

Introduction

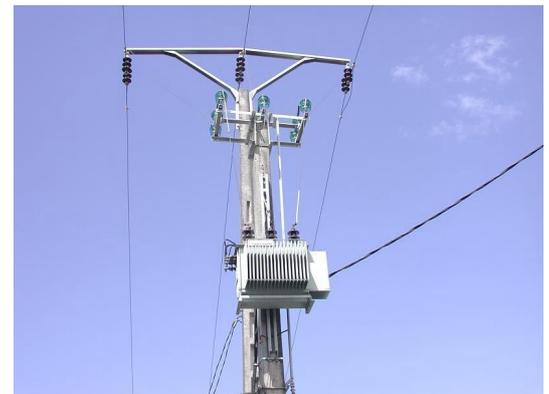
✚ Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le **transport**, la **distribution** et **l'utilisation de l'énergie électrique**.

✚ La première fonction d'un transformateur a été **l'élévation de la tension de transport** afin de **réduire le courant et donc les pertes joules générées dans les lignes**. Cette élévation est bien entendue allée de pair avec l'abaissement de la tension aux points d'utilisation. D'un point de vue plus général, un transformateur est un élément indispensable à **l'interconnexion des différents réseaux d'énergie**.

✚ En effet, dans le cas de la France, on trouve plusieurs types de réseaux classés en réseau de transport **400kV** et **225kV (domaine THT)**, réseau de répartition **90kV** et **63 kV (domaine HT)**, réseau de distribution **20kV (domaine MT)** et réseau **BT**. A noter que la norme UTE C18-510 a redéfini les niveaux de tension comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Domaine		Valeur de la tension nominale U_n
TBT		$U_n \leq 50V$
BT	BTA	$50V < U_n \leq 500V$
	BTB	$500V < U_n \leq 1000V$
HT	HTA	$1000V < U_n \leq 50kV$
	HTB	$50KV < U_n$

Niveaux de tension définis par la norme UTE C18-510

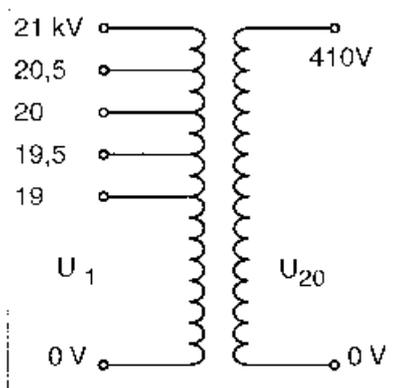


Rôle

✚ Le rôle du transformateur est d'adapter le niveau de tension aux noeuds de connexion. Il adapte aussi les indices horaires. En effet, **si les réseaux 400kV et 225kV ont les mêmes indices horaires**, ce n'est absolument pas le cas des autres réseaux. En prenant les réseaux **THT** comme référence, **le réseau 63kV des régions nord et est de la France a pour indice horaire 0** tandis que le **réseau 63 kV des régions sud-est et sud-ouest a pour indice horaire 11**. Cette diversité est encore plus grande si on s'intéresse aux réseaux HTA et BT.

- Un autre rôle important des transformateurs insérés dans les réseaux d'énergie est leur contribution au réglage du **niveau de tension** en fonction des **conditions de charge du réseau**. Ceci est réalisé par modification de leur rapport de transformation au moyen de changeurs de prises. (*voir schéma ci-dessous*)

- Permettent de compenser les chutes de tension en agissant sur le rapport de transformation. Ajustement dans une fourchette de: $\pm 2,5 \%$ ou $\pm 5 \%$.
- Le changement du rapport de transformation est obtenu à l'aide d'un commutateur qui se manœuvre lorsque le transformateur est hors tension.



$$U_{20} = \frac{N_2}{N_1} U_1$$

N_1 : nombre de spires au primaire.
 N_2 : nombre de spires au secondaire.

Exemple de réglage: Pour une tension en charge de 390 V au secondaire au lieu de 400 V souhaitée, soit 2,5 % en moins, place le commutateur en position (19,5 kV).

- Un transformateur participe aussi à **l'adaptation (limitation) des courants de défauts du réseau** dans les cas **équilibrés** (courts-circuits triphasés) ou **déséquilibrés** (courts-circuits monophasés ou biphasés). Il permet aussi **d'isoler deux parties d'un réseau** afin, par exemple, de changer **de régime de neutre** entre l'amont et l'aval du transformateur. Enfin, il peut participer à **l'atténuation** ou à **l'élimination de certaines perturbations harmoniques**.

