

**UNITĂȚI RELATIVE.**  
**COMPONENTE SIMETRICE**  
**CURS 7**

PTDEE - Curs 7 - prof. R.  
TIRNOVAN



## 7.1. Mărimi în unități relative

*Acestea se obțin prin împărțirea valorilor actuale cu mărimi de referință, sau de bază, de același tip. Se numește metoda unităților relative („per unit system”). Mărimile sistemului nu se modifică când se schimbă nivelul de tensiune. O mărime în unități relative (p.u.) este definită prin relația:*

$$\text{valoarea\_pu} = \frac{\text{valoarea\_actuala}}{\text{valoarea\_de\_baza}} \quad (7.1)$$

➤valoarea\_actuală este un fazor sau un număr complex în sistemul fizic de măsură;

➤mărimea\_de\_bază este un număr real în aceleași unități de măsură. Valoarea în unități relative este un număr real sau complex adimensional.

Mărimile electrice prin care se poate caracteriza un sistem electric sunt: curentul  $\underline{I}$ , tensiunea  $\underline{U}$ , puterea aparentă  $\underline{S}$ , impedanțele rețelei  $\underline{Z}$  și defazajele din rețea (acestea sunt adimensionale).



Legea lui Ohm în unități relative este identică cu cea scrisă în unități fizice:

$$\underline{U}_{pu} = \frac{U}{U_b} = \frac{ZI}{Z_b I_b} = \underline{Z}_{pu} \underline{I}_{pu} \quad (7.2)$$

Ca mărimi de bază se aleg *puterea aparentă  $S_b$  și tensiunea  $U_b$* . Puterea aparentă de bază se alege în mod uzual multiplu de 10, ceea ce ușurează calculele. Tensiunile de bază sunt în general egale cu tensiunile nominale ale transformatoarelor de putere. În acest fel *curenții de bază și impedanțele de bază rezultă* din mărimile de bază alese:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b}, \quad (7.3)$$

$$Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}I_b} = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (7.4)$$

*Conform definiției (7.1) se obține:*

$$\underline{U}_{pu} = \frac{U}{U_b} \quad (7.5)$$

$$\underline{I}_{pu} = \frac{I}{I_b} \quad (7.6)$$

$$\underline{Z}_{pu} = \frac{Z}{Z_b} \quad (7.7)$$



*Regulile care se aplică în utilizarea metodei unităților relative sunt:*

1. Valoarea numerică a puterii de bază este aceeași pentru întregul sistem în studiu; se recomandă a se adopta un multiplu de 10;
2. Tensiunile de bază se aleg în așa fel încât să respecte rapoartele de transformare a transformatoarelor de putere:

$$\frac{U_{b1}}{U_{b2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_T \quad (7.8)$$

## 7.2. Schimbarea bazei

Valoarea actuală a unei mărimi fizice nu depinde de valoarea ei relativă. În acest fel, relația dintre valoarea relativă inițială și cea nouă a unei aceleași mărimi satisface egalitatea următoare:

$$Z_{actual} = Z_{p.u.}^{vechi} \cdot Z_b^{vechi} = Z_{p.u.}^{nou} \cdot Z_b^{nou} \quad (7.9)$$



$$Z_{p.u.}^{nou} = Z_{p.u.}^{vechi} \frac{Z_b^{vechi}}{Z_b^{nou}} ; \quad Z_{p.u.}^{nou} = Z_{p.u.}^{vechi} \left( \frac{U_b^{vechi}}{U_b^{nou}} \right)^2 \frac{S_b^{nou}}{S_b^{vechi}} \quad (7.10)$$

Puterea trifazată în p.u. este egală numeric cu cea monofazată:

$$S_{p.u.}^{3\Phi} = S_{p.u.}^{1\Phi} \quad (7.11)$$

Iar între tensiunea de linie și cea de fază în p.u. există o relație de egalitate:

$$\underline{U}_{p.u.} = \underline{V}_{p.u.} \quad (7.12)$$

### Concluzie

- 1. puterea de bază, în MVA, este aceeași pentru întreg sistemul în studiu. În general aceasta se alege un multiplu de 10 MVA;*
- 2. tensiunile de bază se aleg în așa fel încât să satisfacă raportul de transformare al transformatorului asociat rețelei respective.*
- 3. celelalte mărimi derivate se obțin prin utilizarea formulelor (7.3-4).*



### 7.3. Modelarea transformatorului în unități relative

Producătorii de echipamente electrice dau de multe ori impedanțele procentual, raportat la mărimile nominale ale echipamentelor:

$$S_b = S_T \quad U_{b1} = U_1 \quad U_{b2} = U_2 \quad Z_{b1} = \frac{U_{b1}^2}{S_b} \quad Z_{b2} = \frac{U_{b2}^2}{S_b}$$

Rezistența transformatorului în p.u (tensiunea în kV, puterea aparentă în MVA, pierderile în scurtcircuit în kW, impedanța de bază în ohmi):

$$\begin{aligned} R_{T1}^{p.u.} &= \left( \frac{\Delta p_{sc} U_1^2}{S_T^2} 10^{-3} \right) \frac{1}{Z_{b1}} = \left( \frac{\Delta p_{sc} U_1^2}{S_T^2} 10^{-3} \right) \frac{S_T}{U_1^2} = \frac{\Delta p_{sc}}{S_T} 10^{-3} = \\ &= \left( \frac{\Delta p_{sc} U_2^2}{S_T^2} 10^{-3} \right) \frac{S_T}{U_2^2} = \left( \frac{\Delta p_{sc} U_2^2}{S_T^2} 10^{-3} \right) \frac{1}{Z_{b2}} = R_{T2}^{p.u.} = R_T^{p.u.} \quad (7.13) \end{aligned}$$



