

LE TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

Philippe MARSEILLE

Transformateurs triphasés – Philippe MARSEILLE

1



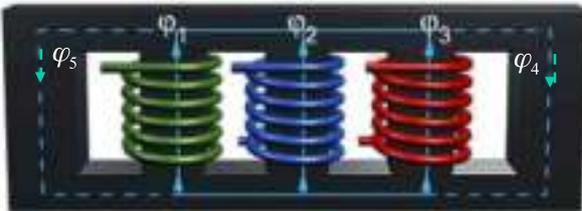
BOBINES TRIPHASEES

Les tensions imposent les flux (résistances et fuites négligées)

$$v_1(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega t) \approx n \frac{d\varphi_1(t)}{dt} \implies \varphi_1(t) \approx \Phi_1 \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$v_2(t) = V_2 \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta_{v_2}) \approx n \frac{d\varphi_2(t)}{dt} \implies \varphi_2(t) \approx \Phi_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_{v_2})$$

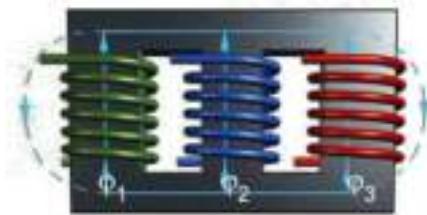
$$v_3(t) = V_3 \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta_{v_3}) \approx n \frac{d\varphi_3(t)}{dt} \implies \varphi_3(t) \approx \Phi_3 \sqrt{2} \sin(\omega t + \theta_{v_3})$$



Flux libres

$$\varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t) = \varphi_4(t) + \varphi_5(t)$$

Si la somme des tension est nulle, la somme des flux l'est aussi : on peut supprimer les colonnes latérales

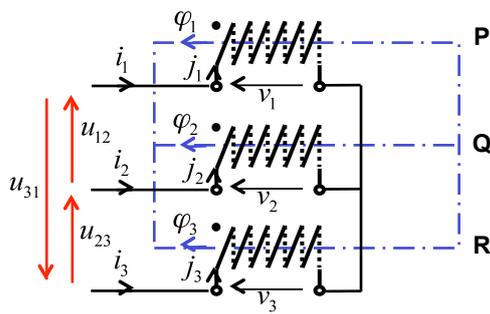


Flux forcés

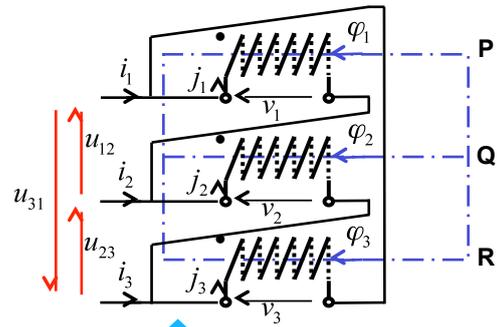
Solutions qui évitent l'emploi de trois bobines monophasées !

