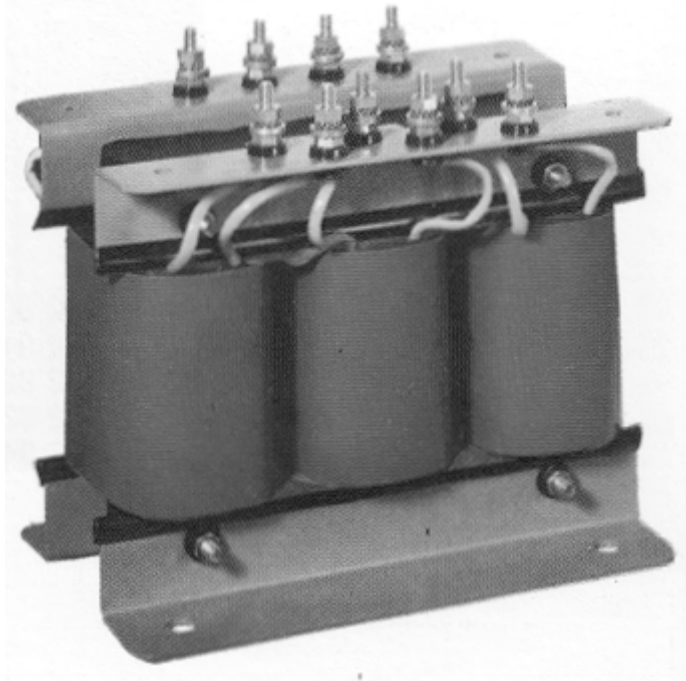


Cours d'électrotechnique

LES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

MACHINE STATIQUE A COURANT ALTERNATIF



PARTIE N°4 :

LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

TABLE DES MATIERES

1.	Description	2
1.1.	Le circuit magnétique	2
1.2.	Les enroulements	3
1.3.	Prise de réglage	3
1.4.	Le refroidissement	4
1.5.	Les bornes	4
2.	Principe de fonctionnement	5
3.	Fonctionnement en déséquilibré	8
3.1.	Le couplage triangle	8
3.2.	Le couplage étoile	9
3.2.1.	Dans un transformateur à flux libres	9
3.2.2.	Dans un transformateur à flux liés	10
3.3.	Le couplage zig-zag	10
4.	Caractéristique d'un transformateur triphasé	11
4.1.	Les couplages	11
4.2.	Repérage	11
4.3.	Grandeurs nominales	11
4.3.1.	La tension nominale	11
4.3.2.	Le courant nominal	11
4.3.3.	La puissance apparente nominale	12
4.4.	Rapport global de transformation	12
4.4.1.	Couplage Dd	12
4.4.2.	Couplage Yy	12
4.4.3.	Couplage Dy	12
4.4.4.	Couplage Yd	12
4.4.5.	Couplage Dz	12
4.4.6.	Couplage Yz	13
4.5.	L'indice horaire	13
4.5.1.	Couplage Yy en phase	13
4.5.2.	Couplage Yy en opposition	14
5.	Couplage en parallèle	14

1. Description

Pour la plupart des transformateurs triphasés, le courant qui circule dans les bobinages est relativement élevé ce qui sous-entend que les conducteurs sont soumis à des effets joule relativement important. Nous avons donc un échauffement des bobinages. Jusqu'à une puissance considérée comme faible par les constructeurs, les bobines sont refroidies par l'air ambiant c'est également le cas pour les transformateurs monophasés. Pour les transformateurs de moyenne puissance, le circuit magnétique et les bobines sont placées dans une cuve. Cette cuve est ensuite inondée d'huile non conductrice. Cette huile sert en fait de fluide colporteur. Par analogie avec les machines fournissant du froid, ou dans ce cas c'est le fréon ou l'argon qui joue ce rôle. Une réserve d'huile est placée au dessus de la cuve. Cette huile est soumise à une surveillance très stricte afin d'éviter que par dépôt de saleté dans l'huile, elle ne perde ces propriétés isolantes. Une quantité trop élevée d'impureté pourrait conduire à un phénomène de court-circuit au sein du transformateur. Pour ces transformateurs, l'huile est refroidie par contact avec les parois de la cuve. Ces parois sont d'ailleurs formées d'ailettes qui accentue l'effet de refroidissement. Pour les transformateurs de grande puissance, l'échauffement est tel qu'il faut absolument réaliser une circulation du fluide colporteur au sein de la cuve. On utilise toujours de l'huile qui est mise en circulation au sein du transformateur. L'huile est ensuite refroidie en passant dans un échangeur. Que se soit dans n'importe quel cas, l'huile une fois contaminée par des saletés n'est pas jetée mais recyclée. La plupart du temps l'huile est traitées sur place et réinjectée immédiatement après traitement. Je note encore que en aucun cas il ne faut arrêter le fonctionnement du transformateur pour effectuer ce traitement.

1.1. Le circuit magnétique

Les circuits magnétiques sont en tôles à cristaux orientés. Les tôles sont enchevêtrées avec joints droits ou avec joints obliques tout comme dans les transformateurs monophasés. Je rappelle que le choix du type de joint est fonction de la circulation du flux au sein du circuit magnétique. Pour des joints droits, le flux réalise dans les coins une courbe, tandis que pour les joints obliques, le flux réalise dans les coins une cassure à 90°. Selon le cas on obtient plus ou moins de fuite de flux donc on joue sur le rendement de la machine. Tous les transformateurs n'ont pas une forme parallépipédique, une partie ont une forme circulaire. Pour utiliser au mieux la surface interne des bobinages circulaires, on cherche à donner au circuit magnétique une section circulaire. Afin d'arriver à des résultats acceptables, on utilise des tôles de largeur différente pour réaliser des noyaux en croix et parfois en gradin.