Impedanța transformatorului în unități relative:

$$\begin{aligned} Z_{T1}^{p.u.} &= \left( \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_1^2}{S_T} \right) \frac{1}{Z_{b1}} = \left( \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_1^2}{S_T} \right) \frac{S_T}{U_1^2} = \left( \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_2^2}{S_T} \right) \frac{S_T}{U_2^2} = \\ &= \left( \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_2^2}{S_T} \right) \frac{1}{Z_{b2}} = Z_{T2}^{p.u.} = Z_T^{p.u.} = \frac{U_{sc\%}}{100} \quad (7.14) \end{aligned}$$

Reactanța transformatorului în unități relative:

$$X_T^{p.u.} = \sqrt{(Z_T^{p.u.})^2 - (R_T^{p.u.})^2} \approx Z_T^{p.u.} \approx \frac{U_{sc\%}}{100} \quad (7.15)$$

Conductanța în unități relative:

$$G_T^{p.u.} = \left( \frac{\Delta P_{Fe}}{U_1^2} 10^{-3} \right) Z_{b1} = \left( \frac{\Delta P_{Fe}}{U_1^2} 10^{-3} \right) \frac{U_1^2}{S_T} = \left( \frac{\Delta P_{Fe}}{U_2^2} 10^{-3} \right) \frac{U_2^2}{S_T} = \frac{\Delta p_{Fe}}{S_T} 10^{-3} \quad (7.16)$$



Susceptanța în unități relative:

$$B_T^{p.u.} = \left( \frac{I_{0\%}}{100} \frac{S_T}{U_1^2} \right) Z_{b1} = \left( \frac{I_{0\%}}{100} \frac{S_T}{U_1^2} \right) \frac{U_1^2}{S_T} = \frac{I_{0\%}}{100} \quad (7.17)$$

**Aplicatia 7.1.** Datele de catalog pentru un transformator de putere sunt:

puterea nominală:  $S_T = 25$  MVA;

raportul de transformare:  $U_1/U_2 = 110 / 6,6$  kV;

schema de conexiuni:  $Y_0d-11$ ;

pierderile la scurtcircuit:  $\Delta p_{sc} = 130$  kW;

tensiunea de scurtcircuit procentuală:  $U_{sc\%} = 11$  %;

pierderile în fier:  $\Delta p_{Fe} = 30$  kW;

curentul de mers în gol în procente:  $I_{0\%} = 1$  %.

Se cere:

1. să se calculeze constantele pe fază ale transformatorului raportate la înfășurarea de înaltă tensiune;
2. să se calculeze constantele transformatorului în unități relative.



### *Soluție:*

1. Constantele transformatorului raportate la înfășurarea de 110 kV:

$$R_{T1} = \frac{P_{sc} U_1^2}{S_T^2} = \frac{130 \cdot (110)^2}{25^2} 10^{-3} = 2,516.8 \cdot 10^{-3} = 2.5168 \Omega$$

$$Z_{T1} = \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_1^2}{S_T} = \frac{11}{100} \frac{(110)^2}{25} = 53.24 \Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{53.24^2 - 2.52^2} = 53.18 \Omega$$

$$X_{T1}/R_{T1} = 53.18/2.52 \approx 21.10 \quad X_{T1} \cong \frac{U_{sc\%}}{100} \frac{U_1^2}{S_T} = \frac{11}{100} \frac{(110)^2}{25} = 53.24 \Omega$$

$$G_{T1} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_{PT1}^2} 10^{-3} = \frac{30}{110^2} 10^{-3} = 0.00248 S \quad B_{T1} \cong \frac{I_{0\%}}{100} \frac{S_T}{U_1^2} = \frac{1}{100} \frac{25}{(110)^2} = 0.00002 S$$



## 2. Constantele transformatorului în unități relative:

constantele transformatorului în unități relative raportate la mărimile nominale ale transformatorului:

- se aleg:  $S_b = S_T = 25 \text{ MVA}$ ;  $U_{b1} = U_1 = 110 \text{ kV}$ ;  $U_{b2} = U_2 = 6,6 \text{ kV}$ ;
- se calculează impedanțele de bază:

$$Z_{b1} = \frac{U_{b1}^2}{S_b} = \frac{U_1^2}{S_T} = \frac{(110)^2}{25} = 484 \Omega$$

$$Z_{b2} = \frac{U_{b2}^2}{S_b} = \frac{U_2^2}{S_T} = \frac{(6.6)^2}{25} = 1,743 \Omega$$

