

Laboratorul numărul 9

Transformatorul electric - Considerații generale

Transformatorul electric este un aparat static, cu două sau mai multe înfășurări, cuplate magnetic, cu rolul de a modifica parametrii puterii electrice în curent alternativ (tensiunea, curentul și eventual numărul de faze), frecvența rămânând constantă.

Transformatorul electric funcționează în baza principiului inducției electromagnetice. Inducția electromagnetică preupune generarea tensiunii, u_2 , într-un circuit plasat în câmp magnetic variabil, Φ , iar dacă acest circuit este închis prin acest circuit va circula curentul indus, i_2 (Fig. 1).

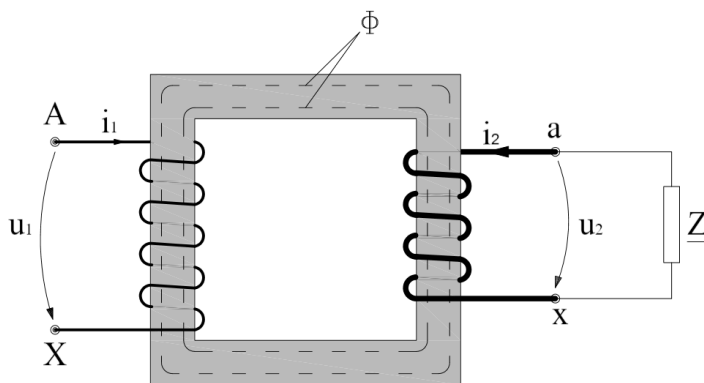


Fig.1. - Transformatorul monofazat – principiu de funcționare

Transformatoarele electrice pot fi: monofazate și polifazate (frecvent trifazate). În sistemul trifazat sunt utilizate aproape exclusiv transformatoarele trifazate. Acestea funcționează parcurse de un sistem de curenți simetrici proveniți de la alimentarea primarului de la sistemul trifazat de tensiuni simetrice. Funcționarea transformatorului trifazat este similară transformatorului monofazat.

Transformatoarele de puteri mici ($S_N < 1 \text{ kVA}$) au, de regulă, răcire naturală în aer și se numesc transformatoare uscate, iar cele de putere mai mare au răcire în ulei.

Regimul nominal de funcționare al unui transformator este acela pentru care se proiectează transformatorul și la care trebuie să funcționeze fără ca temperatura în diferite zone să depășească limitele impuse de normele tehnice în vigoare pentru clasa materialelor electroizolante utilizate. Regimul nominal de funcționare, caracteristic serviciului nominal, este caracterizat de datele nominale înscrise pe tăblița indicatoare, fixată pe transformator la loc vizibil și accesibil.

Funcționarea în regim nominal este definită de următoarele date:

- curenții primari și secundari - sunt curenții de linie pentru puterile și tensiunile nominale ale transformatorului;

- tensiunea nominală de scurtcircuit – este tensiunea ce trebuie aplicată înfășurării/ înfășurărilor de tensiune mare a transformatorului ca în circuitul de tensiune mică, pus în scurtcircuit, să se închidă curentul nominal, temperatura transformatorului fiind temperatura nominală de lucru;

- frecvența nominală a transformatorului, care în mod obișnuit este 50 Hz, iar în cazuri speciale altă frecvență, aceasta fiind indicată pe plăcuța indicatoare.

1. Notarea bornelor la transformatoarele se realizează astfel:

- Pentru capetele înfășurarilor de tensiune mare se utilizează majuscule și anume: începuturile înfășurărilor se notează cu A, B, C iar sfârșitul înfășurărilor se notează cu X, Y, Z;

- Pentru capetele înfășurarilor de tensiune mică se utilizează litere mici și anume: începuturile înfășurărilor se notează cu a, b, c iar sfârșitul înfășurărilor se notează cu x, y, z.

- În cazul transformatoarelor cu trei înfășurări, pentru înfășurările de medie tensiune sunt folosite literele A_m, B_m, C_m pentru începuturi, și X_m, Y_m, Z_m pentru sfârșituri.

Punctul neutru al înfășurărilor, dacă este scos la placa de borne, se notează cu N, n, N_m pentru înaltă, joasă respectiv medie tensiune.

Atât pe partea de înaltă tensiune cât și pe partea de joasă tensiune, succesiunea alfabetică a literelor coincide cu succesiunea fazelor în timp, bobinele înfășurărilor considerându-se că au același sens de înfășurare.

Identificarea bornelor transformatoarelor

În cazul curentului alternativ trifazat, transformarea parametrilor energiei electrice (tensiunea, curentul sau eventual numărul de faze) se realizează cu ajutorul a trei transformatoare monofazate identice (Fig. 2) sau cu ajutorul unui transformator trifazat cu miez compact (Fig. 3).

În primul caz, transformatorul trifazat constituit din trei transformatoare monofazate, se utilizează în cazul puterilor mari și foarte mari sau soluția se aplică din considerente tehnice (imposibilitatea transportului transformatorului de mare putere cu miez compact datorită gabariturii) sau economice (rezerva necesară în cazul defectului de transformator – este economic a păstra în rezervă o unitate monofazată decât o unitate trifazată cu miez compact).

În acest caz, fiecare miez feromagnetic, monofazat, beneficiază de câte o înfășurare primară și una secundară.

În cazul al doilea înfășurarea primară și secundară, corespunzătoare fiecărei faze, sunt dispuse pe câte o coloană a transformatorului, miezul feromagnetic fiind prevăzut cu trei coloane. Capetele înfășurărilor unui transformator sunt scoase, de regulă, la placă de borne.

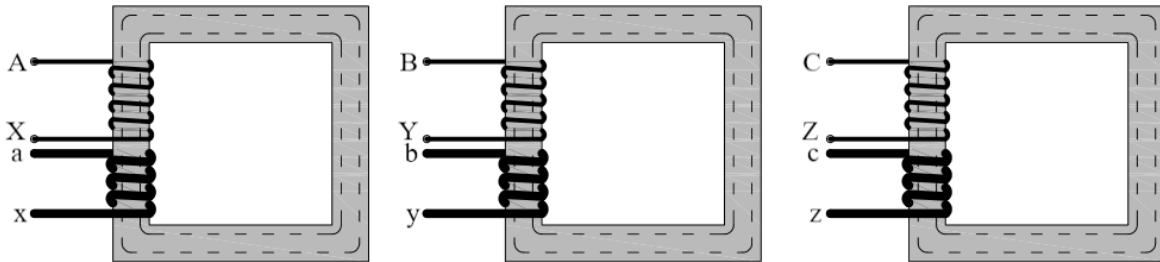


Fig. 2. Transformator trifazat realizat din trei transformatoare monofazate

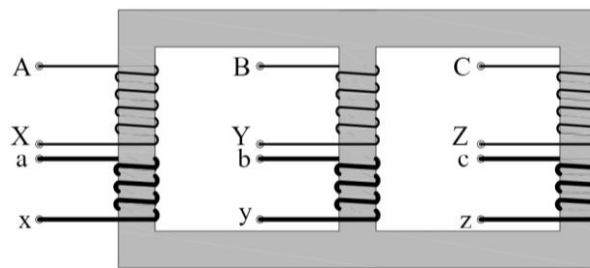


Fig. 3. Transformator trifazat cu miez compact în trei coloane

Pentru realizarea diverselor conexiuni ale înfășurărilor transformatoarelor polifazate este necesară determinarea bornelor fiecărei faze precum și separarea începuturilor și sfârșiturile înfășurărilor.

