

MODELAREA LINIILOR LUNGI DE TRANSPORT AL ENERGIEI ELECTRICE PRIN INTERMEDIUL SCHEMELOR ECHIVALENTE

1. Obiectivele lucrării

În cadrul acestei lucrări se analizează posibilitățile de modelare a liniilor lungi de transport al energiei electrice prin intermediul următoarelor tipuri de scheme echivalente:

- ❖ *schema cu un singur cuadripol, cu parametri globali;*
- ❖ *schema cu un singur cuadripol, cu parametri corecțai;*
- ❖ *schema cu lanț de cuadripoli elementari.*

Rezultatele experimentale obținute, pentru diverse regimuri de funcționare, în cazul utilizării succesive a celor trei tipuri de scheme echivalente se compară cu rezultatele obținute prin calcule bazate pe ecuațiile de funcționare ale liniilor lungi cu parametri uniform distribuiți, în regim staționar armonic.

2. Considerații de ordin teoretic

Pentru analiza regimurilor de funcționare ale liniilor electrice lungi de transport trebuie luate în considerare următoarele aspecte:

- parametrii electrici ai acestora sunt caracterizați de o repartiție uniformă de-a lungul liniei (cu alte cuvinte, unei unități de lungime îi revin rezistența r_0 , reactanța inductivă x_0 , conductanța g_0 și susceptanța capacitivă b_0);
- în regim normal de funcționare, liniile de transport sunt încărcate simetric (deci, cele trei faze funcționează în condiții identice), fapt ce face suficient studiul fenomenelor ce caracterizează o singură fază;
- funcționarea liniilor electrice lungi de transport se poate analiza cu ajutorul *ecuațiilor telegraștilor*, scrise în mărimi instantanee.

2.1 Ecuațiile de funcționare ale liniilor lungi în mărimi instantanee

Se consideră o linie monofazată fictivă, echivalentă unei linii trifazate. Linia echivalentă monofazată considerată este compusă din conductorul de fază și conductorul fictiv de nul.

Schema electrică monofilară a liniei propuse pentru analiză este reprezentată în Figura 1, iar schema echivalentă monofazată a liniei este reprezentată în Figura 2.