- se calculează constantele transformatorului în unități relative:

$$R_{pu1} = \frac{R_{T1}}{Z_{b1}} = \frac{2,52}{484} = 0,00521$$

$$R_{pu2} = \frac{R_{T2}}{Z_{b2}} = \frac{9,06048 \cdot 10^{-3}}{1,743} = 0,0052$$

$$R_{pu1} = R_{pu2} = R_{pu} = 0,0052 \quad R_{pu} = \frac{\Delta p_{sc}}{S_{PT}} 10^{-3} = \frac{130}{25} 10^{-3} = 0,0052$$



$$X_{pu1} = \frac{X_{T1}}{Z_{b1}} = \frac{53.18}{484} = 0.10988$$

$$X_{pu2} = \frac{X_{T2}}{Z_{b2}} = \frac{0.19145}{1.743} = 0.10984$$

$$X_{pu1} = X_{pu2} = X_{pu} = 0.1098$$

$$Z_{pu} = \frac{U_{sc\%}}{100} = 0.11 \quad X_{pu} = \sqrt{Z_{pu}^2 - R_{pu}^2} = \sqrt{0.11^2 - 0.0052^2} = 0.109$$

$$G_{pu1} = \frac{G_{T1}}{Y_{b1}} = \frac{0.00248}{0.00207} = 1.19807$$

$$G_{pu2} = \frac{G_{T2}}{Y_{b2}} = \frac{0.68871 \cdot 10^{-3}}{0.57372} = 1.19807$$

$$G_{pu1} = G_{pu2} = G_{pu} \cong 1.20 \quad G_{pu} = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_b} 10^{-3} = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_{PT}} 10^{-3} = \frac{30}{25} 10^{-3} = 1.20$$

$$B_{pu1} = \frac{B_{T1}}{Y_{b1}} = \frac{0.00002}{0.00207} = 0.00966$$

$$B_{pu2} = \frac{B_{T2}}{Y_{b2}} = \frac{0.00574}{0.57372} = 0.01$$

$$B_{pu1} = B_{pu2} = B_{pu} = 0.01$$

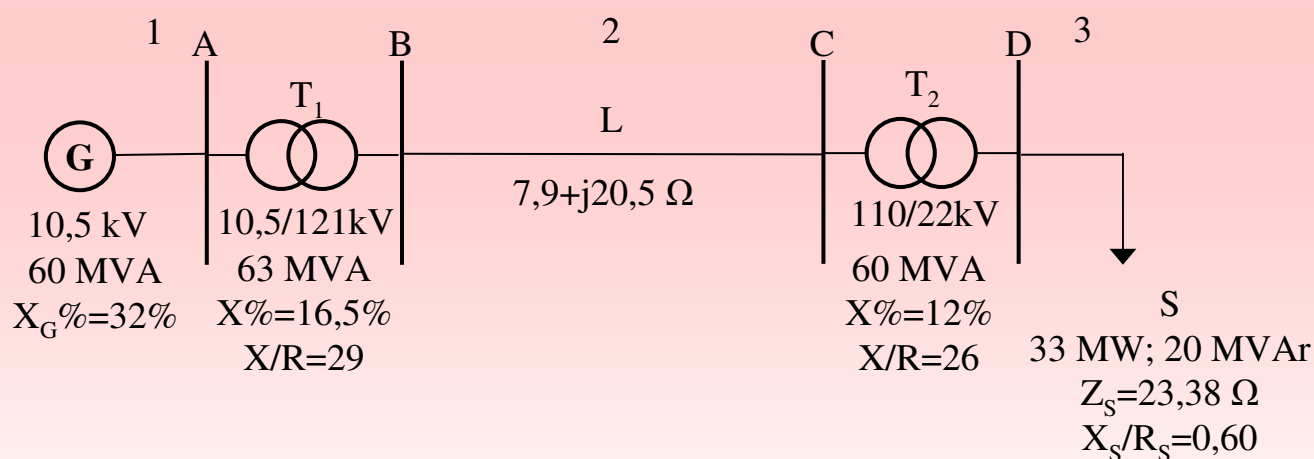
$$B_{pu} = \frac{I_{0\%}}{100} = \frac{1}{100} = 0.01$$



- se calculează constantele transformatorului în unități relative cand  $S_b=100$  MVA iar  $U_{b1}=138$  kV:

$$R_{pu}^{nou} = 0.0052 \frac{100}{25} \left( \frac{110}{138} \right)^2 = 0,01322 \quad X_{pu}^{nou} = 0.109 \frac{100}{25} \left( \frac{110}{138} \right)^2 = 0,27702$$

**Aplicatia 7.2:** Se consideră sistemul prezentat din figura următoare:



**Fig.7.1.** Rețea radială – schema monofilară.



Sistemul se consideră normal. Se cere:

1. Să se aleagă și să se calculeze mărimile de bază;
2. Să se calculeze constantele elementelor de sistem în unități relative;
3. Să se calculeze circulația curenților în regim permanent simetric.

