

Les fiches techniques

15

La machine statique Les transformateurs



15 Transformateurs

15.1 Définitions

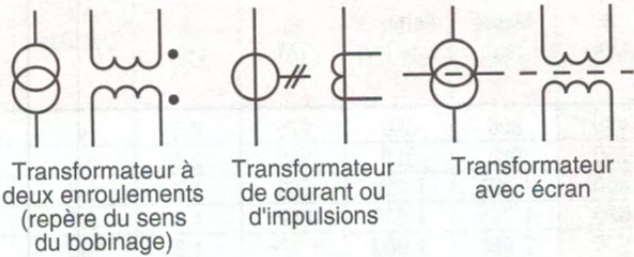
Transformateur

C'est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à modifier l'amplitude des signaux (courant et tension) en conservant la même fréquence.

Autotransformateur

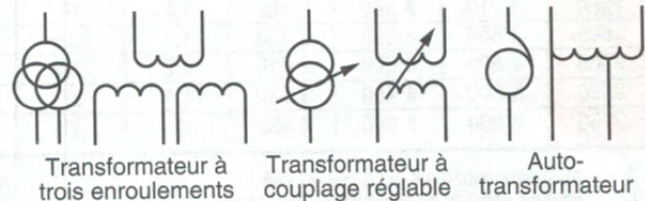
C'est un transformateur dont le primaire et le secondaire ont une partie commune.

SYMBOLES NFC 03-2064



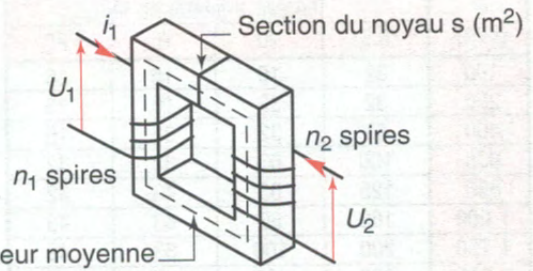
15.2 Relations fondamentales

$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$	$u_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$
$L_1 = \frac{n_1^2}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}}$	$L_2 = \frac{n_2^2}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}}$
$M = \frac{n_1 n_2}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}}$	$K = \frac{M}{L_1 \cdot L_2}$
$m = \frac{u_2}{u_1} = \frac{i_1}{i_2}$	



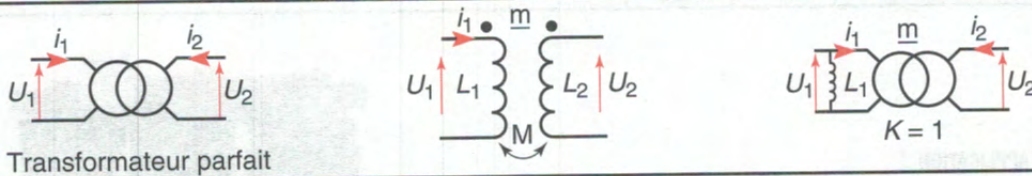
M est appelé mutuelle induction ; K est appelé coefficient de couplage du transformateur. Lorsqu'il n'y a pas de pertes dans l'air, $K = 1$; L_1 : inductance du primaire (H) ; L_2 : inductance du secondaire (H) ; U_1 : tension primaire ; i_1 : courant primaire ; U_2 : tension secondaire ; i_2 : courant secondaire ; $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.

TRANSFORMATEUR RÉEL



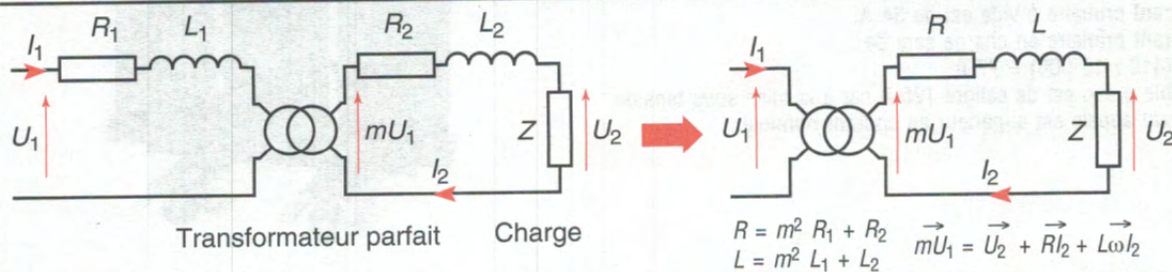
15.3

ÉQUIVALENCE DES REPRÉSENTATIONS



15.4

RÉSISTANCE ET RÉACTANCE RAMENÉE AU SECONDAIRE



15.5

CARACTÉRISTIQUES DE TRANSFORMATEURS

Transformateurs secs triphasés classe F tension primaire < 24 kV, tension secondaire : 410 V à vide ; température de fonctionnement : 120 °C ; le rendement est précisé pour une charge de 100 %.