Pour donner un ordre de grandeur, le circuit magnétique d'un transformateur de 100KVA pèse environ 300Kg. Certain transformateur de très grande puissance ont cinq colonnes, les trois du centre reçoivent les enroulements et les deux aux extrémités servent à refermer le circuit magnétique. L'avantage de ce système est que les colonnes peuvent être plus petites ce qui facilite le déplacement.

1.2. Les enroulements

Ils peuvent être concentriques ou à bobines alternées. Selon les cas un choix sera fait. Notons toutefois que le plus souvent on utilise des enroulements concentriques. Dans ce cas, l'enroulement HT est formé par des galettes superposées. Les bobinages sont en fil de cuivre ; très souvent on emploie plusieurs fils en parallèle. Ces fils changeant de position, on dit qu'ils sont permutés, pour éviter des pertes supplémentaires dues aux courants de Foucault. En basse tension les fils sont émaillés, l'isolation est constituée par des couches de coton, de soie ou de papier. Afin d'éviter au maximum des contacts entre bobinage HT et BT, un cylindre isolant est placé entre les deux enroulements. On place également entre les galettes constituant le bobinage HT des disques isolants. La chose la plus importante dans un transformateur de grande puissance est d'empêcher le déplacement des conducteurs. L'ensemble des enroulements sera donc parfaitement calé afin d'éviter tout déplacement aussi bien axial que radial. Je rappelle que mes conducteurs sont soumis sans cesse à des forces électrodynamiques dues aux courants intenses qui circulent dans le primaire et le secondaire du transformateur.

1.3. Prise de réglage

Suivant leur place dans le réseau, les transformateurs sont plus ou moins soumis aux variations de tension dues aux chutes de tension dans les lignes. Pour en tenir compte, la haute tension comporte quelques spires de réglage sur chaque phase. Notons que pour un couplage étoile il est très facile d'ajouter ou de retrancher ces spires à l'enroulement du côté du point neutre. Le réglage se fera côté du point neutre, car n'oublier pas que les extrémités des bobines sont ensuite directement reliées aux isolateurs extérieurs. On emploie pour cela un commutateur approprié qui pourra être manœuvré en charge ou à vide en fonction des cas. Notons encore que l'ajout de spires peut engendrer une variation de tension de l'ordre de 5% au secondaire.

1.4. Le refroidissement

Malgré leur rendement excellent, les transformateurs produisent une grande quantité de chaleur suite aux pertes par effet joule. Un transformateur de 10000KVA de rendement égale à 0,99 produit une puissance thermique de 100Kw. Nous devons donc envisager de refroidir plus ou moins énergiquement afin d'éviter des températures trop élevées que les bobinages ne supporteraient pas. Pour les transformateurs de faible puissance, le refroidissement naturel par l'air suffit.

A partir de quelques KVA, les bobinages et le circuit magnétique sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile minérale très fluide ou d'un liquide synthétique, le pyralène. L'huile circulant le long des bobinages et du circuit magnétique facilite le refroidissement. L'huile se refroidit elle même au contact de la cuve. Lorsque la puissance thermique augmente de façon dangereuse, on adopte les modifications suivantes. Dans un premier temps, on réalise une ondulation de la tôle de la cuve pour augmenter la surface d'échange. Si cela ne suffit pas, on place des radiateurs en tubes très aplatis. Ils sont placés autour de la cuve et la ventilation est soit naturelle soit forcée. Dans le cas le plus néfaste, un blocs de radiateur aussi appelé échangeur est placé. Une pompe permet la circulation de l'huile de la cuve vers ce dernier. Les échangeurs peuvent également être munis d'une ventilation forcée

1.5. Les bornes

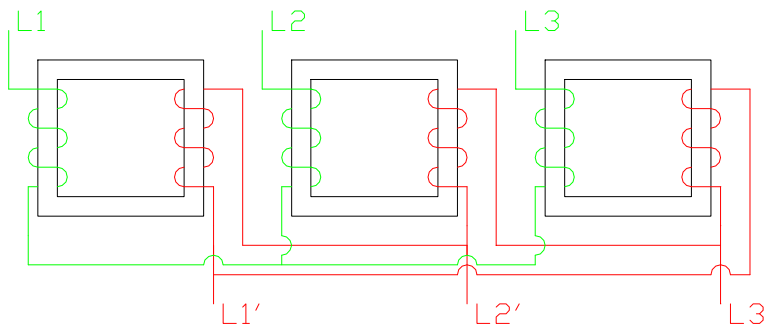
Les enroulements sont reliés aux circuits extérieurs par des bornes. Dans le cas de transformateur sous baignoire d'huile, des ouvertures sont réalisées sur le dessus de la cuve pour laisser passer les conducteurs à travers le couvercle. Pour la haute tension, ces bornes ressemblent à des isolateurs. Il est très difficile de donner des détails sur la forme et la grandeur de celles-ci car selon le lieu, la puissance et la tension, elles sont différentes.

Pour donner un ordre d'idée de la taille en fonction de la tension, sachez que pour une tension de 15KV, la partie d'une borne située au-dessus de la cuve mesure environ 15cm. Par contre pour une tension de 220KV la même partie mesure environ 2m.

