

Les transformateurs

Avertissement :

Les pages qui suivent décrivent le fonctionnement des transformateurs industriels utilisés à des fréquences de 50 ou 60 Hz, voire 400 Hz (avions de ligne) et en régime permanent.

1. Définition

Un transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur d'une tension alternative en maintenant sa fréquence et sa forme inchangées. Le transformateur est un appareil qui peut :

- Transformer une tension alternative d'une grandeur à une autre grandeur.
- Transformer un courant alternatif d'une grandeur à une autre grandeur.
- Isoler un circuit électrique d'un courant continu circulant dans un autre circuit électrique.
- Faire paraître une impédance comme ayant une autre valeur.

Les transformateurs sont des machines électriques entièrement statiques, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport de l'énergie électrique où l'on préfère « transporter des volts plutôt que des ampères ». Ils assurent l'élévation de tension entre la source (alternateurs EDF fournissant du 20000 V) et le réseau de transport (400000 V en Europe), puis ils permettent l'abaissement de la tension du réseau vers l'utilisateur.

Un transformateur monophasé est constitué de 2 bobines en fil de cuivre, l'une dite est dite "primaire", l'autre "secondaire". Ces bobines sont enroulées sur un noyau magnétique constitué d'un empilage de tôles minces en acier. Celui-ci permet de relier magnétiquement le primaire et le secondaire en canalisant les lignes de champ magnétiques produites par le primaire.

1.1. Invention

1831 Michael Faraday réussit à induire un courant dans un circuit électrique secondaire.

1832 Joseph Henry observe l'étincelle se produisant à l'ouverture d'un circuit électrique et nomme ce phénomène *extra-courant de rupture*. C'est la découverte de l'auto-induction.

1835 Charles Grafton Page expérimente un auto-transformateur.

1837 Nicholas Joseph Callan réalise le premier transformateur composé d'un primaire et d'un secondaire.

1838 Charles Grafton Page construit une bobine d'induction qui peut être considérée comme l'ancêtre de la bobine de Ruhmkorff.

1845-1850 Antoine Masson et Louis Bréguet fabrique une bobine d'induction à axe verticale.

1851-1856 Heinrich Ruhmkorff met au point la bobine qui porte son nom en se basant sur les travaux des ses prédécesseurs et en fait un instrument scientifique performant qu'il commercialise.

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2000 volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres. En 1884, Lucien Gaulard, jeune électricien français, présente à la Société française des Electriciens, un « générateur secondaire », dénommé depuis transformateur.

En 1884 Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2000 volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80 km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension.

Gaulard se bat contre les tenants du continu (parmi lesquels Desprez). Cette lutte est aussi âpre que celle qui oppose Edison (tenant du continu) à Tesla et Westinghouse (tenant de l'alternatif) outre Atlantique à la même époque.

La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement. Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps,

sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire « quelque chose de rien » ! Gaulard attaque, perd ses procès, est meurt ruiné dans un asile d'aliénés en 1888.

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksá Déry et Otto Titus Bláthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest.

Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées.

1.2. Symboles

On trouve deux symboles. Sur celui de la Figure 1, les trois barres verticales symbolise le noyau magnétique qui permet à l'énergie magnétique de passer du bobinage primaire au bobinage secondaire.

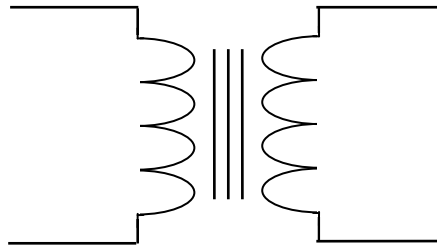


Figure 1

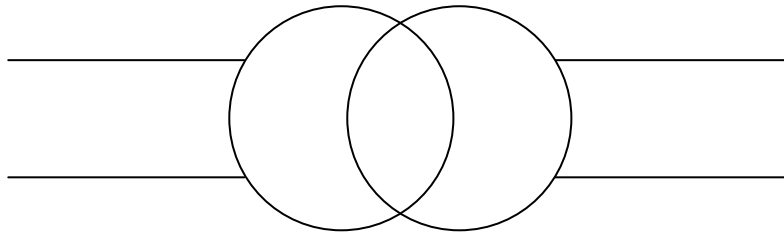
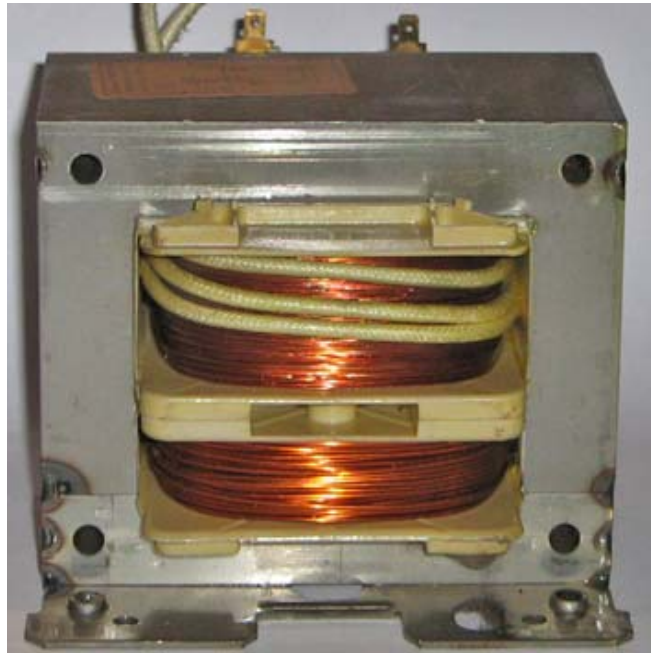


Figure 2

1.3. Utilisation

Il ne pourrait pas y avoir de transport d'énergie électrique à grande distance sans transformateurs. Grâce aux transformateurs éleveurs de tension, on transporte des volts plutôt que des ampères, limitant les pertes d'énergie à quelque pour cent. D'autres transformateurs abaissent la tension pour que celle-ci ne soit plus aussi dangereuse pour l'utilisateur. Les transformateurs sont réalisés en toutes puissances et tensions, de quelques VA et à basse tension pour l'alimentation de circuits électroniques à quelques centaines de MVA et de kV pour l'alimentation ou le couplage des réseaux de transport de l'énergie électrique.

Le transformateur est également utilisé comme adaptateur d'impédance en électronique.



Transformateur élévateur de tension 220 V / 4500 V provenant d'un four à micro-ondes



Transformateur triphasé abaisseur de tension 20000 V / 380 V
En ville, ces transformateurs sont invisibles car enfermés dans des armoires de protection.

2. Principe - équations

2.1. Constitution principe

2.1.1. Principe de fonctionnement :

L'un des deux bobinages joue le rôle de primaire, il est alimenté par une tension variable et donne naissance à un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Le circuit magnétique conduit avec le moins de réluctance¹ possible les lignes de champ magnétique créées par le primaire dans les spires de l'enroulement secondaire. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur.

De par son principe, le transformateur ne peut pas fonctionner s'il est alimenté par une tension continue. Le flux doit être variable pour induire une f.é.m. au secondaire, il faut donc que la tension primaire soit variable.

Le transformateur est réversible, chaque bobinage peut jouer le rôle de primaire ou de secondaire. Le transformateur peut être abaisseur ou élévateur de tension.

Un transformateur comprend :

- Un circuit magnétique fermé, son rôle est de transmettre le plus efficacement possible l'énergie magnétique du primaire, qui la génère, au secondaire. Il doit donc être :
 - de perméabilité magnétique aussi haute que possible ;
 - d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes ;
 - feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault ;
 - de résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium ;
- Deux enroulements (bobines) :
 - Le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension V_1 et comportant n_1 spires. Il absorbe le courant I_1 . Le primaire transforme l'énergie électrocinétique reçue en énergie magnétique. C'est un récepteur d'énergie électrique.
 - Le secondaire comporte n_2 spires ; il fournit, sous la tension V_2 , un courant I_2 au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrocinétique. C'est un générateur d'énergie électrique.

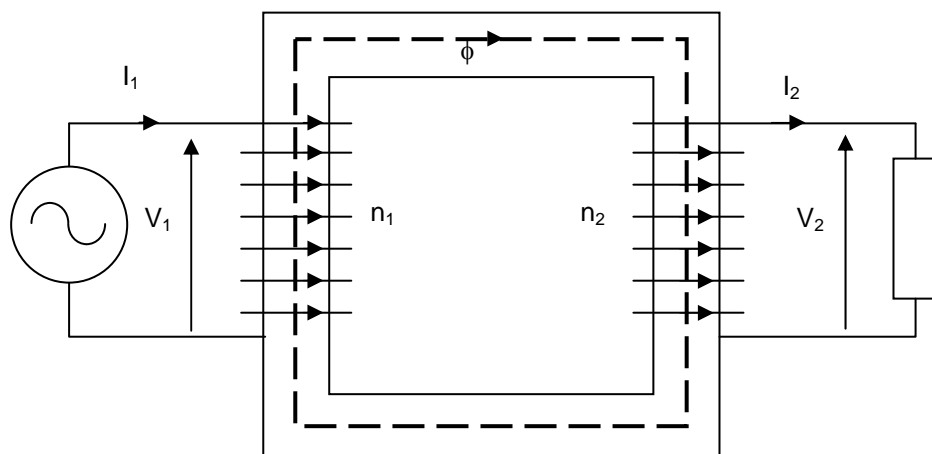


Figure 3

Le flux magnétique est noté ϕ .

¹ La réluctance caractérise l'opposition au passage des lignes de champ magnétique, elle est l'équivalent de la « résistance » caractérisant l'opposition d'un conducteur au passage du courant électrique.

Il peut y avoir plus d'un enroulement secondaire. Par exemple dans le cas d'un transformateur abaisseur fournissant une tension efficace de 24 V, une de 12 V et une autre de 5 V, on a un primaire et trois secondaires. L'isolement électrique et l'échauffement constitue les limitations des enroulements.

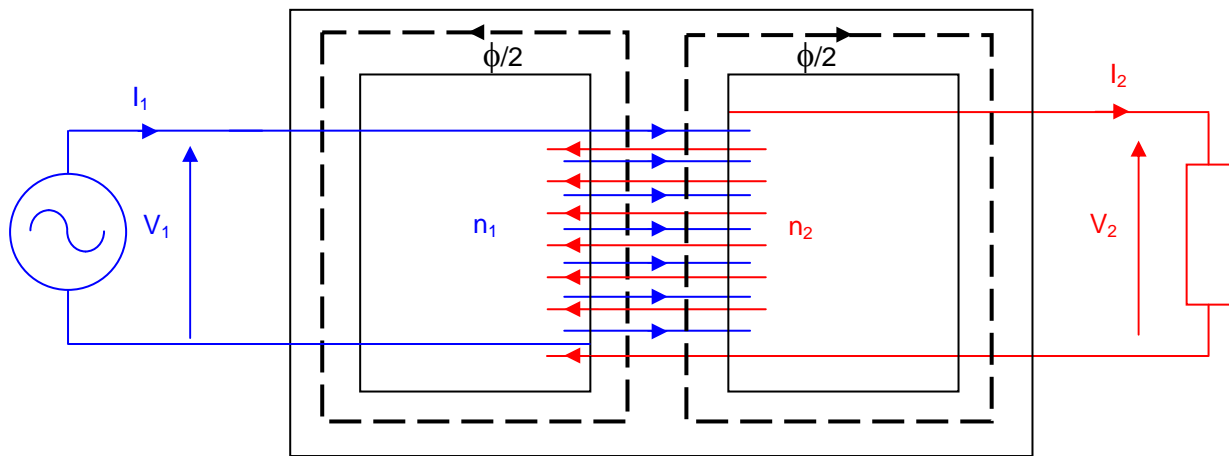


Figure 4
Transformateur cuirassé

On rencontre essentiellement le transformateur cuirassé (Figure 4) dans lequel les bobines sont coaxiales. Ce type de transformateur émet moins de lignes de champ magnétique à l'extérieur (fuites). Que ce soit le transformateur de la Figure 3 ou bien celui de la Figure 4, les deux enroulements sont isolés électriquement, mais magnétiquement couplés par le flux ϕ .

Alimenté par une tension alternative, le primaire crée le flux alternatif ϕ dans le circuit magnétique. Par induction, une f.é.m. apparaît aux bornes du secondaire. Si le dipôle récepteur absorbe une puissance $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$ (φ_2 étant le déphasage dû au dipôle), le primaire, qui se comporte comme un récepteur, absorbe $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$ (φ_1 étant le déphasage entre V_1 et I_1). La conservation de la puissance permet d'écrire, au rendement près : $P_1 = P_2$.

Les grandeurs physiques apparaissent dans l'ordre chronologique suivant, il est nécessaire de bien assimiler cette chaîne de causalité afin de placer correctement tensions et courants sur un schéma :

1. On choisit arbitrairement un instant où la d.d.p. du générateur a le sens que l'on souhaite (ici elle est orientée vers le haut) :

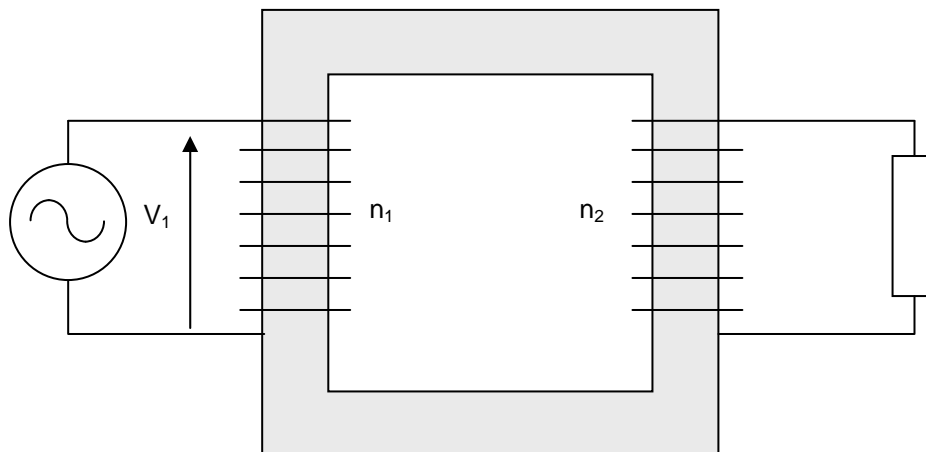


Figure 5

2. A cet instant, le transformateur est un récepteur, le courant sort par la borne « + » du générateur et rentre par une borne « + » dans le transformateur. On a donc déterminé le sens du courant parcourant l'enroulement primaire à cet instant :

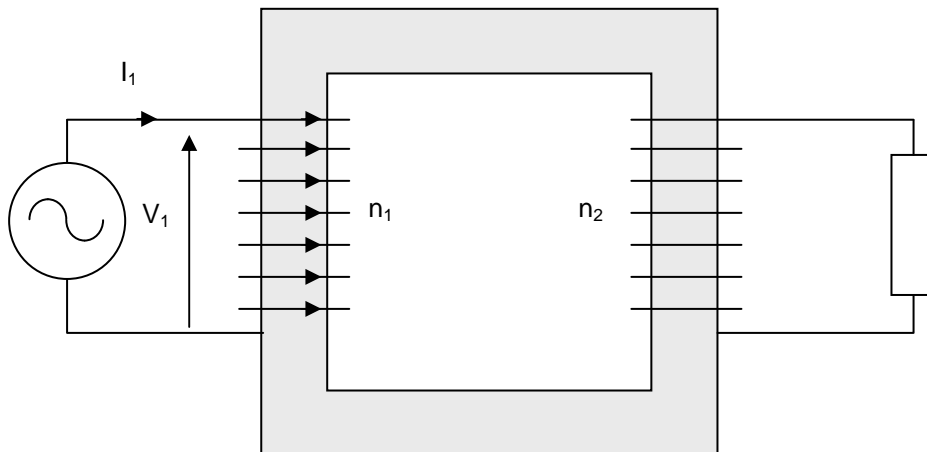


Figure 6

3. Le sens du courant primaire détermine, d'après la règle du tire-bouchon de Maxwell par exemple, le sens du flux magnétique produit à cet instant par l'enroulement primaire. Ce flux est qualifié de « flux inducteur » :

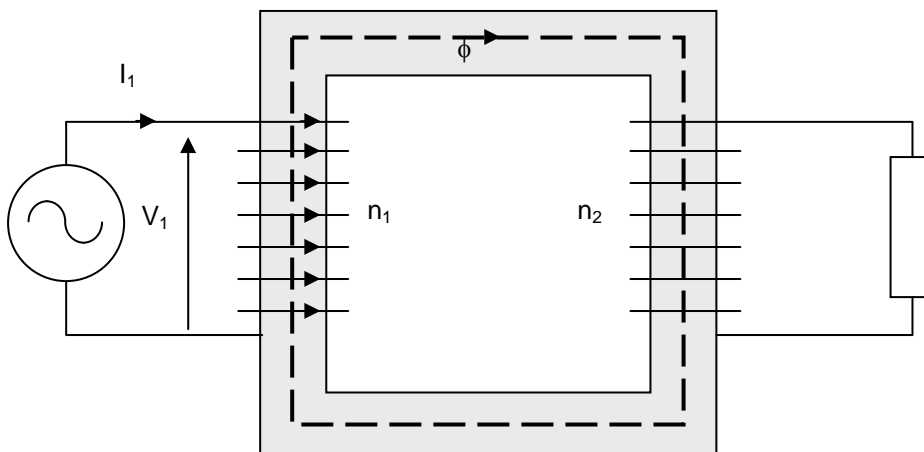


Figure 7

4. En admettant que le courant primaire est en train de croître à l'instant considéré, il en est de même pour le flux magnétique, canalisé par le circuit magnétique, à travers l'enroulement secondaire. Selon la loi de Faraday, un courant va apparaître dans le secondaire (celui-ci étant fermé sur un récepteur). D'après la loi de Lenz, le sens de ce courant secondaire sera tel qu'il créera un flux induit antagoniste au flux inducteur. La règle du tire-bouchon de Maxwell permet de déterminer le sens du courant secondaire.

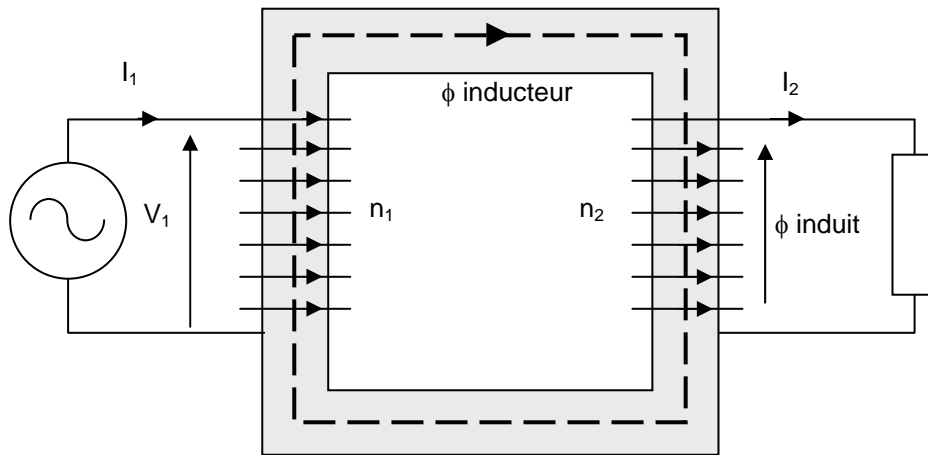


Figure 8

5. L'enroulement secondaire est un récepteur d'énergie magnétique et un générateur d'énergie électrocinétique. Le courant sort par la borne « plus », la polarité, le sens du vecteur tension secondaire à cet instant en découle :

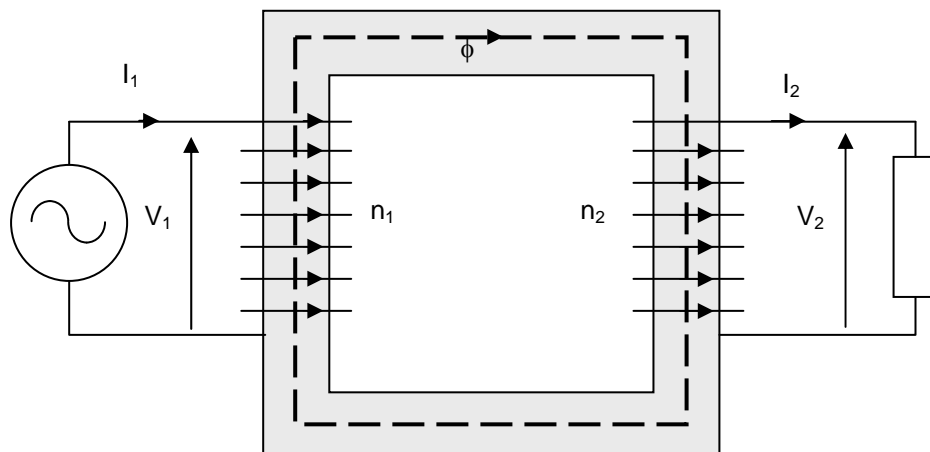


Figure 9

2.1.2. Marque de polarité d'un transformateur

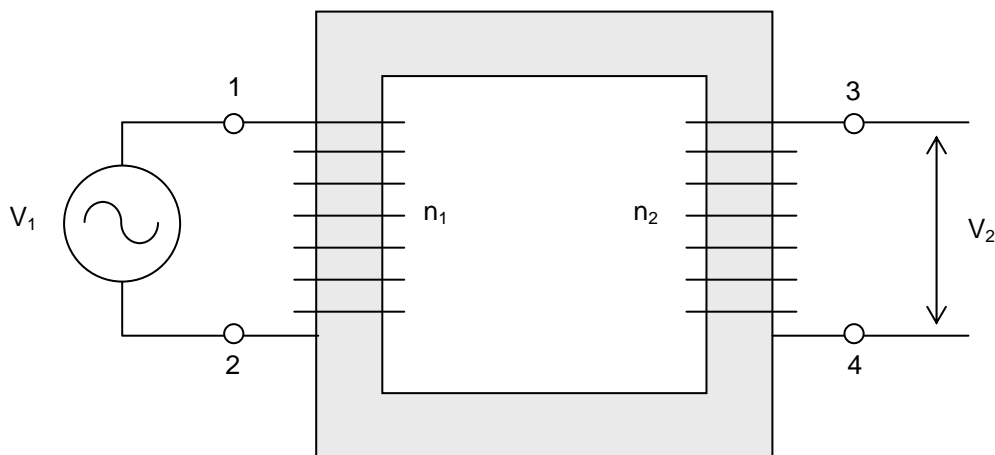


Figure 10

Dans la Figure 10, supposons qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum, la borne 1 soit positive par rapport à la borne 2, et que la borne 3 soit positive par rapport à la borne 4. On dit alors que les bornes 1 et 3 possèdent la même polarité. On l'indique en plaçant un point noir vis-à-vis de la borne 1 et un autre vis-à-vis de la borne 3. Ces points sont appelés des **marques de polarité**.

On pourrait aussi bien placer les marques de polarité vis-à-vis des bornes 2 et 4, car elles deviennent à leurs tours simultanément positives lorsque les tensions alternent. On peut donc placer les marques de polarité, soit à côté des bornes 1 et 3, soit à côté des bornes 2 et 4.

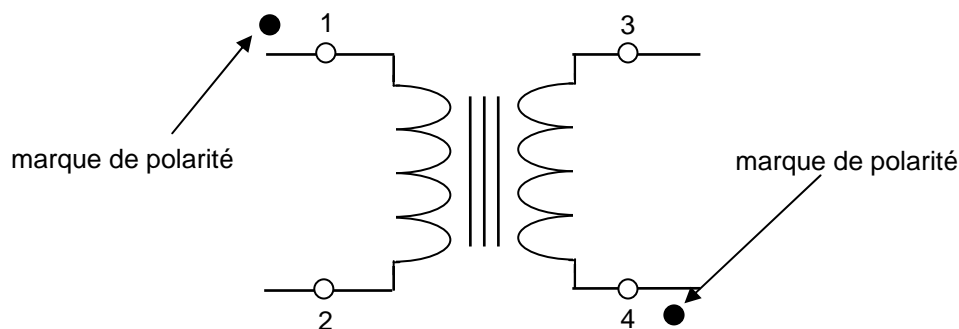


Figure 11

Habituellement, un transformateur est logé dans un boîtier de sorte que seules les bornes primaires et secondaires sont accessibles. Bien que les enroulements ne soient pas visibles, les règles suivantes s'appliquent quand on connaît les marques de polarité :

1. Un courant qui entre par une marque de polarité produit une F.M.M. dans le sens « positif ». Par conséquent, il produit un flux dans le sens « positif ». Inversement, un courant sortant d'une marque de polarité crée une F.M.M. dans le sens « négatif ». Une F.M.M. « négative » agit en sens inverse d'une F.M.M. « positive ».
2. Si une borne portant une marque de polarité est momentanément positive, toutes les bornes ayant une marque de polarité sont momentanément positives (par rapport à l'autre borne du même enroulement).

Ces règles nous permettent de tracer les vecteurs de Fresnel associés aux différentes tensions primaires et secondaires. Par exemple, dans le circuit de la Figure 11, compte tenu des marques de polarité, la tension V_{43} est en phase avec la tension V_{12} .

Le repérage de ces marques de polarité est capitale pour le branchement correct de deux transformateurs monophasés en parallèle ou encore pour le branchement correct d'un transformateur d'impulsion sur un thyristor.

2.1.3. Equations

Afin de préciser les notations et les conventions de signes, redessignons un schéma du transformateur en faisant apparaître :

- ϕ le flux commun aux deux enroulements ;
- F_1 et F_2 les flux de fuite respectivement primaire et secondaire.

