

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

## TRANSFORMATEUR MONOPHASE

### 1. ROLE

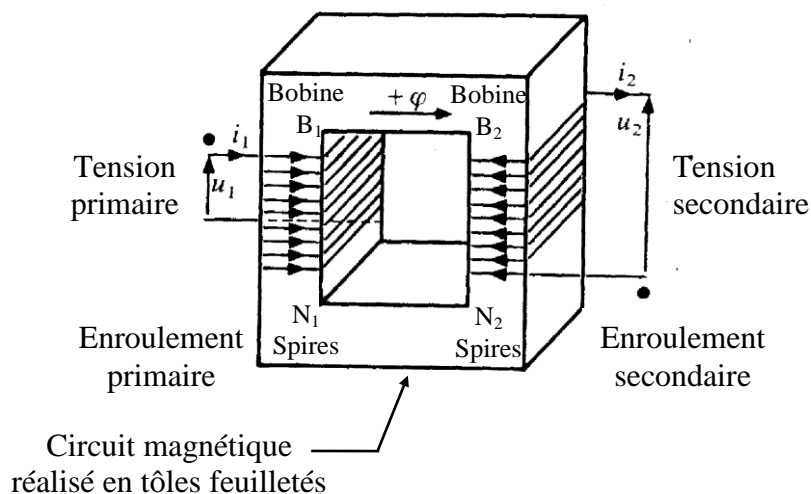
Un transformateur est un appareil qui permet d'obtenir en principe différents niveaux de tension.

Il peut être :

- abaisseur (distribution de l'énergie électrique aux usagers à partir du réseau HT, obtention d'une tension de sécurité etc...)
- élévateur (recherche d'une réduction des pertes dans le transport de l'énergie électrique par exemple)
- séparateur (mise en sécurité d'une partie d'un circuit en rendant le retour par la terre impossible : prise rasoir par exemple)

### 2. CONSTITUTION

Un transformateur est constitué de deux bobines isolées électriquement montées sur un même circuit magnétique généralement fermé.



Du point de vue de la construction, les enroulements sont plutôt superposés ce qui diminue les pertes magnétiques.

### 3. PRINCIPE

Le courant d'alimentation de la bobine B1 (primaire) crée un champ magnétique dont le module est lié au nombre de spires  $N_1$ . Ce champ magnétique est canalisé par le circuit magnétique et traverse la bobine B2.

La **variation de ce flux magnétique** engendre dans la bobine B2 (secondaire) une force électromotrice induite  $e_2$  fonction du nombre de spires  $N_2$  (loi de Faraday) et dont le sens est contraire au champ (loi de Lenz).

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

Ce fonctionnement se traduit par les lois suivantes :

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

D'où 
$$e_2 = (-) \frac{N_2}{N_1} \times e_1$$

Le rapport  $\frac{N_2}{N_1}$  est appelé **rapport de transformation** (désigné généralement par la lettre m ou parfois k)

On a donc 
$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{e_2}{e_1}$$

**Remarques :**

- Si le transformateur est abaisseur  $e_2 < e_1 \Leftrightarrow N_2 < N_1 \Leftrightarrow m < 1$   
Si le transformateur est séparateur  $e_2 = e_1 \Leftrightarrow N_2 = N_1 \Leftrightarrow m = 1$   
Si le transformateur est élévateur  $e_2 > e_1 \Leftrightarrow N_2 > N_1 \Leftrightarrow m > 1$
- La tension à vide est souvent noté  $U_V$  ou  $U_0$
- De part son principe le transformateur est **réversible** mais ne fonctionne que sous une **tension alternative**.

## 4. CARACTERISTIQUES D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASE

### a. Rapport de transformation en charge

Par définition la puissance apparente est  $S = UI$  en VA

Pour un transformateur dit "**parfait**", c'est-à-dire dont les pertes de flux sont négligeables :  $S = S_1 = S_2$ .

$$\Leftrightarrow S = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

on a alors, à la chute de tension, près

$$m \approx \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

**N.B. :** Le rapport de transformation donné par  $\frac{I_1}{I_2}$  sera plus proche de la réalité lorsque l'on se rapprochera du point nominal.

### b. Chute de tension dans le transformateur

Le primaire alimenté par une source de tension fonctionne en **récepteur**. L'enroulement aux bornes duquel on branche une charge, le secondaire, fonctionne en **générateur**.

