ELE 1409: ELECTRICITÉ DU BÂTIMENT

COURS 5: Transformateurs monophasés et triphasés

Lien video pour explications: https://www.loom.com/share/ed828e4b0d2e445386e663baa02379b4?sid=1dab423b-87cf-4fbb-b274-cfecf1d826a4

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Objectifs du cours 5

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

À l'issu de ce cinquième cours, l'étudiant(e) sera en mesure de :

- **Interpréter** les **principales caractéristiques** des transformateurs monophasés et triphasés
- **Choisir** un transformateur monophasé selon les caractéristiques de la source d'alimentation et de la charge.
- **Déterminer** le **rendement** d'un transformateur.
- **Calculer** les tensions et les courants dans les transformateurs triphasés.

Plan du cours

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

- ❑ Généralités
- ❑ Transformateur monophasé idéal
- ❑ Transformateur monophasé réel
- ❑ Transformateur triphasé

Généralités: *Nécessité des transformateurs*

- Un transformateur monophasé consiste à deux ou plusieurs enroulements couplés par un flux magnétique mutuel.
- L'objectif est la transformation des niveaux de tensions pour le transport et la distribution.

- À puissance transportée constante, l'utilisation d'une tension élevée (HT ou THT) permettra de minimiser au maximum les pertes en ligne.

$$p_J = R_\ell . I^2$$

- Des tensions élevées imposent des mesures de sécurité plus exigeantes. Une fois le transport effectué, l'énergie électrique doit être distribuée en basse tension (BT)

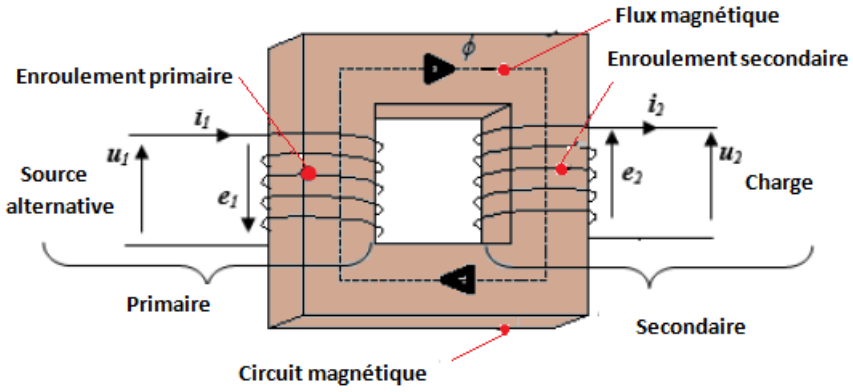
Dénomination	Niveaux de tension
Basse Tension (BT)	$V \leq 600\ V$
Moyenne Tension (MT)	$2,4\ kV \leq V \leq 69\ kV$
Haute Tension (HT)	$V \leq 230\ kV$
Très Haute Tension (THT)	$V \leq 765\ kV$

Niveaux de tensions normalisées

Généralités: *Définition, utilité et constitution*

- Un **transformateur** est une machine statique permettant de transformer l'énergie électrique.

- **Utilité**: Transport en haute tension de l'énergie électrique (transformateur élévateur) et distribution en basse tension de l'énergie électrique (transformateur abaisseur).



Source: https://www.coursuniversel.com/wp-content/uploads/2021/11/transformateurmonophase.png

- Un transformateur est constitué de deux enroulements couplés sur un matériau magnétique (appelé noyau magnétique).
- ✓ Le circuit qui reçoit le courant est le **circuit primaire** et sa tension est notée V_1 ou V_P.
- ✓ Le circuit qui fournit le courant à la charge est le **circuit secondaire** et sa tension est notée V_2 ou V_S.

Généralités: *Fonctionnement et rapport de transformation*

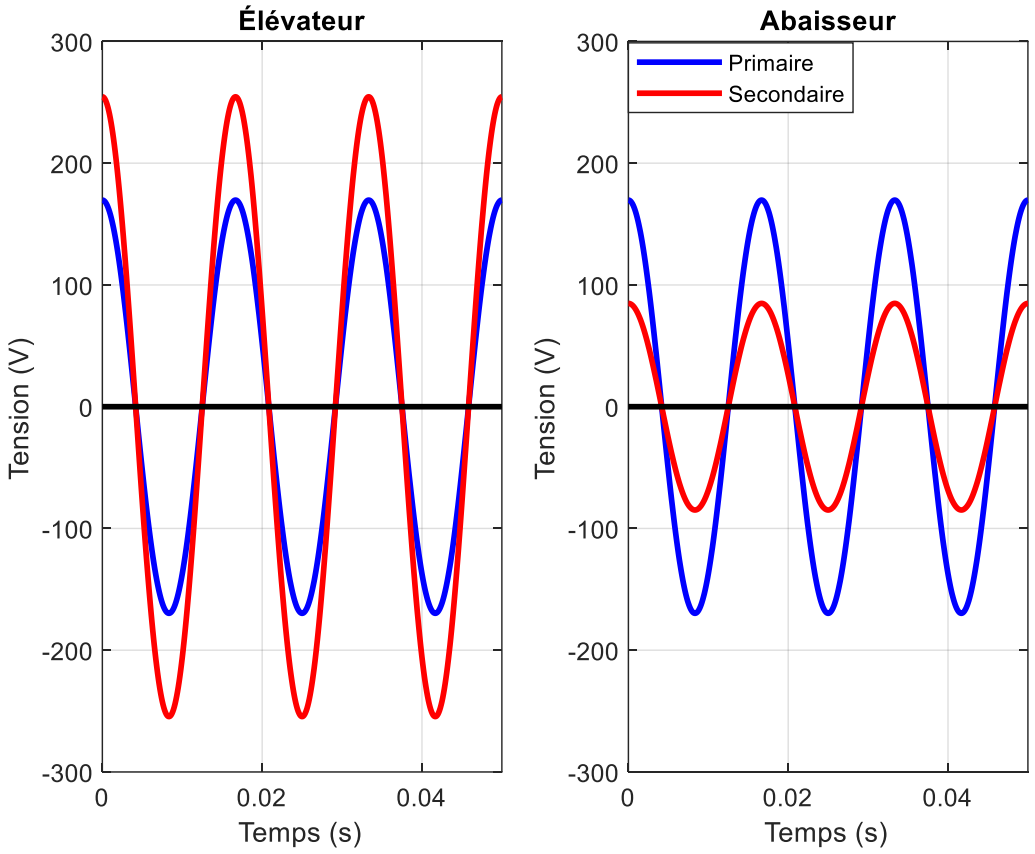
- **Principe de fonctionnement**: Lorsqu'on applique une tension ***alternative sinusoïdale*** de **fréquence** f au primaire, celle-ci crée un **flux alternatif** dans le noyau magnétique. Selon la **loi de Faraday**, des **tensions seront induites** dans les différentes bobines (V_1 au primaire et V_2 au secondaire). Pour chacune des bobines, la tension induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine. Le secondaire alimentera alors la charge avec une tension différente si son nombre de bobines (spires) est différent de celui du primaire.