3

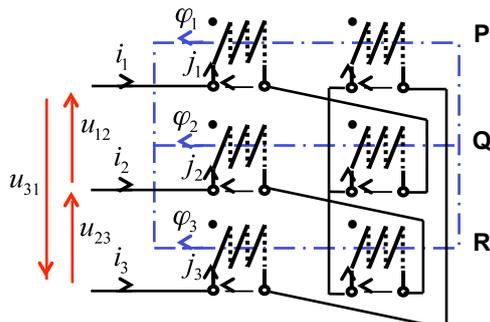
Couplages des enroulements



Couplage étoile



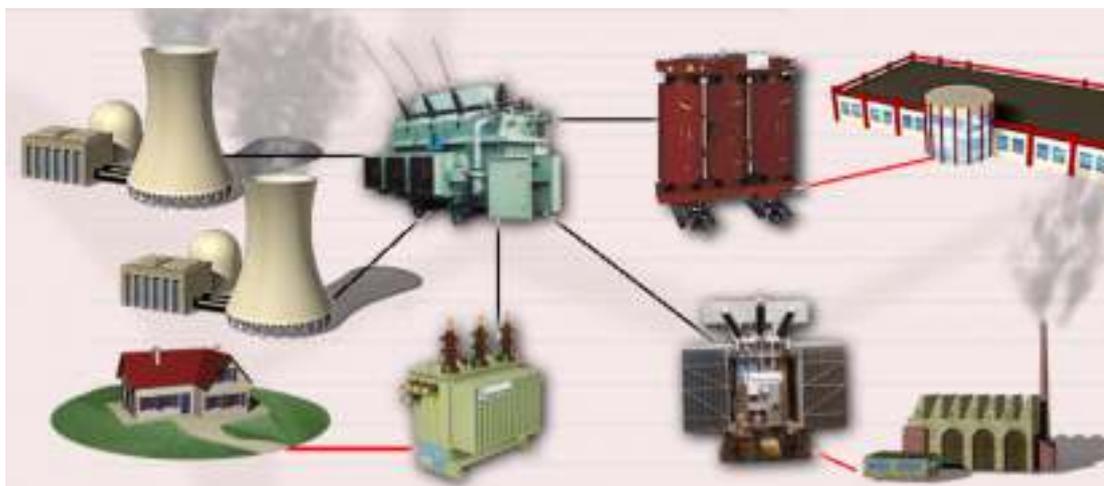
Couplage triangle



Couplage zig-zag



LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE

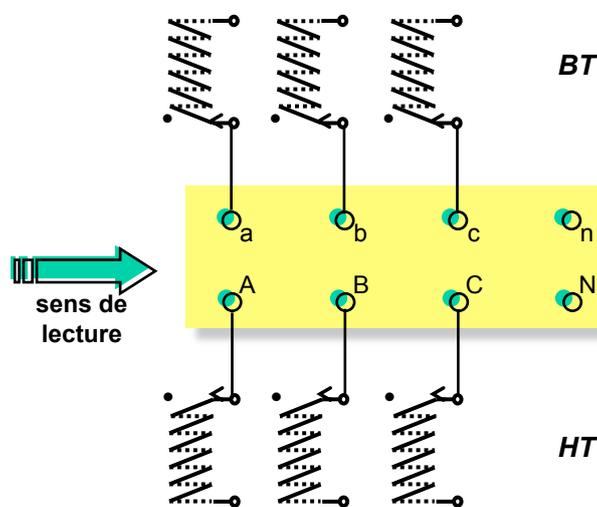


5

TRANSFORMATEUR TRIPHASE EN REGIME EQUILIBRE

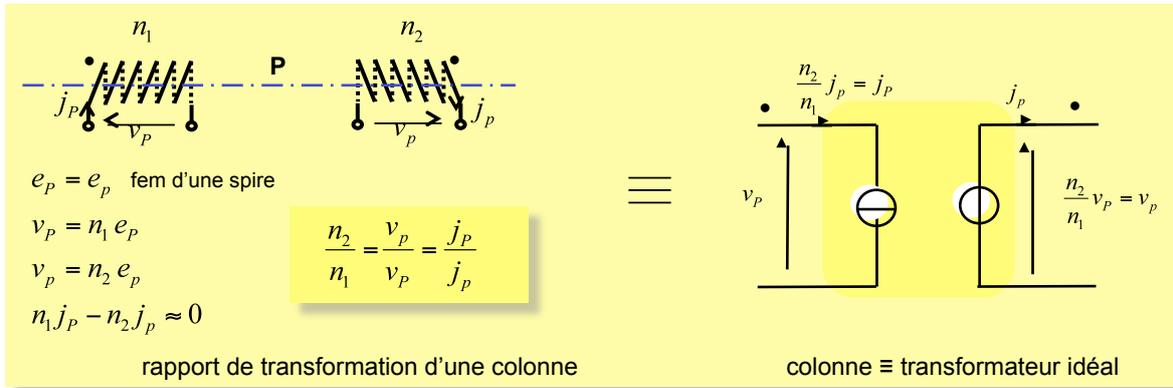
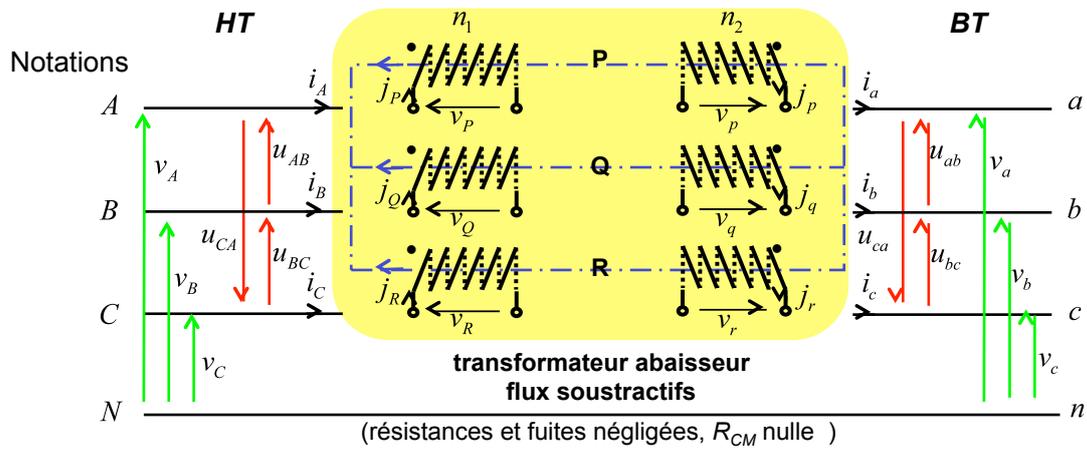