	DISTRIBUTION BAC ELEEC	🕒 : durée	S
	TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	Page 3/15	
		Eric Gicquel	

Technologie de construction

- On distingue essentiellement deux technologies : Les transformateurs **à diélectrique liquide (ou immergés)** et les transformateurs dits "**secs**".

- **Les transformateurs à diélectrique liquide :**

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un **diélectrique liquide** qui assure **isolation** et **évacuation des pertes caloriques** du transformateur. Ils sont utilisés pour :

- Les postes non surveillés car ils ne nécessitent pas d'entretien
- Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve est adapté

Par contre, l'emploi de ces transformateurs posent le problème d'éventuelles pollutions à la suite de fuites de diélectrique (on utilise donc un bac de rétention) et sont dangereux en cas d'incendie (fumées toxiques).

- **Les transformateurs secs :**

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie.

Caractéristiques, symboles et utilisation

- Les différentes fonctions du transformateur de puissance amènent à définir un certain nombre de grandeurs dimensionnantes. On peut citer
 - **La tension assignée au primaire et secondaire (en volt ou Kv).**
 - **La puissance apparente (en VA ou Kva).**
 - **La fréquence de fonctionnement (en France 50 Hz).**

Sur la plaque signalétique d'un transformateur, on peut encore trouver la chute de tension en charge, le couplage des enroulements, la classe de température, les courants primaires et secondaires, etc...

1. La plaque signalétique (lecture et décodage).

C'est la plaque qui permet d'indiquer les principales caractéristiques et branchements du transformateur, plus particulièrement : les valeurs assignées de la puissance, des tensions primaires et secondaires, la fréquence d'emploi, les courants primaire et secondaire et le couplage des enroulements, la tension de court-circuit en %.

L'indication de couplage des enroulements permet d'effectuer le branchement en cas de mise en parallèle de plusieurs transformateurs.

P 61 905 C

76 140 LE PETIT QUEVILLY
FRANCE

GECASTHOM

TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ 50 Hz

N° **798643** Type **UTHA** Année **1990** Niveau d'isolement **50 kV**

Puissance **2500** conforme à **NF C 52 113**

kVA Couplage **Yyn 0**

Rél

		V		V		V		V
1	21000	V		V		V		V
2	20500	V		V		V		V
3	20000	V		V	410	V		V
4	19500	V		V		V		V
5	19000	V		V		V		V
		V		V		V		V
	72,2	A		A	3520	A		A
					7,5	%		%

HERMETIQUE A REMPLISSAGE TOTAL

HUILE 01 825
4740

Nature des enroulements **ALUMINIUM et CUIVRE**

ONAN

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

2. Symbolisation.

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur à deux enroulements
		Transformateur à deux enroulements avec indicateurs des polarités instantanées des tensions
		Transformateur à trois enroulements
		Autotransformateur
		Inductance
		Transformateur de courant

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur triphasé à prises multiples avec commutateur de prises pour manœuvre en charge, couplage étoile - triangle
		Transformateur triphasé couplage étoile zig-zag neutre sorti au secondaire

EXEMPLES D'AUTOTRANSFORMATEURS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Autotransformateur monophasé
		Autotransformateur triphasé, couplage étoile
		Autotransformateur monophasé à réglage progressif de la tension

EXEMPLES DE TRANSFORMATEUR À ENROULEMENTS SÉPARÉS

Symboles		Désignation
Forme 1	Forme 2	
		Transformateur monophasé à deux enroulements avec écran
		Transformateur à prise médiane sur un enroulement
		Transformateur à couplage réglable
		Transformateur triphasé, couplage étoile-triangle
		Transformateur triphasé à quatre prises (non compris la prise principale) couplage étoile-étoile
		Groupe de trois transformateurs monophasés, couplage étoile-triangle

TRANSFORMATEURS DE MESURE ET D'IMPULSION

		Transformateur de tension
		Transformateur de courant
		Transformateur de courant sans primaire bobiné avec 5 passages du conducteur primaire
		Transformateur de courant à plusieurs primaires pour détection différentielle
		Transformateur d'impulsion avec indicateur de polarité instantanée des tensions

	DISTRIBUTION BAC ELEEC	🕒 : durée	S
	TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	Page 6/15	
		Eric Gicquel	

3. Classification des transformateurs

- Petits transformateurs

Ils ont des puissances de moins de 1Kva en général en monophasé.

- Transformateurs spécialisés

Ils ont des puissances de 1 à 25 kVA soit en monophasé soit en triphasé.

- Transformateurs de distribution

Les transformateurs sur poteaux de 25-50-100 kVA.

Les transformateurs dans des postes de distribution 100 à 2 000 kVA.

