

## CAPITOLUL 3

---

### UNITĂȚI RELATIVE

În studiul sistemelor electroenergetice apar situații în care exprimarea parametrilor sistemului și a mărimilor de stare în unități absolute – cum ar fi  $\Omega$ , S, kV sau MVA – nu mai este avantajoasă, de exemplu în cazul analizei unui sistem electroenergetic cu mai multe nivele de tensiune, pentru care, de exemplu, compararea nivelului tensiunilor din noduri este îngreunată de trecerea între treptele de tensiune. În asemenea cazuri, este convenabilă folosirea **sistemului de unități relative**, care descrie în principiu **normalizarea** mărimilor menționate prin aducerea la o formă comună, care permite comparația simplă a acestora. De regulă, normalizarea se face prin raportare la o mărime de referință, numită frecvent **mărime de bază**.

Prin definiție, o mărime exprimată în unități relative – notate prescurtat **u.r.** – reprezintă raportul dintre valoarea efectivă a aceleiași mărimi și valoarea de bază, ambele exprimate în unități absolute:

$$\text{Valoare}_{\text{u.r.}} = \frac{\text{Valoare}_{\text{efectiva}}}{\text{Valoare}_{\text{de bază}}} \quad [\text{u.r.}] \quad (\text{UR.1})$$

Procentele reprezintă un caz particular de unități relative, pentru care valoarea de bază este 100. În acest caz,  $x=0.95$  u.r. este echivalent cu  $x=95\%$ .

Evidențierea mărimilor exprimate în unități relative se face folosind de obicei semnul „\*” ( $\underline{U}^*$ ,  $\underline{Z}^*$  etc). El nu trebuie confundat cu același semn, corespunzător conjugării numerelor complexe.

În general, în cazul unui sistem electric, exceptând defazajele mărimilor complexe, există patru mărimi electrice între care se stabilesc relații independente, și anume tensiunea  $\underline{U}$ , curentul  $\underline{I}$ , puterea aparentă  $\underline{S}$  și impedanța  $\underline{Z}$ :

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z} \cdot \underline{I}, \\ \underline{S} &= \underline{U} \cdot \underline{I}^* \end{aligned} \quad (\text{UR.2})$$

Ca urmare, pentru explicitarea tuturor mărimilor ce caracterizează un sistem electroenergetic este suficient și necesar să se aleagă valori de bază doar pentru două dintre aceste mărimi, restul valorilor rezultând din calcul. În ceea ce privește defazajele asociate argumentelor numerelor complexe ce descriu mărimile de mai sus, acestea sunt valori adimensionale și ca urmare raportarea lor nu este necesară.

Mărimile de bază se aleg întotdeauna numere reale și, de regulă, se folosesc în acest scop tensiunea și puterea aparentă, notate  $U_B$ , respectiv  $S_B$ . Puterea de bază are întotdeauna o valoare unică, și ea se alege pentru ușurința calculului ca multiplu al valorii 10, în timp ce pentru tensiunea de bază se indică mai multe valori, în funcție de numărul de nivele de tensiune folosite.

Dacă se urmărește întocmai respectarea rapoartelor de transformare ale transformatoarelor sau autotransformatoarelor din sistem, atunci valorile impedanțelor / admitanțelor în u.r., calculate prin raportare la cele două sau trei tensiuni nominale vor fi egale.

Pe baza puterii aparente și a tensiunii de bază alese, rezultă curentul și impedanța / admitanța de bază:

$$I_B = \frac{S_B}{U_B}, \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}, \quad Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_B}{U_B^2} \quad (\text{UR.3})$$

În cazul trecerii de la unități absolute la unități relative, legătura dintre mărimile de bază trifazate (3F pentru putere și L pentru tensiune) și cele monofazate (F) este:

$$S_B^{3F} = 3 \cdot S_B^F \quad (\text{UR.4})$$

$$U_B^{FF} = \sqrt{3} \cdot U_B^F$$

iar valorile relative ale mărimilor monofazate și trifazate sunt egale între ele.

