

CHAPITRE 1

Transformateurs

Partie I : Transformateur Monophasé

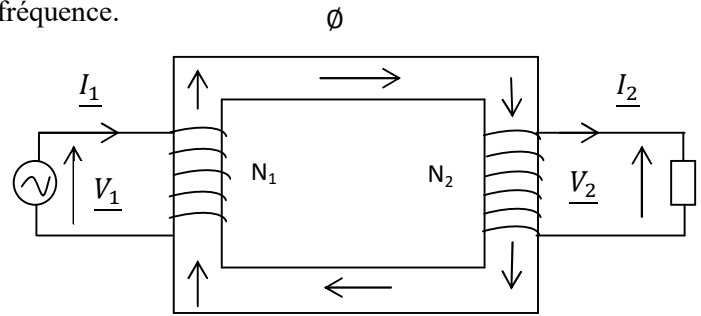
1. Introduction

1.1. Définition : Le transformateur est un élément statique permettant, en alternatif, la modification de certaines grandeurs (tension, courant) sans changer leur fréquence.

1.2. Constitution

Le transformateur est constitué essentiellement de:

- a) Circuit magnétique fermé.
- b) Enroulement primaire (Bobine 1)
- c) Enroulement secondaire (Bobine 2)



1.3. Principe de Fonctionnement:

Le primaire est alimenté par le réseau alternatif, il crée un champ et un flux magnétique (alternatif) dans le circuit magnétique feuilleté. Le secondaire, soumis à la variation de ce flux, est le siège d'une (force électromotrice) f.é.m induite due à la loi de Faraday qui alimente la charge.

Formule de Boucherot

La force électromotrice dans une bobine est donnée par la loi de Faraday $e = -N \frac{d\phi}{dt}$.

Pour un flux sinusoïdal $\phi(t) = \phi_M \sin(\omega t)$, la valeur efficace de e devient:

$$E = 4.44 \times N \cdot B_{max} \cdot S \cdot f$$

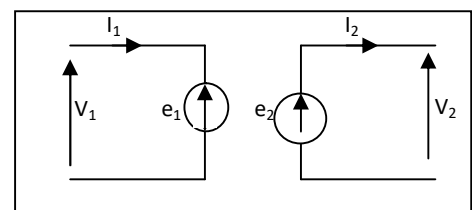
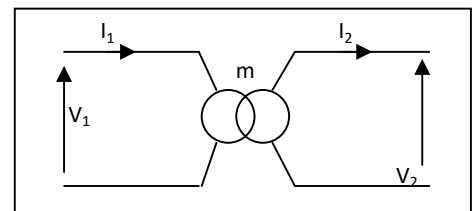
- E : valeur efficace de la f.e.m e (V)
- N : nombre de spires de la bobine
- S : section du circuit magnétique (m²)
- B_{max} : valeur max du champ magnétique dans le circuit (Tesla T)
- f : fréquence (Hz)

2. Transformateur parfait:

2.1. Hypothèse:

Un transformateur est parfait si on néglige:

- Les résistances des enroulements ; ($r_1=0$) et ($r_2=0$)
- Les inductances de fuite ; ($\ell_1 = 0$) et ($\ell_2 = 0$)
- La réluctance du circuit magnétique. ($\mathcal{R}_f = 0$)



2.2 Equations électriques

D'après la loi de mailles au schéma électrique équivalent on aura :

$$V_1(t) = e_1(t) \quad \text{Avec} \quad e_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (\text{convention de signe récepteur})$$

$$V_2(t) = e_2(t) \quad \text{Avec} \quad e_2(t) = -N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (\text{convention de signe générateur})$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathcal{R}_f \phi = 0 \quad \text{En valeurs efficaces le rapport de transformation est : } m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Remarque : Selon la valeur de m, on peut distinguer :

- $m = 1 \Rightarrow V_2 = V_1$: Le transformateur assure l'isolement électrique entre la source et la charge
- $m < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$: Le transformateur est dit abaisseur
- $m > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$: Le transformateur est dit élévateur

2.3 Puissances

Puissance apparente : $S_1 = V_1 \times I_1 = \frac{V_2}{m} \times m \times I_2 = V_2 \times I_2$ donc $S_1=S_2$

