t = \frac{P_{fen}}{U_n^2}$$

$$R_t = P_{cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nt}}$$

$$X_t = \frac{X_t[\%]}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$B_t = - \frac{I_o[\%]}{100} \cdot \frac{S_{nt}}{U_n^2}$$

СВОЂЕЊЕ НАПОНА, СТРУЈА И ИМПЕДАНСИ СА ЈЕДНОГ НА ДРУГИ НАПОНСКИ НИВО



Слика 5. Свођење напона, струја и импеданси са једног на други напонски ниво

Имамо величине на секундару, а хоћемо да их сведемо на примарну страну!

$$\underline{U}_{sv} = mt \cdot \underline{U}$$

$$\underline{Z}_{sv} = mt^2 \cdot \underline{Z}$$

$$\underline{I}_{sv} = \frac{1}{mt} \cdot \underline{I}$$

$$\underline{Y}_{sv} = \frac{1}{mt^2} \cdot \underline{Y}$$

КОМПЛЕКСНИ ПРЕНОСНИ ОДНОС ТРОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Сваки двонамотни трофазни трансформатор, без обзира да ли је формиран од три монофазна трансформатора или је израђен као трофазна јединица, има по три фазна намотаја на примарној и секундарној страни који могу бити везани у звезду (Y,y) или троугао (D,d). Велико слово користи се за примарни, а мали за секундарни намот. Уз ознаку спреге ставља се спрежни број, (нпр. Yd5) који показује фазни померај између фазора примарних и секундарних напона изражен у релативним јединицама. По конвенцији реверентним фазорима за услове сматрају се секундарни напони.

Модул комплексног преносног односа једнак је скаларном преносном односу трофазног трансформатора $|\underline{m}_t| = m_t$, док му аргумент одређује фазни померај између одговарајућих фазора секундарних и примарних напона, при чему је секундарни напон изабран за референтни, у складу са релацијом: .

$$\underline{m}_t = \frac{U_{np}}{U_{ns}} = m_t e^{jk30^\circ}$$

СИНХРОНИ ГЕНЕРАТОРИ

Данас су синхрони генератори готово једини извори електричне енергије у електроенергетским системима. инсталисана снага свих осталих врста изора електричне енергије је готово занемарљива у односу на укупну снагу свих инсталисаних синхроних генератора.

Номинална снага синхроних генератора креће се од неколико стотина (kW) до неколико хиљада (MW).

Најчешће се срећу генератори номиналне снаге од неколико стотина (MW).

С обзиром да су електроенергетски системи трофазни у њима се користе искључиво трофазни синхрони генератори.

Синхрони генератори су обртне електричне машине које механичку енергију трансформишу у електричну.

Побудни намотај и синхроних генератора стављају се на ротор јер је лакше преко клизних прстенова и четкица побудном намотају доводити једносмерну побудну струју ниског напона (неколико стотина (V)) него са ротора преко клизних прстенова и четкица одводити трофазну наизменичну струју високог напона (3kV до 21kV), када би на ротору био смештен трофазни намотај.

Према томе, на статору синхроних генератора смештени су трофазни намотаји из којих се директно добија трофазна наизменична струја. Код синхроних генератора сасвим малих снага (неколико (kW)) може се побудни намотај сместити на статор а трофазни намотај на ротор. У оваквим случајевима трофазна наизменична струја се са роторског трофазног намотаја одводи преко клизних прстенова и четкица.

У пракси се користе два основна типа синхроних генератора а то су:

- Синхрони генератор са ваљкастим ротором или турбогенератор и
- Синхрони генератор са ротором са истакнутим половима или хидрогенератор.