Plaque à bornes normalisée



Observateur
placé côté HT





7

Rapport de transformation complexe

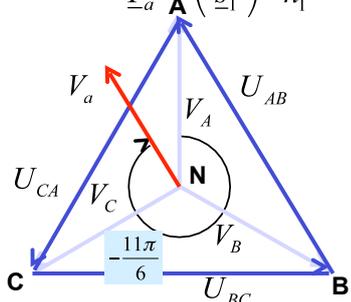
On pose pour les tensions : $\underline{V}_A = s_1 \underline{V}_P$ pour les courants : Conservation de la puissance \underline{S}
 $\underline{V}_a = s_2 \underline{V}_p$ $\underline{S} = 3 \underline{V}_A \underline{I}_A^* = 3 \underline{V}_a \underline{I}_a^*$

$$\underline{m} = \frac{\underline{V}_a}{\underline{V}_A} = \frac{s_2}{s_1} \frac{\underline{V}_p}{\underline{V}_P} = \frac{s_2}{s_1} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\underline{I}_A}{\underline{I}_a} = \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^* \frac{n_2}{n_1} = \underline{m}^*$$

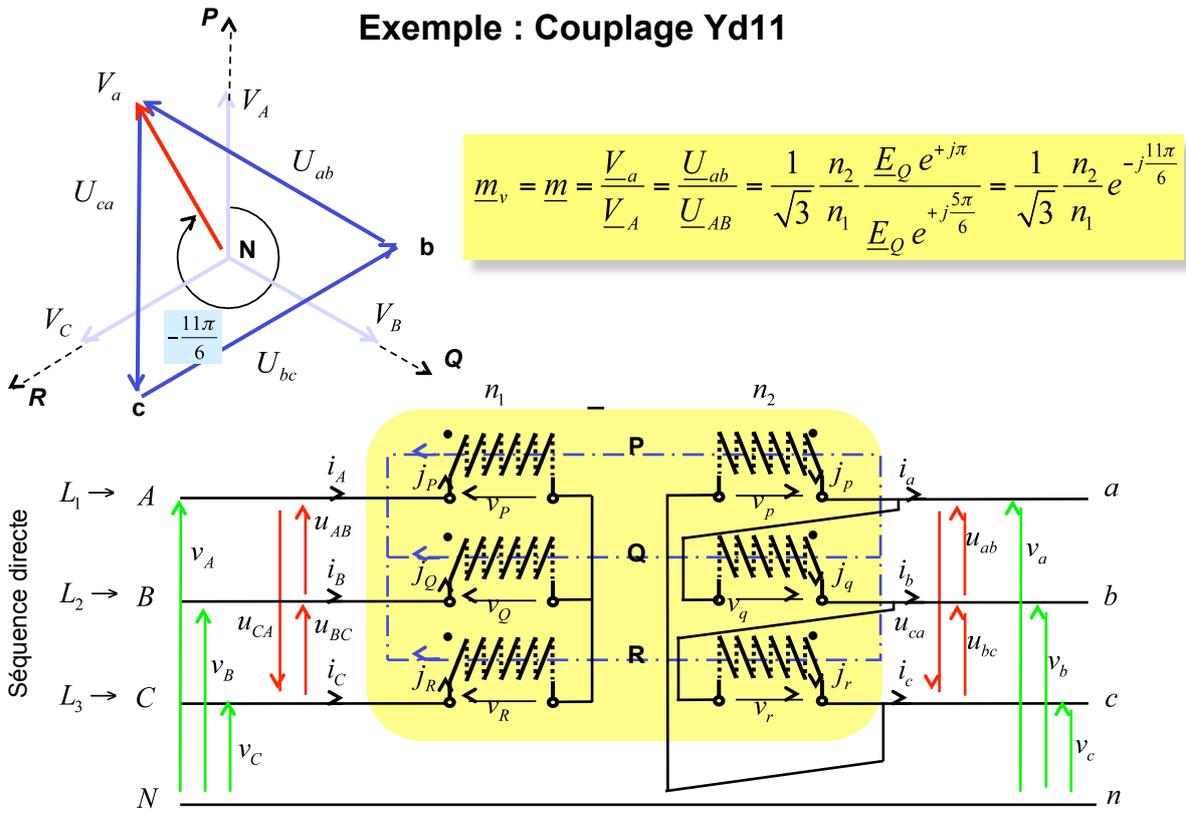
On pose $\underline{m}_v = \underline{m} = \frac{\underline{V}_a}{\underline{V}_A} = \left(\frac{s_2}{s_1} \right) \frac{n_2}{n_1} = \lambda \frac{n_2}{n_1} e^{-j\theta}$
 $\underline{m}_i = \underline{m}^* = \frac{\underline{I}_A}{\underline{I}_a} = \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^* \frac{n_2}{n_1} = \lambda \frac{n_2}{n_1} e^{+j\theta}$