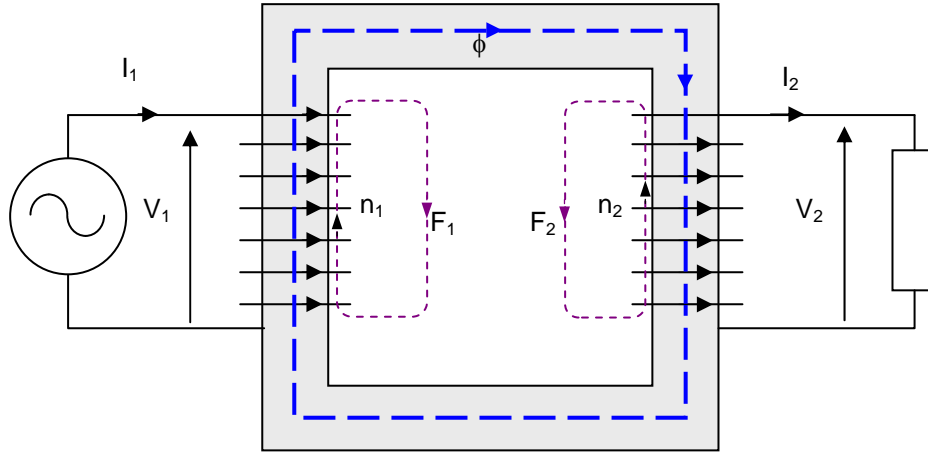


Figure 12

Le flux traversant une spire du primaire est : $\underline{\Phi} + \underline{F}_1 = \underline{\Phi}_1$ (1.1)

Le flux traversant une spire du secondaire est : $\underline{\Phi} - \underline{F}_2 = \underline{\Phi}_2$ (1.2)

Si R_1 et R_2 sont les résistances des enroulements, on peut écrire, en régime sinusoïdal (circuit magnétique non saturé) :

$$\underline{V}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega n_1 \underline{\Phi}_1 \quad (1.3)$$

$$\underline{V}_2 = -R_2 \underline{I}_2 + j\omega n_2 \underline{\Phi}_2 \quad (1.4)$$

Le signe – provient du sens choisi pour I_2 qui est « fourni » par le secondaire.

Le flux commun ϕ est donné par la relation d'Hopkinson² dans laquelle on néglige les fuites devant ϕ :

$$n_1 \underline{I}_1 - n_2 \underline{I}_2 = \mathcal{R} \underline{\Phi} \quad (1.5)$$

\mathcal{R} étant la réluctance du circuit magnétique.

Le flux de fuites propre au primaire, F_1 , est proportionnel au courant dans le primaire :

$$n_1 \underline{F}_1 = \ell_1 \underline{I}_1 \quad (1.6)$$

Où ℓ_1 est l'inductance de fuites du primaire.

De même, au secondaire :

$$n_2 \underline{F}_2 = \ell_2 \underline{I}_2 \quad (1.7)$$

Où ℓ_2 est l'inductance de fuites du secondaire.

² John Hopkinson (28 juillet 1849 - 27 août 1898) était un physicien anglais. Il est l'inventeur de la distribution d'énergie électrique triphasée. Hopkinson est devenu célèbre grâce à ses travaux sur les applications de l'électricité et du magnétisme. Ses travaux sur l'électromagnétisme l'ont conduit à découvrir l'équivalent magnétique de la loi d'Ohm qui porte son nom : Formule de Hopkinson ou analogie d'Hopkinson.

On obtient finalement l'ensemble des équations du transformateur :

$$\underline{V}_1 = (R_1 + j\omega \ell_1) \underline{I}_1 + jn_1\omega \Phi \quad (1.8)$$

$$\underline{V}_2 = -(R_2 + j\omega \ell_2) \underline{I}_2 + jn_2\omega \Phi \quad (1.9)$$

$$n_1 \underline{I}_1 - n_2 \underline{I}_2 = \mathcal{R} \Phi \quad (1.10)$$

Il reste à introduire les pertes fer du circuit magnétique.

3. Transformateur parfait

Afin de dégager les aspects fondamentaux, et compte tenu des ordres de grandeur, il est commode d'utiliser la notion de transformateur idéal (sans pertes, ni fuites) ou transformateur parfait. Nous verrons ensuite qu'un transformateur réel peut être étudié à partir de ce modèle en y introduisant les paramètres négligés ici.

3.1. Transformateur parfait

Un transformateur parfait :

- n'a pas de fuites magnétiques : $\ell_1 = \ell_2 = 0$;
- n'a pas de pertes Joule : $R_1 = R_2 = 0$;
- possède un circuit magnétique infiniment perméable : $\mathcal{R} = 0$;
- n'a pas de pertes fer.

Il est à noter que le transformateur réel est, numériquement, assez proche de ces hypothèses, et ce d'autant plus que les transformateurs sont de grandes dimensions et donc de grande puissance.

Les équations se simplifient :

$$\underline{V}_1 = jn_1\omega \Phi \quad (1.11)$$

$$\underline{V}_2 = jn_2\omega \Phi \quad (1.12)$$

$$n_1 \underline{I}_1 - n_2 \underline{I}_2 = 0 \quad (1.13)$$

En éliminant le flux communs et en utilisant la relation de Hopkinson, on obtient les relations fondamentales :

$$\frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \quad (1.14)$$

Le nombre $\frac{n_2}{n_1}$ (ou bien son inverse selon les auteurs) est appelé **rapport de transformation**.

Le transformateur permet d'élever ou de diminuer la tension.

On remarque, d'autre part, que le flux ϕ est lié à la tension d'alimentation : on a en module

$$\Phi = \frac{V_1}{\omega n_1} \quad (1.15)$$

Dans le circuit magnétique, si S est sa section, l'induction a pour valeur efficace :

$$B_{eff} = \frac{\Phi}{S} = \frac{B_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.16)$$

L'induction maximale B_{max} étant limitée par la saturation des matériaux, nous voyons que pour S , ω , n_1 donnés, la tension applicable à un enroulement est elle aussi limitée :

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2}}{\omega S n_1} \cdot V_1 \leq B_{saturation} \quad (1.17)$$

Cette relation permet, connaissant $B_{saturation}$ (information donnée par le métallurgiste qui fabrique les tôles du circuit magnétique) et V_1 , d'en déduire la valeur minimum de n_1 .

En fonctionnement industriel, V_1 , ω sont des constantes, par suite la valeur efficace du flux dans le circuit est elle aussi constante. On dit que le transformateur travaille à flux forcé (par la tension d'alimentation).

3.2. Impédance ramenée

Les tensions sont dans le rapport des nombres de spires. Le rapport du nombre de spires est un nombre réel pur, cela implique que les rapports des nombres complexes associés aux tensions ou bien aux intensités sont eux aussi des réels purs. Soit :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_1 \cdot e^{j\varphi_1}}{V_2 \cdot e^{j\varphi_2}} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow e^{j\varphi_1} = e^{j\varphi_2} \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 \quad (1.18)$$

Autrement dit, **un transformateur parfait n'introduit aucun déphasage entre les grandeurs primaires et secondaires.**

Les équations complexes précédentes montrent que si le déphasage dû au dipôle de charge est φ_2 , on retrouve ce même angle entre V_1 et I_1 :

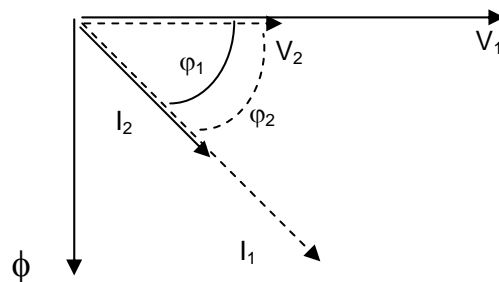


Figure 13

Le rendement est évidemment égal à un : $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 = P_2$

Le dipôle alimenté par le secondaire peut-être représenté par son modèle équivalent de Thévenin, soit une force contre électromotrice E_2 et une impédance Z_2 .

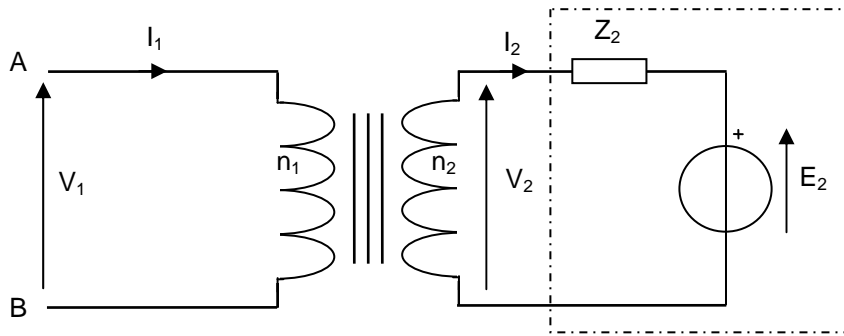


Figure 14

Cherchons à quel récepteur (E_1 , Z_1) le montage est équivalent vu des bornes A et B :

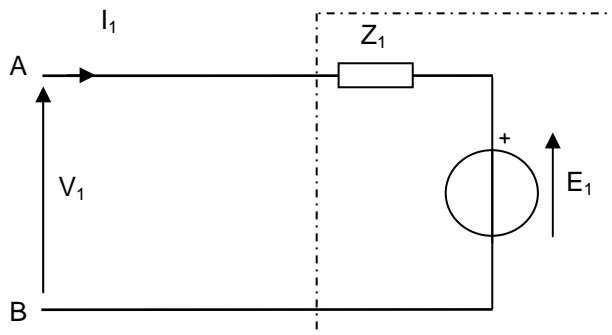


Figure 15

L'examen du secondaire du circuit de la Figure 14 permet d'écrire :

$$\underline{V_2} = \underline{E_2} + \underline{Z_2} \underline{I_2} \quad (1.19)$$

Eliminons $\underline{V_2}$ et $\underline{I_2}$:

$$\underline{V_1} = \frac{n_1}{n_2} \left(\underline{E_2} + \underline{Z_2} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \underline{I_1} \right) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \underline{E_2} + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \cdot \underline{Z_2} \cdot \underline{I_1} \quad (1.20)$$

Ecrivons l'équation de maille du circuit de la Figure 15 :

$$\underline{V_1} = \underline{E_1} + \underline{Z_1} \underline{I_1} \quad (1.21)$$

Par identification, on obtient :

$$\underline{E_1} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \underline{E_2} \quad (1.22)$$

$$\frac{\underline{Z_1}}{\underline{Z_2}} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (1.23)$$

On retiendra surtout ce dernier résultat en notant que, pour les impédances, c'est le carré du rapport des nombres de spires qui compte. Cette formule est connue sous le nom de « théorème du transfert d'impédance ».

L'équation (1.23) permet de modifier les schémas électriques comme nous le verrons plus loin, mais elle a aussi des applications très concrètes en électronique dans le domaine de l'adaptation d'impédance.

Imaginons que nous souhaitions connecter un amplificateur, dont la sortie est représentée par un modèle de Thévenin comportant une résistance de $4\ \Omega$, à un haut parleur de résistance $8\ \Omega$.

Si nous voulons un rendement maximum, le théorème d'adaptation d'impédance nous dit qu'il faudrait changer le haut parleur pour un modèle de résistance $4\ \Omega$ ou bien changer l'amplificateur pour un modèle de résistance de sortie $8\ \Omega$.

Un transformateur de rapport de transformation judicieusement choisi peut nous sortir de l'embarras. D'après l'équation (1.23), si nous avons bien choisi le transformateur, le haut parleur d'impédance $Z_2 = 8\ \Omega$ aura l'impression d'être alimenté par un amplificateur d'impédance $Z_{1\text{ ramenée}} = 8\ \Omega$ tandis que, de son point de vue, l'amplificateur ($Z_1 = 4\ \Omega$) aura l'impression d'alimenter un haut parleur d'impédance ramenée $Z_{2\text{ ramenée}} = 4\ \Omega$.

$$\text{Pour cela, il faut que : } Z_{1\text{ ramenée}} = Z_2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = 8 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = 4\ \Omega$$

$$\text{Ou encore que : } Z_{2\text{ ramenée}} = Z_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 4 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = 8\ \Omega$$

Ces deux relations, identiques, permettent de déterminer le rapport de transformation nécessaire :

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{4}{8} \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

4. Transformateur réel à vide

Un transformateur parfait à vide, c'est-à-dire tel que $I_2 = 0$, n'absorberait aucun courant primaire, et serait équivalent au primaire à une impédance infinie. En fait, le transformateur réel absorbe à vide un courant, faible devant le courant nominal, et qui dépend de la qualité du circuit magnétique (réluctance, pertes fer).

4.1. Influence de la réluctance du circuit magnétique

Si l'on ne néglige plus \mathcal{R} , on a :

$$\begin{aligned}\underline{V}_1 &= jn_1\omega\Phi \\ \underline{V}_2 &= jn_2\omega\Phi \\ n_1\underline{I}_1 - n_2\underline{I}_2 &= \mathcal{R}\Phi\end{aligned}$$

Le rapport des tensions n'est pas modifié, mais pour les courants, on peut écrire :

$$\underline{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I}_2 + \frac{\mathcal{R}}{n_1} \cdot \Phi = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I}_2 + \frac{\mathcal{R}V_1}{j\omega n_1^2} \quad (1.24)$$

Le second terme de cette expression est le **courant magnétisant** du transformateur \underline{I}_{10} :

$$\underline{I}_{10} = \frac{V_1}{j\omega \cdot \frac{n_1^2}{\mathcal{R}}} = \frac{V_1}{j\omega L_1} \quad (1.25) \text{ avec } L_1 = \frac{n_1^2}{\mathcal{R}} \text{ où } L_1 \text{ est l'inductance propre de l'enroulement}$$

primaire.

A vide, $I_2 = 0$, et le primaire du transformateur absorbe le courant I_{10} : nous trouvons évidemment que le primaire utilisé seul se comporte comme une inductance de n_1 spires, placées sur un circuit magnétique de réluctance \mathcal{R} .

Si V_1 et ω sont des constantes, I_{10} est constant. On peut donc écrire :

$$\underline{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_{10} \quad (1.26) \text{ et } \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Il est commode de traduire ces équations par un schéma équivalent au transformateur réel et qui comprend :

- un transformateur parfait de mêmes nombres de spires n_1 et n_2 que le transformateur réel ;
- une inductance L_1 en parallèle et dans laquelle passe le courant magnétisant I_{10} .

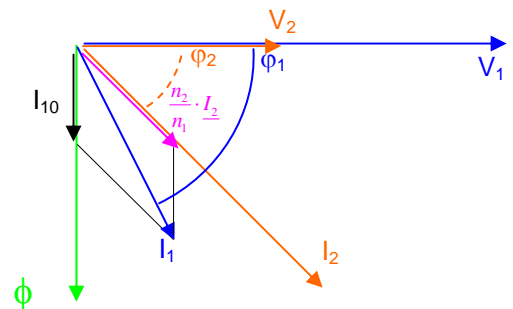
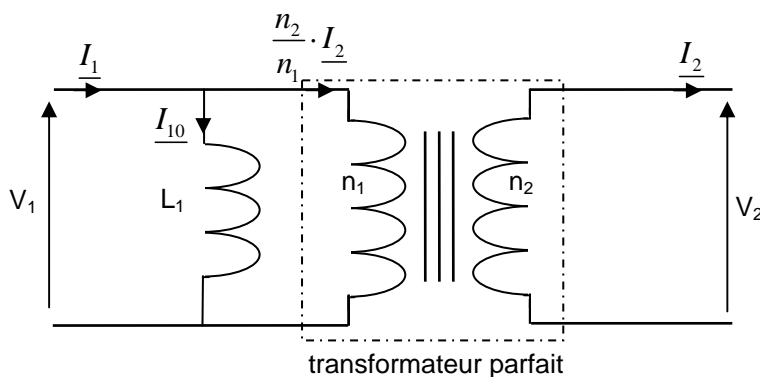


Figure 16

4.2. Influence des pertes fer

Le flux alternatif engendre, par hystérésis et courants de Foucault, un échauffement du circuit magnétique : les « pertes fer ». Cela correspond à une absorption supplémentaire de puissance active approximativement proportionnelle au carré du champ magnétique B et à la fréquence. Le flux étant déterminé par la tension appliquée (à fréquence donnée), les pertes fer seront proportionnelles au carré de la tension. **Elles interviendront en permanence dans le rendement mais seront particulièrement mises en évidence lors du fonctionnement à vide.**

Un transformateur sans pertes fer n'absorberait, à vide, aucune puissance active (l'inductance L_1 n'absorbe que de la puissance réactive) ; le transformateur réel à vide absorbe en fait une puissance correspondant à ces pertes fer.

Cela signifie qu'à vide, le transformateur réel absorbe un courant I_{1V} qui comporte, outre le courant magnétisant I_{10} , un courant I_{1F} , en phase avec la tension, correspondant aux pertes fer :

$$P_V = P_{fer} = V_1 I_{1F} = V_1 I_{1V} \cos \varphi_{1V} \quad (1.27), \quad \varphi_{1V} \text{ étant le déphasage entre } V_1 \text{ et } I_{1V}.$$

$$\underline{I_{1V}} = \underline{I_{10}} + \underline{I_{1F}} \quad (1.28)$$

A fréquence constante, I_{1F} est proportionnel à V_1 .

Il est commode de compléter le schéma équivalent du transformateur en prenant en compte les pertes fer par une **résistance fictive** qui sera le siège de pertes par effet Joule égales aux pertes fer. Cette résistance R_F absorbe, sous la tension V_1 , le courant I_{1F} :

$$P_{fer} = V_1 I_{1F} = \frac{V_1^2}{R_F} \quad (1.29)$$

On aura donc finalement :

$$\underline{I_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I_2} + \underline{I_{1V}} \quad (1.30) \text{ et } \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Remarque :

- Aux forts courants, $I_1 \gg I_{1V}$ et on retrouve la relation du transformateur parfait.
- En fait, à cause de la saturation, le courant à vide n'est pas sinusoïdal : le flux imposé par la tension est sinusoïdal, de même que le champ B ($v_1 = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$) ; par suite, le courant ne le sera pas.

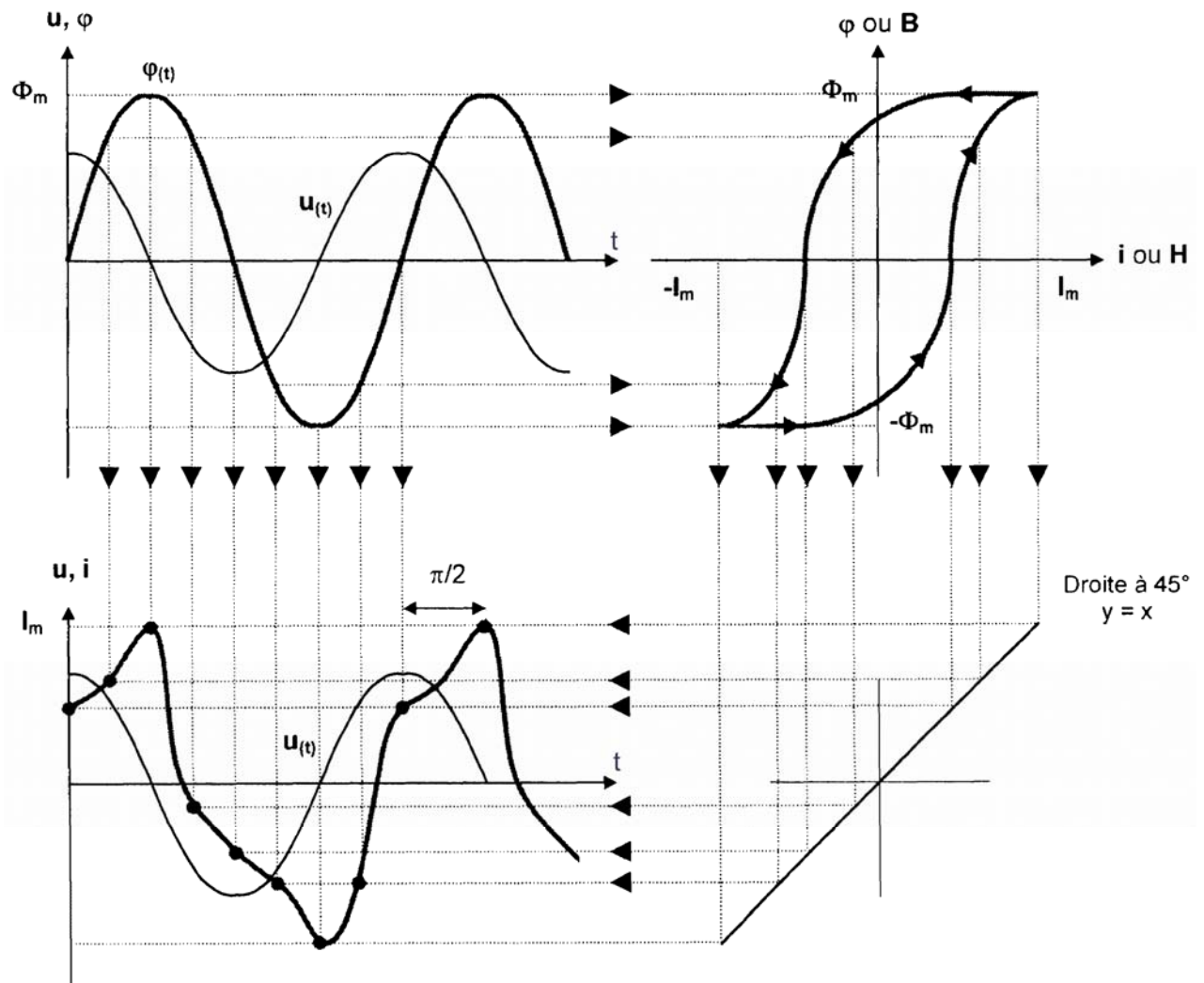


Figure 17

En présence de l'hystérésis, il y a en outre déphasage de la composante fondamentale du courant en avance sur le flux (courbe montante puis descendante : le courant s'annule avant le flux). En charge, les courants I_1 et I_2 seront pratiquement sinusoïdaux car seule leur différence, faible, magnétise le circuit et subit la distorsion.

5. Transformateur réel en charge

5.1. Schéma équivalent

Lorsque les courants sont importants, on doit tenir compte des chutes de tension dans les résistances ohmiques des enroulements primaires et secondaires et dans les inductances de fuites.

Le courant magnétisant et les pertes fer restent liées au flux. Le schéma équivalent traduit les équations complètes.

$$\underline{V}_1 = (R_1 + j\omega \ell_1) \underline{I}_1 + jn_1\omega \Phi$$

$$\underline{V}_2 = -(R_2 + j\omega \ell_2) \underline{I}_2 + jn_2\omega \Phi$$

$$\underline{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_{1V} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_{10} + \underline{I}_{1F}$$

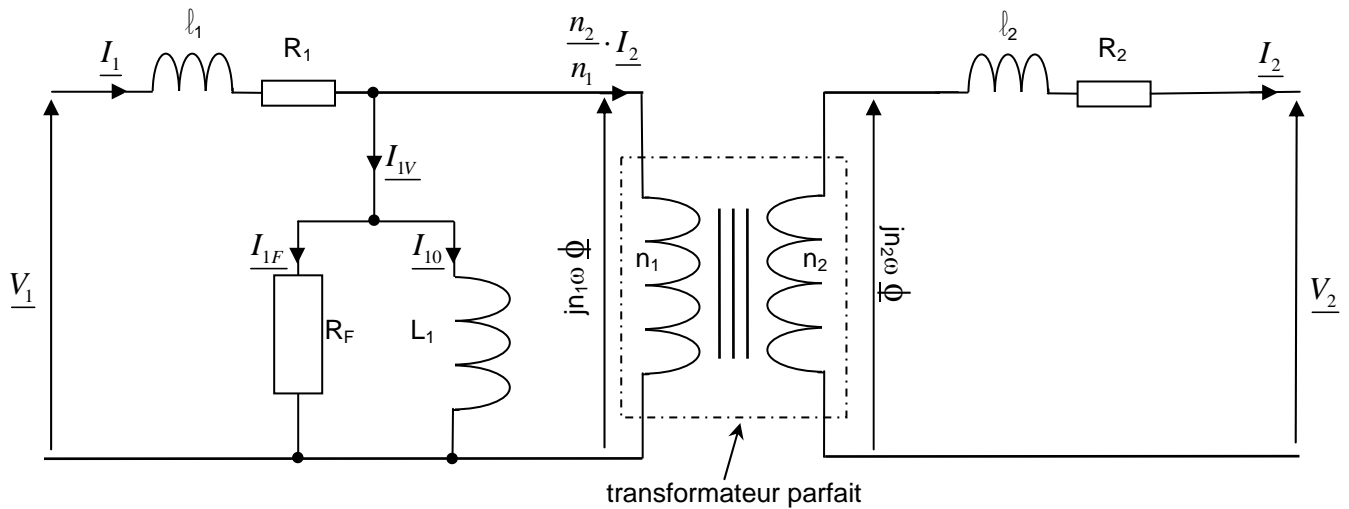


Figure 18

Le schéma équivalent comporte un transformateur parfait alimenté par les tensions fictives $jn_1\omega \Phi$ et $jn_2\omega \Phi$. En pratique, la chute de tension dans R_1 et $j\ell_1\omega$ est faible devant V_1 , aussi, pour le calcul du courant I_{1V} , lui-même faible, il est inutile d'en tenir compte. On obtient alors un schéma plus simple et suffisamment précis :

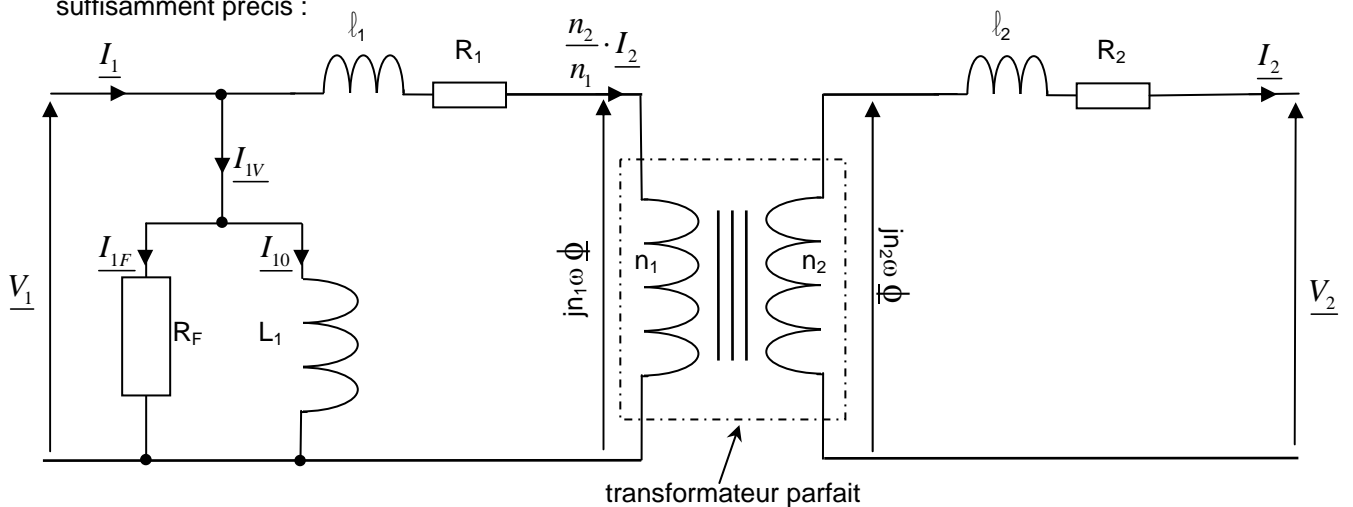


Figure 19

On peut enfin réduire ce schéma en utilisant le théorème de transfert d'impédance :

Grâce à l'équation (1.23), on peut ramener R_1 et ℓ_1 au secondaire en les multipliant par $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$ et en les regroupant avec R_2 et ℓ_2 ; on pose :

$$R_s = R_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 \quad (1.31) \quad \text{résistance des enroulements ramenée au secondaire}$$

$$\ell_s = \ell_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \ell_1 \quad (1.32) \quad \text{inductance de fuites ramenée au secondaire}$$

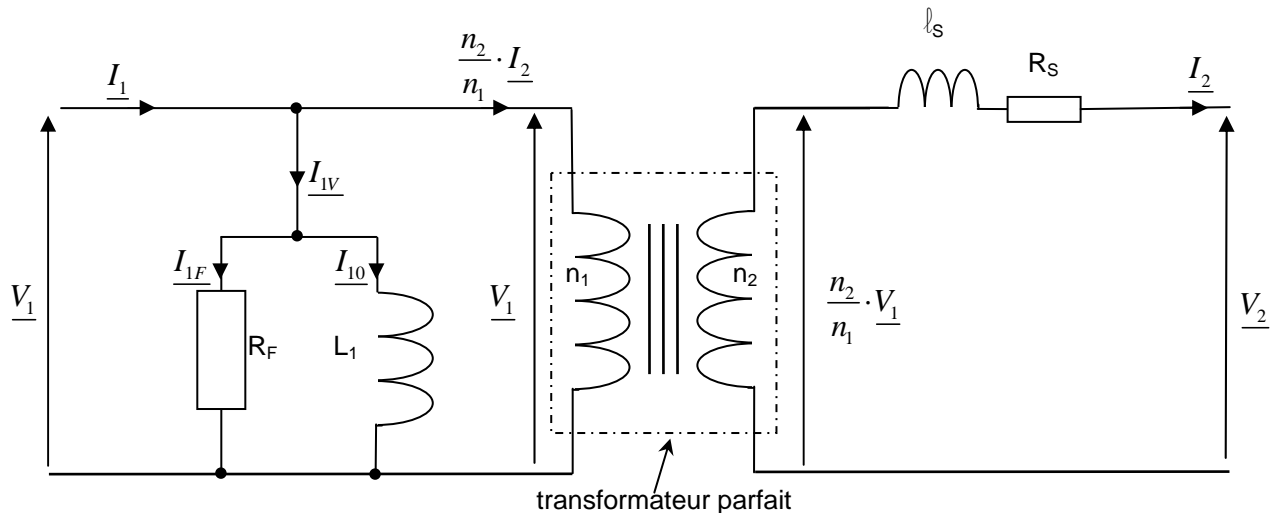


Figure 20

Ce schéma final (appelé schéma de Kapp³) permet l'étude complète du transformateur réel qui, si V_1 est constante, se présente au secondaire comme un générateur de Thévenin de f.é.m. $\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1$ et d'impédance interne $\underline{Z}_s = R_s + j\omega \ell_s$.

