

TRANSFORMATOARE TRIFAZATE DE PUTERE

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, astfel:

- transformatoarele din stațiile de evacuare a puterii din centrale pentru transformarea tensiunii până la valori înalte și foarte înalte în sistemele electrice;
- transformatoare de interconexiune pentru schimb de energie între rețele;
- transformatoare de distribuție pentru transformarea tensiunii înalte 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 stațiile de tracțiune electrică, 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.

Înfășurările trifazate pot fi dispuse 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 de transformare variabile, 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 ca 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 cuadratură sau regulatoarele 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.

7.1. Trafo monofazate

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 variabil 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), se aplică următoarea formulă 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 **bilanțul de putere** rezultă următoarea relație la transformatoare:

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

și:

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

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 dintre tensiune și de curent.

Regimul 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 .

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.

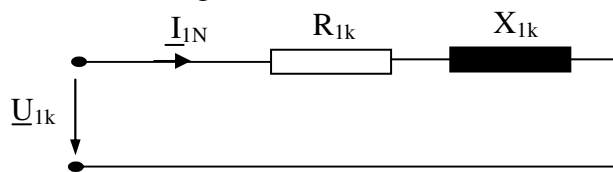
Mai este vorba și de pierderi independente de curent deoarece acestea apar pentru fiecare tip și sarcină a transformatorului.

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%.

Regimul de scurtcircuit

Transformatorul este scurtcircuitat în secundar și se aplică o tensiune mică pe primar, dar suficient 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 mai multe reactanțe de șuntare, care funcționează ca și reactanțe inductive pe circuite.

Rezultă următoarea diagramă de circuit echivalent:



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, corespunzătoare curentului nominal

R_2 : rezistență ohmică a secundarului

R_2' : valoarea lui R_2 raportată la primar potrivit expresiei $R_2' = R_2 \cdot t^2$

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

$X_{2\sigma}$ = reactanța 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:

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

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 se 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.

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:

$$u_k \approx u_x, u_r \approx 0 \quad (10)$$

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.

7.2. Trafo 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 monofazat, există numeroase posibilități de conectare pentru înfășurarea primară și secundară în transformatorul trifazat prin care este asigurată o soluție optimă pentru aplicația respectivă.

7.2.1. 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.

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 (zigzag) - 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 al 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.

7.2.2. Transformatoare cu raport de transformare variabil

Transformatoarele care lucrează în gama tensiunilor foarte înalte prezintă valori u_k foarte mari. Aici scăderea tensiunii secundare (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, întrerupătorul 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.

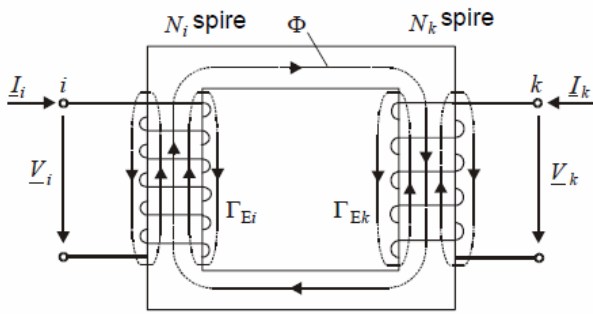
În transformatoarele cu tensiune foarte mari, aria de control se ridică până la +/-22% din tensiunea nominală și aceasta este realizată în maxim 27 de trepte. Acesta este denumit transformator cu reglare în fază.

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.

SCHEMELE ECHIVALENTE SI PARAMETRII TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE

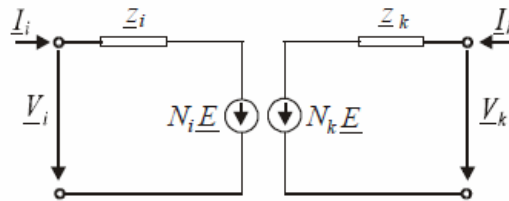
Ipoteze asupra modelului transformatorului monofazat:

- miezul magnetic și circuitele electrice sunt construite simetric;
- transformatorul trifazat în regim simetric față de fazele a , b și c .

