

Chapitre 7 : Transformateurs monophasés et triphasés

Table des matières

Introduction.....	2
Principale fonction d'un transformateur.....	2
Autres usages du transformateur	3
Le transformateur monophasé.....	4
Constitution, Symboles et différents types	4
Circuit magnétique d'un transformateur monophasé	5
Principe de fonctionnement du transformateur monophasé.....	6
Le transformateur parfait ou idéal	7
Le transformateur réel	9
Les transformateurs triphasés	12
Principaux couplages	12
Dénominations adoptées pour le cours	13
Rapport de transformation d'un transformateur triphasé	13
Caractéristiques des différents couplages.....	14

Introduction

Principale fonction d'un transformateur

Un transformateur est une machine statique permettant de transformer l'énergie électrique sans aucun mouvement. La tension et le courant à l'entrée d'un transformateur ont la même fréquence. Le transformateur fonctionne sous le principe de l'induction électromagnétique (*apparition d'une f.é.m. aux bornes d'un conducteur électrique soumis à un flux magnétique variable*). Le transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Par exemple les pertes Joule en ligne durant le transport de l'énergie électrique, sont d'autant plus importantes que le courant sera élevé (voir équation 7-1).

$$p_J = R_\ell \cdot I^2 \quad (7.1)$$

À puissance transportée constante, l'utilisation d'une **tension élevée** donnera lieu à un **courant faible**, car la puissance est le produit de la tension par le courant. Ainsi, afin de **minimiser au maximum les pertes en ligne**, il faut transporter un courant le **plus faible possible** et donc **élever le niveau de tension avant le transport**. Généralement le transport de l'énergie se fait en Haute tension (HT) ou Très Haute Tension (THT). Pour élever la tension fournie par les générateurs, on utilise un **transformateur**.

Par ailleurs, des tensions élevées imposent des **mesures de sécurité plus exigeantes** comme par exemple, les problèmes d'isolation des conducteurs. Ainsi, il n'est donc pas envisageable d'alimenter des bâtiments avec de tels niveaux de tension. Une fois le transport effectué, l'énergie électrique doit être **distribuée en basse tension** et on doit alors faire recours à un **autre transformateur dit de type abaisseur** cette fois-ci.

En résumé l'une des principales fonctions d'un transformateur est de permettre à ce **que l'énergie électrique soit transportée sur de longue distance de façon économique et d'être distribuée en sécurité dans les industries et les habitations**. À titre indicatif, les niveaux de recommandés par divers organismes de normalisation sont fournis dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. Niveaux de tension

Dénomination	Niveaux de tension
Basse Tension (BT)	$V \leq 600 V$
Moyenne Tension (MT)	$2.4 kV \leq V \leq 69 kV$
Haute Tension (HT)	$V \leq 230 kV$
Très Haute Tension (THT)	$V \leq 765 kV$

Brief historique : Le transport de l'énergie se fait en alternatif pour des raisons historiques. Après le début de l'électrification à la fin du 19^e siècle, l'énergie ne pouvant ni n'être transportée en basse tension et ni être distribuée en haute tension, la nécessité du convertisseur est apparue et à cette époque, le seul appareil permettant de réaliser cette conversion fut inventé en 1883 et amélioré en 1886 par Lucien Goulard (voir **Figure 7. 1**). L'équivalent du transformateur en courant continu est appelé le **hacheur** il est conçu à partir des composants à semi-conducteurs qui n'ont été découverts que plus tard.



Lucien Goulard (1850-1888)



Figure 7. 1. Premiers transformateurs

Autres usages du transformateur

Dans la section précédente, il a été évoqué le transformateur seulement dans le transport et la distribution de l'énergie, la plupart des transformateurs utilisés dans le transport de l'énergie électrique sont de type **triphasé** et feront l'objet de la troisième partie de ce cours. Pour des raisons de flexibilité, certains transformateurs triphasés sont obtenus en interconnectant trois transformateurs monophasés. Les figures ci-dessous, montrent respectivement les transformateurs de distribution américain et européen.



Figure 7. 2. Transformateur de distribution : à gauche (américain) et à droite (européen)

En plus des transformateurs de puissance, on trouve des transformateurs de mesure de courant (CT : Current transformer) et de tension TT et des transformateurs électroniques pour l'adaptation d'impédance.



Figure 7. 3. Autre usage des transformateurs : à gauche, transformateur de mesures et à droite, transformateurs électroniques.

Le transformateur monophasé

Constitution, Symboles et différents types

Un transformateur est constitué de **deux bobines couplées** par un **circuit magnétique**. Le schéma de constitution d'un transformateur monophasé est montré sur la **Figure 7. 4**. Les deux circuits électriques sont **non liés électriquement** (c.-à-d isolés l'un de l'autre) et enroulés autour du circuit magnétique.

- Le circuit électrique qui reçoit le courant est appelé **circuit primaire** ou simplement **primaire**. On utilisera l'indice **1** pour les grandeurs électriques liées à ce circuit. Par exemple $v_1(t)$ et V_1 seront utilisés pour respectivement désigner la **tension instantanée** et la **tension efficace** au **primaire**.
- Le circuit électrique de sortie du transformateur est appelé **circuit secondaire** ou simplement **secondaire**. On utilisera l'indice **2** pour toutes les grandeurs liées au secondaire du transformateur. Par exemple I_2 et P_2 représenteront respectivement le **courant efficace** et la **puissance active** au secondaire du transformateur.
- La troisième partie du transformateur est le **noyau magnétique** qui est la partie C de la figure ci-dessous.

Du point de vue électrique, le primaire est un **récepteur électrique** et le secondaire est un **générateur électrique**.