I indice horaire > 0 :
 retard d'une tension BT
 sur la tension HT
 homologue
 (V_A pointant **midi**)
 \underline{V}_a en retard de θ sur \underline{V}_A



8

Exemple : Couplage Yd11



Système per unit (p.u.)

A partir de grandeurs réelles de base ou de référence telles que : S_{nom} V_{1nom} ω_{nom}
 La puissance apparente étant une grandeur de dimensionnement du transformateur définie par :

Primaire	$S_{nom} = 3V_{1nom} I_{1nom} = 3V_{20} I_{2nom}$	Secondaire
$R_{1nom} = \frac{V_{1nom}}{I_{1nom}}$		$R_{2nom} = \frac{V_{20}}{I_{2nom}} = m^2 R_{1nom}$
$v_{1pu} = \frac{V_1}{V_{1nom}}$ $i_{1pu} = \frac{I_1}{I_{1nom}}$	pour les tensions et courants	$v_{2pu} = \frac{V_2}{V_{20}}$ $i_{2pu} = \frac{I_2}{I_{2nom}}$
$r_{1pu} = \frac{R_1 I_{1nom}}{V_{1nom}} = \frac{R_1}{R_{1nom}}$	pour les résistances	$r_{2pu} = \frac{R_2 I_{2nom}}{V_{20}} = \frac{R_2}{R_{2nom}}$
$x_{1pu} = \frac{\lambda_1 \omega I_{1nom}}{V_{1nom}} = \frac{\lambda_1 \omega}{R_{1nom}}$	pour les réactances	$x_{2pu} = \frac{\lambda_2 \omega I_{2nom}}{V_{20}} = \frac{\lambda_2 \omega}{R_{2nom}}$

11

Le calcul des valeurs en p.u. des éléments du schéma équivalent ne fait pas intervenir m

Remarque :
$$z_{pu} = \frac{Z_1 I_{1nom}}{V_{1nom}} = Z_1 \frac{S_{nom}}{U_{1nom}^2} = Z_2 \frac{S_{nom}}{U_{20}^2} \quad \text{et} \quad \frac{Z_1}{U_{1nom}^2} = \frac{Z_2}{U_{20}^2}$$

TRANSFORMATEURS TRIPHASES				
Valeurs de la tension de court-circuit préconisées par la norme				
P (kVA)	25 à 630	631 à 1250	1251 à 3150	3151 et plus
u_{cc} (%)	4	5	6,25	7,15
z (pu)	0,04	0,05	0,0625	0,0715

Remarques :

- ❖ En per unit, les tension de court-circuit u_{cc} et impédance de court-circuit d'un transformateur sont égales
- ❖ On utilise parfois des transformateurs dont l'impédance interne est supérieure à la norme pour qu'ils participent à la limitation des courants de court-circuit en cas de défaut

Transformateurs : en résumé

Utilité: Changer le niveau de tension entre le transport, la distribution et l'utilisation.

