

Lucrarea de laborator nr. 1

Regimuri de funcționare ale liniilor electrice

1. CONSIDERATII TEORETICE

1.1. Introducere

Din motive economice liniile electrice aeriene (LEA) sunt utilizate în principal pentru transmiterea energiei electrice dinspre stații la consumatori, în timp ce în zonele puternic populate alimentarea energiei electrice poate fi făcută doar cu linii electrice în cablu (LEC). Alegerea unuia din cele două tipuri trebuie făcută însă ținând cont, pe lângă proprietățile tehnice și de aspectele economice.

În principiu există trei modalități de transmisie a energiei, prin sisteme de: c.a. monofazat, c.a. trifazat, c.c.

Cum sistemele de transmisie a puterii trifazate au caracter fie inductiv, fie capacitiv (funcție de sarcină), din motive de stabilitate, pe liniile electrice de lungimi mari (>80 km LEA, > 40 km LEC) se introduce o compensare a puterii reactive.

În cadrul experimentelor sunt determinate caracteristicile unei linii electrice pentru diferite cazuri de încărcare.

Pentru a menține numărul componentelor de laborator într-o limită rezonabilă, experimentele vor fi efectuate doar pentru modele de linii electrice de 380 kV.

1.2. Tensiunile nominale și secțiunile liniilor electrice

Nivelul tensiunilor de transport și distribuție este determinat în raport cu puterea ce urmează a fi transmisă și cu distanța între sursă și consumator. Conform unei convenții generale, tensiunea între două conductoare ale unui sistem trifazat se numește *tensiune de linie*. Din motive de uniformizare, în Europa sunt preferate următoarele tensiuni standardizate:

U_N [kV]	Nivel de tensiune	Aplicații
0,4	j.t.	consumatori casnici, mici consumatori
20	m.t.	consumatori mari, alimentarea zonelor rurale și urbane
110	î.t.	orașe mari, LEA
220 / 380	f.î.t.	alimentarea zonelor dens populate, rețele de interconexiune

Impărțirea în tensiuni joase, medii, înalte și foarte înalte este o departajare relativ arbitrară a componentelor furnizorului de energie. Alte normative pot face distincția doar între nivelele de j.t (< 1000 V) și de î.t. (>1000 V).

Secțiunea unei linii electrice trebuie aleasă astfel încât pierderile de tensiune până la consumator să nu fie prea mari, iar densitățile de curent să nu crească prea mult pentru a determina încălzirea inacceptabilă a materialului liniei. Rezultă astfel secțiuni economice, standardizate la rândul lor din motive de uniformitate.

Dacă la cabluri se utilizează Cu sau Al pentru buna lor conductivitate, la LEA cel puțin o parte a firelor componente trebuie să fie din oțel pentru creșterea rezistenței mecanice. În plus, pentru LEA de î. și f.î.t. 2 până la 4 fascicule de conductoare pe fază sunt dispuse la distanțe de

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

40 cm pentru a reduce solicitările câmpului electric asupra suprafeței conductoare. Acest aranjament este cunoscut sub denumirea de *conductor fascicular*.

Conform relațiilor pentru curenți și tensiuni simetrice, conductorul de nul nu este străbătut de curent. În consecință, este suficient ca la consumator să fie legate conductoarele de fază. (În cazul LEA cu stâlpi de oțel există un conductor suplimentar - *conductor de gardă* - care se fixează în vârful stâlpilor și servesc exclusiv pentru protecția împotriva supratensiunilor atmosferice. Recent în interiorul lor pot fi întâlnite componente suplimentare bazate pe tehnologia informațională: ex. transmiterea valorilor măsurate la sistemul de protecție).

Pentru reducerea numărului rutelor LEA, se preferă utilizarea LEA cu mai multe circuite. Trebuie menționat că datorită faptului că trebuie respectate distanțele minime recomandate între conductoare și între acestea și pământ și în condiții de vânt, zăpadă sau gheață, stâlpii de sprijin au atins dimensiuni considerabile, proporționale cu tensiunea nominală.

Fig.1.1. prezintă dimensiunile unui stâlp uzual utilizat.

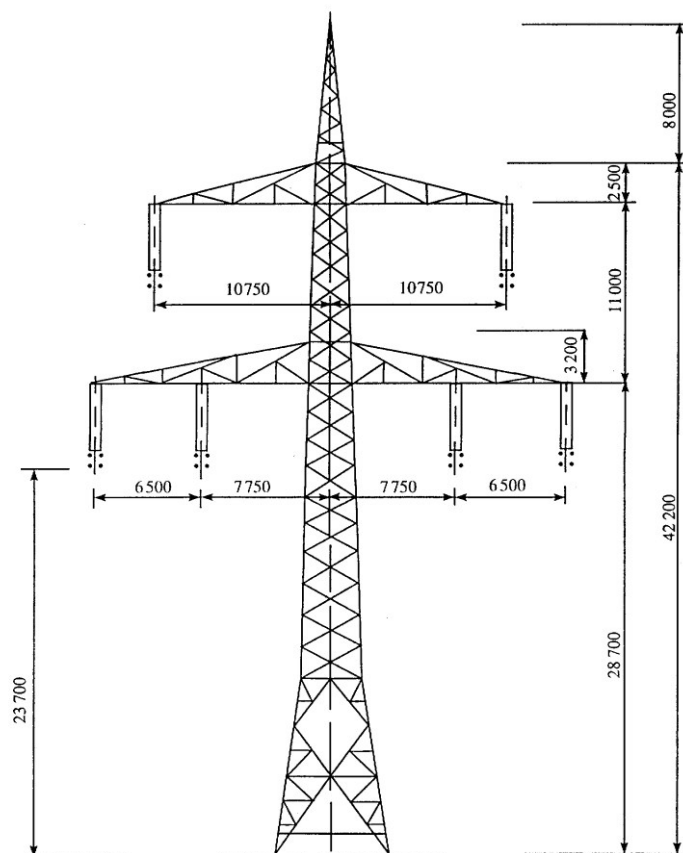


Fig.1.1. Dimensiunile unui stâlp de sprijin pentru o LEA dublu circuit 380 kV [mm]

Puterea maximă transmisă printr-o linie este determinată de valorile limită pentru curent și tensiune; această putere se numește *valoare limită termică*.

În continuare sunt prezentate câteva valori ale secțiunilor LEA (I valoare - secțiunea Al; al II-lea număr - secțiunea Ol; nr. din față se referă la numărul de fascicule individuale pentru conductoarele jumelate).

U_N [kV]	Secțiune [mm ²]	Limită termică [MVA]
20	120 / 20	14
110	240 / 40	135
220	2 * 240 / 40	492
380	4 * 240 / 40	1700

1.3. Parametri electrici și scheme electrice echivalente

La funcționarea unei linii electrice trifazate trebuie luate în considerație atât pierderile prin izolație (prin parametrul G) și proprietățile inductive și capacitive (L și C) ale modelului de reprezentare, cât și rezistența materialului conductor. Cum acești parametri sunt distribuiți uniform de-a lungul liniei sub forma unor cantități specifice (pe unitatea de lungime), schema echivalentă cu parametri concentrați se aplică doar liniilor electrice scurte.

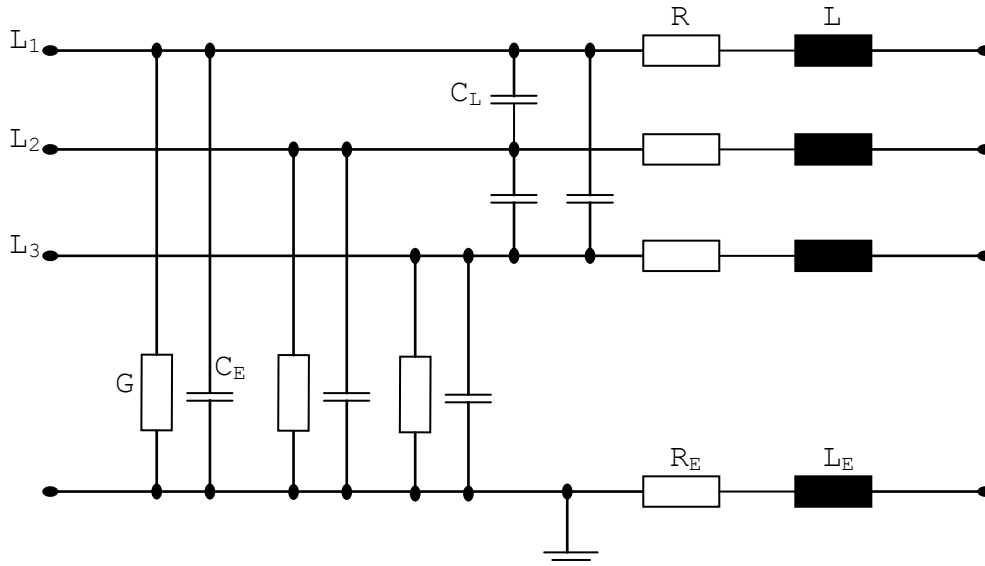


Fig.1.2. Schema echivalentă a unei linii electrice trifazate

Valoarea conductanței G este dată de pierderile de putere activă în dielectric pe direcție transversală, fiind condiționate atât de gradul de imperfecțiune al izolației, cât și de efectul corona pe conductoarele LEA. Inductanța unei linii electrice caracterizează câmpul magnetic generat de circulația de curent de-a lungul liniei la frecvența nominală. Reactanțele inductive ale LEA au valori ușor mai ridicate decât cele ale cablurilor, datorită distanțelor mari între conductoarele fazelor.

Capacitățile liniilor C_L și C_E descriu câmpul electric creat la aplicarea unei tensiuni la frecvența nominală. Capacitățile cablurilor sunt semnificativ mai mari decât ale liniilor electrice aeriene, datorită spațiilor mai mici dintre conductoare și materialului izolației. Aceste considerații limitează serios domeniile de utilizare a cablurilor, așa cum va putea fi văzut ulterior. În plus, trebuie ținut cont de dispunerea izolației conductoarelor cablurilor (cabluri monofazate - conductoarele sunt izolate separat; cabluri trifazate - conductoarele au o izolație comună). Pe de altă parte, în cazul liniilor electrice aeriene, capacitățile între conductoare (C_L) și între conductoare și pământ (C_E) intervin întotdeauna în reprezentările echivalente (fig.1.2).

În practică se are în vedere realizarea LEA simetric în raport cu capacitățile caracteristice. Dacă trei conductoare sunt dispuse în vârfurile unui triunghi echilateral, distanțele între ele sunt egale, dar nu și distanțele între conductoare și pământ. Simetria în raport cu pământul se poate obține prin schimbarea ciclică a poziției conductoarelor la intervale prestabilite (linii transpuse). În cazul unui defect nesimetric (sau a unei sarcini dezechilibrate) curentul nu va mai circula numai prin conductoarele de fază, ci și prin pământ / conductor de întoarcere prin pământ / mantaua cablului înapoi către sursă.

Această cale de întoarcere are caracterul unei impedanțe, fiind reprezentată în circuitul echivalent al liniei (fig.1.2) cu ajutorul unei rezistențe R_E și a unei inductivități L_E .

Calculul parametrilor electrici ai liniilor este foarte complex, datorită faptului că ecuațiile includ valori care se referă la materialul conductorului, la geometrie și în unele cazuri la materialele de izolație. În continuare vor fi date doar ecuațiile necesare pentru LEA.

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Determinarea rezistenței echivalente a conductorului

$R = \frac{l}{\gamma A}$ cu l - lungimea liniei; A - secțiunea transversală [mm^2]; γ - conductivitatea materialului conductor (= 35 S m/ mm^2 pentru Al la 20°C).

Componenta de oțel a conductorului fascicular contribuie doar într-o foarte mică măsură la transportul energiei (contribuție neglijabilă).

În practică deseori se utilizează pentru exprimarea valorii rezistenței unei linii cu lungimea de 1 km (20°C) expresia:

$$R[\Omega] = \frac{32}{A}$$

Determinarea inductanței

Inductanța unui kilometru de linie cu conductoare fasciculare, dispuse simetric, cu n subconductoare egale se calculează conform următoarei ecuații (aproximative):

$$L = \frac{1000 \mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d_{gmi}}{r_B} + \frac{0,25}{n} \right)$$

unde: d_{gmi} - distanța medie geometrică între conductoare

$$d_{gmi} = \sqrt[n]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}} \text{ (cu } d_{12} \text{ etc. distanțele între conductoarele de fază),}$$

n - numărul de subconductoare (în fasciculul conductorului de fază);

r_B - raza echivalentă a liniei cu conductoare multifilare

$$r_B = \sqrt[n]{nra^{n-1}} \text{ cu } r \text{ - raza unui conductor, } a \text{ - distanța dintre conductoarele unui fascicul;}$$

μ_0 - permeabilitatea vidului ($1,257 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am).

Determinarea capacităților

Capacitățile C_L și C_E ale unui kilometru de linie monofază conductor-pământ pot fi calculate utilizând următoarele relații (aproximative):

$$C_L = \frac{1000 \cdot 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \ln \frac{2h}{d_{gmi}}}{3 \ln \frac{d_{gmi}}{r_B} \cdot \ln \frac{2h}{\sqrt[3]{r_B d_{gmi}^2}}}$$

$$C_E = \frac{1000 \cdot 2\pi \cdot \epsilon_0}{3 \cdot \ln \frac{2h}{\sqrt[3]{r_B d_{gmi}^2}} \cdot \frac{\left(\ln \frac{h+h_0}{d_0} \right)^2}{\ln \frac{2h_0}{r_0}}}$$

unde: $h = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$ - media geometrică a înălțimii liniei;

h_0 - înălțimea medie a conductorului de împământare;

$d_0 = \sqrt[3]{d_{10} \cdot d_{20} \cdot d_{30}}$ - distanța medie geometrică între conductorul pământ și celelalte conductoare;

r_0 - raza conductorului de împământare;

r_B - raza echivalentă (vezi determinarea inductanței);

μ_0 - permitivitatea vidului ($8,86 \cdot 10^{-12}$ As/Vm);

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Pentru simplificarea calculului, sunt utilizate tabele cu valori de referință, date de obicei pentru 1 km de linie pentru cele mai uzuale tipuri de linii electrice aeriene și cabluri.

Cu excepția sistemelor de joasă tensiune este de dorit ca liniile să funcționeze simetric (sarcina uniform distribuită pe cele trei faze). Astfel, la funcționarea normală, tensiunile și curenții de fază vor forma sisteme simetrice de mărimi (fazori egali în module și defazați cu 120°). Din acest motiv, este suficientă determinarea mărimilor de stare și parametricilor ale unei singure faze, pentru sistem fiind de asemenea suficientă o reprezentare monofilară (fig.1.3).

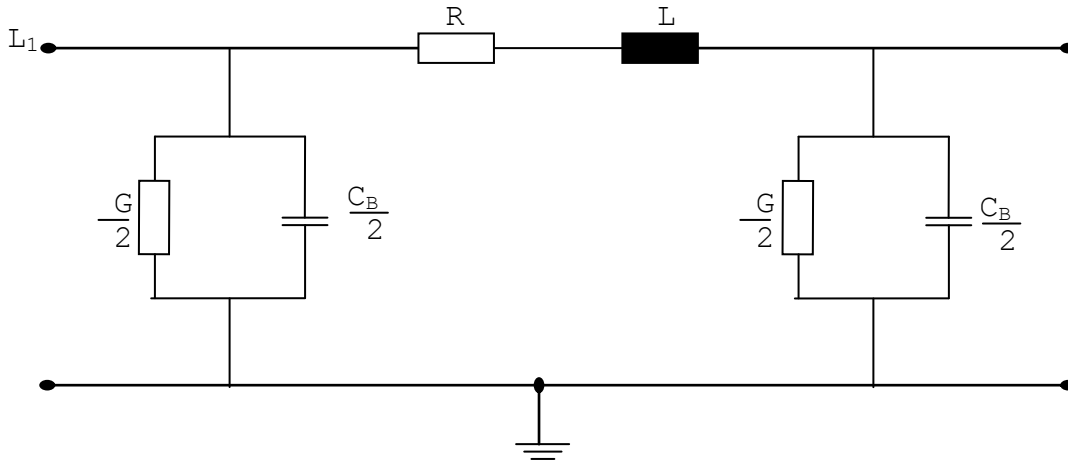


Fig.1.3. Schema echivalentă monofilară a unei linii electrice

În cadrul teoriei cuadripolilor, acest element de sistem (linie electrică) poate fi reprezentat cu ajutorul unei scheme simetrice în Π . Trebuie de asemenea precizat că în reprezentarea monofazată vom avea de-a face cu tensiuni de fază (fază-pământ).

Toate valorile puterilor determinate în cadrul reprezentării monofazate trebuie multiplicat cu 3 când vor fi asociate sistemului trifazat original. Rezistența, conductanța transversală și inductanța unei linii sunt date de aceleași cantități R , G , L ca în schema echivalentă trifazată. Așa-numita *capacitate de serviciu* C_B este introdusă aici ca o cantitate echivalentă, în scopul includerii capacităților între conductoare și între conductoare și pământ (fig.1.2).

Capacitatea de serviciu ar trebui să aibă același efect ca și cele două capacități deja menționate mai sus C_E și C_L (generează aceeași putere reactivă). Conform acestei condiții rezultă următoarea relație între capacități:

$$C_B = C_E + 3C_L$$

Capacitatea de serviciu și conductanța transversală în circuitul echivalent monofazat (modelul Π) sunt împărțite egal la cele două capete ale liniei, în scopul evitării introducerii unui nod la mijlocul liniei (modelul T).

Așa cum s-a mai spus, rezistențele, conductanțele transversale, inductivitățile și capacitățile sunt în realitate distribuite pe întreaga lungime a liniei sub forma unor cantități specifice. Pentru a putea crea un model exact, este necesară conceperea unei linii de lungime l dintr-un număr infinit de elemente cu lungimea diferențială dl . Din acest concept au derivat ecuațiile liniilor lungi, necesare pentru calculul liniilor electrice de lungimi mari. În acest context devine utilă o reprezentare în domeniul complex a parametrilor liniei.

Utilizarea simbolurilor complexe în domeniul c.a. trifazat permite, de exemplu, reprezentarea simultană a amplitudinilor și fazelor tensiunilor și curenților. Dacă nu se specifică, valorile menționate sunt efective.

Impedanțele furnizează în domeniul c.a. informații atât asupra parametrului activ (rezistență), cât a celui reactiv (reactanță). Există două modalități de reprezentare matematică a mărimilor complexe la fel de eficiente: forma carteziană (reprezentarea părții active și reactive) și forma polară (reprezentarea amplitudinii și fazei). Reprezentarea grafică a mărimilor complexe în spațiul numeric gaussian se face cu ajutorul vectorilor sau fazorilor. Utilizând

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

diagramele fazoriale, curenții și tensiunile unui circuit trifazat de c.a. pot fi reprezentate clar și interpretate fără cunoștințe detaliate despre calculul complexe.

În ecuațiile liniilor mai apare un factor numit *impedanță caracteristică a liniei* \underline{Z}_W . Aceasta este mărime complexă, determinată pe baza relației:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C_B}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L'}{G'+j\omega C'_B}}$$

cu $\omega=2\pi f$; mărimile cu ' sunt mărimi specifice (pe unitatea de lungime).

Un alt factor complex care apare în ecuațiile liniilor electrice se referă la *constanta de propagare* a undei de-a lungul liniei $\underline{\gamma}$, definită astfel:

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R+j\omega L')(G'+j\omega C'_B)}$$

Ecuațiile liniilor electrice pot fi astfel exprimate sub forma:

$$\underline{U}_1 = \cosh(\underline{\gamma}l) \underline{U}_2 + \underline{Z}_W \sinh(\underline{\gamma}l) \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_1 = \sinh(\underline{\gamma}l) \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_W} + \cosh(\underline{\gamma}l) \underline{I}_2$$

(indicele 1 se referă la începutul liniei, iar indicele 2 la sfârșitul liniei).

Dacă sunt cunoscute valorile (complexe) tensiunilor și curenților la unul din capetele liniei, pe baza relațiilor precedente pot fi determinate și valorile la celălalt capăt.

Din motive economice întotdeauna liniile electrice sunt proiectate astfel încât pierderile lor active să fie mici în raport cu cele pe elementele capacitive și inductive. În consecință: $R \ll \omega L$; $G \ll \omega C_B$.

Liniile la care R și G sunt ignorate complet se numesc *linii fără pierderi*. În acest caz impedanța caracteristică și constanta de propagare vor avea valori reale:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{L'}{C_B}}, \beta = \omega \sqrt{L' \cdot C_B} \quad (\alpha=0)$$

Se obțin astfel ecuațiile simplificate ale liniilor sub forma:

$$\underline{U}_1 = \cos(\beta l) \underline{U}_2 + j \underline{Z}_W \sin(\beta l) \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_1 = j \sin(\beta l) \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_W} + \cos(\beta l) \underline{I}_2$$

Este cunoscut faptul că în practică nu pot fi realizate linii fără pierderi; cu toate acestea simplificările anterioare sunt cu atât mai utilizate cu cât nivelul de tensiune este mai mare.

Pentru studiul funcționării în regim staționar este suficientă utilizarea unuia sau mai multor elemente JL. În acest caz se utilizează cantitățile specifice. Simplificarea este suficient de exactă pentru lungimile de linii utilizate în prezent în practică.

În calculele simplificate, care nu sunt utilizate pentru evaluări cantitative, liniile electrice de înaltă și foarte înaltă tensiune pot fi modelate doar printr-o inductanță și o capacitate.

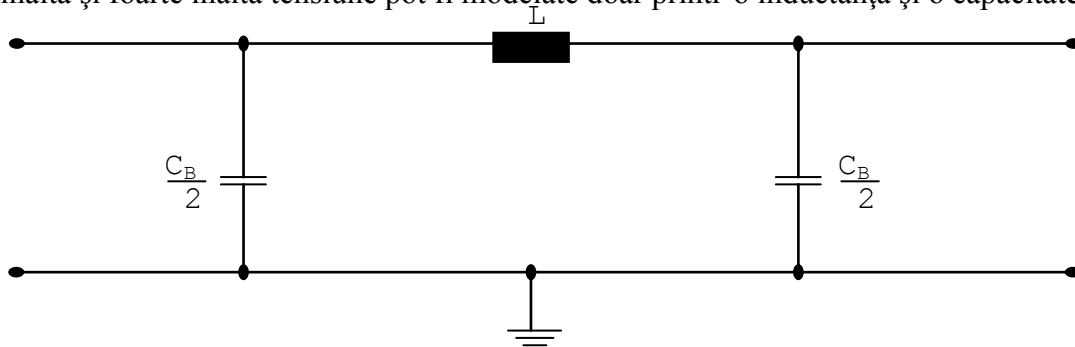


Fig.1.4. Schema echivalentă monofazată a unei linii electrice trifazate fără pierderi

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Această schemă echivalentă este suficientă pentru a pune în evidență caracteristicile de bază ale unei linii în funcțiune. Pentru considerații suplimentare (ex. determinarea randamentului) trebuie luată în considerație cel puțin rezistența echivalentă.

În experimentele prezentate, este simulat acest tip de linie electrică cu pierderi reduse. Linia simulată pe care se va executa studiul are o lungime de 360 km și următoarele date:

- LEA simplu circuit 380 kV amplasată pe un stâlp ramificat; secțiune 4*240 / 40 mm² OI-Al

- caracteristici electrice (mărimi specifice):

rezistență la 20 ⁰ C	$R' = 0,036 \Omega/\text{km}$
inductanța	$L' = 0,805 \text{ mH}/\text{km}$
capacitate conductor - conductor	$C_L' = 2,78 \text{ nF}/\text{km}$
capacitate conductor-pământ	$C_E' = 5,556 \text{ nF}/\text{km}$
capacitate de serviciu	$C_B' = 13,889 \text{ nF}/\text{km}$
impedanța caracteristică	$Z_W = 240 \Omega$
puterea limită termică	$S_{th} = 1700 \text{ MVA}$
rezistența conductorului de întoarcere	$R_E' = 0,031 \Omega/\text{km}$
inductanța conductorului de întoarcere	$L_E' = 0,694 \text{ mH}/\text{km}$

Pentru comparație sunt date caracteristicile unei LEA 110 kV și ale unui cablu 110 kV.

- LEA 110 kV; secțiune 240/40 mm² OI-Al

- caracteristici electrice:

rezistență la 20 ⁰ C	$R' = 0,126 \Omega/\text{km}$
inductanța	$L' = 1,25 \text{ mH}/\text{km}$
capacitate de serviciu	$C_B' = 9,34 \text{ nF}/\text{km}$
impedanța caracteristică	$Z_W = 366 \Omega$
puterea limită termică	$S_{th} = 135 \text{ MVA}$

- LEC 110 kV cu izolație de gaz sub presiune; secțiune 185 mm² Cu

- caracteristici electrice:

rezistență la 20 ⁰ C	$R' = 0,099 \Omega/\text{km}$
inductanța	$L' = 0,38 \text{ mH}/\text{km}$
capacitate de serviciu	$C_B' = 240 \text{ nF}/\text{km}$
impedanța caracteristică	$Z_W = 40 \Omega$
puterea limită termică	$S_{th} = 62 \text{ MVA}$

1.4. Caracteristici de funcționare

Studiul caracteristicilor de funcționare ale unei linii electrice se poate limita la următoarele trei cazuri:

Funcționarea în gol

Această situație apare dacă la unul din capetele liniei tensiunea are valoarea nominală, în timp ce la celălalt capăt nu este conectată nici o sarcină (în gol) - ex. datorită apariției unui defect la consumatorul conectat.

În anumite condiții, tensiunea la capătul deschis al liniei poate să crească peste valorile admise datorită capacității liniei. Acest fenomen se numește *efect Ferranti* și reprezintă o situație periculoasă în cazul liniilor electrice lungi, care ar trebui protejate de sistemul de protecție al rețelei. Într-o formă mai ușoară, efectul Ferranti poate deasemenea să apară când rețeaua alimentează o sarcină mică (ex. încărcarea de noapte).

Linii funcționând doar cu putere activă, egală cu puterea naturală (cu sarcină naturală)

Această situație apare când la linia electrică este conectat o sarcină rezistivă cu rezistența egală cu valoarea impedanței caracteristice. Puterea transmisă în acest caz se numește *putere naturală a liniei*. Curentul prin linie este suficient de mare ca puterea reactivă consumată de inductanța liniei să fie anulată de cea generată de capacitatea liniei; linia electrică nu absoarbe astfel în cadrul funcționării putere reactivă din exterior (se autocompensează). Cum în acest caz, pierderile de putere activă în liniile electrice reale sunt minime, poate fi privit ca o situație optimă. Trebuie ținut însă cont că sarcina într-un sistem se modifică permanent, conform performanțelor consumatorilor. De aceea, funcționarea fără pierderi poate apărea doar aleator. Modificarea curentului într-o linie electrică duce la dezechilibrarea bilanțului de putere reactivă. Pentru valori mici ale curentului, linia se comportă capacitiv, în timp ce la creșterea curentului linia capătă caracteristici inductive.

În ambele cazuri, în liniile electrice reale, pierderile de putere activă cresc. Dacă tensiunea la începutul liniei este menținută constantă, la sfârșitul liniei se poate înregistra o creștere a tensiunii la o încărcare ușoară (ex. caz limită - funcționarea în gol). Tensiunea la capătul liniei cade pentru sarcini severe (ex. caz limită - scurt-circuite).

Pentru garantarea unei tensiuni constante la consumator în cazul modificării sarcinilor din rețea, este necesar reglajul tensiunii la transformatoarele din stații.

Capacitatea de încărcare a liniilor electrice aeriene (ex. valoarea limită termică) este semnificativ mai mare decât puterea naturală ($P > P_{nat}$). În practică, LEA sunt de cele mai multe ori supraîncărcate.

Pe de altă parte însă, cablurile de înaltă tensiune au de obicei o limită termică mai mică decât puterea naturală. De aceea este posibilă doar o funcționare subîncărcată ($P < P_{nat}$).