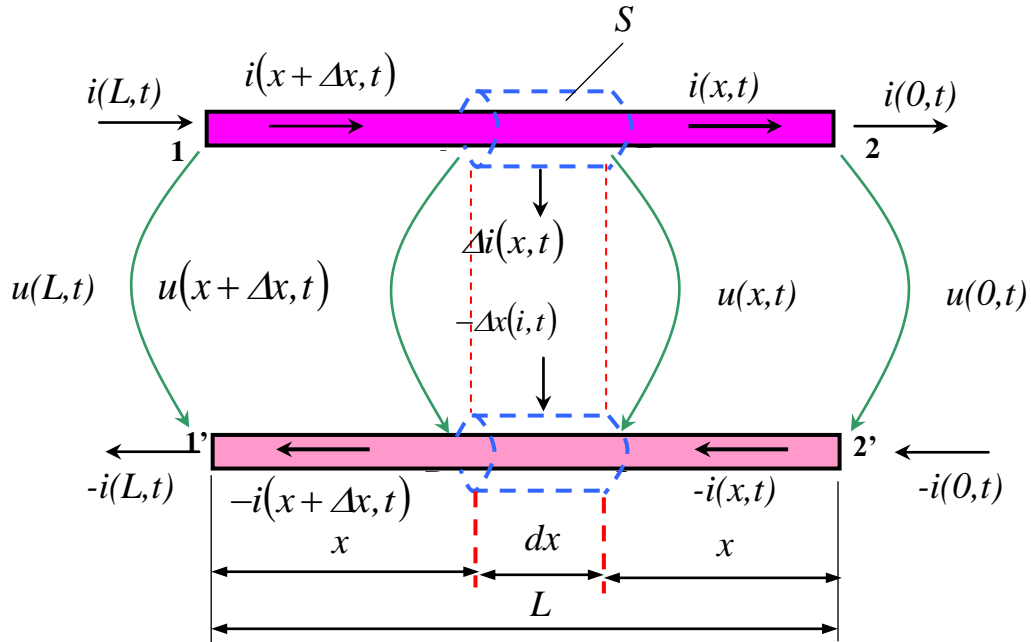


Figura 1 Schema electrică monofilară a unei linii lungi de transport

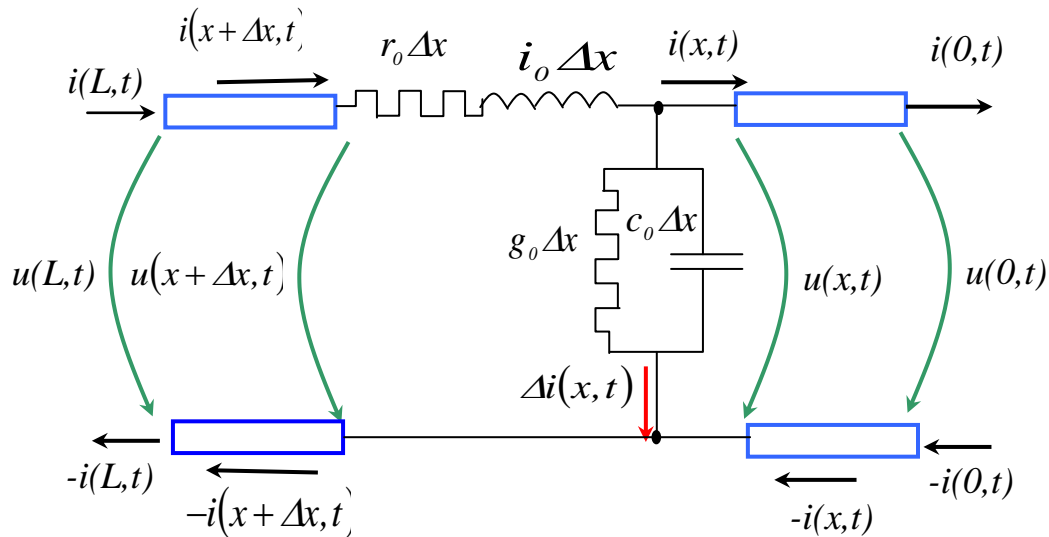


Figura 2 Schema echivalentă monofazată a unei linii lungi de transport

În ipotezele simplificatoare menționate anterior, stabilirea ecuațiilor liniilor lungi de transport se poate realiza prin aplicarea legii inducției electromagnetice și a teoremei conservării sarcinii electrice. Drept origine a variabilei spațiu x se consideră, de regulă, sfârșitul liniei și anume poarta de ieșire 2,2'. Fenomenele electromagnetice dintr-o secțiune a unei linii depind de distanța x ce separă secțiunea considerată de poarta de ieșire a liniei, precum și de variabila timp t . Ecuațiile care descriu repartiția de-a lungul liniei și evoluția în timp a tensiunii și curentului sunt ecuațiile diferențiale cu derivate parțiale, cunoscute sub denumirea de **ecuațiile telegraștilor**.

Aplicând legea inducției electromagnetice conturului ABCD și legea conservării sarcinii electrice libere suprafeței S, reprezentată în Figura 1, se obțin următoarele ecuații de funcționare în mărimi instantanee:

$$\begin{cases} u(x + \Delta x, t) - u(x, t) = r_0 \Delta x i(x, t) + l_0 \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \\ i(x + \Delta x, t) - i(x, t) = g_0 \Delta x u(x, t) + c_0 \Delta x \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

Prin dezvoltarea în serie a sistemului de ecuații (1) și neglijând infiniții de ordin superior, ecuațiile de funcționare ale liniilor lungi, în mărimi instantanee, capătă următoarea formă :

$$\begin{cases} \Delta x \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = r_0 \Delta x i(x, t) + l_0 \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \\ \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g_0 \Delta x u(x, t) + c_0 \Delta x \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

Ambele ecuații ale sistemului (2) pot fi simplificate prin Δx , obținându-se următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = r_0 i(x, t) + l_0 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g_0 u(x, t) + c_0 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

Sistemul de ecuații diferențiale (3) de ordinul întâi cu derivate parțiale, reprezintă **ecuațiile telegrafiștilor de ordinul întâi**. Acest sistem permite eliminarea uneia din variabile, fie tensiunea u , fie curentul i . Pentru aceasta, se derivează una din ecuații în raport cu variabila x și ținând seama de cea de a doua ecuație din sistem, se obține sistemul de ecuații diferențiale de ordinul doi cu derivate parțiale, de forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = r_0 g_0 u(x, t) + (r_0 c_0 + g_0 l_0) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + l_0 c_0 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = r_0 g_0 i(x, t) + (r_0 c_0 + g_0 l_0) \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + l_0 c_0 \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} \end{cases} \quad (4)$$

Ecuațiile sistemului (4) sunt cunoscute în literatura de specialitate sub denumirea de ecuațiile **telegrafiștilor de ordinul doi**. Soluțiile acestor ecuații nu sunt independente, fiind legate prin intermediul ecuațiilor telegrafiștilor de ordinul întâi (3), depinzând totodată de condițiile inițiale din momentul apariției fenomenului și de condițiile la limită, în general impuse la bornele extreme ale liniei.