- Transformateurs pour le transport et l'interconnexion

Ils ont des puissances de 2 000 kVA à 1350 MVA.

- Transformateurs spéciaux

Ce sont les transformateurs pour les postes de soudure à l'arc, les fours à induction, les transformateurs de mesure etc...

Couplage des transformateurs

- Pour des raisons de continuité de service, ou de variations journalières ou saisonnières de consommation d'énergie, il est intéressant de pouvoir coupler deux ou plusieurs transformateurs en parallèle.
- Le rôle du transformateur est d'adapter le niveau de tension aux nœuds de connexion. Il adapte aussi les indices horaires. En effet, si les réseaux 400kV et 225kV ont les mêmes indices horaires, ce n'est absolument pas le cas des autres réseaux. En prenant les réseaux THT comme référence, le réseau 63kV des régions nord et est de la France a pour indice horaire 0 tandis que le réseau 63 kV des régions sud-est et sud-ouest a pour indice horaire 11. Cette diversité est encore plus grande si on s'intéresse aux réseaux HTA et BT.

1. Conditions de couplage.

- Puissance

La puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.

- Réseau

Les transformateurs sont alimentés par le même réseau.

- Connexions et indices horaires

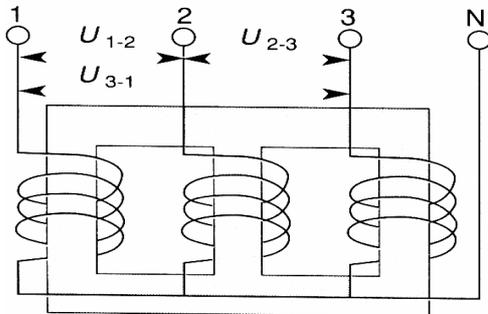
Mêmes longueurs de connexion surtout côté BT. Même indice horaire de couplage.

- Tensions

Tensions de court-circuit égales à 10 % près ; tensions secondaires très peu différentes selon la charge (0,4 %).

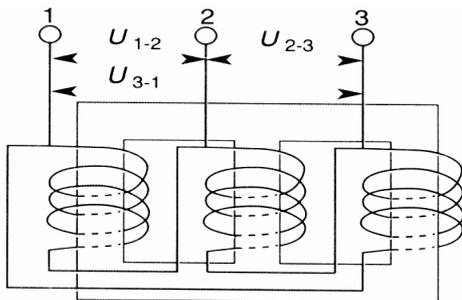
2. Couplage des enroulements

- Couplage étoile



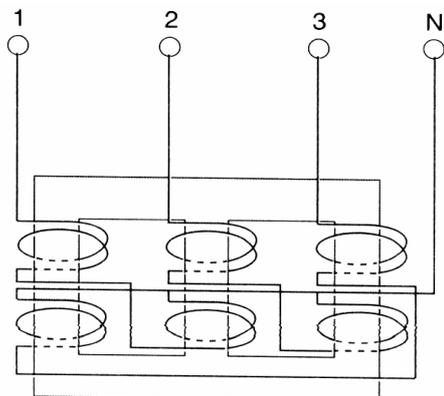
Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée.

- Couplage triangle



Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible.

- Couplage zig-zag



Chaque enroulement comprend deux demi bobines placées sur des noyaux différents ; les sorties de la deuxième demi bobine sont inversées. Les f.é.m. de chaque demi bobine sont déphasées de 120° . Avec le couplage zigzag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau BT déséquilibré.

3. Lettres symboles et couplages possibles.

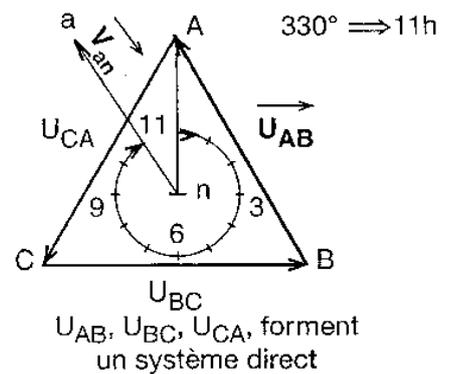
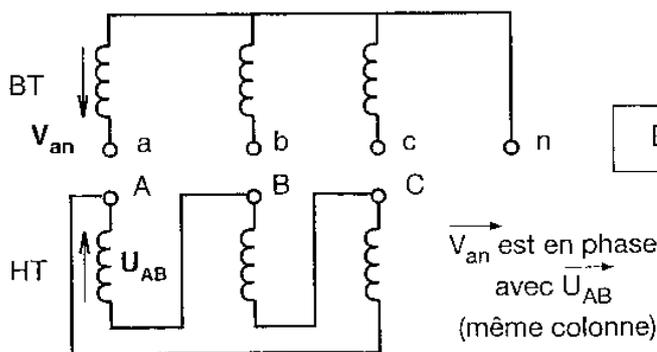
- Les **majuscules** sont relatives à l'**enroulement** fournissant **la plus haute tension**.
- Les **minuscules** sont relatives à l'**enroulement** fournissant **la plus basse tension**.