Scurt-circuite

În acest caz, impedanța consumatorului este scurt-circuitată de un defect (metalic sau prin arc) astfel încât curentul prin linie crește foarte mult. Trebuie făcută o distincție clară între scurt-circuitele simetrice (trifazate) și cele nesimetrice (mono- sau bifazate). Doar scurt-circuitele trifazate pot fi reprezentate cu ajutorul schemelor echivalente monofilare. De aceea, doar aceste tipuri de defecte pot fi examinate în următorul experiment. La apariția unui scurt-circuit, puterea transmisă este în general mult mai mare decât limita termică a liniei electrice. Condițiile de defect trebuie sesizate de dispozitivele de protecție ale rețelei și înlăturate în cel mai scurt timp posibil.

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Pentru o mai bună înțelegere a acestor trei cazuri de funcționare, pot fi reprezentate grafic sub forma unor diagrame fazoriale. În general, diagramele fazoriale sunt utilizate pentru rețele care funcționează în regim sinusoidal.

Unul dintre fazori este ales arbitrar ca referință, având argumentul egal cu 0° . Toate celelalte argumente ale fazorilor din diagramă se vor raporta la acesta. Din motive practice, la reprezentarea caracteristicilor unei linii electrice, ca referință este selectat fazorul tensiunii la sfârșitul liniei.

Notații utilizate în figurile următoare: indicele 1 - începutul liniei; indicele 2 - sfârșitul liniei; indicele 0 - punct neutru.

Cu privire la modul de lucru, trebuie menționat că relațiile de calcul pentru liniile cu pierderi reduse pot fi simplificate dacă se consideră că rezistența liniilor de înaltă și foarte înaltă tensiune este aproximativ 10% din reactanța liniei ($X=\omega L$) în cel mai nefavorabil caz. Datorită însumării geometrice a căderilor de tensiune, abordarea matematică devine mult mai complexă, în timp ce rezultatele sunt puțin diferite de cele obținute în cazul studiului liniilor electrice fără pierderi. Pentru a nu omite informațiile importante, următoarele considerații vor fi făcute pentru liniile electrice fără pierderi. Abaterile în cazul funcționării reale (ex. linii cu pierderi mici) vor fi menționate alăturat.

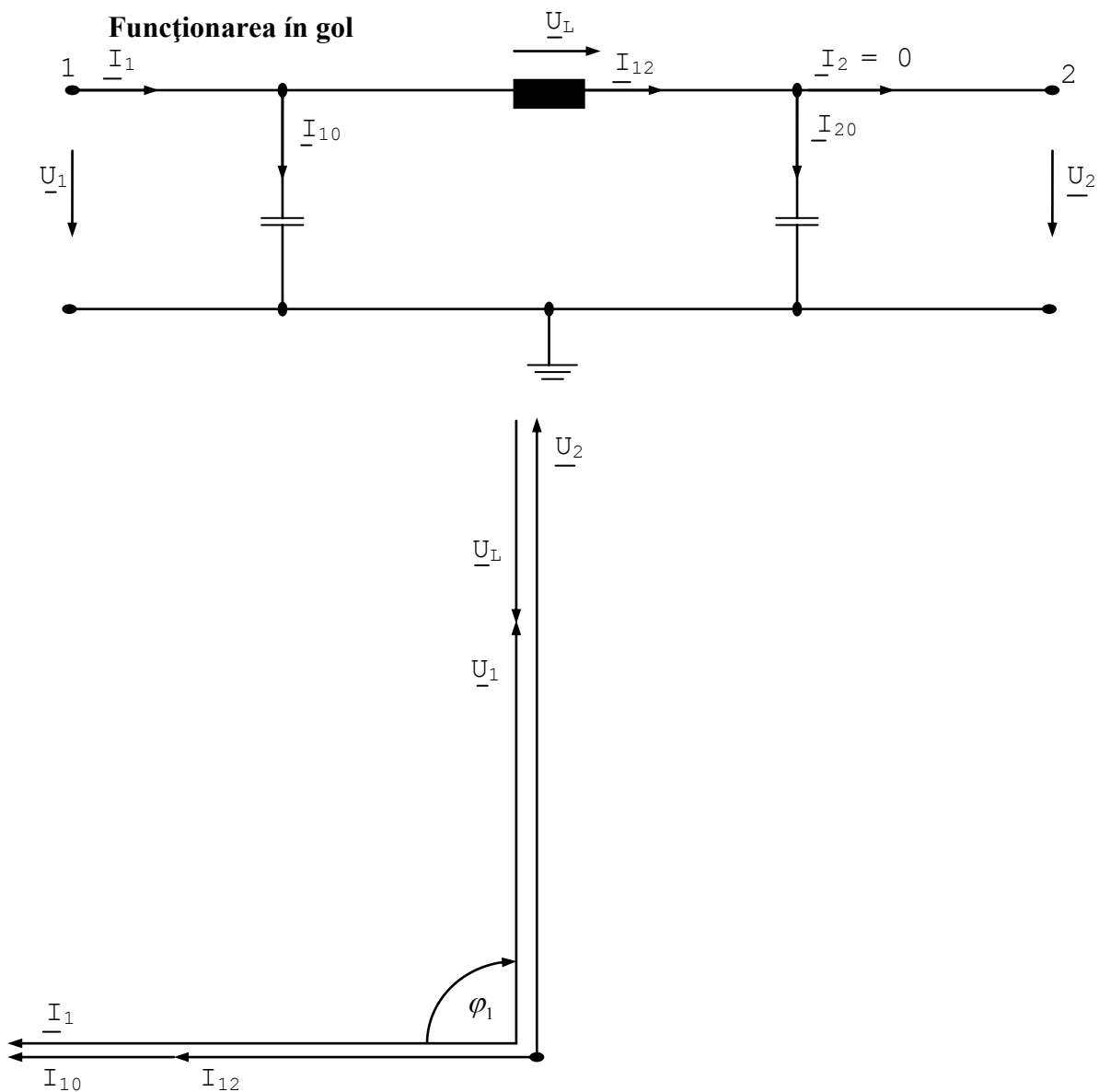


Fig.1.5. Schema echivalentă monofazată a unei linii electrice fără pierderi, cu diagrama fazorială

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

În cazul funcționării în gol, la sfârșitul liniei nu este conectată nici o sarcină ($I_2 = 0$). Pentru o tensiunea dată la capătul dinspre sarcină al liniei \underline{U}_2 (tensiune de fază), tensiunea la capătul dinspre sursă \underline{U}_1 rezultă prin adăugarea la mărimea precedentă a căderii de tensiune \underline{U}_L pe inductivitatea liniei. \underline{U}_L este determinată de curentul $I_{12} = I_{20}$ prin capacitatea $C_B/2$ la capătul liniei.

Se alică următoarele ecuații:

$$I_{20} = \underline{U}_2 j\omega \frac{C_B}{2} \text{ și } \underline{U}_L = I_{20} j\omega L$$

Pentru curentul I_1 la capătul de început al liniei:

$$I_1 = I_{10} + I_{12} \text{ cu } I_{10} = \underline{U}_1 j\omega \frac{C_B}{2}$$

Cum I_{10} și I_{12} sunt curenți pur reactivi, defazajul ϕ_1 între curent și tensiune la capătul de început al liniei este exact 90° . Curentul care circulă în cazul funcționării în gol se numește *curent de încărcare*. Puterea asociată se numește *putere de încărcare*. Așa cum se poate vedea din ecuațiile precedente, creșterea tensiunii la capătul de sfârșit al liniei depinde de valoarea capacității de serviciu C_B . Efectul Ferranti este mai puternic la cabluri, datorită valorilor mari ale C_B , decât la liniile electrice aeriene. În plus, curentul de încărcare este proporțional cu lungimea liniei și atinge foarte repede limita sa termică în cabluri, astfel că linia funcționează la capacitate maximă chiar dacă este în gol, nemaiputând fi realizată o transmisie efectivă de putere.

Dacă se ia în calcul influența rezistenței efective (linie cu pierderi reduse) poate fi observată o reducere ușoară a efectului Ferranti datorită căderii de tensiune pe rezistența R . Din această cauză, liniile cu pierderi reduse consumă puțină putere activă la funcționarea în gol.

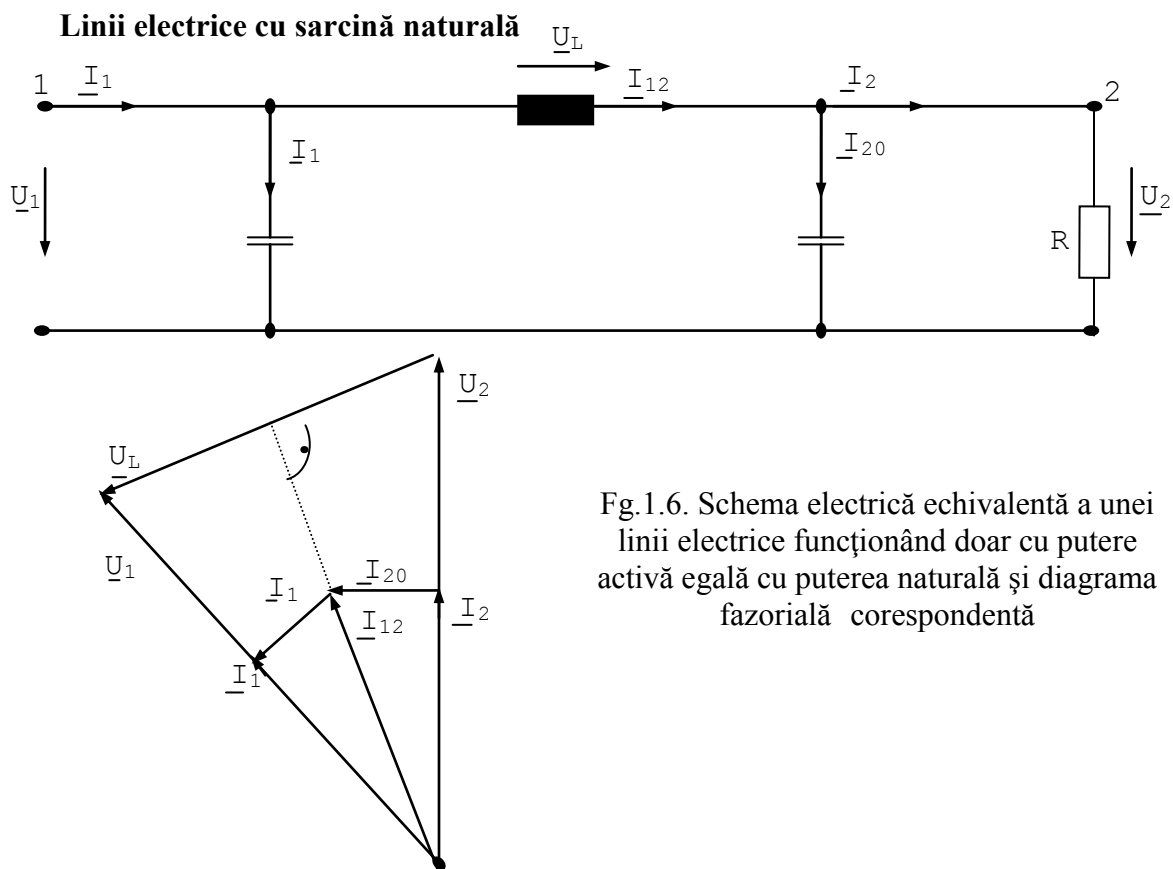


Fig.1.6. Schema electrică echivalentă a unei linii electrice funcționând doar cu putere activă egală cu puterea naturală și diagrama fazorială corespundătoare

Funcționarea unei linii electrice cu putere naturală presupune ca linia să aibă conectată la capăt o sarcină rezistivă cu valoarea egală cu cea a impedanței caracteristice. Curentul de sarcină I_2 este în fază cu tensiunea \underline{U}_2 . Prin capacitatea $C_B/2$ de la capătul de sfârșit al liniei circulă curentul $I_{20} = U_2 \omega C_B / 2j$. Curentul I_{12} care parcurge inductivitatea liniei și determină căderea de

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

tensiune pe aceasta $\underline{U}_L = \underline{I}_{12} j\omega L$ se obține prin însumarea geometrică a celor doi curenți anteriori. \underline{U}_L este perpendicular pe \underline{I}_{12} . Tensiunea \underline{U}_1 la capătul dinspre sursă al liniei este egală cu suma fazorială dintre \underline{U}_2 și \underline{U}_L . Dacă se cunoaște direcția lui \underline{U}_1 , poate fi determinat curentul \underline{I}_{10} prin capacitatea $C_B/2$ la capătul de început al liniei. Suma geometrică a fazorilor \underline{I}_{12} și \underline{I}_{10} determină curentul \underline{I}_1 la începutul liniei.

Caracteristic acestui mod de funcționare este faptul că \underline{I}_1 curentul rezultat este în fază cu tensiunea \underline{U}_1 ; linia electrică consumă doar putere activă.

Pentru liniile electrice cu putere naturală, \underline{U}_1 și \underline{U}_2 au aceeași valoare. Dacă linia are pierderi mici, tensiunea \underline{U}_1 este oarecum mai mare decât \underline{U}_2 , deoarece trebuie compensată căderea de tensiune pe rezistența liniei.

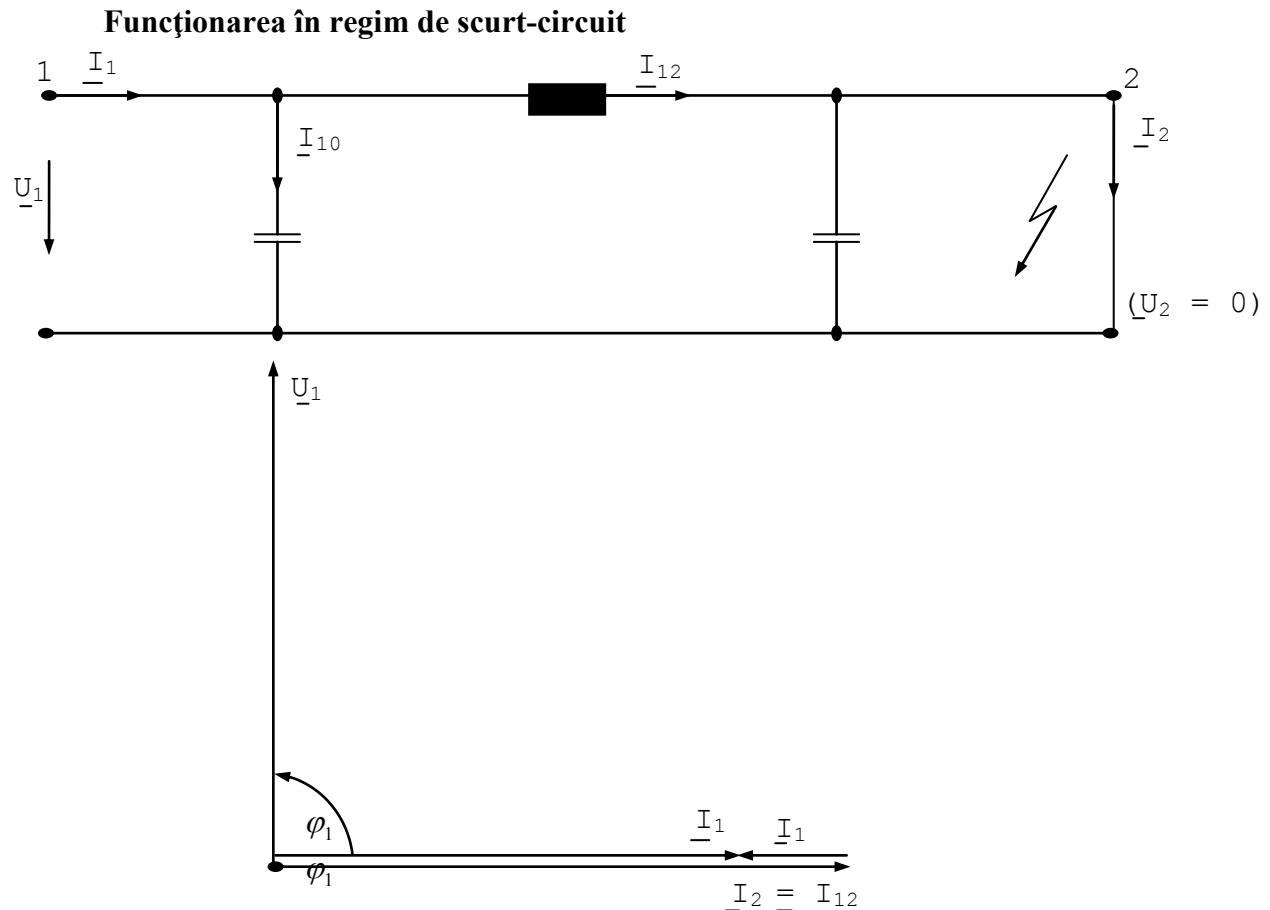


Fig.1.7. Schema echivalentă a liniei electrice fără pierderi în scurt-circuit și diagrama fazorială corespunzătoare

În acest caz de funcționare, linia electrică este scurt-circuitată la capătul de sfârșit (ex. $\underline{I}_2 = \underline{I}_{12}$ și $\underline{U}_2 = 0$). Curentul \underline{I}_1 la capătul de început al liniei rezultă prin însumarea geometrică a curenților \underline{I}_{10} prin capacitatea de operare $C_B/2$ la capătul de început al liniei și curentul \underline{I}_{12} prin inductivitatea liniei. Defazajul φ_1 între \underline{U}_1 și \underline{I}_1 este exact 90° . Pentru liniile electrice cu pierderi reduse el are însă valoarea 85° .

În continuare vor fi studiate întâi cele trei moduri de funcționare a liniei. Apoi vor fi investigate performanțele modelului de linie pentru diferite tipuri de sarcini (rezistiv-inductivă, rezistiv-capacitivă).

2. MOD DE LUCRU

2.1. Măsurile de securitate; scala modelului

Datorită greutatei sale, modelul liniei electrice trebuie amplasat pe partea de jos a cadrului.

Datorită încălzirii rezistoarelor, instrumentele de măsură nu trebuie dispuse direct deasupra modului liniei sau la capetele acestora.

Părțile metalice nu trebuie să fie sub tensiune în funcționare normală și trebuie conectate la conductorul de nul de protecție. Conductorul de împământare este separat de conductorul de nul de lucru al circuitului!

La decuplarea bobinelor pot apărea tensiuni induse mari. Montajul trebuie deconectat pentru orice modificare a configurației experimentale (ex. selectarea altui domeniu de măsură la aparate).

În sistemele de distribuție reale, tensiunile sunt în domeniul kilovolților, iar curenții în domeniul kiloamperilor. Puterile rezultante vor fi de ordinul MW...GW.

În aceste experimente toate tensiunile și curenții au o scală de 1:1000; valorile puterilor rezultante vor fi pe scala 1:1000000.

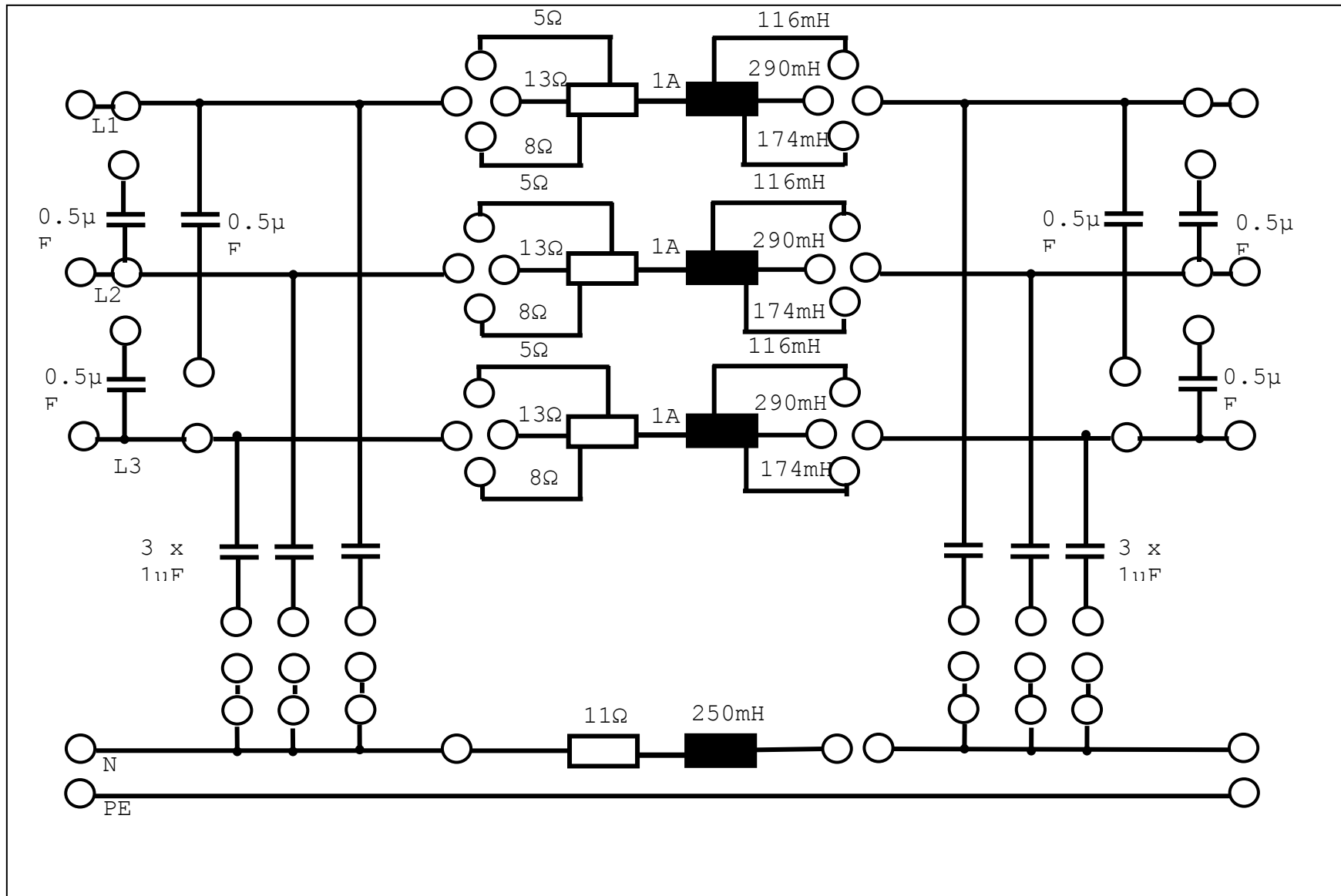
Se vor aplica următoarele echivalări:

Rețea reală	Model în experiment
1 kV	1 V
1 kA	1 A
1 MW	1 W
1 MVA	1 VA

Pentru a converti valorile măsurate în experimente ale tensiunilor și curenților la nivelul de 380 kV este necesară multiplicarea lor cu 1000. În cazul măsurării puterilor este necesar factorul 10^6 .

2.2. Descrierea componentelor lucrărilor și a instrumentelor de măsură

Echipament	Experimente											
	în gol	cu sarcină naturală	scurt-circuit trifazat	sarcină rezistiv inductivă	sarcină rezistiv capacitivă	tratarea neutrlui	bobina Petersen	scurt-circuite nesimetrice	compensarea reactivului paralel	compensarea reactivului serie	măsurarea impedanței homopolare	
Transformator trifazat (745 50)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Modelul de linie electrică (745 51)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Capacitatea LE (745 53)	2											
Modulul de întreruptor (745 561)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Compensarea punerilor la pământ (745 57)							1					
Sarcină rezistivă (733 10)		1		1	1				1	1		
Sarcină inductivă (733 42)				1					1	1		
Sarcină capacitivă (733 11)					1				1	1		
Watt / var - metru (727 11)	1	1	1	1	1				1	1		
Cosφ – metru (727 12)				1	1				1	1		
Ampermetru 1 A (727 31)							1				1	
Ampermetru 2,5 A (727 32)		2	2	2	2	1		3	2	2		
Voltmetru 600 V (727 38)	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	
Sursă de alimentare trifazată (726 75)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Set de 32 conductoare izolate (No. 500 851)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Set 10 conductoare izolate, 25 cm (Vd, G) (No. 500 852)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Set 10 conectori punte izolați (N) (No. 500 59)	3	2	2	4	4	2	2	2	5	5	2	
Set 10 conectori punte izolați (Vd / G) (No. 500 591)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Set de conductoare izolate (N), 25 cm (No. 500 614)				4	4			6	6			



Modelul de linie electrică 380 kV (No. 745 51)

Modelul de linie electrică este construit după o schemă cuadripolară în Π și poate simula o linie electrică de 380 kV cu trei variante de lungime: 144 km, 216 km, 360 km.

Date tehnice:

Lungime [km]	360	216	144
Lungime [%]	100	60	40
R [Ω]	13	8	5
L [mH]	290	174	116
C _B [μ F]	5	3	2

În circuit pot fi conectate capacități, rezistențe și inductivități de valori diferite, cu ajutorul unor conexiuni diferite amplasate în dreptul bornelor corespunzătoare de pe panou.

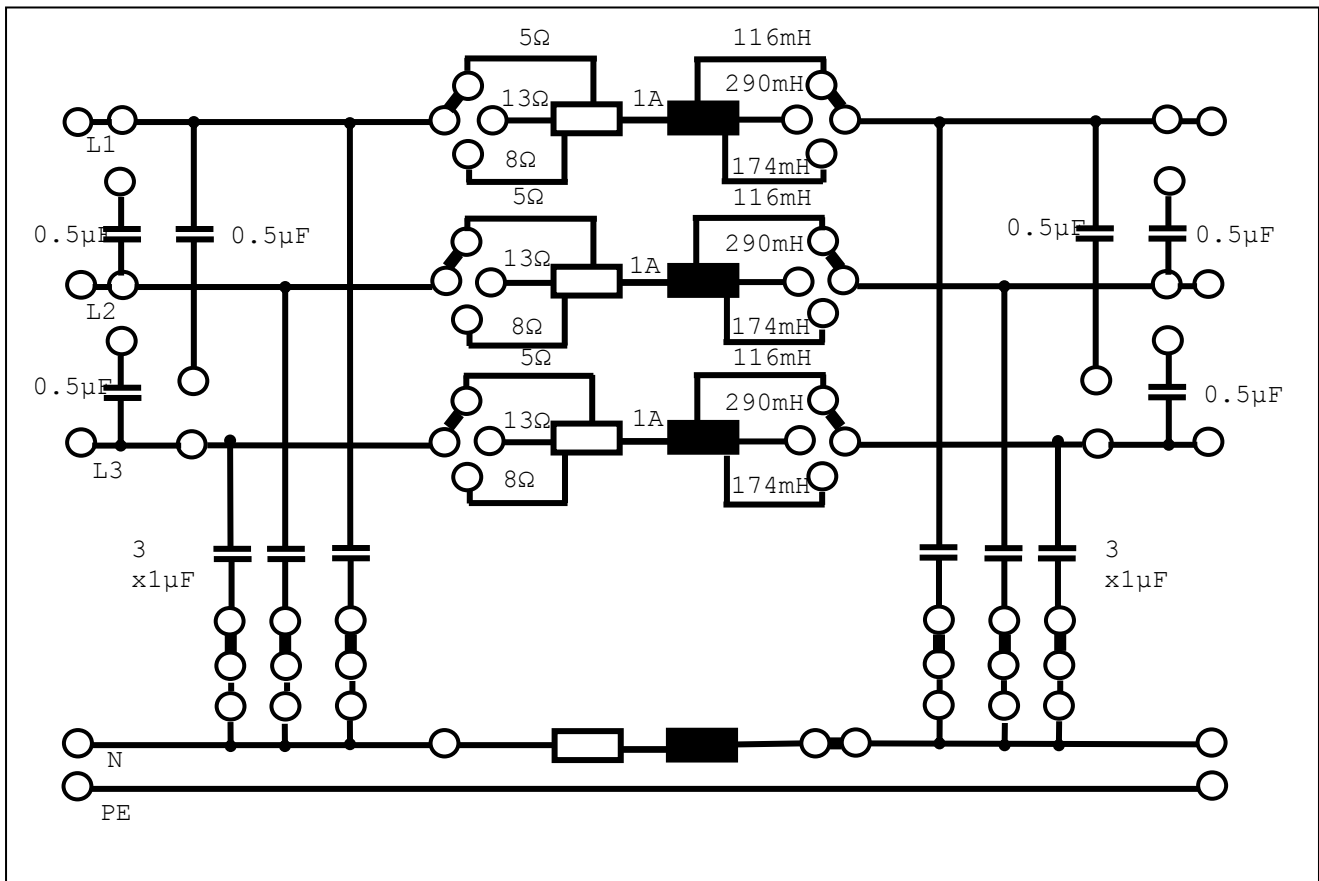
Conductorul de întoarcere este caracterizat de valorile: $R_E = 11 \Omega$ și $L_E = 250 \text{ mH}$ pentru lungimea maximă (360 km) a liniei.