În cazul regimului staționar, rezolvarea problemei pune în evidență un aspect fizic important privind propagarea pe linie a unor perechi de unde asociate, având frecvența sursei de tensiune care imprimă în sistemul electric considerat sistemul forțat. Tensiunea și curentul din orice punct al liniei apar ca rezultante ale undelor incidente și reflectate, care se suprapun în punctul considerat. De asemenea, modelul matematic mai poate fi interpretat în sensul unor unde staționare sinfazice în timp, în toate punctele de pe linie, având însă amplitudini diferite, în funcție de abscisa considerată. În acest fel, tensiunea, respectiv curentul, din orice punct de-a lungul liniei, sunt rezultantele a două unde staționare și anume: o undă staționară corespunzătoare regimului de mers în gol al liniei și una corespunzătoare regimului de scurtcircuit.

2.2 Ecuațiile de funcționare ale liniilor electrice lungi, în mărimi complexe

În cazul regimului armonic staționar, integrarea sistemului de ecuații (3) este înlesnită dacă se utilizează o transformare în complex.

Tensiunea și curentul pe liniile lungi în regim armonic staționar sunt funcții sinusoidale de timp, având următoarea formă:

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \sqrt{2}U(x)\sin[\omega t + \varphi_U(x)] \\ i(x,t) &= \sqrt{2}I(x)\sin[\omega t + \varphi_I(x)] \end{aligned} \quad (5)$$

În expresiile (5), valorile efective ale tensiunii și curentului $U(x)$, respectiv $I(x)$, precum și unghiurile de defazaj $\varphi_U(x)$, respectiv $\varphi_I(x)$ depind de distanța x până la sfârșitul liniei, deci până la poarta de ieșire. Rezultă, în felul acesta, că cele două mărimi electrice – tensiunea și curentul – pot fi reprezentate în planul complex prin intermediul unor relații reversibile, de forma:

$$\begin{aligned} u(x,t) &\leftrightarrow \underline{U} = U(x)e^{j\varphi_U(x)} \\ i(x,t) &\leftrightarrow \underline{I} = I(x)e^{j\varphi_I(x)} \end{aligned} \quad (6)$$

De menționat faptul că această transformare în complex este caracterizată de următoarea proprietate:

$$\frac{\partial \underline{Y}}{\partial t} \leftrightarrow j\omega \underline{Y} \quad (7)$$

Utilizarea relațiilor reversibile (6) de trecere în planul complex, precum și a proprietății (7) a acestei transformări, în sistemul de ecuații diferențiale (3), conduce la următoarea formă a acestuia în mărimi complexe:

$$\begin{cases} \frac{d\underline{U}(x)}{dx} = (r_0 + j\omega l_0) \underline{I}(x) = \underline{z}_0 \underline{I}(x) \\ \frac{d\underline{I}(x)}{dx} = (g_0 + j\omega c_0) \underline{U}(x) = \underline{y}_0 \underline{U}(x) \end{cases} \quad (8)$$

unde: $\underline{U}(x), \underline{I}(x)$ - tensiunea de fază și curentul de linie în secțiunea x a liniei, în mărimi complexe;

$\underline{z}_0, \underline{y}_0$ - impedanța și admitanța specifică a liniei;

$\omega = 2\pi/T$ - pulsația undelor electromagnetice de curent și tensiune.

Integrând sistemul de ecuații (8), iar pentru determinarea constantelor de integrare considerându-se cunoscute tensiunea și curentul la sfârșitul liniei - $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ - în punctul pentru care $x = 0$, adică sfârșitul liniei, rezultă următoarea formă a ecuațiilor de funcționare ale liniilor lungi, în mărimi complexe:

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} x \\ \underline{I}(x) = \underline{Y}_c \underline{U}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} x + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x \end{cases} \quad (9)$$

unde: $\underline{\gamma}$ - constanta complexă de propagare a undelor electromagnetice de tensiune și curent pe linie;

\underline{Z}_c - impedanța caracteristică a liniei;

$\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$ - admitanța caracteristică a liniei.

În situația când pentru determinarea constantelor de integrare sunt folosite mărimile electrice de la intrarea în linie, adică \underline{U}_1 și \underline{I}_1 , pentru $x = L$, ecuațiile de funcționare ale liniilor lungi, în mărimi complexe, au următoarea formă:

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x - \underline{Z}_c \underline{I}_1 \operatorname{sh} \underline{\gamma} x \\ \underline{I}(x) = -\underline{Y}_c \underline{U}_1 \operatorname{sh} \underline{\gamma} x + \underline{I}_1 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x \end{cases} \quad (10)$$

Ecuațiile de funcționare ale liniilor lungi în mărimi complexe, descrise de sistemele (9) sau (10) permit stabilirea variației tensiunii și curentului de-a lungul unei linii.

