

DOMENIILE DE UTILIZARE A DIVERSELOR SCHEME DE CONEXIUNE A ÎNFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATOARELOR DE FORȚĂ

Anatol Cochidco

Conducător științific: conf. univ. d.ș.t. Constantin Codreanu

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: În lucrare se atrage atenția la diferența în reacția transformatoarelor la curenții nesimetrice, în care este prezentă componenta homopolară..

Cuvinte cheie: schemele de conexiune a înfășurărilor transformatoarelor, întocmirea schemei de secvență homopolară pentru transformatoare cu diverse tipuri de conexiune a înfășurărilor

Lipsa la producători și la beneficiari a unei idei clare despre diferențele fundamentale între proprietățile transformatoarelor de forță de putere mică cu diferite scheme de conexiune a înfășurărilor contribuie la erori în utilizarea lor. Precum, alegerea incorectă a schemei de conexiune a înfășurărilor transformatorului nu numai că înrăutățește indicatorii tehnici a instalațiilor electrice și reduce calitatea energiei electrice, dar și aduce la avarii grave.

Schemele de conexiune și proprietățile transformatoarelor

În corespundere cu STAS 11677-85 [1] transformatoarele de forță la tensiunea de 10(6)/0,4 kV și puterea nominală de la 25 până la 250 kVA pot fi fabricate cu următoarele scheme de conexiuni:

- «stea/stea cu neutru legat la pământ» – Y/Yn;
- «triunghi–stea cu neutru legat la pământ» – Δ/Yn;
- «stea-zigzag» – Y/Zn.

Deosebirea principală a caracteristicilor transformatoarelor cu diverse scheme de conexiune a înfășurărilor constă în reacții diferite la curenții nesimetrice, care conțin componenta de secvență homopolară. Acestea-s în primul rând curenții de scurtcircuit, precum și regimurile de lucru cu sarcina nesimetrică.

După cum se știe, transformatoarele de forță la tensiunea 6(10)/0,4 kV au miez de oțel cu trei tije, pe fiecare tijă sunt amplasate înfășurările primară și secundară a fazei respective – A, B și C. Fluxurile magnetice ale celor trei faze în regimuri simetrice de funcționare circulă în miezul de oțel al transformatorului și nu ies din limitele acestuia..

Ce are loc în cazul asimetriei cu predominanța sarcinii a uneia din faze la partea de 0,4 kV? Astfel de regimuri de funcționare sunt cercetate cu utilizarea teoriei componentelor simetrice [2]. În conformitate cu această teorie, orice regim nesimetric de funcționare a rețelei trifazate este prezentat sub formă de sumă geometrică a trei componente simetrice ale curentului și tensiunii: acestea-s componentele de secvență directă, inversă și homopolară.

Vom examina regimul maximal de nesimetrie monofazată – regimul scurtcircuitului monofazat (SCMF) la partea de 0,4 kV al transformatorului cu schema de conexiune a înfășurărilor Δ/Yn. Tabloul curenților componentelor simetrice în înfășurările transformatorului sunt prezentate în figura 1. În fazele nedefectate la partea de 0,4 kV suma geometrică a celor trei componente simetrice ale curentului este egală cu zero (vom neglija de sarcina de lucru a fazelor), iar în faza defectată această sumă este maximală și este egală cu valoarea curentului de SCMF. Valoarea acestuia se determină cu expresia:

$$I_{o,sc} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_l}{\sqrt{(2R_l + R_o)^2 + (2X_l + X_o)}}, \quad (1)$$

unde U_l este tensiunea lineară; R_1, R_0, X_1, X_0 – sunt respectiv rezistențele și inductanțele de secvență directă, indirectă și homopolară.

Rezistențele și inductanțele de secvență directă

Rezistențele și inductanțele de secvență directă R_1 și X_1 ale transformatoarelor cu diverse scheme de conectare a înfășurărilor se determină cu următoarele expresii:

$$R_1 = \frac{P_{sc}}{3I_n^2}; \quad X_1 = \sqrt{Z^2 - R_1^2}; \quad Z = \frac{U_{sc} \cdot U_n}{100 \cdot S_n}.$$

Examinând datele de pașaport este ușor de observat, că componentele cunoscute P_{sc} și U_{sc} din aceste formule nu depind practic de schemele de conexiune a transformatoarelor și respectiv de ele nu depind rezistențele de secvență directă.