Experimentele ce implică condiții de funcționare nesimetrice pot fi executate corect doar pentru lungimea maximă a liniei.

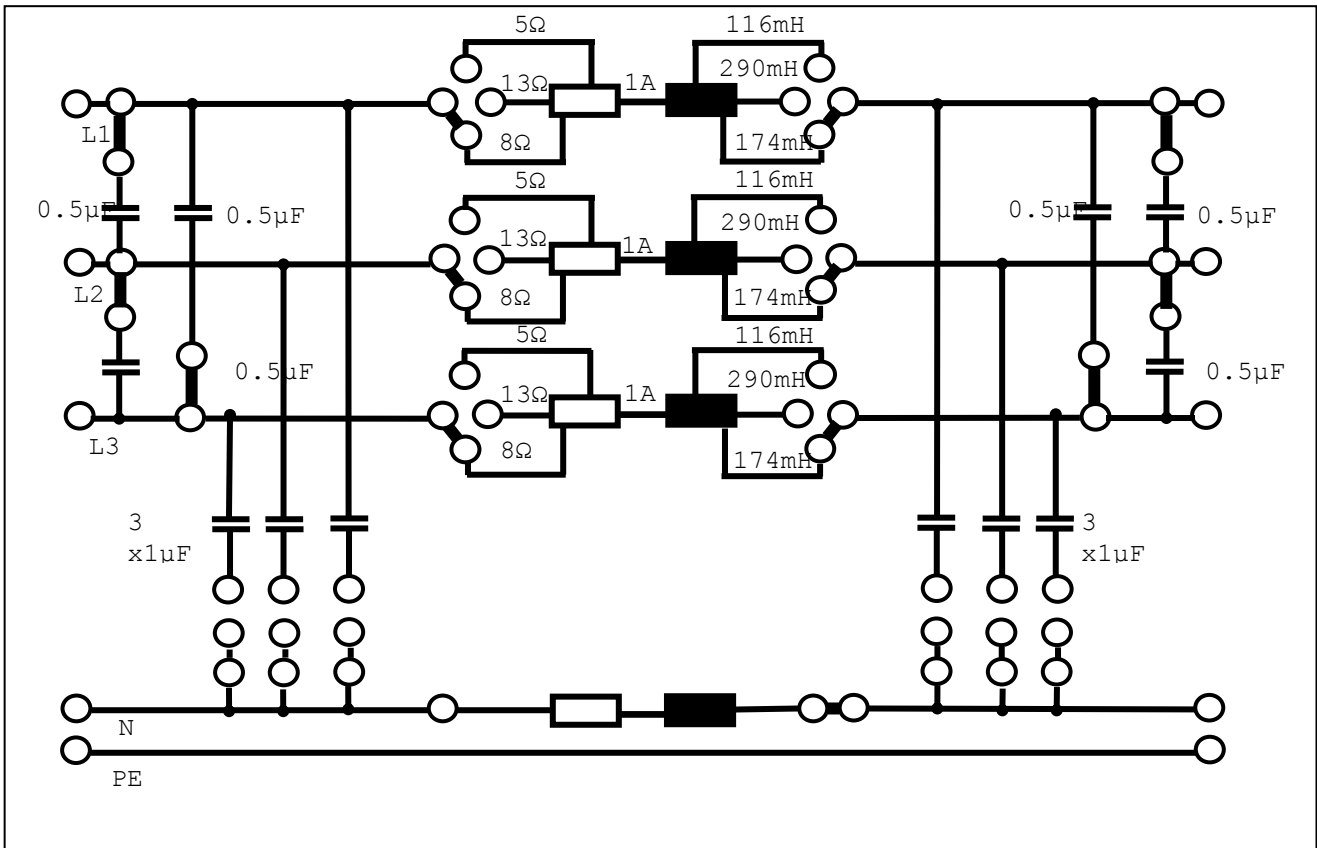
Reactanțele sunt proiectate pentru un curent constant de 1 A; sunt permise suprasarcini de scurtă durată.

Datorită caracteristicilor neliniare ale bobinelor cu miez de fier, a erorilor de fabricație și a influenței temperaturii, pot apărea erori de până la 10 % din valoarea nominală a rezistențelor și inductivităților.

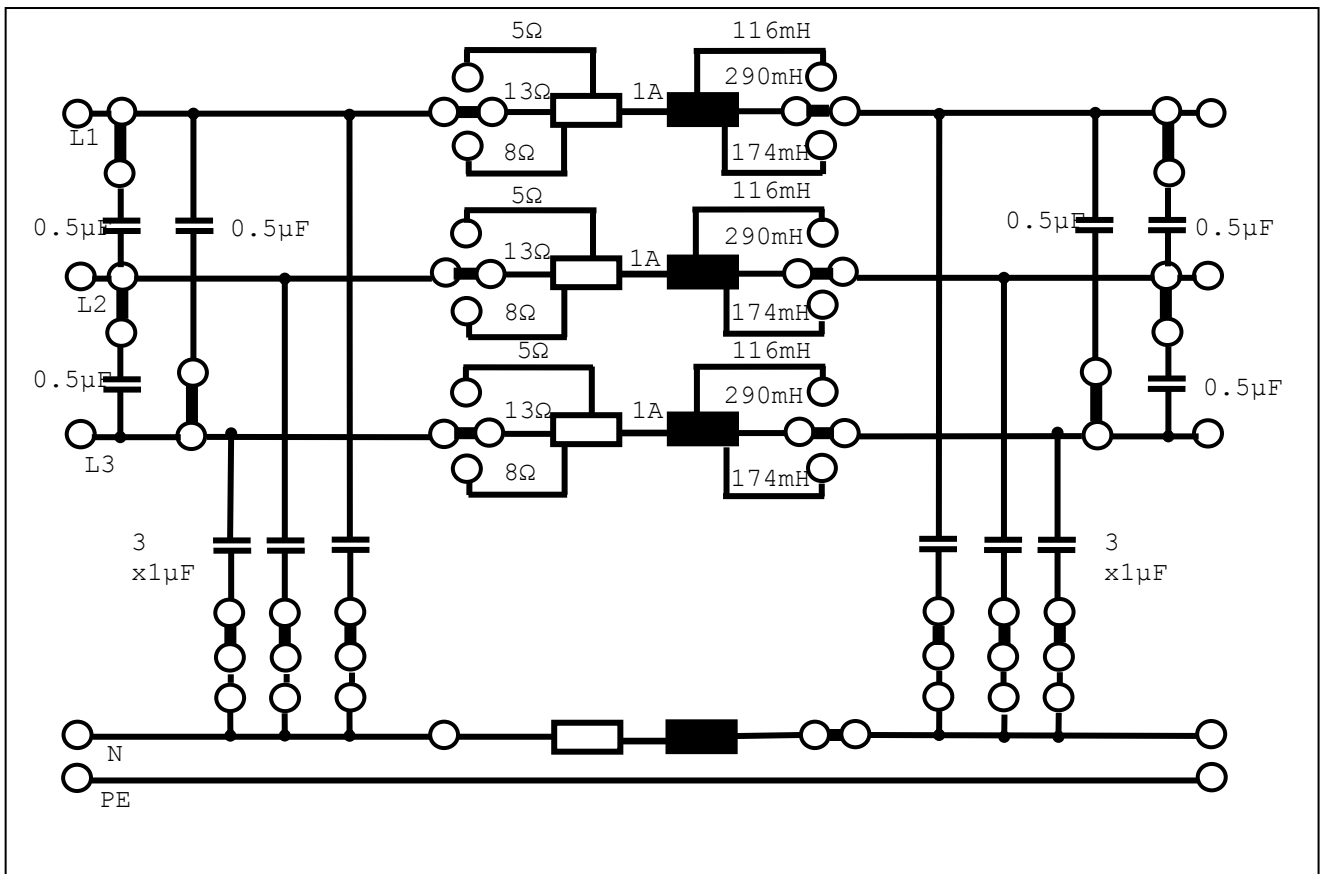
Conexiunile care pot fi executate pentru simularea diferitelor lungimi de linie sunt descrise mai jos:



Modelul liniei electrice cu lungimea de 144 km (40 % din lungimea totală)



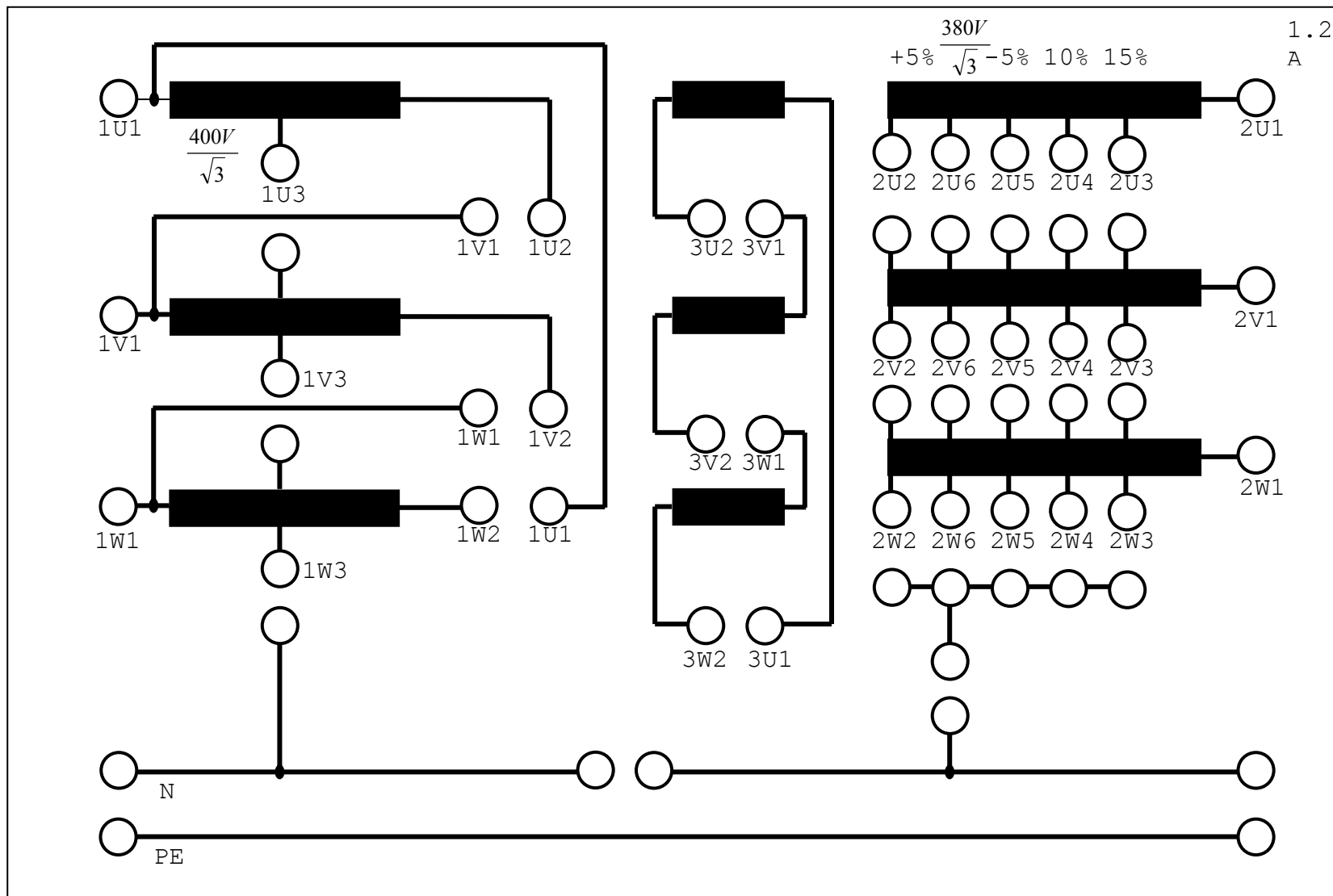
Modelul liniei electrice cu lungimea de 216 km (60 % din lungimea totală)



Modelul liniei electrice cu lungimea de 360 km (100 % din lungimea totală)

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

În toate cele trei cazuri capacitatea de serviciu $C_B = C_E + 3 C_L$ este reprodusă corect și acest lucru poate fi verificat cu ușurință. În cazul unor sarcini dezechilibrate, este corectă doar utilizarea lungimii maxime a liniei, deoarece acest model include toate capacitățile (C_E și C_L).



Transformatorul de putere trifazat (No. 745 50)

1.2
A

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Transformatorul trifazat este realizat cu 3 transformatoare monofazate. Înfășurările primară și secundară sunt izolate electric. Dacă se dorește, poate fi introdusă în circuit și o înfășurare Δ de compensare.

Înfășurare primară: - borne terminale: 1U1 - 1U3
1V1 - 1V3
1W1 - 1W3

- conexiuni posibile: Y sau Δ

Înfășurare secundară: - borne terminale: 2U1 - 2U6
2V1 - 2V6
2W1 - 2W6

- conexiuni posibile: Y cu neutrul accesibil

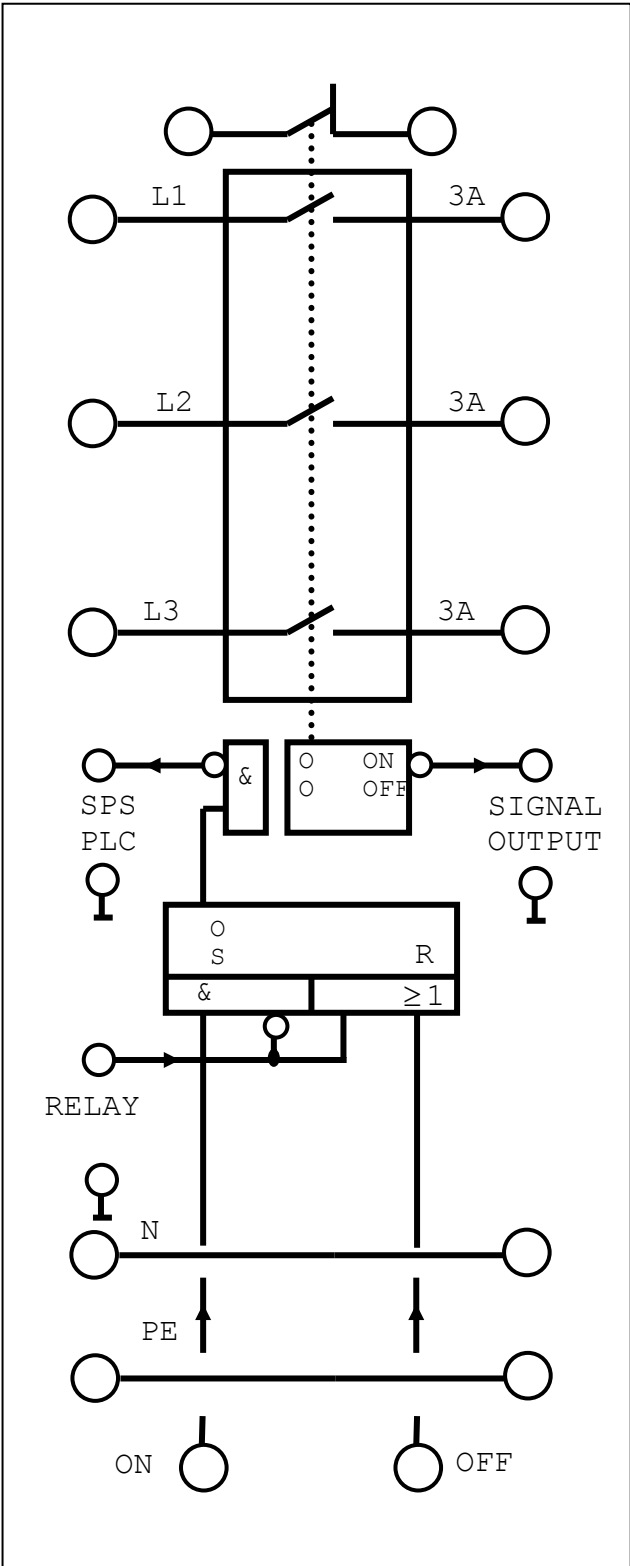
- tensiuni la ploturi: $U_N = 380 \text{ V}$; $U_N + 5\%$; $U_N - 5\%$; $U_N - 10\%$; $U_N - 15\%$

(1,2 A)

Înfășurare de compensare: borne 3U1 - 3U2; 3V1 - 3V2; 3W1 - 3W2

Tensiunea de scurt-circuit a transformatorului: $u_k = 13 \%$.

Modulul de întreruptor (No. 745 56)



Rețele electrice I – Indrumar de laborator

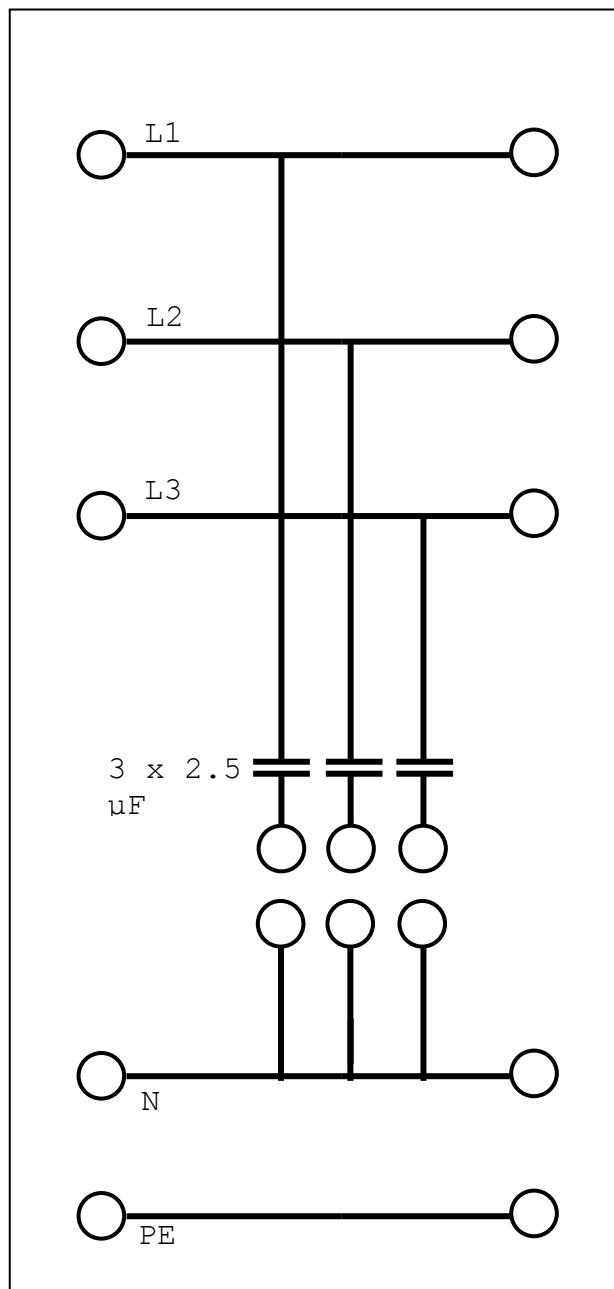
Întreruptorul circuitului (trifazat) poate fi acționat manual sau prin intermediul sistemului de control logic programabil (PLC). Operațiile manuale corespund unui control local în funcționarea rețelelor reale. Pe de altă parte, contactul releului comandă doar deschiderea întrepruptorului. Rețeaua poate fi reconectată manual.

Întreruptorul poate fi închis/deschis prin ieșirea PLC. Tensiunea de alimentare este 230 V c.a. Starea "sub tensiune" a echipamentului este indicată prin aprinderea lămpii galbene. Stările închis / deschis sunt indicate de ledul roșu / verde.

Un contact NI a fost integrat ca un contact auxiliar sau indicator, care poate fi utilizat de exemplu cu PLC.

În plus, există o ieșire disponibilă TTL. Aceasta este setată pe 1 logic pentru contact principal deschis și pe 0 logic pentru contact principal închis. Ieșirea TTL poate fi utilizată pentru experimentele cu protecții prin rele.

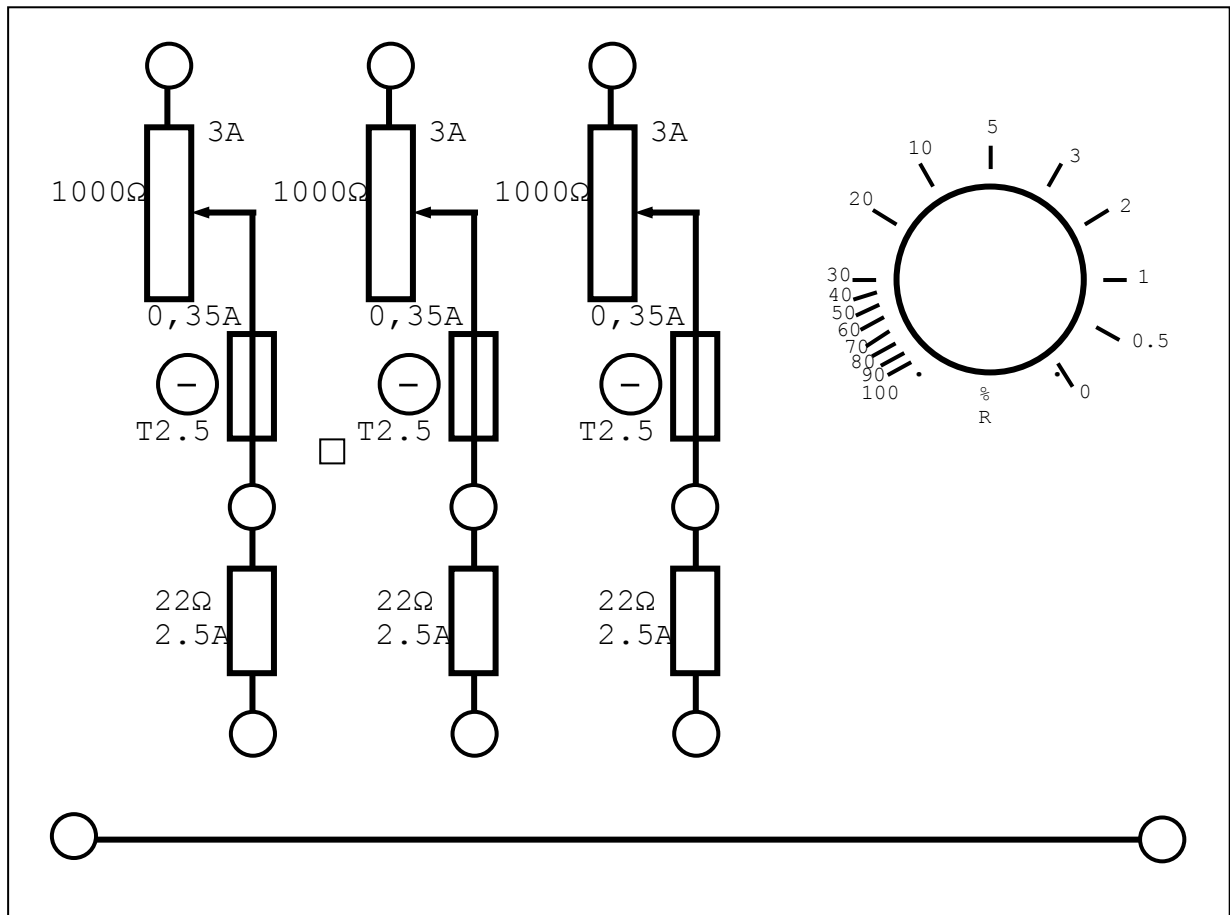
Capacitatea liniei electrice LN 380 kV (No. 745 53)



Constă din 3 condensatoare, fiecare cu capacitatea de $2,5 \mu\text{F}$ (corespunzătoare lungimii maxime a liniei).

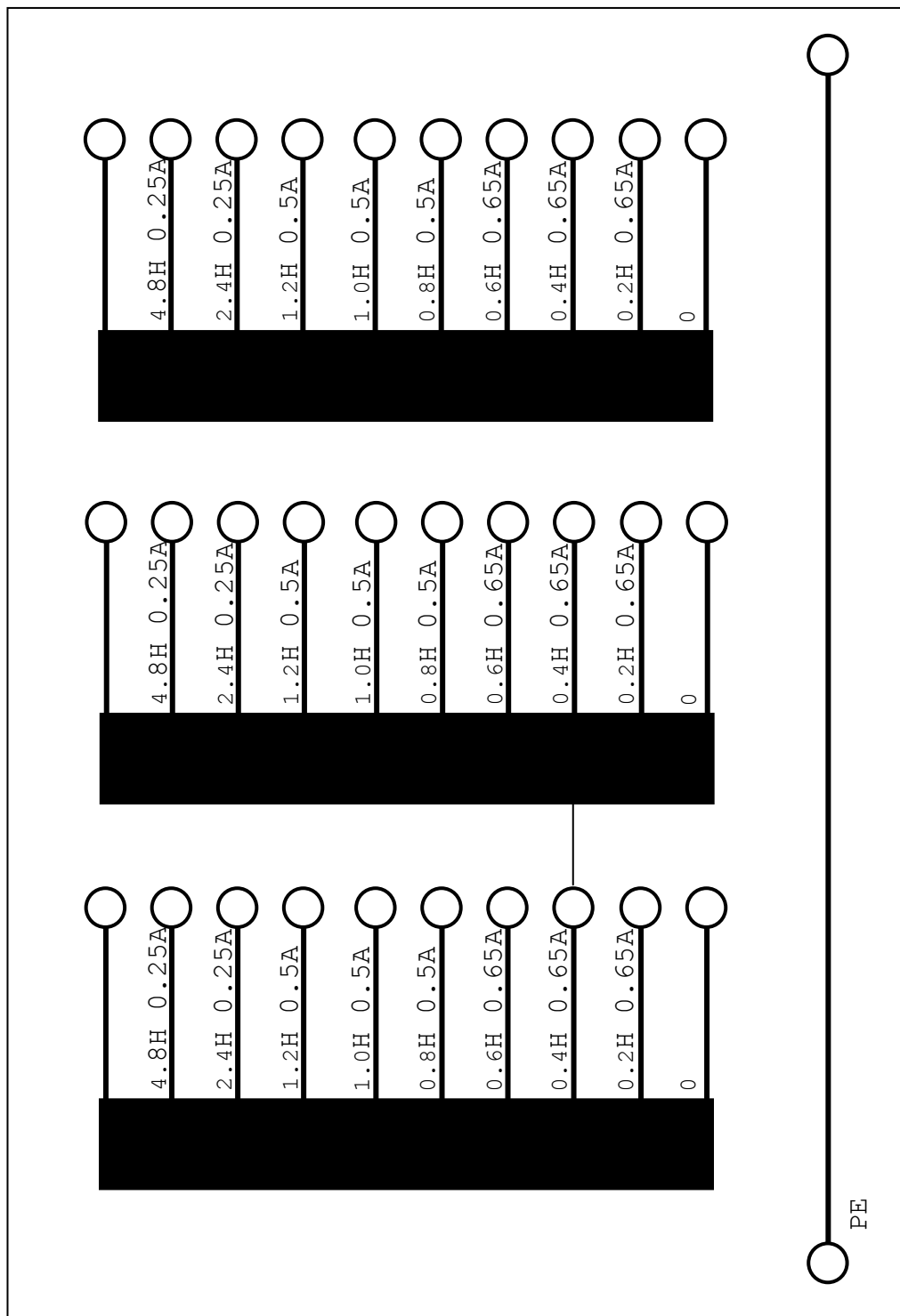
Dacă sunt utilizate ambele capacități ale liniei în asociere cu modelul complet al liniei electrice (cu capacități incluse), circuitul realizat se comportă, în termeni de consum de putere reactivă, exact ca o linie electrică în cablu.