Symboles de transformateurs triphasés:

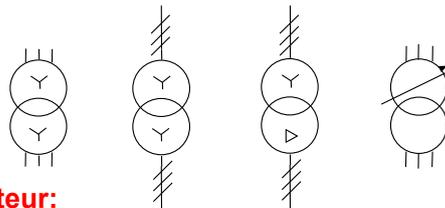
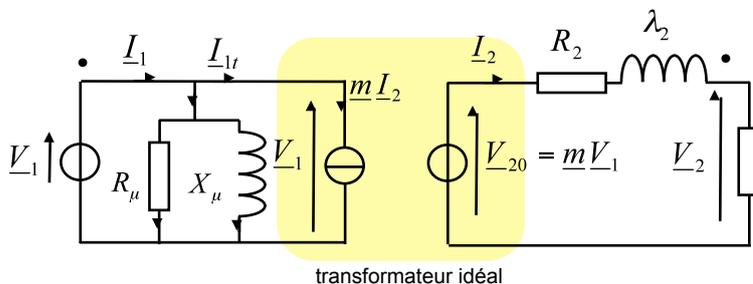


Schéma équivalent monophasé d'un transformateur:



Etoile réelle ou fictive au 1aire et/ou au 2aire

$$R_2 = m^2 r_1 + r_2$$

$$\lambda_2 = l_2$$

Rapport de transformation :

$$m = \frac{V_{20}}{V_{1n}} = \frac{U_{20}}{U_{1n}} = \lambda \frac{n_2}{n_1} e^{-jI\frac{\pi}{6}}$$

Grandeurs simples ou composées prises sur des phases homologues

13

Transformateurs : schéma équivalent

Transformateur à plots

- Plusieurs points de la bobine haute tension sont disponibles afin de réguler la tension du secondaire en fonction de la tension du primaire.
- On fait donc varier n_1 et donc m

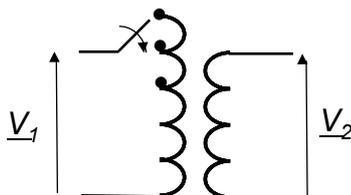
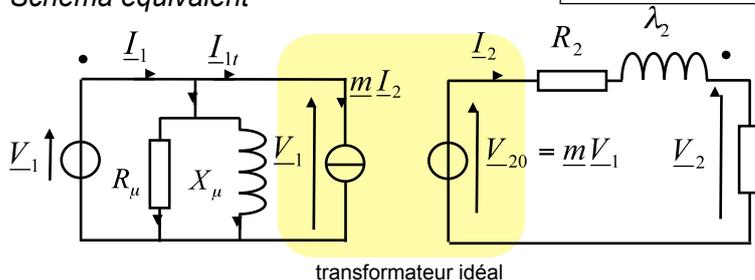


Schéma équivalent



m variable
5 prises
 $0 \pm 2.5\% \pm 5\%$

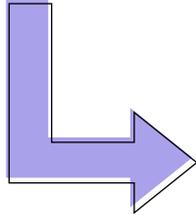


Transformateurs: schéma équivalent

- **Transformateur à plots**

- On distingue

- Les transformateurs à changeur de prise hors charge
- Les transformateurs à changeur de prise en charge
- Les changeurs de prises manuels
- Les changeurs de prises automatiques. Ces derniers permettent de réguler la tension de sortie à une valeur de référence. La plupart des réseaux de distribution en sont équipés.



15

Transformateurs : schéma équivalent

- **Transformateur à trois enroulements: (1 primaire et 2 secondaires)**

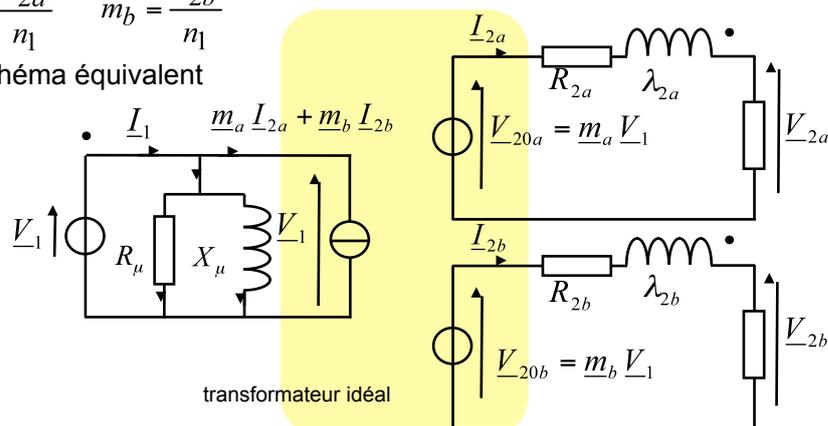
- Souvent plusieurs tensions d'utilisation sont nécessaires.
- Un seul circuit magnétique est présent dans le transformateur, la tension sur chacune des bobines est donc définie par

$$\frac{v_1(t)}{n_1} = \frac{v_{2a}(t)}{n_{2a}} = \frac{v_{2b}(t)}{n_{2b}} = \frac{d\varphi_m}{dt}$$