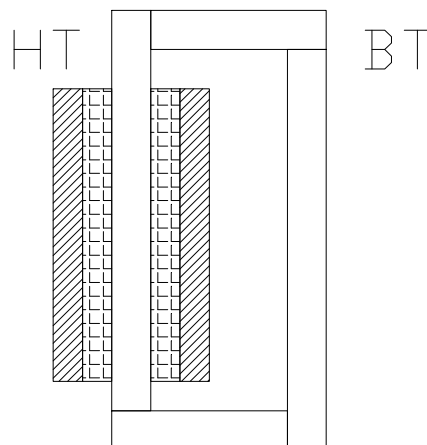
2. Principe de fonctionnement

Nous pourrions pour réaliser la transformation d'un réseau triphasé utiliser trois transformateurs monophasés. Dans ce cas, chacun de ces derniers serait alimenté par une phase. En fonction des enroulements primaires, les enroulements haute tension et basse tension seront couplés en triangle ou en étoile. Cette méthode est toutefois coûteuse et complique l'installation.

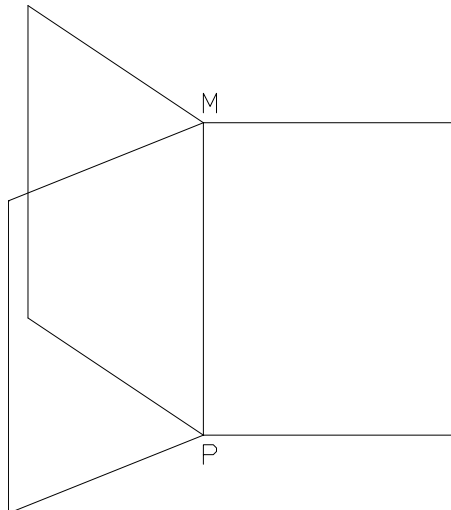
Analysons ensemble comment nous pourrions passer de trois transformateurs monophasés à un seul transformateur triphasé.



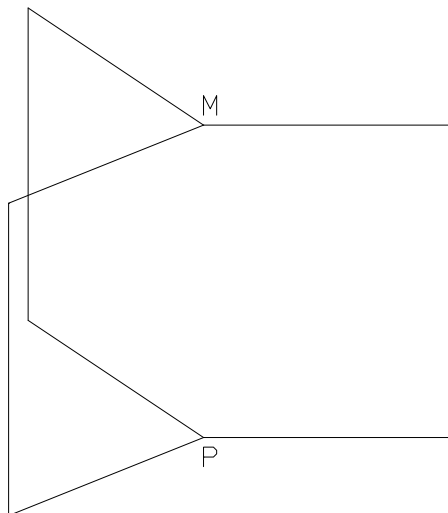
Les circuits magnétiques étant séparés, les flux dans les trois circuits magnétiques sont donc indépendants les uns des autres. Bien que nous ayons indépendances des flux, on peut tout de même dire que nous obtenons bien un réseau secondaire triphasé. Imaginons que nous ayons trois transformateurs type à colonne ayant le secondaire et le primaire bobiné sur le même noyau.



Nous voyons clairement que un des noyaux ne comporte pas de bobinage, il sert uniquement à refermer le circuit magnétique. Nous pourrions donc envisager d'utiliser le noyau d'un seul des trois transformateurs pour refermer le flux de chacun des transformateurs.



Lorsque le secondaire est à vide ou en charge, les trois enroulements primaires constituent un récepteur triphasé équilibré étant donné que ces trois enroulements sont identiques. Ces enroulements sont donc soumis chacun à des tensions qui entres-elles sont déphasées de 120° . Comme j'applique une tension sur une bobine ayant une résistance, j'ai donc circulation d'un courant dans chaque bobine et donc création de trois flux déphasés l'un par rapport à l'autre de 120° . Si on reprend les trois sinusoïdes tensions d'un système triphasé, on peut dire que en tout moment la somme vectorielle des tensions dans le cas d'un système équilibré est nulle. Si cela est vrai pour les tensions il est donc évident que cela sera également vrai pour les flux. Donc dans le noyau de retour commun aux trois circuits, je peux dire que le flux est nul. Si le flux est nul, je ne vois donc plus l'intérêt de placer le noyau de retour car se serait de l'argent jeté par la fenêtre.

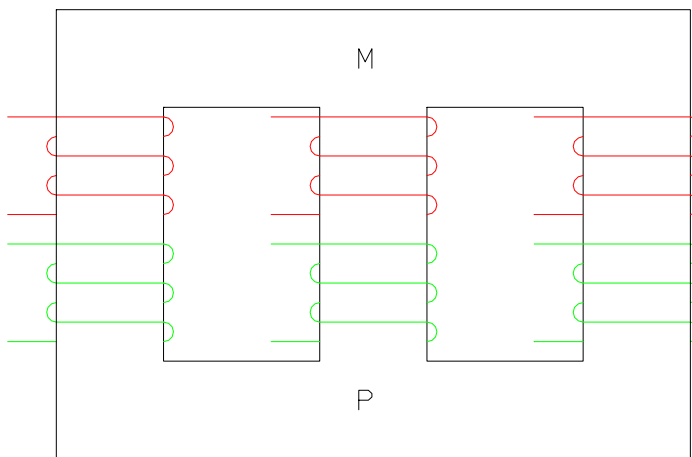


Les trois flux circulant dans les noyaux induisent dans les trois enroulements secondaires des FEM. Les flux circulant dans les noyaux portant les bobines sont soumis à un flux résultant de la combinaison de quatre flux. Le flux primaire 1, le flux primaire deux, le flux secondaire un et le flux secondaire deux. La somme de ces quatre flux me donne le flux résultant dans chaque noyau. Comme ces flux sont tous sinusoïdaux, la somme me donnera aussi un flux sinusoïdale. Comme le flux résultant est sinusoïdale, je peux envisager qu'il sera toujours déphasé de 120° par rapport au deux autres puisqu'ils sont