**Soluție:**

**1.**

- Se alege puterea de bază, comună pentru întregul sistem,  $S_b = 100 \text{ MVA}$ ;
- Se aleg tensiunile de bază pentru fiecare sector, conform tabelului 7.1 și se calculează celelalte mărimi de bază:

$U_b \text{ [kV]}$			$I_b \text{ [kA]}$			$Z_b \text{ [ } \Omega \text{]}$			Obs.
$U_{b1}$	$U_{b2}$	$U_{b3}$	$I_{b1}$	$I_{b2}$	$I_{b3}$	$Z_{b1}$	$Z_{b2}$	$Z_{b3}$	
10,5	121	$121 \cdot 22 / 110 = 24,2$	5,5	0,477	2,388	1,105	146,41	5,856	corect
$110 \cdot 10,5 / 121 = 9,546$	110	22	6,055	0,525	2,627	0,911	121	4,84	corect
10,5	121	110	-	-	-	-	-	-	incorect



2. Se consideră mărimile de bază (culoarea roșie) din tabelul 7.1:

Sursa

$$R_{G,pu} = 0, \quad X_{G,pu} = \frac{32}{100} \frac{100}{60} \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,533$$

T<sub>1</sub>

$$Z_{T2,pu} = \frac{16,5}{100} \frac{100}{63} = 0,262, \quad R_{T2,pu} = \frac{0,262}{\sqrt{1+29^2}} = 0,009$$

$$X_{T1,pu} = \sqrt{0,262^2 - 0,009^2} = 0,2618$$

T<sub>2</sub>

$$Z_{T2,pu} = \frac{12}{100} \frac{100}{60} = 0,2, \quad R_{T2,pu} = \frac{0,2}{\sqrt{1+26^2}} = 0,00768$$

$$X_{T2,pu} = \sqrt{0,2^2 - 0,00768^2} = 0,1998$$

L

$$R_{L,pu} = \frac{7,9}{146,41} = 0,05395, \quad X_{L,pu} = \frac{20,5}{146,41} = 0,14$$

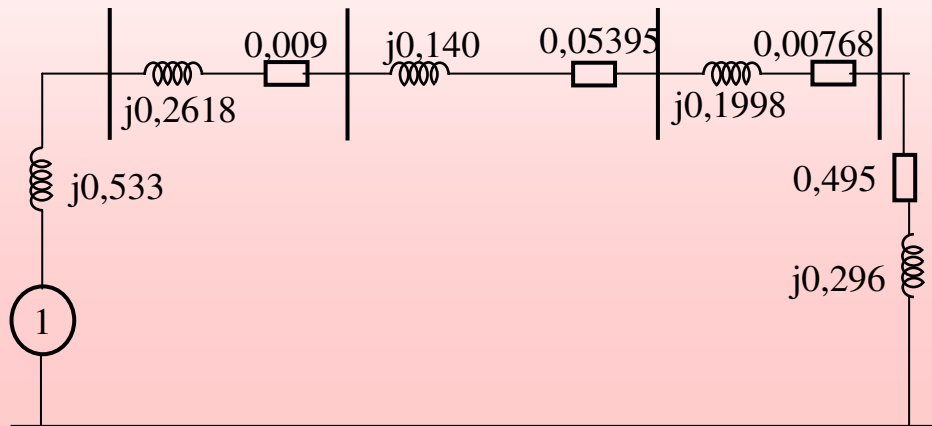
S

$$Z_{S,pu} = \frac{23,38}{5,856} = 0,577, \quad R_{S,pu} = \frac{0,577}{\sqrt{1+0,6^2}} = 0,495$$

$$X_{S,pu} = \sqrt{0,577^2 - 0,495^2} = 0,296$$



3. Schema echivalentă a rețelei este prezentată mai jos:



**Fig.7.2.** Rețea radială – schema echivalentă.

$$R_{ech,pu} = \sum_i R_{i,pu} = 0,009 + 0,00768 + 0,05395 + 0,495 = 0,56563$$

$$X_{ech,pu} = \sum_i X_{i,pu} = 0,533 + 0,2618 + 0,1998 + 0,14 + 0,296 = 1,4306$$

$$Z_{ech,pu} = \sqrt{R_{ech}^2 + X_{ech}^2} = 1,538, \quad I_{pu} = \frac{1}{Z_{ech,pu}} = \frac{1}{1,538} = 0,65$$

$$I_3 = I_{pu} \cdot I_{b3} = 2,388 \cdot 0,65 = 1,522 \text{ kA} \quad I_2 = I_{pu} \cdot I_{b2} = 0,477 \cdot 0,65 = 0,31 \text{ kA}$$

$$I_1 = I_{pu} \cdot I_{b1} = 5,5 \cdot 0,65 = 3,75 \text{ kA}$$



### *Avantajele metodei unităților relative:*

- *simplificarea analizei sistemului electric, deoarece toate impedanțele sistemului sunt în unități relative și ca urmare se pot aduna indiferent de nivelul de tensiune de care aparțin;*
- *în unități relative se elimină multiplicarea și împărțirea cu  $\sqrt{3}$  ;*
- *metoda unităților relative este foarte avantajoasă când se utilizează calculatoarele numerice;*
- *întreprinderile producătoare de echipamente electrice dau impedanța echipamentelor în procente, prin raportare la sarcina nominală, ceea ce reprezintă p.u.·100.*