- **Rapport de transformation**: rapport entre la tension primaire et la tension secondaire qui est aussi équivalent au rapport entre le nombre de spires de l'enroulement primaire et celui de l'enroulement secondaire. On trouvera les notations a, n et m. Dans le cours, on adoptera la notation m.

$$\boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m}$$

Généralités: *Principaux types et symboles*

- **Principaux types**
  - ✓ Si $V_1 < V_2$: le transformateur est dit **élévateur**.
  - ✓ Si $V_1 > V_2$: le transformateur est dit **abaisseur**.
  - ✓ Si $V_1 = V_2$: on a un transformateur d'**isolement**.



Symboles d'un transformateur monophasé

Généralités: *Quelques applications spécifiques des transformateurs*

- **Transformateurs de puissance** : transport et distribution de l'énergie électrique

- **Transformateurs de mesure**: CT(Current transformer) and PT (Power Transformer)

- **Transformateurs électroniques** alimentation à basse tension et adaptation d'impédance.

Transformateurs de distribution américain (à gauche) et européen (à droite)

Généralités: *Exemple d'application 1 (Rapport de transformation)*

Énoncé: On applique une tension efficace de $2400\ V$ au primaire d'un transformateur abaisseur de tension dont le primaire comporte 500 spires et le secondaire 25 spires.

1. Calculez la tension induite au secondaire
2. Calculez la valeur de la tension instantanée au secondaire à l'instant où la tension primaire est de 37 V.

Solution : Données : $V_1 = 2400\ V$; $N_1 = 500$ spires ; $N_2 = 25$ spires

a. Tension efficace induite au secondaire.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{25} = 20 = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{m} = \frac{2400}{20} = \boxed{\mathbf{120\ V}}$$

b. Tension instantanée au secondaire lorsque la tension primaire est de $37\ V$.

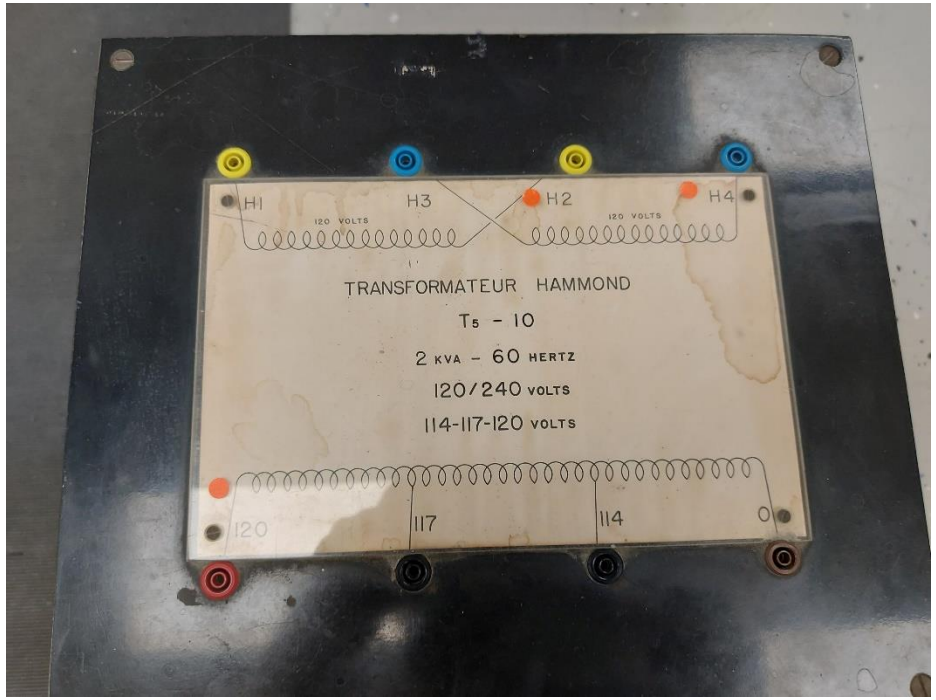
$$V_2 = \frac{V_1}{m} = \frac{37}{20} = \boxed{\mathbf{1,85\ V}}$$

Généralités: *plaques à bornes d'un transformateur monophasé*

- 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.