În general, se impune determinarea mărimilor $\underline{U}, \underline{I}$ într-un punct al liniei sau la un capăt al acesteia, când se cunosc aceleași mărimi electrice la celălalt capăt al liniei.

În mod curent la calculul electric al liniilor lungi de transport, ecuațiile de funcționare (9) și (10), pentru $x = L$ (L - lungimea liniei), dau legătura dintre mărimile de la cele două capete ale liniei $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ și respectiv $\underline{U}_2, \underline{I}_2$, conform următoarelor sisteme de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} + \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \underline{I}_2 \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \\ \underline{I}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} \underline{U}_2 \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} - \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \underline{I}_1 \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \\ \underline{I}_2 = -\sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} \underline{U}_1 \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} + \underline{I}_1 \operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \end{cases} \quad (12)$$

în care: $\underline{Z} = z_0 L$ - impedanța totală a liniei; $\underline{Y} = y_0 L$ - admitanța totală a liniei.

Sistemele de ecuații (11) și (12) pot fi scrise prescurtat în felul următor:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = \underline{A}\underline{U}_1 - \underline{B}\underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 = -\underline{C}\underline{U}_1 + \underline{D}\underline{I}_1 \end{cases}$$

unde \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} reprezintă coeficienții complecși ai liniilor lungi, care conțin în componență funcții hiperbolice.

De asemenea, sistemele de ecuații (13) pot fi scrise și sub formă matriceală, astfel :

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & -\underline{B} \\ -\underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix}$$

Din analiza sistemelor de ecuații (13) și (14) se constată că o linie lungă de transport al energiei electrice se poate reprezenta printr-un cuadripol simetric echivalent, care are o matrice a coeficienților de următoarea formă:

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \pm \underline{B} \\ \pm \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} & \pm \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}}sh\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \\ \pm \sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}}sh\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} & ch\sqrt{\underline{Z}\underline{Y}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

În consecință, rezolvarea sistemelor de ecuații care descriu variația mărimilor electrice de-a lungul liniilor lungi presupune cunoașterea coeficienților \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} și \underline{D} , care caracterizează linia respectivă.

2.3 Calculul coeficienților liniilor electrice lungi de transport al energiei electrice, cu parametri uniform distribuți

Metoda analitică de calcul a liniilor de transport se bazează pe dezvoltarea în serie a funcțiilor hiperbolice, conținute în expresiile coeficienților complecși ai liniilor lungi. În acest caz, coeficienții liniilor lungi capătă următoarea formă:

$$\underline{A} = \underline{D} = ch\sqrt{\underline{ZY}} = 1 + \frac{\underline{ZY}}{2!} + \frac{\underline{Z}^2 \underline{Y}^2}{4!} + \dots$$

$$\underline{B} = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} sh\sqrt{\underline{ZY}} = \underline{Z} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{3!} + \frac{\underline{Z}^2 \underline{Y}^2}{5!} + \dots \right)$$

$$\underline{C} = \sqrt{\frac{\underline{Y}}{\underline{Z}}} sh\sqrt{\underline{ZY}} = \underline{Y} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{3!} + \frac{\underline{Z}^2 \underline{Y}^2}{5!} + \dots \right)$$

Funcție de lungimea liniei L , se rețin un număr mai mare sau mai mic de termeni din aceste dezvoltări, astfel încât, în calculele practice, se pot face următoarele aproximații:

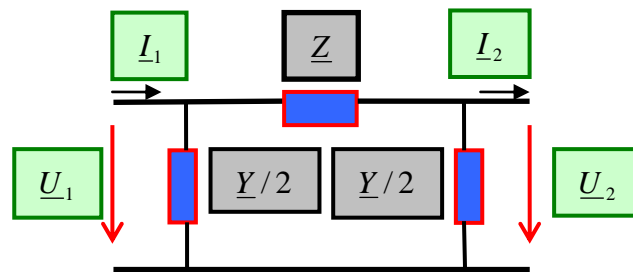
$$\underline{A} \cong I \text{ pentru } L \leq 100 \text{ km}; \quad \underline{A} \cong I + \frac{\underline{ZY}}{2} \text{ pentru } L \leq 650 \text{ km}$$

$$\frac{\underline{B}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{C}}{\underline{Y}} \cong I \text{ pentru } L \leq 250 \text{ km};$$

$$\frac{\underline{B}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{C}}{\underline{Y}} \cong I + \frac{\underline{ZY}}{6} \text{ pentru } L \leq 1000 \text{ km}.$$