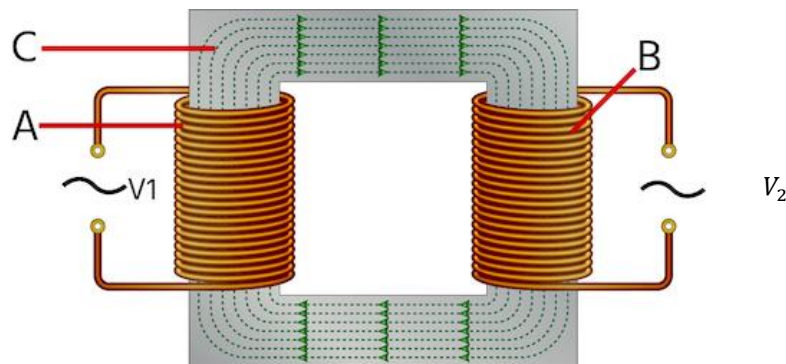


Figure 7. 4. Schéma de **constitution d'un transformateur monophasé**

Remarque : Le circuit primaire et secondaire n'étant pas lié électriquement, on dit qu'il existe une **isolation galvanique** entre ces deux circuits. Par conséquent, si un courant de fuite se produit au secondaire du transformateur, celui-ci ne sera pas détecté par un dispositif de protection différentiel placé en amont au primaire du transformateur. Ainsi dans les installations électriques,

- Il faut placer une **protection différentielle** au secondaire même s'il en existe une au primaire.
- Avec un transformateur d'isolement, il sera possible d'isoler plusieurs circuits entre eux afin d'éviter qu'un défaut se produisant à un emplacement ne mette toute l'installation hors tension. Cela est très utile dans les lieux où la **continuité de service** est vitale comme les blocs opératoires.

Quelques symboles rencontrés pour les transformateurs monophasés sont montrés ci-dessous.



Figure 7. 5. Quelques symboles du transformateur monophasé

L'objectif d'un transformateur est de modifier la valeur efficace d'une tension alternative afin de la rendre compatible avec l'usage que l'on souhaite en faire. On définira trois principaux types de transformateur en fonction des valeurs efficaces des tensions primaires et secondaires mesurées à vide.

- Si $V_1 > V_2$, le transformateur est dit **abaisseur de tension**.
- Si $V_1 < V_2$, le transformateur est dit **élevateur de tension**.
- Si $V_1 = V_2$, on a un transformateur d'**isolement**.

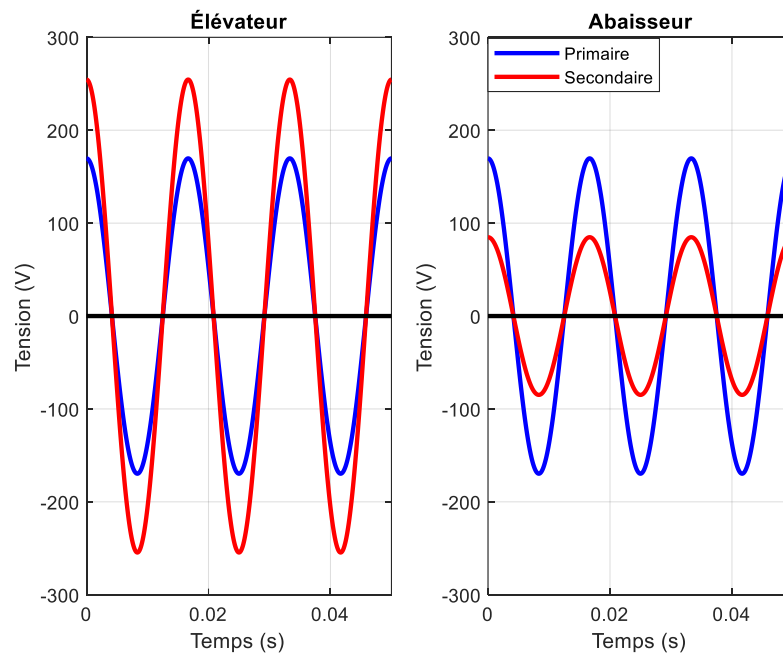


Figure 7.6. Illustration transformateur élévateur et transformateur abaisseur

Circuit magnétique d'un transformateur monophasé

Le **circuit magnétique** ou **noyau d'un transformateur** est conçu pour fournir un chemin au champ magnétique, nécessaire à l'induction des tensions entre les enroulements. Un chemin à **faible réluctance (équivalent de la résistance dans le cas des grandeurs électriques)**, constitué de fines lamelles de silicium et de tôle d'acier, est utilisé à cette fin. En plus de fournir un chemin à faible réluctance pour le champ magnétique, le noyau est conçu pour **empêcher les courants électriques de circuler dans l'acier lui-même**, car ces courants appelés **courants de Foucaults** et dus aux tensions induites dans l'acier provoquent un **échauffement et une perte d'énergie**. Notons que l'acier lui-même étant un conducteur, les lignes changeantes de flux magnétique induiront également une tension et un courant dans ce conducteur. En utilisant des tôles d'acier très fines avec un **matériau isolant entre les tôles, les courants de Foucault (pertes) sont considérablement réduits**. Deux solutions sont couramment proposées pour réaliser cet objectif; celles-ci sont montrées sur la **Figure 7.7** et il s'agit du circuit magnétique à **colonnes** et du circuit magnétique **cuirassé**.