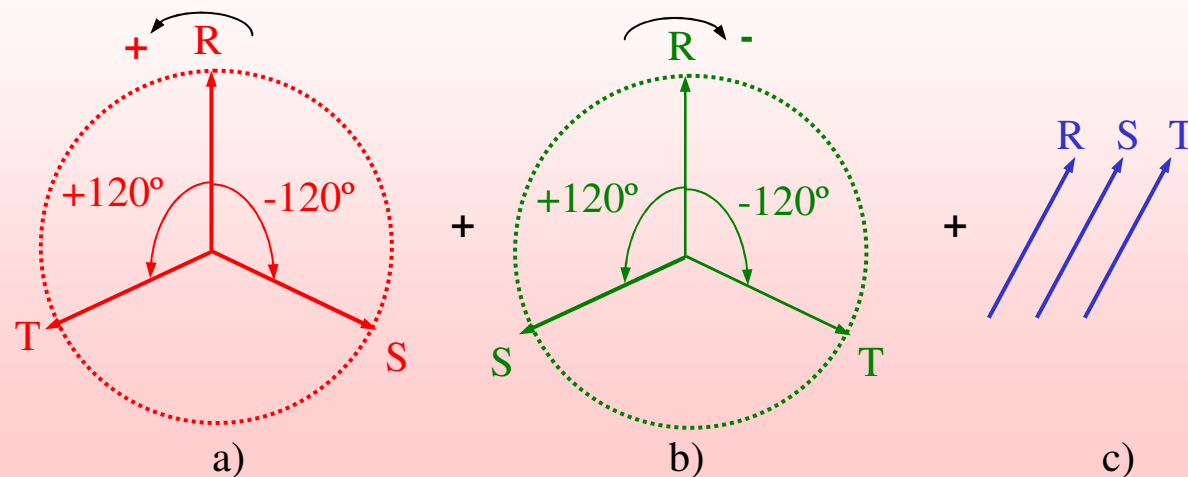


Metoda componentelor simetrice prezentată în continuare - soluționarea regimurilor nesimetrice.

### 7.3. Teoria componentelor simetrice

- 1918 *Fortescue* a propus o metoda de soluționare a unui sistem dezechilibrat denumită "*the symmetrical components of the original unbalanced set*";
- Se demonstrează că orice sistem trifazat de fazori se poate înlocui cu trei sisteme trifazate simetrice:
  - ◆ un sistem de secvență directă (sau pozitivă), format dintr-un sistem de trei fazori egali în mărime, defazați la  $120^\circ$  în sens orar;
  - ◆ un sistem de secvență inversă (sau negativă) format dintr-un sistem de trei fazori egali în mărime, defazați la  $120^\circ$  în sens antiorar;
  - ◆ un sistem de secvență homopolară (sau zero) format dintr-un sistem de trei fazori egali în mărime și în fază.





**Fig.7.2.** Sistemul de componente simetrice :

*a) sistemul de secvență pozitivă; b) sistemul de secvență negativă; c) sistemul de secvență zero*

Pentru un sistem trifazat de mărimi  $[\underline{A}_R, \underline{A}_S, \underline{A}_T]$  se poate scrie:

$$\begin{aligned}\underline{A}_R &= \underline{A}_{1R} + \underline{A}_{2R} + \underline{A}_{0R} \\ \underline{A}_S &= \underline{A}_{1S} + \underline{A}_{2S} + \underline{A}_{0S} \\ \underline{A}_T &= \underline{A}_{1T} + \underline{A}_{2T} + \underline{A}_{0T}\end{aligned}\quad (7.18)$$

**Indici:**

**1 secvență pozitivă;**

**2 secvență negativă;**

**0 secvență zero.**



Pentru un sistem trifazat, dezechilibrat  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ , dacă se alege faza A ca și origine, atunci se poate scrie:

$$\begin{aligned}\underline{V}_A &= \underline{V}_0 + \underline{V}_1 + \underline{V}_2 & \underline{V}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{V}_A + \underline{V}_B + \underline{V}_C) \\ \underline{V}_B &= \underline{V}_0 + a^2 \underline{V}_1 + a \underline{V}_2 & \underline{V}_1 &= \frac{1}{3}(\underline{V}_A + a \underline{V}_B + a^2 \underline{V}_C) \quad (7.19) \\ \underline{V}_C &= \underline{V}_0 + a \underline{V}_1 + a^2 \underline{V}_2 & \underline{V}_2 &= \frac{1}{3}(\underline{V}_A + a^2 \underline{V}_B + a \underline{V}_C) \quad (7.20)\end{aligned}$$

- geometric, transformarea înseamnă o trecere din sistemul de coordonate al fazelor A, B și C în sistemul de coordonate al componentelor simetrice, fiecare sistem având alte caracteristici simetrice;
- algebric, transformarea reprezintă o transformare liniară de ecuații;
- dacă o componentă simetrică există într-o fază, atunci ea există în toate fazele.



