Sciences Appliquées

Les transformateurs monophasés

1 -Fonctionnement d'un transformateur....2
1.1.Constitution....2
1.2. Principe de fonctionnement des transformateurs....2
1.3.Dimensionnement....3
1)Formule de Boucherot....3
2)Rapport de transformation....3
2 -Modèle équivalent....4
2.1 -Les bornes homologues....4
2.2 -Transformateur parfait....4
2.3 -Impédance ramenée au secondaire....4
2.4 -Transformateur réel....5
1)Magnétisation de la machine....5
2)Les pertes fer....5
3)Les pertes Joule....5
4)Les chutes de flux....5
5)Modèle équivalent du transformateur réel....6
6)Bilan des puissances et rendement....6
2.5 -Chute de tension au secondaire....6
3 -Choix et protection de transformateurs....7
3.1 -Choisir un transformateur....7
1)Domaines d'utilisation....7
2)Plaque signalétique....7
3.2 -Dimensionner les protections....8
4 -Mise en service....9

Ce cours portera sur l'utilisation des transformateurs en régime sinusoïdal.

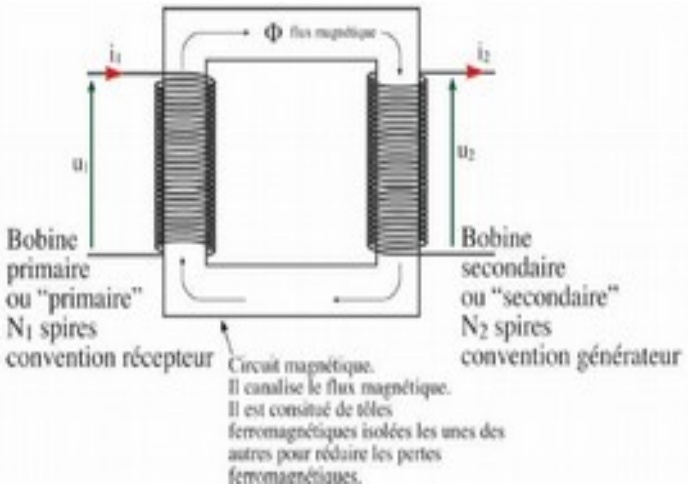
Les **transformateurs électriques** sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser la tension et le courant d'un circuit électrique sans modifier la fréquence, ni la forme . Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

1 -Fonctionnement d'un transformateur

1.1. Constitution

Un transformateur comporte :

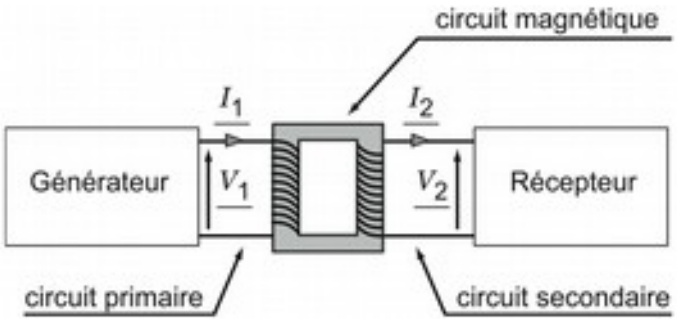
- un circuit magnétique constitué de tôles de matériaux ferromagnétiques (ou ferrimagnétiques) et éventuellement d'entrefers.
- de deux bobinages (ou plus), l'un est appelé primaire, les autres secondaires.
- Les deux circuits électriques sont **sans liaison électrique entre eux.**



Sur la figure ci-dessus, le bobinage de gauche est le primaire, celui de droite est le secondaire.

1.2. Principe de fonctionnement des transformateurs.

- L'énergie électrique au primaire est transformée en énergie magnétique dans le circuit magnétique.
- L'énergie magnétique est retransformée en énergie électrique dans le circuit secondaire.



Le phénomène d'induction transforme une variation de flux magnétique en tension :

loi de Lenz-Faraday $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$)

Dans l'hypothèse du flux forcé : le matériau n'est pas saturé et le flux est sinusoïdal ; la tension au secondaire est sinusoïdale, de même fréquence que la tension au primaire.