$$\underline{S}_{u.r.}^{3F} = \frac{\underline{S}_B^{3F}}{S_B^{3F}} = \frac{3 \cdot \underline{S}_B^F}{3 \cdot S_B^F} = \underline{S}_{u.r.}^F, \quad \underline{U}_{u.r.}^{FF} = \frac{\underline{U}_B^{FF}}{U_B^{FF}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_B^F}{\sqrt{3} \cdot U_B^F} = \underline{U}_{u.r.}^F \quad (\text{UR.5})$$

Deoarece în cadrul unui sistem electroenergetic sau al unui subsistem al acestuia nu toate echipamentele și instalațiile au aceleași date de catalog pentru mărimile de bază – tensiune și putere aparentă – sau există zone în care pentru aceste mărimi s-au ales valori distincte, este necesar ca la trecerea de la un echipament la altul sau de la o zonă la alta impedanțele / admitanțele să fie recalculat. Deoarece mărimea în unități fizice este aceeași în ambele cazuri, se poate scrie:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{u.r.}^{vechi} \cdot Z_B^{vechi} = \underline{Z}_{u.r.}^{nou} \cdot Z_B^{nou} \quad \underline{Y} = \underline{Y}_{u.r.}^{vechi} \cdot Y_B^{vechi} = \underline{Y}_{u.r.}^{nou} \cdot Y_B^{nou} \quad (\text{UR.6})$$

de unde rezultă:

$$\underline{Z}_{u.r.}^{nou} = \underline{Z}_{u.r.}^{vechi} \cdot \frac{Z_B^{vechi}}{Z_B^{nou}} \quad \text{sau} \quad \underline{Z} = \underline{Z}_{u.r.}^{vechi} \cdot \frac{(U_B^{vechi})^2}{(U_B^{nou})^2} \cdot \frac{S_B^{nou}}{S_B^{vechi}} \quad (\text{UR.6})$$

$$\underline{Y}_{u.r.}^{nou} = \underline{Y}_{u.r.}^{vechi} \cdot \frac{Y_B^{vechi}}{Y_B^{nou}} \quad \text{sau} \quad \underline{Y}_{u.r.}^{nou} = \underline{Y}_{u.r.}^{vechi} \cdot \frac{(U_B^{nou})^2}{(U_B^{vechi})^2} \cdot \frac{S_B^{vechi}}{S_B^{nou}}$$

Principalele avantaje ale utilizării unităților relative se regăsesc în cazul tratării transformatoarelor și autotransformatoarelor și includerii acestora în schemele echivalente ale sistemului analizat.

În continuare se va considera cazul unui transformator cu două înfășurări, însă rezultatele pot fi extinse și pentru autotransformatoare și transformatoare cu trei înfășurări.

În ipoteza în care transformatorul ar fi considerat izolat de sistem, parametrii acestuia se raportează la mărimile de bază nominale descrise de puterea nominală  $S_n$  și una din tensiunile nominale ale înfășurărilor de înaltă ( $U_n^{IT}$ ) sau joasă ( $U_n^{JT}$ ) tensiune:

$$S_B = S_n, \quad U_{B1} = U_B^{IT} \quad \text{sau} \quad U_{B2} = U_B^{JT} \quad (\text{UR.7})$$

În funcție de tensiunea nominală la care se face raportarea, rezultă impedanța și admitanța de bază:

$$Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_{B1}}, \quad Y_{B1} = \frac{S_{B1}}{U_{B1}^2}$$

respectiv (UR.8)

$$Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_{B2}}, \quad Y_{B2} = \frac{S_{B2}}{U_{B2}^2}$$