A. Transformatorul monofazat prezintă, de regulă, o placă cu două perechi de borne, câte o pereche pentru primar și secundar.

Bornele se notează cu cifre (Fig. 4) și cu un voltmetru de 300 Vca înseriat cu rețeaua se determină extremitățile fiecărei înfășurări (bobine) obținându-se astfel perechile de borne. Voltmetrul va indica astfel tensiunea de 230 Vca atunci când perechile de borne corespund unei înfășurări și la transformatorul monofazat nu se pune problema separării începuturilor de sfârșiturile înfășurărilor.

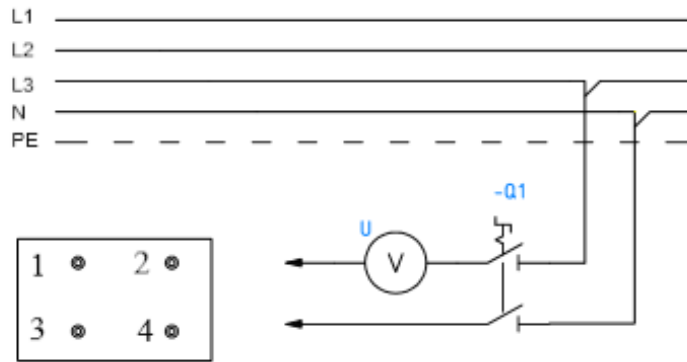


Fig. 4. Determinarea bornelor transformatorului monofazat

B. Transformatorul trifazat pentru înfășurarea primară, prezintă șase perechi de borne, câte două perechi fiecare fază. Dacă înfășurarea secundară are câte două identice pe fiecare fază atunci, la placa de borne a transformatorului se regăsesc 18 borne, din care 6 pentru primar și 12 pentru secundar. Pentru identificarea completă a înfășurărilor unui transformator se procedează conform etapelor de mai jos:

b.1. Determinarea capetelor fiecărei bobine. Se notează bornele cu cifre (Fig. 5.) și, utilizând un ohmmetru sau metoda înserierii voltmetrului cu o rețea se determină capetele fiecărei înfășurări (bobine).

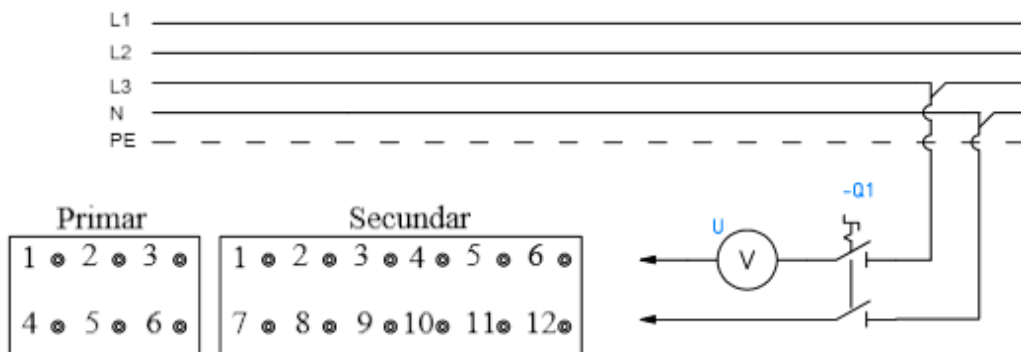


Fig. 5. Determinarea capetelor înfășurărilor transformatorului trifazat

» *Observație:* în cazul metodei înserierii voltmetrului cu rețeaua se caută perechile de borne, de la primar și secundar, între care voltmetrul indică aproximativ 230V, acestea reprezentând capetele unei aceleași înfășurări.

b.2. Determinarea bobinelor aflate pe aceleași coloane al transformatorului. Această operație presupune determinare semibobinelor secundare aflate pe aceeași coloană cu fiecare din bobinele primare. Se alimentează, pe rând, fiecare bobină primară cu tensiune alternativă,

măsurându-se tensiunile obținute la bornei fiecărei semibobine secundare. Bobinele la care s-a obținut tensiune maximă sunt plasate pe aceeași coloană cu bobina primară alimentată la momentul respectiv. Explicația este următoarea: tensiunile obținute în secundar sunt maxime în cazul bobinelor aflate pe aceeași coloană cu înfășurarea primară alimentată deoarece fluxul pe această coloană este maxim.

Se notează astfel bobinele, primară și secundară aliate pe aceeași coloană

b.3. Determinarea poziției înfășurărilor pe cele trei coloane ale transformatorului. Se determină înfășurările aflate pe coloana din mijloc respectiv cele plasate pe coloanele laterale. Când este alimentată bobina primară situată pe coloana din mijloc, fluxul creat prin aceasta se va închide în mod egal prin coloanele laterale și astfel tensiunile induse (proportionale cu fluxurile) sunt maxime în semibobinele secundare plasate pe coloana din mijloc și jumătate în semibobinele situate pe coloanele laterale (Fig. 6).