1.3. Dimensionnement

1) Formule de Boucherot.

Remarque importante : la relation suivante n'est utilisable qu'en régime sinusoïdal de tension.

Cette formule vient directement de la loi de Faraday appliquée à un champ magnétique sinusoïdal.

$$V = 4{,}44\ N\ f\ S\ B$$

- V est l'expression de la tension efficace aux bornes d'un enroulement.
- B est l'amplitude du champ magnétique variable.
- S est la section du circuit magnétique autour duquel l'enroulement est bobiné.
- N est le nombre de spire de l'enroulement.
- f est la fréquence de la tension appliquée à l'enroulement.

La formule de Boucherot établit un lien entre la tension sinusoïdale aux bornes d'un enroulement bobiné autour d'un circuit magnétique et le champ magnétique dans ce circuit.

INTÉRÊTS

Si V et B sont fixés, une augmentation de la fréquence permet diminuer S, donc de réduire la taille du circuit magnétique.

Déterminer l'amplitude du champ magnétique dans le circuit magnétique permet de vérifier la non saturation du matériau (si saturation, la tension secondaire ne sera plus sinusoïdale).

2) Rapport de transformation

Rapport de transformation par colonne m_C

C'est le rapport du nombre de spires au secondaire sur le nombre de spires au primaire, s'ils sont traversés par le même flux : $m_C = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{20}}{E_1}$

où N_2 et N_1 sont les nombres de spires au primaire et au secondaire.

E_{20} est la tension aux bornes de la bobine du secondaire <u>à vide</u>.

E_1 est la tension aux bornes de la bobine du primaire.

Rapport de transformation m

Rapport entre la tension secondaire à vide sur la tension primaire : $m = \frac{U_{20}}{U_1}$.

où U_{20} est la tension au secondaire <u>à vide</u> et U_1 est la tension aux bornes du primaire.

Remarque : m et m_C sont égaux pour un transformateur monophasé

2 -Modèle équivalent

2.1 - Les bornes homologues.

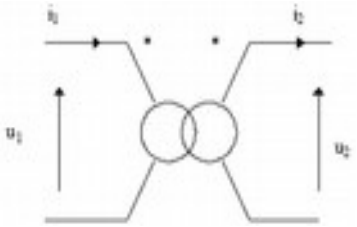
L'intérêt du repérage des bornes homologues :

- Dans le couplage en parallèle de transformateurs monophasés.
- Repérage de l'indice horaire des transformateurs triphasés en vue d'un couplage en parallèle ou d'une optimisation du couplage en fonction de l'utilisation.

Détermination des bornes homologues (Voir TP) :

- *avec un oscilloscope*
- *avec un voltmètre*

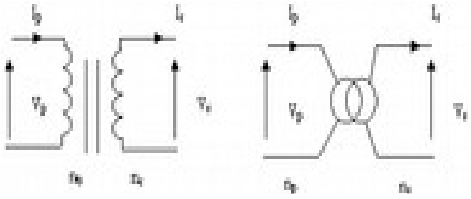
Les bornes homologues sont repérées par un point



2.2 - Transformateur parfait

Un transformateur parfait est un transformateur sans pertes : pas de pertes par effet Joule dans le bobinage et pas de pertes dans le circuit magnétique.

Les symboles usuels sont donnés ci-contre.

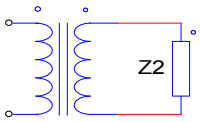


L'indice 1 ou p est affecté à toutes les grandeurs au primaire ; l'indice 2 ou s à celles du secondaire.

Les puissances P, Q et S sont intégralement transmises. On déduit que $m=\frac{U_{20}}{U_1}=\frac{i_1}{I_2}$.