Spre deosebire de aceste rezistențe, rezistențele de secvență homopolară ale transformatoarelor cu diverse scheme de conexiune se deosebesc esențial.

Rezistențele și inductanțele de secvență homopolară

Vom examina tabloul vectorial al curenților și fluxurilor magnetice în schema cu conexiunea înfășurărilor Δ/Y_H (figura.2). În astfel de transformatoare curenții de secvență directă, inversă și homopolară circulă atât în înfășurarea primară cât și în înfășurarea secundară. În acest caz curenții de secvență homopolară se închid în el și în rețea nu nimeresc. Forțele de magnetizare create de curenții de secvență homopolară în înfășurările primară și secundară (amper-spire) sunt direcționate în întâmpinare și practic complet se compensează reciproc una pe alta, ceea ce cauzează o valoare neînsemnată a inductanțelor transformatorului. În acest caz rezistențele și inductanțele de secvență directă și homopolară sunt aproximativ egale: $R_1=R_0$; $X_1=X_0$. În transformatoarele cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Z_n pentru regim analogic curenții de SCMF circulă numai în înfășurarea secundară a transformatorului, însă ei nu creează flux magnetic de secvență homopolară, ceea ce se lămurește prin particularitatea schemei Z_n – «zigzag».

Această particularitate constă în aceea, că la fiecare tijă a transformatorului este situată a câte o semi-înfășurare secundară a două faze diferite (figura 3). În regimul de scurtcircuit monofazat, forțele de magnetizare create de curenții de secvență homopolară în aceste semi-înfășurări sunt direcționate în direcții opuse și se compensează reciproc una pe alta.

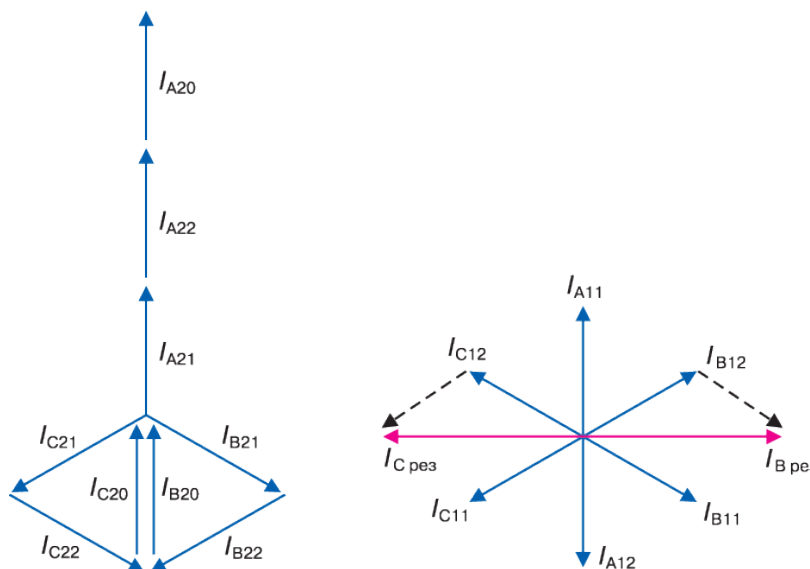


Figura 1 - Curenții componentelor simetrice în înfășurările transformatoarelor în regimul de scurtcircuit:

- IA21, IA22, IA20, IB21, IB22, IB20, IC21, IC22, IC20 – curenții fazelor A, B, C de secvență directă, inversă și homopolară din înfășurările secundare;
- IA11, IA12, IA10, IB11, IB12, IB10, IC11, IC12, IC10 – curenții fazelor A, B, C de secvență directă, inversă și homopolară din înfășurările primare.

În acest caz curenții de secvență homopolară în înfășurările primare lipsesc. În astfel de transformatoare rezistențele și inductanțele de secvență homopolară sunt mai mici decât rezistențele și inductanțele de secvență directă: $R_0 < R_1$; $X_0 < X_1$.