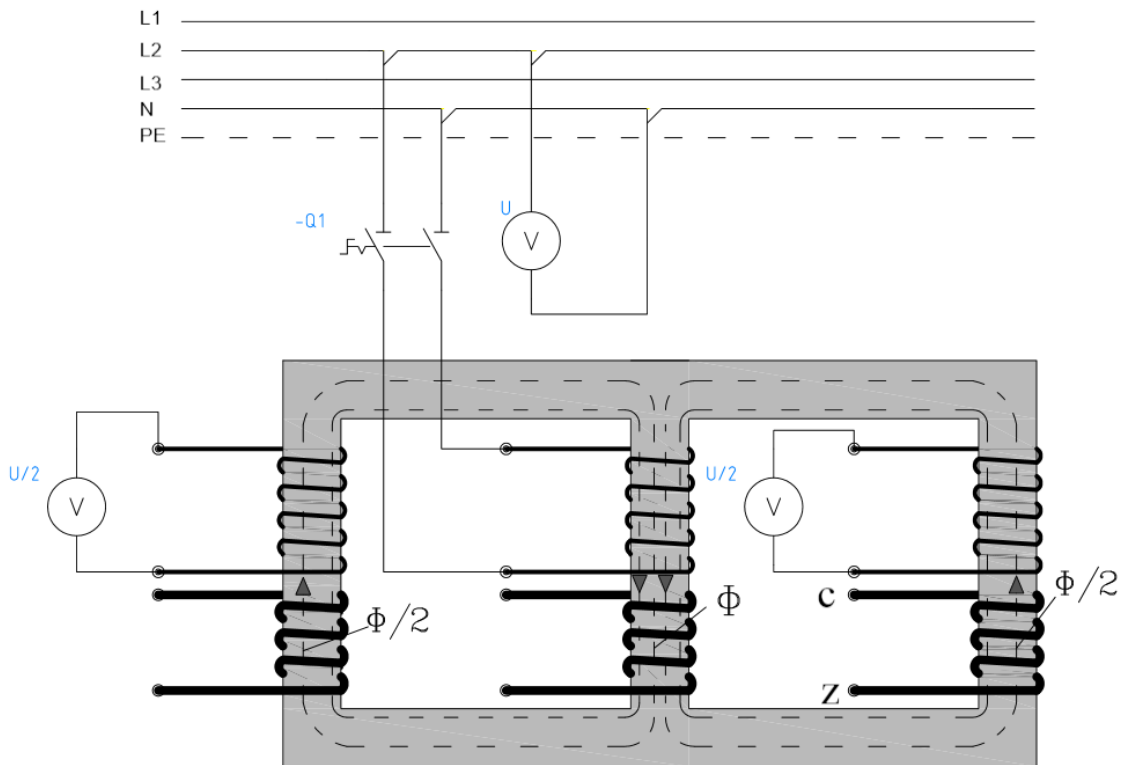


Fig. 6. Determinarea poziționării înfășurărilor pe cele trei coloane
– Alimentarea unei înfășurări de pe coloana din mijloc

În cazul alimentării unei bobine primare plasată pe o coloană laterală tensiunile induse în semibobinele secundare situate pe celelalte două coloane nu mai sunt egale, datorită inegalității reluctanțelor de pe traseul celor două fluxuri (Fig. 7.).

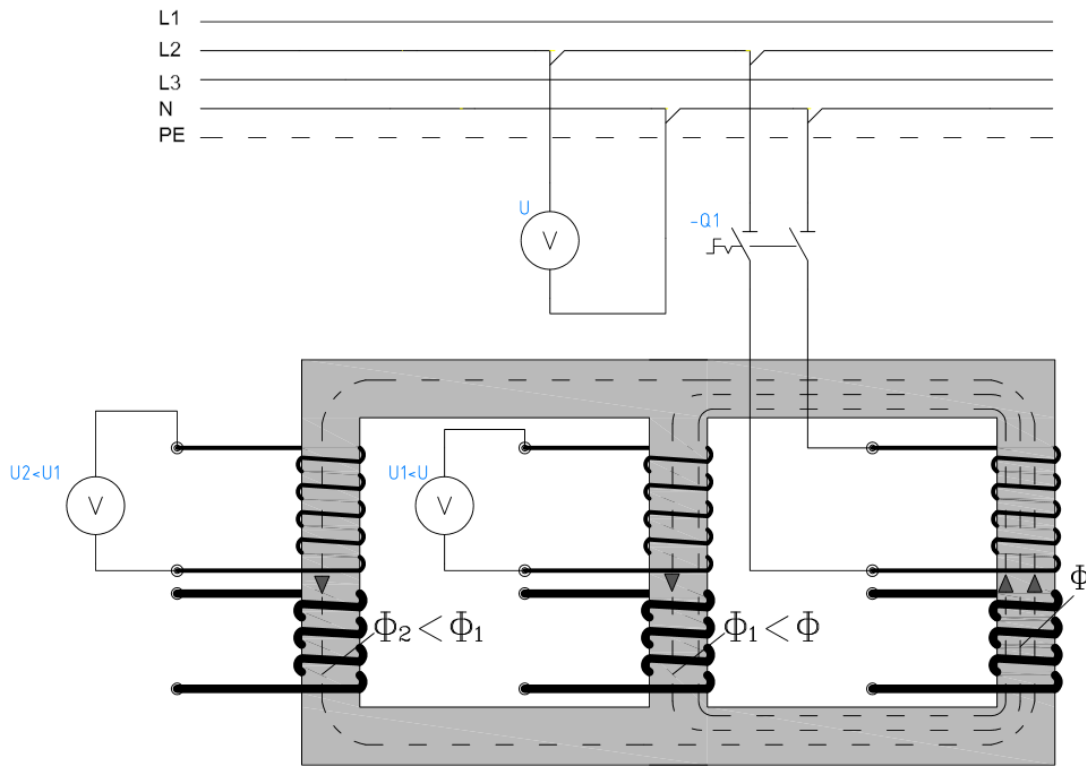


Fig. 7. Determinarea poziționării înfășurărilor pe cele trei coloane
 – Alimentarea unei înfășurări de pe coloana din mijloc

b.4. Separarea începuturilor și sfârșiturilor înfășurărilor primare. Se alimentează, cu tensiune corespunzătoare, una din înfășurărilor primare (de ex. 1-4 in Fig. 8.) iar celelalte două înfășurări se conectează între ele prin legarea a două capete. Cu ajutorul unui voltmetru se citește tensiunea între capetele rămase libere. În cazul în care capetele unite sunt ambele începuturi sau ambele "sfârșituri", voltmetrul indică o valoare redusă, apropiată de zero. Se alimentează apoi o altă înfășurare, 3-6 în Fig. 9., și se procedează în mod analog știind de această dată că borna 2 este început și 5 este sfârșit.