Sarcina rezistivă (No. 733 10)



Sarcina are o construcție trifazată și constă în trei rezistoare cu rezistențe variabile în domeniul $R = 0 - 1000 \Omega$, fiecare incluzând rezistoare serie cu $R = 22 \Omega$. Rezistoarele serie pot fi încărcate până la max. $2,5 A$ și sunt protejate corespunzător. Sarcina pentru reostatele rotative depinde de poziția cursorului. Curentul se reglează continuu între $0,35 A$ la limita din stânga și $2,5 A$ la limita din dreapta. Sarcina continuă în pozițiile intermediare este liniar proporțională cu poziția cursorului între limite. Utilizând prizele punții, rezistoarele individuale ale sarcinii pot fi conectate fie în stea, fie în triunghi.

Sarcina inductivă (No. 732 42)



Această componentă este deasemenea proiectată ca o sarcină trifazată și constă din trei bobine separate cu ploturi. Pot fi reglate următoarele valori:

0,2 H - 0,4 H - 0,6 H (sarcină max. 0,65 A fiecare);

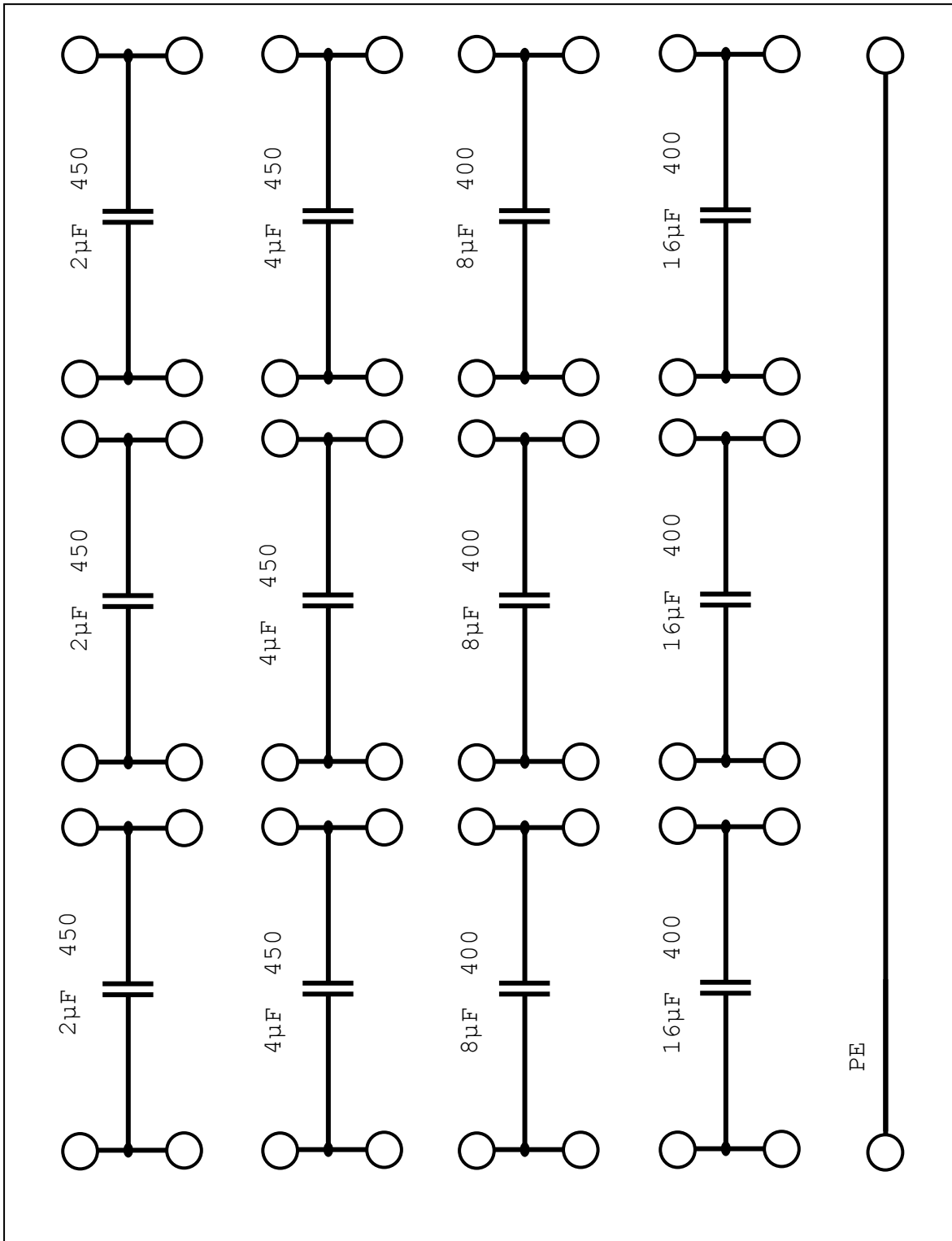
0,8 H - 1,0 H - 1,2 H (sarcină max. 0,5 A fiecare);

2,4 H - 4,8 H - 6,0 H (sarcină max. 0,25 A fiecare).

Inductivitățile individuale ale sarcinii pot fi conectate în stea sau în triunghi utilizând bornele punții.

În experimentele care urmează va fi utilizată doar conexiunea stea.

Sarcina capacitivă (No. 733 11)

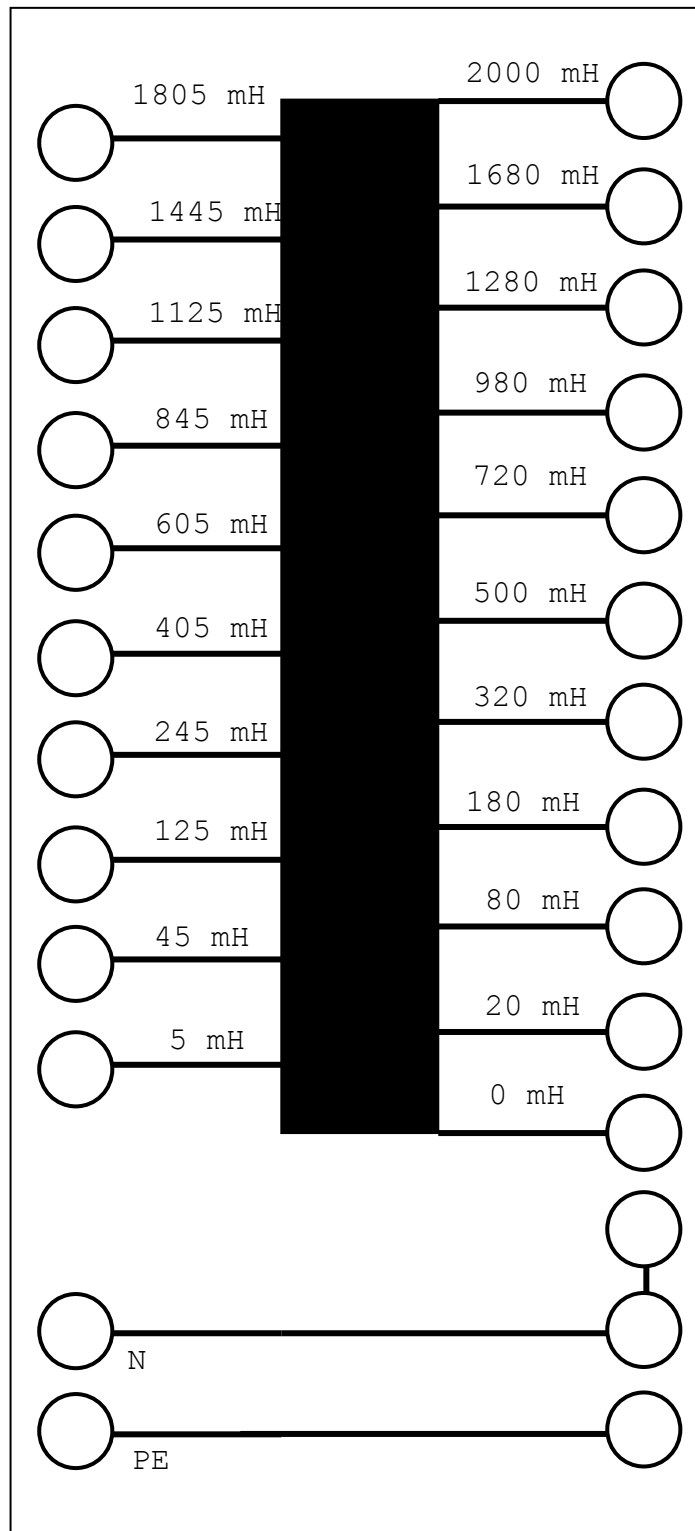


Și aceasta sarcină este de tip trifazat. Constă în trei grupuri separate de condensatoare. Pot fi conectate următoarele valori (și combinațiile lor):
 2 μF - 4 μF - 8 μF - 16 μF . Valorile capacităților 2 μF și 4 μF corespund pentru 450 V c.a., iar 8 μF și 16 μF pentru 400 V c.a.

Capacitățile individuale ale sarcinii pot fi conectate în stea sau în triunghi, utilizând bornele punții.

În experimentele următoare va fi utilizată doar conexiunea stea.

Bobina de stingere (No. 745 57)

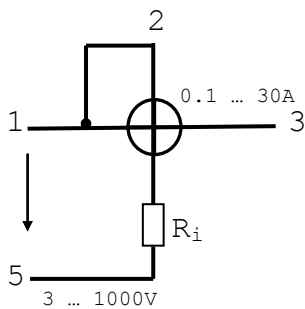
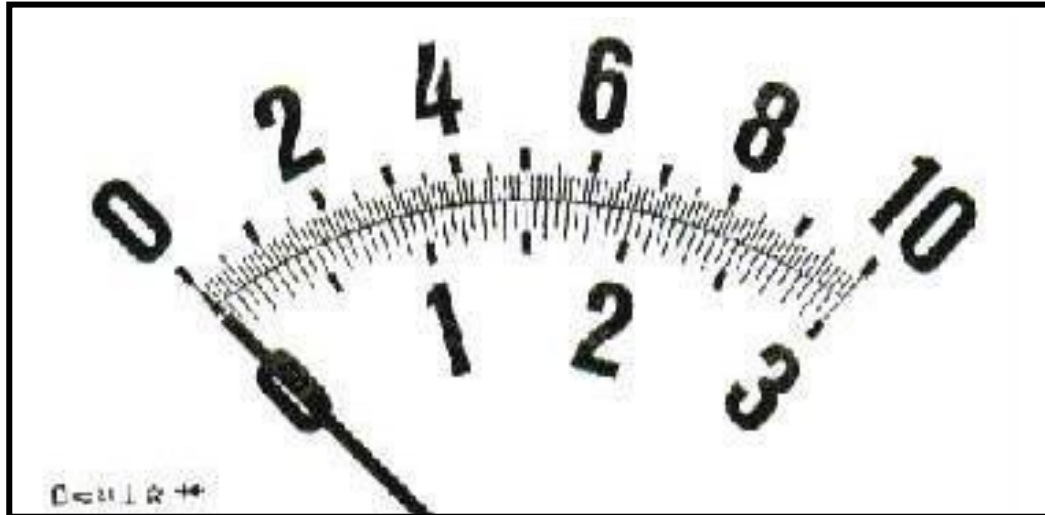


Bobina de stingere este o bobină monofazată cu prize multiple. Pot fi reglate următoarele valori:

5, 20, 45, 80, 125, 180, 245, 320, 405, 500, 605, 720, 845, 980, 1125, 1280, 1445, 1680, 1805, 2000 mH.

Toate valorile inductanței corespund unei tensiuni de 230 V și unui curent max. de 0,5 A.

Watt/varmetru (No. 727 11)

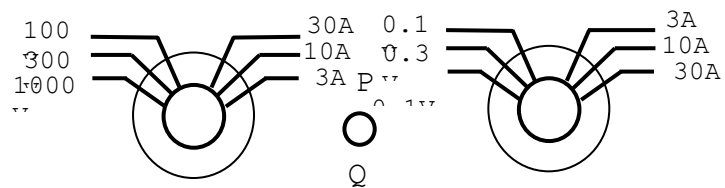
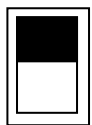


U/V \ I/A	3	10	30	100	300	1000
∩	0.1	0.1	1	1	10	10
0.3	0.1	1	1	10	10	100
1	1	1	10	10	100	100
3	1	10	10	100	100	1000
1 ∩	10	10	100	100	1000	1000
30	10	100	100	1000	1000	1000

SCALE 0 -10 SCALE 0 - 3
 Q_L Q_C

U OVER

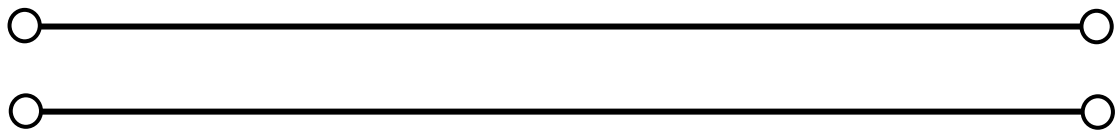
OVER I



5

3

1/2



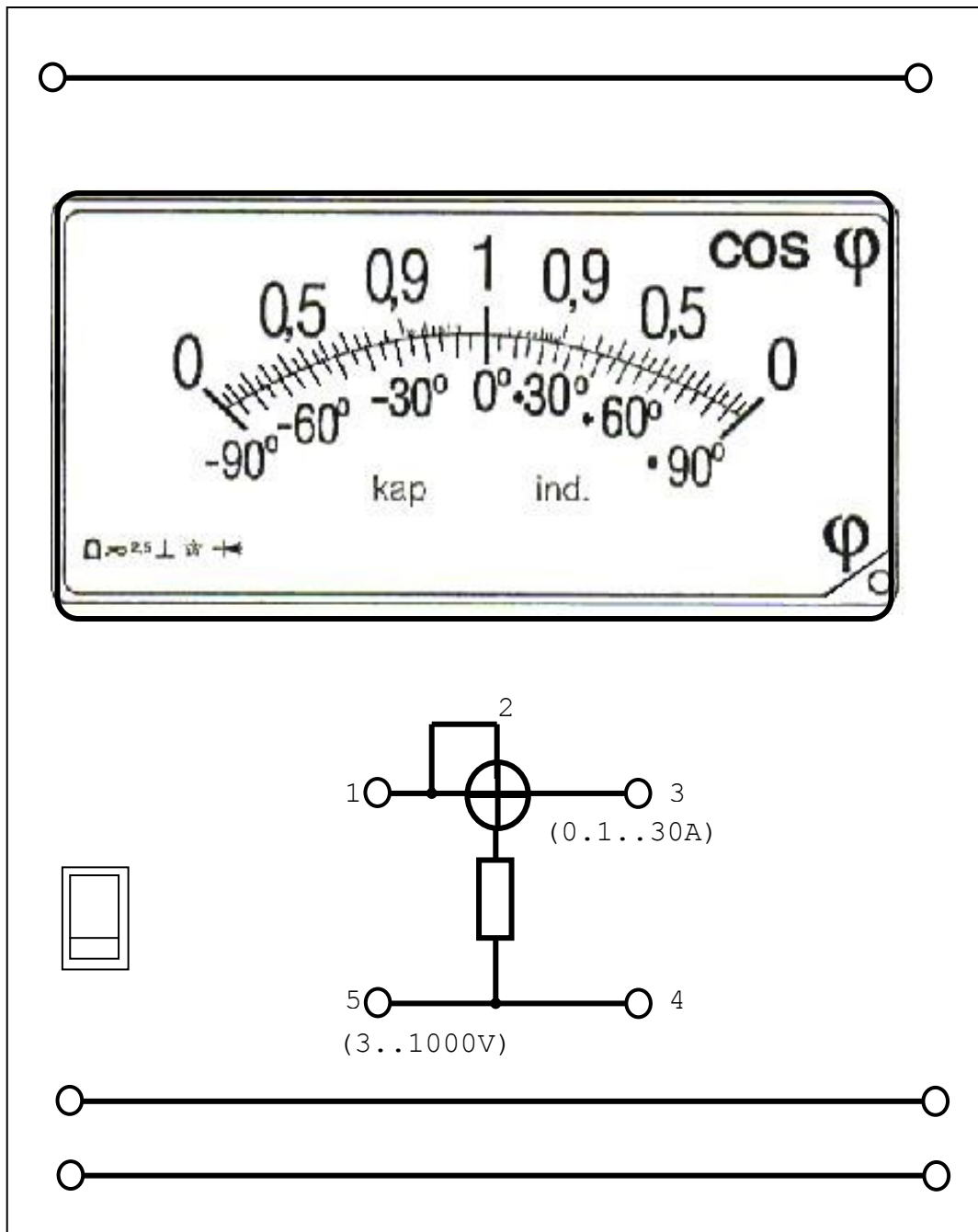
Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Watt/varmetrul este de tip monofazat; în consecință trebuie conectat între un conductor de fază și conductorul neutru.

Poate fi utilizat fie pentru măsurarea puterii active (poziția P a comutatorului), fie pentru cea a puterii reactive (poziția Q a comutatorului). Când se măsoară puterea reactivă, instrumentul indică fie o putere inductivă (Q_L), fie una capacitivă (Q_C) care caracterizează circuitul. Pentru obținerea unor rezultate exacte trebuie utilizat cel mai mic domeniu de măsură (pornind de la domeniul de măsură maxim).

Puterea consumată totală a unui circuit trifazat este determinată prin multiplicarea valorii măsurate cu 3.

Cosφ - metru (No.727 12)



Cosφ-metrul funcționează pe același principiu ca și watt/varmetrul. Spre deosebire de acesta, cosφ-metrul indică factorul de putere al sarcinii conectate.

Cosφ-metrul este conectat la o fază a circuitului trifazat, în același mod ca și watt/varmetrul.

Lucrarea de laborator nr. 2

2.3. Experimente privind performanțele liniei electrice

2.3.1. Funcționarea în gol

Scopul experimentului: măsurarea creșterii de tensiune și a puterii de încărcare pe linii de lungimi diferite în gol; explicarea conceptului de capacitate de serviciu; caracteristici de funcționare ale liniilor electrice aeriene și în cablu.

Lista echipamentelor și configurații experimentale

1	sursă de putere trifazată	(No. 726 75)
1	modul comutator de putere	(No. 745 561)
1	transformator de putere trifazat	(No. 745 50)
1	modul linie electrică	(No. 745 51)
2	capacități linie	(No. 745 53)
2	voltmetre 600 V	
1	watt/varmetru	
1	set de conductoare izolate	(No. 500 851)
1	set conductoare izolate (Vd, G)	(No. 500 852)
3	seturi conectori punte izolați (N)	(No. 500 59)
1	set conectori punte izolați (Vd / G)	(No. 500 591)

Amplasarea echipamentelor pe cadru: sunt așezate după cum se vede mai jos :

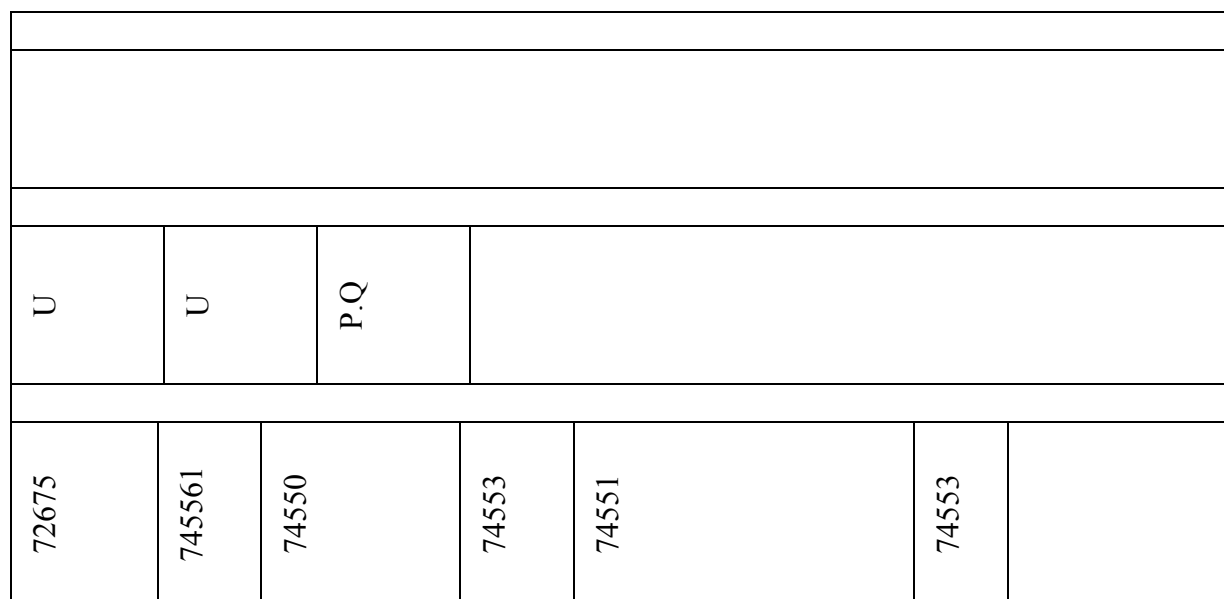


Fig 2.1. Amplasarea echipamentelor pentru studiul funcționării în gol

Mod de lucru

Se realizează circuitul din fig.2.2.

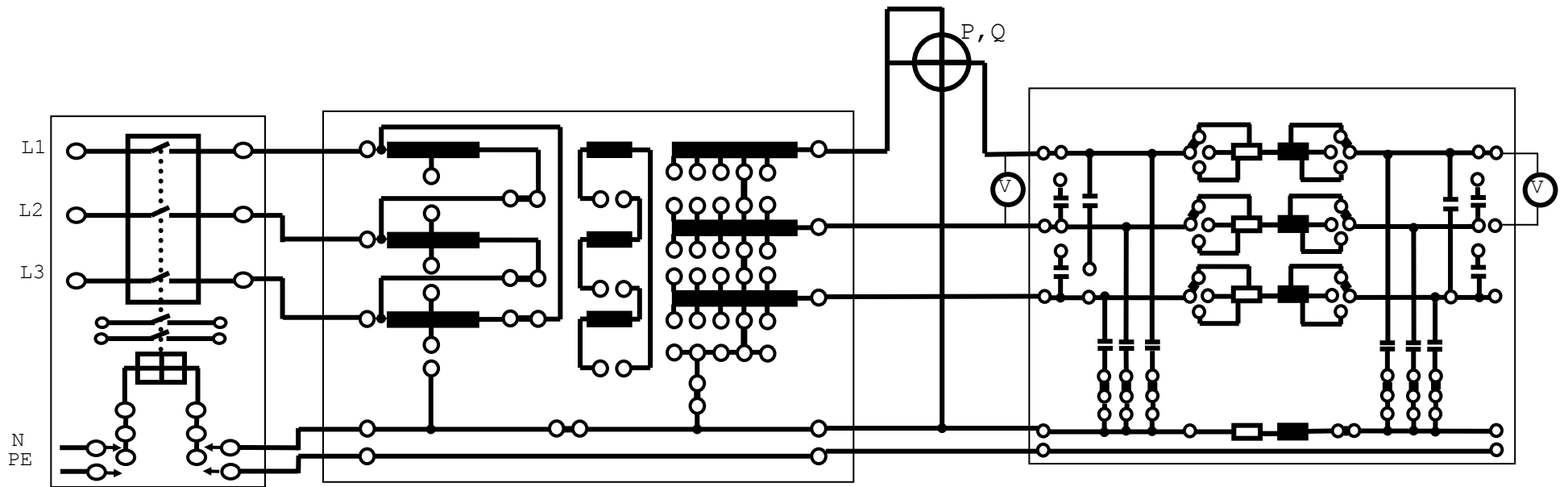


Fig. 2.2. Schema circuitului pentru studiul performanțelor unei linii electrice în gol (lungimea liniei - 40 % din lungimea maximă)

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Utilizând conectorii punte se reglează tensiunea în secundarul transformatorului trifazat la $U_N - 10\%$.

Conectorii punte au fost poziționați astfel încât să fie asigurată cea mai mică lungime de linie: 144 km. Caracteristicile liniei în gol au fost astfel minimizate.

Se va măsura tensiunea între două conductoare de fază la capetele liniei și puterea reactivă consumată pe fază:

$$U_1 = \dots\dots\dots, \quad U_2 = \dots\dots\dots, \quad U_2 / U_1 = \dots\dots\dots, \quad Q_C = \dots\dots\dots$$

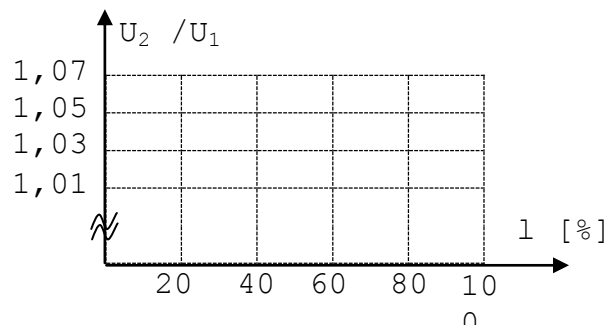
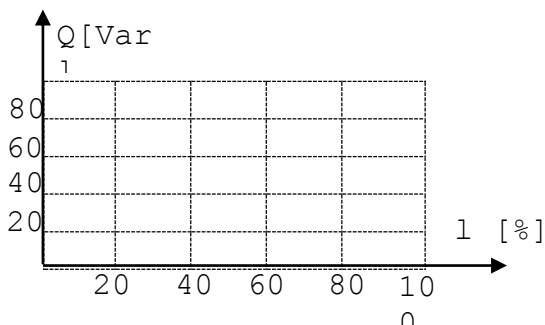
Se vor reconecta conectorii punte pentru o lungime a liniei de 216 km (fig.2.3) și se repetă măsurătorile anterioare:

$$U_1 = \dots\dots\dots, \quad U_2 = \dots\dots\dots, \quad U_2 / U_1 = \dots\dots\dots, \quad Q_C = \dots\dots\dots$$

Operația se va repeta și pentru cazul lungimii liniei de 360 km (fig.2.4):

$$U_1 = \dots\dots\dots, \quad U_2 = \dots\dots\dots, \quad U_2 / U_1 = \dots\dots\dots, \quad Q_C = \dots\dots\dots$$

Se vor trasa graficele dependenței puterii reactive și a raportului U_2 / U_1 de lungimea liniei. Ce concluzii se pot trage?