Pentru modelarea liniilor electrice lungi de transport se utilizează, de obicei, trei tipuri de scheme echivalente:

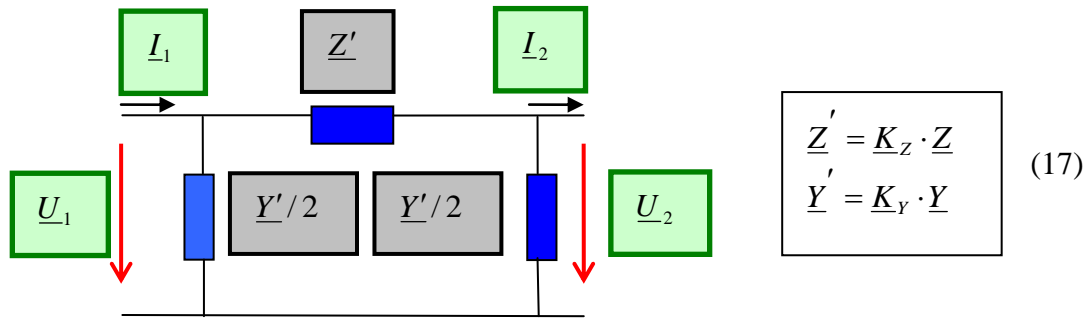
- Schema cu un singur cuadripol, tip II uzual, construită cu parametrii nominali (globali) ai liniei: $\underline{Z} = z_0 l$, $\underline{Y} = y_0 l$.



$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{2} \right) + \underline{I}_2 \underline{Z} \\ \underline{I}_1 &= \underline{U}_2 \left(2 + \frac{\underline{ZY}}{2} \right) \frac{\underline{Y}}{2} + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Această schemă echivalentă în Π , care conține parametrii globali ai liniei, reușește să modeleze fidel o linie lungă de transport doar în cazul identificării ecuațiilor ce descriu funcționarea ei cu ecuațiile telegrafiștilor, exprimate în mărimi complexe.

- Schema cu un singur cuadripol, tip II, construită cu parametrii *corecțai* prin intermediul coeficienților propuși de Kennely :



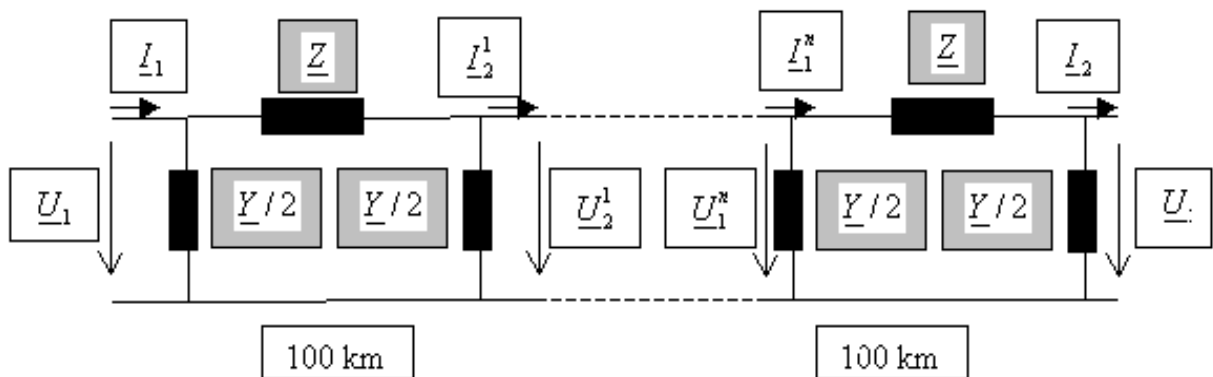
Coeficienții de corecție Kennely ($\underline{K}_Z, \underline{K}_Y$), în funcție de lungimea liniei, se calculează astfel:

- 1) pentru $l \leq 300$ km, $\underline{K}_Z, \underline{K}_Y$ sunt aproximativ egali cu unitatea;
- 2) pentru $300 \text{ km} \leq l \leq 600 \div 700$ km:

$$\underline{K}_Z = 1 + \frac{\underline{ZY}}{6} \quad \text{și} \quad \underline{K}_Y = \frac{1 + \frac{\underline{ZY}}{6}}{1 + \frac{\underline{ZY}}{6}}$$