Lorsque le transformateur fonctionne **à vide**, c'est-à-dire, lorsque le secondaire n'alimente aucune charge, le courant  $I_2 = 0$ .

Lorsque le transformateur fonctionne **en charge**, c'est-à-dire, lorsqu'il alimente une charge  $I_2 \neq 0$ , dans ce cas la tension secondaire chute principalement du fait de la résistance des enroulements. On peut calculer cette chute de tension :

en valeur absolue

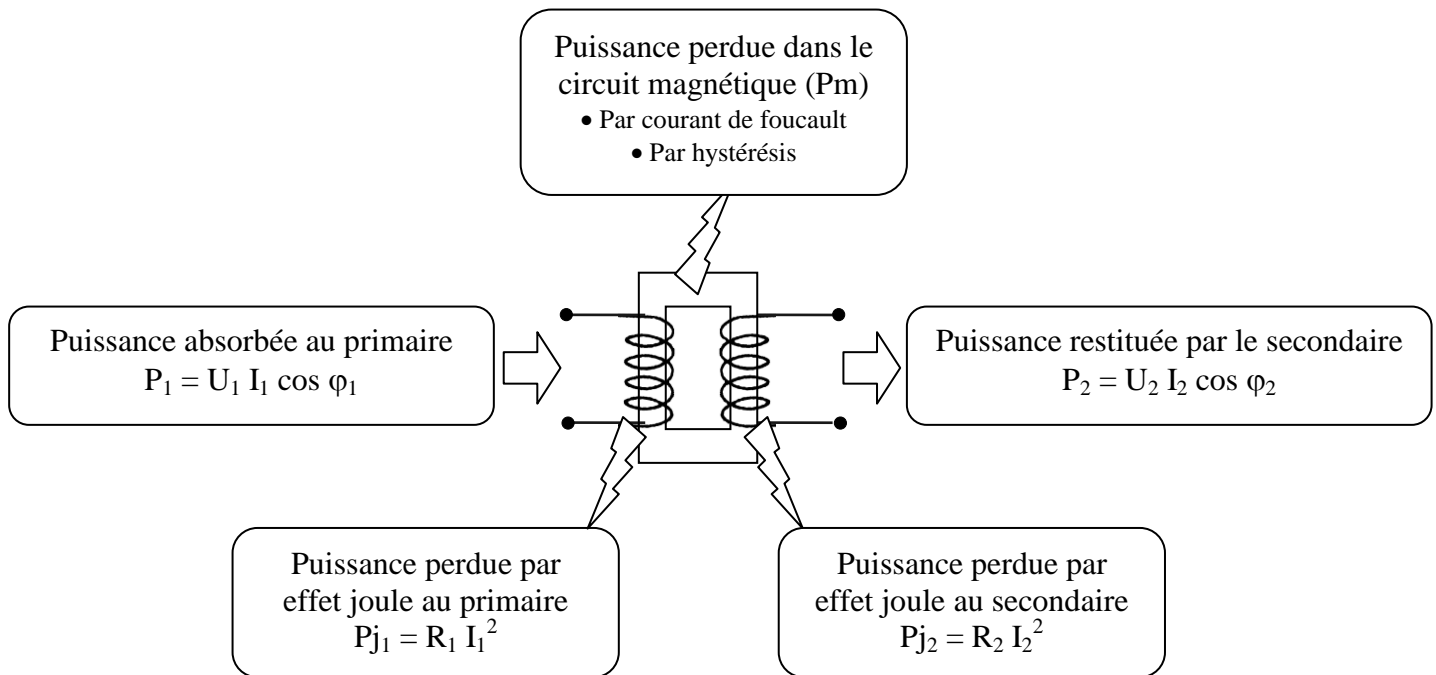
$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_{2ch}$$

en valeur relative (en %)

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{2V} - U_{2ch}}{U_{2V}} \times 100$$

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

### c. Bilan des puissances



### d. Expression du rendement

**Méthode directe**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \times I_2 \times \cos \varphi_2}{U_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1}$$

Remarque :

En pratique cette méthode aboutit souvent à un résultat erroné car le rendement d'un transformateur est proche de 1, ce qui implique que  $P_1$  est proche de  $P_2$  mais la mesure est largement faussée compte tenu de l'erreur des appareils.