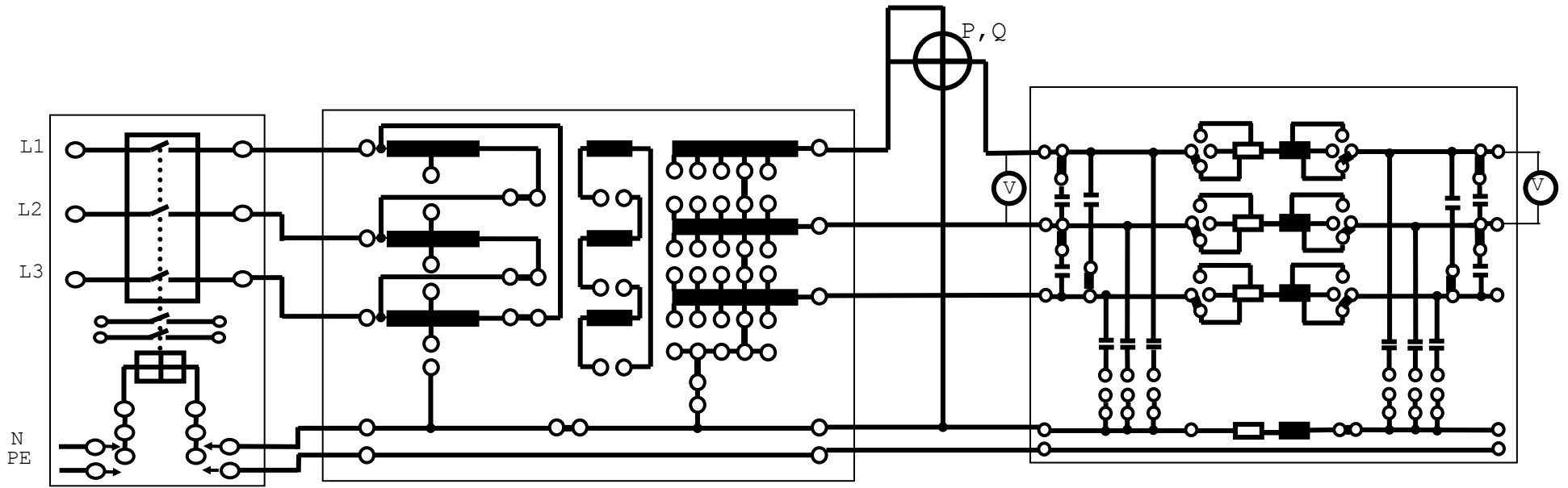


Fig. 2.3. Schema electrică pentru studiul performanțelor de funcționare ale unei linii electrice în gol (lungime 60% din lungimea maximă)

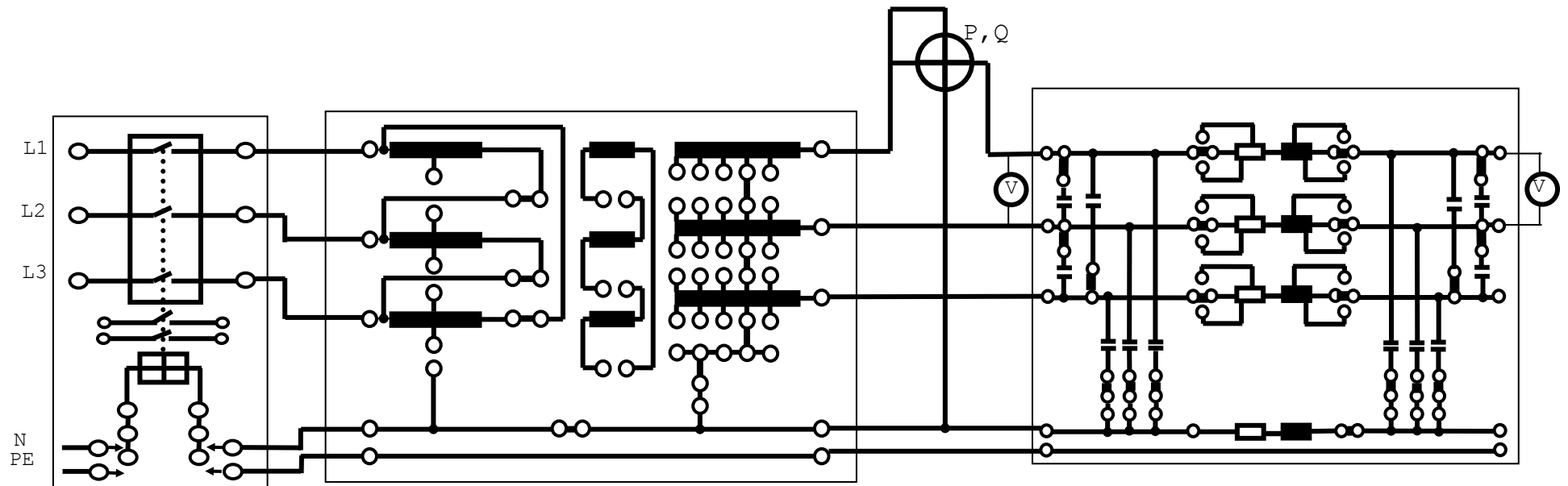


Fig. 2.4. Schema electrică pentru studiul performanțelor de funcționare ale unei linii electrice în gol (lungime maximă)

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Să se compare puterile reactive măsurate cu valorile calculate corespunzătoare fiecărei lungimi considerate.

Rezultate

Puterea reactivă calculată ($Q_C = U_N^2 \cdot \omega \cdot C_B$)

Pentru $l=144$ km: $Q_C = 91$ Var (măsurată)

Pentru $l=216$ km: $Q_C = 136$ Var (măsurată)

Pentru $l=360$ km: $Q_C = 227$ Var (măsurată)

Necesită modelul liniei electrice putere reactivă în cazul funcționării în gol?

Răspuns

Curentul slab care traversează linia de la un capăt la altul și de-a lungul jumătății capacității de serviciu cauzează pierderi de putere activă grele în rezistența liniei. Măsurarea puterii ne arată că

.....

În scopul înțelegerii conceptului de "capacitate de serviciu" se va realiza schema din fig.2.5. (față de montajul anterior se introduc capacitățile de linie – No.745 53).

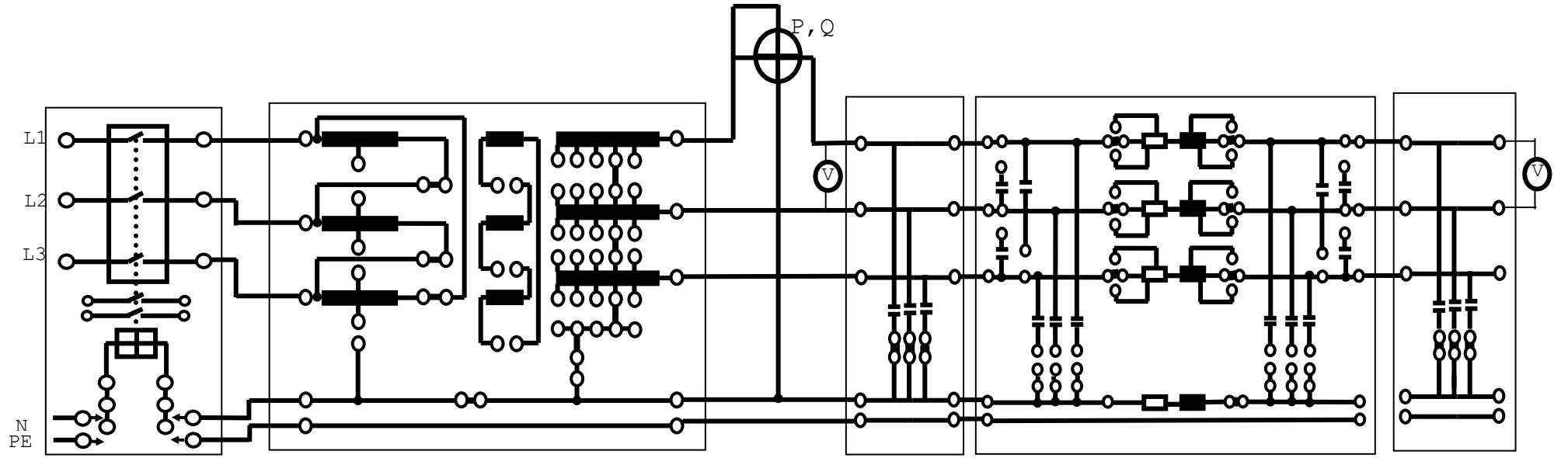


Fig.2.5. Schema electrică pentru demonstrarea conceptului de "capacitate de serviciu"

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Se reglează tensiunea în secundarul transformatorului trifazat la valoarea $U_N - 10\%$; se vor scoate toți conectorii punte care leagă capacitățile la modelul de linie electrică (eliminarea capacităților).

Se măsoară tensiunea între două conductoare de fază la capetele liniei, precum și puterea reactivă consumată pe fază:

$$U_1 = \dots\dots\dots, \quad U_2 = \dots\dots\dots, \quad U_2 / U_1 = \dots\dots\dots, \quad Q_C = \dots\dots\dots$$

Se vor compara rezultatele cu cele corespunzătoare modelului de linie de lungime maximă. Ce concluzii se pot trage în ceea ce privește capacitatea echivalentă?

Răspuns

.....

Pentru a pune în evidență diferența dintre caracteristicile unui cablu și cele ale unei linii electrice aeriene la funcționarea în gol se va realiza circuitul din fig. 2.6. Se vor reconecta capacitățile individuale în modelul de linie.

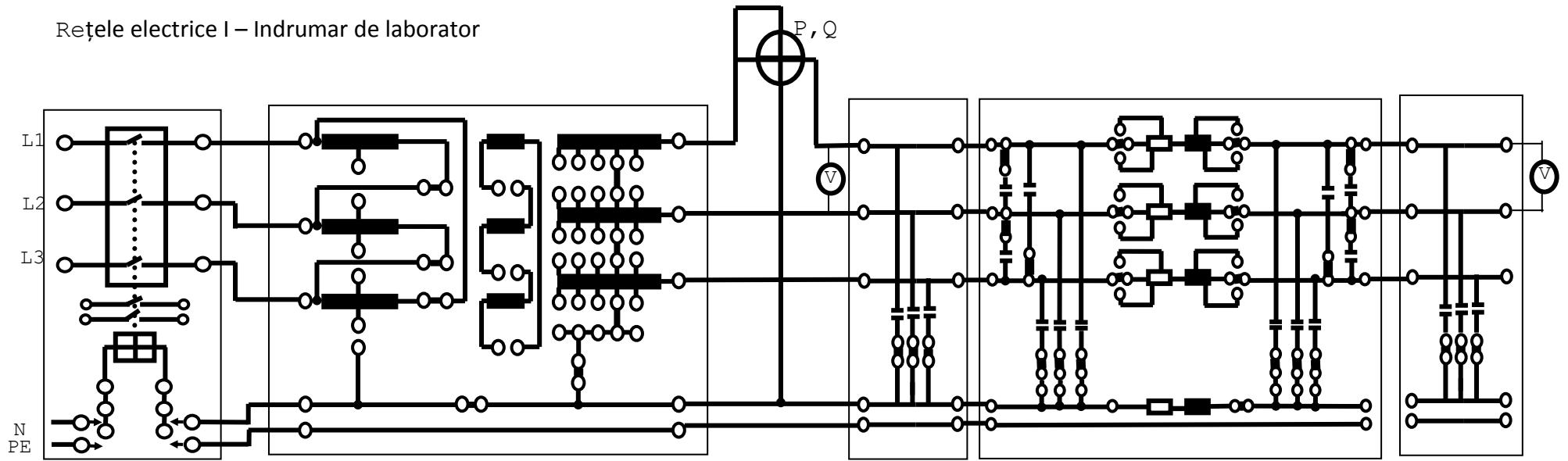


Fig.2.6. Modelul de linie electrică cu capacitate de serviciu mare

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Prin conectarea celor două capacități de linie (artificiale), capacitatea de serviciu a modelului de linie electrică se dublează. In consecință, efectul de creștere a tensiunii se amplifică.

Se va măsura tensiunea între două conductoare de fază la ambele capete ale liniei, precum și puterea reactivă consumată pe fază:

$$U_1 = \dots, \quad U_2 = \dots, \quad U_2 / U_1 = \dots, \quad Q_C = \dots$$

Se vor compara rezultatele cu cele obținute pentru cazul liniei de lungime maximă, dar fără capacități suplimentare.

Rezultate

Notă: Cablurile reale au o capacitate de serviciu semnificativ mai mare (vezi datele corespunzătoare unui cablu de 110 kV - & 1.3). In rețelele de distribuție cablurile au lungimi relativ reduse.

Lucrarea de laborator nr. 3

2.3.2. Linii electrice cu sarcină naturală

Scopul experimentului: măsurarea și interpretarea relațiilor dintre tensiuni și curenți pentru o linie electrică cu sarcină naturală; interpretarea termenilor de impedanță caracteristică, funcționare supra- și subîncărcată, randamentul transmisiei și pierderi de putere.

Lista echipamentelor și configurații experimentale

1	sursă de putere trifazată	(No. 726 75)
1	modul întreruptor	(No. 745 561)
1	transformator de putere trifazat	(No. 745 50)
1	modul linie electrică	(No. 745 51)
1	sarcină rezistivă	(No. 733 10)
2	ampermetre 2,5 A	
2	voltmetre 600 V	
1	watt/varmetru	
1	set de conductoare izolate	(No. 500 851)
1	set conductoare izolate (Vd, G)	(No. 500 852)
2	seturi conectori punte izolați (N)	(No. 500 59)
1	set conectori punte izolați (Vd / G)	(No. 500 591)

Amplasarea echipamentelor pe cadru: sunt așezate după cum se vede mai jos :

U	I	U	I	P, Q	
72675	745561	74550		74551	73310

Fig 2.7. Amplasarea echipamentelor pentru studiul funcționării cu sarcină naturală

Mod de lucru

Se realizează circuitul din fig.2.8

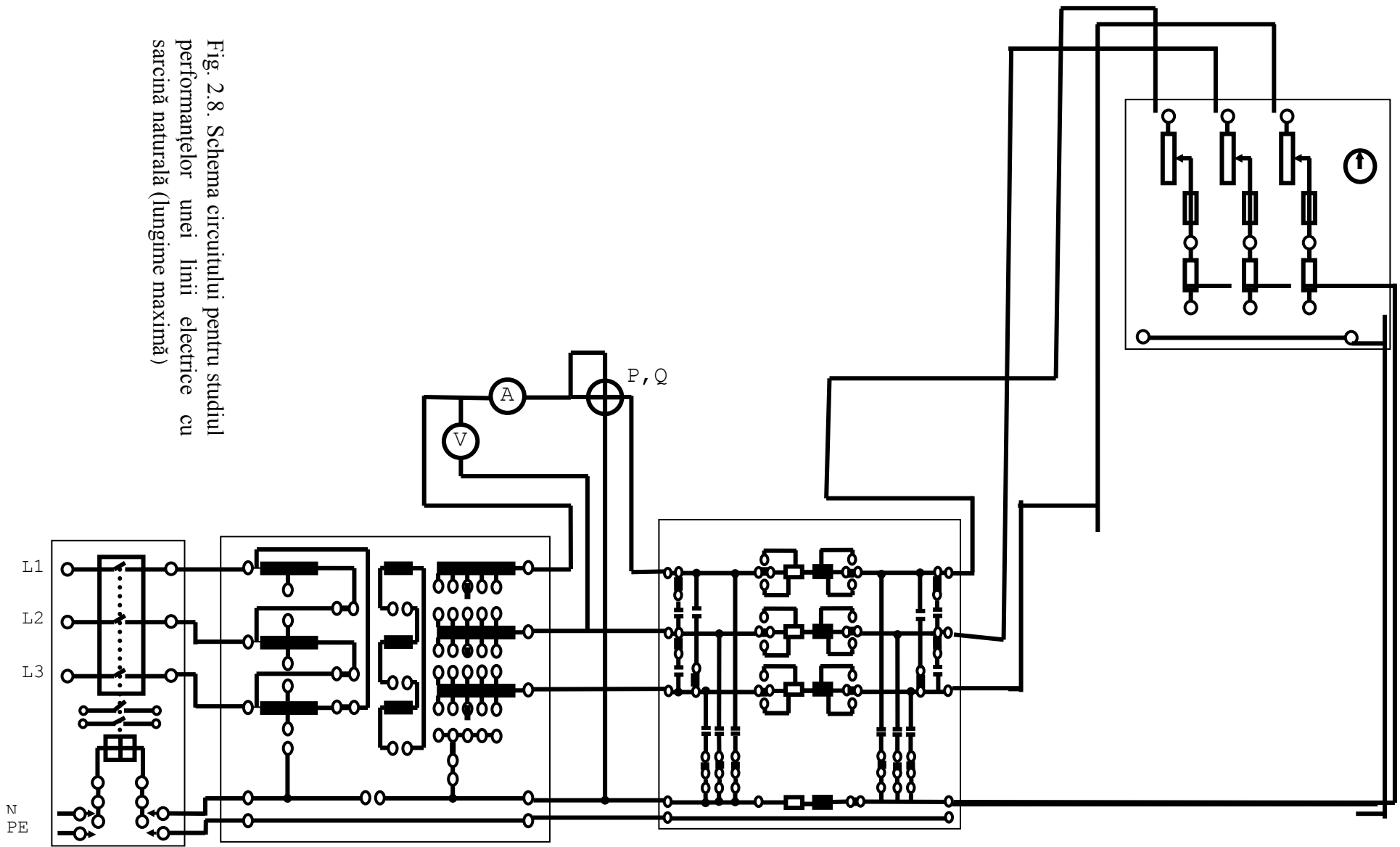


Fig. 2.8. Schema circuitului pentru studiul performanțelor unei linii electrice cu sarcină naturală (lungime maximă)

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Modelul de linie este realizat inițial pentru lungimea maximă, în timp ce tensiunea la transformatorul trifazat este reglată la $U_N - 5\%$.

Sarcina rezistivă se reduce începând de la 100% în 9 pași de câte 10 % (la valoarea cea mai mică a rezistenței măsurătorile trebuie efectuate rapid pentru a evita expunerea prelungită a componentelor la curenți mari).

La fiecare pas trebuie măsurate următoarele mărimi: tensiunea U_1 , curentul I_1 , puterea activă P_1 , puterea reactivă Q_1 la capătul de început al liniei și tensiunea U_2 , curentul I_2 la capătul de sfârșit al liniei.

Valorile măsurate vor fi trecute în tabelul următor:

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						
20						
10						

Pentru ce valoare a rezistenței de sarcină apare comportamentul capacitiv și pentru care cel inductiv?

Să se determine valoarea rezistenței pentru care linia nu mai consumă putere reactivă și să se compare cu valoarea impedanței caracteristice dată în secțiunea teoretică.

Rezultate

.....
.....

Să se verifice independența valorii impedanței caracteristice a liniei de lungimea acesteia.

Menținând constantă sarcina rezistivă (aprox. 240Ω) și tensiunea de alimentare ($U_N - 5\%$) și modificând lungimea liniei întâi la 40 %, apoi la 60 % din lungimea maximă (vezi figura ce descrie modelul liniei electrice) să se precizeze dacă circuitul consumă putere reactivă.

Rezultate

.....
.....

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Se fixează lungimea modelului de linie la 100% pentru a determina din nou pierderile pe linie și randamentul în cazul funcționării cu sarcină naturală. Se menține rezistența sarcinii egală cu valoarea impedanței caracteristice. Se măsoară tensiunea și curentul la ambele capete ale liniei pentru toate tensiunile de alimentare care pot fi reglate în secundarul transformatorului de putere.

Tensiune de alimentare	U_1 [V]	I_1 [A]	U_2 [V]	I_2 [A]
$U_N + 5\%$				
U_N				
$U_N - 5\%$				
$U_N - 10\%$				
$U_N - 15\%$				

Cu valorile măsurate pentru tensiuni și curenți se calculează puterea activă totală P_1 la începutul liniei și puterea activă totală P_2 la sfârșitul liniei pentru tensiunile de alimentare precizate mai sus, conform relației: $P = \sqrt{3}UI$ (în cazul funcționării cu sarcină naturală este transmisă doar putere activă).

Diferența $\Delta P = P_1 - P_2$ reprezintă pierderile pe linie, în timp ce raportul P_2 / P_1 dă randamentul liniei.

Rezultatele obținute pentru fiecare valoare a tensiunii de alimentare se trec în tabelul următor:

Tensiune de alimentare	P_1 [W]	P_2 [W]	ΔP [W]	Randamentul [%]
$U_N + 5\%$				
U_N				
$U_N - 5\%$				
$U_N - 10\%$				
$U_N - 15\%$				

Depinde randamentul de amplitudinea tensiunii de alimentare?

Rezultate

.....
.....

Notă: La liniile electrice aeriene reale mai apar pierderile prin efect corona, care influențează (în mică măsură) negativ eficiența transmisiei de putere.

Trebuie precizat că valorile obținute mai sus sunt valabile doar pentru cazul special al funcționării cu sarcină naturală.

2.3.3. Caracteristici în regim de scurt-circuit

Scopul experimentului: măsurarea și interpretarea valorilor tensiunii și curentului pentru un scurt-circuit trifazat pe linie.

Lista echipamentelor și configurații experimentale

1	sursă de putere trifazată	(No. 726 75)
1	modul comutator de putere	(No. 745 561)
1	transformator de putere trifazat	(No. 745 50)
1	modul linie electrică	(No. 745 51)
2	ampermetre 2,5 A	
1	voltmetre 600 V	
1	watt/varmetru	
1	set de conductoare izolate	(No. 500 851)
1	set conductoare izolate (Vd, G)	(No. 500 852)
2	seturi conectori punte izolați (N)	(No. 500 59)
1	set conectori punte izolați (Vd / G)	(No. 500 591)

Amplasarea echipamentelor pe cadru: sunt așezate după cum se vede mai jos :

I	P, Q	U	I	
72675	745561	74550	74551	

Fig 2.9. Amplasarea echipamentelor pentru cazul scurtcircuitelor trifazate

Mod de lucru

Se realizează circuitul din fig.2.10.

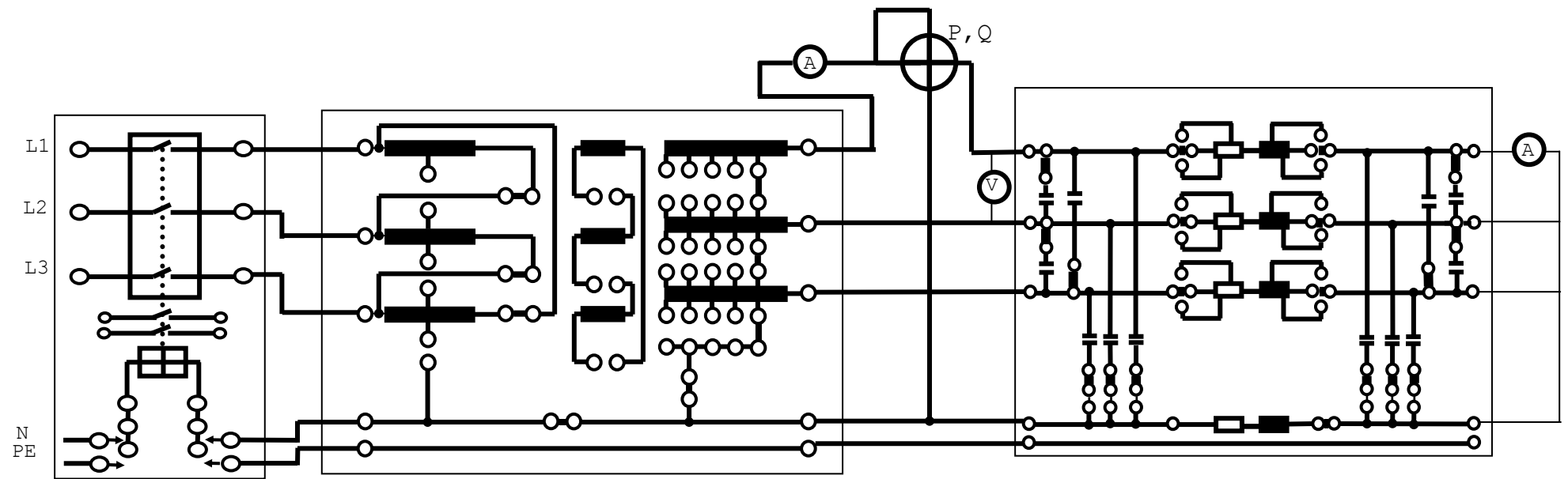


Fig. 2.10. Schema circuitului pentru studiul unui scurtcircuit trifazat pe o linie electrică (lungimea liniei - 100 % din lungimea maximă)

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Se reglează tensiunea în secundarul transformatorului trifazat la valoarea $U_N - 15\%$.

Datorită valorilor mari ale curenților prin componente în regim de scurtcircuit, măsurătorile trebuie efectuate rapid, utilizând doar lungimea maximă a liniei la cea mai mică valoare posibilă a tensiunii de alimentare!

Se măsoară tensiunea la capătul de început al liniei și curentul la ambele capete, precum și puterea activă și reactivă consumată de linie:

$U_1 = \dots\dots\dots$, $I_1 = \dots\dots\dots$, $I_2 = \dots\dots\dots$,
 $P_1 = \dots\dots\dots$, $Q_1 = \dots\dots\dots$

Ce tip de putere predomină (activă sau reactivă)?

Răspuns

.....
.....

Notă: Dacă curenții de scurtcircuit mășurați sunt exprimați pentru tensiunea reală de 380 kV nu vor fi obținute niște valori realiste. Curenții de defect la acest nivel de tensiune pot fi considerabil mai mari pentru că în acest caz este vorba de obicei despre rețele buclate, cu câteva puncte de alimentare, incluzând linii mai scurte de 360 km.

În plus, în acest experiment, în locul curentului de scurtcircuit inițial (componentă continuă), se măsoară curentul de scurtcircuit stabilizat. Dacă protecțiile principale sunt complet funcționale, componentele afectate ar trebui să fie deja deconectate.

2.3.4. Caracteristicile liniei electrice cu sarcină rezistiv - inductivă și sarcină pur inductivă

Scopul experimentului: măsurarea și interpretarea valorilor tensiunii și curentului pentru o linie electrică cu sarcină mixtă rezistiv - inductivă și sarcină pur inductivă.

Lista echipamentelor și configurații experimentale

1	sursă de putere trifazată	(No. 726 75)
1	modul comutator de putere	(No. 745 561)
1	transformator de putere trifazat	(No. 745 50)
1	modul linie electrică	(No. 745 51)
1	sarcină rezistivă	(No. 733 10)
1	sarcină inductivă	(No. 745 51)
2	ampermetre 2,5 A	
2	voltmetre 600 V	
1	watt/varmetru	
1	set de conductoare izolate	(No. 500 851)
1	set conductoare izolate (Vd, G)	(No. 500 852)
4	seturi conductoare izolate 25 cm (N)	(No. 500 614)
4	seturi conectori punte izolați (N)	(No. 500 59)
1	set conectori punte izolați (Vd / G)	(No. 500 591)

Amplasarea echipamentelor pe cadru: sunt așezate după cum se vede mai jos :

U	I	P, Q	U	I	cos φ	733 10	
72675	745561	74550	74551		73242		

Fig 2.11. Amplasarea echipamentelor pentru experimentul cu sarcină mixtă și sarcină pur-inductivă

Mod de lucru

Se realizează circuitul din fig.2.12.