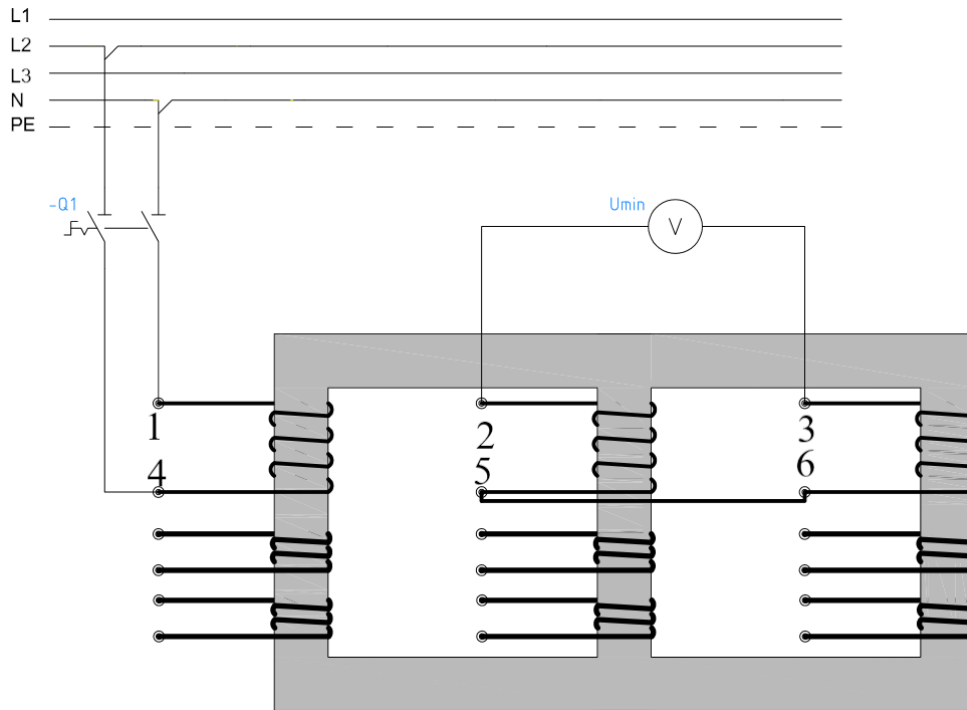


Fig. 8. Determinarea începuturilor și sfârșiturilor înfășurărilor primare

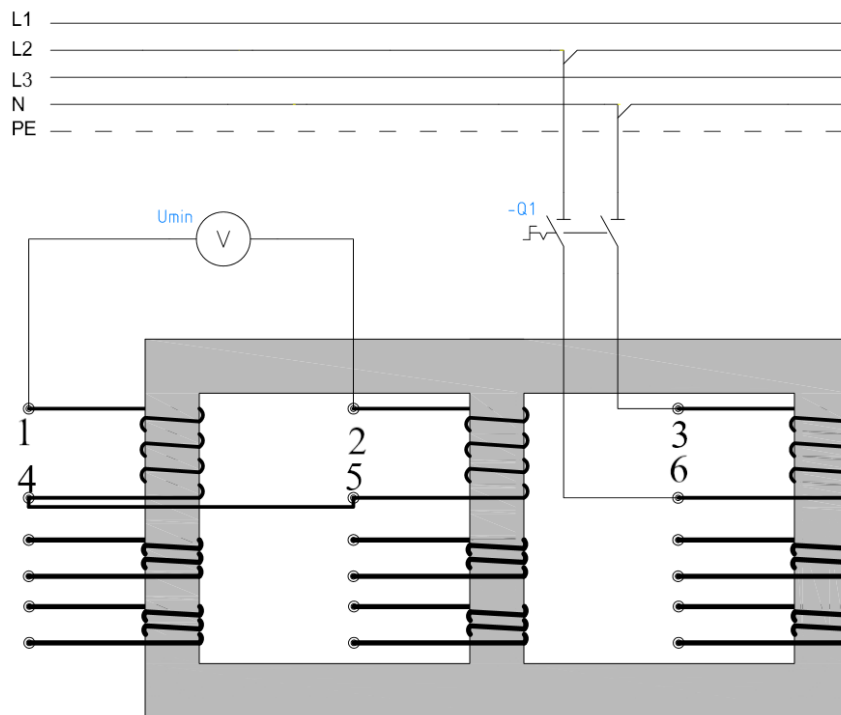


Fig. 9. Determinarea începuturilor și sfârșiturilor înfășurărilor primare

Se determină astfel începuturile și sfârșiturile înfășurărilor primare care se notează respectiv cu A-X, B-Y, C-Z.

b.5. Determinarea legăturilor de inseriere corectă a semi-bobinelor din secundar. Prin această operație se determină legătura de inseriere corectă dintre un început și un sfârșit a celor două semibobine de pe aceeași coloană ale transformatorului trifazat.

Se alimentează o înfășurare primară (de ex. A-X - fig 10) și se conectează între ele două capete ale semibobinelor din secundar (4 cu 7). Dacă tensiunea măsurată la bornele ramase libere (1 și 10) are valoare maxima (mult diferită de zero) atunci legătura între bornele 4 și 7 este o legătura între început și sfârșit. Dacă tensiunea este apropiată de zero atunci cele două borne sunt fie începuturi fie sfârșituri.

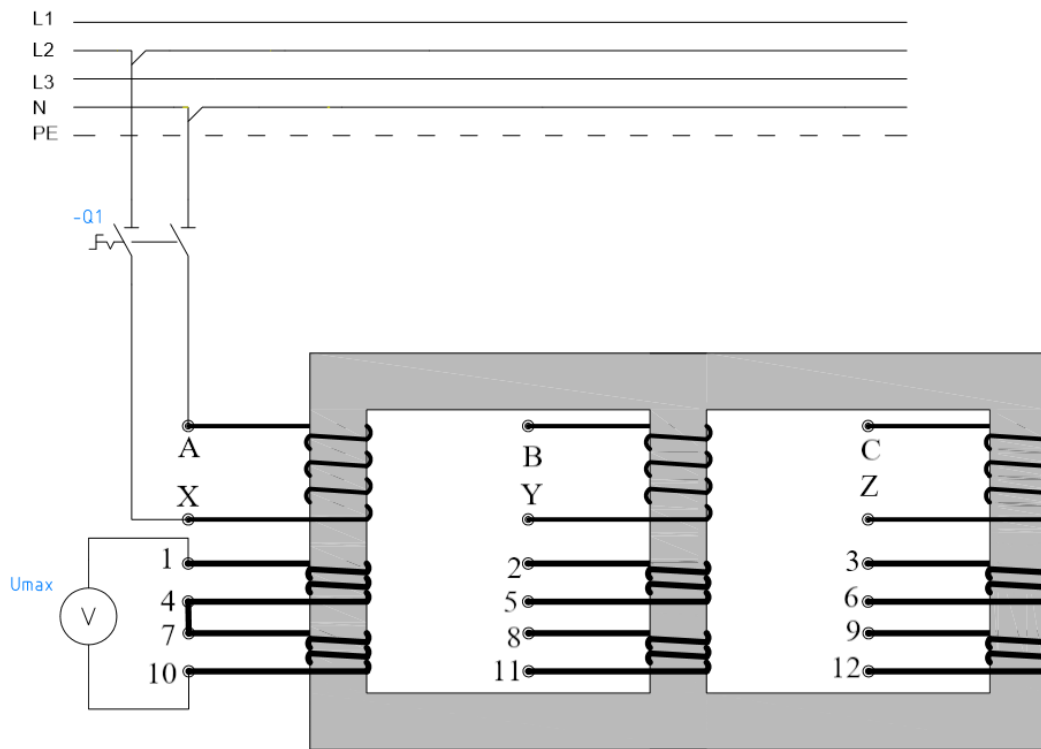


Fig. 10. Determinarea legăturilor de inseriere corectă a semi-bobinelor din secundar

Se vor determina legaturile corecte de inseriere pentru semibobinele secundare de pe toate cele trei coloane.

b.6. Determinarea începuturilor și sfârșiturilor semibobinelor secundare. Să presupunem că legăturile de inseriere corectă a bobinelor secundare sunt 4-7, 5-8, 6-9 (Fig. 11).

