

Le transformateur triphasé

I. Principaux paramètres de la plaque signalétique

La puissance apparente ou assignée S, elle s'exprime en Voltampère $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$	Tension de court-circuit : $U_{CC} \% = 100U_{1CC}/U_1$
	Réglage hors tension
	Couplage
	Diélectrique
Fréquence	Classe thermique et échauffement
Tension et intensité au primaire	refroidissement
Tension et intensité au secondaire	Technologie diélectrique : sec enrobé ou immergé

Exemple de plaque signalétique :



Transformateur enrobé 3 phase(s) 50 Hz refroid. AN Classe therm. HT F
 N° 753301-01 année 2002 conforme à NBN HD 538-1 S1 #1 HD 444 S1:1998/A3:1992
 1000 kVA Ucc 6.00 % Couplage Dyn11 - IK IP 00
 avant le schéma ci-dessous relayer haute tension basse tension
 changement de tension

relayer	haute tension	basse tension
1-2	10500 V	400 V
2-3	10250 V	1443.4 A
2-5	10000 V	
3-4	9750 V	
4-5	9500 V	

niveaux d'isolement
 haute tension basse tension
 95-38 10.0 kV

masses
 sans enveloppe 2190 kg
 de l'enveloppe kg
 totale avec enveloppe kg

Classes HD 444-51 : Comportement au feu F1
 Climatique C2
 Environnement E2

Note : raccordement HT
 Effort limité à la traction sur les plaques de raccordement : 500N
 Couple limité sur les vis de réglage et de raccordement : 20Nm

Usine d'Ennery (Moselle) France
 n°226277



Signification :

- 3 Phase(s) : Nombre de phase du transformateur
- 50 Hz : Fréquence nominale d'utilisation du transformateur
- Refroid. AN : Type de refroidissement du transformateur
 - ONAN : circulation huile naturelle (ON) + circulation air naturelle (AN)
 - ONAF : circulation huile naturelle (ON) + circulation air forcée (AF)
- Classe therm : classe thermique d'isolation : définit la limite maximale que peuvent supporter l'isolants des enroulements
- N° 753301-01 : Numéro de série
- Année 2002 : Année de construction
- 1000 kVA : Puissance apparente nominale
- Ucc : 6 % : Tension de court-circuit
- Couplage Dyn11 : couplage des enroulements du transformateur
- IK : indice de protection contre les chocs
- IP 00 : indice de protection contre l'eau et la poussière
- Haute tension : Valeur des tensions nominales primaires possible
- Basse tension : Valeur de la tension nominale et du courant nominal secondaire
- Niveau d'isolement : tension maximale entre enroulement et masse et entre enroulement

II. Rapport de transformation

Par définition : $M = U_{ab} / U_{AB}$

Ce rapport dépend non seulement des nombres de spires primaires et secondaires, mais aussi des couplages au primaire et au secondaire.

III. Indice horaire

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaires et secondaires et homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (V_A , V_a) ou (U_{AB} , U_{ab}).

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de 30° .

θ = retard d'une tension BT sur son homologue HT.

L'indice horaire I est : $I = \theta / 30^\circ$ $0 \leq I \leq 11$ (entier)

IV. Couplages du transformateur triphasé

IV.1. Principe

Comme tous les récepteurs triphasés, le primaire d'un transformateur peut avoir ses enroulements couplés en étoile ou en triangle. De la même façon, les bobines secondaires pourront être connectées en étoile, en triangle ou en zig-zag.

	Couplages		
	Etoile Y	Triangle D	zigzag Z
Côté HT	Y	D	
Côté BT	y	d	z

Remarque :

Le couplage zig-zag est obtenu en divisant les trois bobines d'un enroulement en six bobines. Pour avoir une phase, on met en série deux demi-bobines prises sur des colonnes différentes en sens inverse.

IV.2. Choix du couplage

Il s'effectuera à partir de nombreux critères ; citons quelques règles générales :

- Dimensionnement des enroulements :

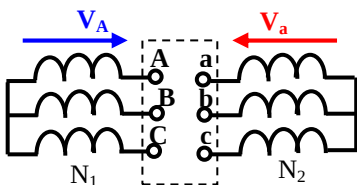
- Aux très hautes tensions, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : $V' = U / \sqrt{3}$
- Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : $J = I / \sqrt{3}$

- Fonctionnement déséquilibré :

- Aux faibles déséquilibres ($I_{\text{neutre}} \leq 10\% I_{\text{ligne}}$), primaire et secondaire seront couplés en étoile avec conducteurs neutres;
- Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire sera connecté en zigzag ;
- Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle-étoile pour économiser du cuivre au secondaire.