În aceste condiții, parametrii transformatorului exprimați în u.r., pentru cele două variante de raportare, vor fi:

$$\begin{aligned} R_{u.r.} &= \frac{R^{IT}}{Z_{B1}} = \frac{\Delta P_{sc} \cdot (U_n^{IT})^2}{S_n^2} \cdot \frac{S_n}{(U_n^{IT})^2} = \frac{\Delta P_{sc} \cdot (U_n^{JT})^2}{S_n^2} \cdot \frac{S_n}{(U_n^{JT})^2} = \frac{R^{JT}}{Z_{B2}} = \frac{\Delta P_{sc}}{S_n} \\ X_{u.r.} &= \frac{X^{IT}}{Z_{B1}} = \frac{u_{sc} \cdot (U_n^{IT})^2}{100 \cdot S_n} \cdot \frac{S_n}{(U_n^{IT})^2} = \frac{u_{sc} \cdot (U_n^{JT})^2}{100 \cdot S_n} \cdot \frac{S_n}{(U_n^{JT})^2} = \frac{X^{JT}}{Z_{B2}} = \frac{u_{sc}}{100} \\ G_{u.r.} &= \frac{G^{IT}}{Y_{B1}} = \frac{\Delta P_{Fe}}{(U_n^{IT})^2} \cdot \frac{(U_n^{IT})^2}{S_n} = \frac{\Delta P_{Fe}}{(U_n^{JT})^2} \cdot \frac{(U_n^{JT})^2}{S_n} = \frac{G^{JT}}{Y_{B2}} = \frac{\Delta P_{Fe}}{S_n} \\ B_{u.r.} &= \frac{B^{IT}}{Y_{B1}} = \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot (U_n^{IT})^2} \cdot \frac{(U_n^{IT})^2}{S_n} = \frac{i_0 \cdot S_n}{100 \cdot (U_n^{JT})^2} \cdot \frac{(U_n^{JT})^2}{S_n} = \frac{B^{JT}}{Y_{B2}} = \frac{i_0}{100} \end{aligned} \quad (\text{UR.9})$$

Aceste relații evidențiază independența expresiilor parametrilor transformatorului în u.r. de tensiunea de raportare, astfel încât valorile acestor parametri rămân neschimbate când raportarea se face la o înfășurare sau alta. Această proprietate este îndeplinită întotdeauna când tensiunile de bază se aleg egale cu tensiunile nominale ale înfășurărilor transformatorului, adică:

$$\frac{U_{B2}}{U_{B1}} = \frac{U_n^{JT}}{U_n^{IT}} = N \quad (\text{UR.10})$$

De regulă, pentru a ține seama și de reglajul de tensiune, parametrii transformatorului se raportează la tensiunea nominală a înfășurării de JT (înfășurarea nereglată), astfel încât în schema echivalentă partea de pierderi  $Z_T - Y_T$  se raportează la  $U_n^{JT}$  și se înscriează cu un transformator ideal cu raportul de transformare  $N = U_n^{JT} / U_n^{IT}$  (Fig. 1.a).

În acest caz, prin trecerea la unități relative, pentru tensiunile la bornele transformatorului ideal se poate scrie:

$$U_{1 \text{ u.r.}} = \frac{U_1}{U_n^{IT}} \quad (UR.11)$$

$$U'_{1 \text{ u.r.}} = \frac{U'_1}{U_n^{JT}} = \frac{N \cdot U_1}{N \cdot U_n^{IT}} = \frac{U_1}{U_n^{IT}} = U_{1 \text{ u.r.}}$$

Cu alte cuvinte, dacă schema echivalentă se exprimă în unități relative, tensiunile la bornele primare și secundare ale transformatorului ideal sunt identice, adică transformatorul ideal poate fi eliminat din schema echivalentă (Fig. 1.b).