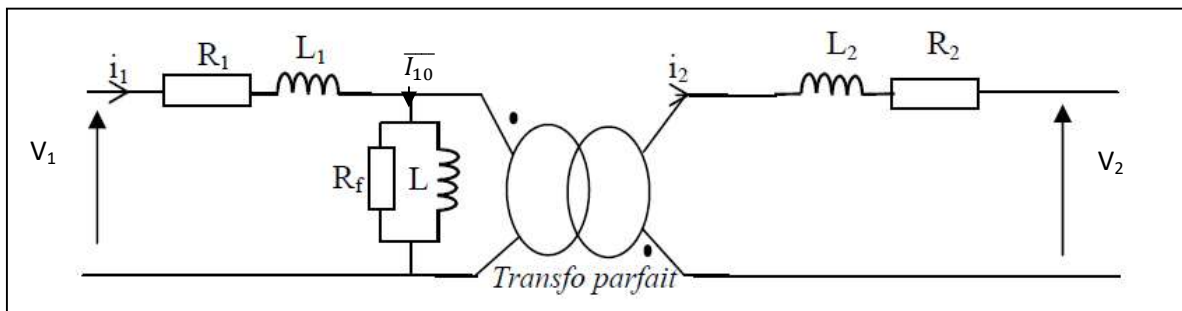
Puissance active : d'après la définition du transformateur parfait $P_1=P_2= S_1 \times \cos\varphi_1 = S_2 \times \cos\varphi_2$

Puissance réactive : $Q_1 = Q_2 = S_1 \times \sin\varphi_1 = S_2 \times \sin\varphi_2$

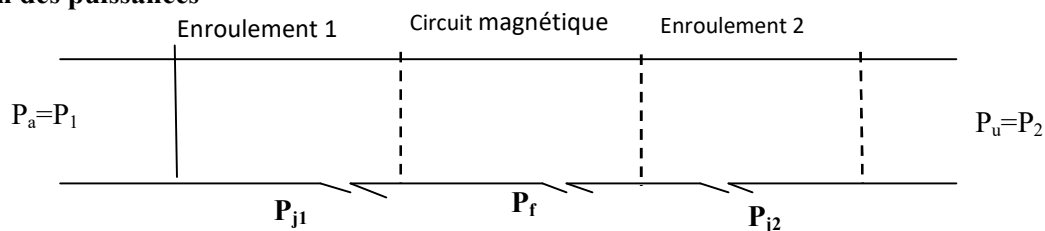
Conclusion : Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1 (pas de pertes)

3. Transformateur Réel

En réalité : $P_2 < P_1$ et le rendement < 1 car : il y'a présence des pertes. Alors dans un transformateur réel, On tient compte des résistances R_1 et R_2 et les inductances de fuites L_1 et L_2 des bobinages. De R_f et L_m la résistance équivalente aux pertes fer et l'inductance magnétisante vue du primaire. Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté sur la figure ci-dessous.



3.1 Bilan des puissances



P_1 et P_2 sont des puissances électriques : $P_1 = V_1 I_1 \cos \Phi_1$ et $P_2 = V_2 I_2 \cos \Phi_2$.

Le rendement du transformateur est : $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_j + P_{fer}}$

Le transformateur réel est un transformateur parfait avec des pertes (Joule, fer), ces pertes ont deux origines :

- ✓ **Electrique** Les pertes Joule (ou pertes *cuivre*) dans les enroulements : R_1 : résistance de l'enroulement primaire R_2 : résistance de l'enroulement secondaire ; $P_j = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$
- ✓ **Magnétique** (pertes fer) Pertes par courants de Foucault et Pertes par hystérésis.