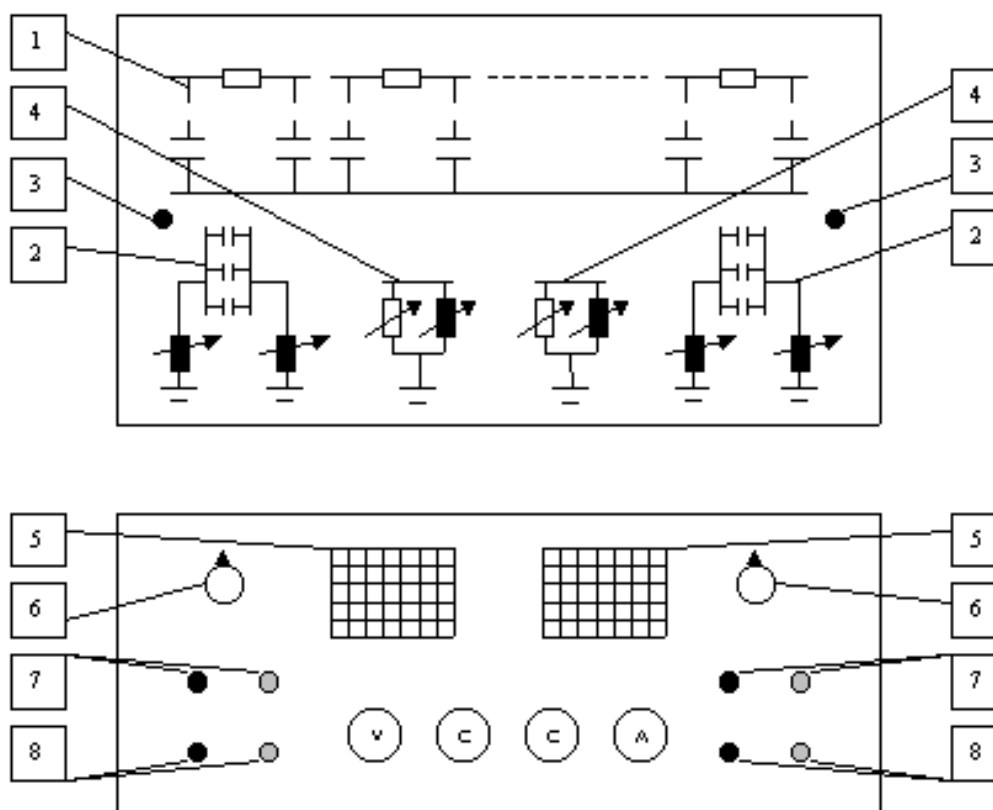
- 3) pentru $600 \div 700 \text{ km} \leq l \leq 1000$ km, $\underline{K}_Z, \underline{K}_Y$ se calculează reținând din dezvoltarea serie a funcțiilor hiperbolice, primii trei termeni;
- 4) pentru $l \geq 1000$ km, $\underline{K}_Z, \underline{K}_Y$ se calculează utilizând complet dezvoltarea în serie a funcțiilor hiperbolice $sh\sqrt{\underline{ZY}}$, respectiv $ch\sqrt{\underline{ZY}}$.

- Schema cu lanț de n cuadripoli, de tip II, construită cu parametrii globali ai liniei, fiecare cuadripol modelând un segment de linie cu lungimea de 100 km:



3. Model fizic de linie lungă

În cadrul laboratorului de Transportul și distribuția energiei electrice există o instalație care permite modelarea, prin intermediul a 15 cuadripoli (fiecare modelând un segment de linie cu lungimea de 100 km), a unei linii electrice aeriene de 400 kV, cu secțiunea de $3 \times 2 \times 450 \text{ mm}^2$, construită cu conductoare de OI-Al, plasată pe stâlpi portali și cu o lungime variabilă între 100 și 1500 km. Panoul frontal al modelului de linie lungă, precum și pupitrul pentru măsurători, sunt prezentate în continuare.

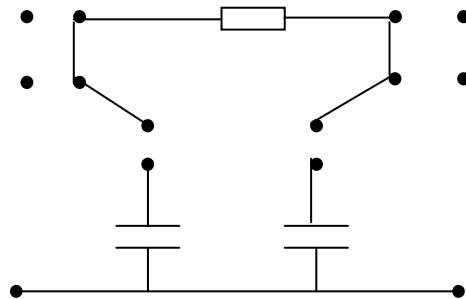


Modelul de linie lungă existent în laboratorul de Transportul și distribuția energiei electrice conține următoarele elemente:

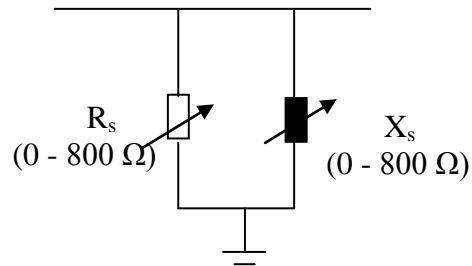
- 1 – lanț de cuadripoli;
- 2 – celule de compensare longo-transversală;
- 3 – butoane basculante pentru conectarea sursei de tensiune la capetele lanțului;
- 4 – modele de sarcină;
- 5 – claviaturi pentru comutarea aparatelor de măsură în diverse puncte de interes;

- 6 – reglajul tensiunii de alimentare de la autotransformatoare;
- 7 – butoane pornit/oprit pentru alimentarea la 220 V și 50 Hz a autotransformatorului;
- 8 – butoane pornit/oprit pentru alimentarea la 220 V și 200 Hz a autotransformatorului.

Pe panoul frontal al modelului sunt reprezentate simbolic următoarele elemente ale instalației:



Reprezentarea unui cuadripol pe panoul frontal al instalației



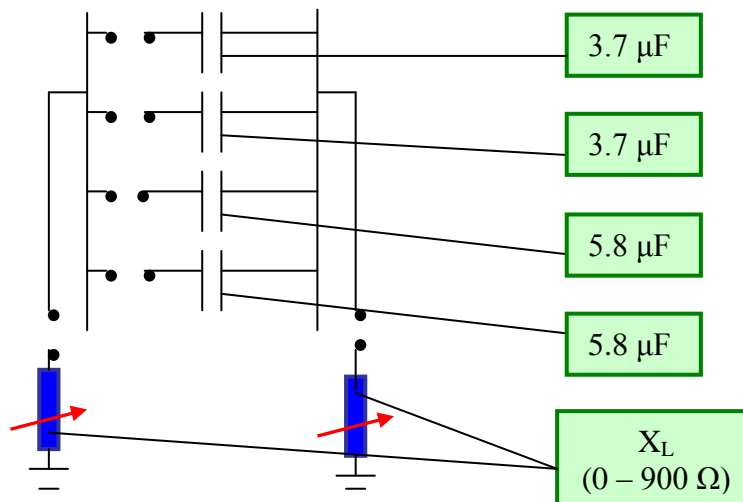
Reprezentarea unui model de sarcină pe panoul frontal al instalației

La realizarea modelului fizic de linie lungă, s-au utilizat scările de modelare din Tabelul 1.

Scările de modelare utilizate în cadrul modelului de linie lungă

Tabelul 1

Parametrii liniei	Unit. măsură	Valorile reale	Scările de modelare	Valorile pe model
Tensiunea	kV	400	$\sqrt{3} \cdot 2.5 \cdot 10^{-5}$	0.01
Rezistența specifică	Ω/km	0.032	1	0.032
Inductanța specifică	mH/km	1.1	1	1.1
Capacitatea specifică	nF/km	10	1	10
Impedanța caracteristică	Ω	333	1	333



Reprezentarea unei celule de compensare longo-transversală pe panoul frontal al instalației

Descrierea modelului fizic de linie lungă existent în laboratorul de TDEE:

- ✓ reactanța inductivă a liniei este modelată prin intermediul unor bobine cu miezuri de ferită, iar susceptanța capacitivă prin seturi de condensatoare;
- ✓ conectarea elementelor pentru realizarea unui cuadripol, precum și pentru interconectarea cuadripolilor, se face prin introducerea corespunzătoare a jacurilor în bornele de pe panoul frontal al instalației;
- ✓ modelul de laborator mai permite modelarea a doi consumatori și a două celule de compensare longo-transversală;
- ✓ alimentarea instalației de modelare se poate realiza de la ambele capete prin intermediul a două autotransformatoare, la o frecvență fixă de 50 Hz sau la o frecvență reglabilă în domeniul [10, 200] Hz, la dispoziție existând un convertizor de frecvență;
- ✓ informațiile legate de valorile mărimilor electrice (tensiune, curent, factor de putere) în diverse puncte ale liniei modelate se obțin de la un pupitru de măsurări echipat cu un voltmetru, un miliampermetru și cu un cosfimetru;
- ✓ conectarea aparatelor de măsură, în orice punct al modelului, prezintă interes, fiind facilitată de existența unui sistem de comutație comandat prin claviaturi și este observabilă prin intermediul unor beculețe de control.

4. Modul de desfășurare a lucrării și prelucrarea rezultatelor experimentale:

În cadrul acestei lucrări, obiectul de interes îl va constitui modelarea liniilor electrice lungi de transport, prin intermediul a trei tipuri de scheme echivalente: schema cu un singur cuadripol, cu parametri globali; schema cu un singur cuadripol, cu parametri corecțai; schema cu lanț de cuadripoli.