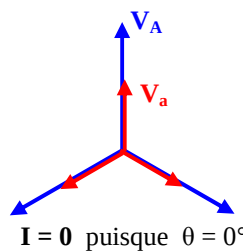
IV.3. Couplages normalisés

IV.3.1 Couplage étoile-étoile Yy

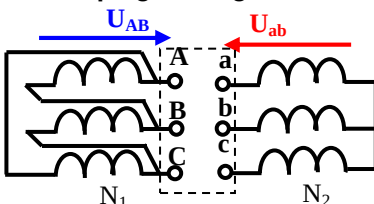


- Equation aux tensions du transformateur-colonne :

$$V_a = N_2 / N_1 V_A \quad \text{soit} \quad M = U_{ab} / U_{AB} = N_2 / N_1$$



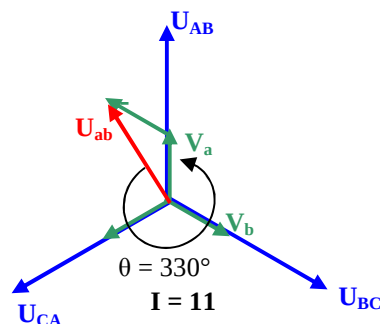
IV.3.2 Couplage triangle-étoile Dy



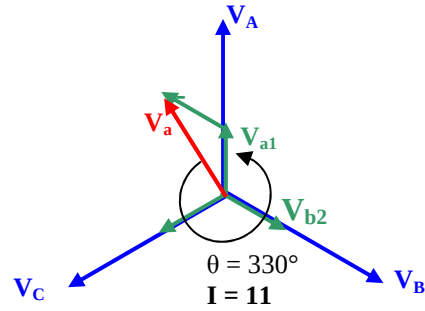
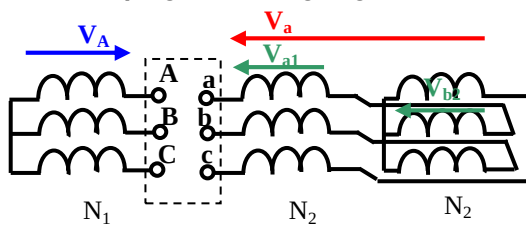
- Equation aux tensions de la première colonne s'écrit

$$V_a = N_2 / N_1 U_{AB} \quad \text{soit} \quad M = U_{ab} / U_{AB} = \sqrt{3} N_2 / N_1$$

$\theta = 330^\circ \rightarrow I = 330^\circ / 30 = 11$ C'est bien 11 heures ! Ce couplage sera désigné **Dy11**



IV.3.2 Couplage étoile-zig zag Yz



Equations aux tensions du transformateur-colonne:

$$V_{a1} = V_{a2} = N_2/N_1 V_A$$

$$V_{b1} = V_{b2} = N_2/N_1 V_B$$

$$\underline{V}_a = \underline{V}_{a1} - \underline{V}_{b2} = N_2/N_1 (\underline{V}_A - \underline{V}_B)$$

$$V_a = N_2/N_1 U_{AB} \text{ soit } M = U_{ab}/U_{AB} = \sqrt{3} N_2/N_1$$

$$\theta = 330^\circ \rightarrow I = 330^\circ/30 = 11 \quad \text{Ce couplage sera désigné } \mathbf{Yz11}$$

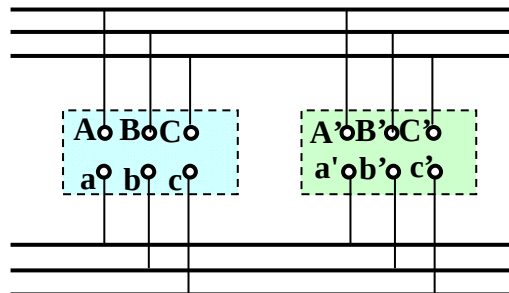
V. Marche en parallèle des transformateurs triphasés

V.1. But

La puissance transmise par une centrale au réseau évolue au cours du temps en fonction de la consommation. Un transformateur unique qui est capable de transmettre la pointe maximale de consommation serait en général utilisé très en-dessous de son fonctionnement nominal, avec un rendement médiocre ou mauvais. On préfère disposer de plusieurs transformateurs de moindre puissance fonctionnant en parallèle de telle sorte qu'ils soient toujours au voisinage de leurs conditions nominales de marche.

V.2. Conditions de couplage en parallèle

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge.