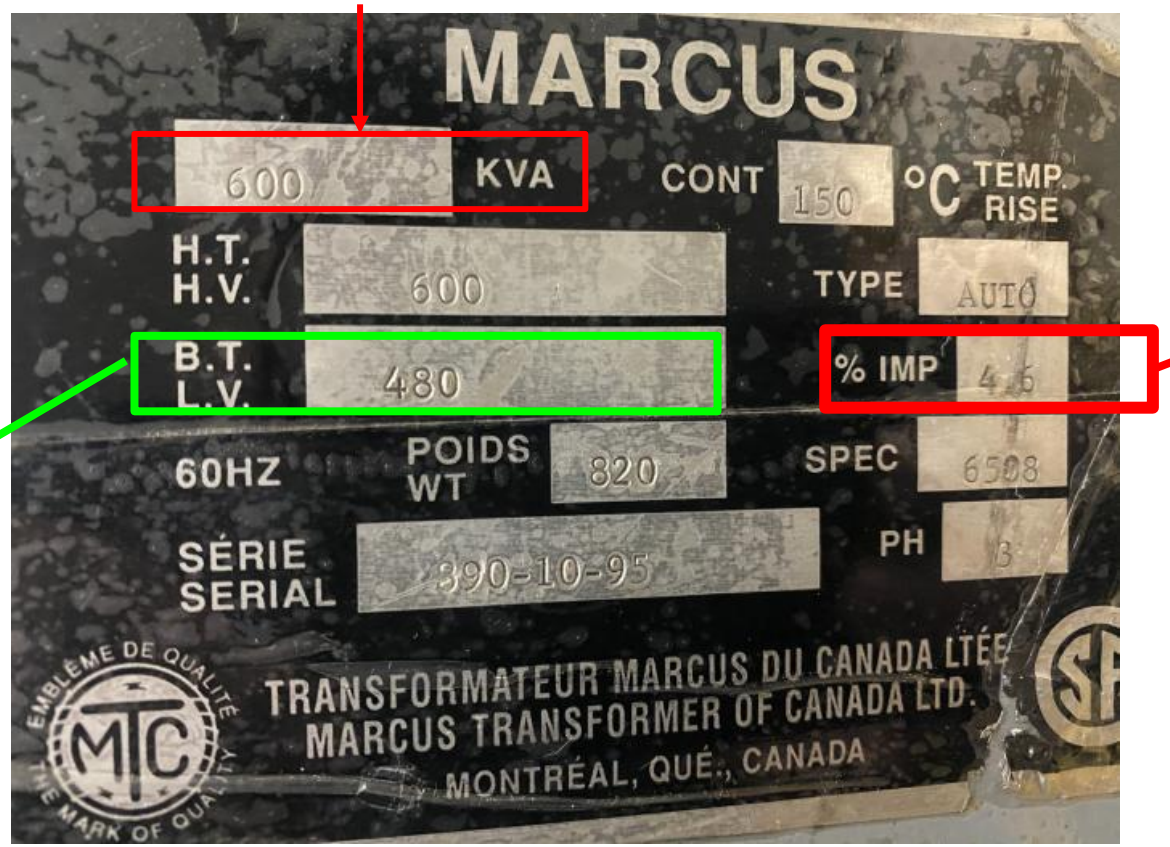
- Pour éliminer cette confusion, dans la production d'électricité, les enroulements des transformateurs sont souvent appelés enroulements **hautes tension (bornes H)** et enroulement **basse tension (bornes X)**, en fonction des valeurs relatives des tensions.

- La figure ci-contre montre la plaque à bornes du transformateur HAMMOND qui sera utilisé au **laboratoire 3**. On observe sur cette figure **deux demi-enroulements primaires** chacun de **120 V (H_1H_2)** et **(H_3H_4)** pour un total de **240 volts**. Comme on peut le voir le secondaire a plusieurs prises **0-114-117-120 V**.



Généralités: *signalétique d'un transformateur monophasé*

Puissance apparente nominale



Tension Secondaire

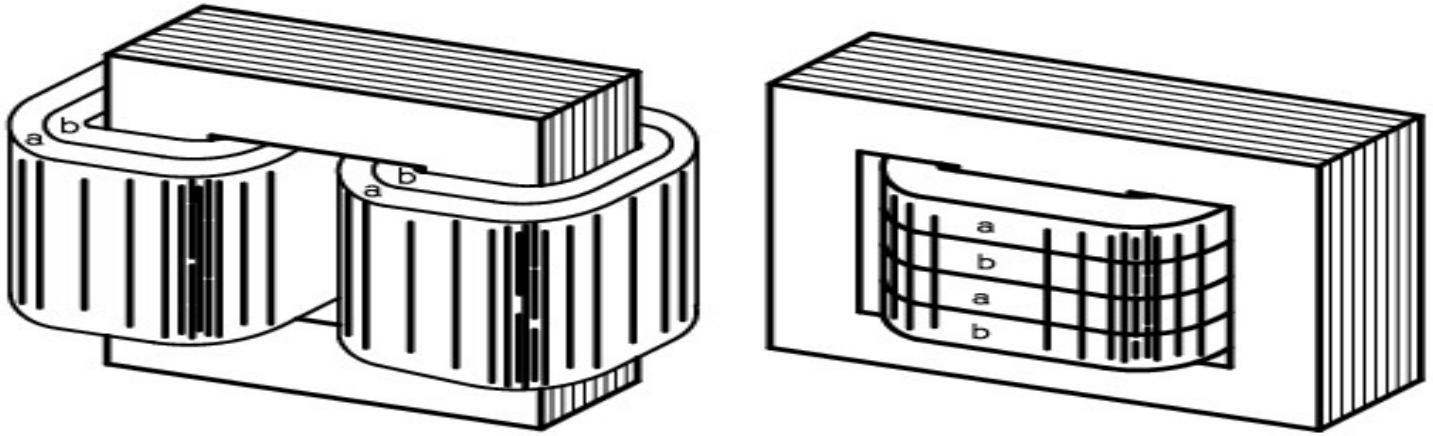
% d'impédance

Source: https://www.surplusindustriel.com/annonce_img/l/1705025788_big.jpeg

Généralités: *le circuit magnétique*

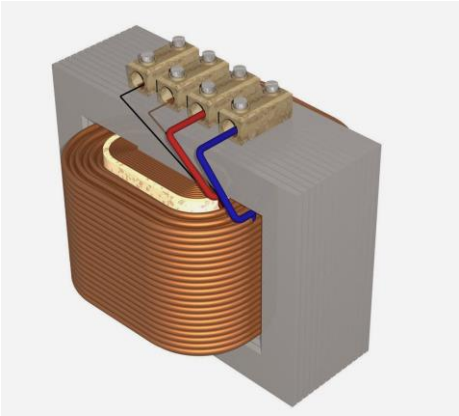
Type à colonnes: les enroulements primaires et secondaires sont placés autour de deux colonnes du noyau

Type cuirassé: les deux enroulements sont placés autour de la branche centrale du noyau. Cette géométrie permet de réduire les flux de fuites.