Статори обе врсте синхроних генератора у принципу су исти. Састоје се од гвоздених цилиндара формираних од прстенстих лимова који су са унутрашње стране ожљебљени да би се могао сместити трофазни статорски намотај. Синхрони генератори механичку енергију добијају од погонских мотора, а то су углавном парне и хидро турбине. Различите конструкције синхроних генератора потичу од потребе да се генератори прилагоде погонским моторима, односно да се избегне коришћење механичких редуктора. Економичност парних турбина расте са порастом брзине обртања. Због тога се турбогенератори, које погоне парне турбине, граде као двополне синхроне машине са синхроним брзиномобртања од $n=3000$ о/мин при учестаности од $f=50\text{Hz}$, односно са бројем пари полова $p=1$. Четворополни турбогенератори са $p=2$, односно $n=1500$ о/мин. Због велике брзине обртања и великих центрифугалних сила ротори турбогенератора су релативно малог пречика од 1.25m , док им дужина може бити и до 6.5m . што се тиче материјала ротори турбо генератора израђују се као челични откивци из једног комада високоотпорних челика легираних хромом, никлом и молибденом.

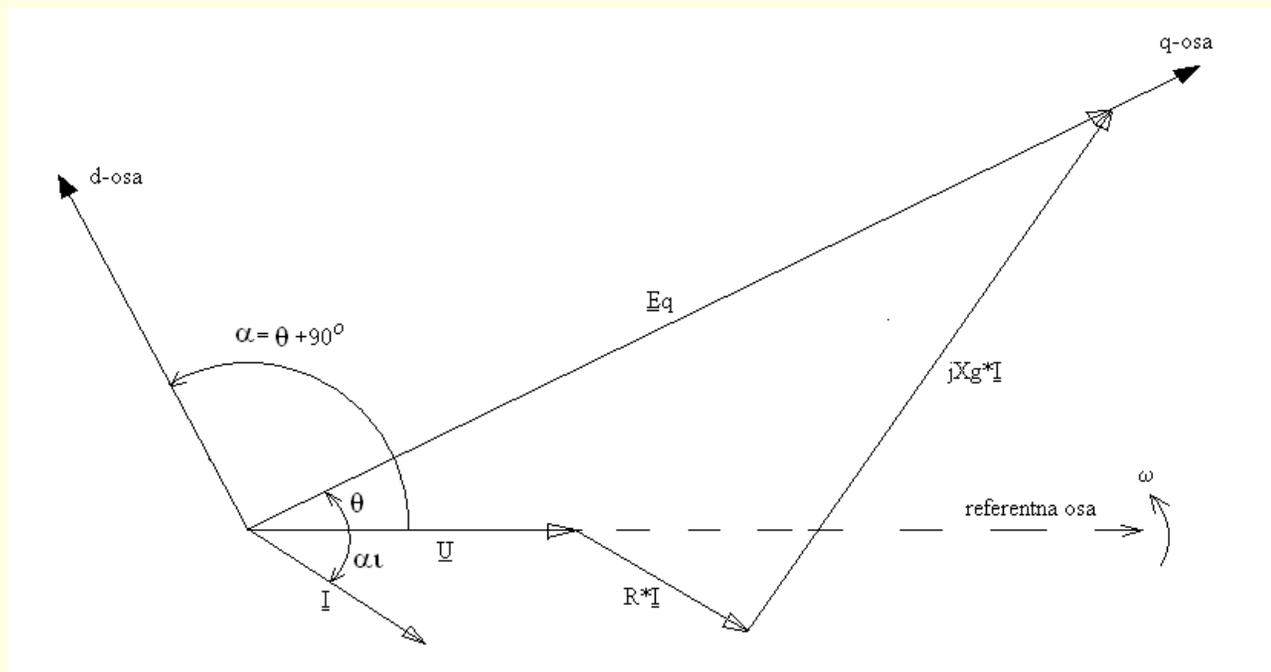
За разлику од парних, хидро турбине економично раде при знатно мањим брзинама обртања. Економичне брзине обртања хидр турбина у зависности од типа турбина крећу се од неколико десетина обртаја у минути до неколико стотина обртаја у минути. Због тога се хидро генератори израђују од вишеполне машине са оноликим бројем пари полова са којим се постиже механичка синхрона брзина обртања блиска економичној брзини изабране хидро турбине. Веза између броја периода побудног и статорских намотаја, односно броја пари полова, и механичке синхроне брзине обртања је $p = (60 \cdot f) / n$ [Hz/(o/min)]