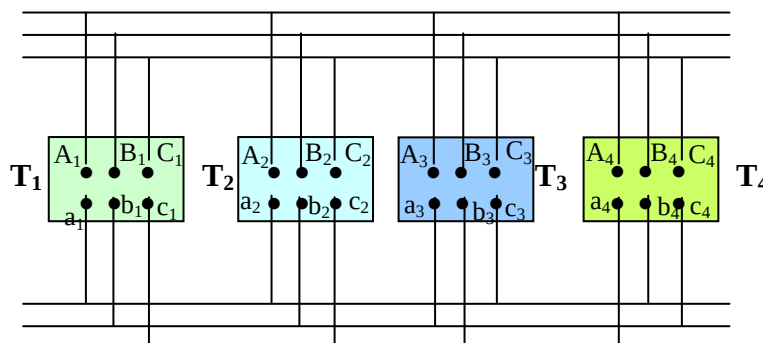


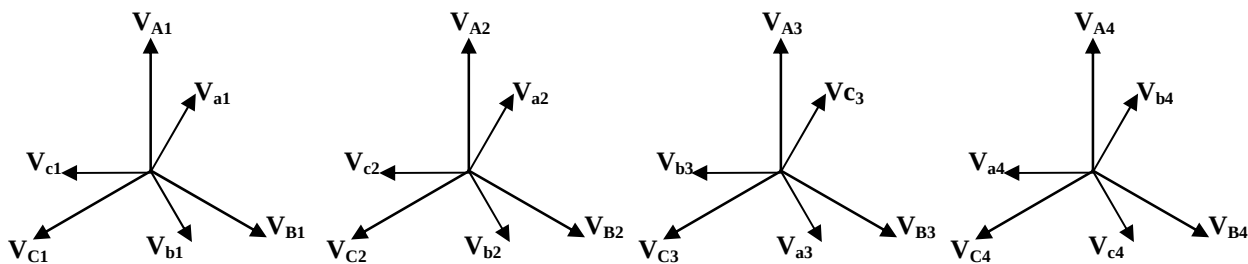
Pour cela il faut que:

- _ Les transformateurs soient alimentés sous la même tension.
- _ Les rapports de transformations à vide soient identiques.
- _ Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- _ Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles.

V.3 Groupes d'indices horaires

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire. on pourra donc coupler en parallèle sans difficulté des transformateurs dont les indices diffèrent de ± 4 .





Pour toutes ces raisons on définit quatre groupes de transformateurs suivant les valeurs des indices: deux transformateurs d'un même groupe (et de même rapport) peuvent aisément marcher en parallèle.

Groupe	Indices	Couplages
I	0, 4, 8	Yy Dd Dz
II	2, 6, 10	Yy Dd Dz
III	1, 5	Dy Yz Yd
IV	7, 11	Dy Yz Yd

Nota : Les indices 9 et 3 n'existent pas

VI. Exercices

Exercice 1

1/ Sur la plaque signalétique d'un transformateur triphasé on relève les caractéristiques suivantes :

- Puissance assignée : 1250 kVA.
- Tension primaire assignée : 20 kV.
- Tension secondaire à vide : 237 V/410 V.
- Couplage Dyn 11.
- Tension de court-circuit % : 5,5.
- Courant assigné : 35,2 A.
- Courant d'enclenchement : I_e / I_n : 9.

Calculer :

- 1° la tension de court-circuit U_{CC} ;
- 2° l'intensité du courant de court-circuit I_{CC} ;
- 3° la puissance de court-circuit P_{CC} ;
- 4° l'intensité du courant d'enclenchement I_e ;
- 5° la puissance réelle disponible si l'installation desservie a un $\cos \varphi$ de 0,80.

Réponses : $U_{CC} = 1100V$; $I_{CC} = 640A$; Avec $\cos \varphi = 1$, $P_{cc} = 22 MW$; $I_e = 316,8 A$; $P = 1000 kW$.

Exercice 2

On donne les schémas des enroulements et les représentations vectorielles aux figures : 1 et 2 de deux transformateurs triphasés.

1° Figure 1 (a), (b) : Dessiner la représentation vectorielle « horaire ».

2° Figure 2 (a), (b) : Tracer le schéma des couplages.

3° Indiquer pour chaque transformateur l'indice horaire; la mise en parallèle est-elle possible?