Se alimentează, cu tensiune corespunzătoare, o înfășurare primară. Fie aceasta B-Y. Având legătura de înscriere corect realizată, se conectează borna X din primar cu borna 1 din

secundar și se măsoară tensiunea la bornele A-10 (Fig. 11.). Apoi se desface legătura dintre bornele X și 1, se face legătura între bornele X și 10 și se măsoară tensiunea între bornele A și 1 (Fig. 12.). Când voltmetrul indică tensiunea mai mare (în cazul exemplului ales este cazul din Fig. 11.) înseamnă că borna X, care reprezintă un sfârșit, a fost conectată cu un început, adică borna 1. Deci borna 4 este sfârșit, 7-început, 10-sfârșit. În felul acesta s-au determinat începuturile și sfârșiturile bobinelor secundare de pe faza A-X care se notează cu ax' respectiv a'x. În mod analog se procedează pentru faza C-Z.

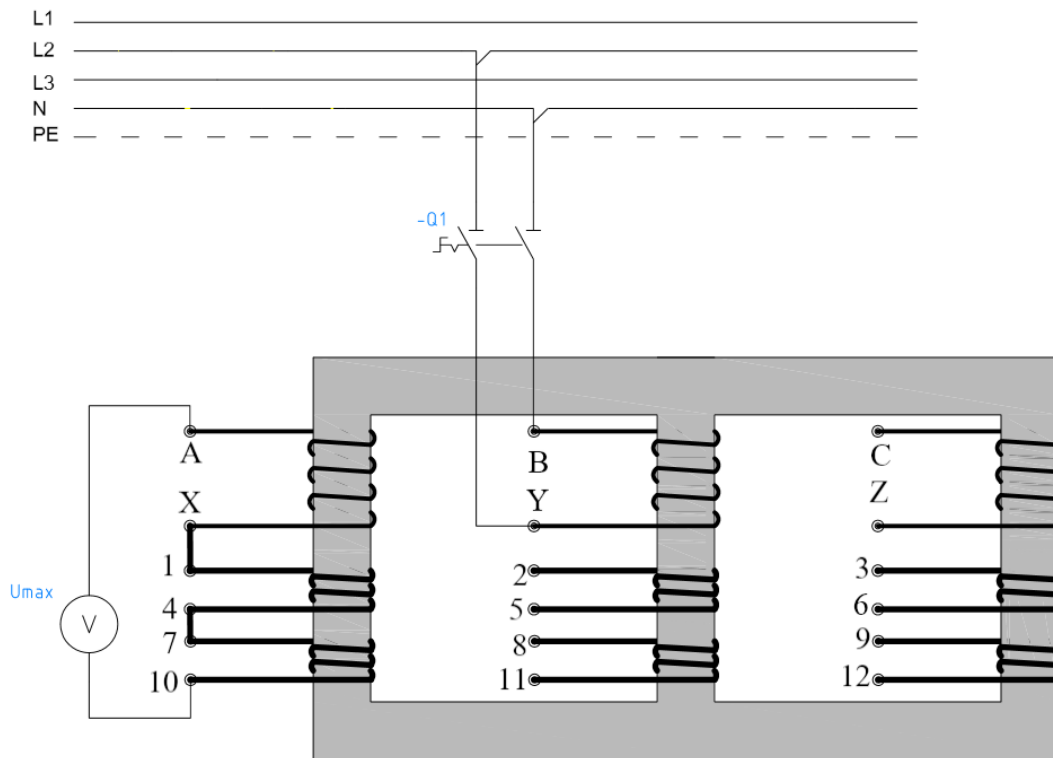


Fig. 11. Determinarea începuturilor și sfârșiturilor semibobinelor secundare

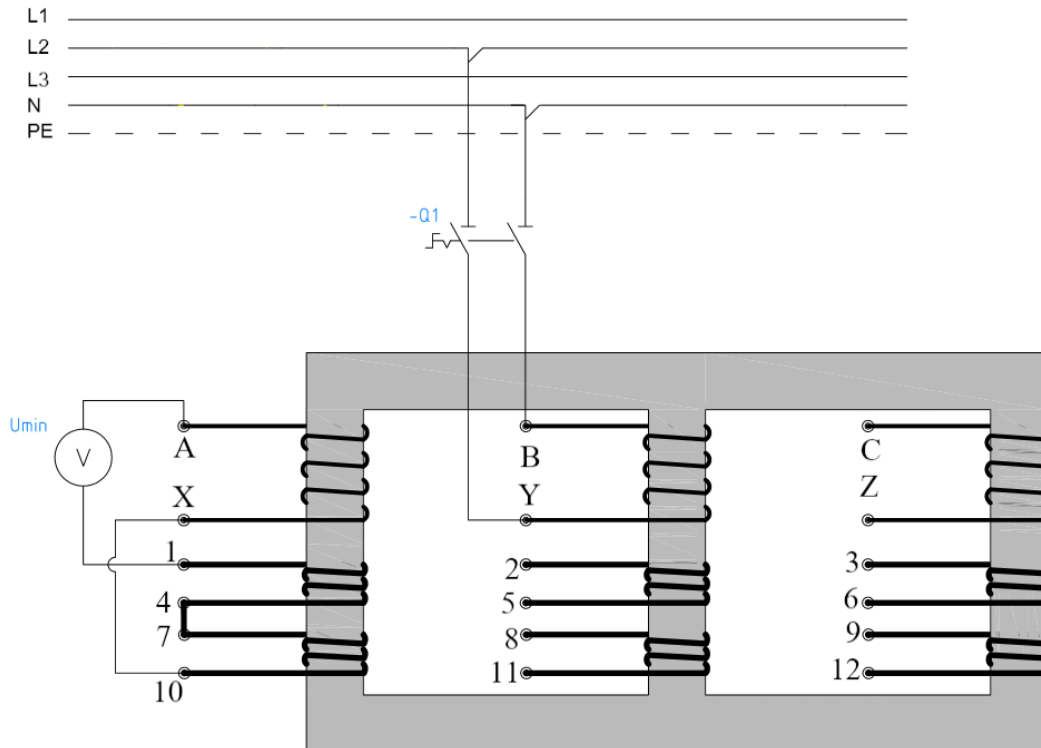


Fig. 12. Determinarea începuturilor și sfârșiturilor semibobinelor secundare

Pentru determinările corespunzătoare fazei B-Y este necesară alimentarea fie a fazei A-X fie a fazei C-Z, raționamentul fiind analog. Rezultatul în final este tocmai determinarea completă a bornelor înfășurărilor transformatorului trifazat.