Bobinage à colonnes

Source: http://idata.over-blog.com/4/17/44/96/Transfo.PNG



Bobinage de type cuirassé

Source: http://4.bp.blogspot.com/-ff0pkhHqEO4/VTmAo6p321I/AAAAAAAAAU4/SaqwROhPk-0/s1600/0000.jpg

Le transformateur parfait (TP): *Caractéristiques*

- **<u>Transformateur idéal:</u>** Transformateur dans lequel il y'a **aucune perte**. Son noyau est infiniment perméable et il n'a aucun flux de fuite.

- **Lois de conservation**: Pour un transformateur idéal, la puissance apparente absorbée au primaire est égale à la puissance apparente débitée au secondaire et donc on a l'égalité :

$$V_1 . I_1 = V_2 . I_2 \Rightarrow \boxed{m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}}$$

- Un transformateur **idéal conserve les puissances actives, réactives et apparentes**. Il conserve aussi le déphasage courant-tension.

$$P_1 = P_2 \ ; \quad S_1 = S_2 \ ; \quad Q_1 = Q_2$$

Le transformateur parfait (TP): Exemple d'application 2

Énoncé: On considère comme **idéal** un transformateur 208V/24 V fonctionnant sur un réseau d'Hydro-Québec. On le connecte à un appareil qui consomme 8 A et 170 W. Quelle puissance et quel courant le transformateur consomme-t-il ?

Solution : Données : $208\,V\,/24\,V$; $I_2 = 8\,A$; $P_2 = 170\,W$

Puissance et courant consommée par le transformateur.

- *Puissance active*

$$P_1 = P_2 \Rightarrow \boxed{\boldsymbol{P_1 = 170\,W}}$$

- *Puissance apparente*

$$S_2 = V_2.I_2 = 24 \times 8 = 192\,VA \;\Rightarrow\; \boxed{\boldsymbol{S_1 = 192\,VA}}$$

- *Puissance réactive*

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = \sqrt{192^2 - 170^2} = \boxed{\boldsymbol{89,241\,VARS}}$$

- *Courant primaire.*

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{208}{24} = 8{,}67 \;;\; I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{8}{8{,}67} = \boxed{\boldsymbol{0,92\,A}}$$

Le transformateur réel: Les pertes

Dans un transformateur réel on ne néglige plus les pertes et on distingue deux principaux types :

- Les **pertes dans le circuit électrique** : pertes par effet joule (aussi appelé **pertes cuivres : P_C**) à cause de la résistance des enroulements.
- Les **pertes dans le circuit magnétique** : le flux créé par le primaire n'est pas complètement accroché par le secondaire et il faut tenir compte des **flux de fuite**. En plus de cela, au niveau du noyau magnétique, un phénomène d'hystérésis (retard à l'aimantation) et l'apparition de courants induits parasites appelés courants de Foucault sont responsables des pertes par échauffement; ces pertes sont appelées **pertes fer (P_f)**.

Le transformateur réel: Exemple d'application (Essai à vide)

Exemple d'application: 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 perte 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: rendement du transformateur

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

- P_2: puissace fournie à la charge au secondaire du transformateur
- P_1 : puissance absorbée au primaire du transformateur
- Les $pertes$ sont composés des pertes magnétiques (pertes fer: P_f) et des pertes par effet Joule (Pertes dans le cuivre : P_C)

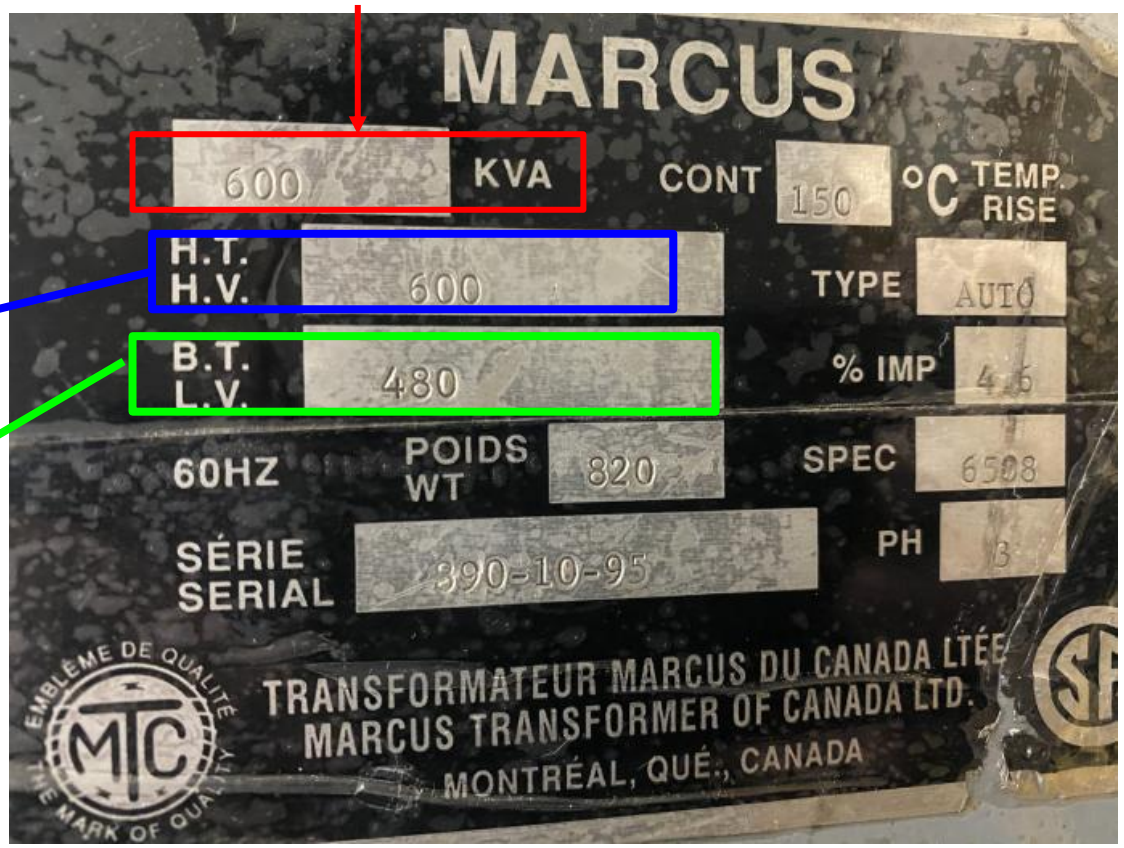
- Les **pertes fer** sont presque égales à la puissance absorbée à **vide**.
- Les **pertes joules** dépendent de la résistance des enroulements.
- Le **rendement maximal** est atteint lorsque les *pertes fer sont égales aux pertes cuivre*.