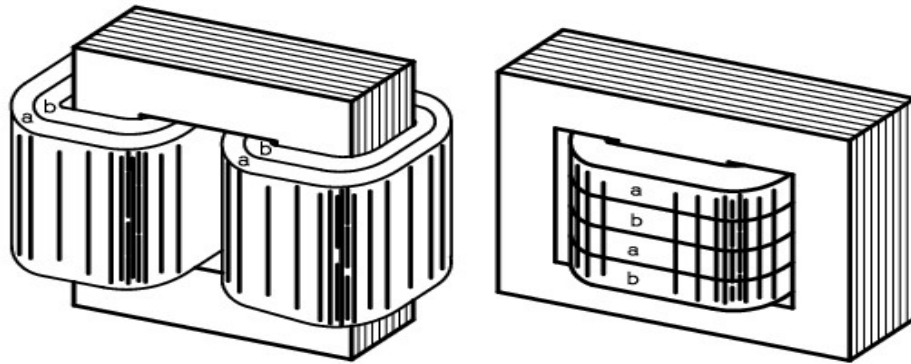


Figure 7.7. Circuits magnétiques d'un transformateur : à gauche type à colonne et à droite type cuirassé.

- Dans le transformateur à colonnes, les enroulements entourent le noyau. Une section d'enroulements primaire et secondaire est enroulée sur chaque branche du noyau.
- Dans un transformateur de type cuirassé, le circuit magnétique en acier forme une coque entourant les enroulements. Cette géométrie permet de réduire les flux de fuites.

Les pertes dans le matériau magnétiques incluent les pertes par **hystérésis** et celle par **courant de Foucault**. On les appelle les **pertes fer** et elles sont obtenues *expérimentalement par la mesure de la puissance absorbée à vide*.

Principe de fonctionnement du transformateur monophasé

L'enroulement primaire soumis à une tension sinusoïdale est parcouru par un courant sinusoïdal. Ce courant variable donnera naissance à un flux magnétique variable ayant la même fréquence que la tension appliquée. Ce flux est alors canalisé et se propage à travers le circuit magnétique en traversant le bobinage secondaire pour revenir au primaire. Il engendre ainsi une f.é.m. de valeur efficace V_1 dans l'enroulement primaire et une f.é.m. de valeur efficace V_2 dans l'enroulement secondaire.

- ✓ Au primaire d'après la loi de Lenz, $v_1(t)$ va s'opposer à l'existence du flux magnétique et donc à l'existence du courant. Sa valeur va augmenter pour égaler la tension d'entrée. C'est cela qui explique les forts appels de courant (**inrush current**) qui existent lorsque l'on branche le primaire d'un transformateur au réseau. À l'instant $t = 0$ du raccordement, la tension induite v_1 est nulle et le courant absorbé sera maximal.
- ✓ Au niveau du secondaire, il apparaîtra une tension secondaire dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire. L'amplitude dépendra du nombre de spires de l'enroulement secondaire. Si aucune charge n'est raccordée au secondaire, le courant sera nul de même que la puissance produite au secondaire : on dit que le transformateur est **à vide**. Si l'on raccorde au secondaire une charge alors le secondaire délivrera un courant on dit que le transformateur est en **charge**.

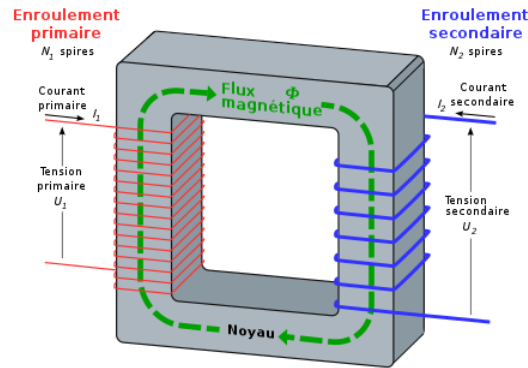


Figure 7. 8. Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé (Source).

Le transformateur parfait ou idéal

Définition et hypothèses simplificatrices

Le transformateur idéal ou parfait (TP) est un transformateur dans lequel, on a aucune perte. Cela suppose alors les hypothèses suivantes :

- Pas de pertes fer (pertes par hystérésis et par courant de Foucault).
- Pas de fuite magnétique.
- Pas de pertes par effet joule dans les enroulements.

D'un point de vue des grandeurs électriques, cela supposera qu'en fonctionnement :

- La puissance d'entrée P_1 au primaire du transformateur est égale à la P_2 active de sortie au secondaire; cela suppose un rendement de $\eta = 1 = 100 \%$.
- Si le courant de sortie I_2 est nul alors le courant d'entrée I_1 le sera aussi.
- Quel que soit le courant de sortie alors la tension V_2 restera toujours constante et égale à la f.é.m. Cela signifie alors que l'impédance de sortie du T.P. est nulle.

Relations fondamentales

Pour un transformateur parfait (TP), il est établi les relations suivantes :

- Loi de Lenz :

$$\begin{cases} v_1(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ v_2(t) = N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases} \Rightarrow \frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = \boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m} \quad (7.2)$$

- Loi d'Ampère :

$$N_1 i_1(t) - N_2 i_2(t) \approx 0 \Rightarrow \frac{i_2(t)}{i_1(t)} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \boxed{\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m} \quad (7.3)$$

Le **rapport m est appelé rapport de transformation du transformateur**. On peut ainsi fixer le rapport m en ajustant le nombre de spires au primaire et au secondaire.

Remarque : Pour le calcul du rapport de transformation, le rapport des intensités est **l'inverse** de celui des tensions.

Comme mentionné précédemment on aura un transformateur élévateur lorsque la tension au secondaire est plus élevée que la tension au primaire. Dans ce cas le nombre de spires au primaire est plus bas que le nombre de spires au secondaire. Dans la situation inverse, on aura un transformateur abaisseur c'est-à-dire lorsque le nombre de spires secondaire est plus bas que celui du primaire. Le transformateur est une machine **réversible** c'est-à-dire qu'il peut être alimenté dans un sens ou dans l'autre, et donc agir comme un transformateur élévateur ou abaisseur, en *fonction de l'endroit où l'énergie est générée et de l'endroit où elle est consommée*. Comme mentionné ci-dessus, l'un ou l'autre enroulement peut être primaire ou secondaire. Pour éliminer cette confusion, dans la production d'électricité, les enroulements des transformateurs sont souvent appelés enroulements **haute tension (bornes H)** et enroulement **basse tension (bornes X)**, en fonction des valeurs relatives des tensions. La figure ci-dessous montre la plaque à bornes du transformateur HAMMOND qui sera utilisé durant le **laboratoire 4**. On observe sur cette figure **deux demi-enroulements primaires** chacun de **120 V (H₁H₂)** et **(H₃H₄)** pour un total de **240 volts**. Comme on peut le voir le secondaire a plusieurs prises **0-114-117-120 V**.