S (kVA)	Masse (kg)	Pertes à vide (W)	I_n (A)	I_0 (%)	Q à vide	U_{cc} (%)	I_{cc} (kA)	Chute de tension		η en % $\cos\varphi = 0,8$	P_{ch} (W)
								$\cos\varphi = 1$ %	$\cos\varphi = 0,8$ %		
160	806	650	225	2,5	4	6	3,75	1,91	4,9	97,4	2 440
250	985	870	352	2,1	5,2	6	5,87	1,68	4,76	97,7	3 320
400	1 300	1 250	563	1,7	6,7	6	9,39	1,52	4,66	97,9	4 710
630	1 755	1 600	887	1,4	8,7	6	14,79	1,41	4,59	98,2	6 810
800	2 080	2 000	1 126	1,3	10,2	6	18,78	1,21	4,46	98,4	7 870
1000	2 455	2 300	1 408	1,3	12,8	6	23,47	1,19	4,44	98,5	8 910
1250	3 210	2 900	1 760	1,3	16	6	29,34	1,26	4,49	98,4	11 870
1600	3 666	3 300	2 253	1,3	20,6	6	34,55	1,14	4,41	98,5	14 400
2000	4 800	4 000	2 816	1,2	23,6	7	40,23	1,29	5,11	98,5	18 330
2500	5 600	4 400	3 520	1,1	27	7	50,29	1,24	5,07	98,6	21 830
3150	6 800	5 800	4 435	1	31	7	63,37	1,1	4,98	98,7	23 570

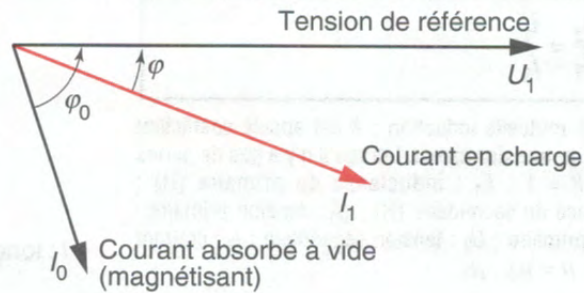
S : puissance apparente exprimée en kVA ;
 I_n : courant nominal au secondaire sous 410 V ;
 I_0 : courant magnétisant à vide ;
 Q : puissance réactive à vide à compenser ;

U_{cc} : tension de court-circuit ;
 I_{cc} : courant de court-circuit ;
 η : rendement à 100 % de la charge ;
 P_{ch} : pertes dues à la charge (cuivre) à 75 °C.

15.6

FUSIBLES DE PROTECTION DES TRANSFORMATEURS (A)

S (kVA)	Tension primaire en kV			
	5,5	10	15	20
160	32	16	16	16
250	32	32	16	16
400	63	32	32	16
630	100	63	32	32
800	125	63	43	32
1 000	160	80	63	43
1 250	200	100	63	43
1 600	250	125	100	63
2 000	—	160	125	80
2 500	—	—	—	100
3 150	—	—	—	125



EXERCICE D'APPLICATION :

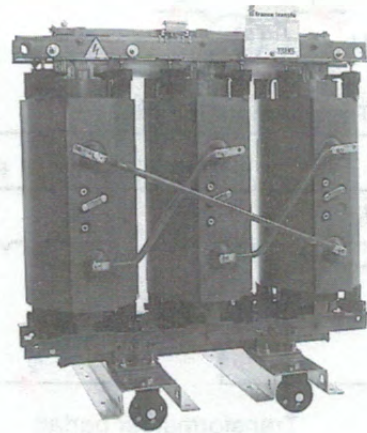
Un transformateur de 2 000 kVA alimenté sous 15 kV fournit un courant secondaire de 2 816 A par phase.

Le courant primaire à vide est de 34 A.