Le transformateur réel en charge: courant nominaux

Puissance apparente nominale

Tension primaire

Tension Secondaire

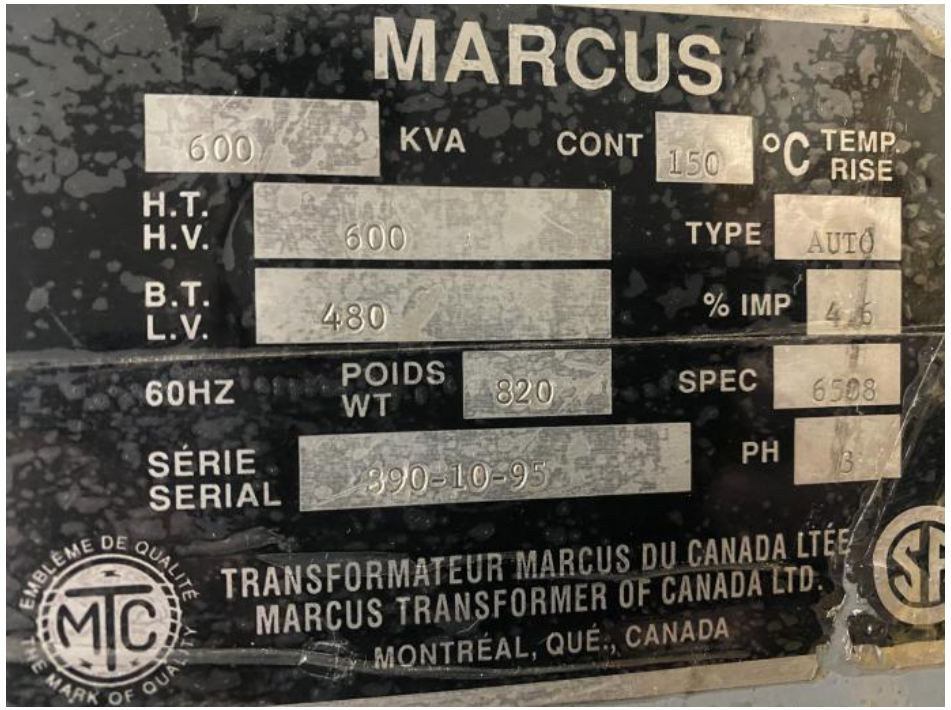


Source: https://www.surplusindustriel.com/annonce_img/l/1705025788_big.jpeg

Courant nominaux du transformateur

$$\begin{cases} I_{1_n} = \dfrac{S}{V_1} \\ I_{2_n} = \dfrac{S}{V_2} \end{cases}$$

Le transformateur réel en charge: courant nominaux



Source:
https://www.surplusindustriel.com/annonce_img/l/1705025788_big.jpeg

Courants nominaux exemple d'application

Calcul du **rapport de transformation** et des **courants nominaux** pour le transformateur dont la plaque est montrée ci-contre:

- **Rapport de transformation**

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{600}{480} = \boxed{1{,}25}$$

- **Courants nominaux**

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{S}{V_1} = \dfrac{600 \times 1000}{600} = \boxed{1\ kA} \\ I_2 = \dfrac{S}{V_2} = \dfrac{600 \times 1000}{480} = \boxed{1{,}25\ kA} \end{cases}$$

Le transformateur réel: rendement du transformateur (exemple d'application)

Énoncé: 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

1. Pertes dans les circonstances décrites

Pour une charge résistive, on aura: $P_2 = S_2 = 66{,}7\ MW$.

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

$$pertes = P_1 - P_2 = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) P_2 = \left(\frac{1}{99{,}3\ \%} - 1\right) \times 66{,}7\ MW = \boxed{\mathbf{470\ kW}}$$

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

Dans ce cas : $P_2 = S_2 \times FP = 66{,}7\ \times 0{,}8 = 53{,}36\ MW$.

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

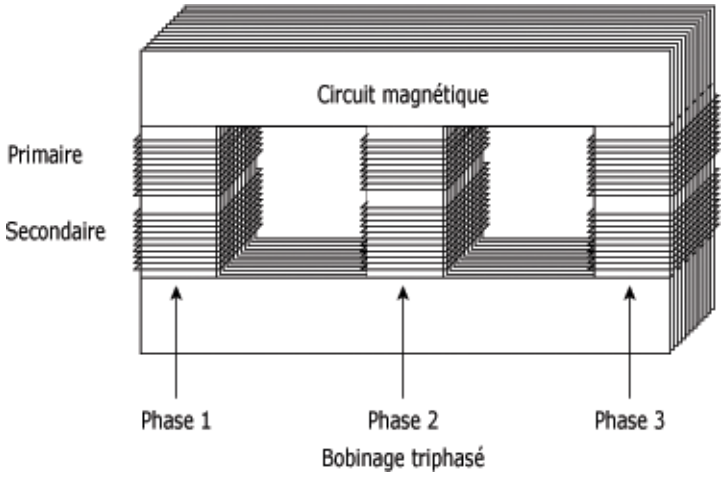
Cela signifie que les pertes Joule ne changeront pas il en est de même pour les pertes fer. Ainsi

$$pertes = 470\ kW$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + pertes} = \frac{53{,}36}{53{,}36 + 0{,}47} = \boxed{\mathbf{99{,}1\ \%}}$$