- Couplages possibles :

	Triangle	Etoile	Zig-zag	Neutre sorti
Côté HT	D	Y	-	-
Côté BT	d	y	z	n

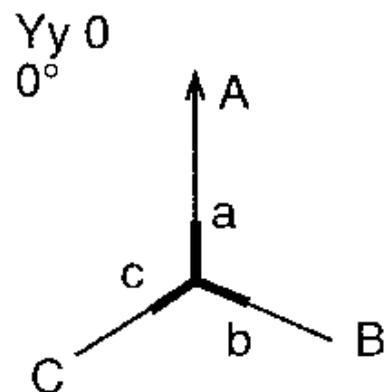
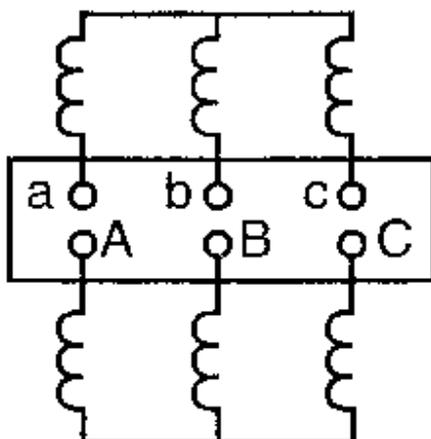
- Exemple de détermination d'un couplage et d'un indice horaire :

– Les schémas de connexions sont tracés en admettant que les enroulements ont le même sens relatif de bobinage.

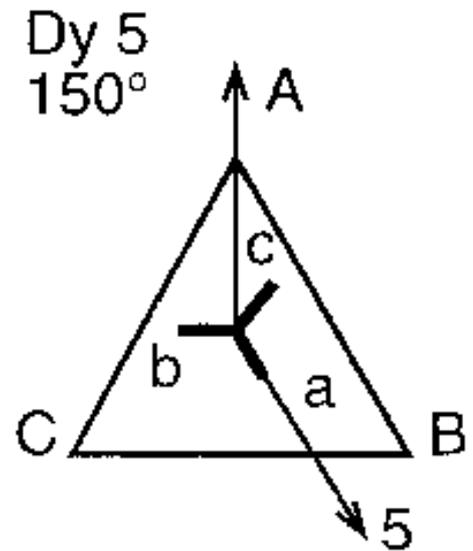
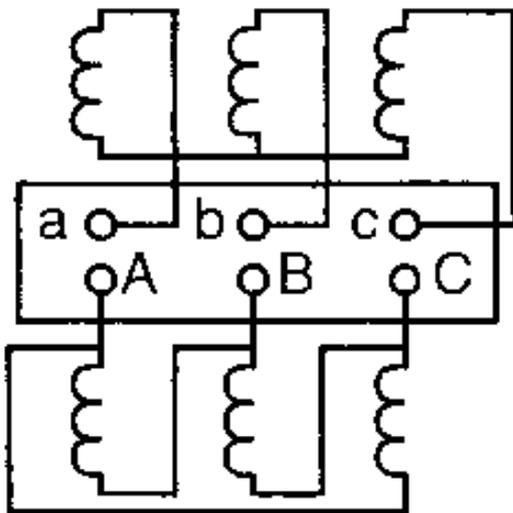
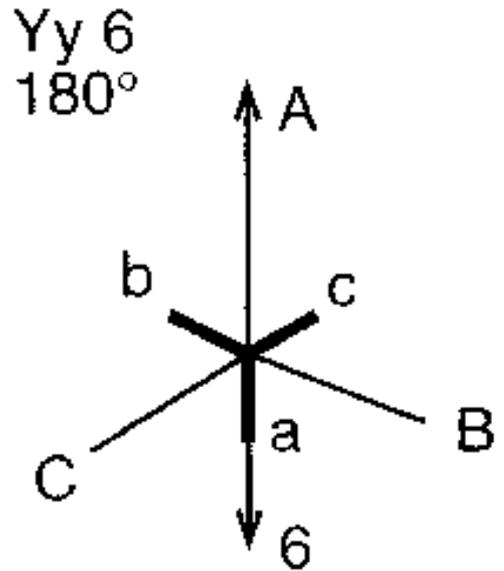
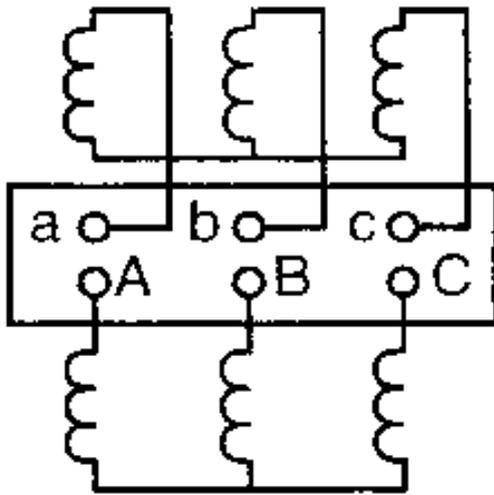


