

SISTEME ELECTROENERGETICE











Capitolul 2

MODELAREA ELEMENTELOR COMPONENTE ALE SEE








Elemente componente ale SEE

- Generatoare sincrone
- Sarcina complexa (motorul asincron si modele statice si dinamice de sarcina)
- Linii electrice
- Transformatoare de putere (transformatoare cu 2 / 3 infasurari si autotransformatoare)
- Bobine de reactanta
- Baterii de condensatoare









Simboluri folosite pentru reprezentarea elementelor SEE

Element	Simbol uzual	Simbol alternativ
Generator /centrală		
Transformator cu două înfășurări fără reglaj		
Transformator cu două înfășurări cu reglaj sub sarcină		
Transformator cu trei înfășurări:		
Autotransformator		

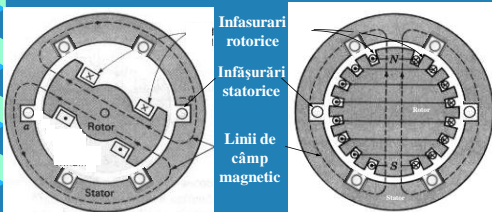
Simboluri folosite pentru reprezentarea elementelor SEE

Element	Simbol uzual	Simbol alternativ
Linie electrică aeriană sau în cablu	—	
Înterupător		
Separator		
Transformator de curent		
Transformator de tensiune		

Simboluri folosite pentru reprezentarea elementelor SEE

Element	Simbol uzual	Simbol alternativ
Conexiune ale transformatoarelor		
Nod/ Bară în stații de transformare		
Sarcină		
Baterie de condensatoare		
Bobină de reactanță		

Generatorul sincron - 1



Generatorul sincron - 2

Reactantele generatorului sincron:

- (i) reactanța sincronă longitudinală (X_d) sau transversală (X_q) – în regimurile permanente, când generatorul funcționează sincron;
- (ii) reactanțele tranzitorii (X_d' , X_q') sau supratranzitorii (X_d'' , X_q'') – în regimurile caracterizate de variații bruște ale curentului debitat de generator.

Generatorul sincron - 3

Componente:

- reactanța de reacție X_a - circulația curentului de sarcină prin înfășurarea statorică dă naștere unui flux de reacție.
- reactanța de scăpări X_σ - fluxul magnetic care nu se închide prin înfășurarea statorică, reprezentând un flux de scăpări.

$$X_d = X_{a,d} + X_\sigma \quad X_q = X_{a,q} + X_\sigma$$

Generatorul sincron - 4

Reactantele sincrone:

- Hidrogeneratoare - $X_d > X_q$
- Turbogeneratoare - $X_d \approx X_q$

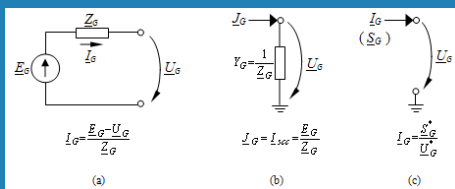
Reactantele tranzitorii: $X_d' \approx X_q'$; $X_d', X_q' < X_d, X_q$

Reactantele supratranzitorii: $X_d'', X_q'' < X_d', X_q'$

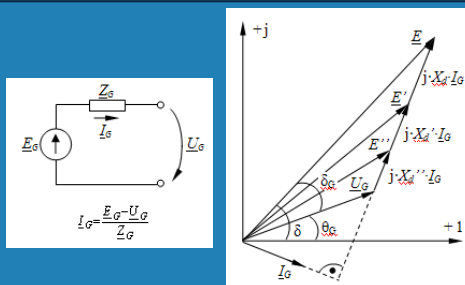
- Hidrogeneratoare - $X_d'' < X_q''$
- Turbogeneratoare - $X_d'' \approx X_q''$