Le transformateur triphasé: Mise en situation

- La transformation sur les lignes triphasées peut être obtenue avec des transformateurs triphasés comportant trois enroulements primaires et trois enroulements secondaires ou par des montages spéciaux avec **trois transformateurs monophasés**.
- Les transformateurs triphasés peuvent être réalisés à partir de trois transformateurs monophasés. Cela peut être intéressant du point de vue productivité, fiabilité et maintenance. Dans ce dernier cas, on peut raccorder les enroulements de plusieurs façons, les primaires en étoile (**Y** ou **Wye**) et les secondaires en triangle (**Δ** ou **Delta**) et vice-versa.



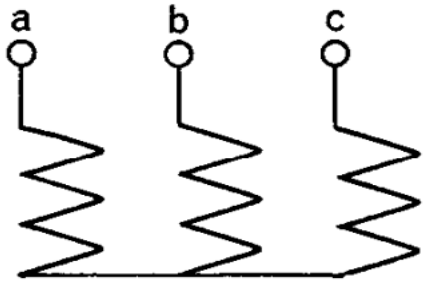
Transformateur triphasé du LAB

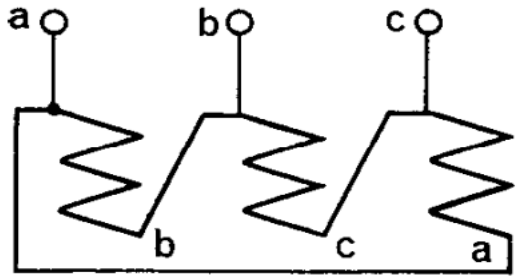
Le transformateur triphasé: Couplage des transformateurs monophasés

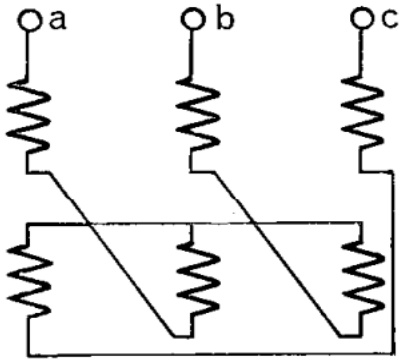
- **Couplage:** Association d'un mode de connexion primaire avec un mode de connexion secondaire.
- Les enroulements primaires ou secondaires peuvent être couplés en **étoile**, en **triangle** ou en **zig-zag**.
- Le couplage zig-zag est un couplage mixte: une **moitié de l'enroulement est couplée en étoile** et **l'autre moitié en triangle**. Ce mode de couplage permet de **limiter l'influence du déséquilibre des courants**.

Astuce 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.



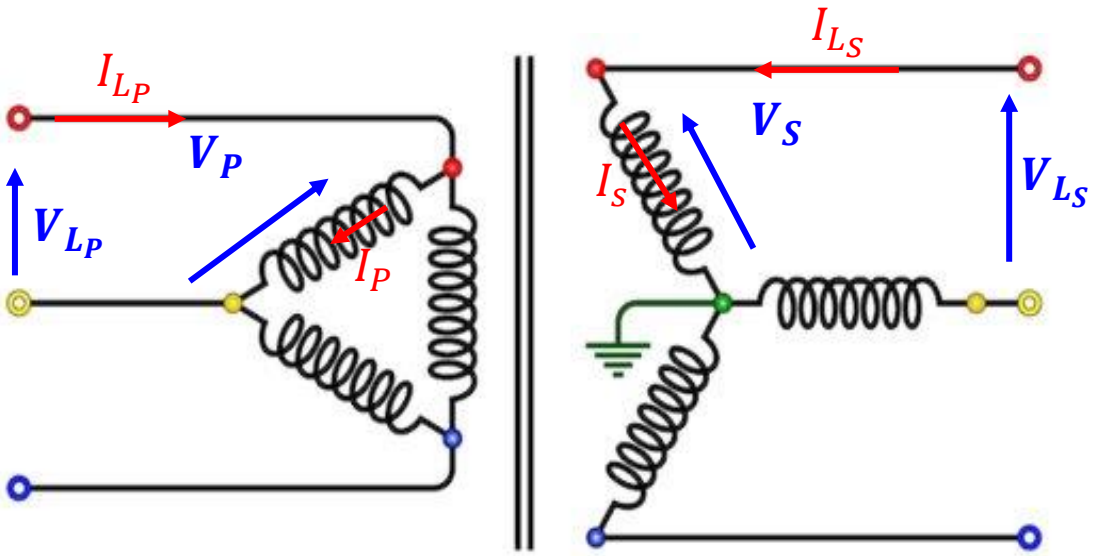




Le transformateur triphasé: dénominations pour le cours

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_{L_P} et V_{L_S} pour représenter respectivement les tensions de ligne efficaces au primaire et au secondaire.
- I_{L_P} et I_{L_S} pour représenter respectivement les courants de ligne efficaces au primaire et au secondaire.