soumis aussi à un flux résultant. Dès lors, rien ne m'empêche d'écrire que $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$. La constance des flux est également d'application dans le transformateur triphasé, ce qui sous-entend que j'ai également équilibre des ampères tours. Donc dans un noyau donné je peux écrire que $N_1.I_1 = N_2.I_2$.

La chute de tension se produit de la même façon que dans un transformateur monophasé, chute ohmique et inductive. La théorie vue dans le transformateur monophasé est également applicable ici notamment pour les différents essais. Une seule remarque c'est que pour l'essai en court circuit, le secondaire sera toujours couplé en étoile car nous ne sommes jamais certain d'un équilibre lors d'un court circuit triangle.

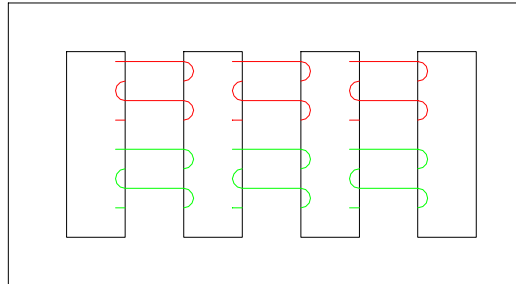
Bien que nous venions de prouver que notre transformateur permettait de produire une tension alternative triphasée, il a encore un inconvénient. Il prend de part sa situation dans l'espace beaucoup de place. Pour améliorer cela, on peut envisager de ramener le transformateur à la forme suivante :



Le transformateur dans cette configuration est dissymétrique. En effet c'est aux points M et P que le flux est nul au sein du circuit magnétique. Or, dans la phase médiane ou noyau central, la reluctance sera celle du noyau central alors que celle des autres phases sera composée de la somme des reluctances des noyaux latéraux plus la moitié de la culasse. Les conséquences de cette dissymétrie sont les suivantes. Si la reluctance augmente, cela veut dire que je vais devoir pour magnétiser le circuit magnétique augmenter le courant. Nous parlons bien ici de la composante réactive du courant absorbé. Dans notre cas je pourrais donc dire que je vais avoir une différence entre mes courants dans chaque phase. Nous savons que à vide ce problème sera très important car le courant se ramène au courant à vide et que ce dernier est majoritaire inductif. Dans le cas d'un fonctionnement en charge, le courant à vide devient négligeable vis à vis de la charge et donc l'inégalité devient insignifiante. Une solution pour lutter contre ce problème est d'augmenter la section des culasses par rapport à celle des noyaux. Ce type de transformateur est dit à flux liés.

On trouve également des transformateurs constitués de 5 noyaux dont trois seulement sont utilisés comme support pour les enroulements. Les deux autres noyaux servant uniquement au retour des flux magnétiques.

Ce type est à flux indépendants ou libres.

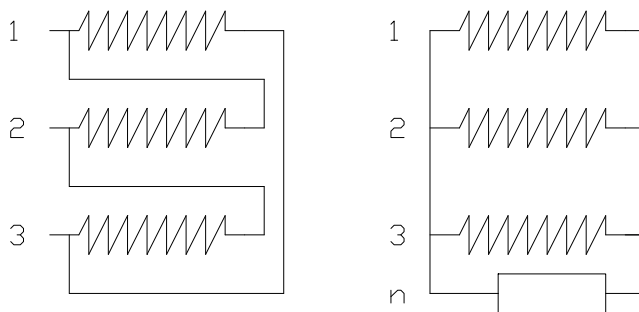


3. Fonctionnement en déséquilibré

Le déséquilibre se présente d'une façon aléatoire pour un transformateur alimentant une distribution BT à 4 fils. Le secondaire du transformateur est alors couplé en étoile, le centre de l'étoile étant réuni au fil neutre de la distribution.

Le déséquilibre le plus grave se produit lorsqu'une seule phase du secondaire est chargée. Le comportement du transformateur est différent selon le couplage du primaire.

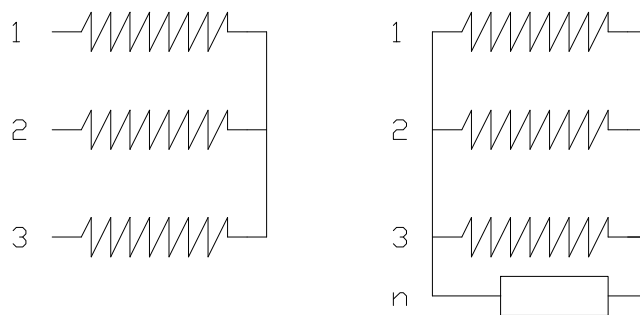
3.1. Le couplage triangle



Les ampères tours se compensent sur le noyau correspondant, le courant I_a étant fourni au primaire sans altérer les tensions appliquées à chacune des phases primaires. Le fonctionnement reste correctement équilibré en tension quelque soit le déséquilibre des courants. Analysons ensemble ce qui se passe réellement au sein de notre machine. Soit un déséquilibre du à un phénomène quelconque, ce dernier va entraîner un appel supplémentaire de courant au primaire. Cela va également entraîner une augmentation proportionnel du flux dans le noyau correspondant à cette phase . Si le flux dans ce noyau augmente, cela veut dire que la FEM elle aussi va augmentée. Donc à priori nous allons relever un