Outre le phénomène essentiel traduit par le transformateur parfait, on localise les imperfections :

- Réluctance du circuit magnétique : L_1
- Fuites de flux : ℓ_s
- Pertes fer : R_F
- Pertes cuivre (effet Joule) : R_s

On retrouve le modèle idéal si : $L_1 = \infty$; $\ell_s = 0$; $R_F = \infty$; $R_s = 0$.

Le modèle établi ci-dessus est valable pour les fréquences industrielles (inférieures à 500 Hz). Pour les transformateurs soumis à des tensions de fréquences plus importantes, il faut faire intervenir les capacités réparties entre spires et entre les enroulements primaire et secondaire.

³ Gisbert Kapp est né le 2 septembre 1852 à Mauer près de Vienne. Il fait ses études à Zurich puis travaille comme ingénieur électricien en Angleterre à partir de 1875. En 1894, il s'installe à Berlin comme ingénieur conseil. Il est ensuite professeur d'électrotechnique à l'université de Birmingham entre 1905 et 1919. Kapp a proposé des améliorations à la dynamo et aux méthodes de mesures électriques, il a également effectué des travaux sur le transformateur. Il meurt le 10 août 1922 à Birmingham. Kapp a laissé son nom, dans le domaine des transformateurs, à une hypothèse simplificatrice et à un diagramme vectoriel.

5.2. Chute de tension

Le schéma précédent conduit pour les tensions à l'équation de maille du secondaire :

$$\frac{n_2}{n_1} \cdot \underline{V}_1 = \underline{V}_2 + (R_s + j\omega \ell_s) \underline{I}_2 \quad (1.33) \quad \text{équation de kapp}$$

Supposons que le transformateur débite le courant I_2 sous la tension V_2 dans un dipôle qui impose le déphasage φ_2 . On peut construire les vecteurs de Fresnel associés aux tensions (diagramme de Kapp) :

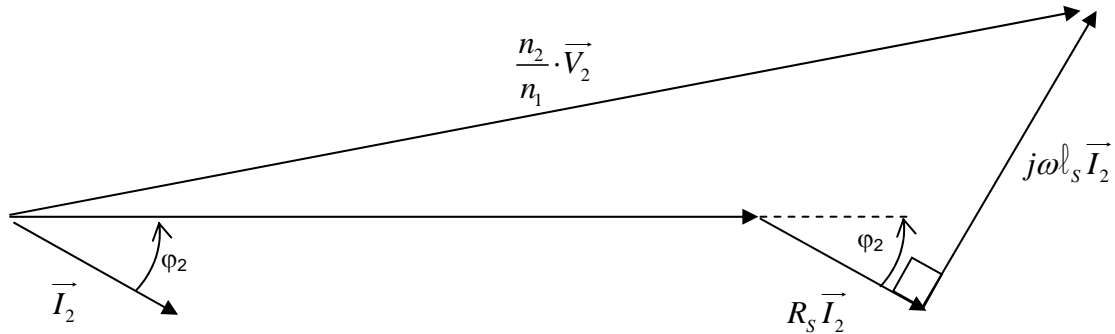


Figure 21

On voit que, en général, V_2 sera différente de $\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1$ est dépendra de I_2 et de φ_2 .

A vide, $I_2 = 0$, on aura une tension $V_2 = V_{20} = \frac{n_2}{n_1} \cdot V_1$.

On appelle **chute de tension** la quantité :

$$\Delta V_2 = |V_{20}| - |V_2| \quad (1.34) \quad \text{Différence des valeurs efficaces de la tension secondaire à vide et en charge pour une même tension primaire } V_1.$$

Attention : ΔV_2 n'est pas la tension aux bornes de R_s et ℓ_s .

Le diagramme de Kapp permet de déterminer graphiquement cette chute de tension. En réalité, $R_s I_2$ et $\ell_s \omega I_2$ sont faibles devant V_2 et on peut souvent utiliser une relation simplifiée :

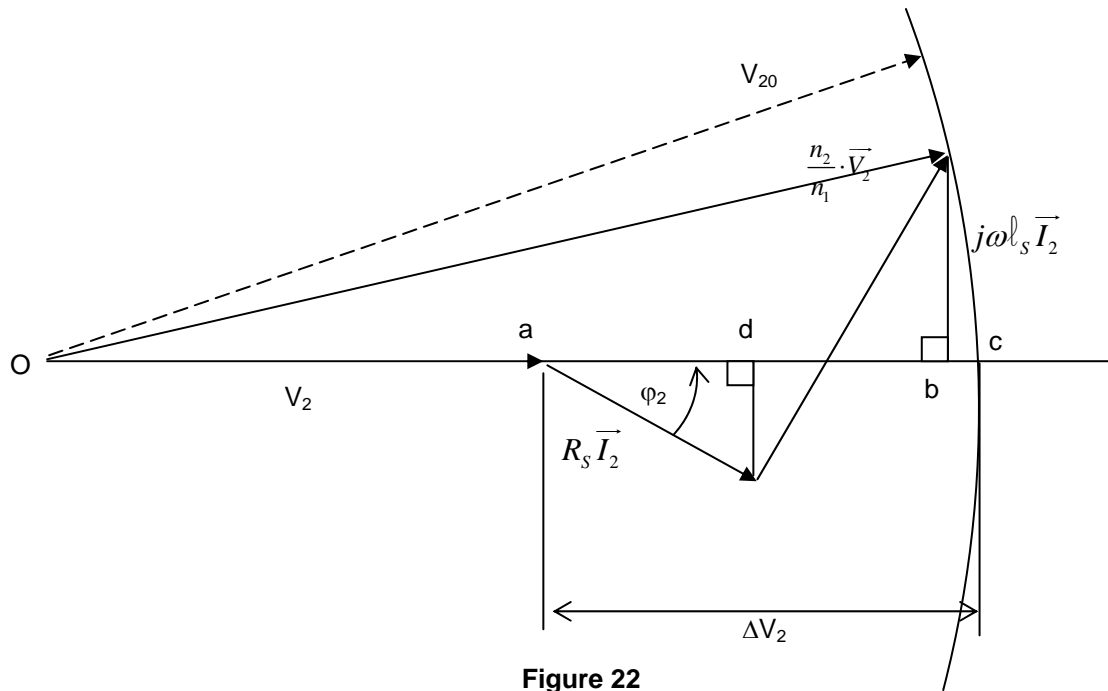


Figure 22

On peut matérialiser ΔV_2 sur le diagramme en traçant le cercle de rayon V_{20} , centré en O :

$$\Delta V_2 = ac$$

Si $R_s I_2 \ll V_2$ et $\ell_s \omega I_2 \ll V_2$, on peut considérer que le rayon du cercle est très grand et confondre la projection ab avec ΔV_2 .

On a alors : $\Delta V_2 \simeq ad + db$

$$\Delta V_2 \simeq R_s I_2 \cos \varphi_2 + \ell_s \omega I_2 \sin \varphi_2 \quad (1.35)$$

5.3. Essai et propriétés du transformateur

Les paramètres du schéma équivalent doivent être déterminés par des essais expérimentaux. On peut effectuer des mesures directement sous tensions et courants minimaux. Il est préférable de séparer les essais, ce qui, en outre, permet de travailler à puissance réduite.

5.3.1. Essai à vide

Le secondaire étant vide ($I_2 = 0$), on mesure V_1 , $V_2 = V_{20}$, P_{1V} , I_{1V} .

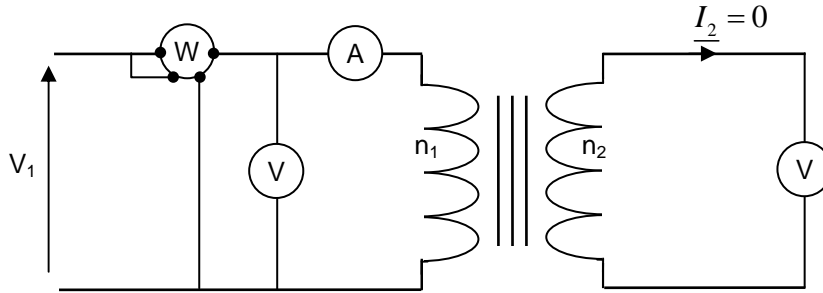


Figure 23

On en déduit :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_{20}}{V_1}$$

$$\cos \varphi_{1V} = \frac{P_{1V}}{V_1 \cdot I_{1V}}$$

$$I_{1F} = I_{1V} \cos \varphi_{1V} \text{ et } I_{10} = I_{1V} \sin \varphi_{1V}$$

D'où l'on peut déduire :

$$R_F = \frac{V_{eff}^2}{P} = \frac{P}{I_F^2} = \frac{V_{eff}}{I_F} \quad (1.36)$$

$$X_1 = L_1 \omega = \frac{V_{eff}^2}{Q} = \frac{Q}{I_0^2} = \frac{V_{eff}}{I_0} \quad (1.37)$$

5.3.2. Essai en court-circuit

Le secondaire est mis en court-circuit par un ampèremètre ; **le primaire doit être alimenté sous une tension réduite V_{1CC}** , sinon on risque la destruction pure et simple du transformateur sous l'effet conjugué des efforts mécaniques dus aux forces de Laplace entre conducteurs et de l'élévation de température due à l'effet Joule.

On règle généralement V_{1CC} pour obtenir un courant I_{2CC} égal à $I_{2\text{ nominal}}$.

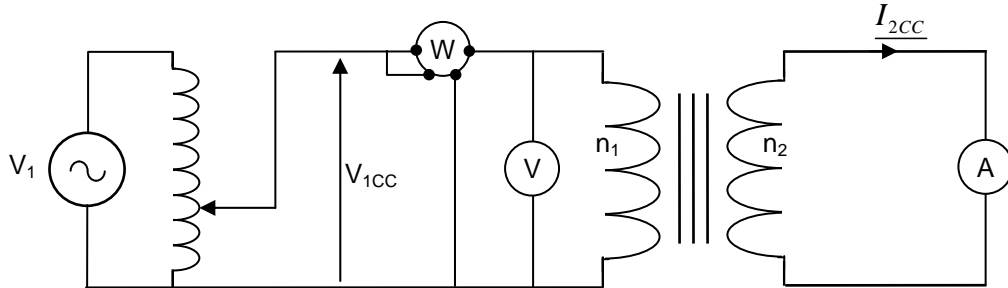


Figure 24

On mesure : V_{1CC} , P_{1CC} , $I_2 = I_{2CC}$.

Comme V_{1CC} est très faible, les pertes fer sont négligeables (on rappelle qu'elles sont proportionnelles à B_{max} et donc à la tension d'alimentation) et il ne reste plus que les pertes Joule :

$$P_{1CC} \approx R_s I_{2CC}^2 \Rightarrow R_s \approx \frac{P_{1CC}}{I_{2CC}^2}$$

On peut également mesurer R_1 et R_2 en courant continu et faire le calcul.

En court-circuit, le diagramme de Kapp se réduit à un triangle rectangle ($V_2 = 0$) dont on connaît le côté ($R_s I_{2CC}$) et l'hypoténuse.

On en déduit ($\ell_s \omega$) :

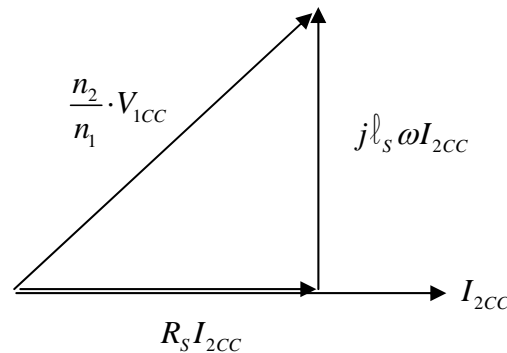


Figure 25

$$\ell_s \omega = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_{1CC}\right)^2 - (R_s I_{2CC})^2}}{I_{2CC}} \quad (1.38)$$

5.3.3. Chute de tension

Par le diagramme de Kapp, ou en utilisant la relation approchée du paragraphe précédent, on peut prédéterminer la tension V_2 (ou la chute de tension) pour tout courant I_2 débité et tout déphasage φ_2 . Numériquement, pour les transformateurs industriels, la chute de tension est très faible (quelques % de la tension). Si le déphasage est négatif et suffisamment élevé (débit sur circuit capacitif), la chute de tension peut être négative ($V_2 > V_{20}$) ; c'est en fait un phénomène de résonance. On peut traduire ces résultats par des courbes donnant V_2 en fonction de I_2 pour V_1 constante et diverses valeurs du déphasage φ_2 .

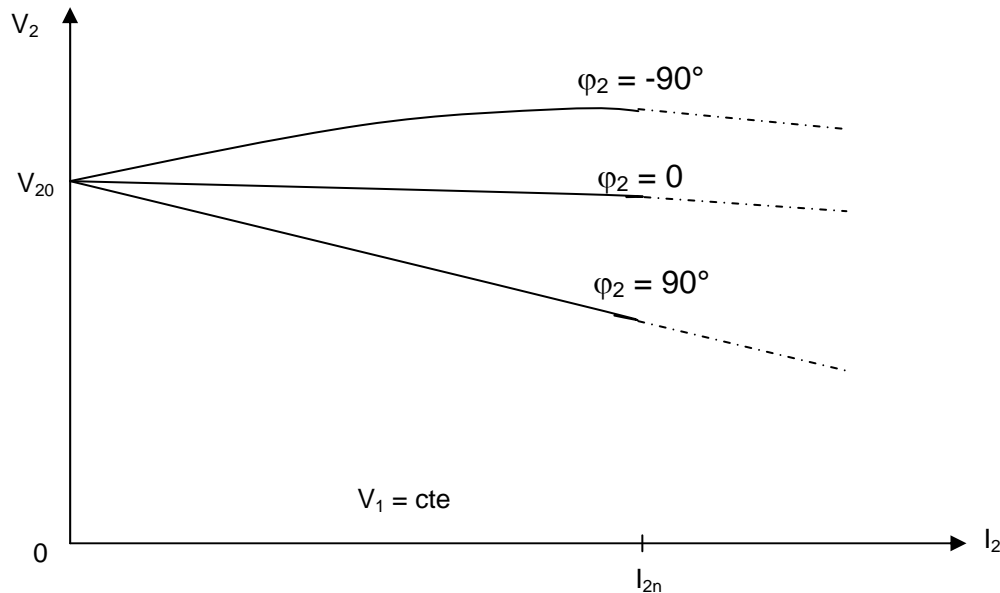


Figure 26

Remarque :

- La relation approchée montre que, si le dipôle présente un déphasage φ_2 nul, la chute de tension ne provient que des résistances des enroulements. Si un déphasage existe, l'inductance de fuite intervient.
- Dans certains transformateurs, on favorise les fuites magnétiques afin d'augmenter ℓ_s ; on augmente ainsi l'impédance interne du transformateur ce qui permet de limiter le courant sans perdre de puissance active (pas d'échauffement). On utilise ces transformateurs pour la soudure électrique ou pour limiter une consommation : la chute de tension est alors très importante.

5.3.4. Rendement

On applique le théorème de Boucherot :

Puissance absorbée = puissance fournie + pertes

Puissance fournie : $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$

Pertes Joule : $p_{Joule} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_s I_2^2$

Pertes fer : $p_{fer} = \frac{V_1^2}{R_F} = P_{Vide}$

D'où le rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{Joule} + p_{fer}} = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_S I_2^2 + p_{fer}}$$

L'essai à vide donne les pertes fer et l'essai en court-circuit donne les pertes Joule.

Numériquement, ce rendement est très bon pour un transformateur industriel ($\eta > 95\%$). Il dépend de V_2 , I_2 , φ_2 .

Remarque :

Le rendement est nul pour $I_2 = 0$ et $I_2 = \infty$.

Si on suppose V_2 et φ_2 constants, il est maximum lorsque $R_S I_2 = \frac{p_{fer}}{I_2}$, soit lorsque $p_{Joule} = p_{fer}$

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi_2}{V_2 \cos \varphi_2 + R_S I_2 + \frac{p_{fer}}{I_2}}$$

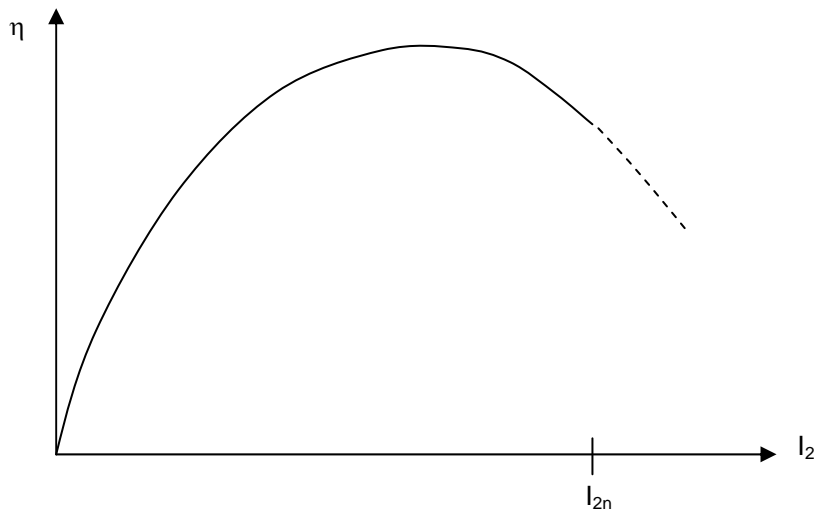


Figure 27

6. Transformateurs spéciaux

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base que nous avons étudiées dans le chapitre précédent :

- La tension induite dans un enroulement est proportionnelle au nombre de spires ;
- Lorsque le transformateur est en charge, les ampères-tours du primaire sont égaux aux ampères-tours du secondaire ;
- Le courant absorbé à vide (courant d'excitation absorbé en permanence) est négligeable par rapport à la valeur du courant de pleine charge du primaire.

6.1. Autotransformateur

On appelle autotransformateur, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire.

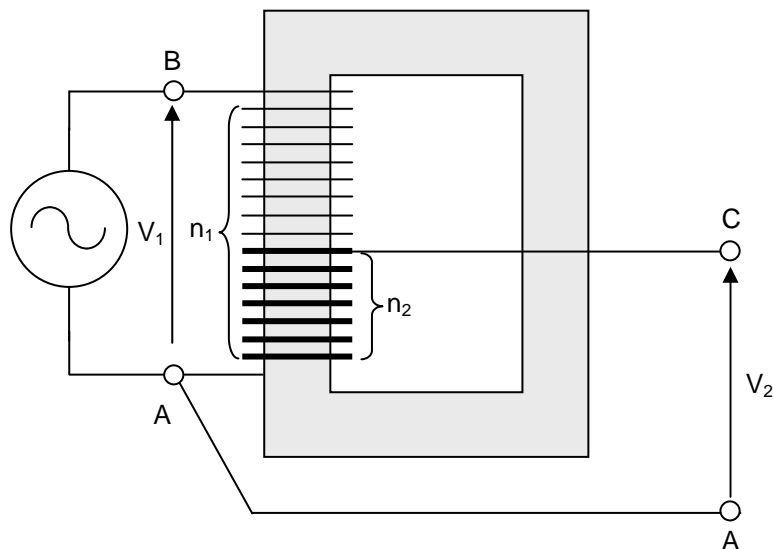


Figure 28

Soit un autotransformateur (Figure 28) composé d'un enroulement AB de n_1 spires monté sur un circuit magnétique. L'enroulement est raccordé à une source de tension constante V_1 . Le courant d'excitation crée un flux Φ , et, comme dans tout transformateur, ce flux demeure constant tant que V_1 est constante.

Supposons que l'on sorte une prise C entre les extrémités A et B de l'enroulement, et que n_2 spires soient comprises entre les bornes A et C. Comme la tension induite est proportionnelle au nombre de spires, la tension entre ces bornes est :

$$V_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot V_1 \quad (1.39)$$

Cette relation est la même que celle obtenue avec un transformateur conventionnel à deux enroulements ayant n_1 et n_2 spires respectivement au primaire et au secondaire. Cependant, comme les enroulements primaire AB et secondaire AC ont une borne commune A, ils ne sont plus isolés.

Si l'on branche une charge entre les bornes A et C, le courant I_2 provoque la circulation d'un courant I_1 au primaire (Figure 29).

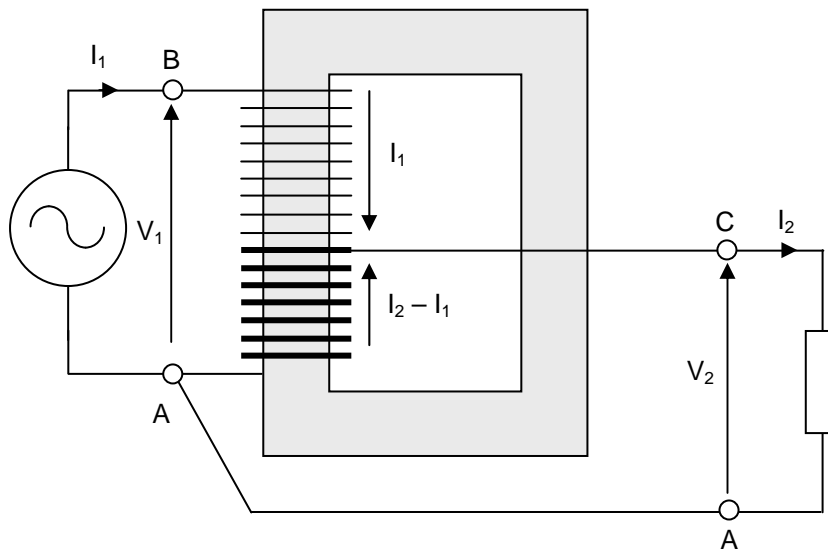


Figure 29

La section BC de l'enroulement est traversée par le courant I_1 . D'après la loi des nœuds appliquée en A, la section CA est traversée par une intensité $(I_2 - I_1)$. De plus la F.M.M. créée par I_1 doit être égale et opposée à celle produite par $(I_2 - I_1)$. On a donc :

$$I_1(n_1 - n_2) = (I_2 - I_1)n_2 \quad (1.40)$$

$$\text{Soit } n_1 I_1 = n_2 I_2 \quad (1.41)$$

Enfin, si l'on suppose que les pertes et le courant magnétisant sont négligeables, la puissance apparente absorbée par la charge doit être égale à celle fournie par la source. Par conséquent, $V_1 I_1 = V_2 I_2$ (1.42)

On constate que les équations (1.39), (1.41), (1.42) sont identiques à celles obtenues avec un transformateur conventionnel ayant un rapport de transformation $\frac{n_2}{n_1}$. Cependant, dans un

autotransformateur, l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il s'ensuit qu'un autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance. Cette économie devient particulièrement importante lorsque le rapport de transformation se situe entre 0,5 et 2. Par contre, l'absence d'isolation entre la haute tension et la basse tension constitue un inconvénient parfois prohibitif.

Les autotransformateurs servent au démarrage à tension réduite des moteurs, à la régulation de la tension des lignes de distribution et, en général, à la transformation de tensions de valeurs assez rapprochées.

Un transformateur à deux enroulements peut être monté en autotransformateur : il suffit de relier le secondaire en série avec le primaire. Selon le mode de connexion, la tension secondaire peut s'ajouter à la tension primaire ou se soustraire de celle-ci.

Lorsqu'on utilise des transformateurs conventionnels comme autotransformateurs, il est important d'appliquer les règles suivantes :

- Le courant dans un enroulement ne doit pas dépasser la valeur nominale
- La tension aux bornes d'un enroulement ne doit pas être supérieure à la valeur nominale.
- Si le courant nominal circule dans un enroulement, le courant nominal circule automatiquement dans l'autre (égalité des ampères-tours dans les deux enroulements).
- Si la tension nominale apparaît aux bornes d'un enroulement, la tension nominale correspondante apparaît automatiquement aux bornes de l'autre.