- Principaux couplages des transformateurs :

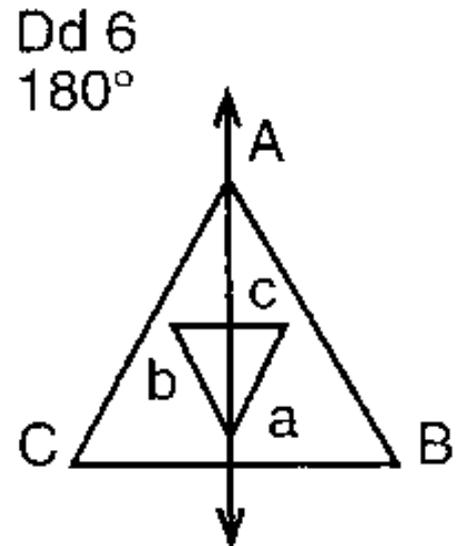
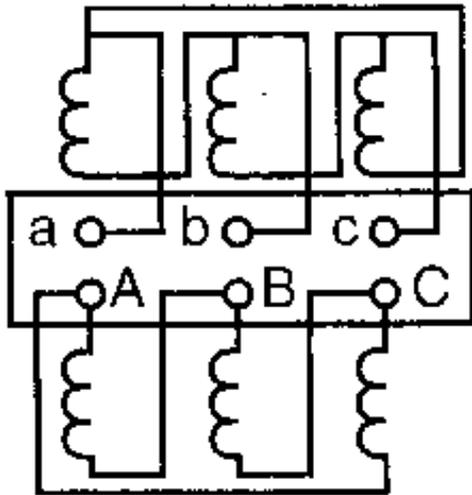
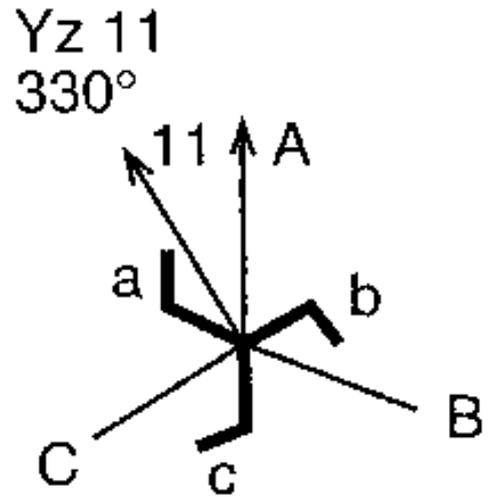
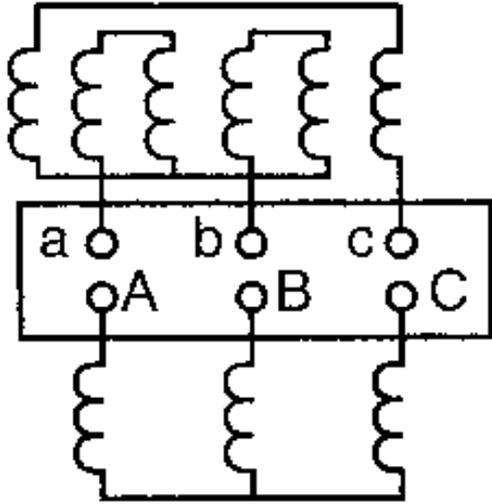
Pour la mise en parallèle de deux transformateurs de distribution il est indispensable qu'ils possèdent le même couplage et le même indice horaire.