On détermine donc le rendement par la **méthode des pertes séparées** :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{j1} + P_{j2} + P_m}$$

Pour déterminer les différentes pertes on réalise 2 essais :

- Un **essai à vide** dans lequel les pertes par effet joule (ou pertes cuivre) n'existent qu'au primaire et peuvent être négligées donc permettant de mesurer les pertes magnétiques (ou pertes fer).
- Un **essai en court-circuit** réalisé **sous tension réduite** réglée pour obtenir  $I_{2n}$  ( $\approx 10\% U_{1n}$ ) ce qui rend négligeable les pertes magnétiques.

N.B. en cas de court-circuit à  $U_{1n}$  l'intensité devient

$$I_{cc} = I_n \times \frac{U_{1n}}{U_{cc}} = I_n \times \frac{U_{1n}}{U_{1n} \times \frac{U_{cc\%}}{100}} = I_n \times \frac{100}{U_{cc\%}}$$

Le rendement d'un transformateur est maximal lorsque les pertes fer  $P_F$  sont rendues égales aux pertes cuivre  $P_C$  :

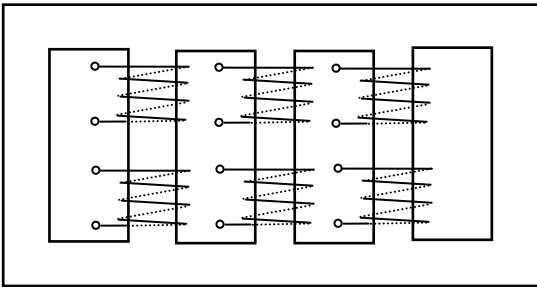
$$P_F = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

## TRANSFORMATEUR TRIPHASE

### 1. CONSTITUTION

Outre le fait qu'il puisse être composé à partir de trois transformateurs monophasés, un transformateur triphasé se trouve généralement sous la forme suivante :



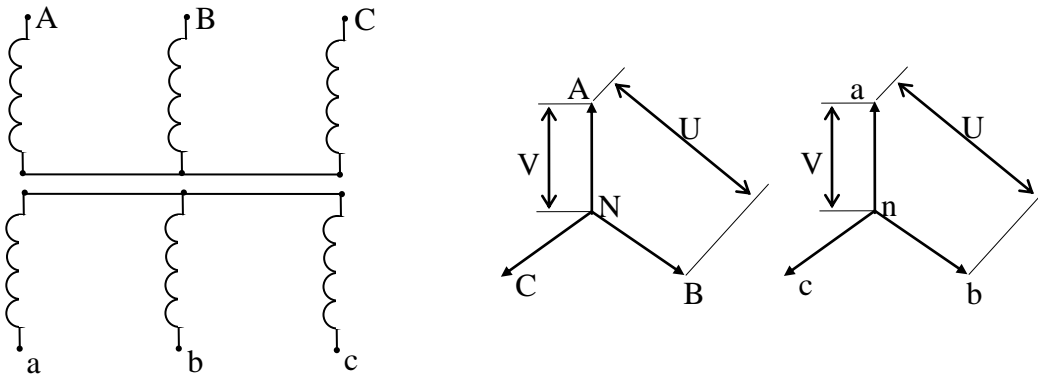
Les six enroulements (3 primaires et 3 secondaires) peuvent être connectés de plusieurs manières différentes, appelées couplages.

### 2. COUPLAGES

On appelle "couplage" l'association des enroulements primaires d'une part et secondaires d'autre part, énoncés dans l'ordre Haute tension-Basse tension. Les enroulements primaires peuvent être branchés en étoile ou en triangle, les enroulements secondaires en étoile, triangle ou zigzag.

Remarque : on appelle tension nominale, la tension entre phases  $U$ , et courant nominal, le courant en ligne  $I$ . La puissance apparente nominale  $S$  se calculera par :  $S_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3}$  au primaire ou par  $S_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3}$  au secondaire. En somme, les valeurs dites nominales sont celles qui sont mesurées à l'extérieur du transformateur au point de fonctionnement prévu par le constructeur.