Autotransformateur variable

Lorsque l'on a besoin d'une tension variable de 0 à 220 V ou plus, on a souvent recours à un autotransformateur ayant une prise mobile (Figure 30). Le transformateur comprend un enroulement d'une seule couche de fil bobiné sur un noyau magnétique toroïdal et un balai en graphite mobile que l'on peut déplacer au moyen d'un bouton de réglage. Le balai glisse sur les spires, et à mesure que le point de contact se déplace, la tension V_2 augmente proportionnellement au nombre de spires parcourues. Si la source de tension V_1 est connectée sur une prise fixe englobant 85 % des spires, on peut faire varier la tension V_2 de 0 à $\frac{100}{0,85} = 117\%$ de la tension V_1 . Ainsi, par exemple, si $V_1 = 220\text{ V}$,

V_2 pourra varier entre 0 et 250 V.

On préfère l'autotransformateur au rhéostat car, pour une position donnée du curseur, la tension V_2 varie beaucoup moins avec la charge, et les pertes Joule sont bien moindres.

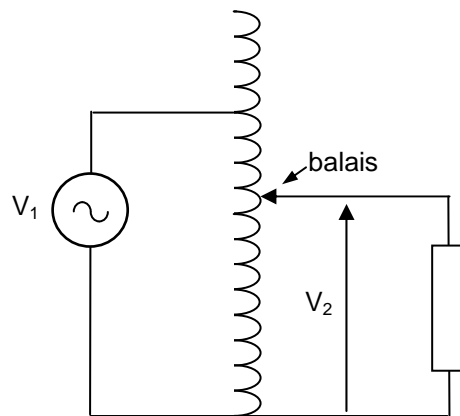


Figure 30



Figure 31

6.2. Transformateur de tension (TT)

Les transformateurs de tension sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (voltmètre, wattmètre, etc) ou de protection (relais). Ils servent à isoler ces appareils de la haute tension et à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts, ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courante pour la mesure de tension élevées.

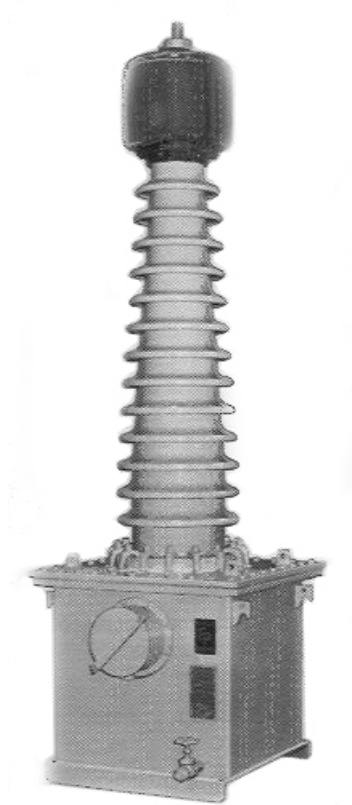


Figure 32

Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension. Leur construction diffère très peu de celle des transformateurs conventionnels. Cependant, leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA) de sorte que le volume de l'isolation dépasse souvent celui du cuivre et de l'acier utilisé.

Les transformateurs de tension installés sur les lignes HT sont toujours raccordés entre une ligne et le neutre. Cela élimine la nécessité d'utiliser deux grosses bornes de porcelaine, une des deux extrémités de l'enroulement étant reliée à la terre.

Par exemple, la Figure 32 montre un transformateur utilisé sur une ligne à 140 kV, il comprend une grosse borne (traversée) en porcelaine afin d'isoler la ligne haute tension du boîtier qui est mis à la terre. Ce dernier renferme le transformateur proprement dit.

Afin d'éviter le risque de choc électrique en touchant l'instrument de mesure ou un de ses fils de raccordement, un des fils de l'enroulement secondaire doit systématiquement être relié à la masse. En effet, même si le secondaire paraît isolé du primaire, la capacitance distribuée entre les enroulements effectue une connexion invisible qui peut mettre le secondaire à un potentiel très élevé par rapport au sol si ce dernier n'est pas raccordé à la masse (Figure 33).

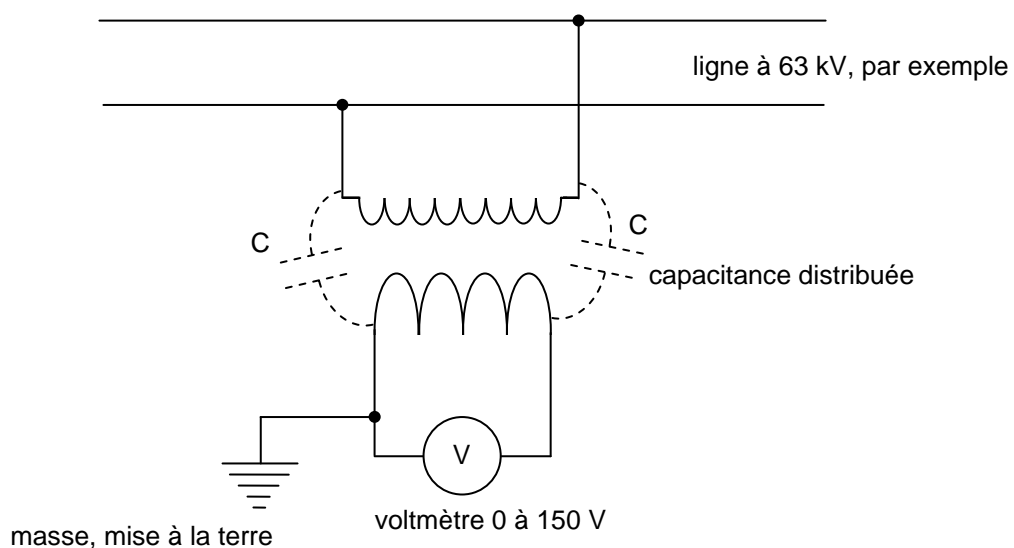


Figure 33

Le voltmètre ayant une très forte impédance, le transformateur de tension est pratiquement à vide. On a :

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$, et comme $V_1 \gg V_2$, il faut : $n_1 \gg n_2$. L'impédance ramenée au primaire du transformateur

de tension, $Z_{1 \text{ ramenée}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot Z_{\text{voltmètre}}$, sera très grande.

6.3. Transformateur de courant (TI)

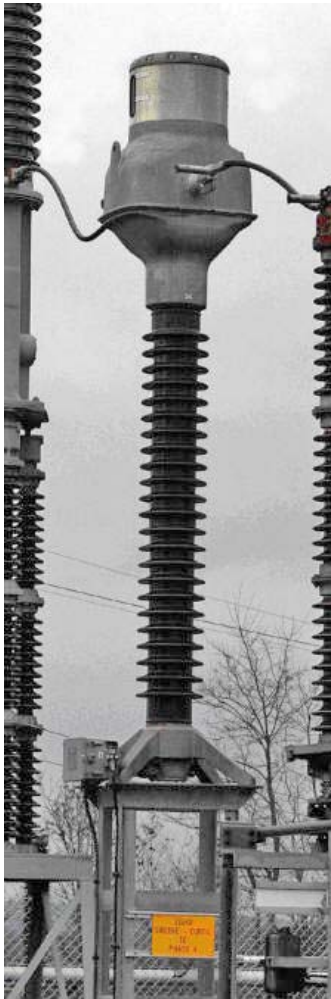


Figure 34

Les transformateurs de courant sont utilisés pour ramener à une valeur facilement mesurable les courants intenses des lignes à haute ou à basse tension. Ils servent également à isoler les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension (Figure 34). Le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne dont on veut mesurer l'intensité. Ces transformateurs sont employés seulement à des fins de mesure et de protection, donc leur puissance est faible, de l'ordre de 15 à 200 VA. Le courant nominal secondaire est généralement compris entre 1 et 5 A.

L'emploi des transformateurs de courant sur les lignes à haute tension est indispensable pour des raisons de sécurité. Une ligne à 200 kV peut n'être parcourue que par une intensité de 40 A parfaitement mesurable par un ampèremètre de 0-50 A ; mais personne ne pourrait approcher l'instrument sans subir une électrisation fatale. Il est essentiel que l'instrument soit isolé de la haute tension au moyen d'un transformateur (Figure 35).

Comme dans le cas d'un transformateur de tension, on doit toujours raccorder un des fils secondaires à la masse.

Le transformateur de courant est court-circuité par un ampèremètre. Comme, en général $I_2 \ll I_1$, il faut : $n_2 \gg n_1$. Si $Z_{\text{ampèremètre}}$ est l'impédance de l'ampèremètre, l'impédance ramenée dans le circuit

principal, $Z_{1 \text{ ramenée}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot Z_{\text{ampèremètre}}$, est très faible et n'entraîne

qu'une très faible chute de tension dans le primaire du TI.

On ne doit jamais ouvrir le secondaire d'un TI lorsque le primaire est alimenté. S'il est nécessaire de retirer un instrument raccordé au secondaire, il faut auparavant mettre le secondaire en court-circuit et ensuite retirer l'instrument, ou encore, ce qui est souvent plus facile à réaliser, court-circuiter le primaire.

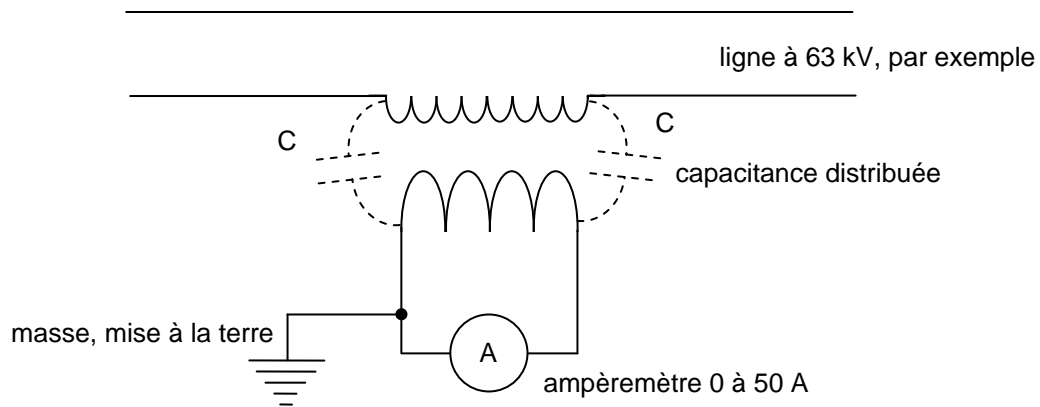


Figure 35

Si on ouvre le circuit secondaire d'un TI, le courant dans le primaire continue à circuler, inchangé, car celui-ci ne dépend que de la charge du réseau. Les ampères-tours du primaire ne sont plus compensés par ceux du secondaire, il se produit une saturation du circuit magnétique.

La Figure 36 montre que lorsque le courant I_1 primaire croît et décroît pendant la première alternance, le flux croît et décroît également, mais il demeure constant, au niveau de saturation ϕ_S pendant quasiment toute l'alternance. Le même phénomène se produit lors de l'alternance négative.

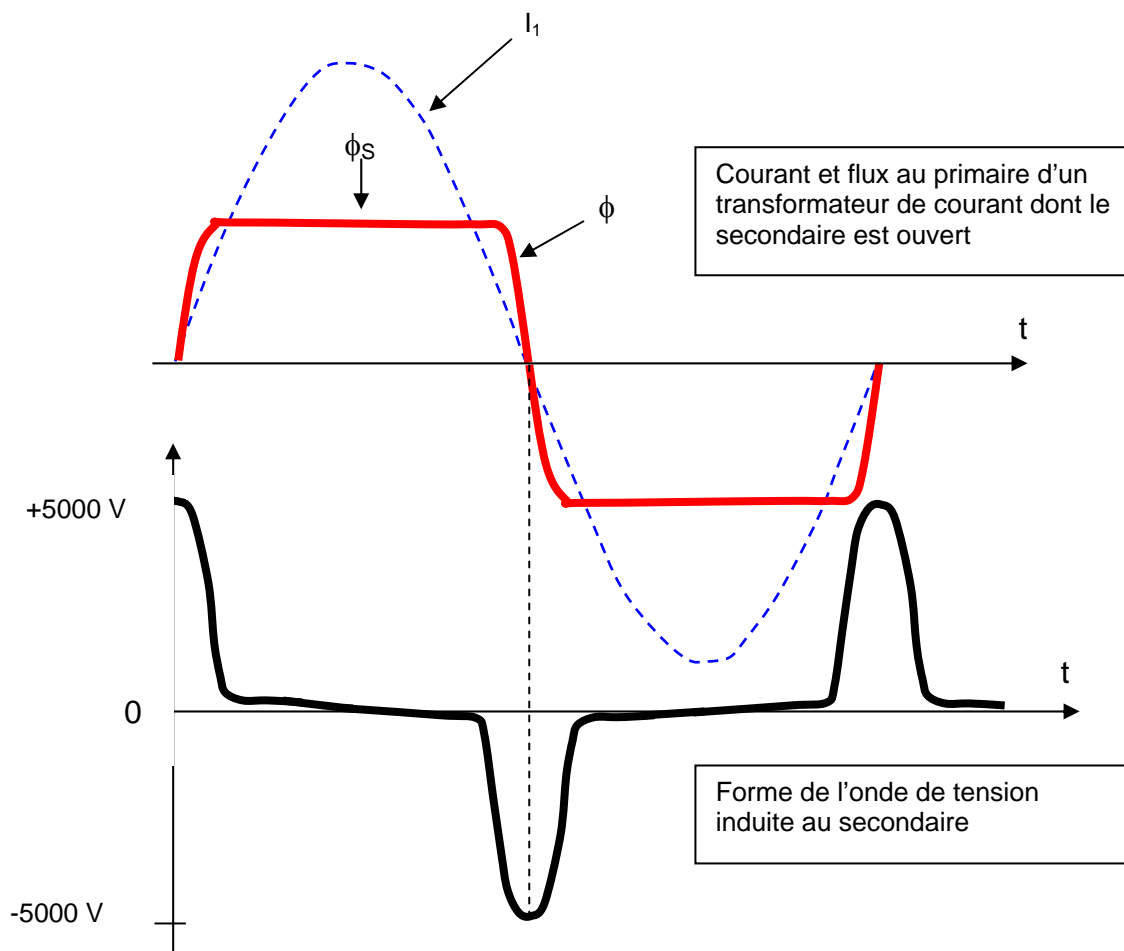


Figure 36

Lors des intervalles de temps où le flux est saturé, la tension induite est très faible car $\frac{d\phi}{dt}$ est très faible. Cependant, autour des passages de la tension par 0, le $\frac{d\phi}{dt}$ est très important, ce qui peut produire aux bornes du secondaire des tensions dont le maximum peut atteindre quelques milliers de volts, assez élevées en tous les cas pour provoquer des chocs électriques dangereux.

7. Transformateurs triphasés

On utilise des transformateurs triphasés pour élever ou abaisser la tension des lignes triphasées de transport de l'énergie électrique en basse fréquence (50 ou 60 Hz).

7.1. Principe

On peut transformer la tension d'un système de distribution triphasé à l'aide de trois transformateurs monophasés identiques comme l'indique la Figure 37.

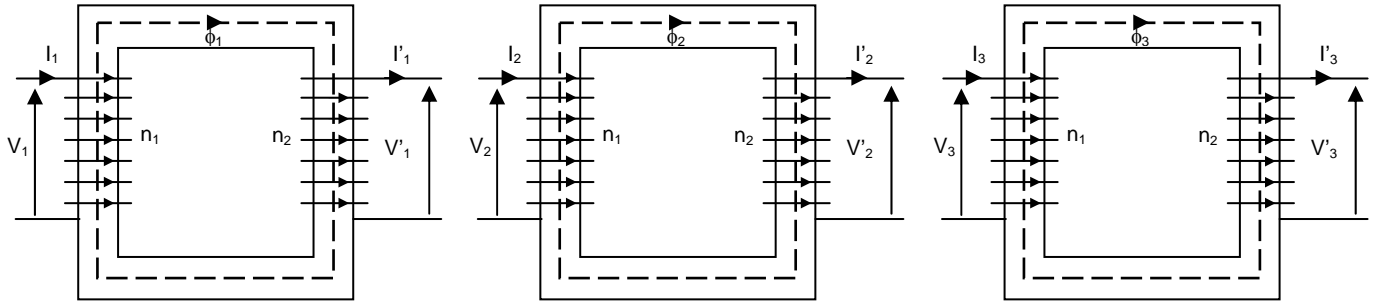


Figure 37

Les primaires de ces transformateurs seront alors groupés :

- soit en étoile et donc alimentés par les tensions simples ;
- soit en triangle et donc alimentés par les tensions composées.

De la même façon, les bobinages secondaires pourront être couplés en étoile ou en triangle. Dans cette disposition, les flux magnétiques ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , correspondant à des circuits magnétiques totalement distincts, sont complètement indépendants. Par opposition au système suivant, on dit qu'il s'agit d'un transformateur triphasé à **flux libre**.

En supposant que les transformateurs précédents soient parfaits et en désignant par $m = \frac{n_2}{n_1}$ leur rapport de transformation, on obtient, avec les orientations de la Figure 37, les équations de fonctionnement :

$$\begin{cases} V'_1 = mV_1 & I'_1 = mI_1 & v_1 = n_1 \frac{d\phi_1}{dt} \\ V'_2 = mV_2 & I'_2 = mI_2 & v_2 = n_1 \frac{d\phi_2}{dt} \\ V'_3 = mV_3 & I'_3 = mI_3 & v_3 = n_1 \frac{d\phi_3}{dt} \end{cases} \quad (1.43)$$

Les tensions primaires (V_1 , V_2 , V_3) et secondaires (V'_1 , V'_2 , V'_3) sont des tensions simples ou composées suivant le mode de couplage des phases. De la même façon, les courants (I_1 , I_2 , I_3) et (I'_1 , I'_2 , I'_3) représentent des courants de ligne ou des courants dans les dipôles.

Les flux magnétiques ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 dans les circuits magnétiques des transformateurs sont imposées par les tensions d'alimentation primaire et sont donc eux aussi équilibrés : leur somme vectorielle ou complexe est nulle à chaque instant.

On peut donc à priori réunir les trois transformateurs en un seul comportant trois colonnes. Chacune de ces colonnes porte un bobinage primaire et un bobinage secondaire comme cela est représenté sur le schéma de principe de la Figure 38.

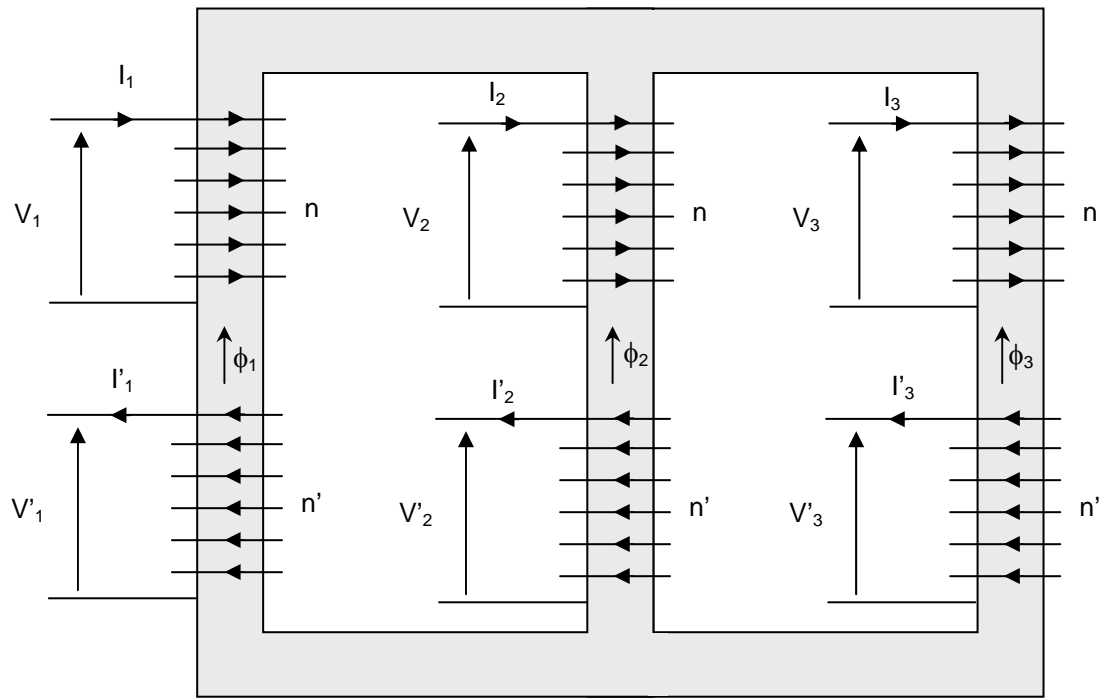


Figure 38

7.2. Etat magnétique

Les flux dans les trois colonnes du transformateur sont imposés par les tensions d'alimentation des bobinages primaires comme l'indiquent les équations ci-dessous :

$$v_1 = n \cdot \frac{d\phi_1}{dt} \quad v_2 = n \cdot \frac{d\phi_2}{dt} \quad v_3 = n \cdot \frac{d\phi_3}{dt} \quad (1.44)$$

Si les tensions sont équilibrées, les flux le sont aussi et leur somme est nulle. Autrement, un déséquilibre des tensions primaires se traduit par un déséquilibre des flux dont la somme, désignée ici par ϕ_s peut alors être non nulle :

$$\underline{\phi_1} + \underline{\phi_2} + \underline{\phi_3} + \underline{\phi_s} \neq 0 \quad (1.45)$$

Pour se refermer, les lignes de champ magnétique constituant le flux ϕ_s empruntent un trajet de réluctance \mathcal{R}_s symbolisé sur la Figure 39 .

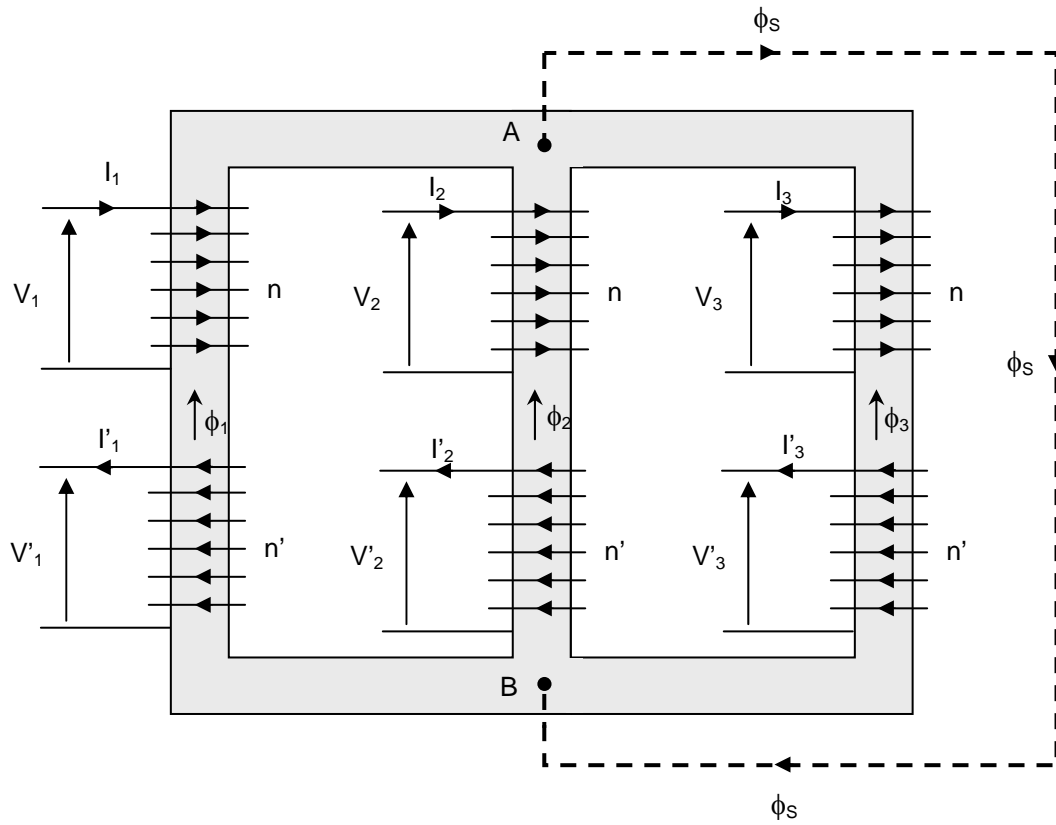


Figure 39

La différence de potentiel magnétique $v_A - v_B$ entre les points A et B du circuit magnétique est donnée par :

$$\begin{aligned}
 v_A - v_B &= ni_1 - n'i_2 - \mathcal{R}_1 \phi_1 \\
 v_A - v_B &= ni_2 - n'i_2 - \mathcal{R}_2 \phi_2 \\
 v_A - v_B &= ni_3 - n'i_3 - \mathcal{R}_3 \phi_3 \\
 v_A - v_B &= \mathcal{R}_s \phi_s
 \end{aligned} \quad (1.46)$$

Si les tensions primaires et donc les flux, sont équilibrés, $\phi_s = 0$, la différence de potentiel magnétique $v_A - v_B$ est donc nulle.

Puisque, à vide, les courants secondaires sont nuls, les courants à vide du transformateur sont alors donnés par :

$$\begin{aligned}
 ni_{10} &= \mathcal{R}_1 \phi_1 \\
 ni_{20} &= \mathcal{R}_2 \phi_2 \\
 ni_{30} &= \mathcal{R}_3 \phi_3
 \end{aligned} \quad (1.47)$$

La structure du circuit magnétique de la Figure 39 n'est pas symétrique, les flux ϕ_1 et ϕ_2 parcourent des longueurs supérieures à celle parcourue par ϕ_3 entre les points A et B. Il en résulte que les réluctances des trois colonnes ne sont pas identiques, créant ainsi un déséquilibre des courants à vide.

Afin de réduire ce déséquilibre, il faudrait donner une section plus faible à la colonne centrale.

Lorsque la différence de potentiel magnétique $v_A - v_B$ n'est pas nulle, c'est le produit $\mathcal{R}_s \phi_s$ qui est alors imposé. On distingue alors deux types de constructions des transformateurs :

- les transformateurs à flux liés. Ils ne comportent que 3 colonnes, voir Figure 40, le flux ϕ_s se referme au moins en partie dans l'air en empruntant des chemins de réluctance élevée. Dans le produit $\mathcal{R}_s \phi_s$, c'est \mathcal{R}_s qui est élevée, le flux ϕ_s reste très faible, on peut considérer que $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \phi_s \approx 0$;
- les transformateurs à flux libres : on ajoute une quatrième voire une cinquième colonne au circuit magnétique du transformateur, voir Figure 41. Ces colonnes canalisent le flux par un chemin de réluctance très faible. Ce flux peut devenir important : il n'est plus imposé par la structure du transformateur.