**TRANSFORMATEURS DE
PUISSANCE**



**TRANSFORMATEURS DE
PUISSANCE**



Protection des transformateurs

1. Protection en amont.

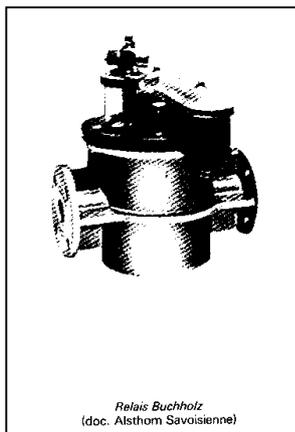
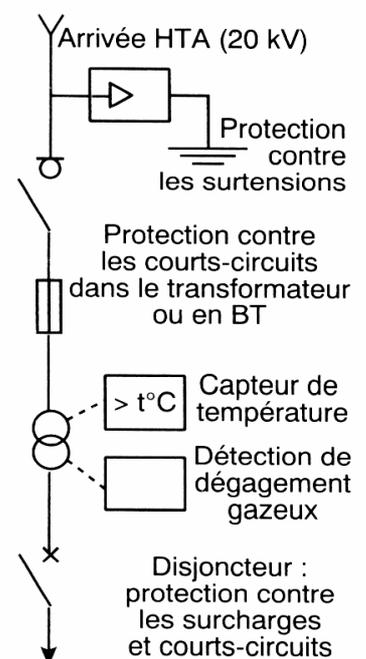
Des perturbations peuvent provenir du réseau amont (HTA) ; ce sont surtout des surtensions, ou la foudre. On emploie souvent des parafoudres, ou des limiteurs de surtensions.

2. Protection du transformateur .

On peut détecter trois types de défauts :

- L'élévation anormale de température du transformateur : on utilise un thermostat qui signale l'anomalie et peut couper l'alimentation si la température est trop élevée.
- Le dégagement de gaz : lorsqu'un transformateur est immergé, tout défaut d'isolement se manifeste par un arc électrique qui décompose l'huile et provoque un dégagement gazeux qui se porte au sommet de la cave. Des relais type Buchholz (voir image ci-dessous) détectent ce dégagement gazeux.
- La protection masse cuve : permet de détecter tout défaut interne entre le transformateur et la masse.

Ces deux dernières protections sont surtout employées pour des transformateurs de puissance supérieure à 5 000 kVA.



3. Protection côte basse tension BT.

Il s'agit surtout d'une protection contre les surcharges et les courts-circuits. Elle comporte un disjoncteur avec relais magnétothermique

	<i>DISTRIBUTION BAC ELEEC</i>	🕒 : durée	S
	TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	<i>Page 12/15</i>	
		Eric Gicquel	

L'essentiel

- Les transformateurs de distribution ont pour fonction d'adapter la tension du réseau (HT) à la tension d'utilisation (BT).
- Le rapport de transformation est indépendant du courant débité, il dépend uniquement du nombre de spires.
- Le transformateur est constitué de trois parties :
 - un circuit magnétique qui canalise le flux ;
 - un circuit électrique qui comporte deux enroulements : le primaire et le secondaire ;
 - des organes accessoires qui permettent d'assurer les fonctions : support, protection, manutention, refroidissement.
- Les transformateurs sont caractérisés par leurs grandeurs assignées qui sont :
Puissance, tension primaire et secondaire, fréquence, couplage des enroulements.
- Le couplage se désigne par des lettres majuscules coté haute tension et des lettres minuscules coté basse tension. La combinaison des trois couplages de base : étoile (Y,y), triangle (D,d), et zig-zag (Z,z) permet d'obtenir 12 déphasages différents entre les tensions primaires et secondaires, on les appelle les indices horaires (de 30° en 30°)

	<i>DISTRIBUTION BAC ELEEC</i>	⌚ : durée	S
	TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	<i>Page 13/15</i>	
		Eric Gicquel	

Exercices résolus

- 1°) Sur la plaque signalétique d'un transformateur on relève les indications suivantes :
400 kVA, 20 kV - 235/410 V, 50 Hz Traduisez ces informations.
- 2°) Sur le même transformateur on relève aussi les valeurs Dy 1 ; à quoi correspondent ces indications ?
- 3°) Quelle protection doit-on prévoir sur un transformateur côté basse tension ?