Le courant primaire en charge sera de :

$$2\,816 \left(\frac{410}{15\,000} \right) = 77 \text{ A.}$$

Le fusible prévu est de calibre 125 A car à la mise sous tension, le courant appelé est supérieur au courant nominal.



15.7

TRANSFORMATEURS D'ISOLEMENT BASSE TENSION

Les transformateurs de séparation de circuits permettent l'isolation d'un réseau par rapport au réseau de distribution EDF (par exemple, lorsque le schéma des liaisons à la terre est différent).

Caractéristiques électriques (transformateurs protégés par une enveloppe)

Triphasé D Y _n						Monophasé					
Primaire : 400 V ; secondaire : 400 V						Primaire : 230/400 V ; secondaire : 230 V					
S (kVA)	Masse (kg)	Pertes à vide (W)	$\frac{\Delta u \text{ en } \%}{\cos \varphi = 0,8}$	$\frac{\eta \text{ en } \%}{\cos \varphi = 0,8}$	$U_{cc} \%$	S (kVA)	Masse (kg)	Pertes à vide (W)	$\frac{\Delta u \text{ en } \%}{\cos \varphi = 1}$	$\frac{\eta \text{ en } \%}{\cos \varphi = 1}$	$U_{cc} \%$
1	27	50	2,7	91	2,6	0,16	6,3	16,5	5,5	88	5,5
1,6	40	70	1,3	94	1,4	0,25	6,7	13	7,2	88	7,2
2,5	49	70	1,9	96	2,2	0,4	11,5	22,5	4,6	91	4,7
4	55	90	2,1	96	2,5	0,63	18,6	30	2,8	93	2,9
6,3	68	140	3,3	93	3,9	1	18,7	33	3,4	94	3,6
10	96	160	4,6	93	4,7	1,6	30	60	1,9	95	2,1
16	136	180	4,2	94	4,3	2,5	41	80	1,8	95	2
25	180	265	3,8	94	3,9	4	47	80	3,5	94	3,6
40	250	435	3,1	95	3,2	6,3	51	130	2,7	94	2,8
50	265	435	3,8	95,5	4	10	60	120	6	93	6,2

P à vide : pertes à vide dans le circuit magnétique et l'enroulement primaire ; Δu : chute de tension à 100 % de la charge ; U_{cc} : tension de court-circuit en %.

15.8 Mise sous tension d'un transformateur

Le primaire d'un transformateur peut s'assimiler à un circuit RL. Si la source délivre une tension constante, le courant s'établit selon la loi :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E$$

le courant permanent est : $I_0 = E / R$;

la constante de temps est : $\tau = L / R$, exprimée en secondes.

La valeur instantanée du courant i s'écrit :

$$i = I_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

Si la source délivre une tension $u = U_m \sin \omega t$, alors

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

La valeur instantanée du courant se calcule par :

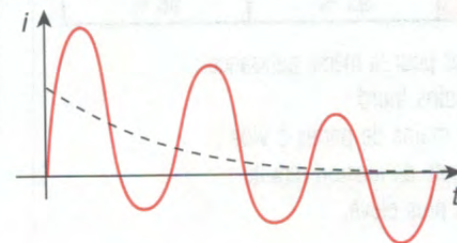
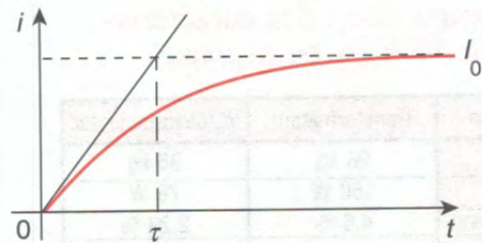
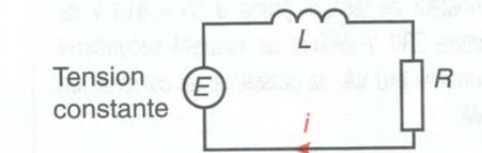
$$i = U_m / Z [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-t/\tau}]$$

Z : impédance du circuit ; α : angle de retard à la mise sous tension ; φ : angle de déphasage entre u et i .

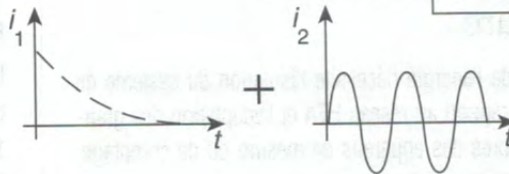
Le courant i obtenu est la somme de deux grandeurs :

- une composante continue décroissante i_1 ;
- une composante alternative déphasée de φ sur la tension u_2 .