Figure 40

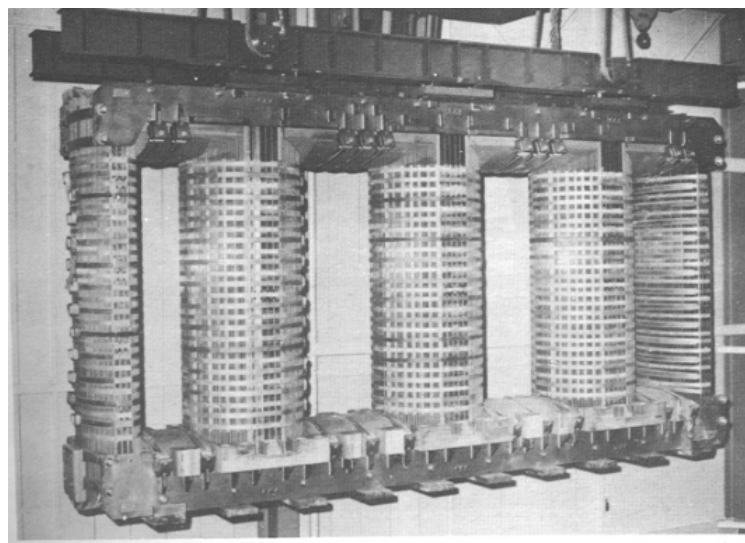


Figure 41

7.3. Modes de couplage des enroulements

En plus des couplages habituels étoile et triangle, on trouve le couplage « zigzag ». Dans ce couplage, l'enroulement zigzag (primaire ou secondaire) est divisé en deux demi-enroulements identiques. Chaque phase est alors constituée par la mise en série de deux demi-bobines prises sur des colonnes voisines. Les bornes homologues des bobinages étant repérées d'une manière identique sur les 3 colonnes, la mise en série est telle que chaque phase est constituée de 2 enroulements pris en sens inverse l'un de l'autre comme l'indique la Figure 42.

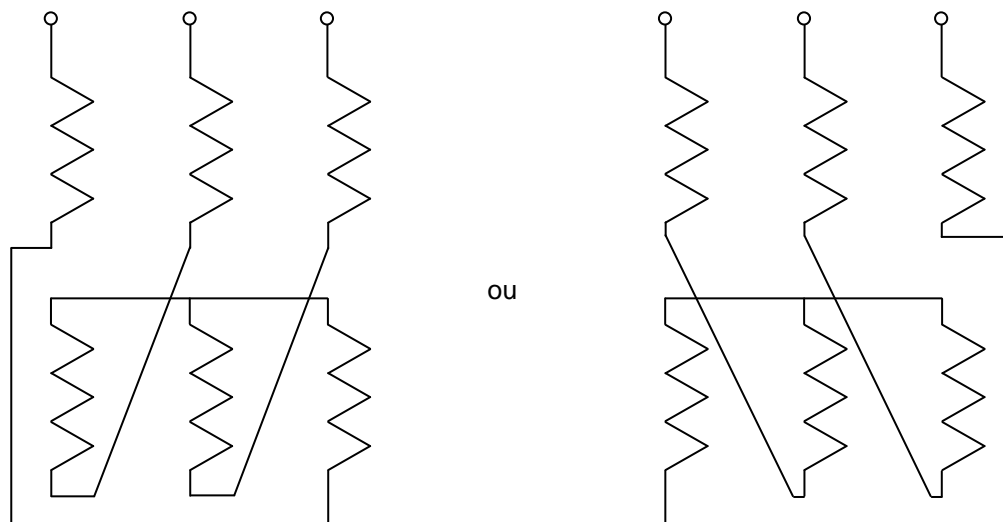


Figure 42

Trois couplages des enroulements sont donc possibles, chacun d'eux est désigné par une lettre :

- y pour le couplage étoile ;
- d pour le couplage triangle ;
- z pour le couplage zigzag.

Pour les transformateurs monophasés, les tensions primaires et secondaires ne peuvent être qu'en phase ou en opposition de phase. Il en va autrement pour les transformateurs triphasés dont le déphasage entre les tensions primaires et secondaires dépendra notamment du couplage des enroulements. Il est très important de connaître ce déphasage lorsque l'on veut faire fonctionner des transformateurs triphasés en parallèle.

7.3.1. Mise en parallèle de deux transformateurs :

Les transformateurs sont des machines statiques dont la durée de vie est très longue, couramment 30 ou 40 ans et plus. Supposons que l'on construise une usine dont l'ensemble des récepteurs absorbe une puissance apparente de 1 MVA. On installera un transformateur d'alimentation de puissance apparente légèrement supérieure à 1 MVA. Si l'usine décide de s'agrandir et que l'ensemble des récepteurs doivent absorber, mettons, 3 MVA, deux solutions se présentent :

- Une première solution est de débrancher le transformateur existant et de le remplacer par un transformateur de puissance un peu supérieure à 3 MVA, c'est une solution « chère ».
- Une deuxième solution consiste à acheter un transformateur de puissance apparente un peu supérieure à 2 MVA et à le placer en parallèle sur le transformateur déjà en place. Cette solution est moins onéreuse.

Lorsque la puissance demandée par une installation subit de grandes fluctuations, la prise en considération du rendement du transformateur peut conduire à installer plusieurs transformateurs en parallèle que l'on connectera en essayant de fonctionner au point de rendement maximum.

Mais, pour que l'on puisse coupler à vide 2 transfos triphasés, il faut que leurs diagrammes vectoriels de tension coïncident, il faut que les deux transformateurs possèdent le :

- Même rapport de transformation
- Même ordre de succession des phases
- Même décalage angulaire, ils doivent donc appartenir au même groupe.

De plus, pour avoir une répartition correcte des puissances entre les 2 transfos en charge, il faut aussi qu'ils aient la même chute de tension donc pratiquement la même tension de court-circuit.

7.3.2. Rapport de transformation en triphasé :

Le rapport de transformation vu en monophasé est ici appelé rapport de transformation interne (noté

$m = \frac{N_2}{N_1}$). Il est égal au rapport du nombre de spires d'une bobine du secondaire sur le nombre de

spires de la bobine homologue primaire, ou du rapport de la tension apparaissant aux bornes d'une bobine secondaire sur la tension aux bornes de la bobine homologue primaire.

Le rapport de transformation ou rapport de transformation externe est égal au rapport de la tension composée secondaire sur la tension composée primaire. On le note M.

$$M = \frac{U_2}{U_1}$$

7.3.3. Détermination du déphasage entre une tension primaire et une tension secondaire homologue

Nous appellerons tensions homologues deux tensions de même nature (simple ou composée) relatives aux mêmes phases, l'une côté haute tension, l'autre du côté basse tension.

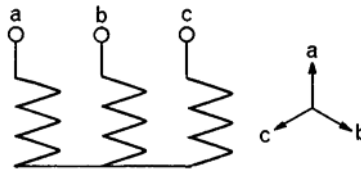
En considérant le transformateur alimenté par un système de tensions triphasé équilibré direct, le déphasage sera mesuré par l'avance d'une tension côté basse tension sur son homologue côté haute tension.

7.3.4. Etablissement des diagrammes de vecteurs de Fresnel associés aux tensions

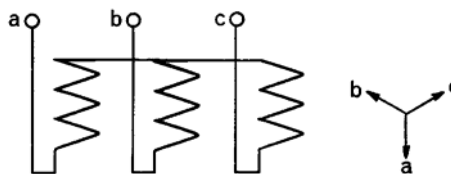
1° Raisonnons par exemple sur l'enroulement basse tension. Nous désignons ses trois bornes par a, b, c (éventuellement encore n s'il y a un neutre). Dans cette première partie, nous convenons de représenter verticalement sur la feuille la tension entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure de la bobine placée sur le noyau 1 (le plus à gauche). La tension sera en retard de 120° sur celle-ci dans la bobine placée sur le noyau médian et de 240° entre les bornes homologues de la bobine placée sur le noyau 3 (noyau le plus à droite). Examinons comment se présente le diagramme de temps des tensions suivant le mode de connexion des enroulements.

2° Ceux-ci peuvent être groupés en *étoile* (notation : y) :

a) la connexion neutre reliant les bornes inférieures homologues de trois bobines ;

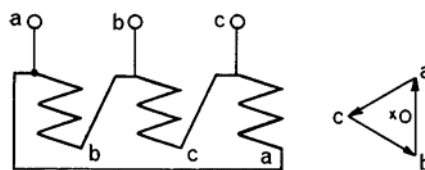


b) la connexion neutre reliant les trois bornes homologues supérieures ce qui entraîne une rotation de 180° du diagramme de temps.

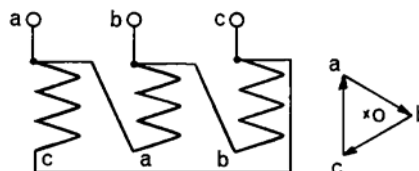


3° Les trois bobines peuvent aussi être associées en *triangle* (notation d) :

a) avec connexion de liaison montant de gauche à droite, ba étant représenté, verticalement, cb en retard de 120° , ac de 240° ; on dispose les trois vecteurs en triangle;



b) avec connexion de liaison descendant de gauche à droite.



4° Sur la basse tension des réseaux de distribution déséquilibrés quatre fils, on peut utiliser la connexion zig-zag. Dans celle-ci chacune des trois bobines basse tension est divisée en deux moitiés. Une phase est alors constituée par la liaison en série de deux demi-bobines placées sur deux noyaux différents et prises en sens inverse (en allant de la borne d'entrée de la phase à la borne de sortie, on en parcourt une de bas en haut et l'autre de haut en bas). Dans ces conditions, les deux forces électromotrices qui s'ajoutent sont déphasées entre elles de 60° . La force électromotrice résultante d'une phase n'est que $\sqrt{3}$ fois celle d'une demi bobine. Il en résulte que pour obtenir la même tension, il faudra augmenter le nombre de spires BT dans le rapport $2/\sqrt{3}$ et comme elles resteront parcourues par le même courant, le poids de cuivre BT sera ainsi augmenté dans le même rapport. En contrepartie, une charge monophasée BT se trouve répartie sur deux noyaux et intéresse donc deux phases de la HT, ce qui atténuera le déséquilibre sur ce réseau.

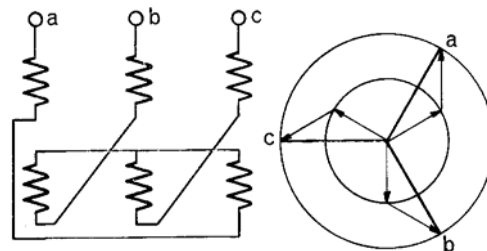
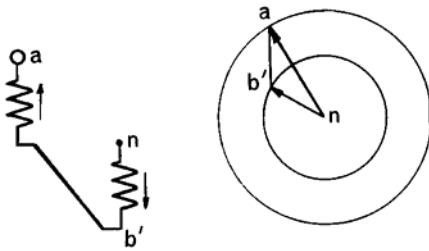


FIG.1 - Schéma (à gauche) et diagramme de temps correspondant (à droite) d'un enroulement en zig-zag.

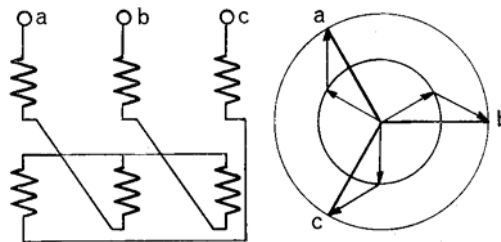


FIG. 2. - Schéma et diagramme de temps correspondant (à droite) d'un enroulement en Zig-Zag.

Pour la même position du neutre que sur la figure 1, les liaisons entre demi-bobines descendent cette fois de gauche à droite. Pour les mêmes flux dans les noyaux, les vecteurs résultants ont tourné de 60° .

Les trois phases ainsi obtenues sont associées en étoile. A priori, on peut placer la connexion neutre reliant trois bornes homologues à quatre niveaux différents. Pour l'un d'eux (liaison des bornes supérieures des demi-bobines inférieures) les figures 1 et 2 représentent respectivement les schémas :

- a) avec connexion entre demi bobine montant de gauche à droite;
- b) avec connexion entre demi bobine descendant de gauche à droite.

On voit que le diagramme de temps des tensions de sortie correspondant tourne de 60° quand on passe d'un montage à l'autre.

Couplage d'un transformateur triphasé :

1° Les enroulements haute tension d'un transformateur peuvent être reliés en étoile (symbole Y) ou en triangle (D).

Les enroulements basse tension peuvent être montés en étoile (symbole y), en triangle (d) ou en Zig Zag (z).

L'association d'un mode de connexion de la haute tension avec un mode de connexion de la basse tension caractérise un couplage du transformateur (Yz par exemple).

2° Pour représenter le schéma d'un transformateur triphasé, on fait les conventions suivantes :

On note par :

- A, B, C les bornes de la haute tension,
- a, b, c les bornes de la basse tension.

Sur le couvercle les bornes homologues (bobines appartenant à une même colonne du circuit magnétique) sont en regard, la borne A étant à gauche d'un observateur placé devant le côté haute tension.

Pour représenter l'enroulement, on suppose l'observateur placé face aux connexions qu'il représente, soit du côté A, B, C quand il étudie la haute tension, soit du côté a, b, c, quand il étudie la basse tension.

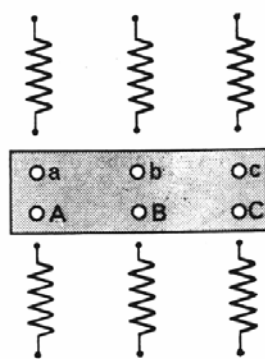


FIG. 3. - REPRÉSENTATION CONVENTIONNELLE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ (le grisé sur le couvercle a été ajouté dans un but pédagogique; il doit évidemment être supprimé sur un schéma normalisé). A, B, C sont les bornes haute tension, a, b, c, sont les bornes basse tension. Chaque enroulement est supposé rabattu sur le plan du couvercle de sorte que, si on suppose le transformateur vertical, sur chaque bobine la partie la plus éloignée de la borne correspondante est l'extrémité inférieure. Nous supposons toujours les bobines haute et basse tensions enroulées dans le même sens.

L'ensemble (fig. 3 ci-dessus) se présente donc comme un rabattement sur le plan du couvercle, les parties supérieures des enroulements se trouvant au voisinage des bornes, les parties inférieures à l'opposé.

Nous supposons toujours dans nos schémas que les enroulements sont bobinés dans le même sens.

3° Représentons par exemple sous cette forme le schéma d'un transformateur étoile-étoile (Y, y) et traçons en faisant coïncider leurs centres les diagrammes de temps des enroulements haute et basse tension. Nous obtenons le diagramme Vectoriel du transformateur :

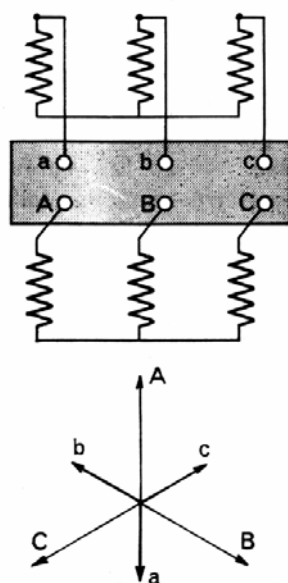


FIG. 4. - COUPLAGE Yy6 : Y car la haute tension est en étoile; y car la basse tension est en étoile; 6 (indice horaire) car sur une montre dont la grande aiguille OA serait sur midi, la petite aiguille Oa indiquerait 6 heures.

L'angle au centre $\alpha = (\vec{Oa}, \vec{OA})$ qui caractérise le déphasage des deux réseaux s'appelle le déplacement angulaire. Il vaut ici 180° (naturellement il suffirait de relier b à la ligne R, c à la ligne S, a à la ligne T du réseau basse tension pour que le déphasage des deux réseaux soit de 60° . Les décalages angulaires sont donc définis à 120° près).

Dans la représentation internationale, le couplage précédent sera noté Yy 6.

Le chiffre 6 est l'indice **horaire**. Il caractérise le déplacement angulaire et signifie que si on considère \vec{OA} comme la grande aiguille d'une montre, \vec{Oa} comme la petite aiguille d'une montre, cette montre indiquerait ici 6 heures. On trace tous les diagrammes vectoriels de façon que \vec{OA} soit dirigé verticalement vers le haut, c'est-à-dire que la grande aiguille soit sur midi.

Si, sur le schéma précédent, la connexion neutre côté basse tension se trouvait aussi à la partie inférieure des bobines, on aurait un transformateur à déplacement angulaire nul Yy 0.

4° Suivant leur déplacement angulaire, on peut ainsi classer les transformateurs triphasés en quatre groupes :

A) Groupe de déplacement angulaire nul :

$$\alpha = 0 \left(\text{à } \frac{2\pi}{3} k \text{ près} \right) \text{ indice horaire } 0 \text{ (à } 4k \text{ près)}$$

B) Groupe de déplacement angulaire 180° (ou 60°)

indice horaire : 6 (ou 2, ou 10, soit $6 \pm 4h$)

C) Groupe de déplacement angulaire $+30^\circ$

indice horaire : 1 (ou 5, ou 9, soit $1 \pm 4h$)

D) Groupe de déplacement angulaire -30° (ou $+330^\circ$)

indice horaire : 11 (ou 7, ou 3, soit $11 \pm 4h$)

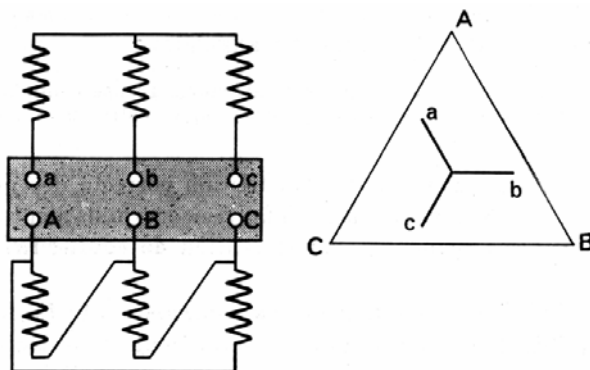


FIG. 5. - Schéma et diagramme vectoriel d'un transformateur triphasé couplage Dy11. La lettre D indique que la haute tension est en triangle, la lettre y que la basse tension est en étoile. 11 est l'indice horaire. C'est l'heure qu'indiquerait la petite aiguille Oa d'une montre dont la grande aiguille OA serait sur midi. Le déplacement angulaire correspondant vaut :

$$(\vec{Oa}, \vec{OA}) = -30^\circ$$

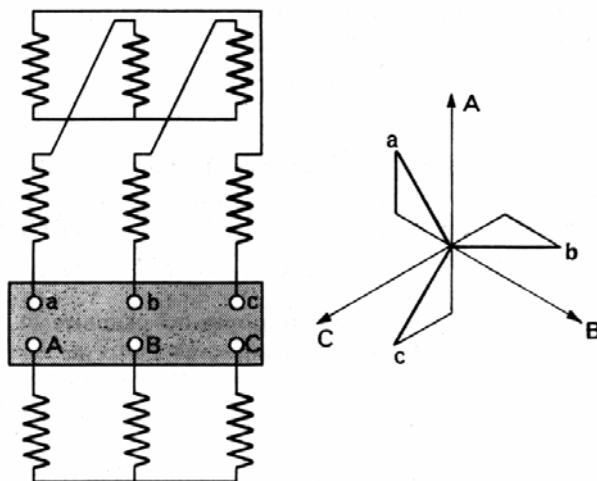


FIG. 6. - Schéma et diagramme vectoriel d'un transformateur triphasé couplage Yz 11,

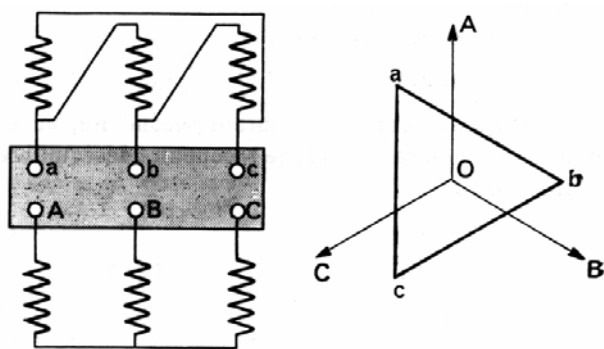


FIG. 7. - Schéma et diagramme vectoriel d'un transformateur triphasé couplage Yd 11.

Les couplages considérés comme normaux sont : Yy 0, Dy 11 (fig. 5), Yz 11 (fig. 6), Yd 11 (fig. 7).

5° Pour qu'on puisse coupler en parallèle à *vide* deux transformateurs triphasés, il faut que leurs diagrammes vectoriels coïncident, ce qui exige, outre le même rapport de transformation, le même ordre de succession des phases et le même décalage angulaire.

Ils doivent donc appartenir au même groupe (toutefois en inversant 2 phases au primaire et au secondaire, on peut coupler entre eux un transformateur du groupe C et un du groupe D).

Pour qu'on ait une répartition correcte des puissances entre les deux transformateurs *en charge*, il faut encore qu'ils aient la même chute de tension donc pratiquement la même tension de court-circuit.

Lorsque le couvercle du transformateur n'est pas représenté, on utilise des points ou des étoiles afin de représenter les entrées des enroulements. On connaît grâce à ces points ou étoiles le sens de l'enroulement dans une colonne. On peut alors établir une règle au niveau des déphasages entre le primaire et le secondaire sur une colonne :



Figure 8

Dans le cas de la figure ci-dessus n°8, on admettra que V_{an} sera en phase avec U_{AB} . On admet ainsi que si les deux pointes des flèches représentant les tensions sont sur les points, alors on considère que les tensions sont en phases l'une par rapport à l'autre (à condition bien sûr que les deux enroulements soient sur la même colonne).

Dans le cas de la figure ci-dessous n°9, on admettra que V_{an} est en opposition de phase avec U_{AB} :

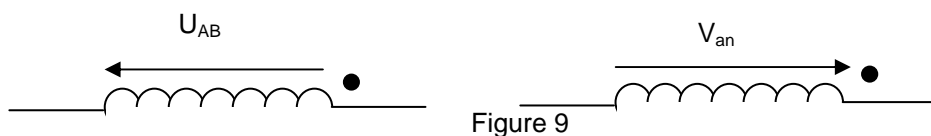


Figure 9

Exemple : Déterminez l'indice horaire du transformateur ci-dessous

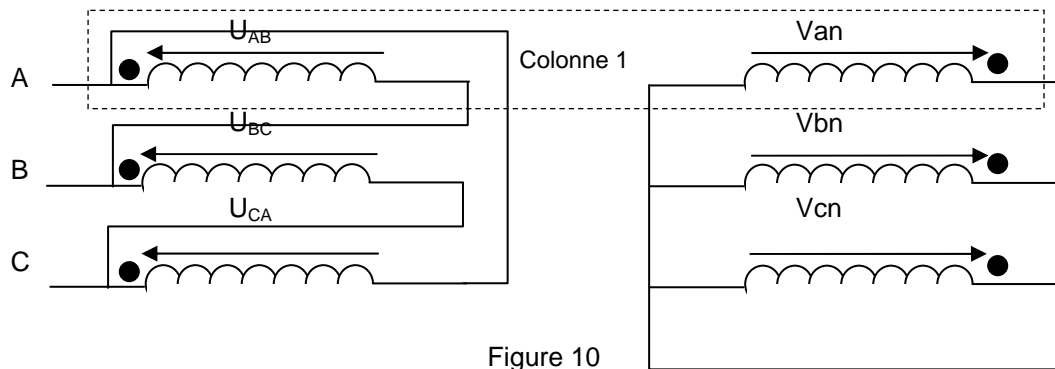


Figure 10

- 1- On trace les tensions des enroulements du primaire (ici ce sont des tensions composées).
- 2- On trace les tensions dans les enroulements du secondaire (phase ou opposition de phase selon les sens des flèches et l'emplacement des étoiles ou des points) en respectant les règles (ici dans notre cas Van en phase avec UAB, etc...)
- 3- On mesure le déphasage entre la tension simple du primaire et la tension simple du secondaire et ceci quelque soit le couple du primaire et du secondaire). Dans le cas présent, le déphasage est de 330° .
- 4- On donne alors l'indice horaire qui est $330/30 = 11$, ou bien on considère que la tension primaire est la grande aiguille d'une montre placée sur midi et on regarde quelle heure indique la petite aiguille qui est la tension secondaire homologue.