Solution de l'exercice

- N°1 - 400 kVA : c'est la puissance assignée que le transformateur peut transférer du réseau HT au réseau basse tension BT ;
- 20 kV : c'est la tension du réseau 20 000 V entre phases ;
- 235/410 V : c'est la tension secondaire 235 V entre phase et neutre et 410 V entre phase ($410 = 235\sqrt{3}$) ;
- 50 Hz : c'est la fréquence de fonctionnement.
- N°2 Dyl indique le couplage des enroulements primaires et secondaires du transformateur :
- D primaire en triangle
- y secondaire en étoile
- l déphasage de 30° entre tension primaire et secondaire.
- N°3 Il faut protéger le transformateur électriquement contre les surcharges et courts-circuits par un disjoncteur réglé sur la valeur de l'intensité assignée et prévoir un contact à thermostat pour signaler tout échauffement anormal.

Exercices à résoudre

- 1°) Relevez les caractéristiques d'un transformateur 24 kV de 250 kVA et comparez-les à celles d'un transformateur de 2 500 kVA (voir p. documentation n°2) pour les pertes à vide et les pertes en charge.
- 2°) Sachant que le rendement d'un transformateur peut se calculer par la formule
Rendement en % = (Puissance) x 100 / (Puissance + Pertes)
Calculez le rendement en charge pour un transformateur de 250 kVA et un de 2 500 kVA.
- 3°) Calculez le rapport de transformation d'un transformateur 20 kV/400 V.
- 4°) Précisez le rôle du circuit magnétique dans un transformateur.
- 5°) On indique une tension de court-circuit de 4,5 %; par rapport à quelle valeur est-elle prise ?
- 6°) On relève sur la plaque signalétique d'un transformateur l'indication Yy n6. Quelle est sa signification ?
- 7°) Représentez le branchement des enroulements pour un transformateur dont le couplage est Yy 0.
- 8°) Indépendamment de l'indice horaire représentez le schéma des enroulements d'un transformateur Dz.
- 9°) À votre avis quels sont les avantages d'un transformateur à refroidissement dans l'air par rapport à un transformateur à refroidissement dans l'huile ?
- 10°) Dans un poste de transformation, le disjoncteur côté BT déclenche, cela provient-il d'un défaut du transformateur ? pourquoi ?

Documentation 1

B 8 TRANSFORMATEURS SECS

ALSTHOM

Transformateurs imprégnés classe H - 160 à 2500 kVA

- ▶ Ces appareils ne contribuent pas à propager l'incendie ; ils ne dégagent ni fumée, ni vapeurs toxiques.

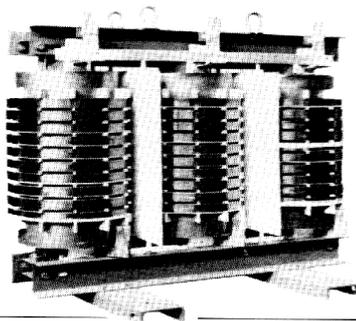
Présentation et particularités

Le refroidissement par circulation naturelle de l'air ambiant sans liquide intermédiaire, assure une sécurité absolue de fonctionnement en raison de l'absence de toute ventilation.

La surveillance et l'entretien sont très réduits : il suffit de s'assurer que le local ou la cellule dans laquelle les transformateurs sont installés est suffisamment aéré et que l'air n'est pas excessivement chargé de poussière et d'humidité.

L'installation peut être faite près du lieu d'utilisation : sur une plate-forme ou en étage. La longueur des raccords basse tension est diminuée de ce fait.

Les encombrements sont plus réduits que pour des appareils immergés équivalents, facilitant leur installation et les travaux de Génie civil nécessaires.



Caractéristiques

Puissances et tensions

- Gamme de puissances normalisées en triphasé - 50 Hz.
160 - 250 - 400 - 630 - 800 - 1000 - 1250 - 1600 - 2000 - 2500 kVA.
- Des puissances supérieures, inférieures ou intermédiaires sont réalisables sur demande.
- Toutes tensions primaires et secondaires sur demande.

Tension la plus élevée du réseau HT	Tension de service	Tension préférentielle à vide BT	Tension d'essais à fréquence industrielle	
kV	V	V	kV	kV
7,2	5500		20	40
12	10000		28	60
17,5	15000		38	75
24	20000		50	95
		237		
		410		

Caractéristiques standards

- Couplage : HT triangle - BT Etoile neutre sorti.
- Groupe Dyn 11 - réglage hors tension $\pm 2,5\%$ par barrettes sur les enroulements HT.
- Ambiance maximale : 40°C.
- Altitude inférieure à 1000 m.

Sur demande nous pouvons réaliser :
 - des basses tensions inférieures à 237 V ou supérieures à 410 V,
 - un réglage hors tension $\pm 5\%$ ou 2 fois $\pm 2,5\%$,
 - des autres groupes de couplage,
 - des appareils utilisables à des ambiances maximales ou altitudes autres.