### ***a – operator de transformare***

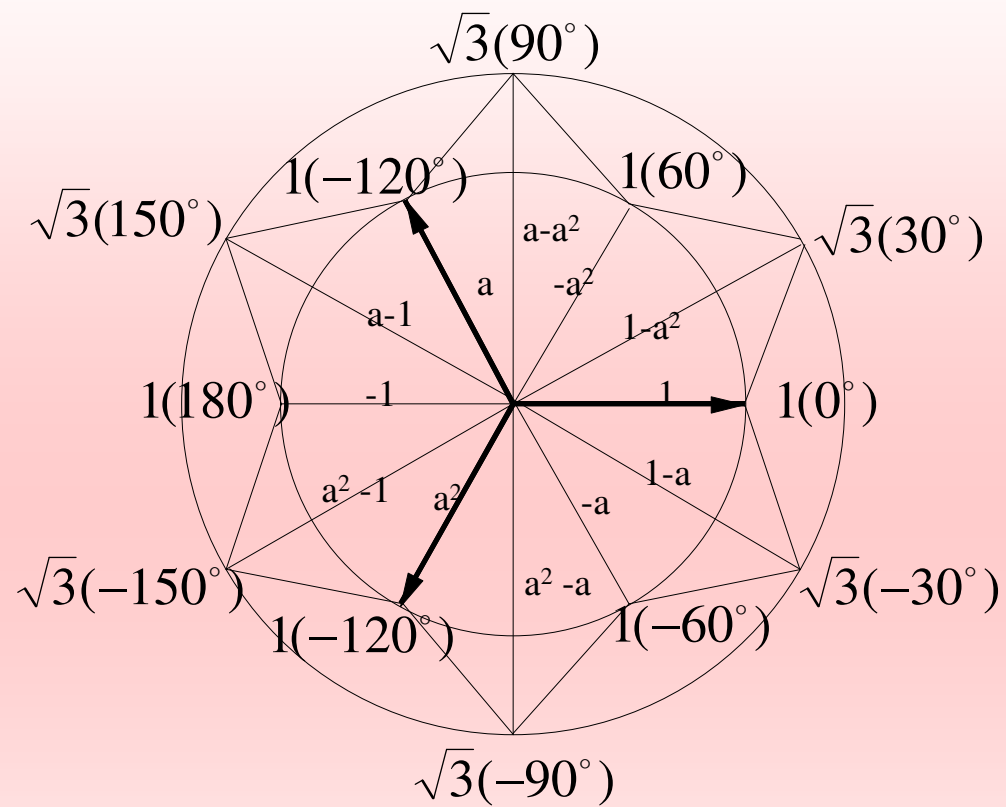
- aplicarea lui asupra unei mărimi fazorială produce rotirea acesteia cu  $120^\circ$  în sens trigonometric
- nu introduce defazaje și are următoarea expresie:

$$a = e^{j120^\circ} = -\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j0,866 \quad (7.21)$$

**Tabelul 7.2.** Operații cu operatorul a

Puterile operatorului a	Forma algebrică
$a$	$-0,5 + j0,866$
$a^2$	$-0,5 - j0,866$
$a^3$	$1 + j0,0$
$a^4$	$-0,5 + j0,866$
$a^{n+3}$	$a^n$
$1+a+ a^2$	$0,0 + j0,0$
$a+ a^2$	$-1,0 + j0,0$





**Fig.7.3.** Operații cu operatorul  $a$ .



## 7.4. Transformarea în componente simetrice

Considerând faza A fază de referință, se poate scrie:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_0 + a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (7.22) \quad \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (7.23)$$

Curenții de secvență se obțin cu relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 &= \frac{1}{3} ( \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C ) \\ \underline{I}_1 &= \frac{1}{3} ( \underline{I}_A + a \underline{I}_B + a^2 \underline{I}_C ) \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{3} ( \underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C ) \end{aligned} \quad (7.24) \quad \begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} \quad (7.25)$$



Se notează:

$$(\underline{T}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

$$(\underline{T})^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad (7.27)$$

$$[\underline{I}]_S = [\underline{T}]^{-1} [\underline{I}] \quad (7.28)$$

$$[\underline{V}]_S = [\underline{T}]^{-1} [\underline{V}] \quad (7.29)$$



## 7.5. Impedanțe de secvență

### *A. Impedanța de secvență pozitivă/directă $Z_1$ ( $R_1$ , $X_1$ ).*

Impedanța de secvență directă/pozitivă  $Z_1$  a unui element component de sistem se definește ca fiind raportul dintre tensiunea de fază și curentul de linie, atunci când elementul respectiv este alimentat de la un sistem simetric de secvență pozitivă.

Impedanța de secvență directă reprezintă:

- impedanța liniilor;
- impedanța de scurtcircuit a transformatorului sau a reactorului;
- impedanța generatorului.

**Observații:** În condițiile normale de funcționare ale unui sistem electric, simetric și echilibrat, există numai secvența directă a curenților și tensiunilor.



### ***B. Impedanța de secvență inversă/negativă $Z_2$ ( $R_2$ , $X_2$ ).***

Impedanța de secvență inversă/negativă  $Z_2$  a unui element component de sistem se definește ca fiind raportul dintre tensiunea de fază și curentul de linie, atunci când elementul respectiv este alimentat de la un sistem simetric de secvență negativă .

**Observații:** Pentru linii electrice, transformatoare electrice și reactoare, impedanța de secvență negativă corespunde impedanței de secvență directă deoarece impedanța acestor elemente de sistem nu se schimbă atunci când un sistem simetric de secvență negativă este aplicat acestora. Pentru generatoarele electrice, ca de altfel și pentru orice mașină electrică, impedanța de secvență inversă este diferită față de cea de secvență pozitivă, deoarece atunci când se aplică un set de tensiuni de secvență negativă (sistem ce se rotește în sens contrar sensului de rotație a mașinii) și care are deci o viteză dublă de rotație față de rotor.