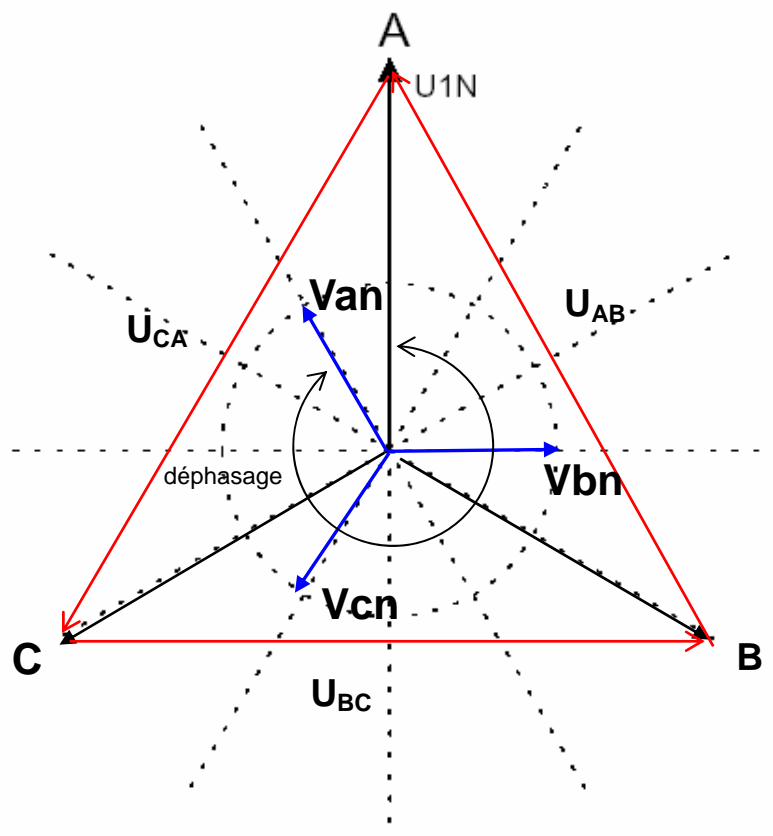


Figure 11

Déterminez l'indice horaire du transformateur suivant :

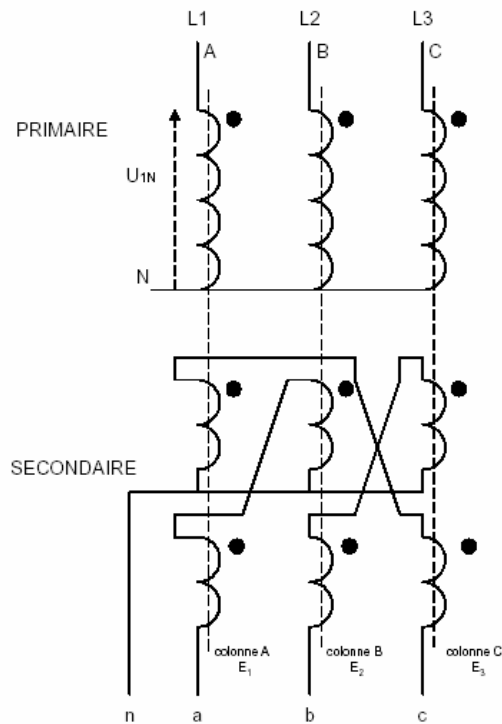


Figure 12

Solution :

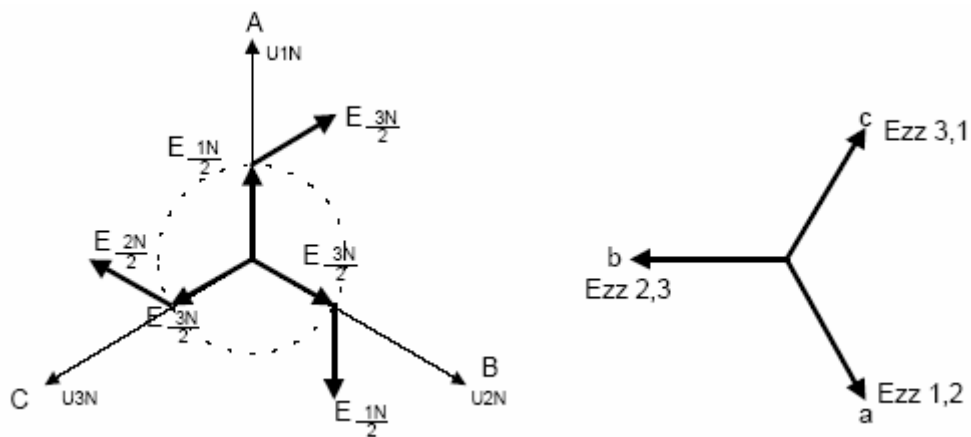


Figure 13

Couplage Yzn 5

Y : étoile au primaire

Z : zigzag au secondaire

n : neutre sorti au secondaire

5 : indice horaire 150° ou 5 heures

Application du déphasage éventuel créé par le transformateur : diminution des harmoniques créées par les onduleurs (cf figure 14)

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé. Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs.

Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés.

Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel.

La figure n°15 donne le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires. Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur.

Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle (voir la figure 16).

Dans le cas de la mise en parallèle, les tensions instantanées délivrées par chacun des deux redresseurs n'étant pas égales (puisqu'elles sont décalées de 30°), il est nécessaire de rajouter une inductance à point milieu pour conserver un débit continu pour chaque redresseur. En l'absence de cette inductance, la conduction serait assurée à chaque instant par celui des redresseurs délivrant la tension la plus élevée.

Il existe plusieurs variantes du schéma de la figure 14 (cf. fig. 17) qui conduisent au même résultat au niveau des harmoniques.

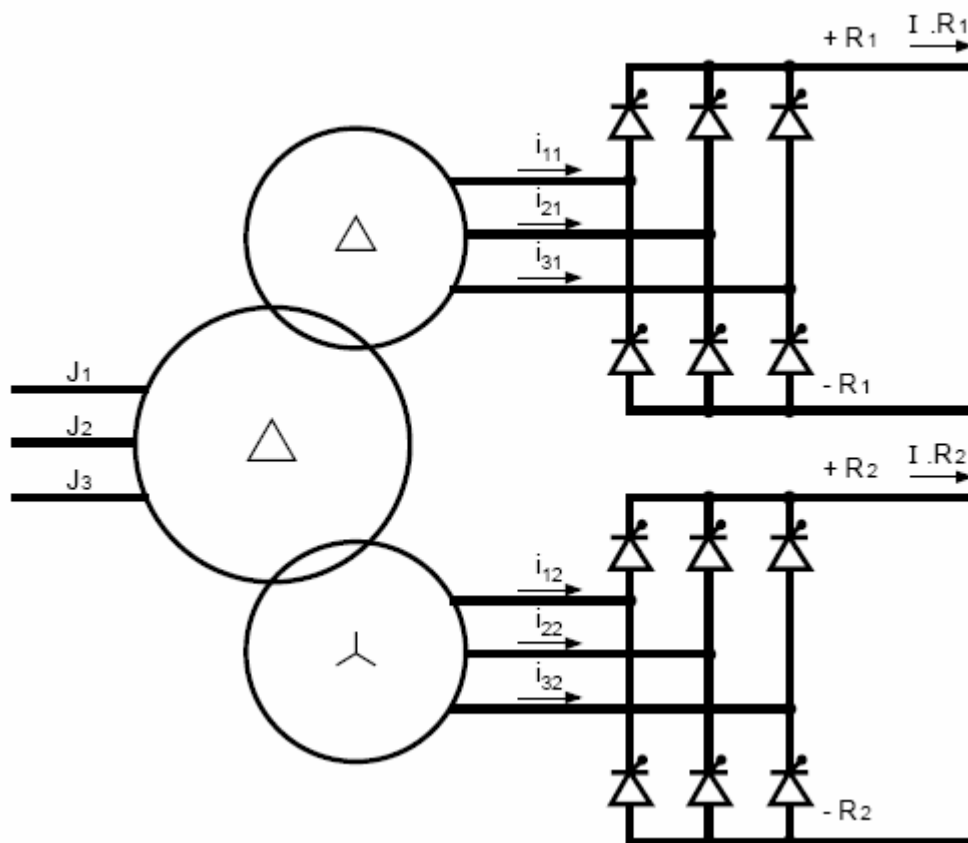


Figure 14 Schéma de principe d'un redresseur à deux ponts décalés.

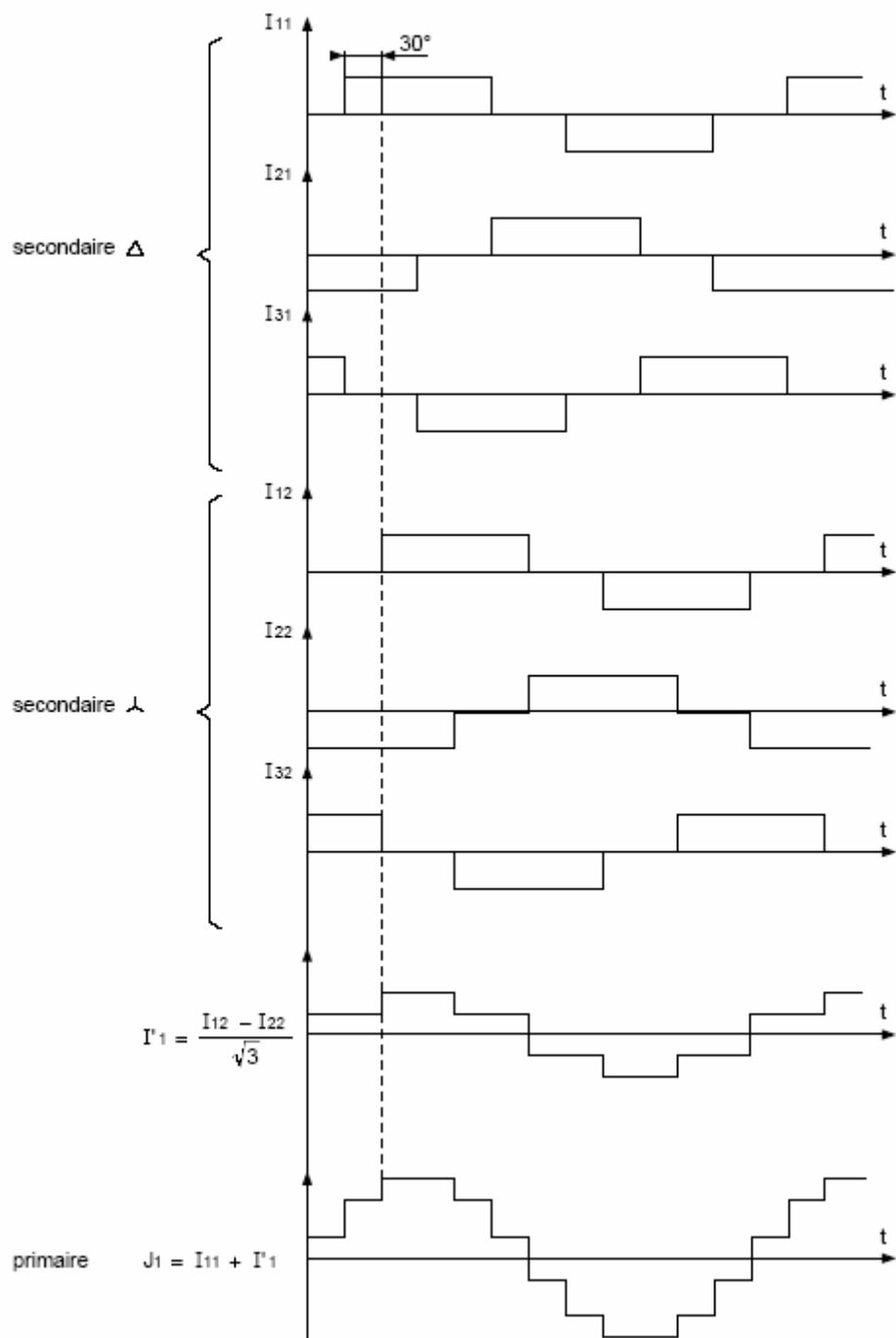


Figure 15 Forme des courants absorbés par le redresseur et résultante au primaire du transformateur à deux secondaires.

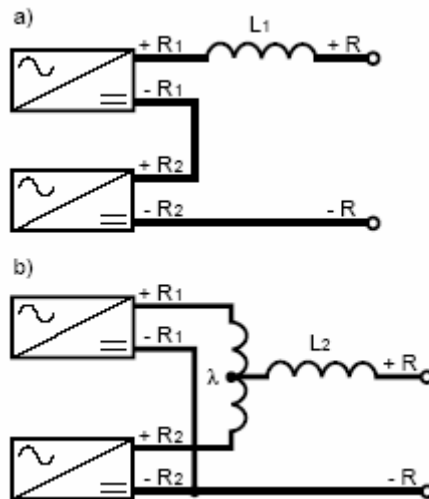


Figure 16 Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

Taux de distorsion en courant

Avec l'hypothèse d'une impédance amont au redresseur nulle et d'un courant continu parfaitement lissé, la valeur efficace de chaque harmonique de courant est de la forme : $I_n = I_1/n$ avec $n = 12k \pm 1$.

Le taux de distorsion théorique est donc :
$$D\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{12k+1}^2) + (I_{12k-1}^2)}}{I_1} \cdot 100$$

soit $D \approx 15\%$ ce qui représente la moitié de la valeur obtenue avec un seul redresseur.

Taux de distorsion de la tension

Le taux de distorsion de la tension dépend de l'impédance de source. Pour une impédance de source très faible (somme des impédances amont au(x) redresseur(s)), le rapport entre les taux de distorsion

obtenus avec le montage à deux redresseurs et celui à un seul redresseur est de : $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7$.

Pour une impédance de source plus élevée, le gain est plus important car les harmoniques de rangs élevés diminuent rapidement lorsque l'impédance de source augmente.

Il reste toutefois modeste et en pratique un rapport de 0,5 à l'avantage du double pont, est à retenir.

A titre d'exemple : pour un angle de retard $\theta = 30$ degrés, le rapport entre les deux taux de distorsion vaut 0,66 pour $U_{cc} = 8\%$ et 0,55 pour $U_{cc} = 16\%$; pour $\theta = 0$ les rapports sont respectivement de 0,53 et 0,37.

Ce rapport entre les taux de distorsion ne tient pas compte de l'inductance du système déphaseur.

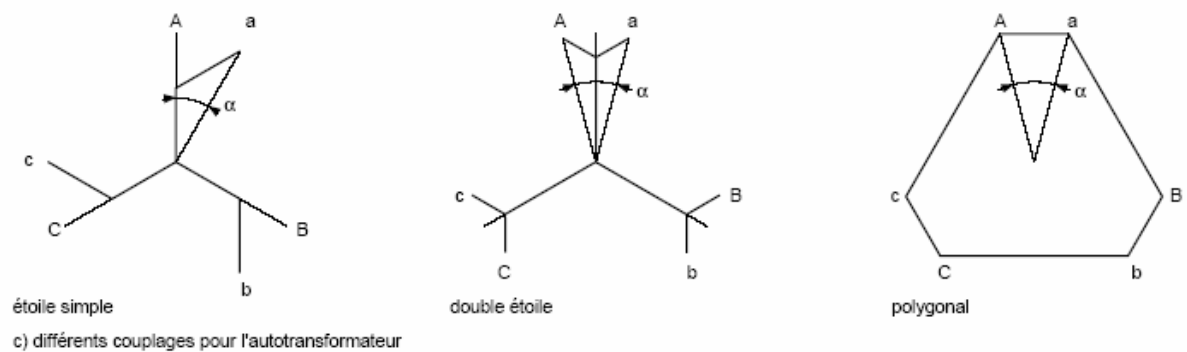
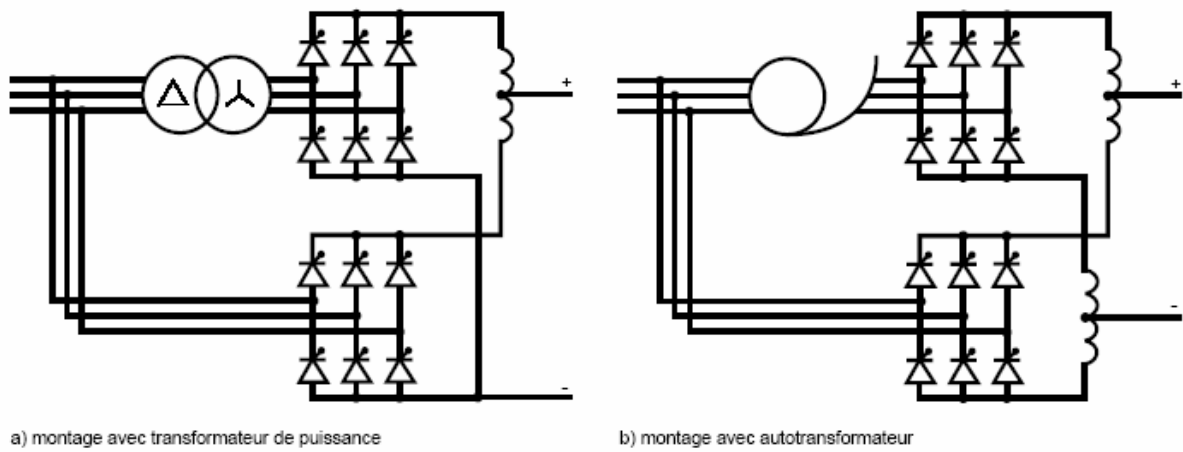


Figure 17 montages permettant d'obtenir un déphasage de 30° et les différents couplages de l'autotransformateur.

Redresseur à plus de deux ponts (cf figure 18)

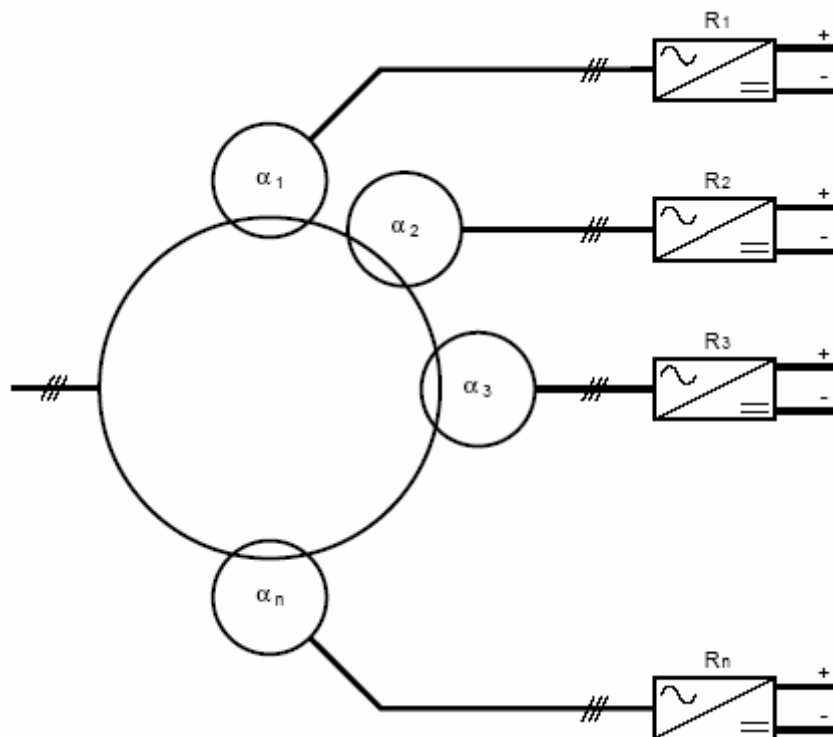


Figure 18 exemple de n redresseurs.

L'idée de base est ici d'augmenter le nombre de secondaires du transformateur avec des déphasages relatifs dépendant du nombre de secondaires retenus dans le but d'éliminer d'autres harmoniques de courant.

Montage avec 3 redresseurs

Pour ce type de montage, les déphasages doivent être tels que :

$$\alpha_1 = 0 \text{ degré},$$

$$\alpha_2 = 20 \text{ degrés},$$

$$\alpha_3 = 40 \text{ degrés}.$$

Dans ce cas les seuls harmoniques restants sont de rang $6k \pm 1$ avec k multiple de 3, soit $18k \pm 1$.

Les premiers harmoniques de courant sont donc les harmoniques 17 et 19 et les suivants 35 et 37.

Montage avec 4 redresseurs

Dans ce cas, les déphasages sont les suivants :

$$\alpha_1 = 0 \text{ degré},$$

$$\alpha_2 = 15 \text{ degrés},$$

$$\alpha_3 = 30 \text{ degrés},$$

$$\alpha_4 = 45 \text{ degrés}.$$

Les seuls harmoniques restants sont alors de rang $24k \pm 1$.

Les premiers harmoniques sont donc les harmoniques 23 et 25 et les suivants 47 et 49.

Ces montages sont intéressants dans la mesure où ils permettent d'obtenir des taux de distorsion en courant et en tension relativement faibles. Ils ont l'inconvénient d'être complexes et coûteux et, en conséquence, leur utilisation est réservée aux équipements de forte puissance.

A titre d'exemple, l'électrolyse de l'aluminium, qui utilise le courant continu avec des puissances de plusieurs MW, fait appel à des montages qui ont jusqu'à 72 phases !

Exercices :

Transformateur parfait :

1) On désire alimenter sous une tension de 220 V un récepteur monophasé absorbant 50 A avec un facteur de puissance de 0,6 arriéré (inductif). Ce récepteur est situé à l'extrémité d'une ligne bifilaire de 40 km de longueur dont chaque conducteur en cuivre de résistivité $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, possède une section de 1 cm^2 . On utilise deux transformateurs parfaits identiques T1 et T2; T1 est utilisé en élévateur de tension et T2 en abaisseur. Le rapport des nombres de spires est de 25.

Sous quelle tension faut-il alimenter le transformateur T1?

Quelle serait cette tension si on n'utilisait pas de transformateurs ?

Solution : $U_{11}=220,6 \text{ V}$ (tenir compte du déphasage du courant et donc du déphasage de $U = RI$ lors de l'addition des tensions primaire du transfo abaisseur et d.d.p. aux bornes de la résistance de la ligne).

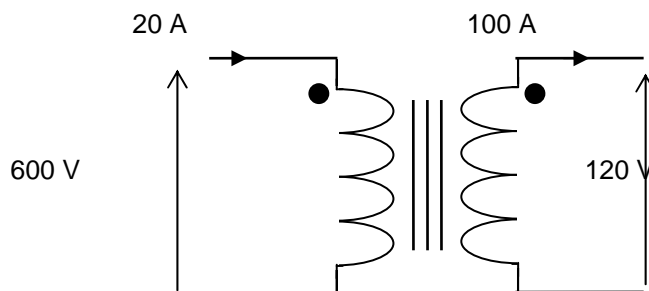
Sans transformateur, U est de l'ordre de 800 V ! Cela empêcherait l'alimentation de récepteur de tension nominale 220 V au voisinage immédiat de l'alternateur produisant la tension de 800 V. De plus les pertes lors du transport dépasseraient la puissance utile transportée !

2) Autotransformateur :

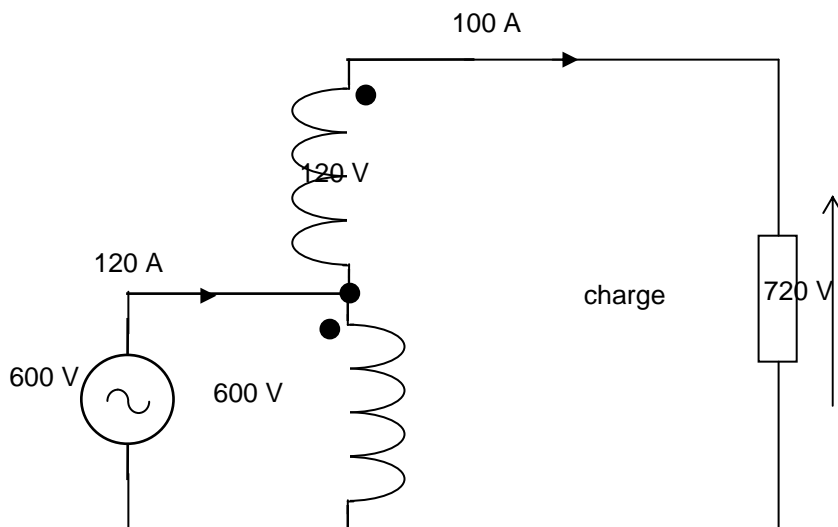
Soit un transformateur monophasé (à deux enroulements) 60 Hz, 12 kVA, 600V/120 V que l'on peut considérer comme parfait. On utilise les deux enroulements de ce transformateur pour câbler un transformateur de rapport 600V / 720V.

Donner le schéma de câblage et la capacité (en kVA) de l'autotransformateur.

Solution : Dans les conditions nominales de fonctionnement, le transformateur monophasé à 2 enroulements fonctionne de la manière suivante :



Le schéma de câblage de l'autotransformateur de rapport 600V / 720V est le suivant :



La puissance apparente de l'autotransformateur est dès lors égale à :
 $720 \text{ V} \times 100 \text{ A} = 72000 \text{ VA}$ (si l'on observe les choses du côté récepteur) ou $600 \text{ V} \times 120 \text{ A} = 72000 \text{ VA}$ (si l'on observe les choses du côté alimentation), évidemment les deux valeurs sont identiques

3) On veut réaliser un transformateur monophasé 5000/200 volts, 50 Hz et on désire que la section du circuit magnétique soit de 1 dm^2 .

D'autre part, l'induction maximale dans le circuit magnétique ne doit pas dépasser 1,5 tesla.

- * Quels doivent être les nombres de spires au primaire et au secondaire?
- * Que deviendrait ce résultat si la fréquence d'utilisation était de 60 Hz au lieu de 50?

Solution : $N_1=1500$ spires, $N_2=60$ spires en 50 Hz; en 60 Hz, $N_1=1250$ spires.

Transformateur réel :

4) Un transformateur monophasé a été soumis à un essai à vide :

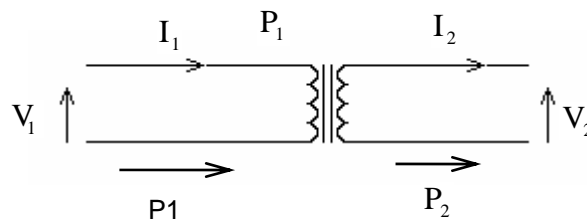
$$I_2 = 0 \text{ A}, V_1 = 220 \text{ V}, V_2 = 110 \text{ V}, I_1 = 0,3 \text{ A}, P_1 = 10 \text{ W}, f = 50 \text{ Hz}$$

L'enroulement primaire présente une résistance $R_1 = 8 \Omega$ et le secondaire, une résistance $R_2 = 2 \Omega$. On néglige les fuites magnétiques.

a) Déterminer le facteur de puissance à vide, le courant magnétisant I_{10} , le courant I_F , la résistance R_F et l'inductance L_1 .

b) Le courant appelé par le secondaire étant $I_2=2 \text{ A}$, en phase avec la tension V_2 , calculer:

- * la tension V_2 obtenue, le primaire restant alimenté sous 220V.
- * le rendement du transformateur.



5) On considère un transformateur monophasé dont le rapport de transformation est $n_1 / n_2 = 23$.

L'impédance totale du transformateur ramenée au secondaire a un module de $1,33 \Omega$ et un argument de $70^\circ 30'$. Pour le fonctionnement considéré, les pertes fer doivent être de l'ordre de 70 watts.

Supposons que le secondaire débite 3 kVA sous une tension de 200 V avec un facteur de puissance égal à 0,8 (récepteur inductif).

- * Calculer la tension au primaire.
- * Déterminer le rendement du transformateur.

6) Lors de l'essai en court-circuit d'un transformateur, on a relevé les valeurs suivantes :

$$I_1 = 0,65 \text{ A}, I_2 = 15 \text{ A}, P_1 = 100 \text{ W}, V_1 = 460 \text{ V}$$

Quelles sont les valeurs de n_1 / n_2 et de \underline{Z}_s ? On sait que $R_2 = 0,225 \Omega$; quelle est la valeur de R_1 ?