3.2 Plaque signalétique d'un transformateur

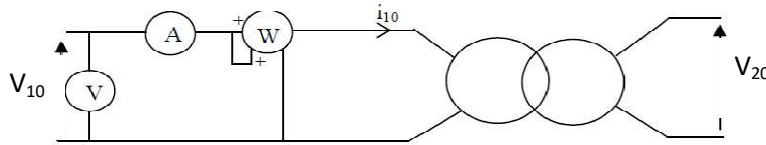
- $S_n = S_1 = S_2 = V_{1n} I_{1n} = V_{20} I_{2n}$ (VA)
- V_{1n}/V_{20} (V)
- f (Hz)

3.3 Détermination des pertes

3.3.1 Essai avec secondaire à vide:

L'essai à vide permet de mesurer : Le rapport de transformation m et les pertes fer P_f

A la tension primaire nominale on place le wattmètre pour mesurer la puissance à vide P_{10}



- $I_{10} \ll I_{1n}, I_{2n} = 0$

$P_1 = P_{fer} + P_J + P_2$ A vide : $P_2 = 0$ W et $P_J = R_1 I_{10}^2 + 0$ est négligeable car I_{10} négligeable (I_2 nul)

$P_{10} = P_{fer} + R_1 I_{10}^2$ Alors $P_{10} = P_{fer}$

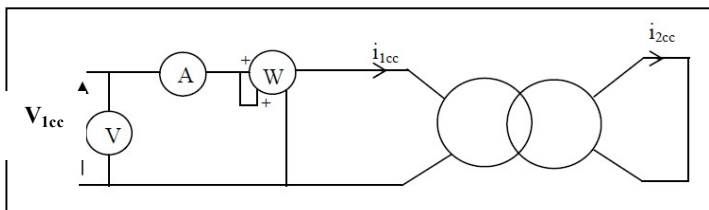
Rapport de transformation : $m = \frac{V_{20}}{V_1}$

Détermination de R_f et X_m (Branche Magnétisante)

1. **Détermination de R_f** $P_f = P_{10} = R_f I_{10a}^2$ avec $I_{10a} = \frac{E_{10}}{R_f} \simeq \frac{V_1}{R_f} \Rightarrow P_f = \frac{V_1^2}{R_f} \Rightarrow R_f = \frac{V_1^2}{P_{10}}$
2. **Détermination de X_m** $Q_{10} = P_{10} \text{tg}\phi_{10} = X_m I_{10r}^2$ avec $I_{10r} = \frac{E_{10}}{X_m} \simeq \frac{V_1}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{V_1^2}{Q_{10}}$
3. **Facteur de puissance $\cos\phi_{10}$** : $P_{10} = V_1 I_{10} \cos\phi_{10} \Rightarrow \cos\phi_{10} = \frac{P_{10}}{V_1 I_{10}}$

3.3.2 Essai en court-circuit

L'essai en court-circuit permet de mesurer les pertes Joule. On se place à V_{1cc} réduite, de façon à avoir $I_{2cc} = I_{2n}$ (valeur nominale). Le wattmètre mesure P_{1cc} la puissance absorbée en court-circuit par le transformateur:



- $V_{1cc} \ll V_{1n}, V_{2n} = 0$

$P_{1cc} = P_{fer} + P_J + P_2$

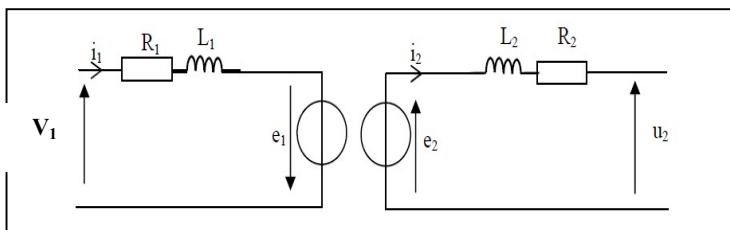
En court-circuit : $P_2 = 0$ W (car $V_2 = 0$ V)

L'essai se fait sous tension primaire réduite ($V_{1cc} \ll V_{1n}$). Les pertes fer sont proportionnelles à V_1^2 donc elles sont négligeables. Finalement $P_{1cc} = P_J$

Rapport de transformation : $m = \frac{I_{1cc}}{I_{2cc}}$

3.4 Modèle du transformateur avec l'Hypothèse de Kapp

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant I_{10} devant les courants I_1 et I_2 au fonctionnement nominal. Cela revient à débrancher l'impédance magnétisante (R_f/L_m), le schéma équivalent devient :