déséquilibre des tensions secondaires. Sachant que nous sommes en câblage triangle, je peut dire que tout le courant absorbé par la ligne 1 n'influence pas les autres lignes donc pas de déformation du flux dans les autres noyaux. Je sais que le flux résultant dans chaque noyau est du à la somme vectoriel de tous les flux. Comme le flux primaire augmente suite à la charge, je peux dire également que le courant secondaire de cette phase vis à vis des courants dans les autres phases va aussi augmenter. Comme ce courant augmente, le flux qu'il crée augmente aussi. Sachant que le flux est constant au sein du circuit magnétique et que j'ai équilibre des ampères tours, je peut dire que l'augmentation du courant au primaire est proportionnel à l'augmentation du courant secondaire ce qui me permet de dire que le flux dans ce noyau reste constant et que dès lors les tensions restent parfaitement équilibrées.

3.2. Le couplage étoile



Lorsque le couplage est étoile sans fil neutre comme toujours en haute tension, le courant I_1 appelé au primaire ne peut être fourni qu'à travers les enroulements 2 et 3. Sur les noyaux correspondant, il ne peut donc y avoir compensation des ampères tours et donc les effets suivants doivent être constatés.

3.2.1. Dans un transformateur à flux libres

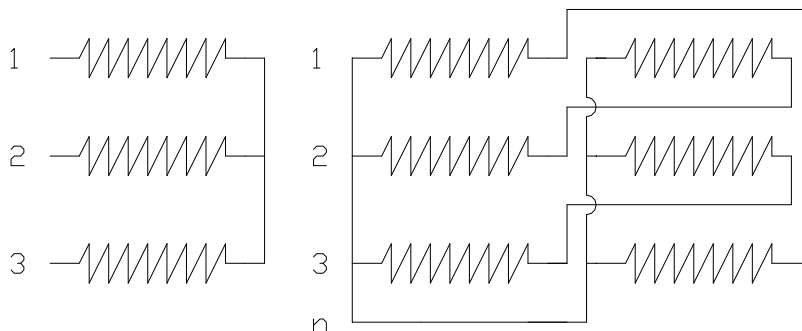
Dans un tel transformateur, tandis que le flux diminue dans la phase chargée, les flux augmentent ainsi que les tensions pour les autres phases. Analysons ensemble ce qui se passe au sein de la machine. Nous savons que la consommation d'un courant dans une phase couplée en étoile est fournie de moitié par chacune des deux autres phases. Dans notre cas, si un appel de courant est demandé dans la phase 1, cela va entraîner une demande de courant au primaire via les deux autres phases soit la 2 et 3. Donc je peux dire que la phase 1 primaire et secondaire vont toutes deux voir leur courant augmenter de façon proportionnel donc augmentation des flux mais équilibre des ampères tours puisque tout reste proportionnel. Pour les phase 2 et 3, nous n'aurons augmentation du courant dans le primaire donc augmentation du flux primaire pour ces deux phases. Comme il n'y a pas d'augmentation du courant au secondaire sur les deux phases correspondantes, je peux dire que je n'ai plus équilibre des ampères tours donc suite à cela une augmentation du flux résultant dans ces deux noyaux engendrant une augmentation des tensions secondaires pour ces deux phases.

3.2.2. Dans un transformateur à flux liés

Dans un tel type de transformateur, la liaison des flux limite leur déséquilibre, sans l'annuler complètement. D'une façon générale le fonctionnement reste admissible tant que le courant dans le fil neutre n'excède pas 20% du courant nominal de phase. Analysons ensemble ce qui se passe au sein de la machine. Nous savons que dans ce type de transformateur, les flux résultant correspondent à la somme d'une série de flux, dès lors je peux envisager que suite à cette combinaison de flux les flux résultants au sein des noyaux restent sensiblement constants ce qui limite le déséquilibre en tension. Cela ne veut toutefois pas dire que la tension reste constante.

3.3. Le couplage zig-zag

Pour conserver les avantages du couplage étoile au primaire dans le cas d'un déséquilibre très grand on a imaginé un couplage secondaire dit zig-zag. Chaque phase du secondaire est composée de deux bobines placées sur deux noyaux différents et réunies en série en sens inverse. L'ensemble des trois phases est couplé en étoile avec neutre sorti. Une première remarque est de savoir pourquoi les bobines sont elles placées en sens inverse ? Vous savez que le but est d'obtenir un flux relativement important au secondaire afin de réaliser l'équilibre des ampères tours. Si le secondaire est formé de deux bobines de phase différentes, cela veut dire que une bobine est parcourue par le courant I_1 et la seconde par le courant I_2 . C'est deux courants sont de sens opposés et de valeurs différentes. Donc si je me place dans le circuit magnétique je vais voir que les deux flux vont s'opposer pour donner un flux très faible. La solution est donc d'inverser une des bobines afin que les flux s'additionnent.