Solution :

Ici, il faut penser à utiliser le rapport des intensités afin de déterminer le rapport de transformation :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1CC}}{I_{2CC}} = \frac{0,65}{15} \approx 43,3 \cdot 10^{-3}.$$

Au secondaire, la loi d'Ohm généralisée donne : $\frac{N_2}{N_1} \cdot V_1 = \underline{Z}_s \times I_{2CC}$

$$\text{On en tire : } \underline{Z}_s = \frac{\frac{N_2}{N_1} \cdot V_1}{I_{2CC}} = \frac{43,3 \cdot 10^{-3} \times 460}{15} = 1,32 \Omega$$

L'argument de \underline{Z}_s s'obtient avec la formule :

$$P = VI \cos \varphi \Rightarrow \cos \varphi = \frac{100}{43,3 \cdot 10^{-3} \times 460 \times 15} = 0,334 \Rightarrow \varphi = 70,5^\circ$$

Donc : $\underline{Z}_s = 1,32 \angle 70,5^\circ$ (c'est bien $\angle 70,5^\circ$, l'impédance étant inductive).

$$R_s = \underline{Z}_s \times \cos \varphi = 1,32 \times 0,334 = 0,444 \Omega$$

$$R_s = R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \Rightarrow R_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \times (R_s - R_2) = \left(\frac{1}{43,3 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \times (0,444 - 0,225) \approx 113 \Omega$$

Cela peut paraître élevé, mais les pertes Joule au primaire sont modérées. En effet, en considérant un transformateur 5000/220 V de 3 kVA, comme au n° 5, l'intensité nominale primaire est de :

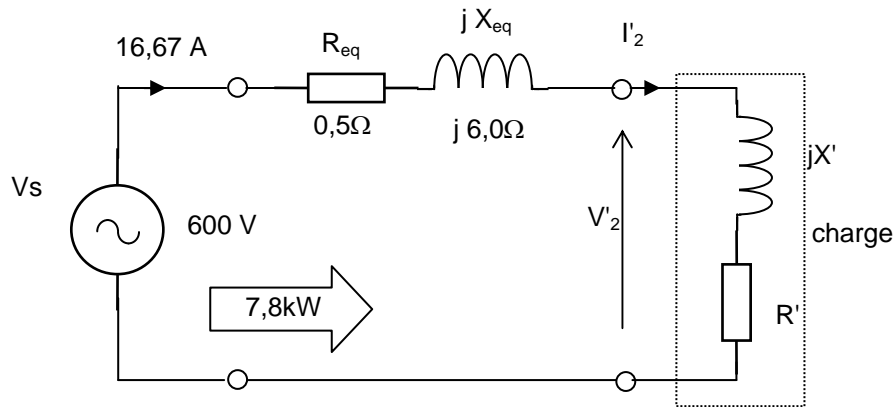
$$I_{1n} = \frac{3000}{5000} = 0,6 \text{ A} \Rightarrow R_1 \times I_{1n}^2 \approx 41 \text{ W}$$

7) Soit un transformateur monophasé de caractéristiques :

10 kVA, 60 Hz, 600 V / 120 V dont l'impédance équivalente ramenée au primaire est égale à $(R_{eq} + jX_{eq}) = (0,5 + j6,0) \Omega$. Une charge inductive est connectée au secondaire. On mesure alors au primaire : tension primaire $V_1 = 600 \text{ V}$, courant primaire $I_1 = 16,67 \text{ A}$, puissance active absorbée par le primaire $P_1 = 7,8 \text{ kW}$.

Déterminer la tension V_2 au secondaire et le facteur de puissance de la charge.

Solution : Le circuit équivalent ramené au niveau du primaire est :



La puissance apparente absorbée par le primaire est égal à :

$$S_1 = V_1 I_1 = 600 \times 16,67 = 10002 \text{ VA}$$

La puissance active absorbée par le primaire du transfo est égale à : $P_1 = (R_{eq} + R') I_1^2$

$$\text{On en déduit : } R' = \frac{P_1}{I_1^2} - R_{eq} = \frac{7800}{(16,67)^2} - 0,5 = 27,57 \Omega$$

La puissance réactive au primaire est égale à :

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{(10002)^2 - (7800)^2} = 6261 \text{ VA}$$

On a $Q_1 = (X_{eq} + X') I_1^2$, on en déduit :

$$X' = \frac{Q_1}{I_1^2} - X_{eq} = \frac{6261}{(16,67)^2} - 6 = 16,53 \Omega$$

Le facteur de puissance au primaire est : $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{7800}{10002} = 0,78 \Rightarrow \varphi_1 = 38^\circ,7$

La tension V'_2 est égale à :

$$V'_2 = V_1 - (R_{eq} + jX_{eq}) I_{eq} = 600 - (0,5 + j6) \cdot (16,67 \angle -38^\circ,7) = 535,9 \angle -7^\circ,8 \text{ V}$$

La tension aux bornes du secondaire du transfo est :

$$V_2 = \frac{V'_2}{(600/120)} = \frac{535,9 \angle -7^\circ,8}{5} = 108 \angle -7^\circ,8 \text{ V}$$

La valeur efficace de la tension secondaire est donc 108 V.

Le facteur de puissance de la charge est : $\cos \varphi_2 = \cos \left[a \tan \left(\frac{X'}{R'} \right) \right] = \cos(30^\circ,94) = 0,858$

8) On étudie un transformateur monophasé 220/110 V de puissance apparente 1100 VA. Ce transformateur est alimenté au primaire en 220 V, 50 Hz.

8.1. Pour réaliser ce transformateur, on utilise le circuit magnétique représenté ci-dessous. On admet que la section du tube d'induction est : $s=17,5 \text{ cm}^2$ et que la longueur de la ligne d'induction moyenne est : $l=36 \text{ cm}$.

Les tôles magnétiques utilisées, non saturées, ont les caractéristiques suivantes :

- perméabilité relative : $\mu_r = 3000$; $\mu_0 = \frac{1}{8.10^5}$,
- masse volumique : 7 kg / dm^3 ,
- pertes fer à 50Hz : 2,5 W par kilogramme pour une induction **maximale** de 1 tesla.

a) Déterminer le nombre n_1 de spires du primaire pour que, dans le fer, l'induction **maximale** atteinte soit de un tesla.

b) Calculer la valeur efficace du courant magnétisant I_{10} absorbé au primaire.

c) Calculer les pertes fer et en déduire la valeur de la composante I_{1F} du courant à vide, en phase avec la tension d'alimentation.

d) Déterminer le courant I_{1V} , absorbé à vide par le primaire, ainsi que le facteur de puissance à vide.

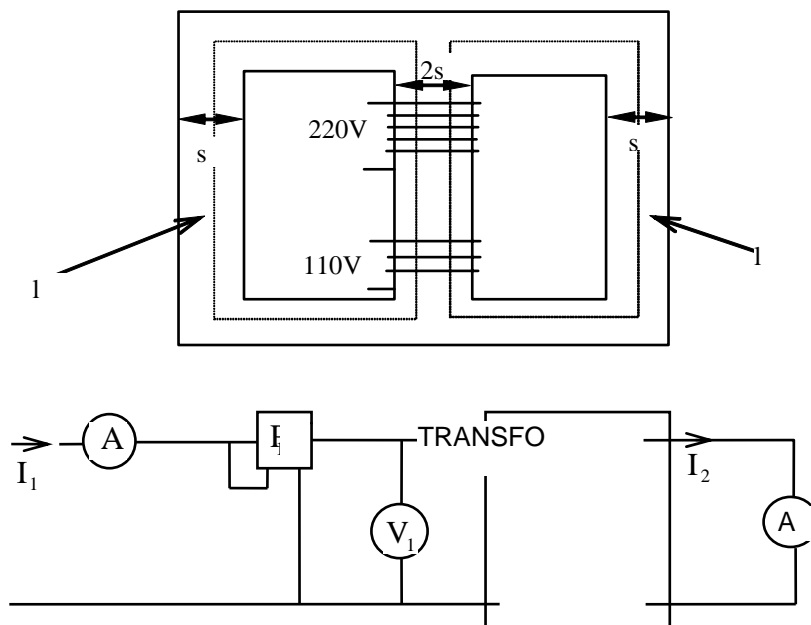
8.2. Le transformateur ayant été réalisé, on a procédé aux essais expérimentaux qui ont donné les valeurs suivantes:

* essai à vide: $V_1=220 \text{ V}$, $V_2 = 110 \text{ V}$, $P_v = 25 \text{ W}$,

* essai en court-circuit: $I_2 = 10 \text{ A}$, $V_1 = 6,22 \text{ V}$, $R_1 = 0,40 \Omega$, $R_2 = 0,12 \Omega$

a) Déterminer la réactance de fuite ramenée au secondaire $l_s \omega$.

b) Déterminer la tension V_2 obtenue lorsque $V_1=220 \text{ V}$ et que le transformateur fournit au secondaire $I_2=10 \text{ A}$, $\cos \varphi_2=0,8$ arrière ; $\Delta V \approx R_s I \cos \varphi + l_s \omega I \sin \varphi$



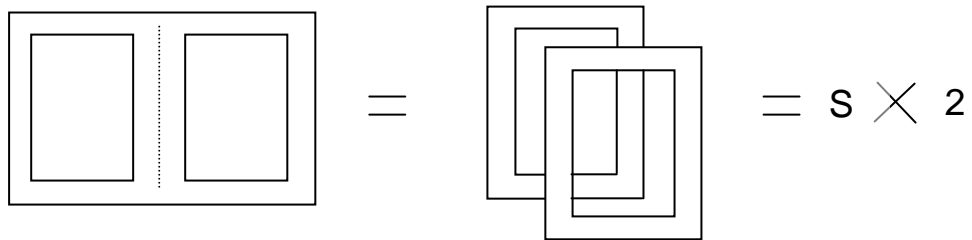
8.1.a

$$e = \frac{\partial \phi}{\partial t} \Rightarrow \underline{V} = j n_1 \omega \underline{\phi} \Rightarrow \hat{V} = n_1 2 \pi f \hat{B} S \Rightarrow n_1 = \frac{\hat{V}}{2 \pi f \hat{B} S} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,0 \cdot 0,0035} = 283 \text{ spires}$$

8.1.b les équations du transformateurs donnent (poly page 39 en haut) :

$$\begin{cases} n_1 \underline{I}_1 - n_2 \underline{I}_2 = R \underline{\phi} \\ \underline{\phi} = \frac{\underline{V}_1}{j \omega n_1} \end{cases} \Rightarrow I_{10} = \frac{R V_1}{n_1^2 \omega}$$

Nous connaissons V_1 , nous venons de déterminer n_1 , il nous faut déterminer la réluctance R . Le circuit magnétique est constitué par deux circuits identiques **en parallèle**.



$$\text{Or } R = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l}{S} \Rightarrow R = \frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,36}{3000 \times 0,0035} = 27468 \text{ unités S.I. ou } \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

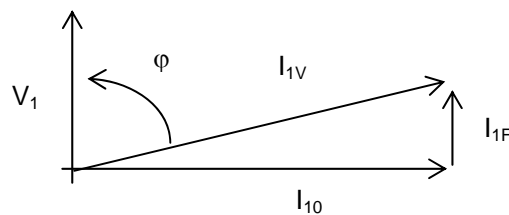
$$I_{10} = \frac{27468 \cdot 220}{283^2 \cdot 314} \approx 240 \text{ mA}$$

8.1.c volume du circuit magnétique : $V = 2 \times s \times l$

$$\text{pertes fer } P_f = \rho \cdot V \cdot 2,5 = 22,05 \text{ W}, \text{ or on a } P_f = V_1 \cdot I_{1F} \cdot \cos \varphi_{1F} \Rightarrow I_{1F} = \frac{P_f}{V_1} \approx 0,1 \text{ A},$$

car $\cos \varphi_{1V} = 1$ (I_{1F} est en phase avec V_1).

8.1.d



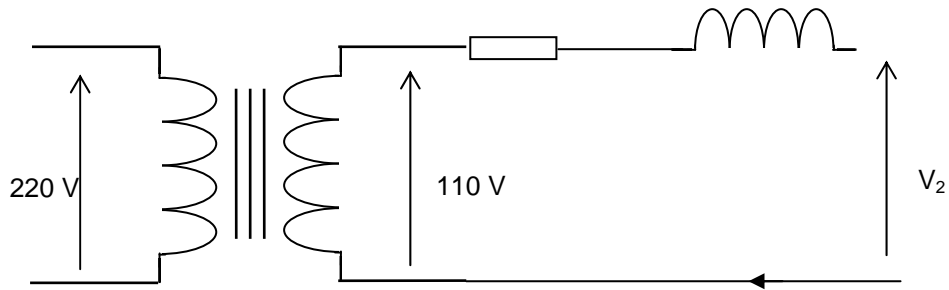
$$I_V = \sqrt{I_0^2 + I_F^2} = 0,26 \text{ mA}$$

$$\cos \varphi_V = \frac{I_F}{I_V} = \frac{0,1}{0,26} = 0,38$$

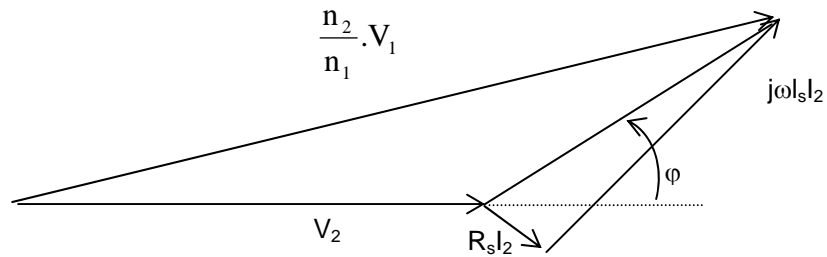
8.2.a L'essai en court-circuit permet de déterminer l'inductance de fuite (poly page 46 en haut) :

$$\omega l_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} V_{1cc} \right)^2 - (R_s I_{2cc})^2}}{I_{2cc}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{110}{220} \cdot 6,22 \right)^2 - \left(\left(0,12 + \left(\frac{110}{220} \right)^2 \cdot 0,40 \right) \cdot 10 \right)^2}}{10} \approx 0,22 \Omega$$

8.2.b



D'où le diagramme de Kapp :



$$V_2 = \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1\right)^2 - \left(\sqrt{(R_s^2 I_2^2 + \omega^2 l_s^2 I_2^2)} \sin \phi\right)^2} - \sqrt{(R_s^2 I_2^2 + \omega^2 l_s^2 I_2^2)} \cos \phi = 108,2 \text{ V},$$

il s'agit du calcul exact.

Sinon par la formule approchée :

$$V_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1\right) - (R_s I_2 \cos \phi + \omega l_s I_2 \sin \phi) \approx 107 \text{ V}$$

9) Une série de mesures sur un transformateur monophasé a permis d'établir les caractéristiques suivantes :

- * Tensions à vide: U_{1n} (tension primaire nominale) = 21 kV, U_{20} (tension secondaire nominale) = 380 V.
- * Impédances: primaire: $R_1 = 61\Omega$, $l_1\omega = 141\Omega$
secondaire: $R_2 = 2.10^{-2}\Omega$, $l_2\omega = 4.10^{-2}\Omega$.

D'autre part, la puissance nominale, indiquée sur la plaque signalétique est :

$$S_n = U_{20} \cdot I_{2n} = 76 \text{ kVA.}$$

Sauf indications contraire, dans tout le problème le transformateur sera alimenté par un réseau de tension 21 kV/50 Hz.

a) Donner le schéma équivalent ramené au secondaire en précisant les valeurs:

- * du rapport de transformation $k = \frac{n_2}{n_1}$,
- * de la résistance totale du secondaire R_s ,
- * de l'inductance de fuite totale au secondaire l_s .

b) Le secondaire du transformateur débite sur une charge absorbant un courant $I_2 = I_{2n}$, de facteur de puissance $\cos \varphi = 0,8$ (selfique).

Calculer, en utilisant une relation algébrique simplifiée, la chute de tension ΔU_2 .

En déduire la tension au secondaire du transformateur.

c) Le primaire étant toujours alimenté sous une tension de 21000 V, les bornes de sortie du secondaire sont mises en court-circuit franc, calculer le courant de court-circuit I_s .

d) A quelle valeur U_{ICC} faut-il réduire la tension primaire pour limiter en court-circuit, le courant circulant au secondaire à la valeur $I_{CC} = I_{2n}$. On exprimera ensuite la valeur de $\varepsilon = \frac{U_{ICC}}{U_{1n}}$ en %.

Calculer enfin la puissance absorbée P_{CC} dans l'essai en court-circuit sous tension réduite U_{ICC} .

e) Un essai supplémentaire, à vide, a donné la puissance absorbée au primaire:

$$P_0 = 400 \text{ W pour } \cos \varphi_0 = 0,1$$

En effectuant un bilan des puissances mises en jeu, calculer le rendement du transformateur lorsqu'il débite $I_2 = I_{2n}$ avec $\cos \varphi_2 = 0,8$.

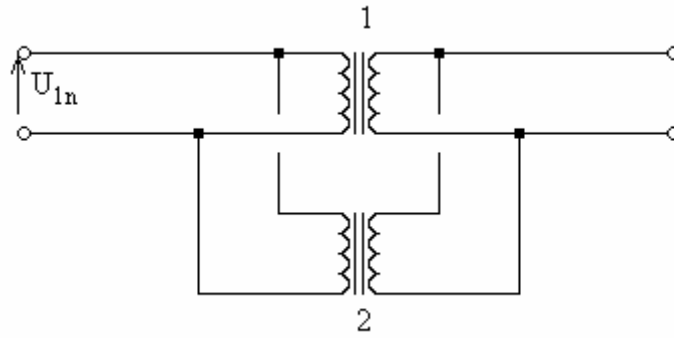
f) Dans les mêmes conditions d'exploitation (I_{2n} , $\cos \varphi_2 = 0,8$) on demande de calculer :

- * la puissance P_1 absorbée au primaire,
- * la puissance réactive Q_1 absorbée au primaire,
- * le facteur de puissance du primaire, $\cos \varphi_1$,
- * le courant I_1 circulant au primaire.

g) Calculer le courant débité I'_2 donnant lieu au rendement maximum. Calculer ce rendement pour $\cos \varphi_2 = 1$.

h) On considère à présent un deuxième transformateur, rigoureusement identique au premier. Son rapport de transformation vaut néanmoins: $k' = 1,01.k$

Les primaires sont connectés en parallèle sur le réseau 21 kV. Les secondaires sont connectés en parallèle.



L'ensemble étant à vide (pas de débit sur charge extérieure) calculer le courant de circulation I_v dans les secondaires.

i) On débranche le primaire de (2) du réseau; les secondaires de (1) et (2) restent cependant connectés en parallèle.

En faisant les approximations nécessaires, calculer:

- * le courant au secondaire de (1),
- * le courant au primaire de (1).

$$9.a \ m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{380}{210000} = 0,01809$$

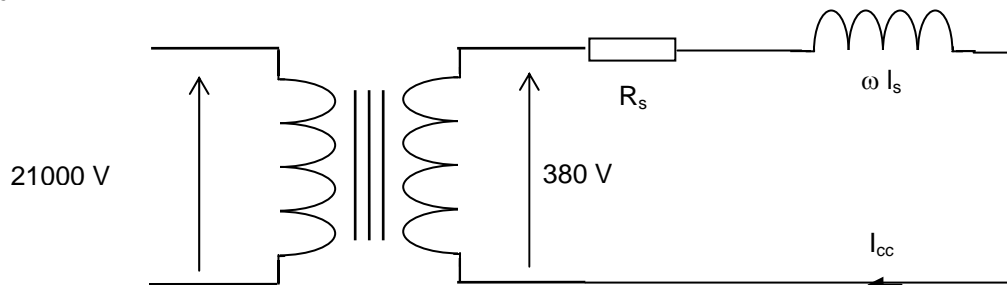
$$R_s = R_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot R_1 = 0,040 \Omega$$

$$\omega l_s = \omega l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot \omega l_1 \Rightarrow \omega l_s = 0,086 \Omega$$

$$9.b \ \Delta U \approx (R_s I_2 \cos \varphi + \omega l_s I_2 \sin \varphi) = 16,7 \text{ V},$$

$$\text{avec } I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = 200 \text{ A} \Rightarrow V_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1\right) - \Delta U = 380 - 16,7 = 363,3 \text{ V}$$

9.c



$$I_{cc} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1\right)}{\sqrt{R_s^2 + (\omega l_s)^2}} \approx 4006 \text{ A}$$

$$9.d \ I_{2n}=200 \text{ A} \Rightarrow \left(\frac{n_2}{n_1} \cdot V_1\right) = I_{2n} \cdot \sqrt{R_s^2 + (\omega l_s)^2} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \Rightarrow U_{1cc} = 1048 \text{ V}$$

$$P_{cc} = R_s \cdot I_{2cc}^2 = 0.04 \times 200^2 = 1600 \text{ W}$$

$$9.e \quad \eta = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi + \text{Pertes fer} + \text{Pertes cuivre}} = 0,966$$

9.f La puissance absorbée au primaire est égale au dénominateur de l'expression du rendement ci-dessus, elle vaut donc 60,128 kW.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2} \Rightarrow Q = 46,482 \text{ kVAR}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S} = \frac{60,128 \cdot 10^3}{76 \cdot 10^3} = 0,791$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{60128}{21000 \times 0,791} = 3,61 \text{ A}$$

9.g Le courant donnant lieu au rendement maximum est celui qui produit des pertes cuivre (pertes par effet Joule) égales aux pertes fer.

$$\text{En effet, } \eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + P_{\text{fer}} + R_s I_2^2}, \text{ divisons numérateur et dénominateur par } I_2 :$$

$$\eta = \frac{U_2 \cos \varphi}{U_2 \cos \varphi + \frac{P_{\text{fer}}}{I_2} + R_s I_2}$$

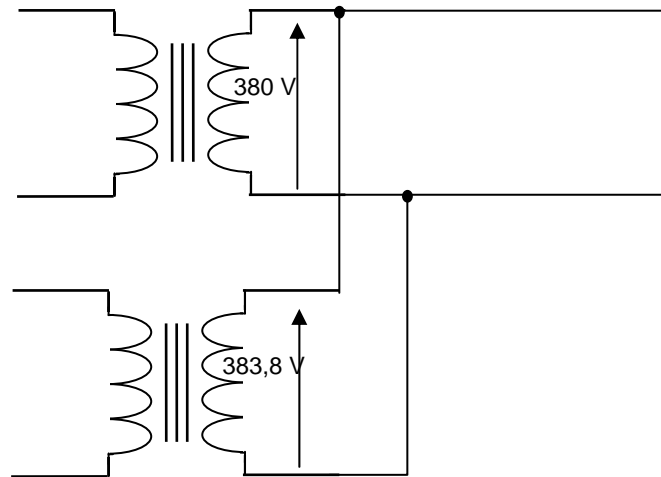
η est maximal lorsque l'expression $\frac{P_{\text{fer}}}{I_2} + R_s I_2$ est minimale, c'est à dire lorsque la dérivée de cette expression par rapport à I_2 est nulle.

$$\text{Or } \frac{\partial \left(\frac{P_{\text{fer}}}{I_2} + R_s I_2 \right)}{\partial I_2} = -\frac{P_{\text{fer}}}{I_2^2} + R_s = 0 \Rightarrow P_{\text{fer}} = R_s \cdot I_2^2$$

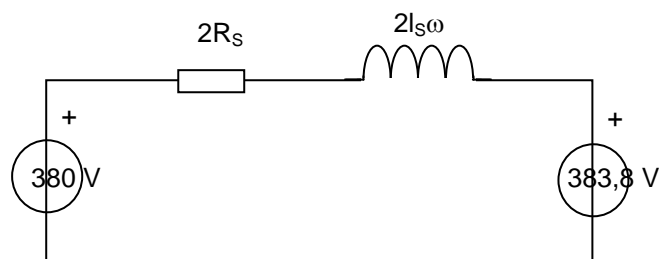
$$\text{Il faut donc que } I_2 = \sqrt{\frac{400}{0,04}} = 100 \text{ A}$$

$$\text{Alors } \eta = \frac{100 \times (380 - 0,04 \times 100)}{100 \times 376 + 2 \times (0,04 \times 100^2)} = 0,979$$

9.h



Équivalent à



$$I_v = \frac{383,8 - 380}{\sqrt{(2 \times 0,04)^2 + (2 \times 0,086)^2}} = 20 \text{ A}$$

Transformateurs triphasés :

10) Un transformateur Dy, avec neutre au secondaire, possède un rapport de nombres de spires $m_v = 0,044$. La tension primaire est de 5000 V.

10.1. Quelles sont les tensions disponibles au secondaire?

10.2. Quand le débit secondaire est de 100 A, quelle est l'intensité du courant primaire:

- * Dans un fil de ligne?
- * Dans un enroulement?

10.1. Il s'agit d'un transformateur dont le primaire est en triangle (D) et le secondaire en étoile (y). Il y a donc un point neutre au secondaire et de plus ce neutre est connecté une borne. On pourra donc disposer des tensions composées (entre phases) et des tensions simples (phase neutre) au secondaire.

La tension aux bornes d'une bobine secondaire est égale à la tension aux bornes d'une bobine primaire multipliée par le rapport du nombre de spires. Or la tension aux bornes d'une bobine primaire est la tension composée au primaire (5000 V) car le primaire est en triangle. On a donc :

$$V_{bob2} = V_{bob1} \times \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow V_{bob2} = 0,044 \times 5000 = 220 \text{ V}$$

Il s'agit de la tension simple car les bobines secondaires sont connectées en étoile. La tension composée secondaire est égale à :

$$U_2 = \sqrt{3} \times V_2 = \sqrt{3} \times 220 = 380 \text{ V}$$

10.2. Le rapport des intensités dans les bobines secondaires est primaires est égal au rapport du nombre de spires on a donc :

$$\frac{I_{bob1}}{I_{bob2}} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow I_{bob1} = I_{bob2} \times \frac{N_2}{N_1} = 100 \times 0,044 = 4,4 \text{ A .}$$

Il s'agit de l'intensité dans un enroulement du primaire. L'intensité sur les fils de ligne est racine de trois fois plus grande :

$$I_1 = I_{bob1} \times \sqrt{3} = 4,4 \times \sqrt{3} = 7,6 \text{ A}$$

11) 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.

12) 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 :

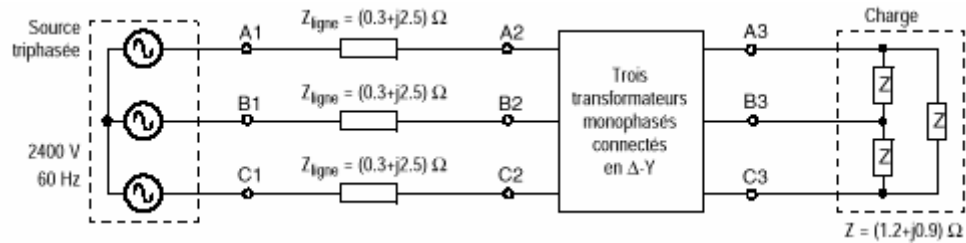
- * l'intensité du courant dans la ligne;
- * l'intensité du courant dans un enroulement.

13) Trois transformateurs monophasés identiques 60 Hz, 50 kVA, 2400V/120V sont connectés en D-Y pour former un transformateur triphasé.

Les paramètres (ramenés au primaire) d'un transformateur monophasé sont :

$R_{eq} = 3.0 \, \Omega$, $X_{eq} = 4.8 \, \Omega$, $L_1 = 50000 \, \Omega$ (inductance absorbant l'intensité nécessaire à la circulation du flux), $R_F = 18000 \, \Omega$ (résistance siège des pertes fer).

a) Le primaire du transformateur triphasé est relié à une source triphasée de 2400 V (ligne-ligne) par une ligne de transport dont l'impédance par phase est $(0.3 + j2.5) \, \Omega$. Le secondaire alimente une charge équilibrée composée de trois impédances identiques connectées en D.