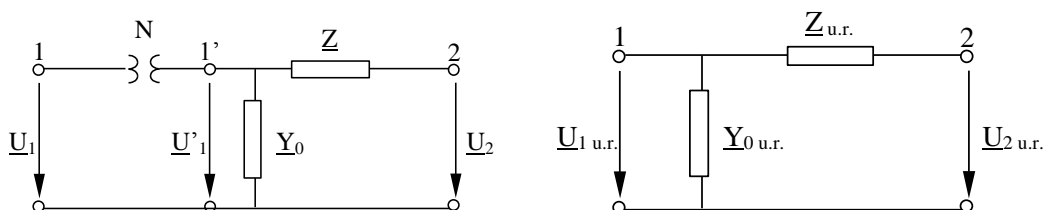


Fig. UR.1 – Schemele echivalente ale transformatorului cu două înfășurări în unități absolute (a) și relative (b).

În cazul în care la calculul raportului de transformare se folosește numărul spirelor celor două înfășurări ( $N = N_{JT} / N_{IT}$ ), la alegerea tensiunilor de bază ale transformatorului trebuie să se țină seama și de conexiunile înfășurărilor de IT și JT, după cum se indică în Tabelul 1.

Tabelul UR.1 – Influența conexiunilor înfășurărilor transformatorului cu două înfășurări asupra alegerii tensiunilor de bază.

Conexiuni		Raportul tensiunilor de bază $U_{B2} / U_{B1}$
Înfășurare JT	Înfășurare IT	
Y	Y	N
$\Delta$	$\Delta$	
$\Delta$	Y	$N / \sqrt{3}$
Y	$\Delta$	$N * \sqrt{3}$

### Reguli pentru calculul în unități relative

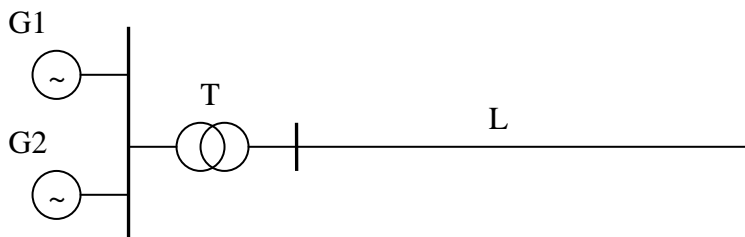
Pentru modelarea simplă și corectă a sistemului analizat se recomandă respectarea următoarei succesiuni de pași:

- Reprezentarea schemei monofilare a sistemului.
- Alegerea unei puteri aparente de bază comună pentru întregul sistem (se recomandă o valoare egală cu un multiplu de 10 MVA).
- Pe schema monofilară se notează rapoartele nominale de transformare ale (auto)transformatoarelor.
- Individualizarea zonelor distincte ale sistemului, separate prin (auto)transformatoare.
- Alegerea tensiunii de bază într-una din zonele sistemului (se recomandă valoarea tensiunii nominale din zona respectivă).
- Se consideră succesiv celelalte zone ale sistemului, pentru care se determină tensiunile de bază, pornind de la tensiunea de bază aleasă la pasul anterior și rapoartele nominale de transformare ale transformatoarelor ce separă zonele.
- Calculul impedanței și curentului de bază pentru fiecare zonă din sistem.
- Exprimarea în u.r. a impedanțelor / admitanțelor, injectiilor de putere și / sau curent și tensiunilor în noduri pentru fiecare zonă din sistem.
- Reprezentarea schemei echivalente monofazate în u.r. și eliminarea transformatoarelor, care se înlocuiesc prin conexiuni galvanice.
- Efectuarea calculelor și, dacă este cazul, transformarea rezultatelor din u.r. în unități fizice.

### Exemple

#### Problema 1

Să se calculeze în unități relative parametrii rețelei electrice din figura de mai jos :



Se dau :

Parametrii generatoarelor :

	$U_n$ [kV]	X	$S_n$ [MVA]
G1	2.5	10%	10
G2	2.5	8%	5

Parametrii transformatorului

	$U_n^i / U_n^j$ [kV]	X	$S_n$ [MVA]
T	2.5 / 231	6%	15

Parametrii liniei :

	R [ohm]	X [ohm]
L1	4	60

Se consideră puterea de bază  $S_b = 15 \text{ MVA}$ .