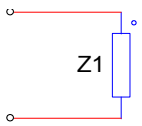
2.3 - Impédance ramenée au secondaire

Si le transformateur débite dans une charge d'impédance Z_2, on peut ramener l'impédance au primaire grâce aux relations entre les grandeurs.



$$S=Z_2 I_2^2=Z_1 I_1^2=Z_1(mI_2)^2$$

Le réseau alimentant le transformateur voit alors une impédance



$$Z_1=\frac{Z_2}{m^2} \quad \text{soit} \quad Z_2=m^2 Z_1$$

2.4 - Transformateur réel

Pour modéliser un transformateur réel, il existe plusieurs modèles. Le plus souvent, ces modèles tentent de rendre compte des pertes et des chutes de tension en charge. On ajoute alors au transformateur idéal des dipôles linéaires permettant de modéliser les pertes mais aussi les chutes de tension lors d'un fonctionnement en régime sinusoïdal à la fréquence d'utilisation

1) Magnétisation de la machine

Le bobinage primaire se comporte comme une bobine. À vide, le transformateur crée le flux magnétique. La puissance nécessaire est réactive. La consommation de cette puissance sera représentée par l'inductance magnétisante L_M .

2) Les pertes fer

Les pertes dans le circuit magnétique, également appelées « pertes fer » échauffent le matériau ; elles dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. À fréquence constante, on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation. Ces pertes ont deux origines physiques :

- **les pertes par courants de Foucault.** L'induction crée des courants au sein du noyau de fer, ces courants échauffent ce dernier par effet joule. On limite leur effet en feuilletant le circuit magnétique.
- **les pertes par hystérésis**, le changement permanent de direction du flux oblige le fer à se réorienter lui aussi en permanence, cela crée des frottements. Elles sont minimisées par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique doux. En effet, elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis, celui-ci doit donc être le plus étroit possible, d'où les matériaux doux.

Elles sont représentées par une résistance R_F (au primaire) soumise à la tension d'alimentation.

3) Les pertes Joule.

Les pertes par effet Joule dans les enroulements sont appelées également « pertes cuivre », elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse : elles sont proportionnelles au carré de l'intensité. Elles sont représentées par une résistance R_S (au secondaire) traversée par le courant I_2.

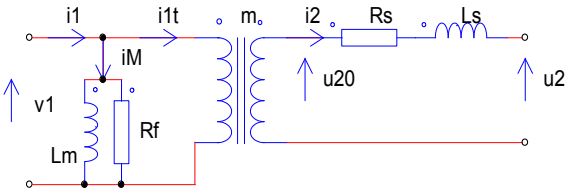
4) Les chutes de flux

L'intégralité du flux crée par le primaire ne traverse pas le circuit secondaire : ce sont les chutes de flux. Elles sont représentées par une inductance ramenée au secondaire L_S .

5) Modèle équivalent du transformateur réel

Le modèle équivalent du transformateur réel est donné ci-contre.

En régime nominal, le courant de travail i_{1t} est très supérieur à i_m .



6) Bilan des puissances et rendement

D'après le théorème de Boucherot : $P_1 = P_2 + P_{Rf} + P_{Rs}$; $Q_1 = Q_2 + Q_{Lm} + Q_{Ls}$

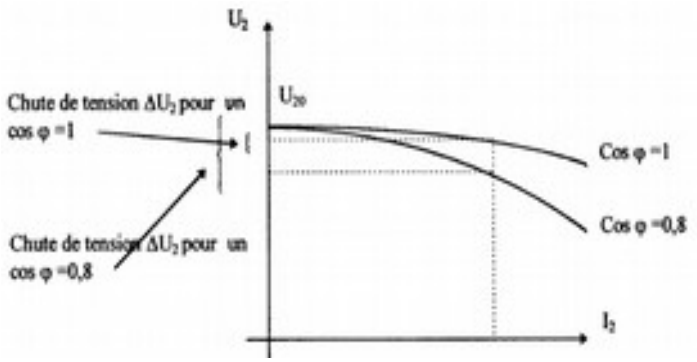
Le rendement s'effectue sur les puissances actives : $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

2.5 - Chute de tension au secondaire

Contrairement à un transformateur parfait, pour un transformateur réel, la tension U_2 en charge est différente de la tension à vide U_{20} . U_2 diminue lorsque l'intensité I_2 du courant débité au secondaire augmente. La différence entre U_{20} et U_2 est la chute de tension au secondaire du transformateur.

Cette chute de tension est due aux résistances des enroulements et aux fuites magnétiques.

La chute de tension dépend du déphasage de la charge au secondaire φ_2 .



$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2$$

$$\Delta U_2 = R_S I_2 \cos\phi_2 + L_S \omega I_2 \sin\phi_2$$

3 -Choix et protection de transformateurs

3.1 - Choisir un transformateur

Les choix sont à faire en fonction de la technologie des transformateurs, des types de charges qu'ils alimentent, et surtout des agressions qu'ils subissent : Cahier Technique Schneider n°192

1) Domaines d'utilisation

Transformateur de puissance

Les transformateurs jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance.

Le transport de grandes puissances sur de grandes distances ne peut être réalisé de façon économique que s'il est effectué à très haute tension. Il est donc nécessaire d'installer, à proximité immédiate des centres de production, des transformateurs « élévateurs » de tension.

On devra trouver des appareils « abaisseurs » aux points de fourniture de l'énergie électrique.

Transformateur d'isolement

Un transformateur d'isolement permet de changer de régime de neutre. Il ne change pas les caractéristiques de l'énergie électrique.

2) Plaque signalétique

La plaque signalétique aidera au choix du transformateur pour l'alimentation de la charge mais aussi pour dimensionner les protections nécessaires.

3.2 - Dimensionner les protections

Courants nominaux

Afin de calculer les courants primaire et secondaire en vue du dimensionnement des protections et de la charge, on utilise la puissance apparente du transformateur. Les valeurs calculées pour les courants sont approximatives mais permettent d'avoir une valeur approchée.

$S = U_1 I_1 = U_{20} I_2$

Pouvoir de coupure

Le calcul des courants de court-circuit en tout point du réseau permet le dimensionnement d'une installation électrique et des matériels à mettre en œuvre, la détermination des protections des personnes et des biens.

Le courant maximal de court-circuit détermine : le pouvoir de coupure (PdC) des disjoncteurs, le pouvoir de fermeture des appareils, la tenue électrodynamique des câbles ou des canalisations et la sécurité des protections.

La tension de court-circuit d'un transformateur est déterminée en plate forme d'essais. L'essai consiste à court-circuiter le secondaire du transformateur et d'appliquer au primaire une tension sinusoïdale réglable Uo telle que celle-ci permette d'obtenir le courant nominal au secondaire :

on calcule la grandeur Ucc (%) : $Ucc(\%) = \frac{Uo \,.\, 100}{U_{1N}}$ Exprimée en %

U_{1N} est la tension primaire nominale.

Ucc(%) permet de calculer l'impédance secondaire du transformateur : $Z_2 = \frac{U_{20}^2 \, x \, Ucc(\%)}{S}$

donc le transformateur est construit avec une impédance de fuite choisie.

Il est courant d'avoir des transformateurs avec un Ucc(%) de l'ordre 4 à 8% . Attention tout de même des gros voire très gros transformateurs dont le Ucc(%) peut atteindre les 20%.

Pour associer des transformateurs en parallèle, il faut que les impédances secondaires soient de même valeur, sinon, un transformateur « travaillera » plus que l'autre.

4 -Mise en service

Bornes homologues

Il est indispensable de repérer les bornes homologues lorsqu'on veut associer des transformateurs. Un mauvais branchement impliquera des court-circuits et l'ouverture des protections.

Prise en compte des pertes

Un transformateur présente des pertes à vide (ou pertes "fer") constantes quelle que soit la puissance appelée, et des pertes en charge variables. Il est important de tenir compte de ces pertes dans le choix d'un transformateur, car celles-ci vont se répercuter tout au long de sa vie.
En fonction de leurs aspects constructifs, tous les transformateurs ne présentent pas les mêmes pertes. La réduction des pertes se réalisant par l'augmentation des quantités de matériaux du transformateur, cela s'accompagne d'une augmentation du coût.

Prise en compte de la chute de tension

Sur un transformateur, la tension secondaire peut être ajustée. Pour obtenir la tension secondaire souhaitée, on modifiera le rapport de transformation en augmentant ou diminuant le nombre d'enroulements primaires par la barrette de réglage.

Lors de la mise en parallèle de 2 transformateurs, la chute de tension devra être identique. Dans le cas contraire, les 2 transformateurs ne fourniront pas la même puissance : l'un des 2 transformateurs limitera le fonctionnement.