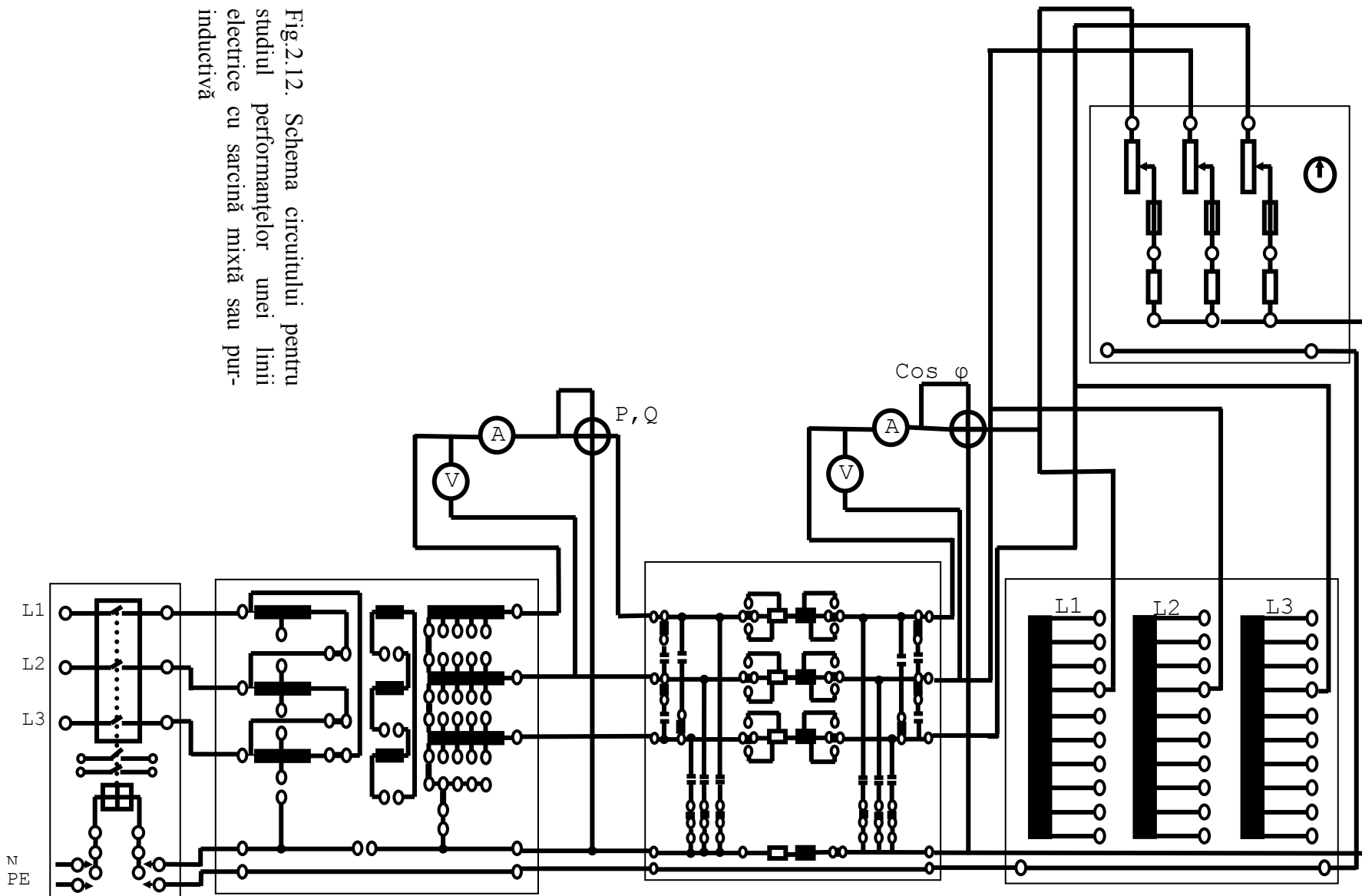


Fig.2.12. Schema circuitului pentru studiul performanțelor unei linii electrice cu sarcină mixtă sau pur-inductivă

Rețele electrice I – Indrumar de laborator

Se reglează tensiunea în secundarul transformatorului trifazat la valoarea $U_N + 5\%$.

În timpul experimentului trebuie urmărit ca sarcina inductivă să nu fie expusă unui curent foarte mare.

Se va începe cu o inductivitate a sarcinii de 1,2 H. Sarcina rezistivă este conectată în paralel. Se va reduce valoarea sarcinii rezistive începând cu 100% și continuând cu 80%, 60% și 40%.

La fiecare pas se măsoară mărimile: U_1, I_1, P_1 și Q_1 la capătul de început al liniei și $U_2, I_2, \cos \varphi_2$ la capătul de sfârșit.

Se introduc valorile măsurate în tabelul următor:

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

Se repetă măsurătorile anterioare pentru valorile 1,0 H și 0,8 H ale sarcinii inductive.

$L = 1,0$ H

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

$L = 0,8$ H

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

Ce caracteristici comune se observă pentru tensiunile măsurate în toate cazurile?

Răspuns

.....

Să se traseze o diagramă fazorială calitativă (nescalată) curent - tensiune pentru cazul sarcinii inductive cu un factor de putere de 0,8. Capacitatea de serviciu a liniei electrice poate fi neglijată.

Se scot legăturile de conectare a sarcinii rezistive și se repetă ultimele măsurători pentru sarcina inductivă cu $L = 1$ H.

$U_1 = \dots\dots\dots, I_1 = \dots\dots\dots, P_1 = \dots\dots\dots, Q_1 = \dots\dots\dots$

$U_2 = \dots\dots\dots, I_2 = \dots\dots\dots, \cos \varphi_2 = \dots\dots\dots$

De ce sarcina inductivă continuă să consume putere activă ($\cos \varphi_2$ nu este egal cu zero) ?

Răspuns

.....

2.3.5. Caracteristicile liniei electrice cu sarcină rezistiv - capacitivă și sarcină pur capacitivă

Scopul experimentului: măsurarea și interpretarea valorilor tensiunii și curentului pentru o linie electrică cu sarcină mixtă rezistiv - capacitivă și sarcină pur capacitivă.

Lista echipamentelor și configurații experimentale

1	sursă de putere trifazată	(No. 726 75)
1	modul comutator de putere	(No. 745 561)
1	transformator de putere trifazat	(No. 745 50)
1	modul linie electrică	(No. 745 51)
1	sarcină rezistivă	(No. 733 10)
1	sarcină capacitivă	(No. 733 11)
2	ampermetre 2,5 A	
2	voltmetre 600 V	
1	watt/varmetru	
1	set de conductoare izolate	(No. 500 851)
1	set conductoare izolate (Vd, G)	(No. 500 852)
4	seturi conductoare izolate 25 cm (N)	(No. 500 614)
4	seturi conectori punte izolați (N)	(No. 500 59)
1	set conectori punte izolați (Vd / G)	(No. 500 591)

Amplasarea echipamentelor pe cadru este analoagă paragrafului anterior, cu deosebirea că sarcina inductivă este înlocuită cu cea capacitivă (vezi fig.2.11).

Mod de lucru

Se realizează circuitul din fig.2.13.

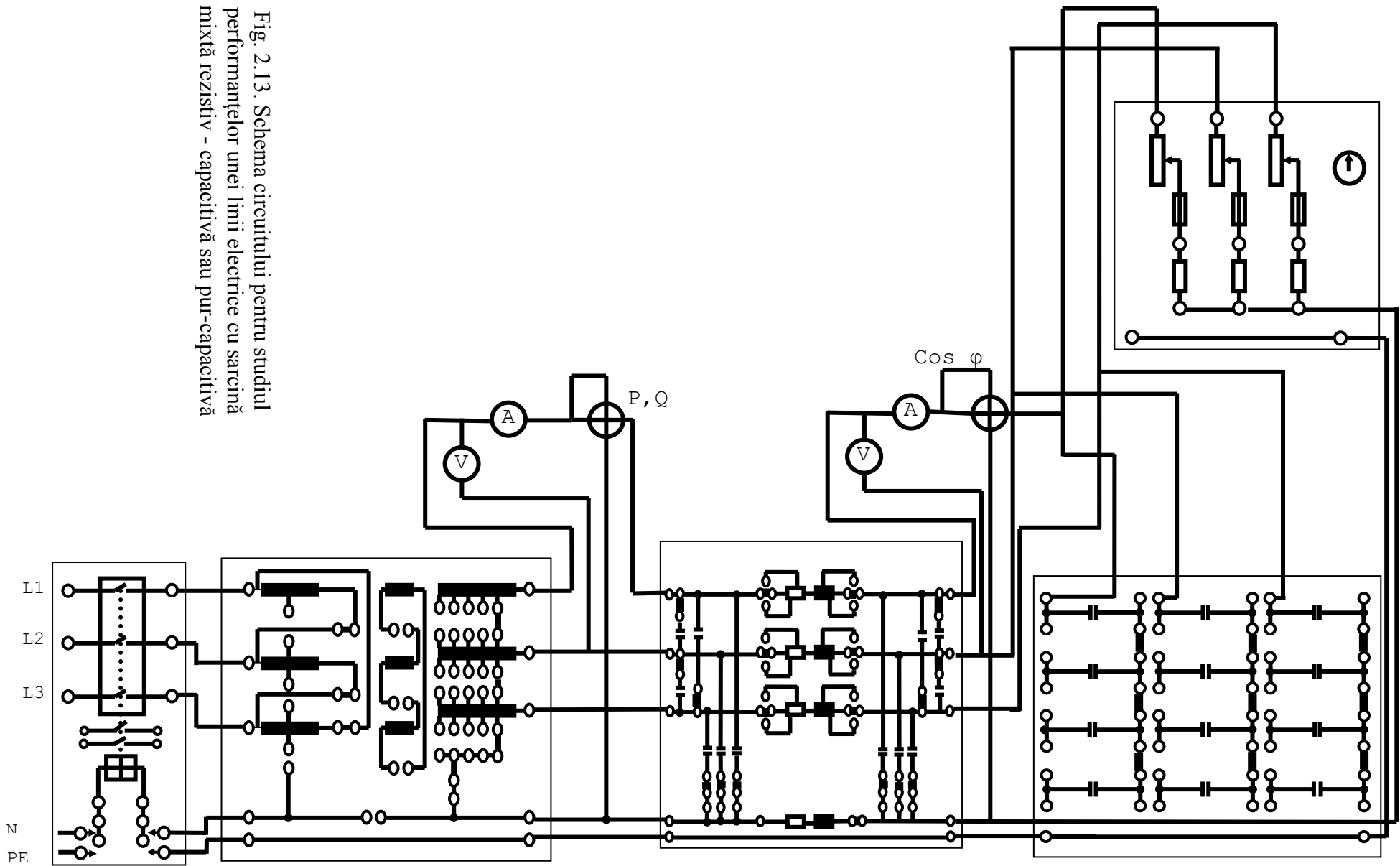


Fig. 2.13. Schema circuitului pentru studiul performanțelor unei linii electrice cu sarcină mixtă rezistiv - capacitivă sau pur-capacitivă

Se reglează tensiunea în secundarul transformatorului trifazat la valoarea $U_N - 15\%$.

Se va începe cu o capacitate a sarcinii de $2 \mu\text{F}$. Sarcina rezistivă este conectată în paralel. Se va reduce valoarea sarcinii rezistive începând cu 100% și continuând cu 80%, 60% și 40%.

La fiecare pas se măsoară mărimile: U_1 , I_1 , P_1 și Q_1 la capătul de început al liniei și U_2 , I_2 , $\cos \varphi_2$ la capătul de sfârșit.

Se introduc valorile măsurate în tabelul următor:

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

Se repetă măsurătorile anterioare pentru valorile $4 \mu\text{F}$ și $6 \mu\text{F}$ ale sarcinii capacitive.

$C = 4 \mu\text{F}$

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

$C = 6 \mu\text{F}$

R [%]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	Q_1 [Var]	U_2 [V]	I_2 [A]	$\cos \varphi_2$
100							
80							
60							
40							

Ce caracteristici comune se observă pentru tensiunile măsurate în toate cazurile?

Răspuns

.....

Să se traseze o diagramă fazorială calitativă (nescalată) curent - tensiune pentru cazul sarcinii capacitive cu un factor de putere de 0,8. Capacitatea de serviciu a liniei electrice poate fi neglijată.

Se scot legăturile de conectare a sarcinii rezistive și se repetă ultimele măsurători pentru sarcina capacitivă cu $C = 4 \mu\text{F}$.

$U_1 = \dots\dots\dots$, $I_1 = \dots\dots\dots$, $P_1 = \dots\dots\dots$, $Q_1 = \dots\dots\dots$
 $U_2 = \dots\dots\dots$, $I_2 = \dots\dots\dots$, $\cos \varphi_2 = \dots\dots\dots$

De ce sarcina capacitivă, spre deosebire de cea inductivă nu consumă putere activă (măsurabilă) ?

Răspuns

.....

Lucrarea de laborator nr. 4

Regimuri de funcționare ale transformatoarelor de putere

1. CONSIDERAȚII TEORETICE

1.1 Introducere

Un avantaj semnificativ al curentului alternativ și al sistemelor trifazate asupra sistemelor în c.c. este acela că energia electrică poate fi generată, economic, în stații de mare putere, transportată pe distanțe lungi, la o tensiune ridicată, cu pierderi foarte mici de energie și în final, să fie pusă la dispoziția consumatorului, la un nivel adecvat nevoilor acestuia. Acest lucru este posibil folosind transformatoarele, care pot fi clasificate, în funcție de modul de aplicare, după cum urmează:

- transformatoarele din stațiile de putere pentru transformarea tensiunii de generare până la valori înalte și foarte înalte din sistemele electrice;
- sistem de transformatoare de interconexiune pentru schimb de energie între rețele;
- transformatoare de distribuție pentru transformarea tensiunii scăzute la nivele medii de tensiune;
- transformatoare de distribuție locală pentru alimentarea rețelelor de j.t.. În plus față de acestea, există, de asemenea, numeroase tipuri speciale - de exemplu, în trenuri, în sisteme de redresare, în furnale și în laboratoare de înaltă tensiune.

În forma lor de bază, transformatoarele au două sau chiar trei (sau mai multe) înfășurări pe fază.

Din motive de greutate și transport, transformatoarele de mare putere sunt în mod normal împărțite în trei unități monofazate, care se află în carcase separate, numite poli.

Mai mult, există o distincție clară între transformatoarele cu înfășurări separate galvanic și acelea în care înfășurarea secundară formează o parte a înfășurării primare. Cele dintâi sunt denumite **transformatoare cu înfășurare separată**, în vreme ce celelalte sunt numite **autotransformatoare**, deoarece ele economisesc material.

În final, există și posibilitatea de proiectat înfășurările trifazate în configurații stea sau triunghi.

Astfel, pot fi realizate diferite **grupuri vector** în așa fel încât transformatoarele să facă față variațiilor cerințelor tehnice și economice, la diferite niveluri de tensiune.

Încărcările diferite în rețea conduc la diverse căderi de tensiuni de-a lungul liniilor. Pentru a asigura tensiune constantă (în limite permise), este nevoie de transformatoare

care au rapoarte variabile de transformare, numite **transformatoare cu raport de transformare variabil**. Acest lucru se realizează prin conectarea și deconectarea înfășurărilor individuale cu ajutorul comutatoarelor de ploturi.

Cu toate că pentru rețelele de m.t. și î.t., comutatoarele de ploturi pot fi acționate în sarcină, din motive economice transformatoarele locale de rețea folosesc comutatoare de ploturi acționate doar atunci când transformatorul este în gol.

Prin modificarea raportului de transformare, doar amplitudinea celei de-a doua tensiuni este afectată, dar nu și faza. Transformatoarele de reglaj precum cele descrise mai sus pot să realizeze numai un control electric în fază.

În plus față de acesta, există și alte modele, care asigură o tensiune suplimentară variabilă în termeni de magnitudine și fază pe secundar. Dacă tensiunea de susținere împreună cu tensiunea principală formează un unghi de $\pm 90^\circ$, aceasta reprezintă un control de tensiune cvadrant, în vreme ce un unghi diferit (în mod normal, $\pm 60^\circ$) este numit unghi de defazaj.

Transformatoarele în cudratură sau reglatoarele de fază permit realizarea unui flux de energie activă în rețelele interconectate, care deseori produc pierderi mai mici de transmisie decât acelea rezultate din impedanțele de linie din distribuția naturală a energiei. Astfel, secțiunile de-a lungul conductorului, existente, pot fi utilizate optim.

În acest experiment, un transformator cu trei înfășurări este supus investigației, constând din trei poli individuali cu posibilități de conectare diferite pe primar și cu tensiune variabilă secundară. Înfășurarea a treia (terțiară) este proiectată precum înfășurarea de stabilizare delta care este necesară pentru tensiuni asimetrice.

1.2. Transformatoarele monofazate

Pentru a cerceta comportamentul unui transformator la tensiuni diferite, se va examina un model monofazat sau a o fază a unui transformator trifazat.

Deoarece un transformator leagă în mod normal două nivele diferite de tensiune, este necesar ca ambele părți să fie clar marcate cu indici.

În general, această marcare se bazează pe direcția fluxului de tensiune și denotă partea care este spre alimentare cu indexul 1 (primarul). În consecință, partea care este spre consumator primește indexul 2 (secundarul).

Funcționarea unui transformator este bazată pe legea inducției, care spune că se induce o tensiune într-un miez atunci când este străbătut de un flux magnetic dependent în timp.

Dacă fluxul magnetic străbate simultan două bobine cu numărul de spire w_1 și w_2 , atunci în cazul unui transformator ideal (adică fără derivații), următoarea formulă se aplică pentru tensiunile corespunzătoare:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = t \quad (1)$$

Raportul t ce corespunde celor două înfășurări reprezintă raportul de transformare al tensiunilor (fără sarcină).

Din aceste considerente, vom presupune că fluxul este generat prin aplicarea unei tensiuni de curent alternativ sinusoidal la bobina 1 și că la bobina 2 este conectată o sarcină.

Dacă nu luăm în considerare pierderile din transformator, atunci nivelul puterii aparente pe ambele părți ar trebui să fie identic. În consecință, există următoarea relație pentru curenți:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (2)$$

Din cauza **echilibrului de putere**, următoarea relație se aplică la transformatoare:

$$\frac{U_1^2}{Z_1} = \frac{U_2^2}{Z_2} = \text{const} \quad (3)$$

și rezultă că:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} = t^2 \quad (4)$$

Astfel, impedanțele de pe o parte a transformatorului apar cu o valoare diferită decât de pe cealaltă parte; același lucru rămâne valabil și pentru rezistențele și reactanțele echivalente. Acest lucru este cunoscut sub denumirea de **transformare de rezistență**.

În următoarele investigații, este, de asemenea, necesar să „transformăm” sau să convertim rezistențele de pe o parte pe cealaltă cu ajutorul relației de mai sus, astfel încât să poată fi obținută o diagramă simplă de circuit echivalent. Acest lucru se poate realiza pas cu pas prin investigații în regim de s.c., de mers în gol și în regim normal.

În acest context are sens să utilizăm **reprezentarea complexă** a relațiilor de tensiune și de curent.

1.2.1. Randament în regim de mers în gol

În cazul lipsei de sarcină înfășurarea 1 este alimentată cu tensiune nominală; înfășurarea 2 rămâne deschisă. Curentul I_{10}

care trece prin primar determină un flux prin reactanța de magnetizare X_h .

Luând în considerare pierderile în cupru V_{Cu} (provocate de rezistența ohmică R_1 a înfășurării primare) ca de altfel și pierderile în fier V_{Fe} (provocate de fluxull magnetic din miezul de fier și reprezentate ca și curent activ de o rezistență ohmică imaginară R_{Fe}) se obține următoarea diagramă de circuit echivalent:

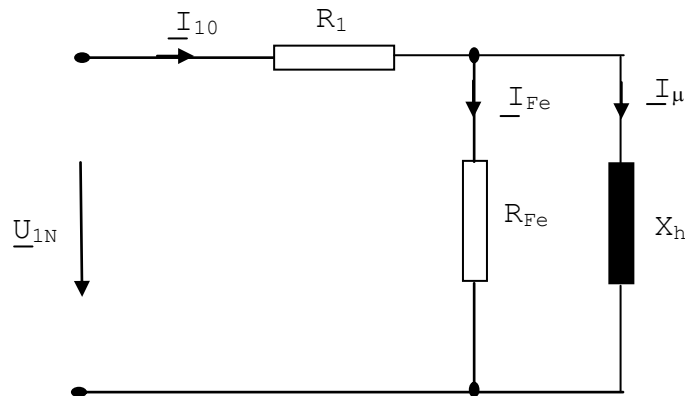


Figura 1: Circuitul echivalent al unui transformator în gol

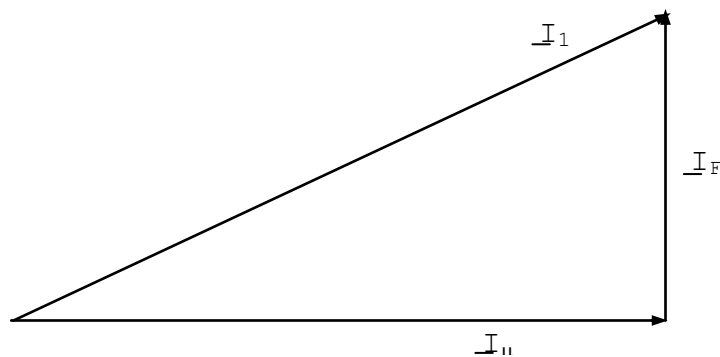


Figura 2: Curentii printr-un transformator în gol

Curentul de mers în gol și pierderile asociate oferă dovezi explicite pentru eficiența economică a unui transformator deoarece acestea determină pe o scară largă și eficiența acestuia.

Mai este vorba și de pierderi independente de curent deoarece acestea apar pentru fiecare tip și sarcină a transformatorului.

În mod frecvent, curentul de mers în gol este legat de curentul nominal al transformatorului și atunci el apare ca un **curent relativ de mers în gol**. Transformatoarele de mare putere au valori sub 1%.

Folosind experimentul la mers în gol, este posibilă determinarea directă a reactanței de magnetizare X_h a diagramei circuitului echivalent al transformatorului.

Valorile lui R_1 și ale lui R_{Fe} nu pot fi măsurate separat. Pentru a determina rezistența înfășurării primare, trebuie folosită o punte de măsurare, de exemplu (măsurarea tensiunii de curent continuu). Oricum, la transformatoarele mari relația

$R_1 \ll R_{Fe}$ se aplică întotdeauna astfel încât rezistența cuprului să fie neglijată cel puțin la mers în gol.

1.2.2. Randament la scurtcircuit

În cazul de față, transformatorul este scurtcircuitat în secundar și se aplică o tensiune mică pe primar, destul de mare pentru trecerea curentului nominal. Curentul prin reactanța de magnetizare este neglijabil, deoarece este practic micșorat la maxim datorită scurtcircuitului de pe secundar. Acum apar cu mult mai multe reactanțe de șuntare, care funcționează ca și reactanțe inductive pe circuite.

Rezultă următoarea diagramă de circuit echivalent:

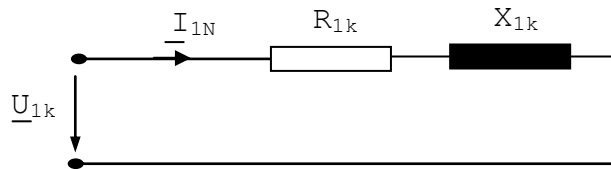


Figura 3: Diagramă de circuit echivalent a unui transformator care funcționează în scurtcircuit

Următoarele valori au fost introduse în plus în diagrama de circuit echivalent de mai sus:

$$R_{1k} = R_1 + R_2' \text{ și } X_{1k} = X_1 + X_2 \quad (5)$$

Unde U_{1k} : tensiune aplicată inițial, care duce la curentul nominal

R_2 : rezistență ohmică a secundarului

R_2' : valoarea lui R_2 raportată la primar potrivit expresiei

$$R_2' = R_2 \cdot t^2$$

$X_{1\sigma}$: reactanță de șuntare a primarului

$X_{2\sigma}$ = reactanță de șuntare a secundarului

$X_{2\sigma}'$ = valoarea lui $X_{2\sigma}$ convertită la primar în concordanță cu expresia $X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot t^2$

Înfășurarea primară și secundară sunt proiectate pentru aceeași putere și cer același spațiu de înfășurare. Astfel este adevărat că: $R_1 = R_2'$ și $X_{1\sigma} = X_{2\sigma}'$.

Cele două valori R_{1k} și X_{1k} sunt combinate în impedanța de scurtcircuit Z_{1k} :

$$Z_{1k} = \sqrt{R_{1k}^2 + X_{1k}^2} = \frac{U_{1k}}{I_{1N}} \quad (6)$$

în cazul scurtcircuitului cu curent nominal pe primar, puterea activă consumată este:

$$P_{1k} = R_{1k} \cdot I_{1N}^2 = U_{1k} \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_k \quad (7)$$

unde φ_k = unghiul de fază al curentului pentru scurtcircuit.

Un experiment asemănător poate, de asemenea, fi realizat pentru scurtcircuitul primarului și alimentat la secundar, aplicându-se următoarea formulă:

$$Z_{2k} = \sqrt{R_{2k}^2 + X_{2k}^2} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} = Z_{1k} \cdot \frac{1}{t^2} \quad (8)$$

Astfel, experimentele de scurtcircuit cu curent nominal servesc pentru a determina impedanța de scurtcircuit.

Pentru a putea să comparăm mai bine diferite situații (independent de nivelurile de tensiune), tensiunea de scurtcircuit U_{1k} este pusă în relație cu tensiunea nominală U_{1N} și astfel ea definește **tensiunea relativă de scurtcircuit**

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} = \frac{Z_{1k} \cdot I_{1k}}{U_{1N}} \quad (9)$$

Această valoare constituie unul dintre cei mai importanți parametri de operare ai transformatorului și este specificată în procente. Este o măsură pentru căderea de tensiune în secundar dintre cele două cazuri limită, fără sarcină și cu scurtcircuit.

În consecință se aplică următoarele:

$$\text{tensiune activă relativă } u_r = u_k \cdot \cos \varphi_k = \frac{R_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}} \quad \text{și}$$

$$\text{tensiune de șuntare relativă } u_x = u_k \cdot \sin \varphi_k = \frac{X_{1k} \cdot I_{1N}}{U_{1N}}$$

Relația care se poate aplica între cele două valori de mai sus este:

$$u_k^2 = u_r^2 + u_x^2 \quad (10)$$

Pe măsură ce puterea nominală aparentă a unui transformator crește, rezistența sa echivalentă (și astfel, pierderea sa rezistivă) scade în comparație cu reactanța sa. Pentru niveluri ale puterii de peste 2 MVA, rezistența echivalentă poate fi, în general, total neglijată, și atunci este adevărat că:

$$u_k \approx u_x, u_r \approx 0 \quad (11)$$

Transformatoarele folosite în sistemele electroenergetice prezintă tensiuni relative de scurtcircuit cuprinse între 3 și 18%.

Nivelurile de putere se situează pe o scară cu valori cuprinse între 200 kVA (transformatoare de distribuție) și 1000 MVA (transformatoare de interconexiune) sau 1200 MVA (transformatoare de utilaje).

Cu toate că o valoare ridicată a lui u_k produce o cădere mare de tensiune în timpul operării normale a unui sistem, aceasta totuși limitează magnitudinea curentului de scurtcircuit, în caz că există vreo defecțiune.

1.2.3 Randament la funcționarea în sarcină

În timpul „funcționării în sarcină” ne vom referi la o condiție care intră în sfera sarcinilor standard de transformatoare, adică un curent, care este considerabil mai mare decât curentul

de mers în gol, dar semnificativ mai mic decât curentul de scurtcircuit.

Diagrama de circuit echivalent pentru această condiție poate fi pusă laolaltă ca o combinație a reprezentărilor de mai sus derivate pentru regim fără sarcină și scurtcircuit.

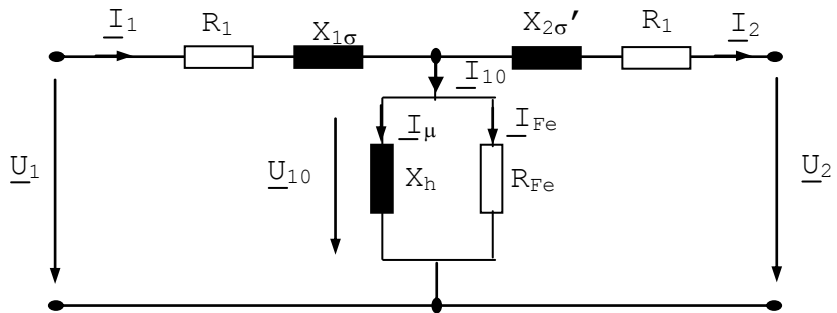


Figura 4 Circuit echivalent trafo în sarcină

Valorile din circuitul echivalent:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + \underline{I}'_2 \cdot (R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + jX_{1\sigma}) \quad \text{și} \quad \underline{I}_1 = \underline{I}'_2 + \underline{I}_{10} = \underline{I}'_2 + \underline{I}_\mu + \underline{I}_{Fe} \quad (12)$$

Rezultă următoarea diagramă fazorială (aici, în cazul unei sarcini mixte rezistiv-inductive, fiind cazul cel mai frecvent):

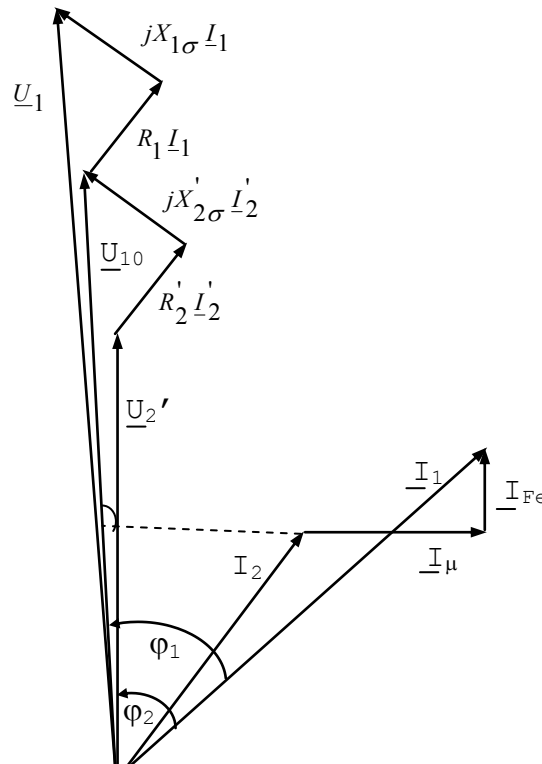


Figura 5: Diagramă fazorială completă a transformatorului care operează sub o sarcină mixtă rezistiv-inductivă

Pentru construcția diagramei fazoriale:

Dacă adăugăm lui U_2' fazorul căderii de tensiune la R_2' și $X_{2\sigma}'$, atunci obținem tensiunea U_{10} .