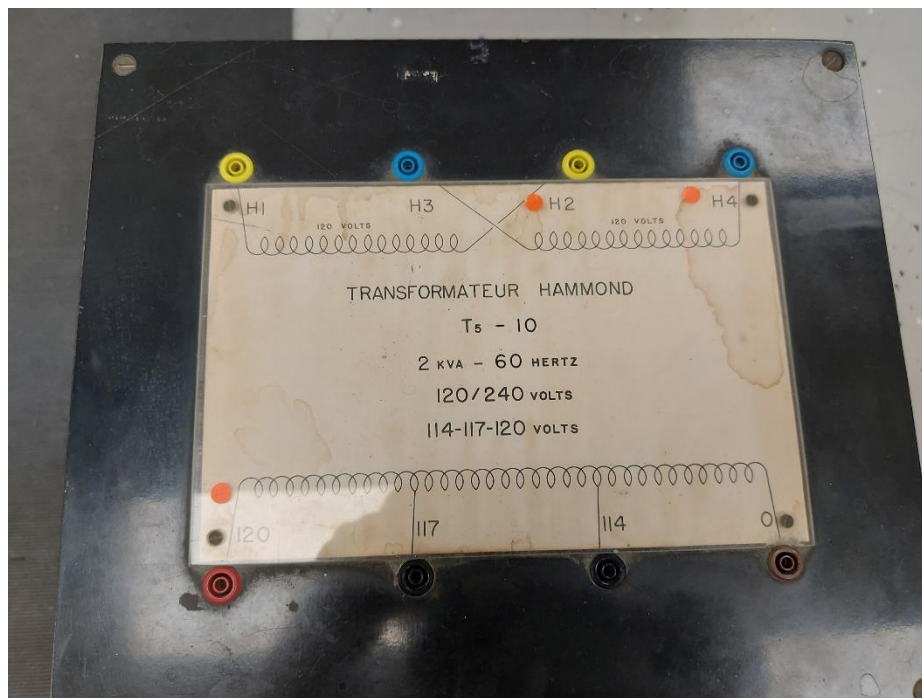


Figure 7. 9. Plaque à bornes du transformateur au laboratoire A-236

Puissance au primaire et au secondaire d'un TP

La puissance apparente complexe à l'entrée du transformateur est définie comme suit :

$$\bar{S}_1 = \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* = (m \cdot \bar{V}_2) \left(\frac{\bar{I}_2^*}{m} \right) = \bar{V}_2 \cdot \bar{I}_2^* = \bar{S}_2 \Rightarrow \begin{cases} P_1 = P_2 \\ Q_1 = Q_2 \end{cases} \Rightarrow \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 \quad (7.4)$$

Remarque : Le TP est absolument passif et sans pertes. Lorsqu'il élève la tension, il abaisse le courant (ou inversement) et ne modifie pas la puissance qui transite. Le déphasage est alors conservé entre le primaire et le secondaire.

Le transformateur réel

Mise en situation

Dans un transformateur réel, on doit prendre en compte deux types de pertes à savoir les **pertes dans le circuit électrique** et les **pertes dans le circuit magnétique** du transformateur.

- **Pertes dans le circuit électrique** : elles sont dues aux échauffements dans les câbles (du fait de leur faible résistance) du primaire et du secondaire; il s'agit alors des **pertes par effet joule** aussi appelé **pertes cuivre**. De plus les câbles seront le siège d'auto-induction.
- **Pertes dans le circuit magnétique** : elles comportent les pertes par hystérésis (retard à l'aimantation) et des pertes par courant de Foucault (courants induits responsables des pertes par échauffement). L'ensemble de ces pertes est appelé **pertes fer**. De plus tout le flux créé par les bobinages ne pénètre pas le circuit magnétique, une partie du flux est perdue dans l'air et on a ainsi des flux des fuites au niveau du noyau comme montré sur la figure ci-dessous.

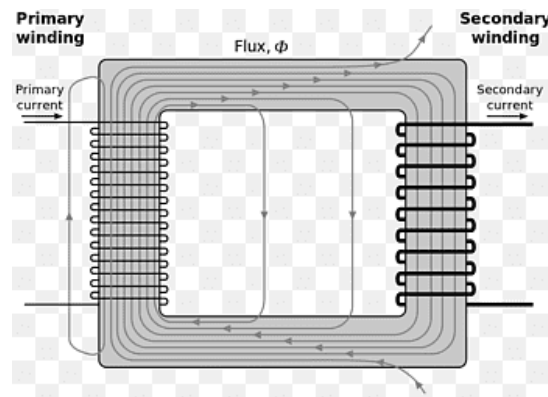


Figure 7. 10. Flux de fuite dans le noyau magnétique. [Source](#)

Les conséquences des pertes mentionnées ci-dessus sont les suivantes :

- Le rendement du transformateur n'est plus égal à 100 %;
- Les déphasages et les puissances ne sont pas conservés.
- L'augmentation du courant au secondaire impliquera une chute de la tension V_2 fournie au secondaire.
- Il existe un courant non nul au primaire lorsque le secondaire est à vide.

Dans la suite, il est proposé l'analyse du transformateur dans deux différents régimes de fonctionnement à savoir le régime à vide et le régime nominal.