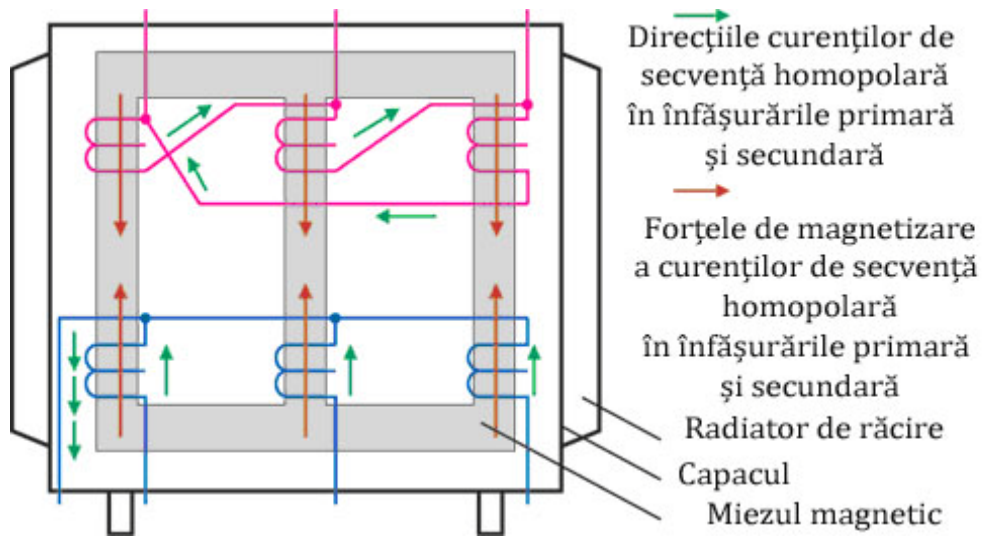


Figura 2 – Direcțiile curenților și fluxurilor magnetice de secvență homopolară în transformatoarele cu schema de conexiune a înfășurărilor Δ/Y_n

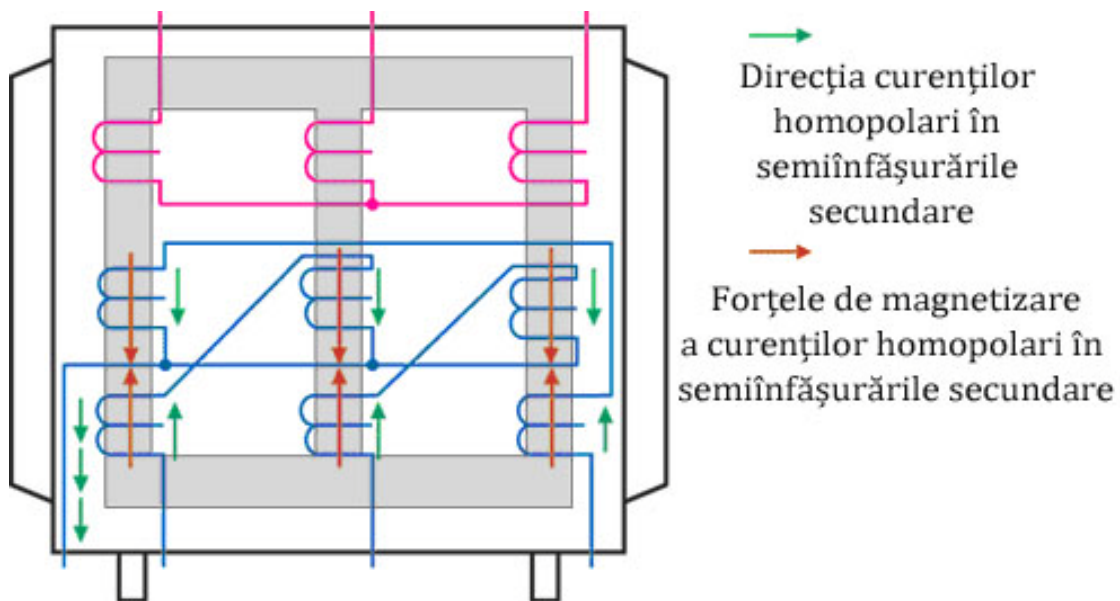


Figura 3 – Direcțiile curenților și a fluxurilor magnetice de secvență homopolară în transformatoarele cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Z_n

Cum rezultă din expresia (1), aceasta contribuie la o valoare mai mare a curenților de scurtcircuit monofazat la transformatoarele cu schema Y/Z_n în comparație cu transformatoarele cu schema Δ/Y_n . Acum vom examina transformatoarele cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Y_n . După cum se știe, în înfășurările conectate în stea fără conductorul nul, curenții de secvență homopolară nu pot circula. De aceea în regimul de scurtcircuit monofazat curenții de această secvență circulă numai în înfășurarea secundară a transformatorului. Fluxurile magnetice de secvență homopolară care coincid după fază, creați de curenții din înfășurarea secundară, ies după limitele miezului magnetic și se închid prin cuva de metal al transformatorului (figura 4). Aceasta determină o valoare cu mult mai mare a rezistențelor și inductanțelor de secvență homopolară a astfel de transformatoare: $R_0 \gg R_1$; $X_0 \gg X_1$.

De menționat, că spre deosebire de rezistențele de secvență directă a transformatoarelor, care pot fi calculate, rezistențele de secvență homopolară a transformatoarelor cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Y_n nu pot fi calculate. Ele pot fi determinate numai experimental. Valorile acestor rezistențe în mare parte

depind de construcția cuvei transformatorului, de valorile ecartamentelor dintre miez și cuvă etc. Schema de măsurare a rezistențelor de secvență homopolară este prezentată în STAS 3484.1-88 [3].

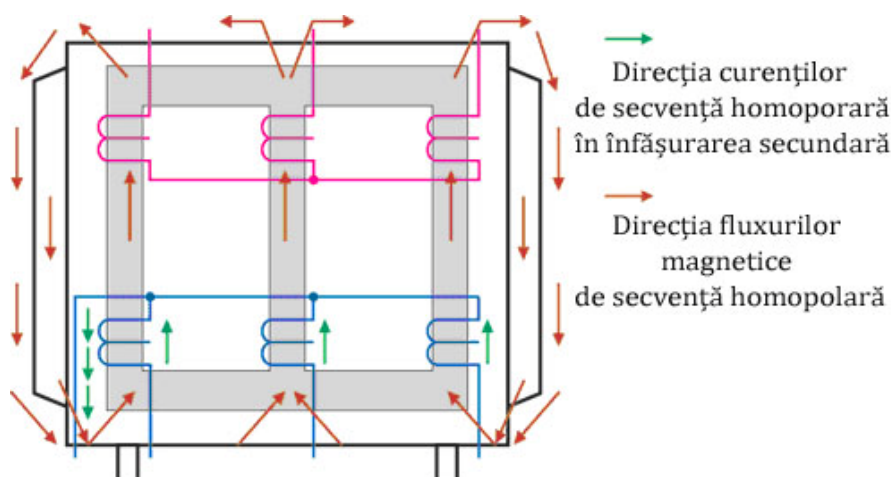


Figura 4 - Direcțiile curenților și a fluxurilor magnetice de secvență homopolară în transformator cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Yn

Cu părere de rău, în acest document nu este indicat că astfel de măsurări întreprinderile producătoare le efectuează la solicitarea beneficiarului. Probabil, în ultimii ani, astfel de solicitări de la beneficiari nu parvin, iar producătorii aceste măsurări nu le efectuează din inițiativă proprie. Ca rezultat, proiectanții la efectuarea calculului utilizează date de pașaport învechite. Însă a utiliza informația învechită este necesar foarte atent, deoarece construcțiile transformatoarelor moderne, mai ales a cuvelor, precum și materialele din care ele sunt fabricate s-au modificat esențial. În afară de aceasta, datele existente la ziua de azi referitoare la rezistențele de secvență homopolară a transformatoarelor sunt foarte contraversate. Astfel, conform măsurărilor uzinei de transformatoare din orașul Minsc, efectuate mulți ani în urmă, inductanțele de secvență homopolară ale transformatoarelor cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Yn depășesc rezistențele de secvență directă în mediu de 10 ori. În același timp în GOST 3484.1-88 există propoziția despre aceea, că rezistențele pot să difere de două ori. Și cu aceasta divergențele nu se limitează [4].

De ce este necesar de a cunoaște valorile reale ale rezistențelor

Valorile reale ale rezistențelor de secvență homopolară este necesar de fi cunoscute, deoarece, ele determină valoarea curentului de SCMF. Cu cât mai mari sunt acestea rezistențe, cu atât mai mic este curentul de SCMF, respectiv este mai dificil de a organiza protecția transformatorului. În condiții normale de funcționare valorile mari a rezistențelor de secvență homopolară în cazul sarcinii neuniforme la partea de joasă tensiune 0,4 kV contribuie la înrăutățirea calității energiei electrice la bornele consumatorului. Astfel, dacă de considerat, că $R_1=R_0$, $X_1=X_0$, ceea ce este caracteristic pentru transformatoarele cu schema de conexiune a înfășurărilor Δ/Yn , atunci obținem:

$$I_{0,sc} = \frac{3U_f}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2}} = \frac{3U_f}{\sqrt{9(R_1^2 + X_1^2)}} = \frac{U_f}{Z_1} \quad (2)$$

Astfel, în aceste condiții, curentul de SCMF la bornele de 0,4 kV ale transformatorului vor fi egale cu curentul de scurtcircuit trifazat. Însă, dacă $R_0 \gg R_1$ și $X_0 \gg X_1$, ceea ce e caracteristic pentru transformatoarele cu schema de conexiune a transformatoarelor Y/Yn, atunci valoarea curentului de SCMF devine cu mult mai mic decât curentul trifazat de scurtcircuit, deci $I_{osc} \ll I_{3f, sc}$. Ce fel de dificultăți în acest caz pot fi pentru protecție, mai ales dacă ea este executată din partea înfășurării de ÎT cu siguranțe fuzibile 6(10) kV, poate fi demonstrat pe un exemplu concret. În figura 5 este prezentată schema de conectare a transformatorului cu puterea de 100 kVA, la tensiune 6/0,4 kV de alimentare a serviciilor proprii (SP) a ST 110/35/6 kV. La ST cu curent alternativ operativ astfel de transformatoare sunt instalate la instalația de distribuție deschisă și sunt conectate la linia aeriană ce vine de la transformatorul de forță la celula de intrare

a ID-6(10) kV. Protecția transformatorului, inclusiv cablul 0,4 kV până la panoul 0,4 kV se execută cu siguranțe fuzibile de 6 kV. Curenții de scurtcircuit la sfârșitul liniei protejate prin siguranțe fuzibile sunt prezentați în tabelul 1. După cum se observă, valoarea minimă a curentului de scurtcircuit prin siguranțele fuzibile 6 kV are loc în cazul scurtcircuitelor monofazate la partea de 0,4 kV.

Tabelul 1 – Curenții de scurtcircuit la sfârșitul liniei protejate cu siguranțe fuzibile în regiunea de după transformatorul 100 kVA, 6/0,4 kV, schema Δ/Yn la bornele de intrare la tabloul 0,4 kV

Tipul scurtcircuitului	Curenții de scurtcircuit ținând cont de impedanța arcului (min), A	
	la partea de 0,4 kV	la partea de 6 kV (prin siguranțe fuzibile)
3-fazat	1875	119
bifazat	1631	103
monofazat	1705	62

Conform recomandărilor existente, conform condițiilor de sensibilizare de la saltul curentului de magnetizare a transformatorului cu puterea de 100 kVA, curentul nominal al siguranțelor fuzibile este considerat egal cu $I_{n,SF} = (2 \div 3) I_{n,tr}$. În acest caz, $I_{n,SF} \geq 2 \cdot 10 \text{ A} \geq 20$. Alegem $I_{n,SF} = 20 \text{ A}$.

Curentul minimal deconectat de către siguranța fuzibilă de tip ПКТ-6 kV, 20 A conform datelor de pașaport constituie $I_{min,dec.} = 240 \text{ A}$, ceea ce este cu mult mai mare decât curenții de SC, prezentați în tabelul 1. Astfel, protecția transformatorului cu siguranțe fuzibile de tip ПКТ 6 kV devine nesensibilă. Mai mult, la circulația curentului de SC mai mic decât cel minimal deconectat, siguranța nu numai că nu protejează utilajul, dar se distruge însăși, cauzând avarie.

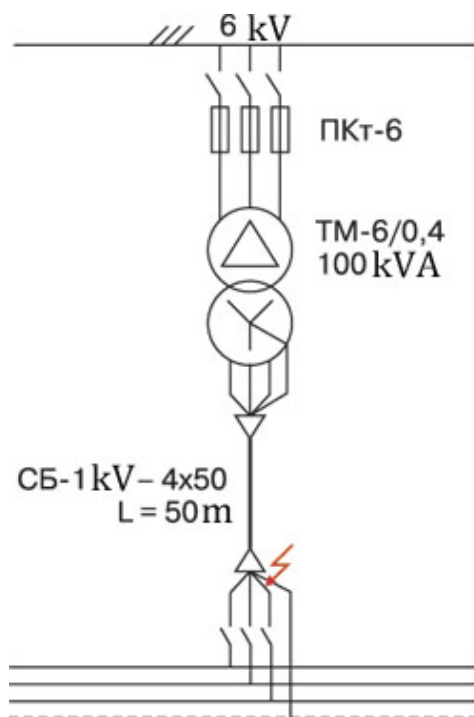


Figura 5 – Schema de conexiune a transformatorului cu puterea de 100 kVA, 6/0,4 kV pentru alimentarea serviciilor proprii al ST 110/35/6 kV

În calitate de aparat de protecție se poate examina posibilitatea utilizării siguranțelor de import, ca de exemplu produse de firma Merlin Gerin. Curentul nominal al fuzibilului specialiștii recomandă de a alege din condiția $I_{SF, 0,1s} \geq 12 I_{n,tr}$. Utilizând caracteristica de acționare a siguranței, prezentate în [5], stabilim, că acestei condiții satisface siguranța de tip Fusarc cu curentul nominal de 20 A, curentul minimal de deconectare a căruia este de 55 A. Pare că siguranța dată protejează sigur utilajul electric, deoarece curentul minimal de SC deconectat de către acesta: $62 \text{ A} \geq 55 \text{ A}$. Însă durata de deconectare de către această siguranță a curentului de SC, egal cu 62 A, constituie 7 s. La o astfel de durată de timp majoră este necesar

de a lua în considerație efectul de reducere a curentului, cauzat de majorarea rezistenței active a cablului din cauza încălzirii acestuia [6]. În rezultat de micșorarea a curentului valoarea lui se apropie de valoare minimă de deconectare a siguranței fuzibile – 55 A, ce face protecția nefiabilă.

De îmbunătățit siguranța protecției se poate prin utilizarea transformatorului de forță 6/0,4 kV cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Zn. În acest caz curentul minimal de scurtcircuit prin siguranța fuzibilă se majorează până la 80 A, iar durata de deconectare de către siguranța fuzibilă se reduce până la 0,6 c și protecția devine destul de fiabilă.

Dacă în exemplul examinat va fi utilizat transformator cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Yn, atunci curentul minimal de SC prin siguranțele fuzibile va constitui doar 22 A. Evident, că protecția utilajului electric cu siguranțe de 6 kV la un astfel de curent este imposibilă. Neajunsurile transformatoarelor cu schema de conexiune a înfășurărilor Y/Yn se manifestă și în regimuri normale de funcționare în cazul unei sarcini nesimetrice. Pierderile de tensiune în faza cea mai încărcată pot să se majoreze esențial în comparație cu fazele mai puțin încărcate, mai ales în cazul unei încărcări mari a transformatorului și un factor de putere redus.

Înseamnă oare aceasta că transformatoarele cu schema de conexiune Y/Yn nu trebuie să fie fabricate deloc? Se pare că nu. Nu întotdeauna valoarea mare a rezistenței de secvență homopolară a transformatorului este un neajuns. De exemplu, la utilizarea transformatoarelor cu puterea mai mare de 1000 kVA poate apărea problema stabilității aparatelor de comutație monofazate 0,4 kV la curenții de SCMF. În acest caz valoarea mare a rezistenței de secvență homopolară a transformatorului cu schema de conexiune Y/Yn poate soluționa aceasta problemă. Ce se referă la protecția a astfel de transformatoare, ea se rezolvă cu ajutorul protecției prin relee și a întreruptorului 6(10) kV, iar din partea de joasă tensiune – cu ajutorul întreruptorului automat în circuitul de intrare la 0,4 kV.

Concluzii

Pentru transformatoarele de putere mică (de la 25 până la 250 kVA), protejate cu siguranțe fuzibile din partea de ÎT, avantaj absolut o are schema de conexiune a înfășurărilor Y/Zn. Un efect mai mic îl oferă schema de conexiune Δ /Yn. Schema Y/Yn pentru astfel de transformatoare nu trebuie utilizată. Schema de conexiune a înfășurărilor Y/Yn poate fi utilizată în cazuri mai rare pentru transformatoare cu puterea mai mare, în cazul necesității limitării curentului de scurtcircuit monofazat în scopul majorării stabilității aparatului de comutație. Întreprinderilor de producere a transformatoarelor de forță este necesar de a efectua obligatoriu măsurări ale rezistențelor de secvență homopolară.

Bibliografie

1. GOST 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
2. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1952. – 280 с. GOST 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78). Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний.
2. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей / Под ред. Большама Я.М., Круповича В.И., Самовера М.Л. и др. – М.: Энергия, 1975. – 696 с.
3. Каталог на предохранители Fusarc Merlin Gerin (стандарт DIN).
4. GOST 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.