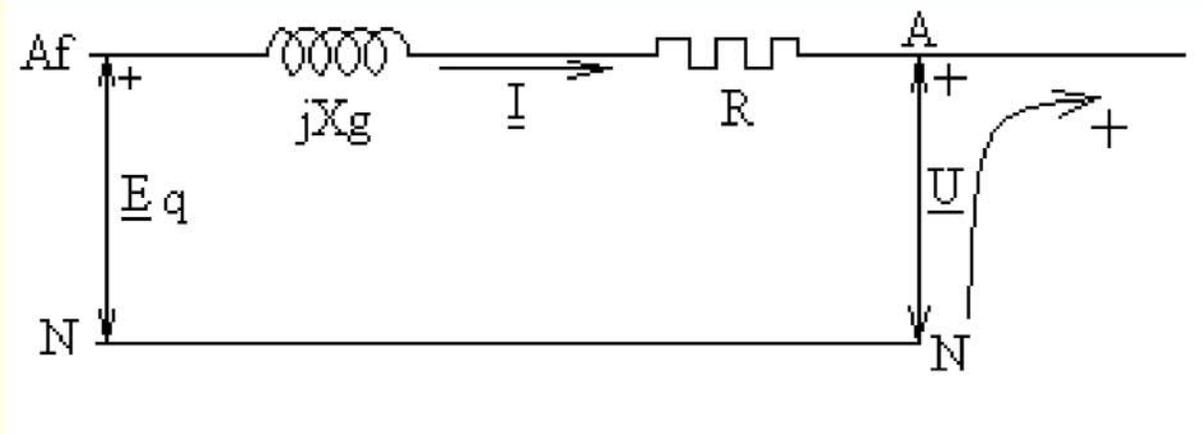
Да би се могао сместити велики број полова по обиму ротора хидрогенератора имају релативно велике пречнике (и преко 15m) и релативно малу дужину у односу на пречник.

На роторима хидрогенератора поред побудног постоји у експлицитној форми и пригушни намотај кавезног типа. Овај намотај има улогу само у режимима са брзинама различитим од синхроне и у асиметричним режимима. Цилиндрични ротори турбогенератора немају пригушни намотај изведен у експлицитној форми, али сама маса ротора направљена од комада челика када се нађе у променљивом магнетском пољу има улогу пригушног намотаја јер се у њој индукују вихорне струје.

ПАРАМЕТРИ СИНХРОНОГ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЗА СИМЕТРИЧНЕ РЕЖИМЕ

На слици слици 6. а) приказан је напонски векторски дијаграм турбогенератора у коме је напон референтна величина за углове, док је на слици 6. б) приказана еквивалентна шема турбогенератора која важи за симетричне трофазне режиме. При цртању напонског векторског дијаграма предпостављено је да генератор напаја претежно индуктивне претвараче, тако да струја фазно заостаје иза напона.





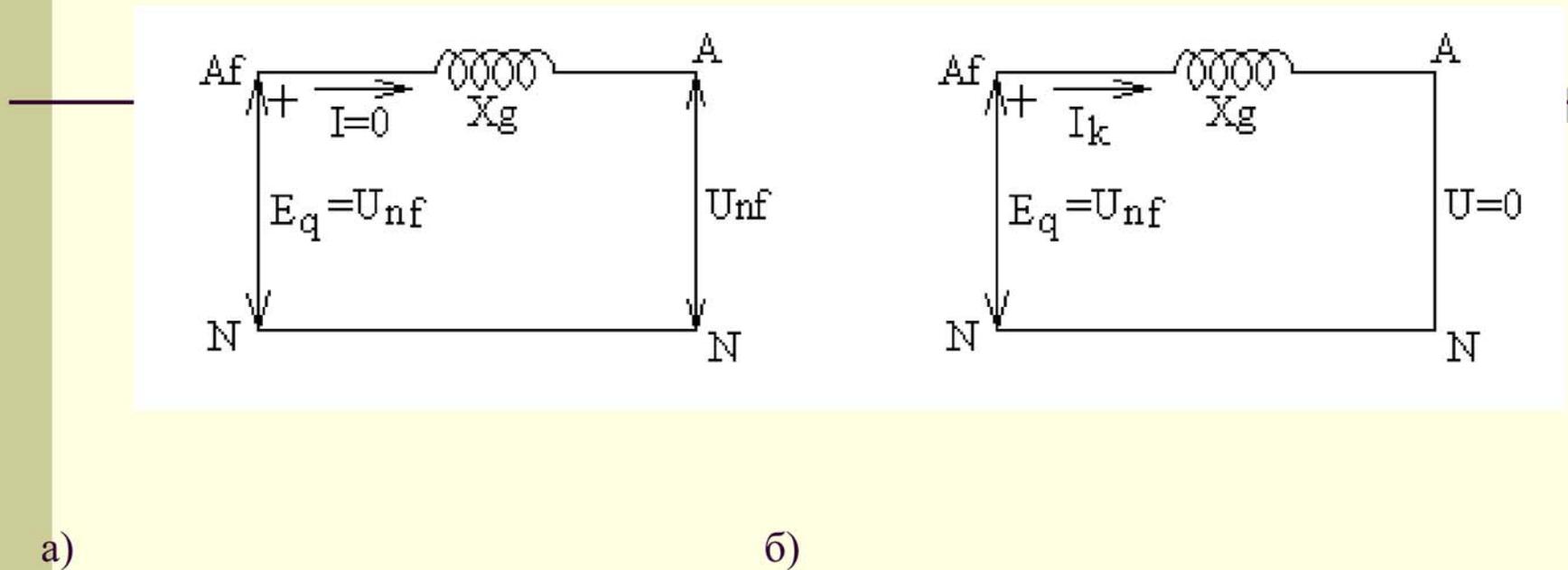
б)

слика:6. а) векторски дијаграм, б) еквивалентна шема турбогенератора

Активна отпорност фазног намотаја турбогенератора може се одредити из губитака у бакру статорског намотаја на исти начин као код енергетског трансформатора. $R = P_{cu} \cdot U_n^2 / S_n^2$

$X_g \gg R$

Синхрона реактанса, која представља суму реактансе расипања и реактансе магнећења генератора при трофазној побуди са статорске стране, може се одредити помоћу огледа празног хода и сратког споја.



Слика 7. Огледи: а) празног хода б) кратког споја турбогенератора

Генератор се прво при номиналној брзини обртања побуди толико да му напон празног хода буде једнак номиналном напону, као на слици. Након тога се направи оглед трофазног кратког споја са истом побудном струјом, да се не би променила електромоторна сила генератора.

турбогенератори снаге	$X_g(\%)$
до 100MVA	120
од 100 до 300MVA	160
преко 300MVA	250

$$X_g = \frac{X_g[\%]}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

ЛИНЕАРАН СИНХРОНИ ГЕНЕРАТОР

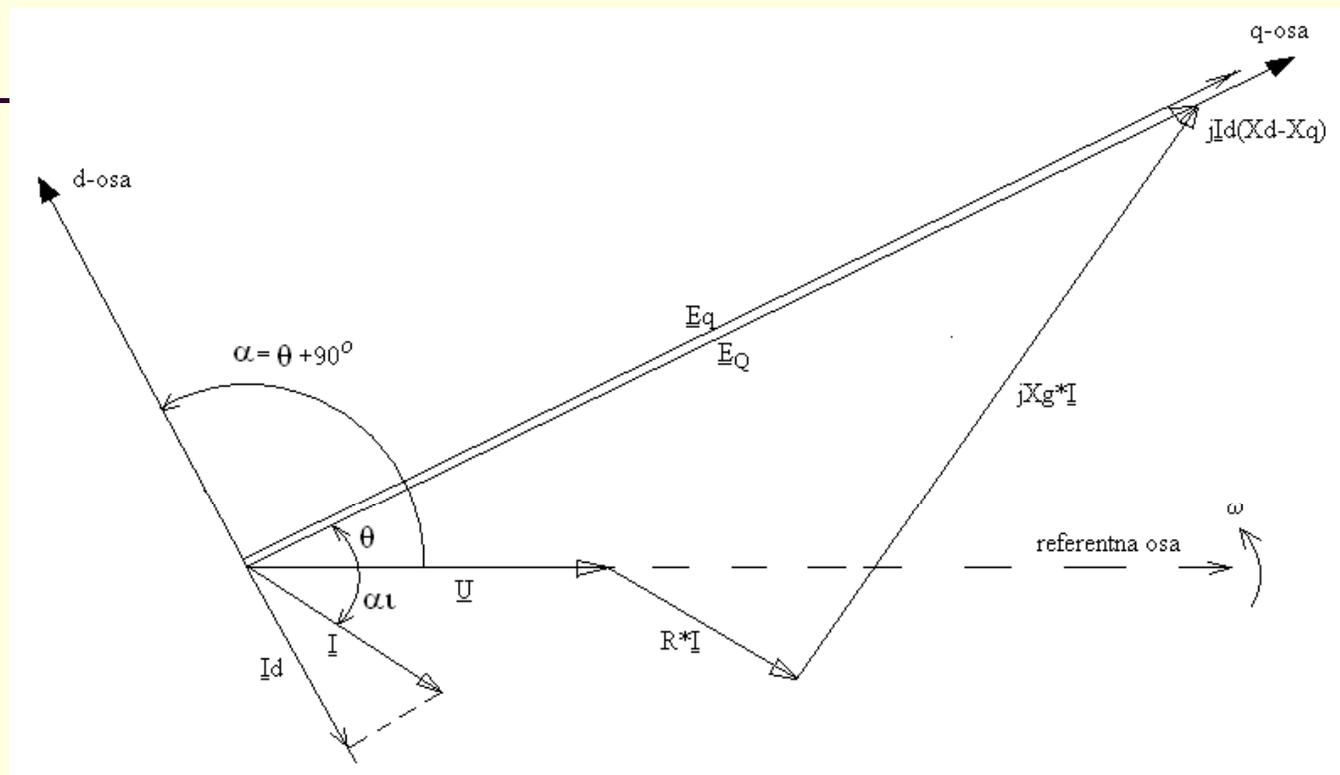
$$\underline{E}_q = U + R * \underline{I} + jX_q \underline{I} + j(X_d - X_q) \underline{I}_d$$

\underline{I}_d – је пројекција фазора струје \underline{I} на d-осу;

X_d, X_q - синхроне реактансе хидрогенератора по d-оси и q-оси;

E_q – ефективна вредност електромоторне силе хидрогенератора која потиче од побудног флукса, односно побудне струје.

При цртању фазорског дијаграма полази се од претпоставке да су напон и струја хидрогенератора познати. На слици претпостављено је претежно индуктивно оптерећење генератора, тако да фазор струје заостаје за фазором напона, који је изабран за референтну величину (са нултом почетном фазом). Након цртања фазора напона (\underline{U}) и струје (\underline{I}) могу се нацртати фазори падова напона ($R*\underline{I}$) и ($jX_q*\underline{I}$). На овај начин одређен је део електромоторне силе генератора (\underline{E}_q) означен као (\underline{E}_Q). Фазор (\underline{E}_Q) одређује положај позитивне (q) осе. Сада је могуће одредити и положај позитивне (d) осе која мора предњачити (q) оси за (90°). Након дефинисања положаја (d) осе може се одредити угао ($\alpha - \alpha_i$), те је могуће израчунати струју (\underline{I}_d). Након одређивања струје (\underline{I}_d) лако је одредити пад напона $j*\underline{I}_d(X_d - X_q)$ и електромоторну силу (\underline{E}_q). Због облика векторског дијаграма хидрогенератор није могуће еквивалентирати једном електромоторном силом и пасивом импедансом, као турбогенератор.