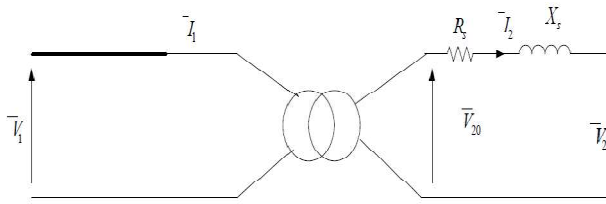
On pose :

$X_1 = L_1 \omega$: Réactance de fuites au primaire

$X_2 = L_2 \omega$: Réactance de fuites au secondaire

3.4.1 Schéma équivalent ramené au secondaire

Vu du secondaire, le modèle électrique d'un transformateur est :



$R_s = R_2 + m^2 R_1$: La résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_s = X_2 + m^2 X_1$: La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire

Détermination expérimentale des éléments du schéma équivalent

Essai en court-circuit :

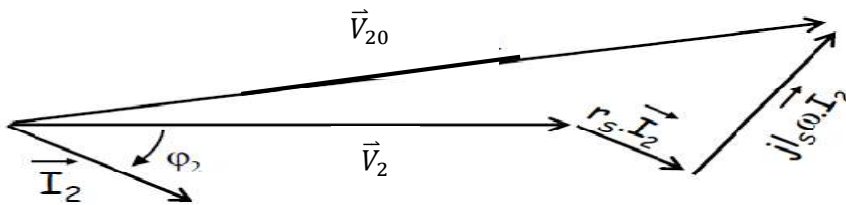
En court-circuit : on détermine : $P_{1cc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$ (On néglige les pertes Fer)

$$P_{1cc} = m^2 R_1 I_{2cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 = (m^2 R_1 + R_2) I_{2cc}^2 = R_s I_{2c}^2$$

$$\begin{cases} R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} \\ Z_s = m \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}} \end{cases} \quad \text{Avec } Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \quad \text{alors} \quad X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

3.5 Essai en charge (chute de tension en charge) :

On considère l'impédance de charge Z_c d'argument ϕ_2 , tel que le transformateur fonctionne aux conditions nominales de tension et de courant. On définit la chute de tension $\Delta V = V_{20} - V_2$ comme la différence des tensions secondaires à vide et en charge. D'après le modèle ramené au secondaire : $\vec{V}_{20} = \vec{V}_2 + R_s \vec{I}_2 + jX_s \vec{I}_2$



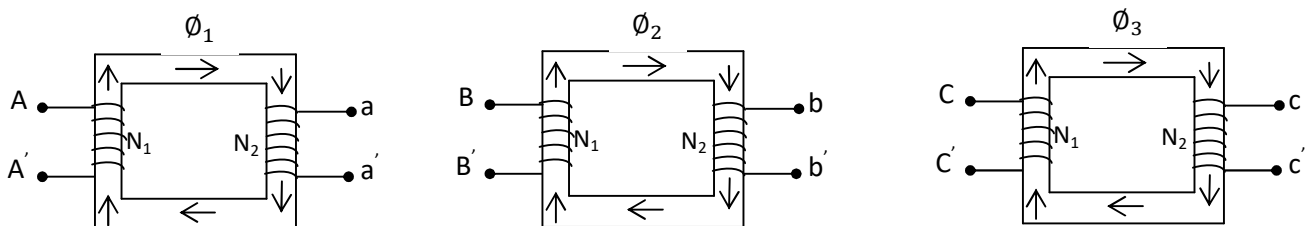
Ce qui donne : $\Delta V = V_{20} - V_2 = R_s I_2 \cos \phi_2 + X_s I_2 \sin \phi_2$

Partie II : Transformateur Triphasé

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé, d'où la nécessité d'utiliser des transformateurs triphasés. Le circuit magnétique peut être réalisé suivant deux configurations:

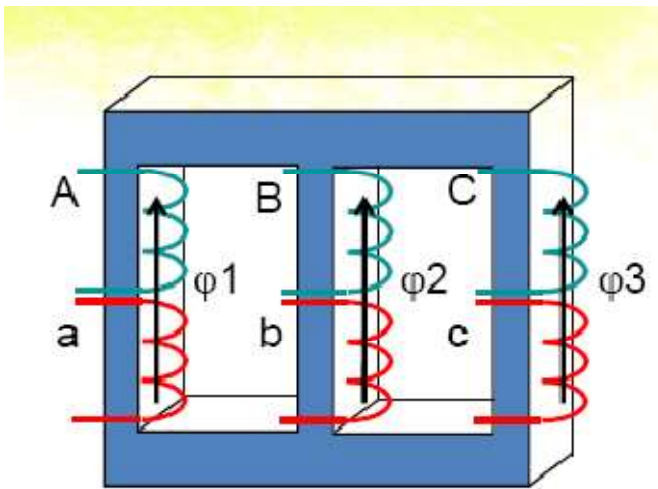
➤ **Transformateur à flux libres**

Trois transformateurs monophasés sont utilisés. Les primaires peuvent être couplés en triangle ou en étoile, ainsi que les secondaires. Les flux magnétiques ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 sont distincts et indépendants on dit qu'il s'agit d'un transformateur à flux libres. L'inconvénient est la quantité de fer installé, encombrement et le poids \implies Pertes fer et cout importants.



- **Transformateur à flux forcés** (Soit un seul transformateur triphasé: solution la plus économique)

On a obligatoirement: $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$ On dit qu'il s'agit d'un **transformateur à flux forcés**



On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)

Les bornes désignées par la même lettre sont dites **Homologues**

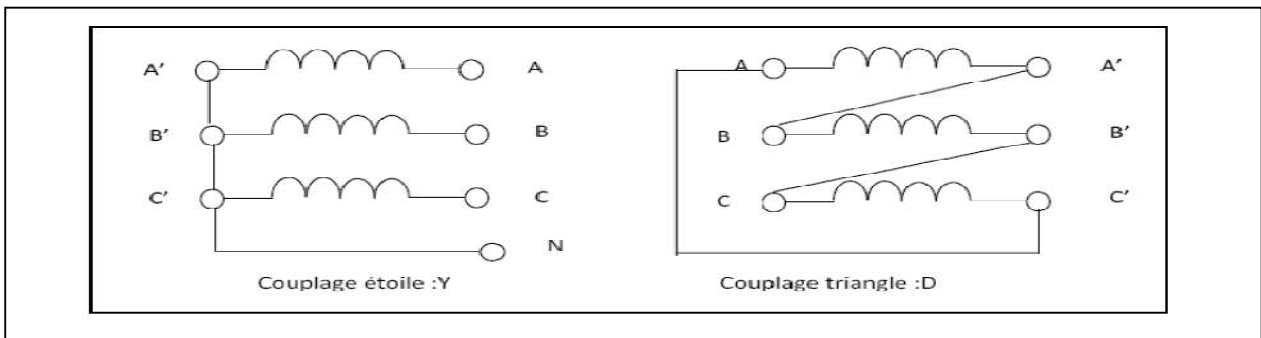
Remarque:L'enroulement primaire (à N_1 spires) et l'enroulement secondaire (à N_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux ϕ_1 les tensions V_A et V_a sont en phases.

Avantage : moins de pertes fer, diminution du coût et meilleur comportement en régime déséquilibré.

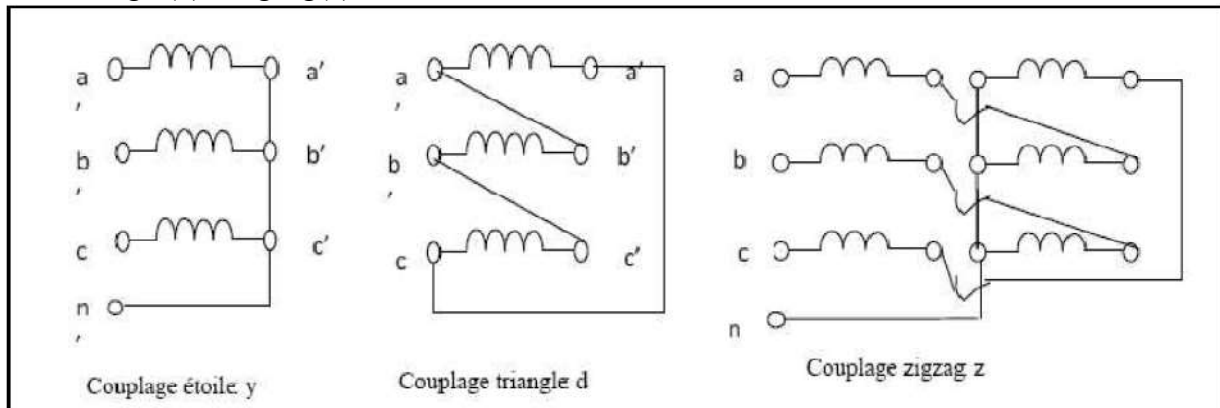
Inconvénient : transport et entretien plus difficiles