#### a. Couplage étoile-étoile $Yy$



|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

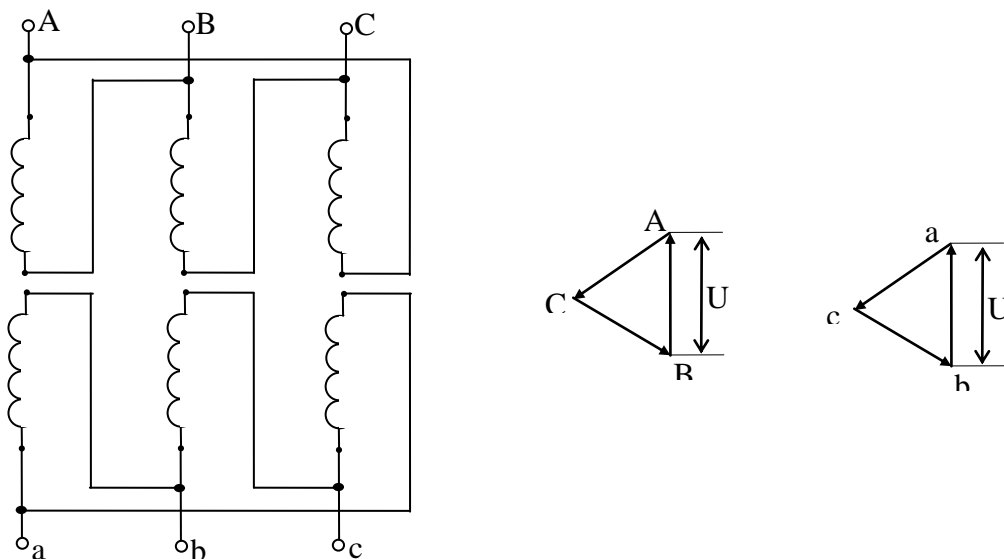
Dans ce cas, le rapport de transformation est :  $m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ , comme pour le transformateur monophasé.

Symbole : (pour transformateur abaisseur de tension)

Yy : Y, la 1<sup>ère</sup> lettre majuscule indique le couplage des bobinages primaire côté HT.  
y, la 2<sup>ème</sup> lettre minuscule indique le couplage des bobinages secondaires côté BT.

Si la désignation est suivie de n (ex : Yyn), cela signifie que le neutre est sorti au secondaire.

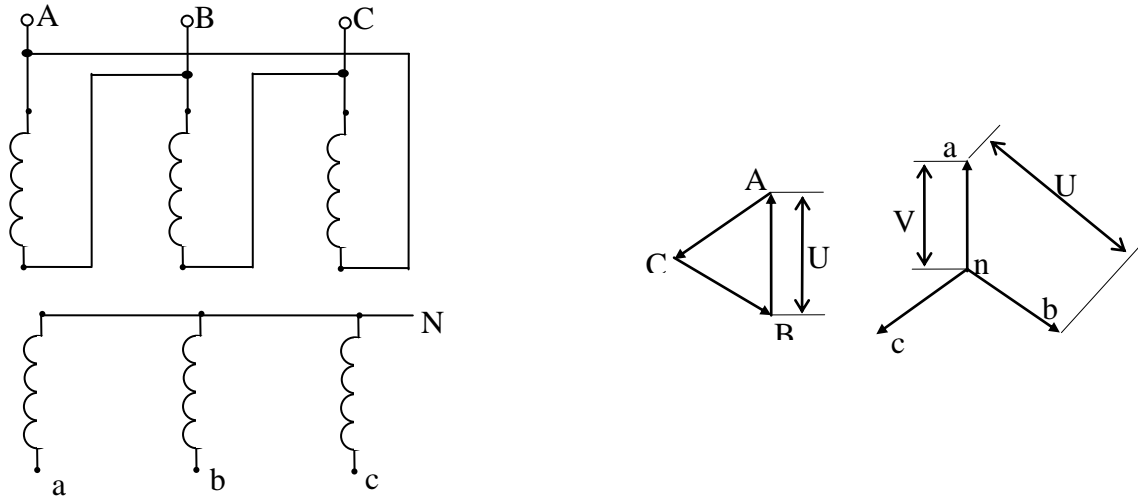
### **b. Couplage triangle-triangle Dd**



Dans ce cas, le rapport de transformation est :  $m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$ , comme pour le transformateur monophasé.