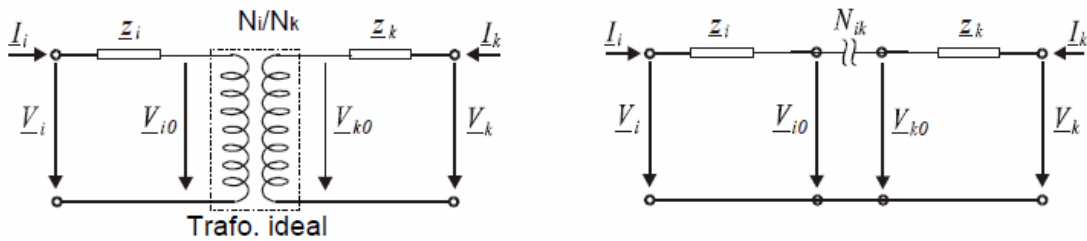


Modelul transformatorului monofazat cu două înfășurări

Schema echivalentă cu două surse:

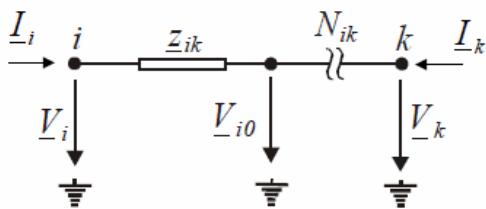


În practică:

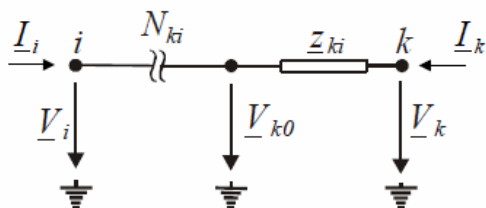


Schēma echivalentă a transformatorului cu două înfășurări:

- a. Schema cu trafo ideal reprezentat prin cuplaj magnetic,
- b. Schema cu trafo ideal reprezentat prin operator de transformare

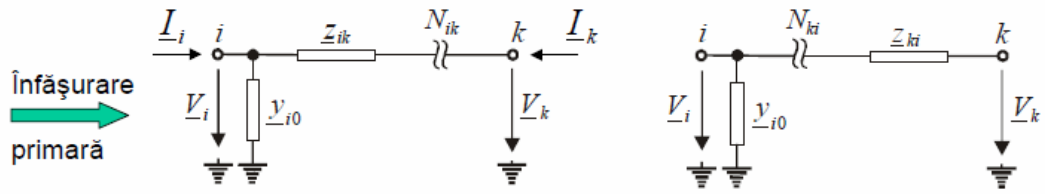


- a. Schema cu operator de transformare N_{ik} și impedanța Z_{ik} raportată la înfășurarea i ; cuplaj galvanic la nodul i și magnetic la nodul k



- b. Schema cu operator de transformare N_{ki} și impedanța Z_{ki} raportată la înfășurarea k ; cuplaj magnetic la nodul i și galvanic la nodul k

Schēma în Γ a transformatorului cu două înfășurări



a. Transformator ridicător

b. Transformator coborător.

$$y_{i0} = \frac{I_{i0}}{V_{i0}}$$

$$N_{ik} = \frac{N_i}{N_k}$$

Parametrii transformatorului cu două înfășurări

Mărimi caracteristice

S_n	reprezintă	puterea nominală a transformatorului, respectiv autotransformatorului;
$U_{n,i}$	-	tensiunea nominală a înfășurării i ;
$U_{n,k}$	-	tensiunea nominală a înfășurării k ;
ΔP_{sc}^{nom}	-	pierderile de putere activă la proba de scurtcircuit;
$u_{sc}[\%]$	-	tensiunea procentuală la proba de scurtcircuit;
ΔP_0	-	pierderile de putere activă la proba de mers în gol;
$i_0[\%]$	-	curentul procentual de mers în gol;
Δu_p	-	căderea procentuală de tensiune pe priză;
w_n	-	numărul de ordine al prizei nominale.

Rezistența echivalentă:

$$R_{ik} = \Delta P_{sc}^{nom} \frac{U_{i,n}^2}{S_n^2} \cdot 10^{-3} \quad [\Omega]$$

kW
MVA
kV

Impedanța longitudinală:

$$z_{ik} = \frac{u_{sc}[\%]}{100} \frac{U_{i,n}}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_{i,n}} = \frac{u_{sc}[\%]}{100} \frac{U_{i,n}^2}{S_n} \quad [\Omega]$$

kV
MVA

Reactanța inductivă echivalentă:

$$X_{ik} = \sqrt{z_{ik}^2 - R_{ik}^2} \quad [\Omega]$$

La transformatoarele de mare putere $R_{ik} \ll Z_{ik}$.

$$X_{ik} \cong Z_{ik} - \frac{R_{ik}^2}{2Z_{ik}} \cong Z_{ik} = \frac{u_{sc} \%}{100} \frac{U_{in}^2}{S_n}$$

Conductanța echivalentă:

$$G_{i0} = \frac{\Delta P_0}{U_{i,n}^2} \cdot 10^{-3} \quad [S]$$

Admitanța corespunzătoare pierderilor de magnetizare la mers în gol:

$$y_{ik} = \frac{i_0 [\%]}{100} \frac{S_n}{U_{i,n}^2} \quad [S]$$

Susceptanța inductivă echivalentă B_i

$$B_{i0} \cong \sqrt{y_{i0}^2 - G_{i0}^2} \quad [S]$$