- La même bobine du primaire sert donc à 2 transformateurs à 2 enroulements de rapport

$$m_a = \frac{n_{2a}}{n_1} \quad m_b = \frac{n_{2b}}{n_1}$$

- Schéma équivalent



Groupement de transformateurs triphasés

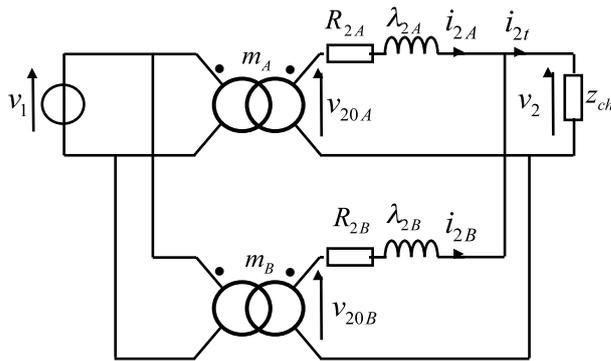


Schéma équivalent monophasé

Conditions de couplage

Première condition :

$$V_1 \approx V_{1nA} \approx V_{1nB} \quad \text{et donc} \quad m_A \approx m_B$$

$$V_2 \approx V_{2nA} \approx V_{2nB}$$

Deuxième condition :

Vérifier que les tensions homologues secondaires sont bien en phase avant de réaliser la connexion

Conditions de couplage

donc

$$\underline{V}_{20A} = \underline{V}_{20B} \rightarrow \underline{m}_A = \underline{m}_B$$

17

Fonctionnement en parallèle de 2 transformateurs triphasés

En résumé

Pour le couplage de 2 transformateurs triphasés, il faut impérativement des tensions secondaires de même module et en phase donc:



- Rapports de transformation identiques
- Tensions nominales identiques
- Indices horaires identiques (et même ordre de phase)

$$\frac{I_{2A pu}}{I_{2B pu}} = \frac{Z_{2cB pu}}{Z_{2cA pu}} e^{j(\varphi_{2cB} - \varphi_{2cA})}$$

- Les transformateurs sont chargés équitablement si

$$I_{2A pu} = I_{2B pu} \Leftrightarrow Z_{2cA pu} = Z_{2cB pu}$$

- Pour obtenir des courants minimaux à I_{ch} donné (et donc des pertes joules minimales), il faut

$$\varphi_{2cA} = \varphi_{2cB}$$

Pour le couplage de 2 transformateurs triphasés et une utilisation optimale de leurs caractéristiques il faut encore



- Tensions de court-circuit proches (en grandeur réduite)
- Rapports X/R proches

Principaux couplages des transformateurs

Symbole	Diagramme vectoriel	Schéma des connexions											
Dy 5			Yy 0										
Yy 0			Dy 11										
Dx 0			Yd 11										
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Groupes de couplage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Groupe I</td> <td>1, 3, 5, 7, 9, 11</td> </tr> <tr> <td>Groupe II</td> <td>2, 6, 10</td> </tr> <tr> <td>Groupe III</td> <td>0, 4, 8</td> </tr> </tbody> </table>			Groupes de couplage		Groupe I	1, 3, 5, 7, 9, 11	Groupe II	2, 6, 10	Groupe III	0, 4, 8	Yz 11		
Groupes de couplage													
Groupe I	1, 3, 5, 7, 9, 11												
Groupe II	2, 6, 10												
Groupe III	0, 4, 8												

19

Conclusions

- Le réseau électrique est constitué d'un ensemble d'éléments: lignes, transformateurs, charges.
- La modélisation précise de ces éléments est nécessaire pour estimer la tension, le courant ainsi que les puissances actives et réactives transitant dans le réseau.
- La connaissance des ordres de grandeurs des paramètres des éléments en grandeurs réduites permet d'estimer le comportement du réseau sans recourir à des essais compliqués sur chacun de ses composants.
- La chute de tension est, en MT et HT, principalement due au transit de puissance réactive alors qu'en BT cette chute de tension est liée tant au transit de puissance active que réactive.
- Des moyens dynamiques sont présents dans le réseau et affectent grandement son fonctionnement: régulateur de tension de source (courant d'excitation des alternateurs), transformateurs équipés de changeurs de prises automatiques, charges régulées, ...