1. Couplage des enroulements primaires et secondaires

- Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D)



- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d)et zigzag(z)



On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y : étoile –étoile
- Y-d : étoile-triangle
- Y-z : étoile-zigzag
- D-y : triangle- étoile
- D-d : triangle –triangle
- D-z: triangle-zigzag

2. Rapport de transformation

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend plus uniquement des nombres de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit donc d'en préciser les différents couplages.

2.1. Rapport de transformation par colonne m_c :

Il est défini comme étant le rapport de nombre de spires secondaire par le primaire: $m_c = \frac{N_2}{N_1}$ et il est égal au rapport de deux tensions homologues.

2.2. Rapport de transformation par phase m :

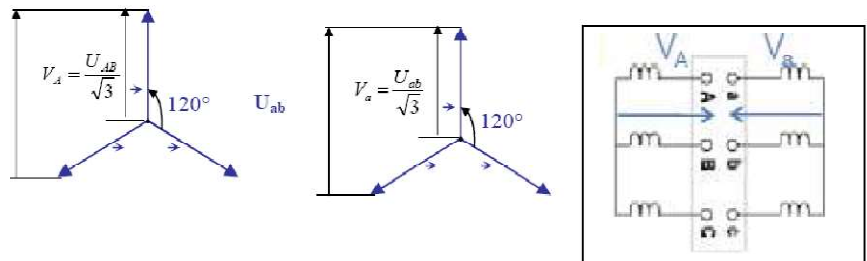
C'est le rapport entre deux tensions de même nature (simple ou composée).

$$m = \frac{V_{a0}}{V_A} = \frac{U_{ab0}}{U_{AB}}$$

Exemple :

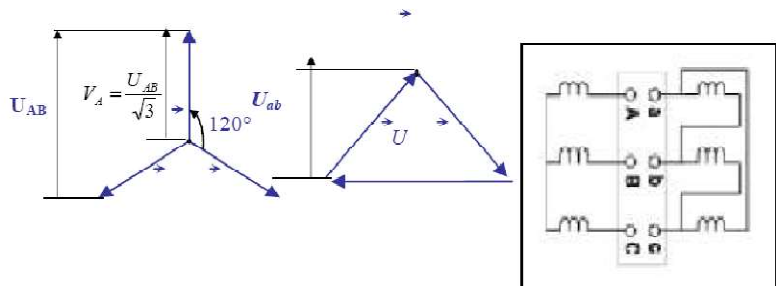
- Couplage Y y : U_{AB}

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3}V_a}{\sqrt{3}V_A} = \frac{V_a}{V_A} = \frac{N_2}{N_1} = m_c$$



- Couplage Y d :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}V_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{ab}}{V_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\sqrt{3}} m_c$$



Remarque: On peut observer que seuls les transformateurs présentant un couplage primaire analogue au couplage secondaire offrent $m=m_c$.

3. Indice horaire

Pour coupler en parallèle des transformateurs, il est nécessaire de connaître le déphasage θ entre les f.e.m de deux enroulements montés sur la même colonne et de même nature.

Ce déphasage θ est un multiple de $30 = \frac{2\pi}{12}$ et s'identifié par :

$$\theta = \text{déphasage entre } (V_A \text{ et } V_a) = \text{déphasage entre } (U_{AB} \text{ et } U_{ab})$$

On déduit alors l'indice horaire $I_H = \frac{\theta}{30}$