- **Rapport de transformation** par colonne ou simplement **rapport de transformation m**: il correspond aux caractéristiques d'un des transformateurs monophasés.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

- **Rapport de transformation global**

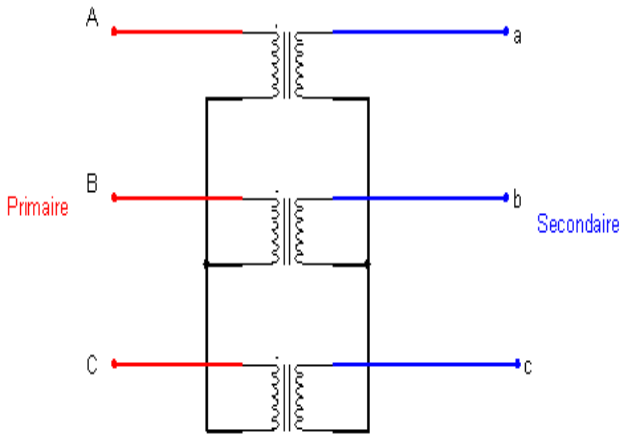
$$m_g = \frac{V_{L_p}}{V_{L_s}} = \frac{I_{L_S}}{I_{L_P}}$$

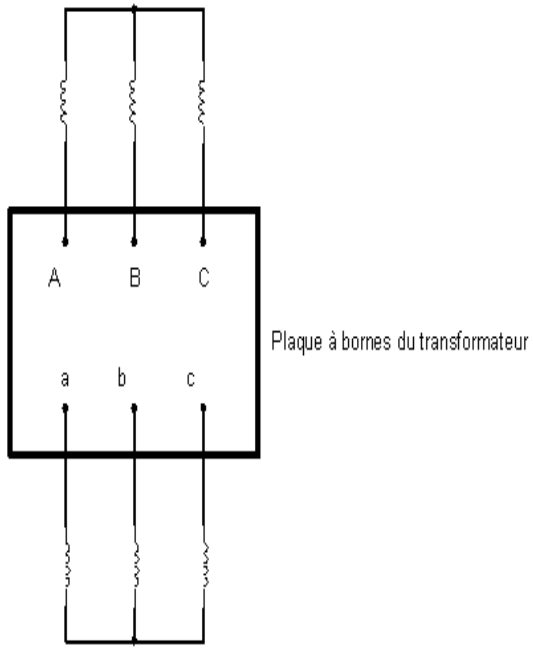
Le transformateur triphasé: Couplage Yy

- Sur la plaque à bornes 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.

- Rapport de transformation

$$m = \frac{V_P}{V_S} \;\; ; \;\; m_g = \frac{V_{L_p}}{V_{L_s}} = \frac{\sqrt{3}V_P}{\sqrt{3}V_S} \Rightarrow \; m = m_g$$

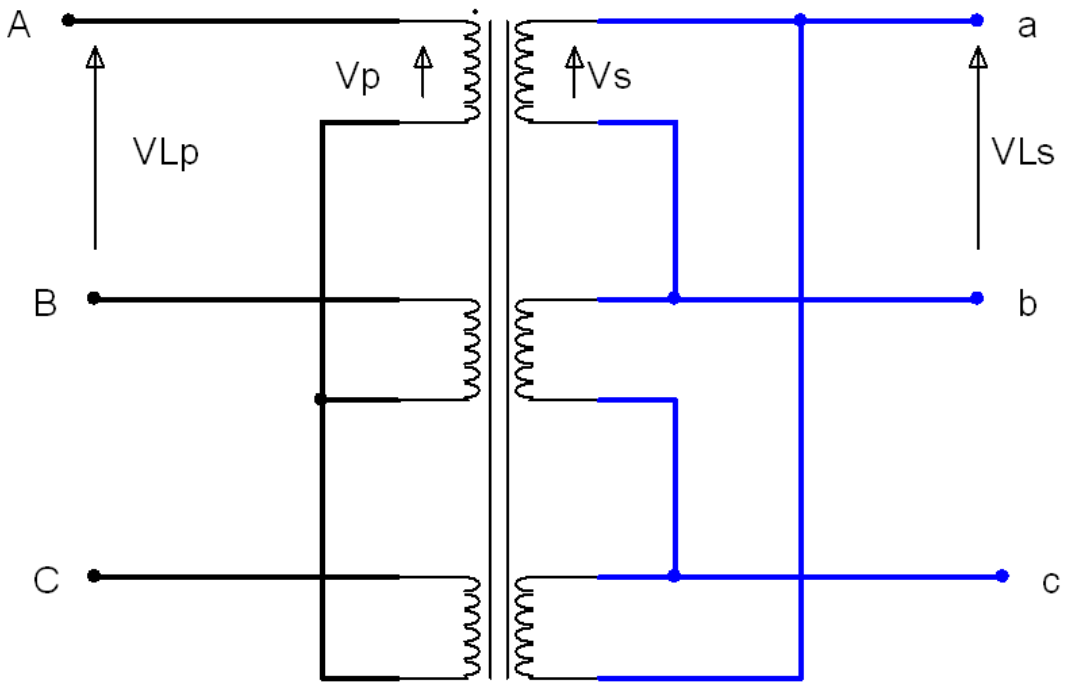




Le transformateur triphasé: Couplage Yd

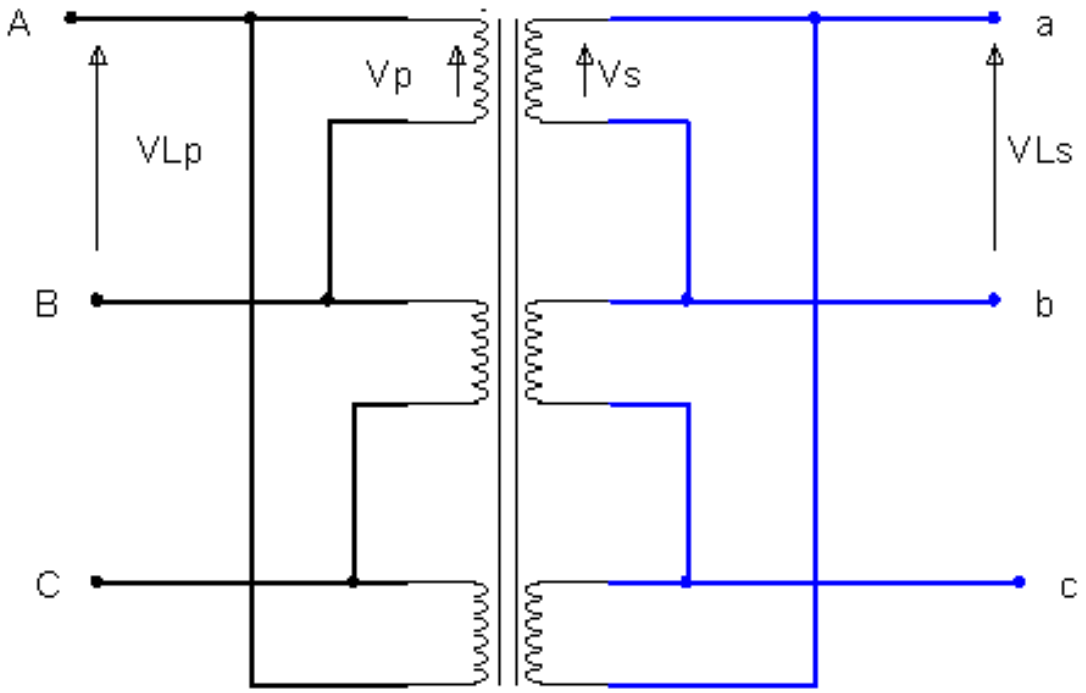
- **Rapport de transformation**

$$m = \frac{V_P}{V_S} = \frac{\frac{V_{L_p}}{\sqrt{3}}}{V_{L_s}} = \frac{V_{L_p}}{\sqrt{3}V_{L_s}} \quad ; \quad m_g = \frac{V_{L_p}}{V_{L_s}} \Rightarrow m = \frac{m_g}{\sqrt{3}}$$



Le transformateur triphasé: Couplage Dd

Le rapport de transformation dans ce cas est égal au rapport de transformation global. Les enroulements primaires et secondaires sont en phase.

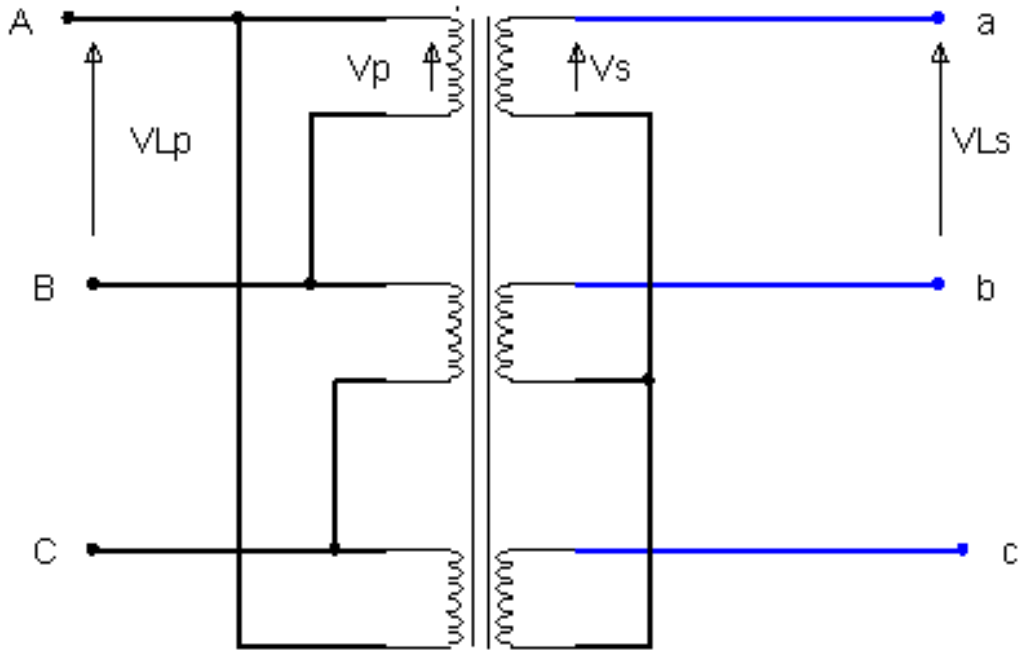


Le transformateur triphasé: Couplage Dy

❑ Rapport de transformation

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 :

$$m = \frac{V_P}{V_S} = \frac{V_{L_p}}{V_{L_s}/\sqrt{3}} = \sqrt{3}\frac{V_{L_p}}{V_{L_s}} \;\; ; \;\; m_g = \frac{V_{L_p}}{V_{L_s}} \Rightarrow m = \sqrt{3}m_g$$



Le transformateur triphasé: Couplage Dy (exemple d'application)

Énoncé: 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 ?

Le transformateur triphasé: Couplage Dy (exemple d'application)

Solution de l'exemple

Dans un couplage Dy, on rappelle les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_P = V_{L_P} \\ V_S = \dfrac{V_{L_S}}{\sqrt{3}} \end{cases} ; \begin{cases} I_P = \dfrac{I_{L_P}}{\sqrt{3}} \\ I_S = I_{L_S} \end{cases}$$

On donne $V_{L_P} = 22000\,V$; $V_{L_S} = 400\,V$; $I_{L_P} = 5\,A$.

Ainsi on aura :

$$m_g = \frac{V_{L_P}}{V_{L_S}} = \frac{22000}{400} = 55 \Rightarrow m = \sqrt{3}m_g = 55\sqrt{3}$$

1. Calcul de I_P et de I_{L_S}

$$\begin{cases} I_P = \dfrac{I_{L_P}}{\sqrt{3}} = \dfrac{5}{\sqrt{3}} = \boxed{2{,}886\,A} \\ I_{L_S} = I_S = m.I_P = 2{,}886 \times 55\sqrt{3} = \boxed{274{,}928\,A} \end{cases}$$

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

$$P_2 = \sqrt{3} \times V_{L_S} \times I_{L_S} \times FP = \sqrt{3} \times 400 \times 274{,}928 \times 0{,}8 = \boxed{152{,}38\,kW}$$

Merci pour votre aimable attention

À venir

Cours 6: Moteurs Asynchrones