ANNEXES

Caractéristiques de transformateurs

HTA / BT : distribution BT
HTB / HTA : distribution HTA
HTB / HTB : transport, répartition

21

Transformateurs : ordre de grandeurs de paramètres

Les valeurs des impédances vues du stator et divisées par l'impédance nominale de la machine (Z_N) sont à peu près les mêmes pour toutes les machines.

$$Z_N = \frac{V_N}{I_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{U_N^2}{S_N} \quad \text{Définie par la tension nominale et la puissance apparente nominale}$$

Comme il y a 2 tensions nominales (primaires et secondaires) on crée 2 bases d'impédance, l'une pour le primaire et l'autre pour le secondaire.

$$Z_{N1} = \frac{U_{N1}^2}{S_N} \quad (\text{base } Z_{N1})$$

et

$$Z_{N2} = \frac{U_{N2}^2}{S_N} = m^2 Z_{N1} \quad (\text{base } Z_{N2})$$

$r_{1_pu} \gg 1\%$
 $x_{f1_pu} \gg 1 \text{ à } 10\%$
 $X_{m_pu} \gg 10 \text{ à } 500$
 $R_{m_pu} \gg 3 \text{ à } 10 X_{m_pu}$

Transformateurs HTA / BT

Caractéristiques constructeur

Puissance apparente nominale (VA, kVA, MVA)

Tension primaire (entre phases)

Tension secondaire à vide

Tension de court-circuit exprimée en pourcentage de la tension nominale (6, 8, 10, 12 ... %)

Couplage et indice horaire

Transformateur de distribution BT (ERDF)

Puissances assignées (I) (*)	kVA	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	
Tension primaire assignée (I)	kV	5,5 - 10 - 15 - 20 et double tension 10/20 - 15/20 puissance conservée										
Niveau d'isolement assigné (I)	kV	7,2 pour 5,5 - 12 pour 10 - 17,5 pour 15 - 24 pour 20 kV										
Tension secondaire à vide (I)	V	410 entre phase, 237 entre phase et neutre										
Réglage (I)	%	± 2,5%										
Couplage (I)		Dyn11 (triangle, étoile neutre sorti)										
Pertes (W)	à vide	750	880	1200	1650	2000	2300	2800	3100	4000	5000	
	dues à la charge (à 75°C)	2010	3320	4800	6800	8200	9600	11450	14000	17500	20000	
	dues à la charge (à 120°C)	2300	3800	5500	7800	9400	11000	13100	16000	20000	23000	
Tension de court-circuit	UCC %	6										
Courant à vide	Io %	2,5	2,1	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	
Chutes de tension à pleine charge	cos φ 1 %	1,85	1,69	1,55	1,41	1,35	1,27	1,22	1,18	1,18	1,10	
	cos φ 0,8 %	4,87	4,77	4,68	4,59	4,55	4,50	4,47	4,44	4,44	4,38	
Rendements	Charge 100%	cos φ 1 %	97,95	96,16	96,35	96,52	96,60	96,69	96,74	96,82	96,81	96,89
		cos φ 0,8 %	97,45	97,71	97,96	98,16	98,25	98,36	98,43	98,53	98,52	98,62
	Charge 75%	cos φ 1 %	98,22	98,42	98,59	98,74	98,80	98,88	98,93	99,00	98,99	99,05
		cos φ 0,8 %	97,79	98,03	98,24	98,43	98,50	98,61	98,68	98,76	98,75	98,82
Bruit (A)	puissance acoustique LWA	62	65	68	70	72	73	75	76	78	81	
	pression acoustique à 1 m. LPA	50	53	55	57	58	59	61	62	63	66	

Transformateurs HTA / BT

Caractéristiques des transformateurs HTA/BT				
Puissance (en kVA)	Ucc (en %)	Pertes fer (en W)	Pertes en charge (en W)	DU/U à 100% de la charge (en %)
25	4%	115	700	3.77%
50	4%	145	1320	3.44%
100	4%	210	2100	3.14%
160	4%	460	2350	2.94%
250	4%	650	3250	2.82%
400	4%	930	4600	2.70%
630	4%	1300	6500	2.61%
1000	5%	1840	9400	2.99%