La valeur maximale de l'intensité dépend de l'instant où l'on met le transformateur à vide sous tension.



$$i = i_1 + i_2$$



15.9 Autotransformateurs

Les autotransformateurs permettent le changement de tension en conservant une liaison électrique avec le réseau amont ; le schéma des liaisons à la terre reste commun aux deux parties de l'installation. La puissance apparente d'un autotransformateur est plus faible que celle d'un transformateur ; il y a moins de cuivre, le circuit magnétique est de moindre section. Les autotransformateurs sont moins lourds, moins encombrants, plus économiques.

Ils ont l'inconvénient de ne pas isoler les parties amont et aval de l'installation.

15.91 Puissance apparente (de construction)

$$S_a = S (U_1 - U_2) / U_1$$

S_a : puissance apparente de l'autotransformateur.

S : puissance apparente des récepteurs.

EXEMPLE D'APPLICATION :

Un autotransformateur de tension primaire $U_1 = 410$ V de tension secondaire 230 V délivre un courant secondaire $I_2 = 18$ A et fournit 4 140 VA, sa puissance de construction sera de 1 820 VA.

15.92 Comparaison des caractéristiques pour 10 kVA en triphasé

Comparaison	Transformateur	Autotransformateur
Masse	96 kg	36 kg
Pertes à vide	160 W	76 W
Chute de tension	4,6 %	2,29 %
Rendement	93 %	96 %

L'autotransformateur pour la même puissance :

- est trois fois moins lourd ;
- dépense moitié moins de pertes à vide ;
- possède une chute de tension réduite ;
- a un rendement plus élevé.

15.10 Transformateur de mesure

Le comptage de l'énergie nécessite l'isolation du système de comptage par rapport au réseau HTA et l'adaptation des grandeurs aux calibres des appareils de mesure ou de comptage. Les calibres utilisés sont :

1 A et 5 A en intensité, 100 V ou $100 / \sqrt{3}$ V en tension.

CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES AUTOTRANSFORMATEURS

Triphasé 400 V / 230 V réversible					
S (kVA)	Masse (kg)	Pertes à vide (W)	ΔU en % $\cos \varphi = 0,8$	η en % $\cos \varphi = 0,8$	U_{cc} %
1	10	13	4,24	93	4,89
1,6	14	22	3,24	94	3,68
2,5	19	32	2,29	95	2,56
4	27	40	2,34	96	2,42
6,3	30	55	2,7	0,95	3,24
10	36	76	2,29	0,96	2,70

Monophasé 400 V / 230 V réversible					
S (kVA)	Masse (kg)	Pertes à vide (W)	ΔU en % $\cos \varphi = 0,8$	η en % $\cos \varphi = 0,8$	U_{cc} %
1	8,7	16	3,5	93	4
1,5	14	25	1,8	95	2
2	18	35	1,5	96	1,9
3,15	25	45	1,3	96	1,5
4	28	55	0,65	97	1
6,3	37	75	0,4	98	0,9

CARACTÉRISTIQUES DES TRANSFORMATEURS DE MESURE

Transformateurs de courant ** TC	
Tension d'isolement	12 à 24 kV
Courant primaire	150 à 1 200 A
Courant secondaire	5 A (variante 1 A)
Puissance de précision	15 à 30 VA
Classe 0,5	
Transformateurs de tension TT	
Tension d'isolement	12 à 24 kV
Tension primaire	$10 / \sqrt{3}$ à $20 / \sqrt{3}$ kV
Tension secondaire	$100 / \sqrt{3}$ V
Puissance de précision	50 à 90 VA
Classe 0,5	

** Les transformateurs de courant à passage direct (le conducteur de liaison sert d'enroulement primaire) autorisent des intensités jusqu'à 5 000 A.

ΔU : chute de tension à 100 % de la charge. U_{cc} : tension de court circuit en %.

Ces transformateurs assurent l'isolation du circuit de mesure dont l'un des points est relié à la terre par sécurité.

EXEMPLE D'APPLICATION :

Une installation fonctionne sous 10 kV, le courant est de 200 A par phase, le TC a un rapport de 200/5, le TT possède un primaire $10\,000 / \sqrt{3}$, un secondaire $100 / \sqrt{3}$, la puissance mesurée en monophasé sera à multiplier par 4 000 (100 pour la tension, 40 pour le courant).