Le courant débité sur un récepteur connecté entre le neutre et la première phase produit autour du noyau 1 et du noyau 2 le même nombre d'ampères tours. Un appel de courant au primaire entrant par la borne 1 et 2 compense rigoureusement les ampères tours secondaires sur chaque noyau. Les flux et les tensions restent équilibrés quelque soit le déséquilibre des courants secondaires. Analysons ensemble ce qui se passe au sein de la machine. Si j'ai appel d'un courant sur la phase 1 du secondaire, via une charge câblée entre le neutre et cette phase, je peux dire que je vais créer un flux supplémentaire sur la colonne 1 et 2 ce qui va entraîner un appel de courant sur les phases primaire 1 et 2 afin de garder le flux constant donc les ampères tours . Si

chaque phase produit un flux supplémentaires proportionnel à la moitié du flux supplémentaire produit par le secondaire, je peux dès lors dire que le flux résultant reste constant et que dès lors la tension reste constante au secondaire.

Ce couplage présente cependant l'inconvénient de mettre en série pour chaque phase du secondaire les tensions de deux bobines, tensions déphasées l'une par rapport à l'autre. Pour obtenir la même tension secondaire qu'avec un couplage étoile normal, il faut 1,6 fois plus de spires secondaires ; donc un transformateur plus chers et de moindre rendement.

4. Caractéristique d'un transformateur triphasé

4.1. Les couplages

L'association d'un mode de connexions des enroulements primaires d'un transformateur d'une part et d'un autre mode de connexions des enroulements au secondaire constitue un couplage.

Les différents types de couplage sont :

- Etoile
- Triangle
- Zig-zag

4.2. Repérage

Pour un transformateur triphasé, on repère les bornes de la façon suivante :

- lettres majuscules pour la haute tension
- lettre minuscule pour la basse tension

Au primaire, seul les couplages étoile et triangle sont employés.

Au secondaire on utilise le couplage étoile, triangle et zig-zag.

Nous avons donc six combinaisons possibles :

Dd, Dy, Dz, Yd, Yy, Yz, pour le cas où le transformateur est abaisseur
dD, dY, dZ, yD, yY, yZ, pour le cas où le transformateur est élévateur

4.3. Grandeurs nominales

4.3.1. La tension nominale

C'est la tension composée au primaire ou/et au secondaire. C'est celle aux bornes d'un enroulement uniquement dans le cas du couplage triangle.

4.3.2. Le courant nominal

C'est le courant admissible dans un fil de ligne

4.3.3. La puissance apparente nominale

C'est $\sqrt{3}$ fois le produit des valeurs nominales de la tension et du courant.

4.4. Rapport global de transformation

4.4.1. Couplage Dd

$$m_1 = m = \frac{U_1}{U_2}$$

4.4.2. Couplage Yy

$$m_1 = m = \frac{U_2 \cdot \sqrt{3}}{U_1 \cdot \sqrt{3}} = \frac{U_2}{U_1}$$

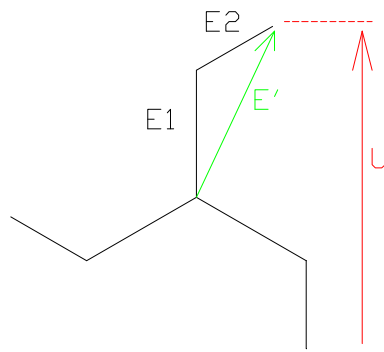
4.4.3. Couplage Dy

$$m_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2}{U_1} = \sqrt{3} \cdot m$$

4.4.4. Couplage Yd

$$m_1 = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

4.4.5. Couplage Dz



$$\begin{aligned} E' &= \frac{U_2}{\sqrt{3}} & U_2 &= E' \cdot \sqrt{3} \\ E' &= \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi} \\ E_1 &= E_2 = \frac{E}{2} & \varphi &= 120^\circ \end{aligned}$$

$$E' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot E$$

$$m1 = \sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E}{U1} = m \cdot \frac{3}{2}$$

4.4.6. Couplage Yz

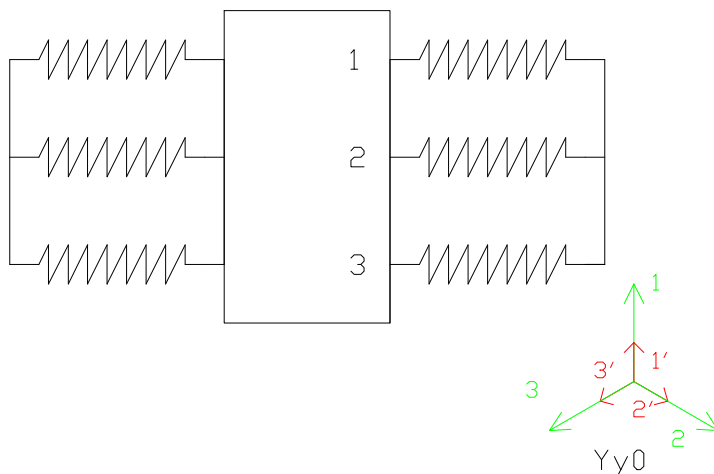
$$m1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{E}{U1} = m \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