**(A) Zona I – G1 + G2 + T**

Se alege arbitrar tensiunea de bază ca fiind tensiunea nominală a înfășurării de JT a transformatorului T:  $U_{b1} = U_{nG1,G2} = U_{n,T}^{JT}$

În zona I, pentru generatoare se face trecerea între unități relative, iar parametrii transformatorului T se calculează în funcție de tensiunea nominală a înfășurării dinspre generatoare:

$$X_{G1}^* = X_{G1} \cdot \left( \frac{U_{nom G1}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom G1}} \right) = 0.1 \cdot \left( \frac{U_{nom G1}}{U_{nom G1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{15}{10} \right) = 0.15 \quad [u.r.]$$

$$X_{G2}^* = X_{G2} \cdot \left( \frac{U_{nom G2}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom G2}} \right) = 0.08 \cdot \left( \frac{U_{nom G2}}{U_{nom G2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{15}{5} \right) = 0.24 \quad [u.r.]$$

$$X_T^* = X_T \cdot \left( \frac{U_{nom T}^{JT}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom T}} \right) = 0.06 \cdot \left( \frac{U_{b1}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom T}} \right) = 0.06 \cdot \frac{15}{15} = 0.06 \quad [u.r.]$$

**(B) Zona II – T + L**

Se recalculează tensiunea de bază:  $U_{b2} = U_{b1} \cdot \frac{U_{nom T}^{IT}}{U_{nom T}^{JT}} = U_{nom T}^{IT} = 231 [kV]$

Recalculând reactanța relativă a transformatorului T pentru Zona II, valoarea ei va rămâne neschimbată :

$$X_T^* = X_T \cdot \left( \frac{U_{nom T}^{IT}}{U_{b2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom T}} \right) = 0.06 \cdot \left( \frac{U_{b2}}{U_{b2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nom T}} \right) = 0.06 \cdot \frac{15}{15} = 0.06 \quad [u.r.]$$

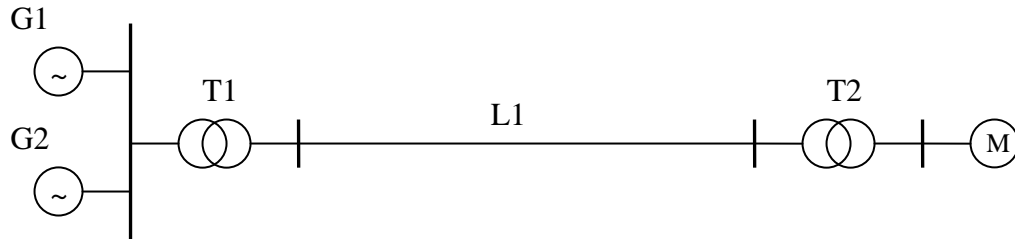
Impedanța relativă a liniei L se va calcula raportând mărimea absolută la impedanța de bază pentru zona II, calculată ca:  $Z_{b2} = \frac{U_{b2}^2}{S_b} = \frac{231^2 [kV]^2}{15 [MVA]} = 3557.4 [\Omega]$

Va rezulta:

$$Z_L^* = \frac{R_L + j \cdot X_L}{Z_{b2}} = \frac{4 + j \cdot 60}{3557.4} = 0.00112 + j \cdot 0.01687 \quad [u.r.]$$

## Problema 2

Să se calculeze în unități relative parametrii rețelei electrice din figura de mai jos :



Se dau :

Parametrii generatoarelor :

	$U_n$ [kV]	X	$S_n$ [kVA]
G1	2.5	20%	10
G2	2.5	30%	20

Parametrii transformatoarelor

	$U_n^i / U_n^j$ [kV]	X [u.r. nom]	$S_n$ [kVA]
T1	2.5 / 8	10%	40
T2	10 / 5	9%	80

Parametrii liniei :

	R [ohm]	X [ohm]
L1	50	200

Parametrii motorului :

	$U_n$ [kV]	X	$S_n$ [kVA]
M	4	10%	25

Se consideră  $S_b = 50$  kVA

De această dată, cele două transformatoare delimitează trei zone de calcul:

### (A) Zona I – G1 + G2 + T1

Se alege tensiunea de bază pentru Zona I ca fiind tensiunea nominală a generatoarelor G1 și G2, respectiv tensiunea nominală a înfășurării de JT a transformatorului T1:  $U_{b1} = 2.5$  [kV].