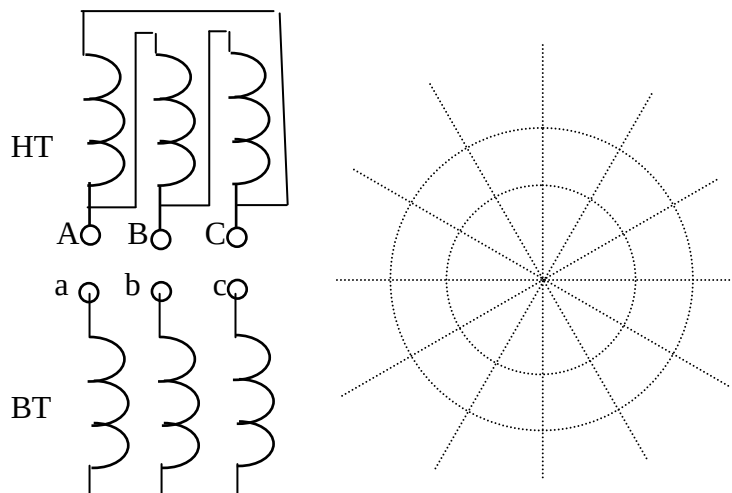


Figure 1

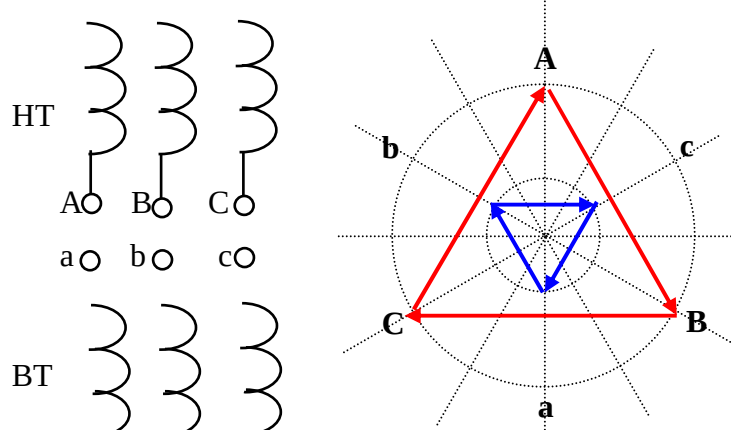
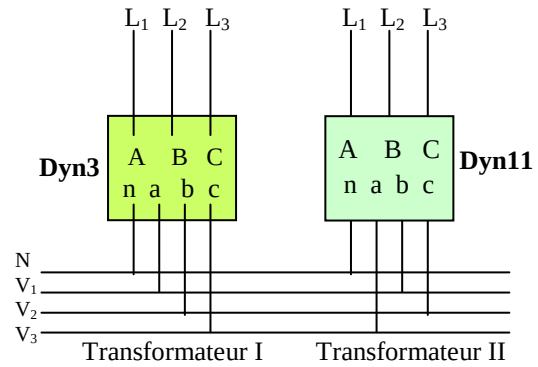


Figure 2

Exercice 3

La mise en parallèle de deux transformateurs triphasés est faite selon le schéma de la figure ci-contre.

- 1° A quels groupes appartiennent les transformateurs 1 et 2 ?
- 2° Justifier cette mise en parallèle par les tracés des diagrammes vectoriels horaires.



Exercice 4

Un transformateur Dy, avec neutre au secondaire, possède un rapport de nombres de spires $m = 0,04$. La tension primaire est de 5000 V.

- a) Quelles sont les tensions disponibles au secondaire?
- b) Quand le débit secondaire est de 100 A, quelle est l'intensité du courant primaire:
 - Dans un fil de ligne?
 - Dans un enroulement?

Exercice 5

Un transformateur triphasé a été soumis à deux essais au cours desquels la puissance a été mesurée par la méthode des deux wattmètres:

- A vide: $P_A = 500 \text{ W}$, $P_B = -200 \text{ W}$.
- En court-circuit pour I_2 nominal: $P_A = 250 \text{ W}$, $P_B = 100 \text{ W}$.

Calculer:

- a) Les pertes fer et le facteur de puissance à vide.
- b) Les pertes cuivre et le facteur de puissance en court-circuit.

Exercice 6

Un transformateur triphasé dont le primaire est en étoile, est alimenté sous une tension de 20000 V. Les nombres de spires par noyau sont $N_1 = 4000$ au primaire et $N_2 = 76$ au secondaire.

- a) Calculer les tensions disponibles au secondaire (entre phases et éventuellement entre neutre et phase) pour les couplages suivants:
 - étoile avec neutre;
 - triangle;
 - zig-zag avec neutre.
- b) La puissance apparente du transformateur étant $S = 140 \text{ kVA}$, calculer au secondaire pour chacun des trois couplages :
 - l'intensité du courant dans la ligne;
 - l'intensité du courant dans un enroulement.