Transformateur de distribution BT (ERDF)

NOMEX®/COMPACT TRANSFORMER SPECIFICATION
as per dimensioned drawing 215/SAP57129

Rated power	2500 kVA
Rated voltage ratio at no load	20.000/400 V
Phases	3
Frequency	50 Hz
Connections & vector group	Dyn5
Tappings	HV +2.5% +5% +7.5% +10% Off-circuit externally operated and lockable tap change selector switch
Insulation levels (kV)	
• HV : Um = 24kV	LI/AC 125/50
• LV : Um = 1.1kV	LI/AC -03
Temperature rise	
• Top oil / avg winding	≤ 75K / 115K
Ambient temperature	-25°C to +50°C
Type	NOMEX®/COMPACT transformer
• cooling	KNAN
• dielectric/cooling medium	silicone liquid
• insulating material	Homogeneous insulation as per IEC 60075-14, based on the DuPont high temperature NOMEX® insulation systems: hermetically sealed finwall tank
• tank	
No load loss	2350 W
No load current	< 12 A
Inrush current	Peak 5.7x I _n - dropped to 1x I _n after 1.85 sec
Sound power level	≤ 70 dB(A)
Load loss at 75°C	1900 W at 2500kVA/75°C as reference
Load loss at 110°C	2000 W at full load of 2500kVA and 20°C ambient
Impedance voltage	6.00 % at 2500kVA
Dimensions	
• Height floor to cover & Total	1670 mm & 2125 mm (incl. skid 40mm and vertical LV flag)
• Length	2335 mm
• Width	795 mm (to fit through a door 800 mm wide)

**Transformateur
d'éolienne**

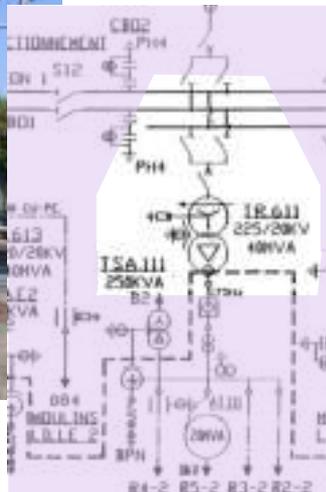
25

Transformateurs HTB / HTA

Côté HTA



Côté HTB



**Transformateur TR611 (HLM)
225 / 20 kV
40 MVA**



26

Transformateurs HTB / HTA

Postes sources (HTB / HTA)		Anstaing TR 411	Hellemmes TR 613
Couplage		Ynd11	Ynd11
Puissance S_n		36 MVA	2x40 MVA
U_n HTB poste source		89 kV	227 kV
U_n HTA poste source		21 kV	21 kV
Tension $u_{cc}\%$		17 %	20 %
m Rapport de transformation (Régleurs en prise médiane)		0.236	0.0925
n_1/n_2		0.461	0.160
Z_{HTA}		0.0676 + j2.081	0.0637 + j2.193
Réactance ramenée en HTA	$X_{TR} = \frac{u_{CC} U_{NT}^2}{100 S_N}$	$X_{TR} = 2.08 \Omega$	$X_{TR} = 2.205 \Omega$

27

Transformateur HTB / HTB (400 /225 kV 100 MVA)



28

Transformateurs HTB / HTB

Postes de répartition		
Couplage	Yn y	Yn y
Puissance S_n	100 MVA	100 MVA
U_n HTB poste source	220 kV	225 kV
U_n HTA poste source	63 kV	64.5 kV
Tension $u_{cc}\%$	12.4 %	12.0 %
m Rapport de transformation (Régleurs en prise médiane)	0.2884	0.2867
$\underline{Z}_{T225kV} [\Omega]$	1.880 + j 60.0	1.884 + j 60.6
$\underline{Z}_{Tpu} [pu]$	0.0037 + j 0.124	0.0036 + j 0.118
$R_{\mu pu} [pu]$	909.1	1428.6
$X_{\mu pu} [pu]$	164.5	333.3

Exemple d'une boucle 63 kV à 2 points d'injection via 4 transformateurs 225 / 63 kV

La règle de couplage s'étend aux transformateurs HTB/HTB alimentant une même boucle