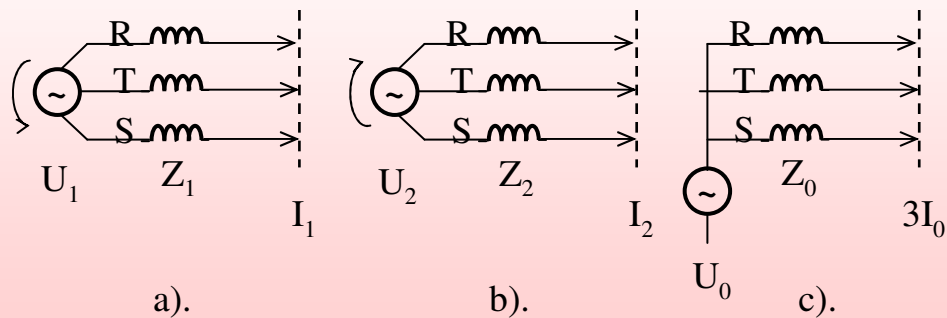


### *C. Impedanța de secvență homopolară/zero $Z_0$ ( $r_0$ , $X_0$ )*

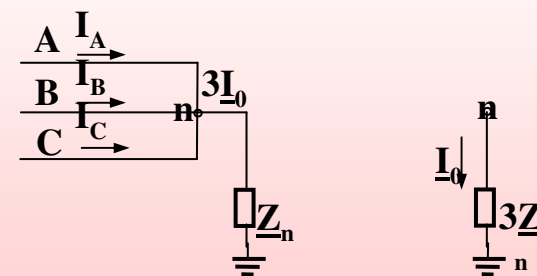
Impedanța de secvență homopolară/zero  $Z_0$  a unui element component de sistem se definește ca fiind raportul dintre tensiunea de fază și curentul de linie, atunci când elementul respectiv este alimentat de la un sistem simetric de secvență homopolară.

**Observații:** Pentru mașinile sincrone, impedanța de secvență homopolară în general este cu mult mai mică decât impedanța sincronă supratranzitorie. Pentru transformatoarele trifazate, impedanța de secvență homopolară depinde de puterea transformatorului, iar la aceeași putere este funcție de tipul constructiv și de conexiunile transformatorului. La liniile electrice, impedanța de secvență homopolară depinde de tipul constructiv al liniei (aeriană sau în cablu) și de calea de întoarcere a curentului. Impedanța de secvență homopolară a unei legături la pământ este egală cu de trei ori valoarea impedanței de legare la pământ.





**Fig.7.4.** Impedanțele de secvență:  
*a). Pozitivă; b). Negativă c). Homopolară/zero.*



**Fig.7.5.** Impedanța de secvență homopolară a unei impedanțe de legare la pământ.

$$\underline{V}_0 = \underline{V}_n$$

$$\underline{V}_0 = (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) \underline{Z}_n \quad (7.30)$$

$$\underline{V}_0 = 3\underline{I}_0 \underline{Z}_n = \underline{I}_0 (3\underline{Z}_n)$$



<b>IMPEDANȚA DE SECVENȚĂ DIRECTĂ, <math>Z_1</math></b>	
<b>Mașini sincrone</b>	$X''$ - reactanța supratranzitorie/subtranzitorie $X'$ - reactanța tranzitorie $X_d$ , reactanța sincrona $X'$ se utilizează în calculele de stabilitate. $X_1 = X''$ sau $X_1 = X'$ sau $X_1 = X_d$ $X_1$ este reactanța de secvență directă
<b>Transformatoare electrice</b>	$R_1 = R_T$ ; $X_1 = X_T$ ; $Z_1 = R_1 + j X_1$ $R_1$ , $X_1$ parametrii de secvență directă $R_T$ , $X_T$ parametrii transformatorului
<b>Linii electrice</b>	$X_1 = X_{0L} * L$ ; $R_1 = R_{0L} * L$ $X_{0L}$ , $R_{0L}$ parametrii liniei, în ohm/Km.
<b>Reactoare</b>	$X_1 = X_R$ ; $R_1 = R_R$



<b>IMPEDANȚA DE SECVENȚĂ INVERSĂ, <math>Z_2</math></b>	
<b>Mașini sincrone:</b>	Turbogeneratoare: $X_2 = X_1$ Generatoare cu poli aparenti: $X_2 > X_1$ Mașini asincrone: $X_2 \sim X_1$
<b>Transformatoare electrice:</b>	$X_2 = X_1$
<b>Linii electrice;</b>	$X_2 = X_1$
<b>Reactoare:</b>	$X_2 = X_1$
<b>IMPEDANȚA DE SECVENȚĂ HOMOPOLARĂ, <math>Z_0</math></b>	
<b>Mașini sincrone:</b>	$X_0 \ll$ reactanța inițială
<b>Transformatoare electrice:</b>	Notă: Valorile sunt puse la dispoziție de firmele constructoare, sau se dau în tabele.
<b>Linii electrice;</b>	1. Linii electrice aeriene, cu tensiunea nominală de: 35, 110, 220 KV simplu circuit: $X_0 = (3...4)X_1$ 2. Linii electrice aeriene, cu tensiunea nominală de: 35, 110, 220 KV dublu circuit: $X_0 = (6...7)X_1$
<b>Reactoare:</b>	Notă: Valorile sunt puse la dispoziție de firmele constructoare, sau se dau în tabele: $X_0 = X_1 = X_2$



## 7.6. Rețele de secvență

Rețelele de secvență, sunt rețele monofazate în care fiecare element component de rețea este reprezentat printr-o impedanță de secvență corespunzătoare secvenței respective.