U_{10} determină direcția curenților I_{Fe} și I_μ . Acești curenți adăugați lui I_2' produc curentul primar I_1 . Căderile de tensiune de la R_1 și $X_{1\sigma}$ pot fi adăugate lui U_{10} și obținem U_1 .

Pierderile care apar la R_1 și R_2' în timpul funcționării în sarcină depind de amplitudinea curentului de sarcină. În consecință, ele sunt considerate pierderi dependente de sarcină.

Dacă diagrama fazorială este reprezentată la scară, atunci putem deduce cu ușurință că, sub sarcină, curentul I_{10} este foarte mic în comparație cu curentul I_2' al sarcinii. Așadar, putem continua să lucrăm cu diagrama simplificată a circuitului echivalent (figura 3).

Pentru o sarcină conectată la secundarul transformatorului, transformatorul apare ca sursă de tensiune, cu tensiunea fără sarcină $U_{20} = U_1'$ și rezistență internă $Z_{2k} = Z_{1k}'$ (cele două valori au fost raportate aici de la primar la secundar).

În cele ce urmează, vom cerceta cum funcționează transformatorul în cele trei cazuri caracteristice ale unor sarcini rezistive, inductive și capacitive. În acest scop au fost reproduse diagramele fazoriale corespunzătoare (forma simplificată):

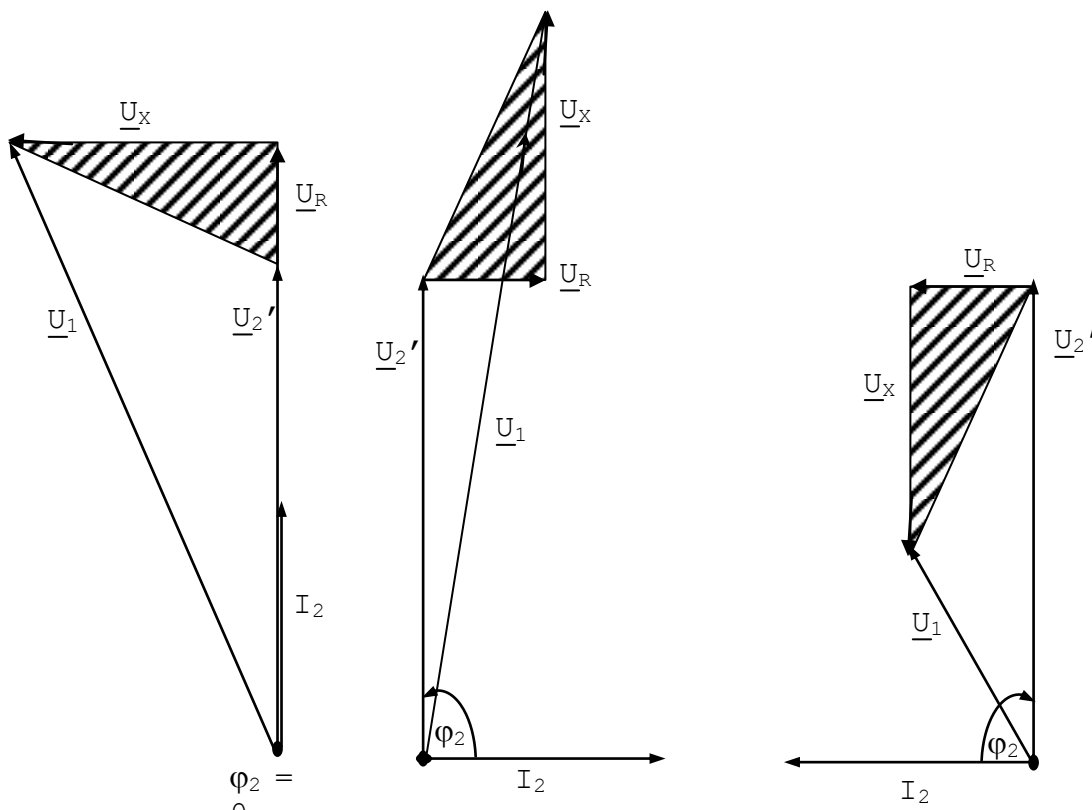


Figura 6 Diagrama fazorială simplificată pentru funcționarea transformatorului cu sarcini rezistive, inductive și capacitive

Suprafețele hașurate indicate în cele trei diagrame reprezintă triunghiul lui Kapp.

Putem observa din diagramele cu fazor pentru sarcini rezistive și inductive că, atunci când tensiunea de alimentare U_1 este menținută constantă (și astfel U_{20} este și ea menținută constantă) tensiunea terminală U_2 scade cu creșterea curentului.

Relația dintre curentul de sarcină și schimbarea de tensiune opusă cazului fără sarcină poate fi obținută din următoarea figură:

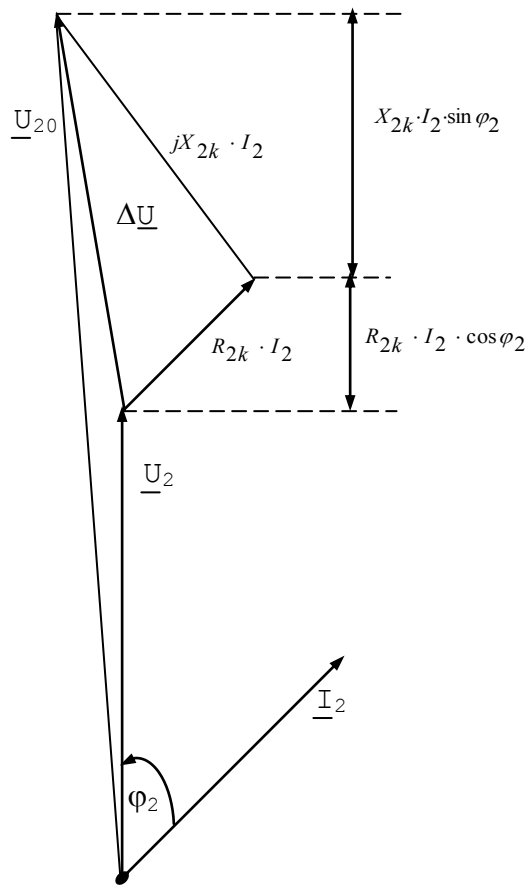


Figura 7. Schimbarea de tensiune atunci când transformatorul lucrează sub sarcină

Rezultă :

$$\underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + \underline{U} = \underline{U}_2 + \underline{Z}_{2k} \cdot \underline{I}_2 \quad (13)$$

La transformatoarele mari (cel puțin pentru sarcini în apropierea sarcinii nominale) tensiunile U_{20} și U_2 sunt mari în comparație cu diferența ΔU .

Astfel, pentru ΔU avem:

$$\Delta \underline{U} = R_{2k} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_{2k} \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (14)$$

sau

$$\Delta \underline{U} \approx U_{2N} \cdot (I_2 / I_{2N}) \cdot (u_r \cdot \cos \varphi_2 + u_x \cdot \sin \varphi_2) \quad (15)$$

Adunarea geometrică a celor doi fazori este astfel exprimată într-o formă simplificată folosind o operație de adunare algebrică.

1.2.4. Randamentul transformatorului

Atunci când vorbim despre randamentul mașinilor electrice vorbim despre raportul putere activă rezultată/putere activă consumată. Diferența dintre aceste două niveluri ale puterii este adusă în discuție deoarece pierderile de putere apar continuu la o

mașină. Transformatoarele excelează datorită randamentului lor ridicat, care poate depăși 98%. Dar, chiar la aceste niveluri excelente, pierderile apărute în unitățile mari sunt considerabile și cer obligatoriu răcirea.

Atunci când se determină un nivel al randamentului ce se apropie de 100%, metoda specifică de formare a raportului nivelurilor celor două puteri nu este în general suficientă deoarece chiar măsurările de putere sunt viciate până la o anumită măsură. Rezultate mai bune se obțin prin aplicarea unei metode cu pierdere unică, unde (pentru transformator) pierderile în fier și cupru sunt determinate prin măsurare la scurtcircuit sau fără sarcină și de aici se determină pierderea totală V_{tot} . Pentru cazul de operare aflat în cercetare obținem randamentul η după cum urmează:

$$\eta = 1 - V_{tot}/P_1 \text{ sau } 1 - V_{tot}/(P_2 + V_{tot}) \quad (16)$$

(P_1 și P_2 reprezintă nivelurile de putere activă măsurate pe primar sau secundar).

Pentru a determina randamentul în mod corect trebuie menținute tensiunea nominală, frecvența nominală și temperatura de operare.

1.3 Transformatoarele trifazate

Un transformator trifazat poate echivalat cu trei transformatoare monofazate. Acest lucru este posibil deoarece modul în care lucrează aceste două tipuri de transformatoare nu este fundamental diferit.

Bineînțeles, spre deosebire de modelul monofat, există numeroase posibilități de conectare pentru înfășurarea primară și secundară în transformatorul trifazat prin care este asigurată o soluție optimă pentru aplicația respectivă.

1.3.1. Simboluri de conexiuni și grupuri de vectori

În conexiunea stea, tensiunea aplicată unei înfășurări este egală cu $U_N/\sqrt{3}$; în conexiunea delta tensiunea nominală este aplicată unei înfășurări.

Astfel, conexiunea stea necesită mai puțină izolație; în schimb ea are nevoie, comparativ cu conexiunea delta de o secțiune transversală mai mare de cupru datorită curenților mai mari. Pentru acest motiv, transformatoarele din stațiile de putere sunt conectate în mod normal în delta pe partea cu tensiune mică și cu conexiune stea pe partea cu tensiune mare. În plus - dacă este necesar - poate fi conectat la punctul stea un miez de reținere.

Dacă urmează a fi cuplate două sisteme de tensiune înaltă, în mod normal este selectată o conexiune stea-stea.

Transformatoarele în conexiune delta-delta sunt rar folosite în practica actuală.

O posibilitate de circuit adițional, care este folosită cu precădere pe partea cu tensiune joasă, este configurația stea-
stea, în care pot fi conectate sarcini monofazate până la
curentul nominal al transformatorului.

Pentru a desemna simbolurile de conectare sunt folosite următoarele litere: D sau d pentru conexiunea delta; Y sau y pentru conexiunea stea și z pentru conexiunea stea-
stea (litera mare se referă la primar; litera mică la secundar). Acestea sunt urmate de un număr distinct care descrie întârzierea de fază a părții de j.t. - în termenii tensiunii conductorului exterior - comparativ cu partea de î.t. în multipli de 30° (comparabil cu sensul de rotație a acelor de ceasornic).

Dacă este accesibil un punct neutru într-o bobină conectată în stea sau în stea-
stea, acesta este specificat în plus cu litera N sau n (depinzând de partea transformatorului).

Grupurile de vectori cele mai obișnuite pentru transformatoare folosite în ingineria de forță sunt Yy0, Dy5, Yd5 și Yz5.

Chiar și fazele individuale ale bobinelor sunt diferențiate prin literele U, V și W. Un număr în fața literei denotă numărul înfășurării (1 = înfășurarea primară, 2 = înfășurarea secundară, 3 = înfășurarea terțiară). Un număr adițional așezat după litera specifică fie începutul înfășurării (1) fie sfârșitul înfășurării (2).

Pentru cazurile în care puterea transmisă de către un transformator nu mai este suficientă după creșterile de sarcină dintr-o rețea, o a doua unitate este deseori conectată în paralel cu prima. Aici trebuie să reținem că ambele transformatoare nu numai că trebuie să prezinte un raport identic de transformare, dar de asemenea aceeași deplasare de fază (adică număr de identificare al grupului vector). În plus, valorile lui u_k nu ar trebui să difere prea mult, altfel distribuția curentului nu se mai poate realiza potrivit celor două niveluri de putere nominală.

Transformatorul folosit în experimentul de față poate fi conectat în raport cu cele două tensiuni principale de tipul Yy0 și Dy5. În primul caz, steaua sau punctul neutru sunt accesibile pe ambele părți, iar în al doilea caz numai pe secundar.

1.3.2. Transformatoare cu trei înfășurări

Transformatoarele trifazate deseori au o a treia înfășurare, denumită bobină terțiară.

Dacă se conectează înfășurările individuale de fază într-o configurație delta, un curent stabilizator va trece prin cea de-a treia înfășurare atunci când transformatorul este încărcat asimetric. Acesta asigură apoi un flux de echilibru în toate piesele polare ale transformatorului și împiedică orice dispersie magnetică nedorită prin lagăr. În acest caz înfășurarea terțiară este folosită ca înfășurare **de stabilizare**.

Oricum, această înfășurare poate, de asemenea, servi la transmiterea puterii într-o rețea cu alt nivel de tensiune. Această aplicație este deseori folosită, de exemplu, pentru a acoperi propriile cerințe de putere ale stațiilor de putere.

În final, o posibilitate adițională de a exploata înfășurarea terțiară constă în conectarea unui miez de curent de încărcare în vederea compensării puterii reactive de bază din liniile sau cablurile aeriene lungi care operează fără sarcină. Aici interconectarea celei de-a treia înfășurări reprezintă o operație mai puțin scumpă decât conectarea miezului de curent de încărcare direct din linia de tensiune înaltă corespunzătoare.

În cazul transformatorului examinat aici există și o a treia înfășurare disponibilă, care este utilizată ca înfășurare de stabilizare în experimente cu sarcini asimetrice.

1.3.3. Transformatoare cu raport de transformare variabil

Transformatoarele care lucrează în gama tensiunilor foarte înalte prezintă valori u_k foarte mari. Aici scăderea tensiunii secundară (cu tensiune primară constantă) produsă de sarcina mare se face observată în mod deranjant. Acest efect este contracarat de asigurarea unui raport de transformare variabil al tensiunilor. Acest lucru este implementat prin folosirea derivațiilor înfășurării și a unui întrerupător în trepte, cu ajutorul cărora raportul de transformare poate fi schimbat sub sarcină.

În mod normal, regulaorul în trepte este conectat la partea cu tensiune înaltă, unde este conectat capătului înfășurării pe partea cu punctul-stea. Acest lucru se face exclusiv din motive de construcție; această măsură nu are nici un impact asupra funcționării întrerupătorului în trepte.

În transformatoarele cu tensiune foarte mari, aria de control se ridică până la +/-22% din tensiunea nominală și aceasta este realizată în maxim 27 de trepte. Acesta este denumit transformator cu reglare în fază.

O alternativă mult mai costisitoare este aceea unde variația raportului de transformare este realizată pentru cele două tensiuni atât în termeni ai magnitudinii cât și ca relație de fază. Aceasta utilizează „orientarea indirectă a tensiunii”, care este implementată tehnic folosind transformatoare adiționale. Opus transformatoarelor cu reglare în fază, aici raportul de transformare poate fi schimbat în termeni de magnitudine și fază, care poate fi folosit, de exemplu, pentru a minimaliza pierderile de transmisie pe linii care au diferite niveluri de tensiune. Acesta este cunoscut ca un transformator cu reglare în cuadratură sau cu reglare de unghi de fază, depinzând de relația de fază a tensiunii adiționale.

Transformatorul folosit aici permite reglarea în fază, și aceasta în cinci trepte pe o scară cuprinsă de la $U_N+5\%$ până la $U_N -15\%$. Aici derivațiile înfășurării sunt localizate pe secundar.

Posibilitatea orientării tensiunii este deseori folosită, de exemplu, atunci când se realizează cercetări pe linii de transmisie de 380kV (L1).

1.3.4. Autotransformatoare

În final am dori să introducem o altă variantă de circuit pentru transformatoare, care datorită costului și greutateii lor scăzute, este frecvent folosită pentru cuplarea a două sisteme de tensiune înaltă.

Avem de-a face aici cu conectarea economică (autotransformatorul), care este folosită pentru a configura transformatorul cu scopul de a forma un divizor inductiv de tensiune. Înfășurările cu tensiune mai mare sau mai mică au aici o parte comună, care este numită înfășurare paralelă. Înfășurarea paralelă constituie înfășurarea de tensiune mai mică. O parte diferită a înfășurării este cunoscută ca înfășurare de serie. Ambele înfășurări sunt aranjate în serie și astfel formează împreună înfășurarea de înaltă tensiune. Conexiunea corespunde astfel circuitului unui divizor de tensiune ohmic. În opoziție cu acest lucru, tensiunile pot fi atât ridicate cât și joase.

Transmisia puterii între două niveluri de sisteme interconectate este realizată atât magnetic cât și galvanic. Ca atare, sunt utilizați doi termeni de tehnologie de putere.

Puterea totală a unui autotransformator este denumită **randament de produs**. Acea parte a puterii pentru transmiterea căreia este responsabil doar câmpul magnetic este denumită **randament echivalent** (într-un transformator cu înfășurare separată randamentul de produs și randamentul echivalent sunt identice).

Mărimea actuală a unui transformator este determinată de randamentul său echivalent. Astfel un autotransformator cu randament de produs identic poate fi proiectat mai mic decât un transformator corespunzător cu înfășurare separată. Materialul (și implicit costurile) economisit este mai mare, mai puțin atunci când tensiunile variază una față de cealaltă pe cele două părți ale transformatorului. Autotransformatoarele pot fi folosite numai în rețele cu punct stea de împământare; în eventualitatea unei avarii, curenții mai mari decât cei din transformatoarele cu înfășurare separată trec și ei. Acest lucru restricționează utilizarea acestui tip de transformator.

1.3.5. Încărcarea asimetrică a transformatoarelor

În mod normal doar sarcinile simetrice apar în sisteme care lucrează la niveluri de tensiuni foarte mari, mari și medii. În consecință, predomină aceleași relații magnetice ca și în modelele monofazate. Oricum, în sistemele cu tensiune joasă pot surveni asimetrii severe datorate posibilității conectării acolo a consumatorilor monofazați. Vom examina acum cazul extrem al unei sarcini monofazate, a cărei conectare la partea de j.t. a

unui transformator de distribuție cu punct stea accesibil este foarte plauzibilă.

Considerațiile sunt bazate pe o înfășurare care este conectată odată în configurație delta și altă dată în configurație stea punct pe primar după cum se arată în figura de mai jos:

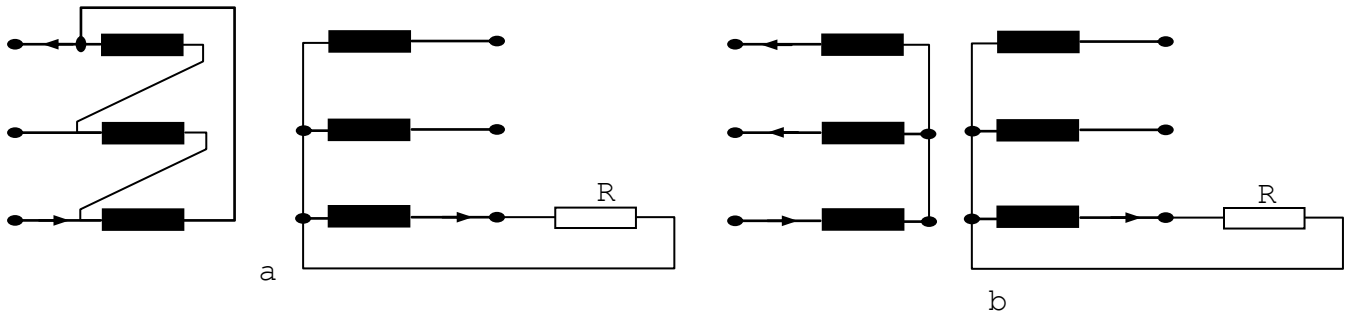


Figura 8. Sarcină monofazată a unui transformator cu :
 a) conexiune delta pe primar b) conexiune stea pe primar

Atunci când primarul este în conexiune delta și există o sarcină monofazată, echilibrul magnetic se stabilește pe ambele părți, deoarece curentul din înfășurarea încărcată pe primar poate să treacă înainte și înapoi prin doi conductori externi. Celelalte înfășurări de fază rămân fără curent. Circuitul poate fi încărcat la curentul nominal.

Acesta nu este cazul pentru conexiunea stea de pe primar. Aici apar fluxuri care nu pot să fie neutralizate pe secundar. Din aceasta rezultă fluxuri magnetice de derivație, care trebuie să se unească prin lagărul transformatorului și prin aer.

Acest lucru aduce cu sine căderi severe de tensiune și asimetrii pe secundar. În consecință transformatoarele din această configurație de circuit pot fi operate numai monofazat cu aproximativ 105% din puterea nominală. Un posibil remediu ar fi conectarea unui conductor neutru pe primar. Acest lucru va duce la lipsa de curent din celelalte înfășurări primare și astfel la restabilirea unei forțe de echilibru magneto-motrice. Oricum, datorită considerentelor economice, această măsură nu este considerată în practică deoarece ea ar necesita un sistem cu patru conductori pe primarul (în general în rețeaua de medie tensiune).

O altă posibilitate pentru alimentarea sarcinilor monofazate într-o conexiune stea-stea ar putea fi transformatorul cu trei înfășurări mai sus menționat cu o înfășurare de stabilizare conectată în configurație delta.

Gradul de asimetrie descoperit atunci când fazele individuale se află sub sarcini diferite poate fi calculat, dacă este cunoscută **impedanța zero** a transformatorului.

Metoda pe care se bazează calculul este cunoscută ca „metoda componentelor simetrice”.

Ideea de bază constă în descompunerea unui sistem trifazat asimetric în trei sisteme individuale simetrice, pe care pot fi

aplicate calculele standard. Sistemele folosite se numesc sistem de secvență pozitivă, sistem de secvență negativă și sistem de secvență zero.

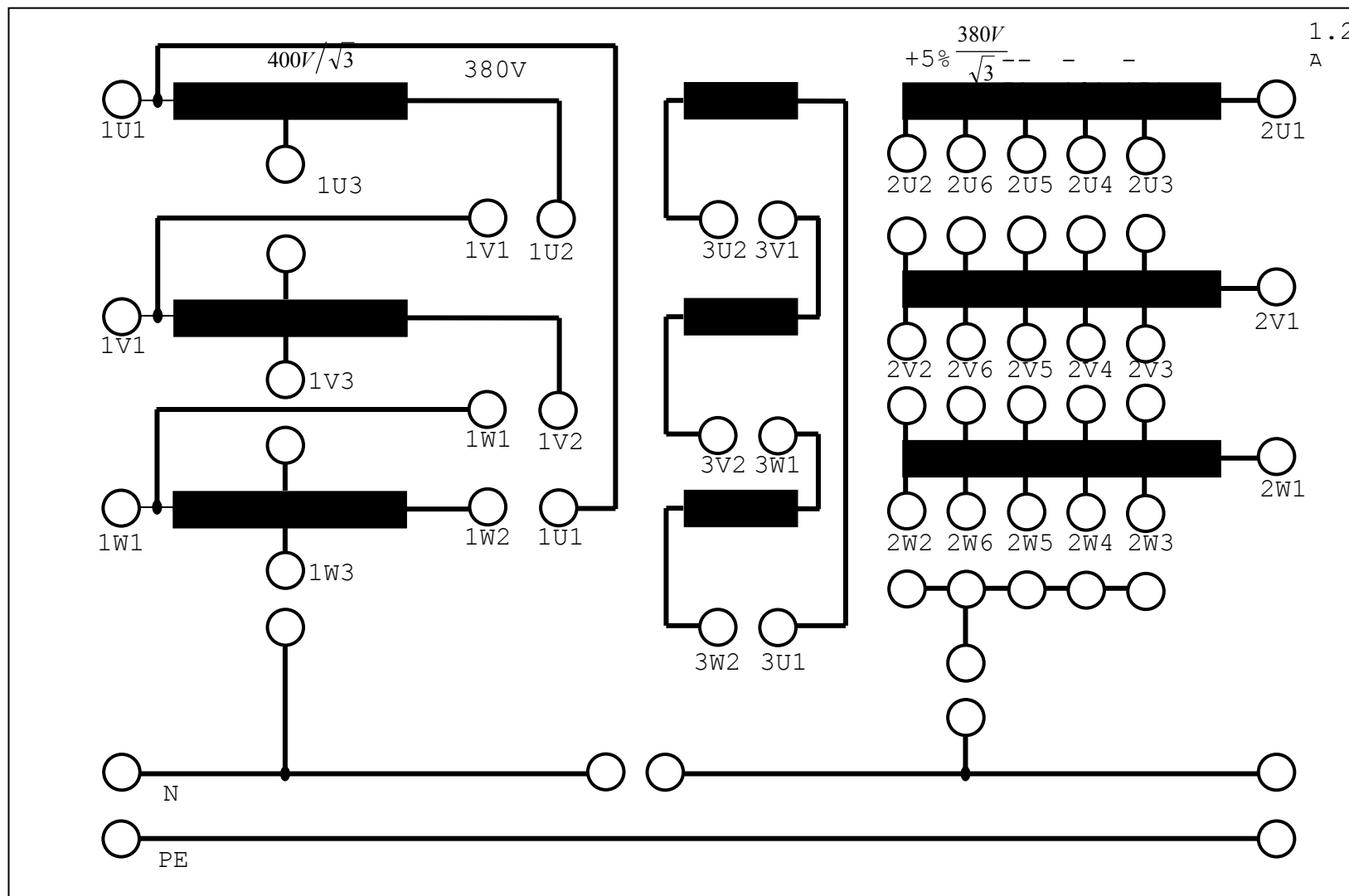
La motoare și generatoare (componente cu părți mobile) impedanțele de fază pozitivă și fază negativă variază în magnitudine; la transformatoare și linii de transmisie (componente statice) ele sunt identice. Impedanța zero este diferită de impedanța pozitivă și negativă și este determinată prin măsurare, în vreme ce aceeași tensiune de curent alternativ este aplicată la toate trei înfășurări de fază ale componentelor, și apoi se măsoară curentul.

La transformatoare, impedanța zero este puternic dependentă de tipul conexiunii. Atunci când este conectată în conexiune delta stea ea are același ordin al magnitudinii precum impedanța de fază pozitivă; în conexiunea stea-stea aceasta este cu mult mai mare. Pe de altă parte, această valoare ridicată este redusă prin utilizarea unei înfășurări de stabilizare delta.

2. MOD DE LUCRU

2.1. Descrierea componentelor experimentului și instrumente de măsurare

Transformatorul trifazic (cat. nr. 74550):



Transformatorul trifazat constă din trei transformatoare monofazate; înfășurările primare și secundare sunt izolate galvanic. Atunci când se dorește, poate fi adăugată la circuit o înfășurare de compensație delta.

Bornele primare sunt marcate 1U1-1U3, 1V1-1V3, 1W1-1W3; conexiunea este posibilă fie în configurația de circuit stea, fie în configurație delta la o tensiune de 230 sau 400V. Bornele secundare au denumirile 2U1-2U6, 2V1-2V6, 2W1-2W6 și ele sunt asigurate pentru o conexiune stea cu punct neutru accesibil. Folosind derivații diferite, pot fi obținute în plus față de tensiunea stabilită $U_N = 380V$ următoarele tensiuni: $U_N + 5\%$, $U_N - 5\%$, $U_N - 10\%$, $U_N - 15\%$, la un curent maxim de 1,2A în fiecare caz. Este posibilă o suprasarcină pe termen scurt (de exemplu în timpul experimentelor cu scurtcircuite). Înfășurarea terțiară este conectată la bornele 3U1-3U2, 3V1-3V2 și 3W1-3W2. Aceasta este proiectată pentru un curent maxim de 0,4A.