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

**c. Couplage triangle-étoile Dy**

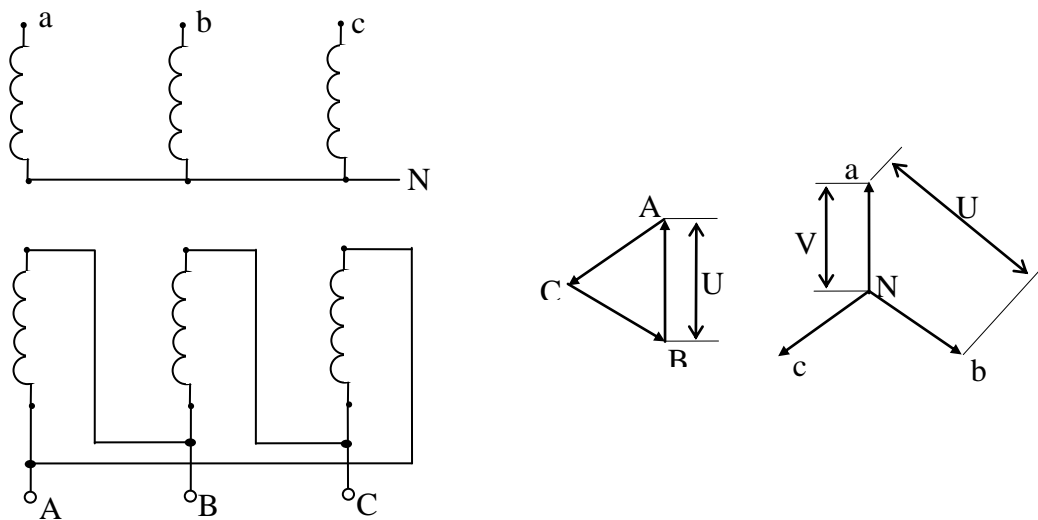


Dans ce cas, on a  $V_2 = m \cdot U_1$  et  $U_2 = V_2 \cdot \sqrt{3}$  donc  $U_2 = m \cdot U_1 \cdot \sqrt{3}$  et donc  $m = \frac{U_2}{U_1 \sqrt{3}}$

De même, l'approximation  $U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} = U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3}$  montre que les courants en ligne sont dans le rapport

$$m = \frac{I_1}{I_2 \sqrt{3}}$$

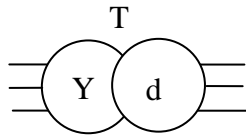
**d. Couplage étoile-triangle Yd**



On a  $V_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$  et  $U_2 = m \cdot V_1$ , donc  $U_2 = \frac{m \cdot U_1}{\sqrt{3}}$ , soit  $m = \frac{U_2 \sqrt{3}}{U_1}$  de même  $m = \frac{I_1 \sqrt{3}}{I_2}$

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

### 3. SYMBOLES



NB : On précise dans chaque cercle le couplage des enroulements.

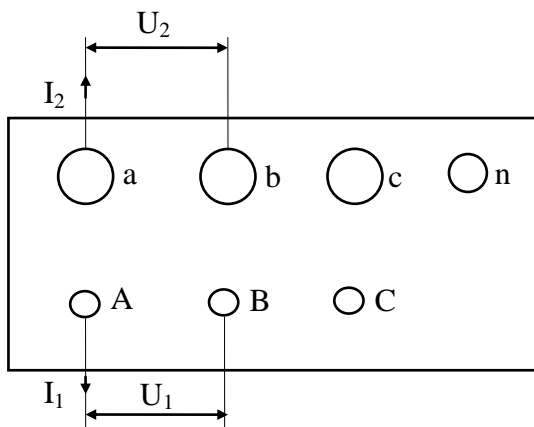
### 4. RENDEMENT

Classiquement, le rendement d'un transformateur triphasé s'exprime par

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} = \frac{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2 + PF + PC}$$

PF = pertes Fer  
PC = pertes Cuivre

### 5. PLAQUE A BORNES



Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

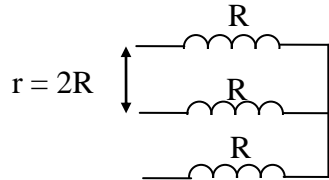
## Le transformateur

TELEEC

Date : \_\_\_\_\_

### PERTES PAR EFFET JOULES DANS UN ENROULEMENT TRIPHASE

#### 1. MONTAGE ETOILE



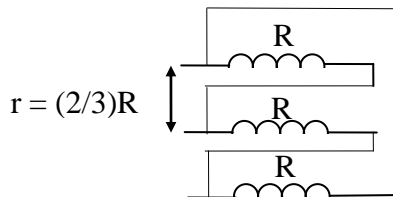
Chaque enroulement monté entre phase et neutre est parcouru par le courant I (si le montage est équilibré). Si R est la résistance d'un enroulement, les pertes par effet Joules sont :

$$p_j = 3.R.I^2$$

Si l'on appelle r, la résistance mesurée de l'extérieur du montage, on peut aussi écrire, sachant

que dans ce cas  $r = 2R$  :  $\Rightarrow R = \frac{r}{2}$  donc :  $p_j = 3.RI^2 = \frac{3}{2}rI^2$  ❶

#### 2. MONTAGE TRIANGLE



Le montage étant équilibré, chaque enroulement monté entre 2 phases est parcouru par le

courant  $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$ .