4.5. L'indice horaire

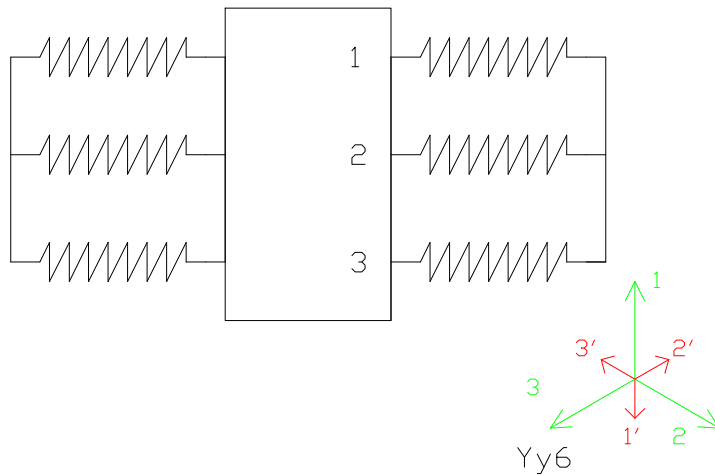
4.5.1. Couplage Yy en phase

Pour le couplage de deux transformateurs triphasés en parallèle, il est nécessaire de connaître le déphasage entre les FEM simples de deux enroulements montés sur une même colonne. Ce déphasage est toujours un multiple de 30°. Or 30° et ses multiples sont justement les divers angles que forment les deux aiguilles d'une horloge celle-ci indique les heures exactes. De ce fait, il a été convenu de superposer le vecteur représentatif de la tension primaire à la grande aiguille et le vecteur représentatif de la tension secondaire à la petite aiguille. L'heure indiquée par cette tension secondaire constitue l'indice horaire. Ce dernier dépend du mode de connexion du primaire et du secondaire et du sens relatif des enroulements sur une même colonne. En effet, sur une même colonne les deux bobines peuvent être de même sens ou opposées.

Quelque soit le type de couplage, vous devez toujours ramener votre diagramme vectoriel en tension simple.



4.5.2. Couplage Yy en opposition



5. Couplage en parallèle

Pour fonctionner en parallèle des transformateurs triphasés doivent avoir le même rapport de transformation, la même chute de tension et en plus le même ordre de succession des phases. Je peux conclure que les transformateurs doivent avoir le même indice horaire.

Le couplage Yd 11 est employé comme élévateur de tension au départ des centrales ou en distribution sur un réseau assez bien équilibré.

Le couplage Yy 0 est employé comme réducteur de tension entre un réseau haute tension et un réseau moyenne tension.

Le couplage Yz 11 est employé en distribution sur réseau mal équilibré.

1. Exercices

- 1) On lit dans le catalogue d'un constructeur les renseignements suivants concernant un transformateur triphasé : 23KV – 400V, 100KVA, $P_{1v}=320w$, $I_{1v}=2,5\%$, $p_j=1750w$, $U_{1cc}=4\%$, chute de tension sur charge purement résistive 1,81% et pour un facteur de puissance de 0,8 de 3,58%. Calculez les courants nominaux primaires et secondaires, le courant à vide, la tension de court-circuit, le rapport de transformation et les valeurs relatives des chutes de tension ohmique et inductive ainsi que l'impédance globale rapportée au secondaire.

$$S=\sqrt{3}.U_1.I_{1n}=\sqrt{3}.U_2.I_{2n}=100KVA$$

$$I_{1n}=\frac{S}{\sqrt{3}.U_1}=\frac{100000}{\sqrt{3}.23000}=2,6A$$

$$I_{2n}=\frac{S}{\sqrt{3}.U_2}=\frac{100000}{\sqrt{3}.400}=144A$$

$$I_{1v}=\frac{2,5.2,6}{100}=0,065A$$

$$U_{1cc}=\frac{23000.4}{100}=920V$$

$$1,81=\frac{\Delta U}{U_{2v}}.100 \quad \Delta U=U_{2v}-U_1$$

$$1,81=\frac{U_{2v}-U_1}{U_{2v}}.100 \quad U_{2v}=407,2V$$

$$m=\frac{U_{2v}}{U_1}=\frac{407,2}{23000}=0,0177$$

si $\cos\varphi_2=1$ (résistif) $\Delta U=1,81$ car $\sin\varphi_2=0$ $r=1,81$

si $\cos\varphi_2=0,8$ $\sin\varphi_2=0,6$ $\Delta U=3,58=0,8.r + 0,6.x$ $x=3,55$