În cazul în care transformatorul este prevăzut în secundar cu câte o singură înfășurare pe fiecare fază, nu mai sunt necesare operațiile corespunzătoare etapei b.5.

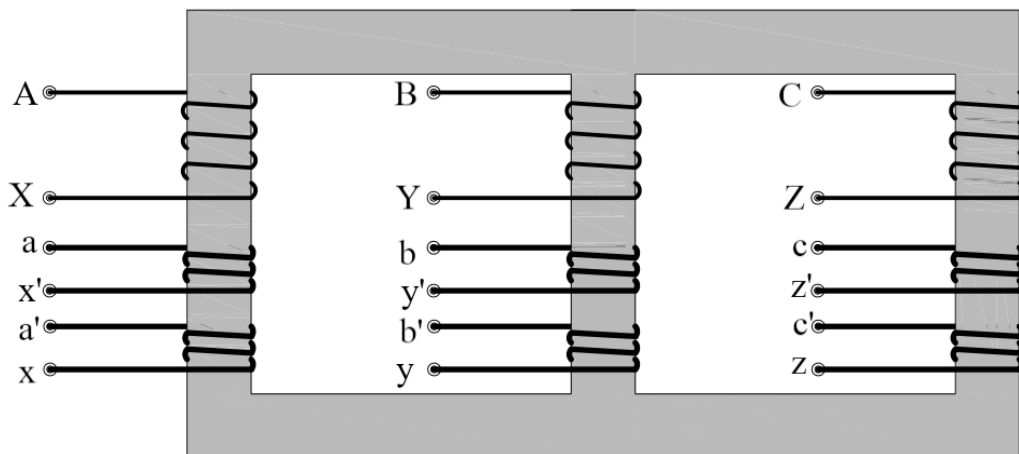


Fig. 13. Determinarea completă a bornelor înfășurărilor transformatorului trifazat.

Conexiunile înfășurărilor transformatoarelor trifazate.

Grupe de conexiuni. Raport de transformare

A. Conexiunile transformatorului trifazat

Înfășurările primare și secundare ale unui transformator trifazat pot fi conectate între ele în diferite moduri, ansamblul conexiunilor constituind schema de conexiuni a transformatorului.

Schemele de conexiuni se indică convențional cu literă mare pentru înaltă tensiune, cu literă mică pentru joasă tensiune și cu literă mare însoțită de indicele m pentru media -tensiune, în cazul transformatoarelor cu trei înfășurări. La transformatoarele trifazate, înfășurările pot fi conectate în stea, în triunghi sau în zig-zag.

Schema de conexiuni stea, simbolizată cu Y (pentru înalta tensiune) și y (pentru joasa tensiune) se realizează conectând împreună începuturile sau sfârșiturile înfășurărilor de fază, constituind astfel punctul de nul, notat cu N sau n , iar capetele libere sunt legate la bornele transformatorului (Fig. 14.). Punctul de nul poate fi scos la placa de borne, situație în care simbolul conexiunii va avea indicele 0 (ex: YN sau yn - după cum ne referim la înaltă tensiune sau joasă tensiune). Conexiunea stea a înfășurărilor permite obținerea a două tensiuni de valori diferite în raportul $1/\sqrt{3}$, un sistem monofazat de tensiuni (tensiunile de fază) și un sistem trifazat de tensiuni (tensiunile de linie).

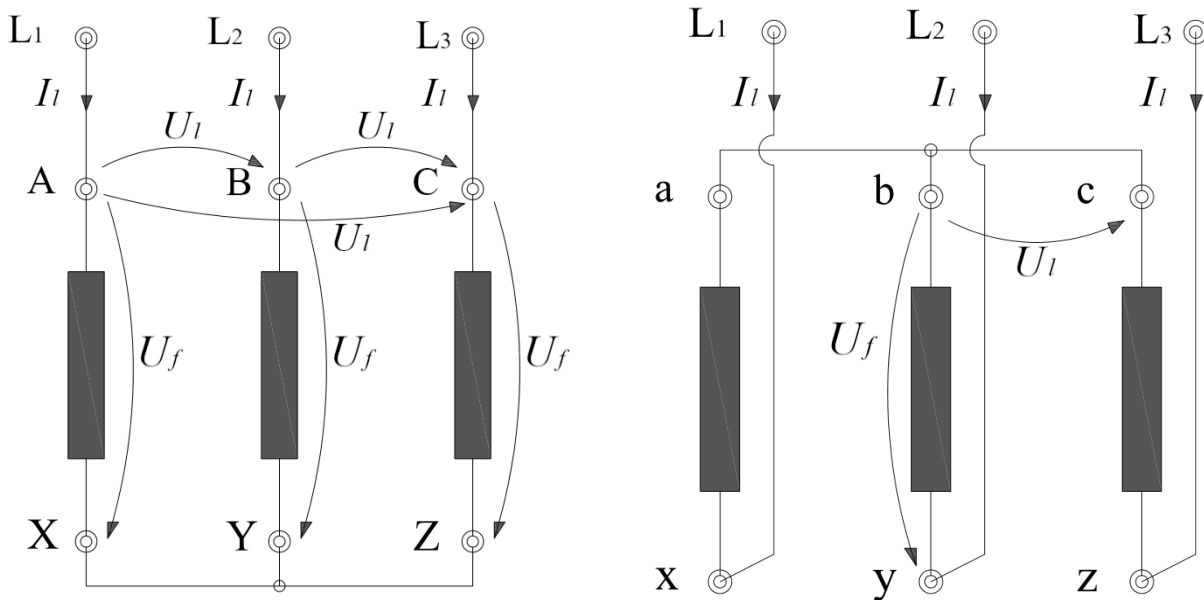


Fig. 14. Conexiune Y

În regim armonic valoarea efectivă a tensiunii de linie este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât valoarea efectivă a tensiunii de fază, iar valorile efective ale curenților de linie și de fază sunt egale:

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_f$$

$$I_l = I_f$$

Această conexiune se utilizează la transformatoarele de putere Pe partea de înaltă tensiune și la transformatoarele de distribuție.

Schema de conexiuni triunghi simbolizată D sau d, se obține conectând sfârșitul unei înfășurări de fază cu sfârșitul unei înfășurări de fază. Înserierea se poate realiza în două moduri: către stânga când triunghiul constituit este în "N" (Fig. 15.a) sau dreapta succesiunii fazelor, când triunghiul este în Z (Fig. 15.b). Punctele de conexiune a fazelor constituie începuturile sau sfârșiturile înfășurărilor transformatorului și se scot la bornele acestuia.