2.2 Măsură de siguranță, scară model

Din cauza greutateii sale, transformatorul trifazic și sarcinile (R, L, sau C) trebuie să fie plasate întotdeauna la nivelul de jos al panoului cadru. Datorită căldurii produse de rezistoare, asigurați-vă că instrumentele de măsurare nu sunt așezate direct deasupra transformatorului sau a unui consumator. Părțile de metal care nu au tensiune în operarea normală (de exemplu, lagăre) urmează a fi conectate la conductorul de bază PE. Conductorul de bază este asigurat numai pentru acest scop și el nu are voie să fie conectat cu conductorul neutru N al circuitului!

Când curentul este întrerupt pot să apară tensiuni ridicate de inducție la bobine. Înainte de a schimba datele experimentului (de exemplu, selectarea unei arii de măsurare diferite pe un aparat), trebuie oprit curentul folosind butonul întrerupătorului.

În rețele de alimentare reale, tensiunile de funcționare variază de la 10 la 400 kV ; curenții care trec sunt cuprinși între 100 A și 2 kA. Puterea rezultată este astfel de ordinul a MW (megawatt, 10^6W) până la GW (gigawatt, 10^9W).

În aceste experimente toate tensiunile și curenții folosiți sunt pe o scară de 1:1000; valorile puterii rezultate ca produși ai acestor două valori sunt pe o scară de 1:1000000.

Se aplică următorii echivalenți:

Rețea reală:	Model în experiment:
1 kV	1 V
1 kA	1 A
1MW	1W
1MVA	1VA

Pentru a putea converti toate valorile tensiunilor și curenților măsurate în cadrul experimentelor ce au loc la nivelul de 380 kV, este nevoie de o multiplicare cu factorul 1000. în cazul valorilor de măsurare a puterii este nevoie de factorul 10^6 .

Observație preliminară asupra experimentelor

Transformatorul trifazat folosit aici constă din trei unități monofazate. În consecință, în fiecare experiment parțial, măsurările sunt mai întâi realizate pe o fază, pentru a le compara ulterior cu circuitul trifazat. Transformatorul experiment poate fi conectat în conexiune stea sau delta pe primar și, în general, în conexiune stea pe secundar. Tipul de conexiune folosit nu joacă nici un rol cu condiția ca numai sarcinile simetrice să fie conectate. Pentru a menține o imagine de ansamblu a experimentelor, vom folosi așadar numai conexiune stea-stea pentru sarcini simetrice. Conexiunea primară delta este folosită dacă sunt realizate experimente cu sarcini asimetrice (sarcină monofazată); de exemplu, pentru a examina efectul înfășurării de stabilizare delta.

Lucrarea de laborator nr. 5

2.3 Funcționarea în regim de mers în gol

Obiectivul experimentului:

Determinarea raportului de transformare a tensiunii unui transformator ce lucrează fără sarcină ca de altfel și măsurarea puterii consumate active și reactive, determinarea valorilor de circuit echivalent bazate pe aceste măsurări.

Lista echipamentului și montarea experimentului:

- 1 Unitate de alimentare trifazată (Cat. Nr. 72675)
- 1 Transformator trifazic (Cat. Nr. 74550)
- 1 voltmetru 100V / 400V; 1 voltmetru 600V; 1 Ampermetru 1A
- 1 Aparat de măsurare a puterii

U	I	P, Q	D	
72675	74550			

Figura 9. Aranjamentul echipamentului pentru experimente în gol

Mod de lucru

Măsurările sunt prima dată făcute pe o fază a transformatorului; investigații ulterioare se realizează pe circuitul trifazat. Mai întâi, conectați componentele ca în figura 10:

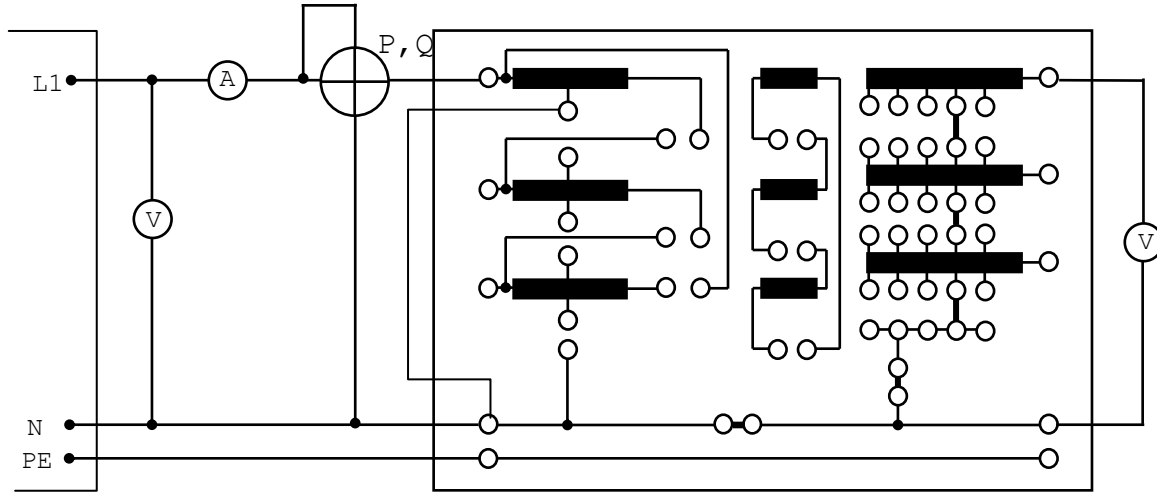


Figura 10: Circuit pentru studiul randamentului unui transformator în gol (conexiune monofazată)

Potriviviți sursa de tensiune pentru tensiune variabilă trifazică la o valoare de 220V și păstrați-o constantă pe durata experimentului.

Folosind prize punte, selectați următoarele valori de tensiune pe secundarul transformatorului: $U_N + 5\%$, U_N , $U_N - 5\%$, $U_N - 10\%$, $U_N - 15\%$.

Măsurăți tensiunile U_2 fără sarcină pe secundar și determinați raportul de transformare adecvat:

	$U_N + 5\%$	U_N	$U_N - 5\%$	$U_N - 10\%$	$U_N - 15\%$
U_1 [V]					
U_2 [V]					
$t = U_1/U_2$					

Notă: Raportul de transformare specificat pe panoul frontal al transformatorului se aplică pentru o sarcină cu un curent de 1,2A pe secundar și așadar nu este în acord cu valorile măsurate în regim fără sarcină. Valoarea calculată a lui t reflectă valoarea aproximativă a raportului de transformare w_1/w_2 .

Fără a schimba nici una dintre conexiunile de pe primar, folosiți voltmetrul secundarului pentru a determina ulterior tensiunea la bobina de pe partea terțiară (terminalele 3U1 - 3U2):

$$U_3 = \frac{\quad}{\quad} V$$

Treceți la măsurarea curentului fără sarcină și a puterii active consumate de către transformator.

Îndepărtați conexiunea la voltmetru de pe secundar pentru a nu distorsiona rezultatele măsurării. De vreme ce măsurarea

tensiunii și a curentului de pe primar are loc în fața aparatului de măsurat puterea, nu există nici un efect aici. Aparatul de măsurat puterea activă demonstrează un consum intrinsec foarte scăzut datorită circuitului său electronic, și astfel are doar un efect cu totul ne semnificativ asupra valorilor măsurate ale tensiunii și curentului de pe bobina primară.

$$U_1 = \text{_____} \text{ V, } I_{10} = \text{_____} \text{ A, } P_{10} = \text{_____} \text{ W}$$

Datorită curentului scăzut care apare în transformatoarele în gol, aproape că nu apar pierderi în cupru la bobină. Astfel, puterea activă consumată servește aproape exclusiv pentru a acoperi pierderile în fier.

Determinați $\cos\varphi_0$ pe primar potrivit expresiei

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}} \tag{17}$$

ca de altfel și componenta activă și reactivă a curentului de mers în gol, potrivit ecuațiilor:

$$I_{Fe} = I_{10} \cdot \cos\varphi_0, \quad I_{\mu} = I_{10} \cdot \sin\varphi_0 \tag{18}$$

Pot fi calculate rezistența în fier și reactanța de magnetizare fictive folosind următoarea ecuație:

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}}, \quad X_h = \frac{U_1}{I_{\mu}} \tag{19}$$

$$\cos\varphi_0 = \text{_____}$$

$$I_{Fe} = \text{_____} \text{ A}$$

$$I_{\mu} = \text{_____} \text{ A}$$

$$R_{Fe} = \text{_____} \Omega$$

$$X_h = \text{_____} \Omega$$

Modificați circuitul conform figurii 11, astfel încât alimentarea cu putere să apară pe secundar (la diferite ramificații) și repetați măsurările tensiunii în regim de mers în gol:

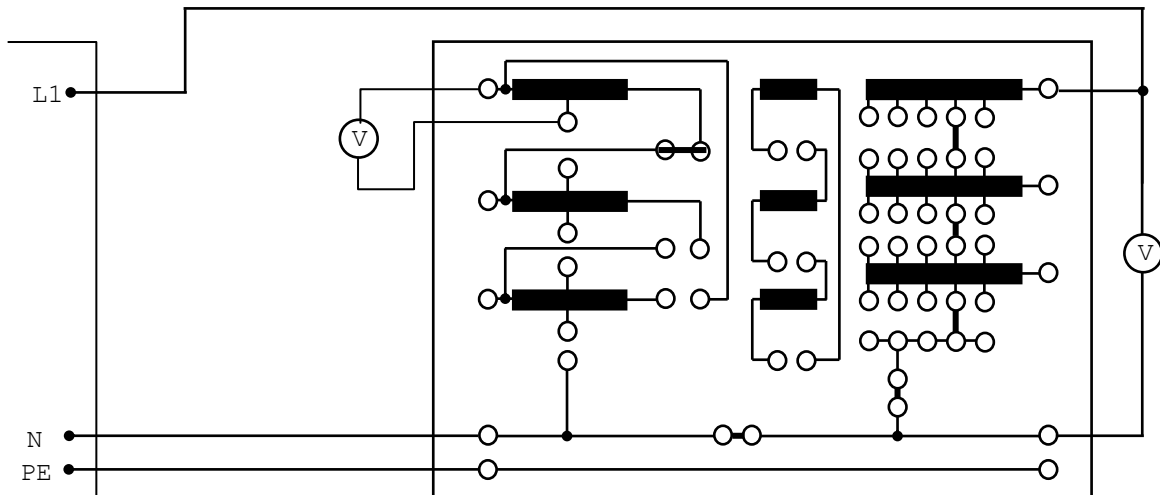


Figura 11: Măsurarea raportului de transformare la alimentarea în secundar

	$U_{N+5\%}$	U_N	$U_{N-5\%}$	$U_{N-10\%}$	$U_{N-15\%}$
U_2 [V]					
U_1 [V]					
$t' = U_2/U_1$					

Ce concluzii pot fi trase din valorile raportului de transformare?

Rezultat:

În următorul experiment trebuie reprodusă versiunea trifazată a transformatorului echivalent cu circuitul monofazat. În cazul acesta este folosită numai partea primară pentru alimentare iar operația are loc la o valoare de U_N pe secundar cu derivația corespunzătoare a înfășurării.

Efectuați circuitul ca în figura 12 și măsurați cele două tensiuni U_1 și U_2 , și (după deconectarea voltmetrului de pe secundar!) măsurați curentul I_{10} fără sarcină și puterea activă consumată P_{10} :

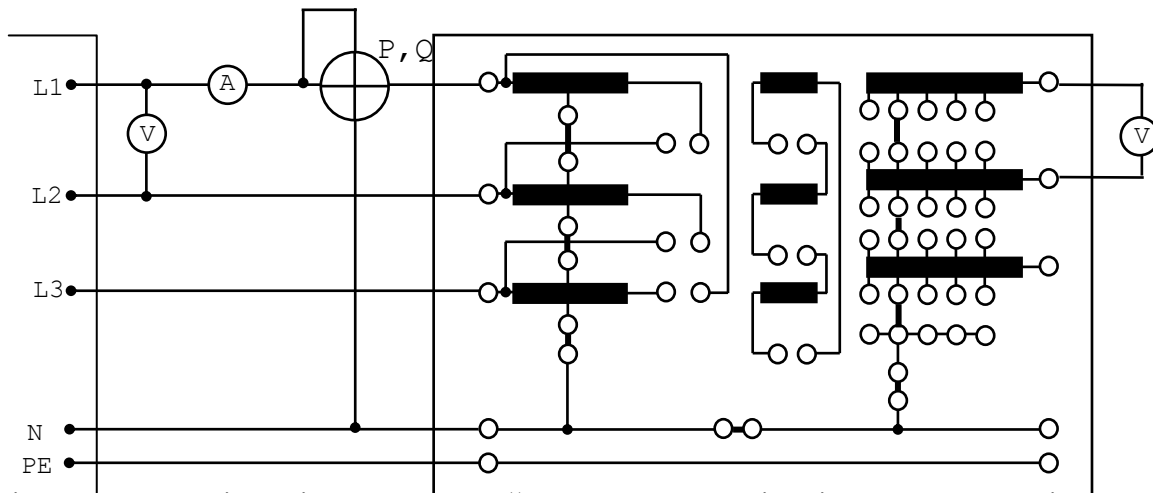


Figura 12: Circuit pentru măsurarea tensiunilor, curenților și a puterilor la trfo trifazat în regim de mers în gol cu conexiune stea în primar

$$U_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V,}$$

$$U_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V,}$$

$$I_{10} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A,}$$

$$P_{10} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Comparați valorile măsurate cu cele măsurate pentru circuitul monofazat.

Rezultat:

2.4 Funcționarea în regim de scurtcircuit

Obiectivul experimentului

Măsurarea tensiunii, curentului și a puterii active atunci când există un scurtcircuit pe secundarul transformatorului și determinarea valorilor circuitului echivalent bazate pe aceste măsurări.

Lista echipamentului și montarea experimentului:

- 1 Tensiune variabilă trifazică 0-400V (Cat. Nr. 72570)
- 1 Unitate de alimentare trifazată (Cat. Nr. 72675)
- 1 Transformator trifazic (Cat. Nr. 74550)
 - 1 Voltmetru 100V / 400V
 - 1 Ampermetru 1A
 - 1 Ampermetru 2,5A
 - 1 Aparat de măsurare a puterii
- 1 set de 32 de fire de siguranță de conectare (Cat. Nr. 500851)
- 1 set de 10 fire de siguranță de conectare, verzi/galbeni (Cat. Nr. 500852)
- 1 set de 10 prize punte, negre (Cat. Nr. 50059)
- 1 set de 10 prize punte, verzi/galbene (Cat. Nr. 500591)

Montarea echipamentului este identică cu aceea folosită pentru măsurări în regim de fără sarcină numai că apare în plus unitatea de alimentare trifazată .

Mod de lucru:

Și aici măsurările sunt prima dată făcute pe o fază a transformatorului iar investigații ulterioare sunt realizate pe circuitul trifazat. Mai întâi, fixați conectarea componentelor așa cum rezultă din figura 13:

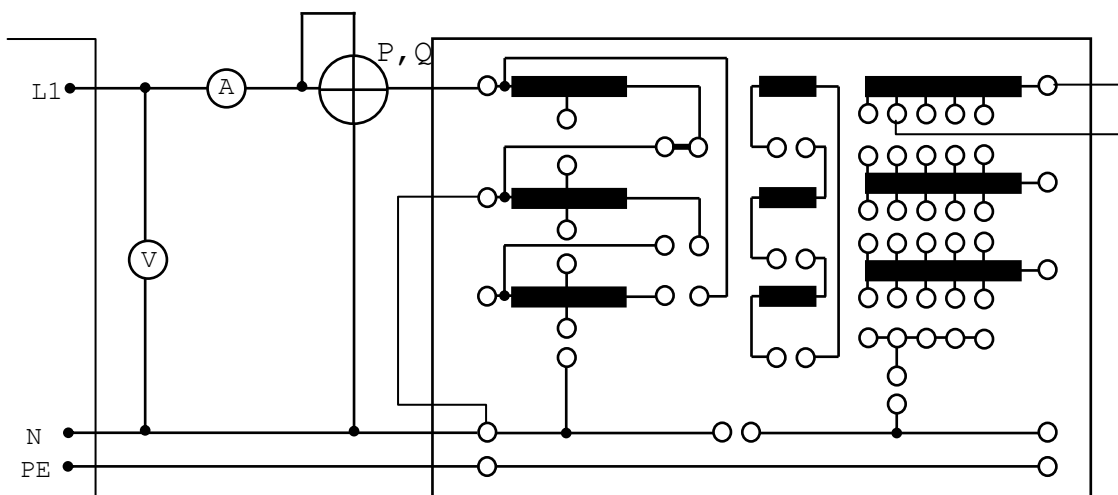


Figura 13: Circuit pentru investigarea randamentului de operare a unui transformator în scurtcircuit (monofazat)

Folosind prizele punte, selectați derivația de pe secundar la tensiune nominală și conectați-o la terminalul de ieșire.

Creșteți valoarea tensiunii variabile trifazate începând de la zero până când primarul transformatorului este străbătut de un curent de 1,2A. Măsurați tensiunea U_{1k} și puterea activă P_{1k} consumată de circuit:

$$U_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}, \quad I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}, \quad P_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Determinați $\cos\varphi$, tensiunile relative de scurtcircuit și componenta inductivă și rezistivă a impedanței de scurtcircuit potrivit ecuațiilor

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot I_1}, \quad u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}}, \quad u_r = u_k \cdot \cos\varphi_k, \quad u_x = u_k \cdot \sin\varphi_k$$

$$R_{1k} = \frac{U_{1k} \cdot \cos\varphi_k}{I_1}, \quad X_{1k} = \frac{U_{1k} \cdot \sin\varphi_k}{I_1}$$

$$\cos\varphi_k = \underline{\hspace{2cm}}, \quad u_k = \underline{\hspace{2cm}} \%, \quad u_r = \underline{\hspace{2cm}} \%, \\ u_x = \underline{\hspace{2cm}} \%, \quad R_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega, \quad X_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

(la măsurările de scurtcircuit, efectele inductanței de magnetizare X_h și rezistența fictivă a pierderii în fier R_{Fe} sunt neglijabile).

Fără a schimba nici una din conexiunile din primar, se măsoară curentul de scurtcircuit în secundar (la derivația U_N) și folosiți acest lucru pentru a determina raportul de transformare al curentului.

$$I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}, \quad I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}, \quad t = I_1/I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Comparați acest lucru cu raportul de transformare a tensiunii corespunzător din măsurarea în regim de mers în gol.

Rezultat:

În următorul experiment este reprodusă versiunea trifazată a transformatorului echivalent cu circuitul monofazat. Și aici, este folosit numai primarul pentru alimentare iar operația are loc la o valoare de U_N pe secundar.

Efectuați circuitul din figura 14 și creșteți tensiunea începând de la valoarea zero până când trece curentul nominal de 1,2A.

Măsurați tensiunea U_{1k} și puterea activă consumată P_{1k} :

$$U_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}, \quad I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}, \quad P_{1k} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

Comparați valorile măsurate cu acelea măsurate pentru circuitul monofazat.

Rezultat:

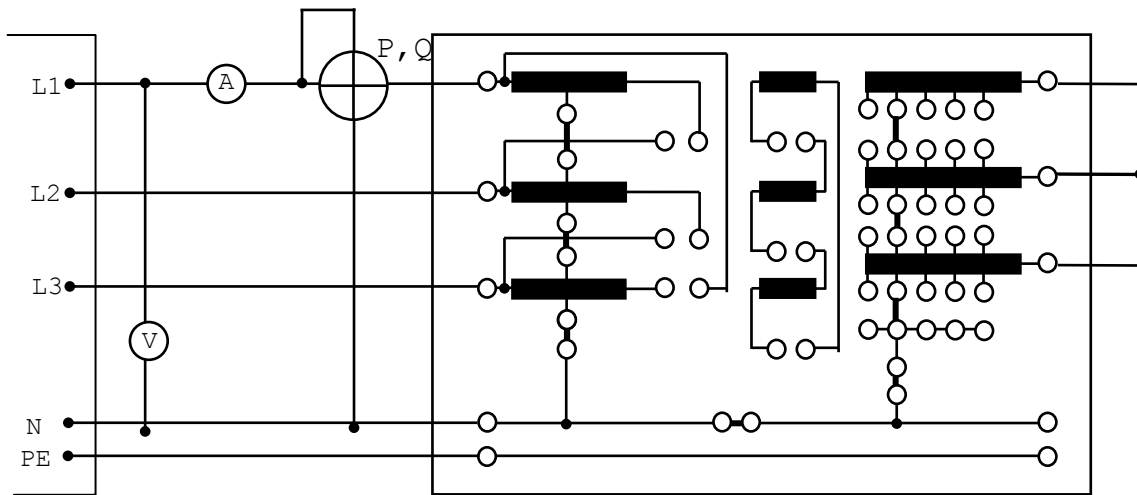


Figura 14: Circuit pentru măsurarea tensiunii, curentului și a puterii în trafa cu conexiune stea pe primar și pe secundarul scurtcircuitat.

Desenați circuitul echivalent complet (monofazat) al transformatorului și notați toate valorile măsurate sau calculate (potrivit observației ce apare în partea teoretică, ceea ce urmează se aplică aproximativ: $R_1 = R_2'$ și $X_{1\sigma} = X_{2\sigma}'$).

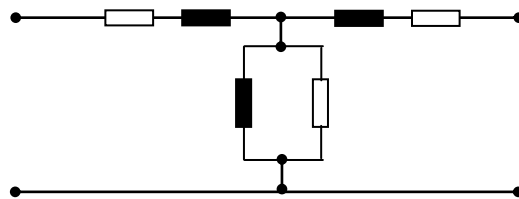


Figura 15: Circuit echivalent monofazat al transformatorului folosit în experiment (folosind valori din conexiunea stea)

Lucrarea de laborator nr. 6

2.5 Funcționarea în sarcină

Obiectivele experimentului:

Măsurarea efectului tipului și amplitudinii sarcinii asupra tensiunii din secundar, și compararea cu valorile teoretice; determinarea eficienței.

Lista de echipamente și montarea experimentului:

1 Tensiune variabilă trifazică 0 - 400V (Cat. Nr. 72675)
 1 Transformator trifazat (Cat. Nr. 74550)
 1 Sarcină rezistivă (Cat. Nr. 73310)
 1 Sarcină capacitivă (Cat. Nr. 73311)
 1 Sarcină inductivă (Cat. Nr. 73242)
 1 voltmetru 100V /400V, 1 voltmetru 600V, 1 Ampermetru 1°, 1 Ampermetru 2,5°, 2 Aparate de măsurare a puterii
 Toate măsurătorile sunt realizate cu transformatorul conectat în configurație stea-stea.

Prima dată vom examina cazul unei sarcini rezistive - figura 17.

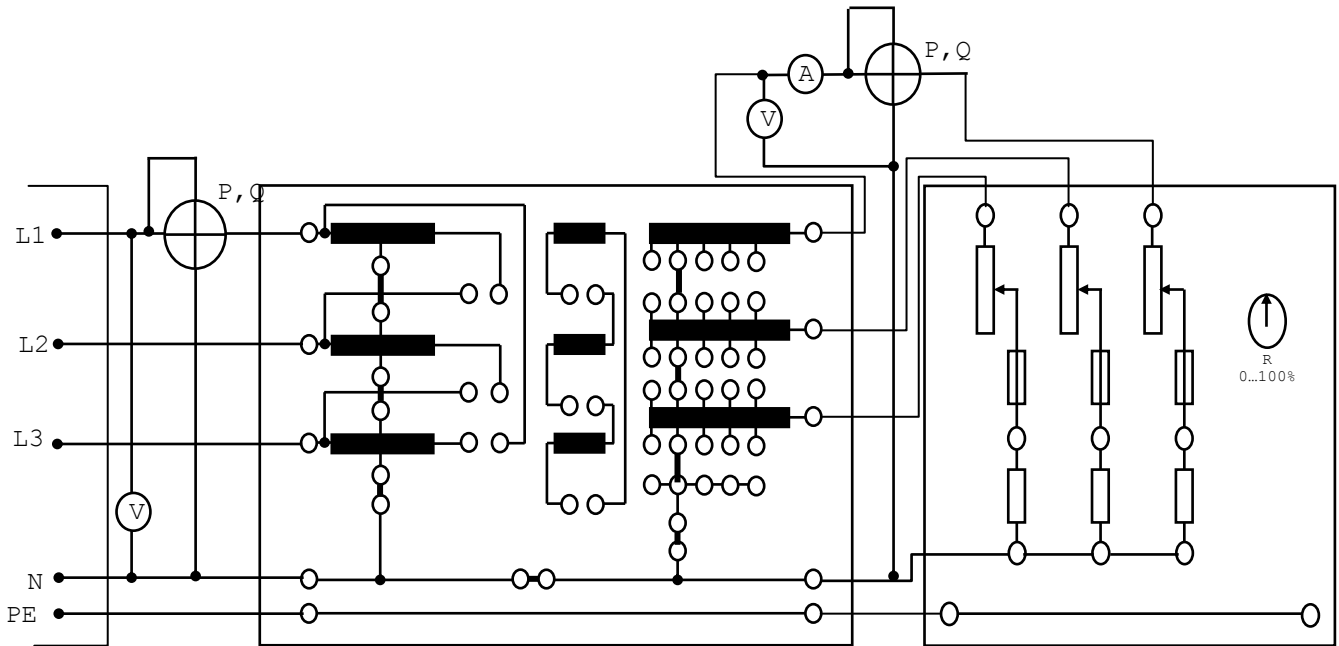


Figura 17: Circuit pentru studiul unui transformator cu diferite tipuri de sarcină

Folosind prizele punte, selectați tensiunea U_N pe secundar și păstrați-o în timpul întregului experiment.

Începând de la o valoare de 100%, reglați sarcina rezistivă la valorile specificate în următorul tabel și măsurați și calculați valorile corecte (U_{20} este tensiunea fără sarcină pe secundar pentru raportul de transformare selectat). În cazul rezistențelor mai mici, măsurările trebuie realizate rapid din cauza curentului de sarcină de pe componente!

Calculați randamentul rezultat ca raport dintre puterea activă consumată și cea de ieșire (datorită diferențelor de

R [%]	U_{20} [V]	U_2 [V]	ΔU [V]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]	η [%]
100							
80							
60							
40							
20							
10							

putere distincte nu este necesar să lucrăm cu metoda de însumare a pierderilor).

Pentru valoarea $R= 40\%$, trebuie comparată căderea de tensiune măsurată cu valoarea obținută matematic în secțiunea teoretică.

Rezultat:

Păstrând circuitul neschimbat, repetați măsurările pentru sarcina inductivă și capacitivă a transformatorului. Măsurarea puterii active poate fi omisă aici datorită faptului că ambele sarcini consumă aproape exclusiv putere reactivă. Rețineți aici că măsurările trebuie realizate rapid!

Sarcina inductivă:

L [H]	U_{20} [V]	U_2 [V]	ΔU [V]	I_2 [A]
6.0				
4.8				
2.4				
1.2				
1.0				

Pentru valoarea $L = 1,2H$, comparați căderea măsurată de tensiune cu raporturile obținute matematic din secțiunea teoretică.

Rezultat:

Sarcină capacitivă:

C [μF]	U_{20} [V]	U_2 [V]	ΔU [V]	I_2 [A]
2.0				
4.0				
6.0				
8.0				
12.0				

Pentru valoarea $C = 6 \mu F$, comparați căderea măsurată de tensiune cu valorile calculate/din secțiunea teoretică.

Rezultat:

Cum variază tensiunea secundară ca o funcție de curent pentru diferitele tipuri de sarcină? Comparați rezultatele obținute cu rezultatele din diagramele fazoriale din figura 6.

Rezultat:
