

Заместващи схеми на двунамотъчни и тринмотъчни силови трансформатори и автотрансформатори, предназначени за изследване на установени симетрични режими на електрическите мрежи

1. Общи сведения за трифазни силови трансформатори, характеризиращи електрическите им свойства.

Силовите трансформатори са предназначени да променят със скок напрежението и тока в електрическите мрежи. В изградените електрически системи най-голямо разпространение са получили трифазните трансформатори, защото така се постигат икономии на материали и енергия спрямо група от три еднофазни трансформатора със същата мощност. По броя на намотките с различни напрежения от една фаза трансформаторите се разделят на двунамотъчни, тринмотъчни и многонамотъчни. Освен това, намотките от едно и също напрежение могат да се състоят от два и повече паралелни клона, изолирани един от друг и от заземените части. Такива трансформатори се наричат трансформатори с разчленени намотки. Прието е намотките за високо, средно и ниско напрежение съкратено да се означават съответно с ВН, СН, НН.

В електрическите подстанции най-често се използват трифазни двунамотъчни силови трансформатори, при тях за всяка фаза има по две намотки, изолирани една от друга, но свързани по магнитен път. Към основните им параметри, характеризиращи електрическите им свойства, се отнасят номиналната им мощност, номиналните им напрежения и токове, напрежението на късо съединение, тока в режим на празен ход, загубите на активна мощност в режим на празен ход и късо съединение, схема и група на свързване на намотките.

Номинална мощност на трансформатора S_{Tn} се нарича посоченото в заводския паспорт значение на пълната мощност, с която непрекъснато може да бъде натоварен трансформатора в нормални условия (нормална температура на околната среда, номинални честота и напрежения). Обикновено номиналната мощност се задава в kVA.

Номинални напрежения на намотките на трансформатора – това са указаните в заводския паспорт напрежения $U_{нВ}$, $U_{нН}$. За всеки трифазен трансформатор това са ефективните стойности на линейните напрежения, измерени в режим на празен ход. Обикновено се задават в размерност kV. Отношението на двете номинални напрежения дава модула на коефициента на трансформация k_T . Коефициентът на трансформация в най-общ случай е комплексно число, реалната и имагинерна част, на което зависят от това, как са разположени намотките на една фаза върху ядрата на трансформатора.

Номинални токове на намотките – това са указаните в заводския паспорт токове $I_{нВ}$, $I_{нН}$ през намотките, при които се допуска продължителна нормална работа на трансформатора. Номиналният ток на всяка намотка на трансформатора се изчислява от нейните номинална мощност и номинално напрежение.

Напрежение на късо съединение u_k се нарича напрежението, с което, ако се захрани едната от намотките на трансформатора при затворена на късо друга намотка, през нея ще протече ток, равен на номиналния. Прието u_k то да се задава в проценти спрямо номиналното напрежение. С увеличаването на номиналното напрежение и номиналната мощност на трансформатора u_k нараства.

Ток на празен ход I_0 се нарича тока, който протича през едната намотка, ако тя се захрани с номинално напрежение, а другата намотка се остави отворена. Прието е този ток да се задава в проценти спрямо номиналния ток. I_0 характеризира активните и реактивни загуби в магнитопровода и зависи от магнитните свойства на използваната стомана, конструкцията на магнитопровода и магнитната индукция.

Загубите на активна мощност в режим на празен ход ΔP_0 се определят от консумираната мощност за намагнитване на стоманата и от вихровите токове. Те се променят при промяна на захранващото напрежение и не зависят от големината на присъединения към трансформатора товар.

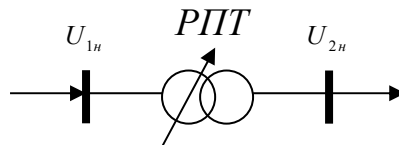
Загубите на активна мощност в режим на късо съединение ΔP_k се определят от консумираната мощност в намотките на трансформатора когато през тях протича номинален ток.

Намотките на трите фази трансформаторите имат схеми на свързване във вид на звезда, триъгълник или зигзаг. Фазовото завъртане между векторите на напреженията на първичната и вторична намотки на една фаза е прието да се изразява условно с групата на свързване на намотките. За означаване на схемите и групата на свързване са възприети следните символи:

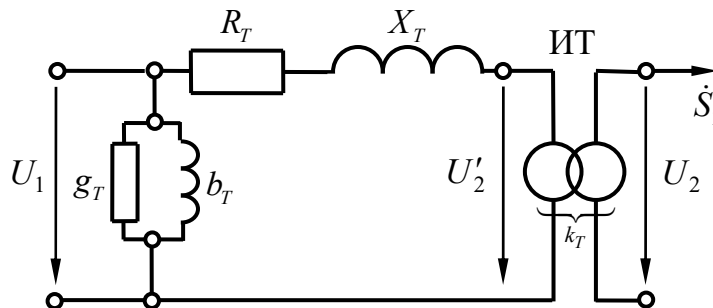
- D – първичната (d – вторичната) намотка е свързана в триъгълник;
- Y – първичната (y – вторичната) намотка е свързана в звезда;
- N – неутралата на първичната (n – на вторичната) намотка е изведена на корпуса на трансформатора;
- Номерът на групата на свързване на намотките се задава с цяло число от 0 до 11.

II. Принципна и заместваща схеми на двунамотъчен силов трансформатор.

В принципните схеми на електрическите мрежи двунамотъчните силови трансформатори се показват с два пресичащи се кръга (фиг.8.1). За изследване на установените симетрични режими на силовите трансформатори най-често се използва Г-образна заместваща схема за една от трите фази на трансформатора. Пълният вид на такава заместваща схема е показан на фиг.8.2.



Фиг.8.1.Принципна схема на двунамотъчен трансформатор



Фиг.8.2.Заместваща Г-образна схема на двунамотъчен трансформатор

Използваните буквени означения на фиг.8.2 имат следния смисъл:

$R_T = r_1 + r_2'$ - сума на активното съпротивление на първичната намотка и приведеното към нея активно съпротивление на вторичната намотка;

$X_T = x_1 + x_2'$ - сума на реактивното съпротивление на първичната намотка и приведеното към нея реактивно съпротивление на вторичната намотка;

g_T, b_T - активна и индуктивна проводимости, с които се отчита влиянието на намагнитващия ток на трансформатора;

ИТ – идеален трансформатор, съотношението на напреженията на неговите изводи е постоянно и се определя от коефициента на трансформация на реалния трансформатор в режим на празен ход.

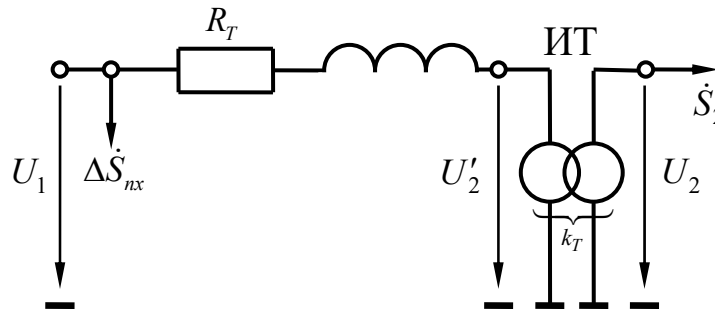
Съпротивленията и проводимостите от заместващата схема се изчислява чрез паспортните данни на трансформатора $S_{Tn}, U_{Bn}, U_{Hn}, u_k, I_0, \Delta P_0, \Delta P_k$ по формулите:

$$R_T = \Delta P_k \cdot \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2, \quad Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

$$g_T = \frac{\Delta P_0}{U_n^2}, \quad \Delta S_0 = \frac{I_0 \%}{100} \cdot S_n, \quad \Delta Q_0 = \sqrt{\Delta S_0^2 - \Delta P_0^2}, \quad b_T = \frac{\Delta Q_0}{U_n^2}, \quad k_T = \frac{U_{nBH}}{U_{nHH}}$$

Понеже загубите на мощност в магнитопровода не зависят от натоварването, а захранващото напрежение се променя в малък диапазон, в заместващата схема на трансформатора напречните проводимости могат да се заменят с постоянни мощности, както това е показано на фиг.8.3.

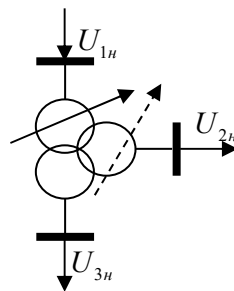
$$\Delta \dot{S}_0 = \Delta P_0 + j\Delta Q_0$$



Фиг.8.3. Заместваща схема на двунамотъчен трансформатор с параметри, приведени към високото номинално напрежение.

III. Принципна и заместваща схеми на тринмотъчен силов трансформатор.

Тринмотъчните трансформатори имат по три намотки във всяка фаза, за които е прието да се наричат съответно намотка за високо напрежение (ВН), за средно напрежение (СН) и за ниско напрежение (НН). Те свързват в обща схема мрежи от три номинални напрежения.



Фиг.8.4. Принципна схема на тринмотъчен трансформатор

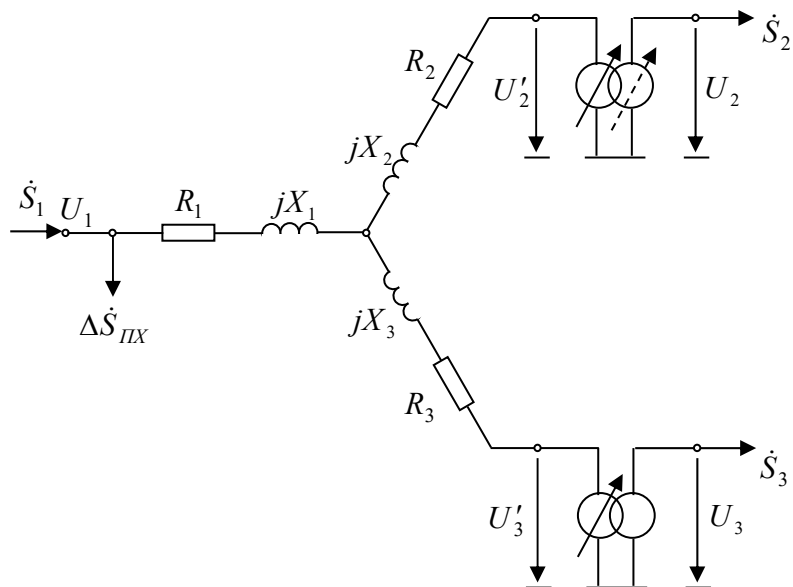
Конструктивно трите намотки са концентрични, като най-външната винаги е намотка ВН. Ако трансформаторът е понижаващ, в средата се разполага намотка СН, а до ядрото – намотка НН. При повишаващите трансформатори намотки СН и НН си разменят местата. Принципната схема на тринамотъчен трансформатор е показана на фиг.8.4. и представлява три пресичащи се кръга.

В зависимост от големината на номиналните мощности на отделните намотки тринамотъчните трансформатори се срещат в три разновидности. При първия вид трите намотки са с еднаква номинална мощност, за това те се наричат изпълнение 100/100/100%. При втория вид две намотки са оразмерени на 100% от номиналната мощност, докато третата е намалена 1,5 пъти спрямо първите две, поради което нейната номинална мощност се получава $100/1,5=66,7\%$. При третия вид съотношението на номиналните мощности на намотките е 100/66,7/66,7%. Изборът на изпълнението на тринамотъчния трансформатор за монтирането му в една или друга подстанция на електрическата система зависи от съотношението между мощностите на товара, получаващ захранване от различните намотки на трансформатора.

Всеки тринамотъчен трансформатор се характеризира със следните паспортни данни:

- номинална мощност на трансформатора S_{Tn} ;
- номинални мощности на отделните намотки на трансформатора S_{n1}, S_{n2}, S_{n3} ;
- номинални напрежения на отделните намотки на трансформатора U_{n1}, U_{n2}, U_{n3} ;
- напрежения на к.с. от трите опита на късо съединение $u_{k12}, u_{k13}, u_{k23}$;
- загуби на активна мощност от трите опита на късо съединение $\Delta P_{k12}, \Delta P_{k13}, \Delta P_{k23}$;
- загуби на активна мощност и ток от опита на празен ход $\Delta P_0, I_0$;

По паспортните данни може да се състави заместваща схема на тринамотъчния трансформатор. Такава схема, във вид на трилъчева звезда, е показана на фиг.8.5. В нея проводимостите g_T, b_T се изчисляват по формулите за двунамотъчните силови трансформатори.



Фиг.8.5.Заместваща схема на тринамотъчен трансформатор с параметри, приведени към най-високото номинално напрежение.

Активните и индуктивни съпротивления се изчисляват с отчитането на номиналните мощности на отделните намотки, затова ще се разгледат самостоятелно три отделни случая:

а) Параметри за изпълнение 100/100/100%.

Условните активни загуби на мощност във всяка от трите намотки могат да се намерят от

$$\Delta P_{k1} = 0,5(\Delta P_{k12} + \Delta P_{k13} - \Delta P_{k23})$$

$$\Delta P_{k2} = 0,5(\Delta P_{k12} + \Delta P_{k23} - \Delta P_{k13})$$

$$\Delta P_{k3} = 0,5(\Delta P_{k13} + \Delta P_{k23} - \Delta P_{k12})$$

Аналогично се изчисляват и условните напрежения на к.с.,

$$u_{k1} = 0,5(u_{k12} + u_{k13} - u_{k23})$$

$$u_{k2} = 0,5(u_{k12} + u_{k23} - u_{k13})$$

$$u_{k3} = 0,5(u_{k13} + u_{k23} - u_{k12})$$

Приведените към най-високото номинално напрежение условни съпротивления се изчисляват от

$$\begin{aligned} R_1 &= \Delta P_{k1} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2, & Z_1 &= \frac{u_{k1} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n}, & X_1 &= \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \\ R_2 &= \Delta P_{k2} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2, & Z_2 &= \frac{u_{k2} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n}, & X_2 &= \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \\ R_3 &= \Delta P_{k3} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2, & Z_3 &= \frac{u_{k3} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n}, & X_3 &= \sqrt{Z_3^2 - R_3^2} \end{aligned}$$

б) Параметри на заместващата схема за изпълнение 100/100/66,7%.

В паспортните данни на този трансформатор активната мощност и напрежението на к.с. за третата намотка се означават с $\Delta P'_{k13}$, $\Delta P'_{k23}$, u'_{k13} , u'_{k23}

Въвежда се коефициент $\alpha = S_{n1} / S_{n3}$ и с него се преизчисляват

$$\Delta P_{k13} = \Delta P'_{k13} \cdot \alpha^2, \quad \Delta P_{k23} = \Delta P'_{k23} \cdot \alpha^2, \quad u_{k13} = u'_{k13} \cdot \alpha, \quad u_{k23} = u'_{k23} \cdot \alpha$$

С така преизчислените параметри съпротивленията се определят по формулите за изпълнение 100/100/100%.

в) Параметри на заместващата схема за изпълнение 100/66,7/66,7%.

В паспортните данни на този трансформатор активните мощности и напреженията на к.с. се означават с $\Delta P'_{k12}$, $\Delta P'_{k13}$, $\Delta P'_{k23}$, u'_{k13} , u'_{k23} , u'_{k12} . За него към посоченото за изпълнение 100/100/66,7% трябва допълнително да се изчислят и $\Delta P_{k12} = \Delta P'_{k12} \cdot \alpha^2$, $u_{k12} = u'_{k12} \cdot \alpha$, след което се прилагат формулите за изпълнение 100/100/100%.