Le transformateur réel à vide

À vide, le courant fourni au transformateur est alors utilisé pour son excitation (produire le champ magnétique). La puissance absorbée à vide dans le transformateur correspond aux pertes dans le circuit magnétique et donc aux pertes dans le fer.

$$P_{1V} \approx P_{\text{fer}} \quad (7.5)$$

En réalisant alors un essai à vide du transformateur dans lequel on mesurerait :

- La tension primaire à vide : V_1

- La tension secondaire à vide : V_2
- Le courant primaire à vide : I_1
- La puissance absorbée par le primaire à vide : P_1
- La puissance apparente absorbée à vide : S_{1V}

On peut déterminer les éléments suivants :

- Rapport de transformation

$$m = \frac{V_1}{V_2} \quad (7.6)$$

- Facteur de puissance

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \Rightarrow \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{V_1 I_1} \quad (7.7)$$

- Pertes fer ou magnétique

$$P_{1V} \approx P_{\text{fer}} \quad (7.8)$$

Exemple d'application 5-1 : La plaque signalétique d'un transformateur monophasé porte les indications suivantes : 220 V/52 V-60 Hz. On réalise un essai à vide au cours duquel on mesure un courant de 0.47 A et une puissance de 20 W.

1. Quelles pertes l'essai à vide permet de déterminer?
2. Déterminez le rapport de transformation.
3. Le nombre de spires au primaire étant de 423, déterminez le nombre de spires au secondaire.

Solution de l'exemple

1. L'essai à vide permet de déterminer les **pertes fer**.
2. Rapport de transformateur :

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{220}{52} = \boxed{4.23}$$

3. Nombre de spires secondaire

$$m = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow N_2 = \frac{N_1}{m} = \frac{423}{4.23} = \boxed{100 \text{ spires}}$$

Le transformateur réel en charge : le rendement

En fonction de la puissance apparente S définie par les fabricants, les courants nominaux dans les enroulements sont approximés comme suit :

$$\begin{cases} I_{1n} = \frac{S}{V_1} \\ I_{2n} = \frac{S}{V_2} \end{cases} \quad (7.9)$$

Si on mesure la puissance absorbée au primaire P_1 et la puissance transmise à la charge au secondaire P_2 , alors on obtient **directement** le rendement comme suit :

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (7.10)$$

On peut également déterminer le rendement par la méthode des **pertes séparées**.

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{fer}} + P_c} \times 100 = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} \times 100 \quad (7.11)$$

Remarque : Le rendement maximal se produit lorsque $P_{\text{fer}} = P_c$.

Exemple d'application 2 et solution.

Calcul du **rapport de transformation** et des **courants nominaux** pour le transformateur MARCUS dont la plaque est montrée ci-dessous (**Figure 7.11**).

- **Rapport de transformation**

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{600}{480} = \boxed{1.25}$$

- **Courants nominaux**

$$\begin{cases} I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{600 \times 1000}{600} = \boxed{1 \text{ kA}} \\ I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{600 \times 1000}{480} = \boxed{1.25 \text{ kA}} \end{cases}$$

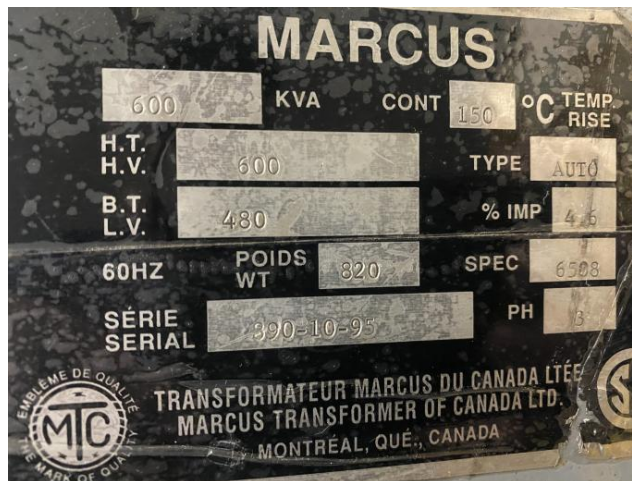


Figure 7.11. Plaque signalétique d'un transformateur MARCUS. [Source](#)

Exemple d'application 3

Les caractéristiques d'un transformateur monophasé sont les suivantes: 66.7 MVA, $\eta = 99.3 \%$; $FP = 100 \%$.

1. Calculez les pertes dans les circonstances décrites.
2. Calculez des pertes et du rendement pour une charge nominale avec un FP de 80 %

Solution de l'exemple d'application

1. **Pertes dans les circonstances décrites**

Pour une charge résistive, on aura: $P_2 = S_2 = 66.7 \text{ MW}$.

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

$$\text{pertes} = P_1 - P_2 = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) P_2 = \left(\frac{1}{99.3\%} - 1 \right) \times 66.7 \text{ MW} = \boxed{470 \text{ kW}}$$

2. Pertes et rendement pour une charge avec un FP de 80 %

Dans ce cas : $P_2 = S_2 \times FP = 66.7 \times 0.8 = 53.36 \text{ MW}$.

Note: le courant nominal ne change pas, car: $S_2 = V_2 \cdot I_2$.

Cela signifie que les pertes Joule ne changeront pas il en est de même pour les pertes fer. Ainsi

$$\text{pertes} = 470 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} = \frac{53,36}{53,36 + 0,47} = \boxed{99.1 \%}$$

Les transformateurs triphasés

Les transformateurs triphasés sont utilisés dans l'industrie afin d'**adapter** les valeurs des tensions et des courants dans les lignes d'alimentations triphasées aux charges triphasées. Il est plus souvent utilisé trois transformateurs monophasés raccordés de façon appropriée plutôt qu'un seul transformateur triphasé (voir **Figure 7. 12**). Pour cette raison dans ce chapitre, il ne sera étudié que des transformateurs triphasés conçus par un couplage adéquat des transformateurs monophasés.