Generatorul sincron - 5

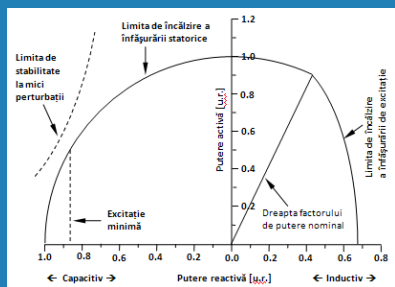
Scheme echivalente



Generatorul sincron - 6

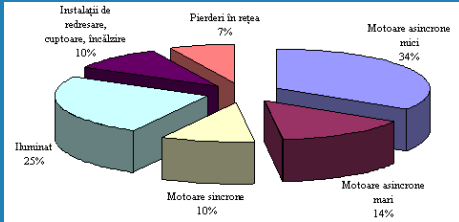


Generatorul sincron - 7



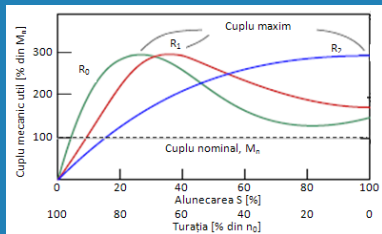
Sarcina complexa - 1

Structura tip a sarcinii complexe pentru un oras cu dezvoltare medie



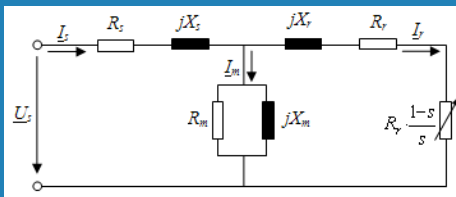
Sarcina complexa - 2

Motorul asincron – caracteristica mecanica pentru motorul cu rotor bobinat



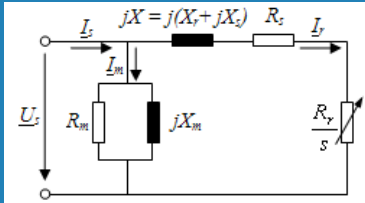
Sarcina complexa - 3

Motorul asincron – schema echivalenta exacta



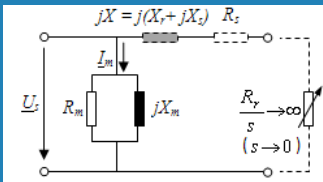
Sarcina complexa - 4

Motorul asincron – schema echivalenta simplificata



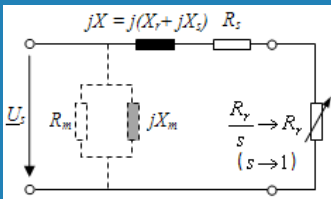
Sarcina complexa - 5

Motorul asincron – incercarea la functionarea in gol



Sarcina complexa - 6

Motorul asincron – incercarea la functionarea cu rotorul cald



Sarcina complexa - 7

Modelarea sarcinii complexe

Modele de sarcină

- (i) modele statice,
- (ii) modele dinamice sau
- (iii) modele mixte.

Generare modele

- (i) prin măsurări
- (ii) prin agregare

Sarcina complexa - 8

Modele statice de sarcina

Un model static de sarcină descrie sarcina ca o funcție algebrică dependentă de tensiunea din nodul analizat și de frecvența din sistem la momentul considerat.

Caracteristici de sarcina

- (i) $P(U)$ și $Q(U)$ pentru $f = \text{const.}$
- (ii) $P(f)$ și $Q(f)$ pentru $U = \text{const.}$

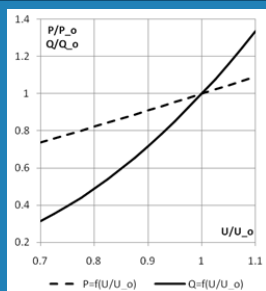
Sarcina complexa - 9

Caracteristici de putere polinomiale – Modele ZIP

$$P = P_0 \cdot \left[\alpha_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + \alpha_1 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + \alpha_2 \right]$$
$$Q = Q_0 \cdot \left[b_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + b_2 \right]$$

Caracteristicile se obțin ca sume ale unor sarcini reprezentate prin impedanță constantă (Z), curent constant (I) și putere constantă (P).

Sarcina complexa - 10

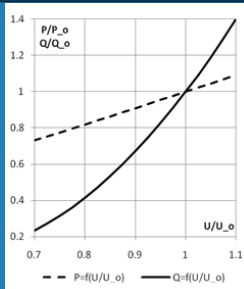


Model ZIP–
rezidențial (57%),
comercial (23%) și
industrial (20%);

$$P/P_0 = \left[0.13 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + 0.65 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0.22 \right]$$

$$Q/Q_0 = \left[2.68 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 2.27 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0.59 \right]$$

Sarcina complexa - 11

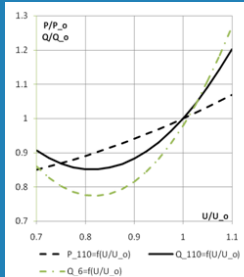


Model ZIP–
rezidențial (40%),
comercial (51%) și
industrial (9%).

$$P/P_0 = \left[0.08 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + 0.76 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0.16 \right]$$

$$Q/Q_0 = \left[3.68 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 3.70 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 1.02 \right]$$

Sarcina complexa - 12



$U_n = 110 \text{ kV}$

$$P/P_0 = \left[0.473 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 0.30 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0.83 \right]$$

$$Q/Q_0 = \left[4.30 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 7.00 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 3.70 \right]$$

$U_n = 6 \text{ kV}$

$$Q/Q_0 = \left[6.22 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 10.14 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right) + 4.92 \right]$$

Sarcina complexa - 13

Caracteristici de sarcina – modelul exponential

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mp}$$

$$Q = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mq}$$

Sarcina complexa - 14

Modele dinamice de sarcina

Modelele dinamice de sarcină exprimă caracteristicile variabile în timp ale sarcinii, fiind folosite de regulă pentru studiul regimurilor dinamice ale sistemului, cum ar fi oscilațiile interzonale, stabilitatea de tensiune sau stabilitatea pe termen lung.

Sarcina complexa - 15

Model dinamic de sarcina tip IEEE

$$T_p \cdot \frac{\partial P_d}{\partial t} + P_d = P_s(U) + K_p(U) \cdot \frac{\partial U}{\partial t}$$
$$T_q \cdot \frac{\partial Q_d}{\partial t} + Q_d = Q_s(U) + K_q(U) \cdot \frac{\partial U}{\partial t}$$

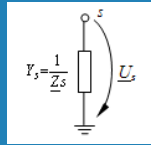
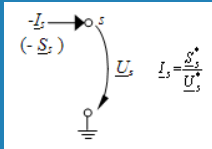
$$K_p(U) = T_p \cdot \frac{\partial P_s}{\partial U}; \quad K_q(U) = T_q \cdot \frac{\partial Q_s}{\partial U}$$

$$P_s(U) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mp}; \quad Q_s(U) = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mq}$$

$$P_s(U) = P_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mp}; \quad Q_s(U) = Q_0 \cdot \left(\frac{U}{U_0} \right)^{mq}$$

Sarcina complexa - 16

Modele simplificate de sarcina



$$I_s = \frac{S_s^*}{U_s} = \frac{P_s - jQ_s}{U_s (\cos \theta_s - j \sin \theta_s)}$$

$$Y_s = \frac{S_s^*}{U_s^2} = \frac{P_s - jQ_s}{U_s^2}$$

Linii electrice - 1

Rezistenta

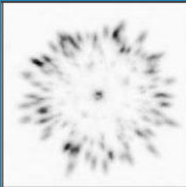
$$R_{cc} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega]$$

$$R_{0cc} = \frac{1000 \cdot \rho}{S} \quad [\Omega \cdot \text{km}]$$

Linii electrice - 2

Conductanta

Efectul Corona



Scindarea fazelor

$$r_m = \sqrt[3]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$$

Conductanta

$$G_0 = \frac{\Delta F_0}{U_s^2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{S} \cdot \text{km}]$$

Linii electrice - 3

Reactanta - 1

Legatura reactanta – inductivitate:

$$X = \omega L_f = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_f$$

Cazul liniei simplu-circuit cu coronament simetric:

$$L_0 = \frac{10^3 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \frac{D}{r_e} \quad [\text{H/km}]$$

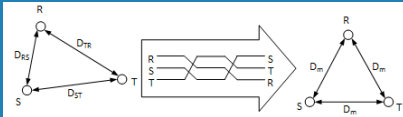
Linii electrice - 4

Reactanta - 2

Cazul liniei cu coronament nesimetric si transpunerea fazelor

$$L_0 = \frac{10^3 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \frac{D_m}{r_e}$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}}$$



Linii electrice - 5

Reactanta - 3

Cazul liniei dublu-circuit

$$L_0 = \frac{10^3 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \left(\frac{D_{m1} \cdot D_{m2}}{r_e \cdot D_{m2}} \right)$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}}$$

$$D_{m1} = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}} \quad D_{m2} = \sqrt[3]{D_{RR} \cdot D_{SS} \cdot D_{TT}}$$

Linii electrice - 6

Susceptanta- 1

Legatura susceptanta- capacitate:

$$B = \omega \cdot C_S = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_S$$

Cazul linii simplu-circuit cu coronament simetric:

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{D_m}{r}} \quad [\text{F/km}]$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}}$$