- linie de transport a energiei electrice cu tensiunea de 400 kV, echipată cu două conductoare pe faza cu secțiunea de 450 mm^2 din Ol-Al, având diverse lungimi (300 km, 600 km, 900 km, 1200 km și 1500 km), prin folosirea modelului de linie lungă existent în laboratorul de TDEE, se va modela în schema echivalentă, pentru efectuarea calculelor de regim permanent, prin următoarele tipuri de scheme: un singur cuadripol în Π conținând parametrii globali ai liniei; printr-un lanț de cuadripoli, fiecare cuadripol modelând 100 km de linie; un singur cuadripol în Π , conținând parametrii corecțai ai liniei prin intermediul coeficienților de corecție Kennely. Pentru diverse regimuri de funcționare ai liniei de transport se vor determina mărimile tensiune și curent de la începutul liniei (U_1, I_1), respectiv de la sfârșitul liniei (U_2, I_2), corespunzătoare celor trei tipuri de scheme de modelare folosite și se vor compara aceste valori cu cele obținute prin calcule, folosind ecuațiile de funcționare ale liniilor electrice lungi în mărimi complexe.
- Regimul de funcționare al liniei se stabilește cu ajutorul modelelor de sarcină prevăzute în cadrul instalației, modele ce echivalează, prin conectarea lor la sfârșitul liniei, un consumator ce absoarbe puterile reglabile P_2 și Q_2 .

- Pentru o analiză comparativă, rezultatele experimentale trebuie sintetizate într-un tabel:

L (km)	Schema echivalentă	U ₁		I ₁		U ₂		I ₂		E _{U₁} (%)	E _{I₁} (%)
		m*	r*	m	r	m	r	m	r		
	globală										
	corectată										
	lanț cadr.										
	<i>ec. de funct.</i>										

*m** – valoarea obținută pe model (în V, respectiv în A);

*r** – valoarea reală (în kV, respectiv în kA).

- Erorile în ceea ce privește mărimile de stare și anume tensiunea și curentul la începutul liniei (U₁, I₁), obținute prin măsurători folosind cele trei tipuri de scheme echivalente se vor stabili în raport cu cele obținute prin calcule folosind ecuațiile de funcționare ale liniilor în mărimi complexe, pentru fiecare lungime de linie considerată și regim de încărcare, cu ajutorul următoarelor relații:

$$E_{U_1} = \frac{U_1 - U_1^{ec.defunct.}}{U_1^{ec.defunct.}} \cdot 100 \qquad E_{I_1} = \frac{I_1 - I_1^{ec.defunct.}}{I_1^{ec.defunct.}} \cdot 100$$

unde U₁, I₁ reprezintă valorile obținute prin măsurători.

Bibliografie

1. **Georgescu Gh.**, *Sisteme de distribuție a energiei electrice*, Editura Politehniun, Iași, 2007.
2. **Georgescu Gh., Neagu B.**, *Proiectarea și exploatarea asistată de calculator a sistemelor publice de repartiție și distribuție a energiei electrice*, vol. 1, partea I-a, Editura Fundației Academice AXIS, Iași, 2010.
3. **Georgescu Gh., Neagu B., Ciobanu R.**, *Proiectarea și exploatarea asistată de calculator a sistemelor publice de repartiție și distribuție a energiei electrice*, vol. 1, partea I-a, Editura Fundației Academice AXIS, Iași, 2010.
4. **Georgescu Gh.**, *Transportul și distribuția energiei electrice. Lucrări practice de laborator*, Editura Politehniun, Iași, 2005.
5. **Georgescu Gh.**, *Transportul și distribuția energiei electrice. Produse software specializate*, Editura Politehniun, Iași, 2005.
6. **Georgescu Gh.**, *Elemente ale liniilor electrice în cablu*, Editura Venus, Iași, 2005.
7. **Georgescu Gh.**, *Linii electrice aeriene*, Editura Venus, Iași, 2005.
8. **Georgescu Gh.**, *Transportul și distribuția energiei electrice*, Litografia Universității Tehnice “Gh. Asachi” Iași, 1989.
9. **Georgescu Gh.**, *Sisteme de distribuție a energiei electrice*, vol. 1, partea a II-a, Editura Politehniun, Iași, 2007.
10. **Georgescu Gh., Gavrilăș M.**, *Transportul energiei electrice. Analiza asistată de calculator a regimurilor de funcționare ale liniilor lungi*, Litografia Universității Tehnice “Gh. Asachi”, Iași, 1992.