Figure 7. 12. Trio de transformateurs monophasés pour adapter les niveaux de tension d'une ligne triphasée. ([Source ici](#))

Principaux couplages

Le couplage d'un transformateur triphasé est caractérisé par l'association d'un mode de connexion primaire avec un mode de connexion secondaire. Les enroulements primaires ou secondaires peuvent être couplés en **étoile**, en **triangle** ou en **zig-zag**. Ces différentes configurations sont montrées sur la figure ci-dessous. On rappelle que les lettres *a*, *b* et *c* représentent les phases d'alimentation.

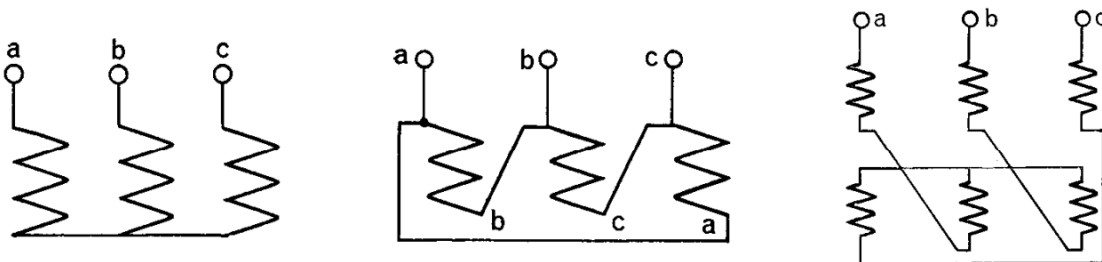


Figure 7. 13. Différents modes de couplage des transformateurs triphasés

Remarque : Dans un couplage zig-zag (mixte), une moitié de l'enroulement est couplée en étoile et l'autre moitié en triangle. Ce mode de couplage permet de limiter l'influence du déséquilibre des courants.

Tout au long du cours, nous utiliserons les lettres majuscules pour le primaire et les lettres minuscules pour le secondaire et l'on se limitera seulement aux cas des couplages triangle et étoile. Ainsi on aura :

- **Y** ou **y** : couplage étoile primaire ou respectivement couplage étoile secondaire.
- **D** ou **d** : couplage triangle primaire ou respectivement couplage triangle secondaire.

Exemple : Yd par exemple signifie que l'enroulement primaire est couplé en étoile et les bobines secondaires en triangle.

Astuces pour le choix des couplages

- En haute tension, il est intéressant d'avoir un couplage qui fera apparaître le neutre. On peut ainsi relier le neutre et les autres parties métalliques à la terre afin de réduire l'isolement des bobines.
- Idéalement, on évite d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire pour ne pas transmettre intégralement le déséquilibre éventuel des courants.

Dénominations adoptées pour le cours

Tout au long de ce cours, il sera adopté les notations suivantes :

- V_P et V_S pour représenter respectivement les tensions efficaces aux bornes d'un enroulement primaire et d'un enroulement secondaire.
- I_P et I_S pour représenter respectivement les courants efficaces circulant dans un enroulement primaire et dans un enroulement secondaire.
- V_{LP} et V_{LS} pour représenter respectivement les tensions de ligne efficaces au primaire et au secondaire.
- I_{LP} et I_{LS} pour représenter respectivement les courants de ligne efficaces au primaire et au secondaire.

La **Figure 7. 14** ci-dessous est un cas de couplage **triangle-étoile**.

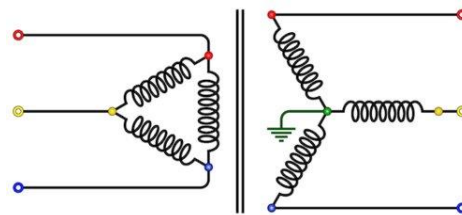


Figure 7. 14. Couplage triangle-étoile des transformateurs monophasés

Rapport de transformation d'un transformateur triphasé

Le rapport de transformation d'un transformateur triphasé ne dépend plus uniquement des nombres de spires secondaire et primaire, mais aussi du mode de couplage des enroulements.

On définit le **rapport de transformation** par colonne ou simplement **rapport de transformation m** comme celui correspondant aux caractéristiques d'un des transformateurs monophasés.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (7.12)$$

On définit le **rapport de transformation global** du transformateur comme étant le rapport de la tension de ligne au primaire par la tension de ligne secondaire.

$$m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{I_{Ls}}{I_{Lp}} \quad (7.13)$$

Caractéristiques des différents couplages

Couplage étoile-étoile Yy

Le raccordement est montré sur la **Figure 7.15**. Dans cette configuration, le rapport des tensions de ligne sera le même que le rapport des tensions aux bornes de chaque enroulement.

Rappel : dans un système équilibré, la valeur efficace des tensions de ligne est $\sqrt{3}$ fois supérieure à celle des tensions de phase. Les tensions de ligne sont également en avance de 30° par rapport aux tensions de phase.