Si R est la résistance d'un enroulement, les pertes par effet Joules sont :

$$p_j = 3.RJ^2 = 3.R.\left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2 = RI^2.$$

Si l'on appelle r, la résistance mesurée de l'extérieur du montage, on peut aussi écrire, sachant que dans ce cas r correspond à la mise en série de 2 résistances R le tout en parallèle avec à

nouveau R soit :  $r = \frac{2R^2}{2R+R} = \frac{2}{3}R$ , donc :  $R = \frac{3}{2}r$  donc :  $p_j = RI^2 = \frac{3}{2}rI^2$  ❷

#### 3. FORMULE GÉNÉRIQUE

En comparant les formules ❶ et ❷, on peut conclure que l'expression des pertes par effet joules dans un enroulement triphasé équilibré, **qu'il soit étoile ou triangle**, est égal à :

$$p_j = \frac{3}{2}rI^2$$

avec r = résistance mesurée de l'extérieur des enroulements (entre 2 bornes, le couplage étant réalisé).



Nom : \_\_\_\_\_

# Le transformateur

TELEEC

Prénom : \_\_\_\_\_

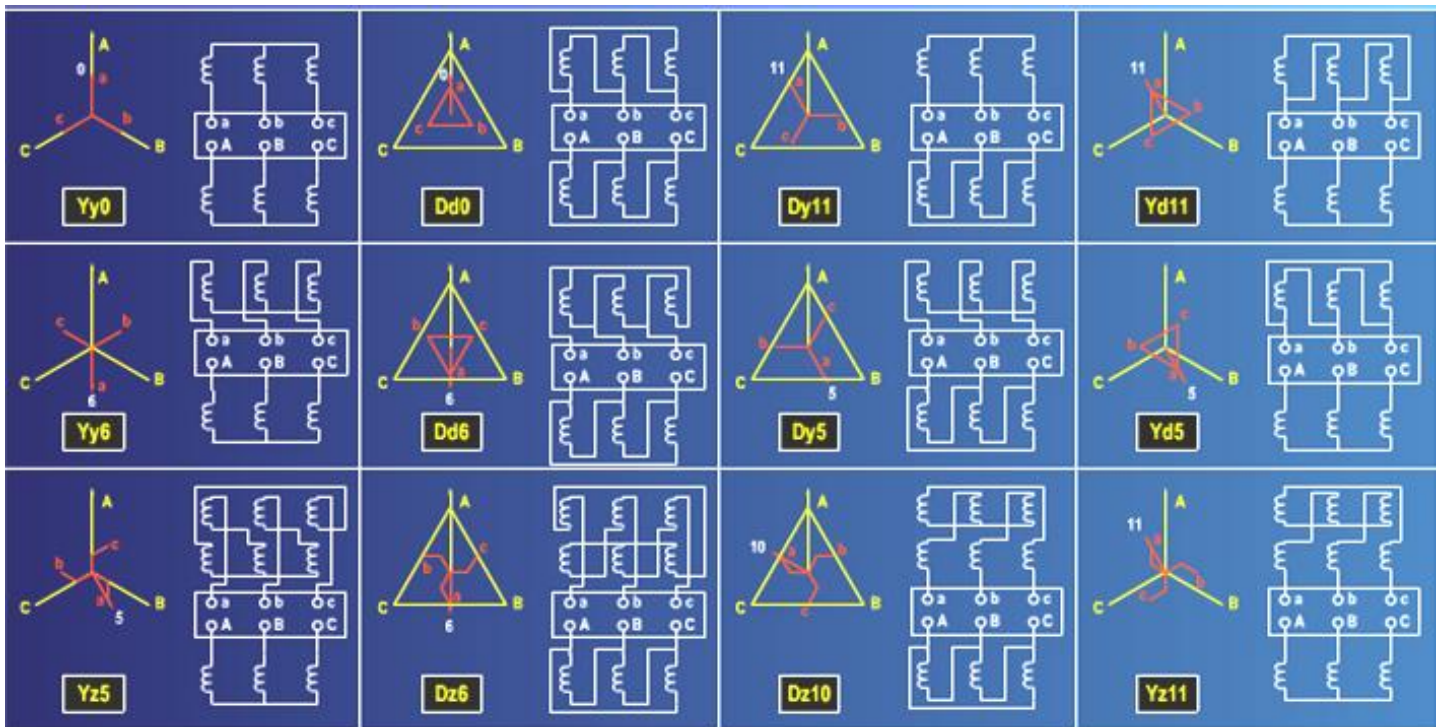
Date : \_\_\_\_\_

## COUPLAGE DE 2 TRANSFORMATEURS TRIPHASES

### 1. INDICE HORAIRE

L'indice horaire exprime l'angle de déphasage existant entre les représentations vectorielle des tensions primaire et secondaire.

Le tableau suivant recense l'ensemble des couplage généralement utilisé pour les transformateurs triphasés.



### 2. DETERMINATION DE L'INDICE HORAIRE :

L'indice horaire peut être simplement déterminé à partir du déphasage mesuré à l'aide d'un oscilloscope ou on peut le déterminer par des mesures de tension (méthode l'électricien)

#### Méthode dite de l'électricien :

On alimente le coté B.T. par le réseau,

On relie les bornes « a » et « A »

On mesure les tensions composées  $U_{ab}$ ,  $U_{AB}$

On mesure les tensions mixtes  $U_{bB}$ ,  $U_{cC}$

Sur papier millimétré, on superpose les points a et A

Choisir une échelle pour déterminer la distance  $U_{AB}$  et positionner les points B et C

(A se trouve à 12h, B à 4h et C à 8h)

Puis au compas, on trace à partir du point A (équivalent au point a) la distance correspondant à  $U_{ab}$

De la même façon, on trace

à partir du point B la distance  $U_{bB}$  (2 points d'intersection avec le tracé précédent)

puis à partir du point C la distance correspondant à  $U_{cC}$ .

En déduire la position des points « a », « b » et « c » et l'indice horaire.

|                |                          |               |