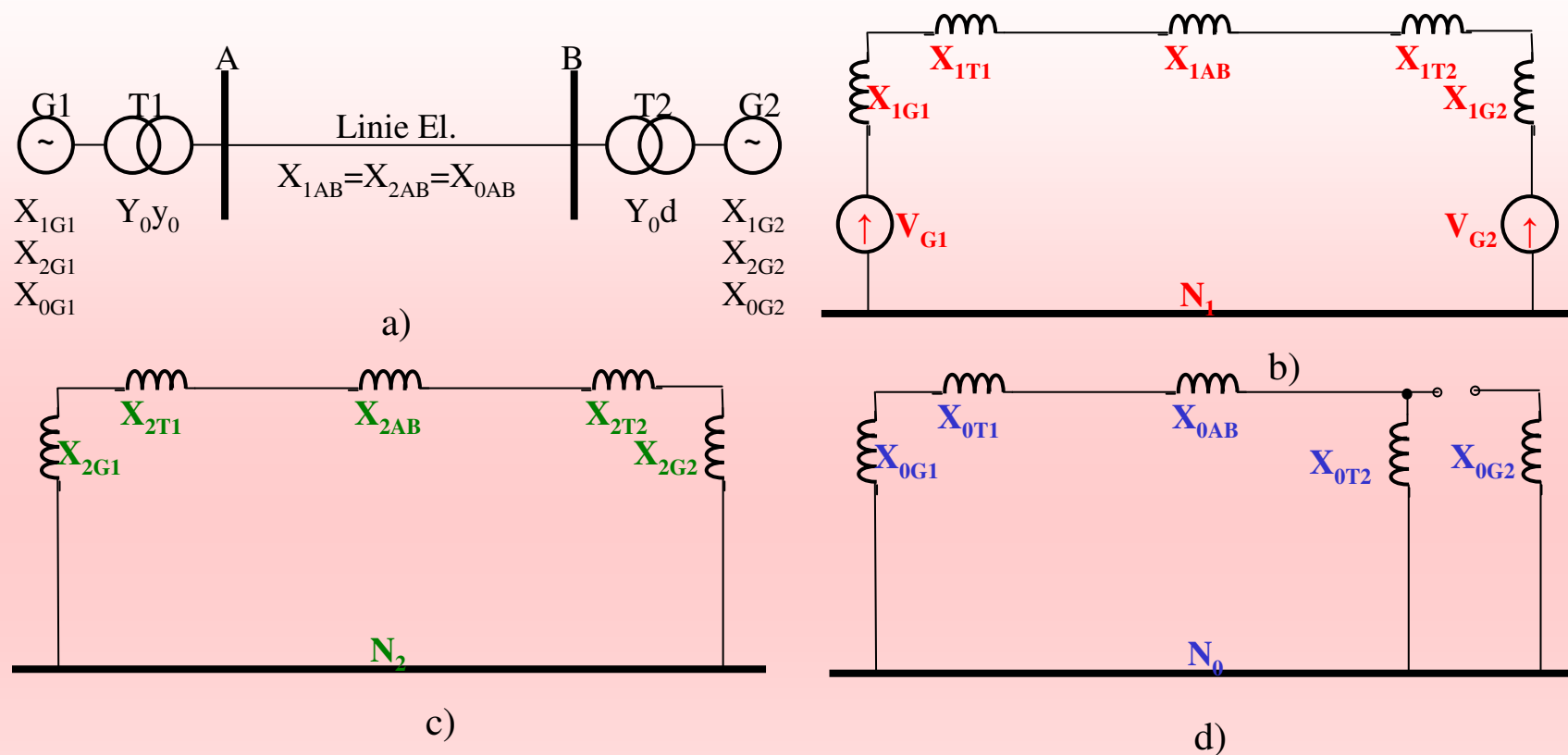
### A. Rețele de secvență pozitivă/directă

Parametrii necesari întocmirii rețelelor de secvență:

- tensiunea și impedanța generatorului;
- impedanța transformatorului;
- impedanțele liniilor electrice;
- impedanța echivalentă a sarcinii electrice.

Tensiunile electromotoare conțin numai componentă directă astfel încât ele vor apărea ca și surse de tensiune numai în schema de secvență directă.





**Fig.7.6.** Rețelele de secvență:

a) Schema monofilară de conexiuni; b) Rețea echivalentă de secvență pozitivă;  
c) Rețea echivalentă de secvență negativă; d) Rețea echivalentă de secvență homopolară.



## **B. Rețele de secvență negativă/inversă**

Rețeaua de secvență negativă/inversă are aceeași structură ca și rețeaua de secvență directă/pozitivă. Rețeaua de secvență inversă nu are surse de tensiune. În calculele practice se considera  $X_2 = X_1$ .

## **C. Rețele de secvență homopolară/zero**

Rețeaua de secvență homopolară/zero este complet diferită față de cea de secvență directă și inversă. Această rețea are următoarele particularități:

- Nu are surse de tensiune – este o rețea pasivă;
- Structura rețelei este determinată de transformatoarele de putere din rețea;
- Impedanțele de pământare din schema de conexiuni apar în rețeaua de secvență homopolară multiplicată cu trei.

Rețeaua de secvență homopolară reprezintă calea curentului de secvență homopolară.