Linii electrice - 7

Susceptanta - 2

Cazul linii dublu-circuit

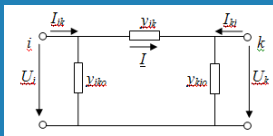
$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 10^{-3}}{\ln \left(\frac{D_m \cdot D_{m2}}{r \cdot D_{m2}} \right)} \quad [\text{F/km}]$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}}$$

$$D_{m2} = \sqrt[3]{D_{RR} \cdot D_{SS} \cdot D_{TT}}$$

Linii electrice - 8

Schema echivalenta si ecuatiile de functionare:



$$\begin{bmatrix} I_{ik} \\ I_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ik} + Y_{iko} & -Y_{ik} \\ -Y_{ik} & Y_{ik} + Y_{kio} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_i \\ U_k \end{bmatrix}$$

Transformatoare-1

Transformatorul cu 2 infasurari

Parametrul	Mărimea de referință din datele de catalog	Formula de calcul
Rezistența R_T [Ω]	Pierderile de putere activă la scurtcircuit ΔP_{sc} [kW]	$R_T = \frac{\Delta P_{sc} [kW] U_s^2 [kV]^2}{S_n^2 [MVA]^2} \cdot 10^{-3}$
Reactanța X_T [Ω]	Tensiunea de scurtcircuit u_{sc} [%]	$Z_T = \frac{u_{sc} [\%] U_s^2 [kV]^2}{S_n [kVA]} \cdot 10^{-2}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$
Conductanța G_T [S]	Pierderile de putere activă la gol ΔP_o [kW]	$G_T = \frac{\Delta P_o [kW]}{U_s^2 [kV]^2} \cdot 10^{-3}$
Susceptanța B_T [S]	Curențul de mers în gol i_o [%]	$Y_T = \frac{i_o [\%] S_n [MVA]}{U_s^2 [kV]^2} \cdot 10^{-2}$ $B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$

Transformatoare-2

Formule alternative

$$R_T [\%] = \frac{\Delta P_{sc}}{S_n} \cdot 100 = \frac{\Delta P_{sc} [kW]}{S_n [MVA]} \cdot 10^{-1}$$

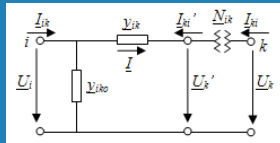
$$X_T [\%] = u_{sc} [\%]$$

$$G_T [\%] = \frac{\Delta P_o}{S_n} \cdot 100 = \frac{\Delta P_o [kW]}{S_n [MVA]} \cdot 10^{-1}$$

$$B_T [\%] = i_o [\%]$$

Transformatoare-3

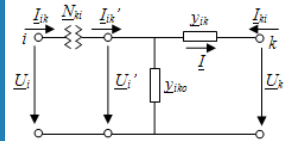
Schema echivalenta si ecuatiile de functionare (transformator ridicator):



$$\begin{bmatrix} I_{ik} \\ I_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ik} + y_{ik0} & -N_{ik} \cdot y_{ik} \\ -N_{ik} \cdot y_{ik} & N_{ik}^2 \cdot y_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_i \\ U_k \end{bmatrix}$$

Transformatoare-4

Schema echivalenta si ecuatiile de functionare (transformator coborator):



$$\begin{bmatrix} I_{ik} \\ I_{ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ik} + Y_{iko} & N_{ki}^2 - N_{ki}^* \cdot Y_{ik} \\ -N_{ki} \cdot Y_{ik} & Y_{ik} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_i \\ U_k \end{bmatrix}$$

Transformatoare-5

Raportul de transformare

$$N = \frac{U^{reg}}{U^{reg}}$$

$$U^{reg} = U_{nom} \cdot \left[1 + (w_{nom} - w) \cdot \frac{\Delta U}{100} \right]$$

$$U_{max}^{reg} = U^{reg}(w_{min}) = U_{nom} \cdot \left[1 + p \cdot \frac{\Delta U}{100} \right]$$

$$U_{min}^{reg} = U^{reg}(w_{max}) = U_{nom} \cdot \left[1 - p \cdot \frac{\Delta U}{100} \right]$$

Bobine de reactanta

Cazul I

$$X_b = \frac{\Delta U_n [\%] \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}$$

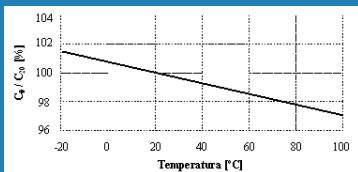
Cazul II

$$X_b = Q_{b,n} \cdot \frac{U_n^2}{\Delta P^2 + Q_{b,n}^2}$$

Baterii de condensatoare

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{U_n^2}{Q_{c,n}}$$

Variatia capacitatii cu temperatura



SFARSIT