$$R_s=\frac{r}{100} \cdot \frac{U_{2v}}{I_{2n}}=0,051ohm$$

$$X_s=\frac{x}{100} \cdot \frac{U_{2v}}{I_{2n}}=0,1ohm$$

$$Z_s=\sqrt{R_s^2+X_s^2}=0,112ohm$$

ou encore $Z_s=\frac{m.U_{1cc}}{I_{2n}}=\frac{0,0177.920}{144}=0,113ohm$

- 1) Un transformateur triphasé de 3000 spires par noyau au primaire et 35 spires par noyau au secondaire. Il est alimenté sous 10KV, calculer les tensions simples et composées obtenues au secondaire.
- 2) Un transformateur triphasé possède 2000 spires par noyau pour le bobinage HT de 50 spires par noyau pour le bobinage BT . Calculer les rapports de transformation globaux obtenus par les couplages Dd, Yy, Yd et Dy.
- 3) Un transformateur triphasé comporte sur chaque noyau un bobinage HT de 5000 spires et deux bobinages BT de 50 spires. Le primaire HT est alimenté sous 15KV entre phases. Quelle sera la tension secondaire à vide entre phases pour les couplages Yy0 et Yz11 ? Justifier par un diagramme vectoriel l'indice horaire du couplage Yz.
- 4) Un transformateur triphasé est 70000KVA. Quand l'appareil débite à pleine charge dans un réseau dont le facteur de puissance est 0,8, il a un rendement de 0,983. Quelle est alors la puissance perdue en chaleur ? Quelle est la quantité de chaleur exprimée en kilocalories produite à l'heure ? On rappelle que 1Kwh équivaut à 860 kilocalories. Combien faut-il de mètres cubes d'eau pour enlever cette chaleur sachant que la température de l'eau augmente de 30° dans le réfrigérateur d'huile ?
- 5) Un transformateur triphasé 70000 – 15000V débite 2000KVA à pleine charge sous 15000V dans un réseau dont le facteur de puissance est de 0,8. Quel courant fournit-il ? Quelle puissance active débite-t-il ? Le rendement de l'appareil est alors de 0,98. Quelle est la puissance active absorbée au primaire ? Quel est le courant primaire, le facteur de puissance primaire étant de 0,78 ?
- 6) Trois transformateurs monophasés 380V – 127V sont identiques. On branche les primaires en triangle sur un réseau triphasé 380V entre phases et l'on réunit trois bornes des secondaires pensant obtenir ainsi un couplage étoile. Si le couplage est correct quelles tensions simples et composées doit-il fournir ? On constate avec un voltmètre qu'il existe bien 127V entre la borne commune et chacune des extrémités libres a,b et c des secondaires ; mais l'on mesure 127V entre a et b, b et c et 220V entre a et c. Expliquer. Indiquer les modifications à effectuer pour obtenir réellement un couplage étoile.
- 7) Un transformateur triphasé Dy comporte par noyau 5000 spires et 40 spires. Quelle est la tension secondaire à vide pour une tension d'alimentation de 15KV. En charge on a effectué les mesures suivantes : au primaire $U_1=15KV$, $I_1=3,25A$ et $P_1=72080w$. Au secondaire $U_2=200V$, $I_2=232A$ et $P_2=70640w$. Calculer le rendement du transformateur, les facteurs de puissances primaires et secondaire de même que la chute de tension en pourcent.
- 8) Un transformateur de 50KVA a des pertes à vide de 254w. En charge, pour un facteur de puissance de 0,8, son rendement est 0,96. Il fonctionne à pleine charge pendant 6 heures par jour, pendant 18 heures il est à vide. Calculer l'énergie active utile fournie pendant une journée, l'énergie active consommée pendant une journée et le rendement journalier moyen.
- 9) Montrer que, quel que soit le couplage, le rapport des courants primaire et secondaire dans un essai en court-circuit est égale au rapport global de transformation $m = \frac{I_{1cc}}{I_{2cc}}$.
- 10) Un transformateur triphasé 23KV – 400V – 50Hz a les caractéristiques suivantes : pertes à vide de 900w, courant à vide de 2,9%, pertes cuivre de 700w, tension de court-circuit de 4%, un rendement sous facteur de puissance de 0,8 de 3,77%. Calculer le rapport global de transformation, la chute de tension pour un facteur de puissance de 0,8 à demi charge et le rendement à pleine charge pour le même facteur de puissance.
- 11) Deux transformateurs triphasés 23KV – 400V de puissances nominales 400KVA et 500KVA sont montés en parallèle. On relève dans le catalogue du constructeur les tensions de court circuit de 1,23 et 1,17% ? Quelle est la puissance maximale que peut fournir l'ensemble des deux transformateurs.
- 12) Un transformateur triphasé à 20 fois plus de spires au primaire qu'au secondaire. LA tension d'alimentation est de 100KV. On demande la tenion aux bornes du secondaire suivant un des couplages Dd, Dy, Yd, YY, Yz et Dz.

- 13) Un transformateur triphasé d'une puissance continue de 50Hz Yy, 50Hz est raccordé sur un réseau HT de 6000V et donne à vide une tension secondaire de 240V. Déterminez la valeur des intensités primaire et secondaire par phase.
- 14) Un utilisateur reçoit son énergie sous forme triphasée à 6000V 50Hz et désire pour les besoins de son exploitation abaisser autant que possible cette tension à 700V. Il possède un transformateur triphasé comprenant 2700 spires par bobine primaire et 180 spires par bobine secondaire. On demande de rechercher les couplages qu'il devra adopter.
- 15) Un transformateur triphasé possède 500 spires sur chaque bobine primaire et 40 sur chaque demi bobine secondaire. Le primaire est connecté en triangle sur 1000V et le secondaire en zig-zag. Quelle est la tension aux bornes du secondaire.
- 16) Cherchez le rendement d'un transformateur triphasé dont le primaire est en triangle et le secondaire en étoile. Le primaire est alimenté sous 6000V entre phase et a une résistance de 30 ohms par phase. Le secondaire donne 220V entre phases et courant débité par phase est de 130A. LA résistance du secondaire est de 0,01 ohm par phase. Le facteur de puissance est de 0,8 et les pertes à vide de 350w.
- 17) Un transformateur triphasé de 65000/5500V 50Hz couplage Yd a comme section du noyau 1240cm². Calculez le flux, le nombre de spires primaires et secondaires par colonne, si on admet une induction de 1,4T ?
- 18) Un transformateur triphasé de 88KVA couplage Dy possède les caractéristiques suivantes : $E_1=425V$, $E_2=10,2V$, $U_{1cc}=1,8\%$ et le rendement vaut 97,5%. Calculer le courant primaire, le courant secondaire et l'hypothénuse du triangle de KAPP.