Pentru această conexiune, relațiile între mărimile de linie și fază în regim armonic sunt:

$$U_l = U_f$$

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_f$$

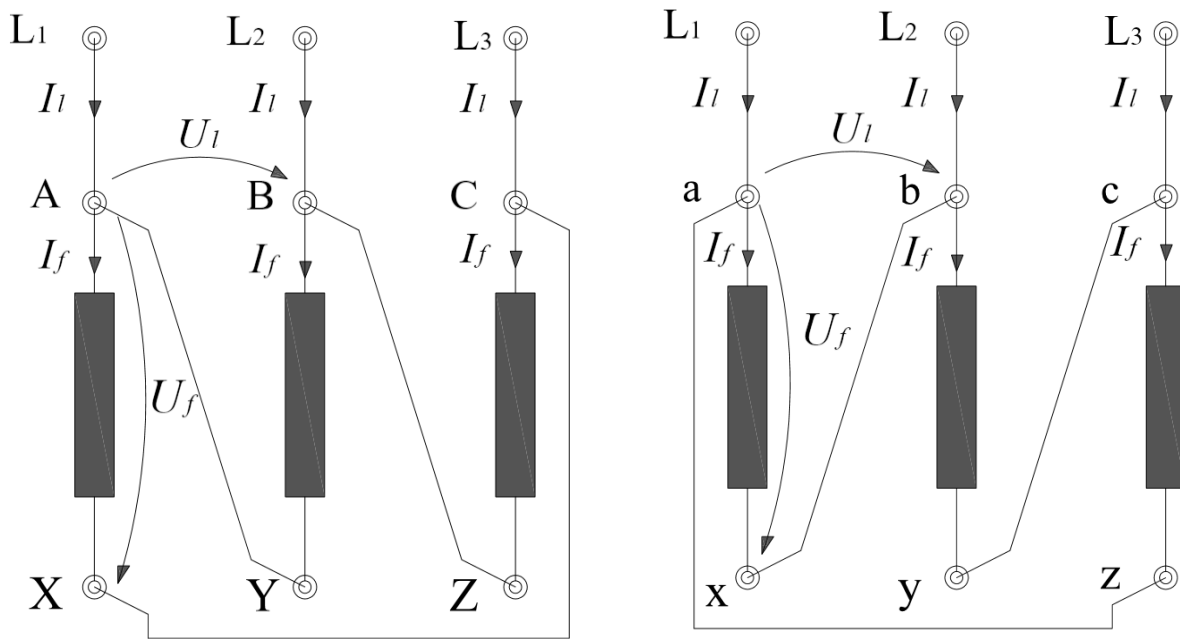


Fig. 15. Conexiunea D

a) Triunghi în N

b) Triunghi în Z

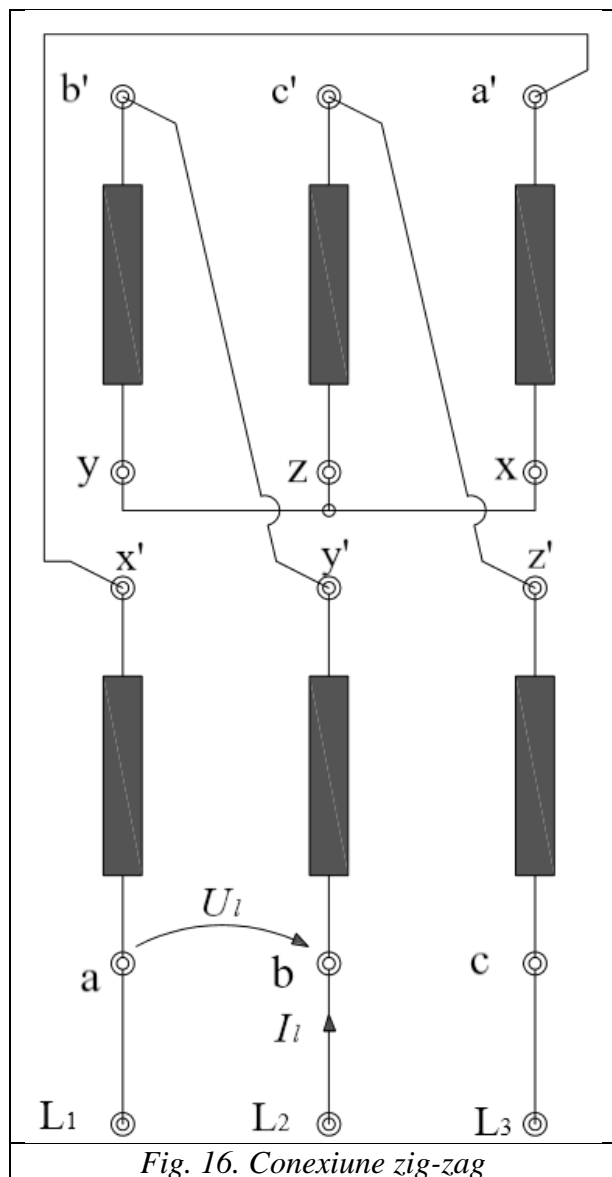


Fig. 16. Conexiune zig-zag

Schema de conexiuni zig-zag este simbolizată cu z și se utilizează NUMAI pe partea de joasă tensiune a transformatoarelor de distribuție. Pentru realizarea acestei conexiuni fiecare înfășurare de fază trebuie să fie formată din câte două semibobine identice. Conexiunea se obține prin înserierea unei semibobine de pe o coloană cu o semibobină de altă coloana, acestea fiind parcurse de curenți în sens invers (Fig. 16).

Relațiile între mărimile de linie și cele de fază în regim armonic sunt identice cu relațiile stabilite la schema de conexiuni stea.

$$U_{lD} = U_{fD}$$

$$I_D = \sqrt{3} \cdot I_l$$

B. Grupe de conexiuni trifazate

Transformatoarele trifazate pot avea diferite conexiuni ale înfășurărilor de fază pe partea de înaltă tensiune în raport cu conexiunile înfășurărilor de fază pe partea de joasă tensiune. Schema de conexiuni este caracterizată de așa numita deplasare unghiulară ce reprezintă defazajul între tensiunile de linie sau de fază de pe partea de joasă tensiune și tensiunea de linie sau de fază omoloagă de pe partea de înaltă tensiune, prima fiind în urma celeilalte (defazată în sens orar în planul de reprezentare fazorială a tensiunilor). Acest defazaj dintre tensiunile omoloage de linie (sau de fază) la transformatoarele trifazate poate fi un multiplu de $30^\circ(\pi/6)$.