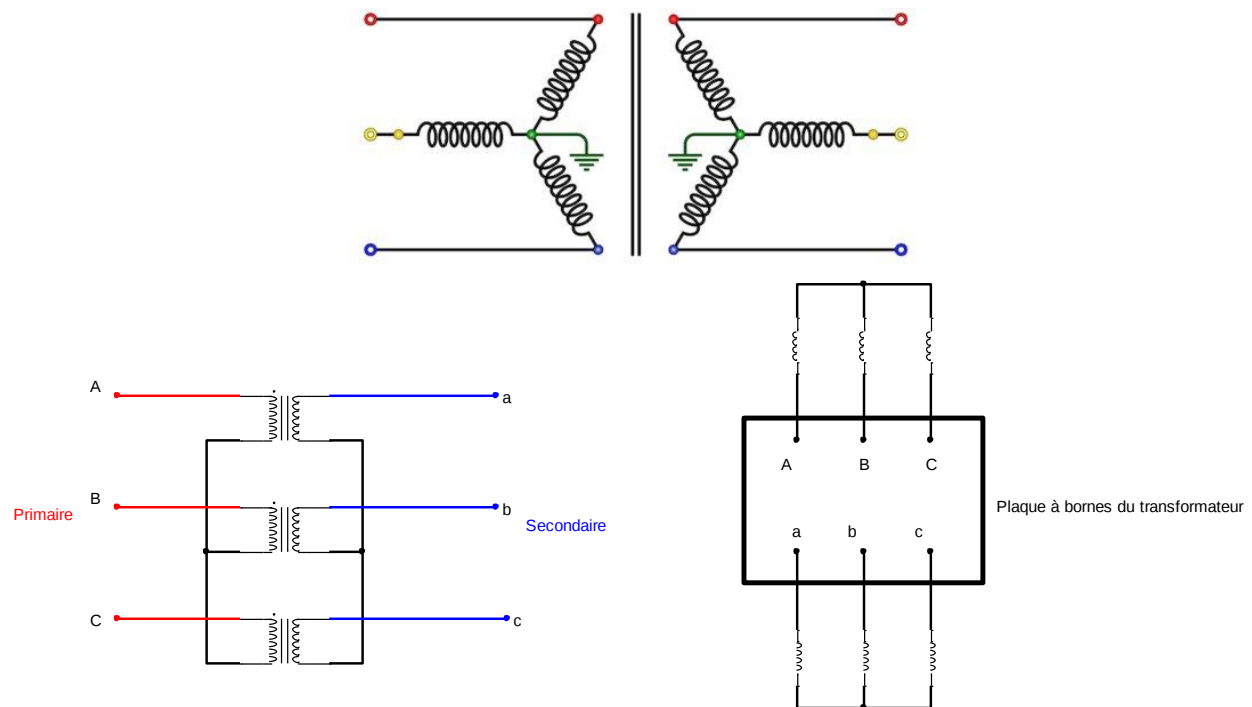


Figure 7.15. Couplage étoile-étoile Yy des transformateurs monophasés

Cette connexion est appropriée dans les **systèmes pour lesquels la charge est équilibrée**. Sur cette figure et comme pour la suite, les lettres majuscules A, B et C sont utilisées pour les bornes du primaire tandis que les lettres a, b et c sont utilisées pour le secondaire. S'agissant des grandeurs (tensions et courants), l'indice *s* est utilisé pour faire référence au secondaire et l'indice *p* pour le primaire.

Rapport de transformation et rapport de transformation global

$$m = \frac{V_p}{V_s} ; m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_p}{\sqrt{3}V_s} \Rightarrow m = m_g \quad (7.14)$$

Couplage étoile-triangle Yd

Le raccordement est montré sur la **Figure 7.16**. Dans cette configuration, chaque enroulement primaire est soumis à une tension de phase (car couplée en étoile) tandis que chaque enroulement secondaire est soumis à une tension de ligne.

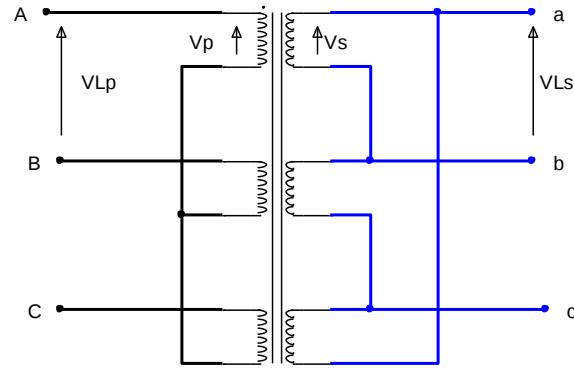


Figure 7.16. Couplage étoile-étoile Yd des transformateurs monophasés

Le rapport de transformation vaudra alors :

$$m = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\frac{V_{Lp}}{\sqrt{3}}}{\frac{V_{Ls}}{\sqrt{3}}} = \frac{V_{Lp}}{\sqrt{3}V_{Ls}} ; m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} \Rightarrow m = \frac{m_g}{\sqrt{3}} \quad (7.15)$$

Connexion triangle-triangle Dd

Le schéma de raccordement est montré sur la **Figure 7.17**, le rapport de transformation dans ce cas est égal au rapport de transformation global. Les enroulements primaires et secondaires sont en phase.

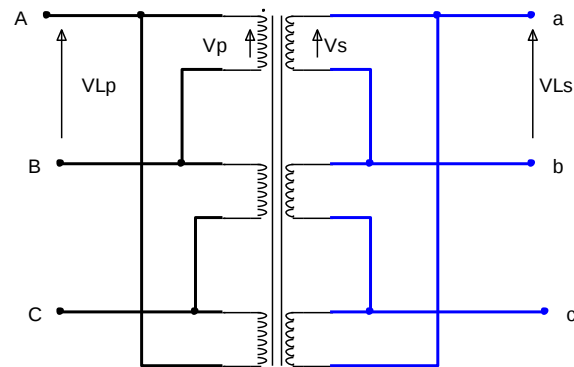


Figure 7.17. Couplage étoile-étoile Dd des transformateurs monophasés

Connexion triangle-étoile Dy

Le schéma de raccordement est montré sur la **Figure 7.18**.