Nu este necesar calculul impedenței de bază  $\underline{Z}_{B1}$ , deoarece în zona 1 avem doar generatoarele și transformatorul, pentru care se realizează schimbarea bazei, din procente în noua bază.

$$X_{G1}^* = X_{G1} \cdot \left( \frac{U_{nG1}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nG1}} \right) = 0.2 \cdot \left( \frac{U_{nG1}}{U_{nG1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{50}{10} \right) = 1 \quad [u.r.]$$

$$X_{G2}^* = X_{G2} \cdot \left( \frac{U_{nG2}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nG2}} \right) = 0.3 \cdot \left( \frac{U_{nG2}}{U_{nG2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{50}{20} \right) = 0.75 \quad [u.r.]$$

$$X_{T1}^* = X_{T1} \cdot \left( \frac{U_{nT1}^{JT}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT1}} \right) = 0.1 \cdot \left( \frac{U_{b1}}{U_{b1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT1}} \right) = 0.1 \cdot \frac{50}{40} = 0.125 \quad [u.r.]$$

#### (A) Zona II – T1+L1+T2

Se recalculează tensiunea de bază:  $U_{b2} = U_{b1} \cdot \frac{U_{nT1}^{IT}}{U_{nT1}^{JT}} = 2.5 \cdot \frac{8}{2.5} = 8 [kV]$

și impedența de bază:  $Z_{b2} = \frac{U_{B2}^2}{S_B} = \frac{(8 [kV])^2}{50 [kVA]} = 1280 [ohm]$

$$X_{T1}^* = X_{T1} \cdot \left( \frac{U_{nT1}^{IT}}{U_{b2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT1}} \right) = 0.1 \cdot \left( \frac{U_{b2}}{U_{b2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT1}} \right) = 0.1 \cdot \frac{50}{40} = 0.125 \quad [u.r.]$$

$$Z_L^* = \frac{R_L + j \cdot X_L}{Z_{b2}} = \frac{50 + j \cdot 200}{1280} = 0.039 + j \cdot 0.156 \quad [u.r.]$$

$$X_{T2}^* = X_{T2} \cdot \left( \frac{U_{nT2}^{IT}}{U_{b2}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT2}} \right) = 0.09 \cdot \left( \frac{10 [kV]}{8 [kV]} \right)^2 \cdot \left( \frac{50 kVA}{80 kVA} \right) = 0.09 \cdot \frac{10 \cdot 50}{8 \cdot 80} = 0.0703 \quad [u.r.]$$

#### (A) Zona III – T2+M

Se recalculează tensiunea de bază:  $U_{b3} = U_{b2} \cdot \frac{U_{nT2}^{JT}}{U_{nT2}^{IT}} = 8 \cdot \frac{5}{10} = 4 [kV]$

$$X_{T2}^* = X_{T2} \cdot \left( \frac{U_{nT2}^{JT}}{U_{b3}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nT2}} \right) = 0.09 \cdot \left( \frac{5 [kV]}{4 [kV]} \right)^2 \cdot \left( \frac{50}{80} \right) = 0.09 \cdot \frac{5 \cdot 50}{4 \cdot 40} = 0.0703 \quad [u.r.]$$

$$X_M^* = X_M \cdot \left( \frac{U_{nM}}{U_{b3}} \right)^2 \cdot \left( \frac{S_b}{S_{nM}} \right) = 0.1 \cdot \left( \frac{4 [kV]}{4 [kV]} \right)^2 \cdot \left( \frac{50}{25} \right) = 0.1 \cdot 2 = 0.2 \quad [u.r.]$$