|----------------|--------------------------|---------------|
| Nom : _____    | <b>Le transformateur</b> | <b>TELEEC</b> |
| Prénom : _____ |                          | Date : _____  |

### 3. CONDITIONS DE COUPLAGE DE 2 TRANSFORMATEURS TRIPHASES

Pour pouvoir connecter 2 transformateurs en parallèle (extension) il faut que :

- Les tensions à vide aux secondaires aient la même amplitude (rapports de transformation identiques à 4% près)
- Les tensions secondaires soient en phase (indices horaire de couplage compatibles)
- Les tensions de court-circuit soient égales à 10% près

### 4. PROTECTION ELECTRIQUE DES TRANSFORMATEURS

#### **a. Protection amont**

Protection contre les surtensions d'origine atmosphérique :

on utilise des parafoudres ou limiteurs de surtension raccordés à une prise de terre locale par une liaison courte et de faible impédance. Dans ces conditions le module écoule la surtension à la terre et revient à son état initial pour attendre une nouvelle perturbation. En cas de surcharge fonctionnelle, le module se détruit, il faut le remplacer.

Protection contre les courts-circuits et les surcharges :

Afin d'éviter un déclenchement intempestif, la protection amont contre les surintensités doit tenir compte de l'effet transitoir qui apparaît lors de la mise sous tension d'un transformateur.

#### **b. Protection aval**

Par déclencheurs directs :

Le plus adapté aux conditions exigées, il permet le réglage de l'intensité et du temps.

Par déclencheurs indirects :

On utilise comme réducteur des transformateurs de courant qui permettent d'alimenter les relais en basse tension avec des courants faibles tout en effaçant les pointes d'intensité (saturation du circuit magnétique du T.I.).

#### **c. Protection contre une élévation anormale de température**

Les transformateurs peuvent être refroidi selon leur puissance

- par convection naturelle de l'air
- par ventilation forcée
- par circulation forcée d'air ou d'eau

Des blocs de protection assurent les fonctions de :

- détection d'une augmentation de la pression interne
- détection d'une augmentation de température
- vérification du plein de diélectrique
- détection des dégagements gazeux

Un module DGPT2 signifie qu'il contrôle le Dégagement Gazeux, la Pression et 2 seuils de Température.



### 5. EXERCICES :

E2-2012 p6-7, E2-2010 p6, E2-09-2009