Norme

Ces transformateurs répondent à la prescription CEI n° 726.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Documentation 2

Transformateurs imprégnés classe H – 160 à 2500 kVA Transformateurs secs

Construction

Enroulements

Du type concentrique en couches ou en bobines.

-BT le plus souvent en feuilles de cuivre pour $U < 750V$.

-HT en galettes (fil rond émaillé ou méplats isolés au Nomex) ; il peut être réalisé aussi en couches.

L'isolation entre les enroulements est assurée par des isolants à base de mica.

L'imprégnation est faite à cœur et la polymérisation à $200^{\circ}C$ avant montage et calage sur le circuit magnétique.

Les canaux de refroidissement à l'intérieur des bobinages et à la surface du circuit magnétique assurent la circulation de l'air.

Circuit magnétique

Le serrage est assuré par calage de tôles magnétiques avec armatures rigides. La protection contre l'oxydation est assurée par une couche de vernis.

Tableaux des valeurs

Garanties techniques pour BT 410 V

Tension la plus élevée du réseau HT	Puissance assignée	Pertes à vide	Pertes dues à la charge (à $115^{\circ}C$)	Tension de court-circuit U_{cc}	Courant assigné I_n	Courant de court-circuit I_{cc} (Max.)	Courant à vide I_0	Puissance acoustique	
								A	%
≤ 12	160	900	3300	4,2	225	5400	2,5		67
	250	1150	4500	4,5	352	7830	2		64
	400	1550	6000	4,5	563	12500	1,6		66
	630	2150	7500	4,5	887	19700	1,4		68
	800	2550	8500	4,5	1126	25000	1,3		69
	1000	3100	10000	4,5	1408	31300	1,3		72
	1250	3700	12000	4,5	1760	39100	1,3		73
	1600	4800	15000	4,5	2253	50000	1,2		75
	2000	5400	20000	4,5	2816	62600	1,1		76
	2500	6000	25000	5	3520	70400	1		78
≤ 24	160	950	3900	6	225	3800	2,6		67
	250	1200	5000	6	352	5900	2,1		65
	400	1650	6000	6	563	9400	1,7		67
	630	2300	8000	6	887	14800	1,5		69
	800	2700	10000	6	1126	18800	1,4		70
	1000	3350	11500	6	1408	23500	1,4		73
	1250	4000	13000	6	1760	29300	1,3		74
	1600	5100	16000	6	2253	37600	1,3		76
	2000	5700	2100	6	2816	47000	1,2		77
	2500	6400	26000	7	3250	58700	1		79
Tension la plus élevée du réseau HT	Puissance assignée	Chute de tension à pleine charge en %		Rendement en % $\cos \varphi = 1$			Rendement en % $\cos \varphi = 0,8$		
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$	charge 50 %	charge 75 %	charge 100 %	charge 50 %	charge 75 %	charge 100 %
≤ 12	160	2,2	4,2	97,4	97,5	97,1	97,3	97,1	96,7
	250	1,89	3,94	98,2	98	97,7	98,7	97,6	97,2
	400	1,59	3,78	98,5	98,3	98,1	98,1	98	97,7
	630	1,29	3,59	98,7	98,6	98,5	98,4	98,3	98,1
	800	1,16	3,52	98,8	98,8	98,6	98,5	98,5	98,3
	1000	1,10	3,48	98,9	98,8	98,7	98,6	98,5	98,3
	1250	1,06	3,45	98,9	98,9	98,7	98,6	98,6	98,4
	1600	1,03	3,44	98,9	98,9	98,7	98,6	98,6	98,4
	2000	1,10	3,48	98,9	98,9	98,7	98,7	98,6	98,4
	2500	1,12	3,79	99	98,9	98,7	98,7	98,6	98,4
≤ 24	160	2,9	5,9	97,2	97,4	97	96,8	96,6	96,3
	250	2,16	5,05	98	97,9	97,5	97,6	97,4	97
	400	1,67	4,76	98,4	98,3	98,1	98	97,9	97,6
	630	1,44	4,61	98,6	98,5	98,4	98,3	98,2	98
	800	1,42	4,60	98,7	98,6	98,4	98,4	98,3	98
	1000	1,32	4,53	98,7	98,7	98,5	98,4	98,5	98,1
	1250	1,22	4,46	98,8	98,8	98,6	98,5	98,5	98,3
	1600	1,18	4,44	98,8	98,8	98,7	98,6	98,5	98,3
	2000	1,23	4,47	98,9	98,8	98,6	98,6	98,5	98,3
	2500	1,28	5,11	98,9	98,9	98,7	98,7	98,6	98,4