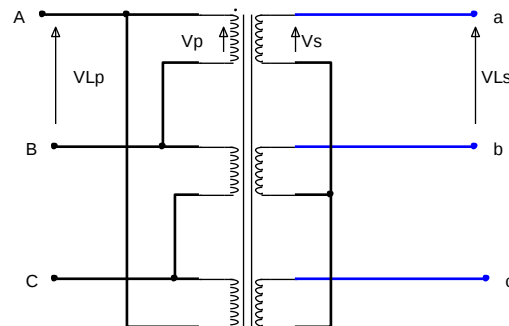


Figure 7.18. Couplage triangle-étoile Dy1 des transformateurs monophasés

Dans cette configuration, chaque enroulement primaire est soumis à une tension de ligne (car couplée en triangle) tandis que chaque enroulement secondaire est soumis à une tension de phase. Le rapport de transformation vaudra alors :

$$m = \frac{V_P}{V_S} = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}/\sqrt{3}} = \sqrt{3} \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} ; m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} \Rightarrow m = \sqrt{3}m_g \quad (7.16)$$

Exemple d'application 4

Un transformateur triphasé 60 Hz est raccordée est couplé en triangle au primaire et en étoile au secondaire. Les tensions de lignes sont respectivement de 22 000 V et 400 V pour le primaire et le secondaire. Le secondaire alimente une charge triphasée équilibrée avec un facteur de puissance de 0.8 retard. Le courant de ligne du côté primaire est de 5 A.

1. Déterminez le courant dans chaque bobine du primaire ainsi que le courant dans chaque ligne du secondaire.
2. Quelle est la puissance réelle de la charge du transformateur ?

Solution de l'exemple 4

Dans un couplage Dy, on rappelle les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_P = V_{Lp} \\ V_S = \frac{V_{Ls}}{\sqrt{3}} \end{cases} ; \begin{cases} I_P = \frac{I_{Lp}}{\sqrt{3}} \\ I_S = I_{Ls} \end{cases}$$

On donne $V_{Lp} = 22000 \text{ V}$; $V_{Ls} = 400 \text{ V}$; $I_{Lp} = 5 \text{ A}$.

Ainsi on aura :

$$m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{22000}{400} = 55 \Rightarrow m = \sqrt{3}m_g = 55\sqrt{3}$$

1. Calcul de I_P et de I_{Ls}

$$\begin{cases} I_P = \frac{I_{Lp}}{\sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2.886 \text{ A} \\ I_{Ls} = I_S = m \cdot I_P = 2,886 \times 55\sqrt{3} = 274.93 \text{ A} \end{cases}$$

2. Calcul de la puissance réelle consommée par la charge du transformateur

$$P_2 = \sqrt{3} \times V_{Ls} \times I_{Ls} \times FP = \sqrt{3} \times 400 \times 274,928 \times 0,8 = 152.38 \text{ kW}$$

Exemple d'application 5

Un réseau HT délivre des tensions sinusoïdales formant un système triphasé équilibré direct avec des tensions de ligne de valeurs efficace 20 kV. Ce réseau alimente le primaire d'un transformateur abaisseur de tension, de couplage triangle au primaire et étoile au secondaire. Le secondaire délivre un système équilibré direct de tensions de valeur efficace de 400 V. chaque colonne du transformateur porte un enroulement primaire de N_1 spires et un enroulement secondaire de N_2 spires. Le transformateur est supposé parfait. La figure ci-dessous précise la désignation des différents courants et les conventions adoptées.

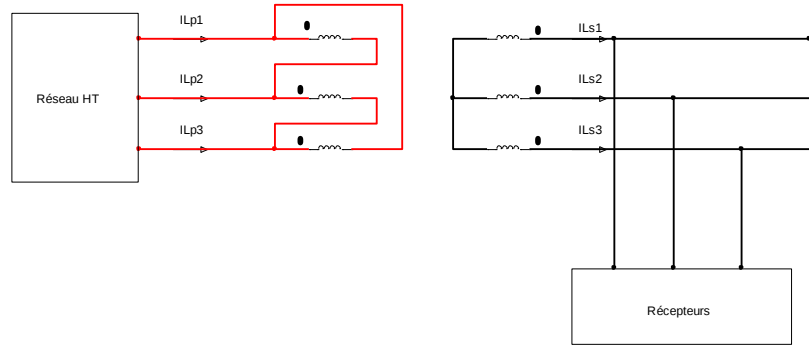


Figure 7.19. Circuit pour l'exemple d'application 5

Note pour information : les points indiquent la polarité des transformateurs. Si les points sont dans le même sens pour l'enroulement primaire et secondaire alors les tensions de part et d'autre sont en phase. Dans le cas contraire, les tensions sont en opposition de phase.

1. Déterminer le rapport de transformation par colonne du transformateur (rapport de transformation m).
2. L'ensemble des récepteurs ont une puissance de 360 kVA.
 - a. Calculez la valeur efficace du courant de ligne au secondaire.
 - b. Calculez la valeur du courant de ligne au primaire.

Solution de l'exemple 4

Données : $V_{Lp} = 20 \text{ kV}$; $V_{Ls} = 400 \text{ V}$.

1. Calcul du rapport de transformation

Dans ce mode de couplage, on aura :

$$\begin{cases} V_P = V_{Lp} \\ V_S = \frac{V_{Ls}}{\sqrt{3}} \end{cases} ; \begin{cases} I_P = \frac{I_{Lp}}{\sqrt{3}} \\ I_S = I_{Ls} \end{cases}$$

Ainsi on aura :

$$m_g = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{20000}{400} = 50 \Rightarrow m = \sqrt{3}m_g = \boxed{50\sqrt{3}}$$

2. Valeurs efficaces des courants de ligne

a. Secondaire

$$S = \sqrt{3}V_{Ls} \cdot I_{Ls} \Rightarrow I_{Ls} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{Ls}} = \frac{360 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = \boxed{519.615 \text{ A}}$$

b. Primaire

$$m_g = \frac{I_{Ls}}{I_{Lp}} \Rightarrow I_{Lp} = \frac{I_{Ls}}{m_g} = \frac{519.615}{50} = \boxed{10.4 \text{ A}}$$

Fin du cours ici, la suite dans les exercices