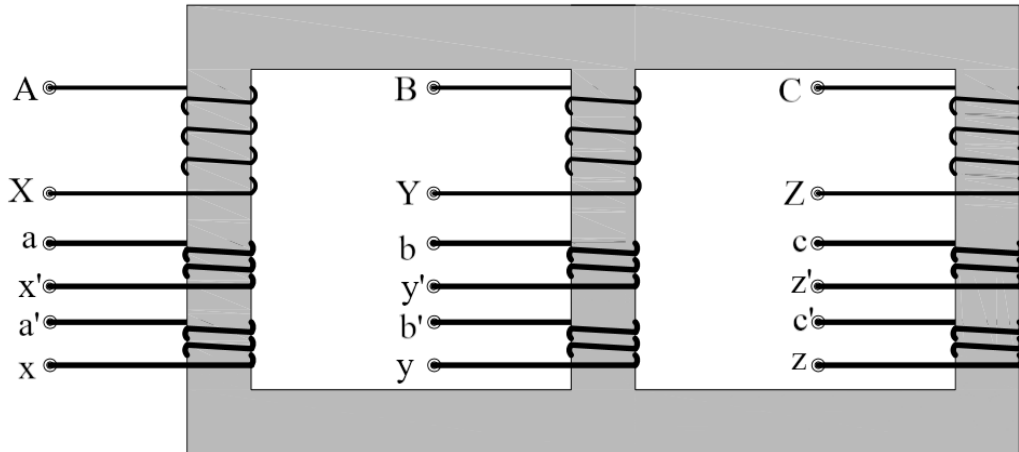


Fig. 17. Determinarea completă a bornelor înfășurărilor transformatorului trifazat.

- Se execută conexiunile date în tabelul de mai sus pentru transformator;

- Se alimentează cu tensiune nominală primarul transformatorului, având secundarul în gol și se măsoară tensiunile la ieșire și calculează raportul de transformare pentru cele 6 conexiuni;

Tabelul 3

Conexiune	Dd	Yy	Dz	Yd	Dy	Yz
$U_1[V]$						
$U_2[V]$						
K						

- Se determina grupa de conexiuni prin metoda celor două voltmetre procedând astfel:

-

- Se realizează montajul din Fig. 18. Observație: Alimentarea transformatorului se poate realiza fie pe joasă tensiune fie pe înaltă tensiune (Fig. 18 .a și b).
- Se conectează între ele două borne omoloage din primar și secundar de exemplu A cu a (Fig. 18 .a și b)

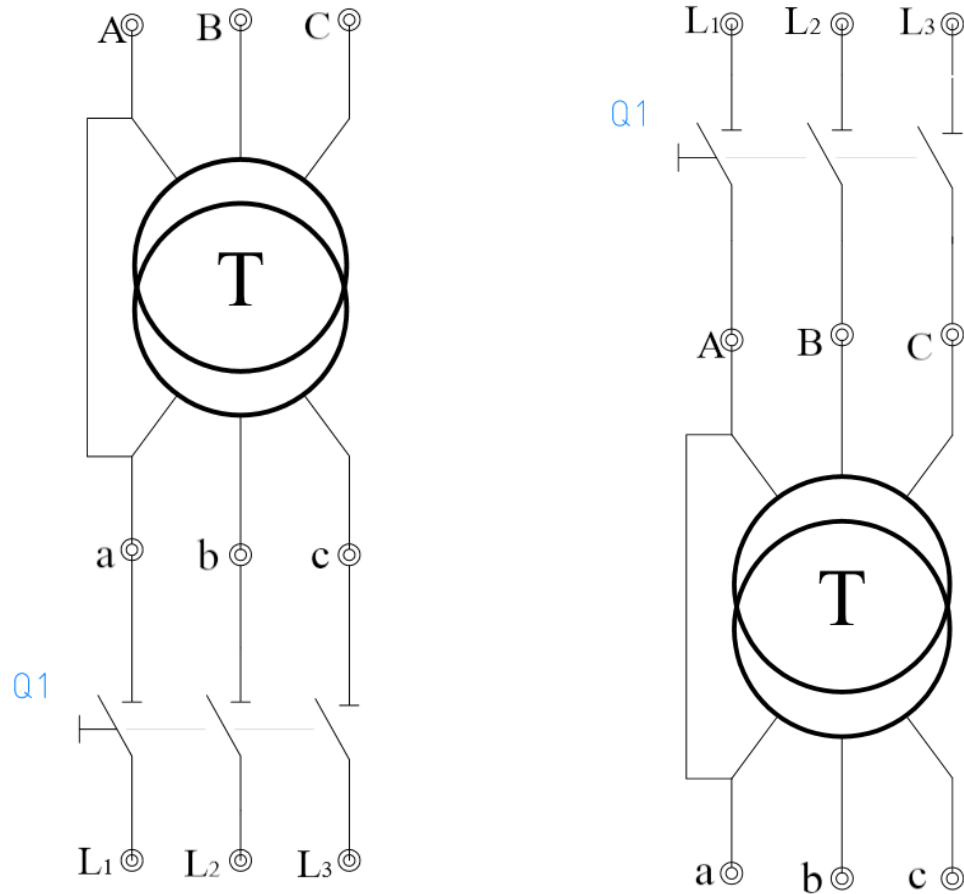


Fig. 18. Montajul pentru determinarea grupei de conexiuni
 a) Alimentare secundar transformator b) Alimentare primar transformator

c) Se măsoară cu un voltmetru, ales corespunzător, tensiunile între diverse borne:

Tabelul 4

U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{Bb}	U_{Cc}	U_{Cb}	U_{Bc}

- d) Se construiesc la aceeași scară triunghiurile tensiunilor din primar ABC și secundar a,b,c, știind că vârfurile A și a coincid.
- e) Se măsoară unghiul dintre tensiunile compuse omoloage plecând de la tensiunea compusă pe partea de înaltă tensiune, în sens orar, până la tensiunea de pe partea de joasă tensiune.
- c) Unghiul obținut se împarte la unitatea de 30° numărul obținut prezentând grupa din care face parte conexiunea respectivă".

® Pe fiecare montaj în parte, se vor verifica următoarele proprietăți ale grupelor de conexiuni:

1.Schimbarea începuturilor cu sfârșiturile la o conexiune stea din primar sau secundar modifică defazajul cu 6 ore ($6 \times 30 = 180^\circ$),

2.Schimbarea unei conexiuni în triunghi din N în Z sau invers modificând defazajul cu 2 ore ($2 \times 30^\circ = 60^\circ$) într-un sens sau în celălalt.

3 Permutarea circulară a bornelor la primar sau secundar modifică defazajul cu 4 ore ($4 \times 30^\circ = 120^\circ$) într-un sens sau în celălalt.

4.Schimbarea între ele a două faze la primar și la secundar va modifica sensul relativ de succesiune a fazelor, respectiv defazajul și grupa de conexiuni a transformatorului.

5.Schimbarea între ele a două borne la înfășurarea de înaltă tensiune și a anumitor două borne la cea de joasă tensiune modifică cu 6 ore ($6 \times 30^\circ = 180^\circ$) defazajul transformatoarelor.