Слика 8. Векторски дијаграм хидрогенератора

ПОГОНСКА КАРТА СИНХРОНОГ ГЕНЕРАТОРА

Погонска карта дефинише дозвољену област радних режима синхроног генератора у P - Q равни, при константном напону на прикључним крајевима генератора. За одређивање погонске карте потребно је дефинисати основне податке о синхроној машини, као и скуп ограничења која дефинишу могуће радне режиме генератора

ОСНОВНИ ПОДАЦИ О СИНХРОНОМ ГЕНЕРАТОРУ СУ:

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \phi_n}$$

- Номинална привидана снага дефинисана је као трофазна и креће се у опсегу од неколико стотина КВА до неколико хиљада МВА;

$P_n = P_{tn} \cdot \eta_n$ - номинална електрична активна снага (P_{tn} - номинална корисна снага турбине и η_n - номинални степен искоришћења генератора);

U_n - номинални напон дефинисан је као међуфазни и може имати следеће вредности; 3.15 kV; 6.3 kV; 10.5 kV; 15.75kV; 21kV;

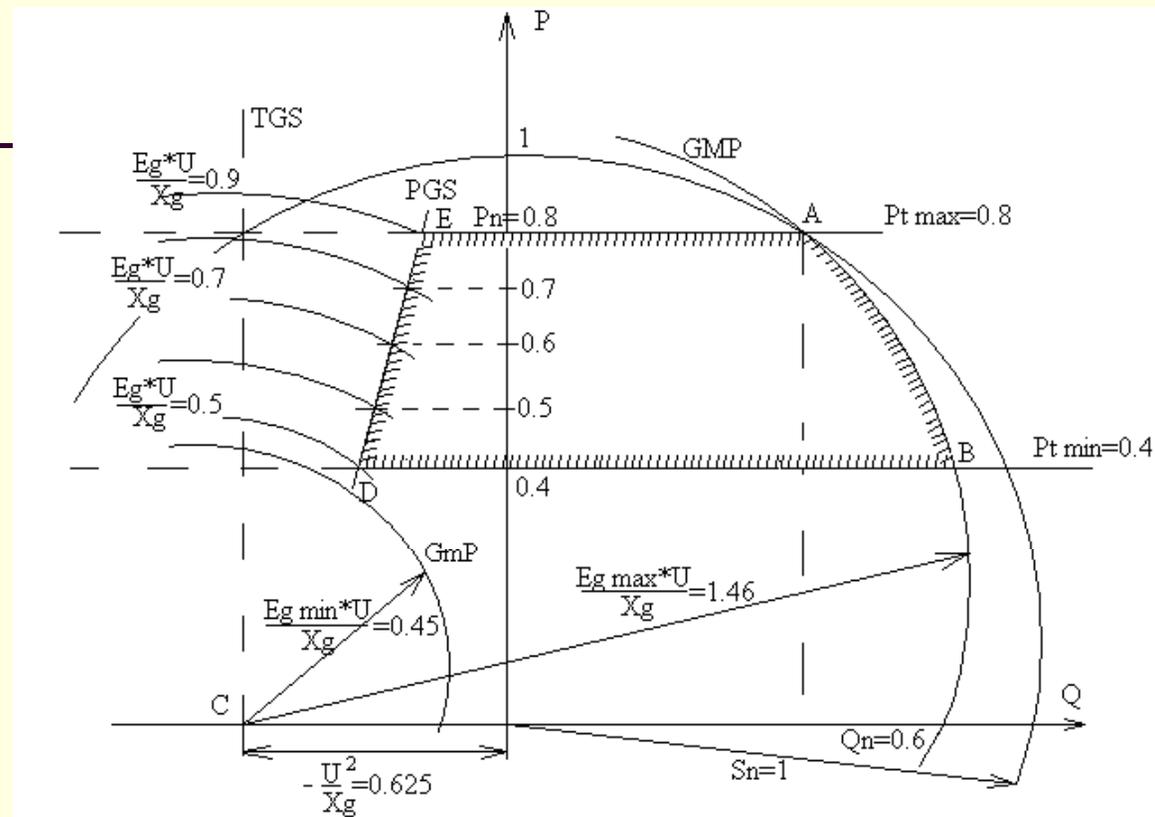
$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}$ - номинална струја генератора;

$\cos \phi_n = \frac{P_n}{(P_n^2 + Q_n^2)^{0.5}}$ називни фактор снаге одређује способност генератора да производи реактивну снагу.

Генератор са мањим називним фактором снаге има већу номиналну реактивну снагу (Q_n) у односу на номиналну активну снагу (P_n), те му је цена већа. Генератори лоцирани близу потрошачких подручја обично имају мање номиналне факторе снаге да би били у стању да произведу веће количине реактивне снаге (синхронни генератор је најјефтинији извор реактивне снаге). Генератори удаљени од потрошачких подручја имају веће називне факторе снаге, јер је пренос реактивне снаге на веће даљине неекономичан;

n_n - номинална брзина обртања креће се од неколико десетина обртаја у минути до 3000ob/min за генераторе инсталисане у 50Hz електроенергетском систему и зависи од броја полова генератора

ПОГОНСКА КАРТА ТУРБОГЕНЕРАТОРА



Слика 9. Погонска карта турбогенератора

GMP-граница максималне побудне струје; PGS-практична граница статичке стабилности; TGS-теоријска граница статичке стабилности; GmP-граница минималне побуде

Погонска карта турбогенератора може се нацртати следећим редом:

Црта се круг константне привидне снаге $P^2+Q^2=S_n^2=1$, односно ограничење по струји статора;

Цртају с прве линије $P=P_{Tmax}=0.8$ и $P=P_{Tmin}=0.4$; односно ограничења по максималној и минималној снази турбине;

Одреди се четири круга константне побудне струје $s(0; -U^2/X_g = -0.625)$. Затим се црта круг снаге при максималној побудној струји (GMP) који пролази кроз тачку номиналног режима (A). Полупречник овог круга може се одредити и аналитички. Прво треба одредити електромоторну силу при номиналном режиму $\underline{E}_{qn} = \underline{E}_{qmax} = U + Q_n X_g / U + j P_n X_g / U = 1.96 + j 1.28$, односно $E_{qmax} = 2.34$. Полупречник круга снаге при максималној побуди је $E_{qmax} U / X_g = 1.463$. У овом кораку може се нацртати и круг снаге при минималној побуди (GmP), полупречника $E_{qmin} U / X_g = 0.45$, који одговара електромоторној сили $E_{qmin} = 0.72$;

Црта се права $Q = -U^2/Xg$, односно теоријска граница статичке стабилности. Тачке које одређују практичну границу статичке стабилности (PGS) одређују се као пресеци круга, полупречника $E_q U/Xg$, са правом линијом $P = E_q U/Xd - 0.1 S_n$.

Погонска карта датог турбогенератора приказана је на слици 9.

Интересантно је приметити да се ограничење по привидној снази, односно по струји статора достиже у једној јединој тачки (А). У датом случају ограничење по минималној побудној струји не може с достићи јер се ограничења по минималној активној снази и практичној граници статичке стабилности достижу раније.