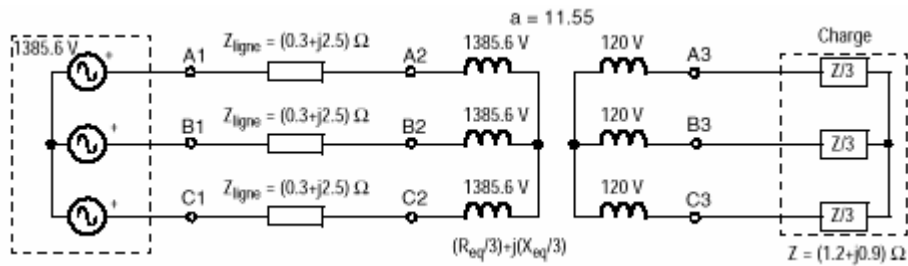


Calculer:

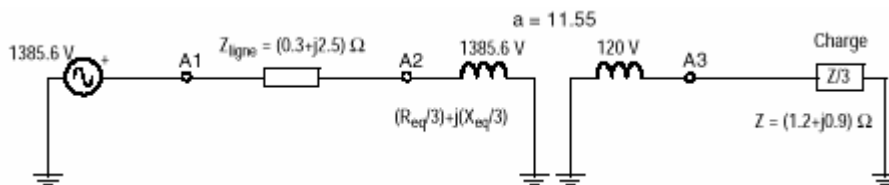
- le courant de ligne au primaire (valeur efficace)
 - la tension composée au secondaire (valeur efficace)
- b) Calculer le rendement du transformateur triphasé dans ces conditions de fonctionnement.

Solution :

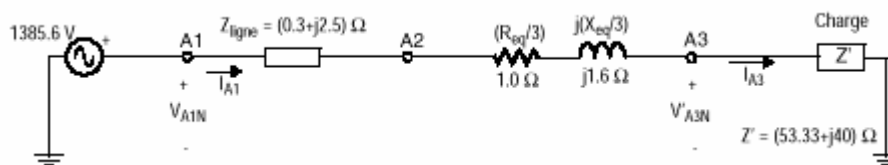
a) Le circuit équivalent Y-Y du système:



Circuit monophasé équivalent :



Circuit monophasé équivalent réfléchi au primaire :



Courant de ligne au primaire :

$$I_{A1} = \frac{V_{A1N}}{Z_{\text{ligne}} + \left(\frac{R_{\text{eq}}}{3} + \frac{jX_{\text{eq}}}{3} \right) + Z'} = \frac{1385,6 \angle 0^\circ}{(0,3 + j2,5) + (1 + j1,6) + (53,33 + j40)} = 19,736 \angle -38,9^\circ \text{ A}$$

La valeur efficace du courant de ligne au primaire est donc 19,736 A.

La tension simple ligne-neutre secondaire réfléchi au primaire :

$$V_{A3N} = Z' \times I_{A1} = (53,33 + j40) \cdot (19,736 \angle -38,9^\circ) = 1315,6 \angle -2^\circ \text{ V}$$

La valeur efficace de la tension composée ligne-ligne au secondaire est :

$$|V_{A3B3}| = \sqrt{3} \times \frac{|V'_{A3N}|}{11,55} = 197,3 \text{ V}$$

b) Le rendement du transformateur dans ces conditions de fonctionnement est :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{CU} + P_{FE}} = \frac{53,33 \times 19,736^2}{53,33 \times 19,736^2 + 1 \times 19,736^2 + \frac{1385,6^2}{18000/3}} = 0,967$$

Etude d'un transformateur triphasé (d'après le CAPES de sciences physiques (concours interne), section : physique et électricité appliquée, session de 1996, composition d'électricité appliquée, première partie)

On applique au primaire du transformateur représenté sur la Figure 43 un système triphasé équilibré de tensions sinusoïdales u_{AB} , u_{BC} et u_{CA} de valeur efficace U_1 .

Les valeurs efficaces des intensités des courants en ligne au primaire et au secondaire sont notées respectivement I_1 et I_2 .

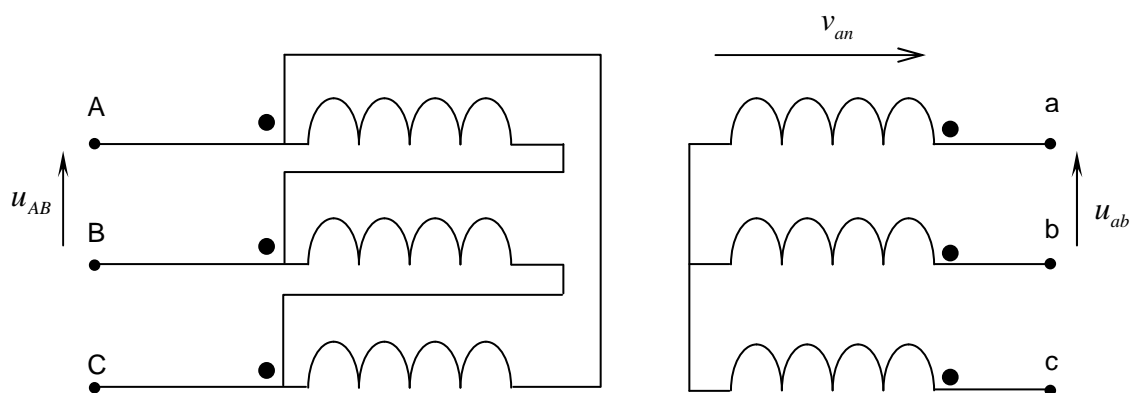


Figure 43

Les caractéristiques nominales du transformateur, constitué de trois noyaux ayant chacun une section $s = 5,0 \text{ dm}^2$, sont les suivantes :

$S_N = 250 \text{ kVA}$; $U_{1N} = 5,20 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$.

On néglige ses pertes de puissance dans le fer.

Deux essais ont été réalisés :

essai à vide sous tension primaire nominale U_{1N} : la tension secondaire entre phases est alors

$U_{20} = 400 \text{ V}$;

essai en court-circuit sous la tension primaire $U_1 = 600 \text{ V}$; le courant secondaire en ligne a pour intensité $I_{2cc} = 350 \text{ A}$ et la puissance absorbée au primaire est $P_{1cc} = 7,35 \text{ kW}$.

1.1. Calculer le rapport de transformation m du transformateur ainsi que le rapport de transformation par colonne $m_c = n_2/n_1$.

1.2. Le champ magnétique maximal dans le circuit magnétique est $B_{\max} = 1,2 \text{ T}$: calculer le nombre de spires n_1 de chaque enroulement primaire. En déduire le nombre de spires n_2 de chaque enroulement secondaire.

1.3. En supposant linéaire le fonctionnement du transformateur, en donner le schéma équivalent par phase vu du secondaire (modèle de Thévenin).

1.4. Calculer la résistance par phase ramenée au secondaire, R_s , et la réactance de fuites par phase ramenée au secondaire, X_s .

1.5. Que signifient les points mis aux extrémités de chaque bobine ?

Pour le fonctionnement à vide du transformateur alimenté sous la tension nominale U_{1N} , représenter sur le même diagramme vectoriel triphasé direct de tensions (u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}), et le système de tensions simples (v_{ab} , v_{bc} , v_{ca}) de valeur efficace V_2 (sans respecter l'échelle en ce qui concerne le rapport entre U_1 et V_2).

1.6. Transformateur en charge alimenté sous tension primaire nominale.

Une charge triphasée équilibrée représentée sur la Figure 44 est connectée au secondaire.

$R = 554 \text{ m}\Omega$; $L = 3,05 \text{ mH}$.

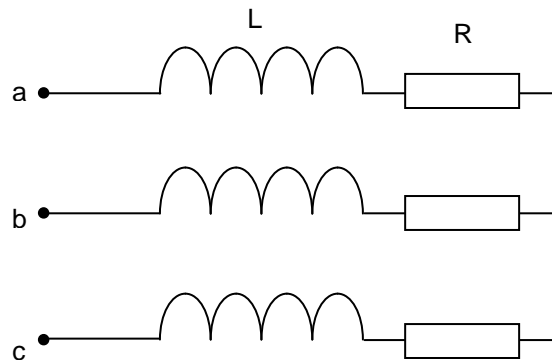


Figure 44

1.6.1. Calculer le facteur de puissance de cette charge.

1.6.2. Tracer le diagramme vectoriel des tensions correspondant au schéma équivalent par phase. En déduire l'intensité I_2 du courant en ligne ainsi que la tension U_2 . Si l'on utilise des approximations, on les justifiera brièvement.

1.6.3. Calculer la puissance fournie à la charge ; en déduire son rendement.

1.6.4. La charge réellement utilisée est constituée d'une charge résistive équilibrée associée à une charge inductive équilibrée montée en parallèle selon la Figure 45. On admet que L' est une inductance pure. Calculer R' et L' pour que cette charge soit équivalente à la précédente.

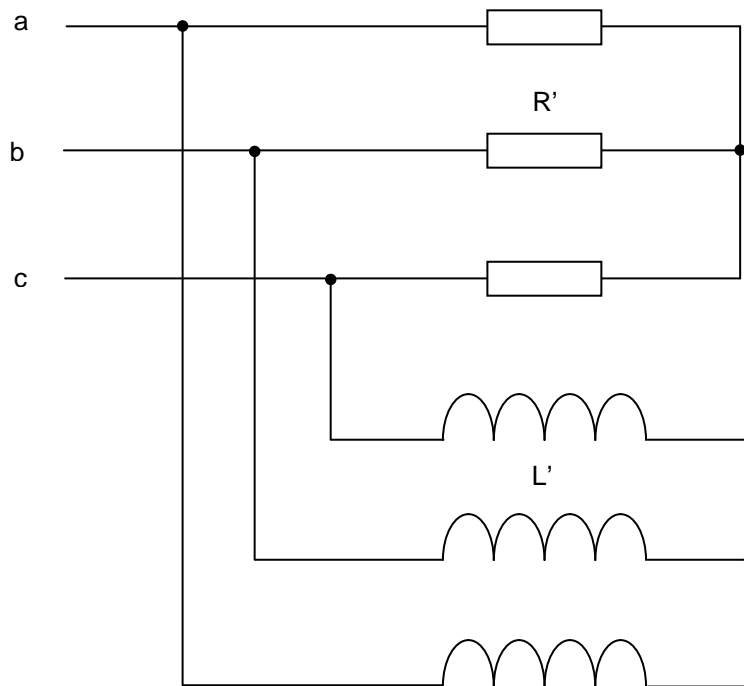


Figure 45

Corrigé

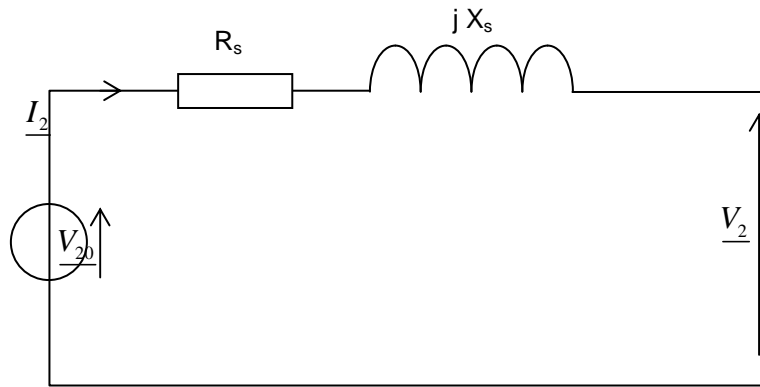
1.1. $m = 7,7 \cdot 10^{-2}$

$$m_c = \frac{m}{\sqrt{3}} = 4,4 \cdot 10^{-2}$$

1.2. $E_1 = U_{1N} = 4,44 \cdot n_1 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S \Rightarrow n_1 = 391$ spires

$$m_c = \frac{m}{\sqrt{3}} = 4,4 \cdot 10^{-2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 = 18 \text{ spires}$$

1.3.

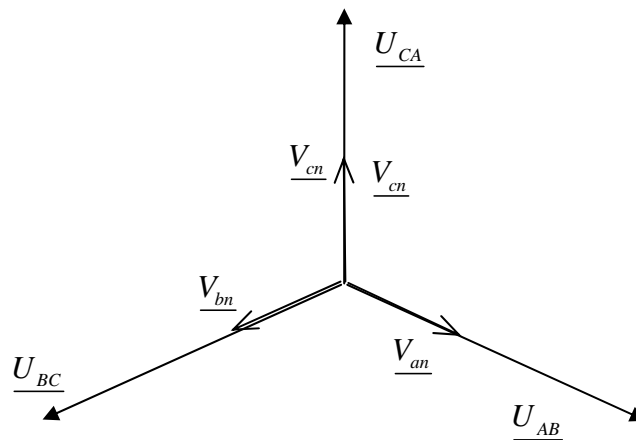


$$\underline{V}_2 = \underline{V}_{20} - R_s \cdot \underline{I}_2 - j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2$$

$$1.4. R_s = \frac{P_{1cc}}{3 \cdot I_{2cc}^2}, X_s = \sqrt{\left(\frac{m_c \cdot U_1}{I_{2cc}} \right)^2 - R_s^2}$$

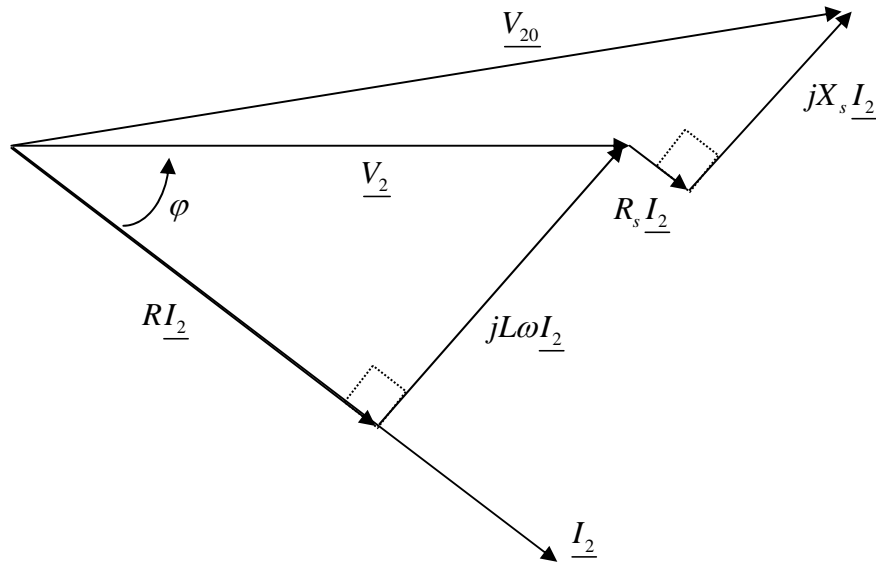
$$R_s = 9,0 \text{ m}\Omega ; X_s = 73,5 \text{ m}\Omega .$$

1.5. Des courants pénétrants dans les bobines marquées d'un point ont des effets magnétisants additifs, il en résulte que dans un fonctionnement à vide : u_{AB} et v_{an} sont en phase, u_{BC} et v_{bn} sont en phase et u_{CA} et v_{cn} le sont également.



1.6.1. Le facteur de puissance est : $\cos \varphi = 0,50$

1.6.2.



Approximation de Kapp (\underline{V}_{20} est pratiquement en phase avec \underline{V}_2 , l'égalité suivante est donc à peu près justifiée) :

$$V_{20} = V_2 + R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi$$

$$U_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 = 375 \text{ V et } I_2 = 196 \text{ A}$$

$$1.6.3. P_u = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = 63,5 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + 3 \cdot R_s \cdot I_2^2} = 96,5 \%$$

$$1.6.4. R' = 3 \frac{V_2^2}{P_u} = 2,21 \Omega$$

$$Q = 3L\omega I_2^2 = 3 \frac{V_2^2}{L' \omega} \Rightarrow L' = 4,06 \text{ mH}$$

Choix et caractérisation d'un transformateur triphasé MT/BT utilisé pour alimenter une usine.

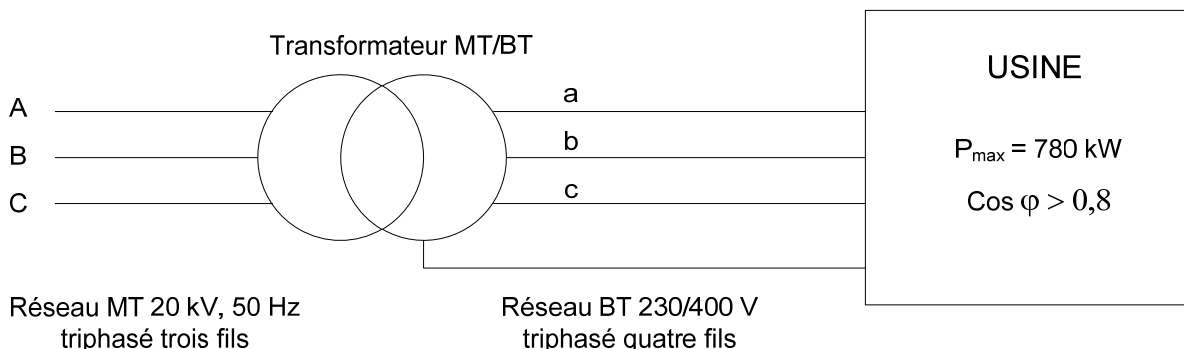


Figure 1

L'ensemble des récepteurs électriques de l'usine consomme théoriquement, à plein régime, une puissance de 780 kW avec un facteur de puissance toujours supérieur à 0,8. On supposera dans tout le problème que la charge est équilibrée.

L'objet de ce problème est de faire le choix du transformateur parmi la liste donnée en annexe (transfo Trihal de Merlin Gerin Figure 46) et d'en caractériser les défauts pour faire éventuellement évoluer l'alimentation du site ultérieurement.

Choix du transformateur et aspects pratiques

- 1.1. A partir de la valeur de la puissance maximale susceptible d'être consommée, choisir le modèle du transformateur dans la documentation fournie en annexe.
- 1.2. Justifier les indications "triphasé trois fils" et "triphasé quatre fils" indiqué sur la figure ci-dessus.
- 1.3. Représenter sur un schéma le couplage des phases primaires et secondaires du transformateur triphasé. Justifier le choix de ce couplage.
- 1.4. Représenter sur un diagramme vectoriel sans échelle les tensions simples (réelles ou fictives) du primaire et du secondaire. Noter alors le déphasage qui existe entre deux tensions analogues et justifier l'appellation Dyn11 lue dans la documentation.
- 1.5. Pourquoi est-il important de noter ces déphasages ?
- 1.6. Que représente le régime nominal du transformateur ? Quelles sont les seules données nominales directement exploitables précisées dans la documentation ?

Utilisation des données de la documentation et caractérisation des défauts

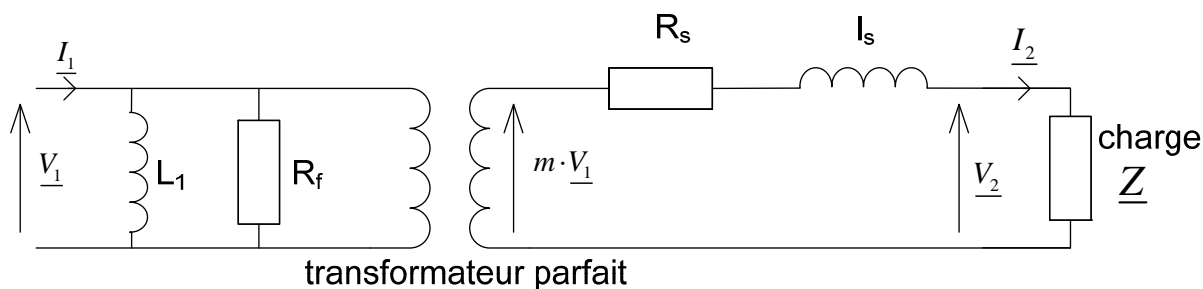


Figure 2

- 2.1. Quelles sont les valeurs des tensions nominales primaires et secondaires pour $\cos \varphi = 1$? On notera ces grandeurs V_{1n} et V_{2n} . Calculer alors dans ces conditions la valeur des courants nominaux primaires et secondaires : I_{1n} et I_{2n} .
- 2.2. Comment calcule-t-on la valeur des éléments donnés en pourcentage dans la documentation ?
- 2.3. Justifier brièvement la présence des divers éléments du schéma équivalent.
- 2.4. A partir de la valeur de la tension secondaire à vide relevée dans la documentation, calculer la valeur du rapport de transformation : m .
- 2.5. Quelle est la valeur du courant à vide ? Quelle est, sur le schéma équivalent, la valeur du courant à vide correspondant (qu'on notera I_{10}) ?

- 2.6. Quelle est la valeur de la puissance consommée à vide ? Calculer alors les valeurs de R_f et L_1 .
- 2.7. La tension de court-circuit correspond à la tension à appliquer au primaire lorsque le secondaire est court-circuité pour débiter le courant nominal. Utiliser cette donnée pour trouver une relation reliant R_s et I_s .
- 2.8. En considérant le cas d'une charge présentant un facteur de puissance unitaire, représenter toutes les grandeurs du transformateur sur un diagramme de Fresnel sans échelle.
- 2.9. En utilisant la donnée de la chute de tension en charge, calculer alors les valeurs de R_s et I_s .
- 2.10. Y-a-t-il un moyen plus simple de résoudre la question précédente ? Si oui, vérifier la concordance des résultats (on considérera le cas à 120°C).
- 2.11. Pour valider le schéma équivalent, calculer la chute de tension théorique correspondant à une charge de facteur de puissance 0,8 AR (on négligera la résistance R_s). Comparer le résultat avec la documentation.
- 2.12. Calculer également le rendement théorique à 100% de charge pour $\cos \varphi = 1$. Comparer avec la documentation et conclure.
- 2.13. Calculer pour finir le facteur de puissance total de l'installation pour une charge de facteur de puissance égal à 0,8. Conclure.

Mise en parallèle de deux transformateurs identiques

On veut pouvoir doubler le parc de machines de l'usine et donc pratiquement doubler la consommation électrique. On se propose d'acheter un deuxième transformateur (identique à celui de la question 1.1.) et de connecter en parallèle au précédent. Deux stratégies sont à étudier :

1. Mettre les deux secondaires en parallèle et faire débiter les deux transformateurs sur l'ensemble des charges.
 2. Connecter les nouvelles charges uniquement sur le deuxième transformateur après avoir assuré la pleine charge du premier.
- 3.1. Calculer le rendement d'un des transformateurs à 50% de sa charge, pour une charge de $\cos \varphi = 0,8$ AR.
 - 3.2. Représenter le schéma global de la stratégie n°1.
 - 3.3. Quel serait le rendement global de la stratégie n°1 pour une charge totale correspondant à 1,5 fois la charge maximale d'un des deux transformateurs, toujours pour une charge de $\cos \varphi = 0,8$ AR.
 - 3.4. Représenter le schéma global de la stratégie n°2.
 - 3.5. Quel serait le rendement global de la stratégie n°2 pour une charge totale correspondant à 1,5 fois la charge maximale d'un des deux transformateurs, toujours pour une charge de $\cos \varphi = 0,8$ AR.
 - 3.6. Quels seraient les problèmes supplémentaires posés par la stratégie n°2 ? N'y-a-t-il pas une autre stratégie possible ?
 - 3.7. A partir du schéma correspondant à la stratégie n°1, déduire le schéma équivalent de l'installation (analogue à celui de la figure 2).
 - 3.8. Quel serait le rendement correspondant à l'utilisation d'un transformateur de 2000 kVA pour la même charge que dans les questions précédentes ?
 - 3.9. Conclure sur la stratégie à adopter.

transformateurs de distribution HTA/BT

transformateurs secs enrobés TRIHAL de 160 à 2500 kVA
isolement ≤ 24 kV - tension secondaire 410 V - 50 Hz
classe thermique F - ambiante $\leq 40^\circ$ C, altitude ≤ 1000 m



normes

Ces transformateurs sont conformes aux normes :

- NFC 52 100 (1990), harmonisée avec les documents d'harmonisation CENELEC HD 398-1 à 398-5 ;
- norme NF C 52115 (1994) harmonisée avec le document HD 538 S1 du CENELEC ;
- norme NF C 52726 (1993) harmonisée avec le document HD 464 S1 du CENELEC ;
- IEC 76-1 à 76-5 (1993) ;
- IEC 726 (édition 1982) ;
- IEC 905.



caractéristiques électriques

isolement 17,5 kV et 24 kV - tension secondaire 410 V

puissance assignée (kVA) ^(*)	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
tension primaire assignée ^(*)	15 kV, 20 kV et doubles tensions 15/20 kV (puissance conservée)									
niveau d'isolement assigné ^(*)	17,5 kV pour 15 kV - 24 kV pour 20 kV									
tension secondaire à vide ^(*)	410 V entre phases, 237 V entre phase et neutre									
réglage (hors tension) ^(*)	$\pm 2,5$ % ^(*)									
couplage	Dyn 11 (triangle, étoile neutre sorti)									
pertes (W)										
à vide	650	880	1200	1650	2000	2300	2800	3100	4000	5000
à 75°C	2350	3300	4800	6800	8200	9600	11400	14000	17400	20000
à 120°C	2700	3800	5500	7800	9400	11000	13100	16000	20000	23000
tension de court-circuit (%)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
courant à vide (%)	2,3	2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1
courant d'enclenchement	10,5	10,5	10	10	10	10	10	10	9,5	9,5
le/ln valeur crête	0,13	0,18	0,25	0,26	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,5
chute de tension à pleine charge (%)										
cos $\varphi = 1$ à 120°C	1,85	1,69	1,55	1,41	1,35	1,27	1,22	1,18	1,18	1,10
cos $\varphi = 0,8$ à 120°C	4,87	4,77	4,68	4,59	4,55	4,50	4,47	4,44	4,44	4,38
rendement (%)										
charge 100 %										
cos $\varphi = 1$ à 120°C	97,95	98,16	98,35	98,52	98,60	98,69	98,74	98,82	98,81	98,89
cos $\varphi = 0,8$ à 120°C	97,45	97,71	97,95	98,16	98,25	98,36	98,43	98,53	98,52	98,62
charge 75 %										
cos $\varphi = 1$ à 120°C	98,22	98,42	98,59	98,74	98,80	98,88	98,93	99,00	98,99	99,05
cos $\varphi = 0,8$ à 120°C	97,79	98,03	98,24	98,43	98,50	98,61	98,66	98,76	98,75	98,82
bruit ^(*)										
puissance acoustique LWA	62	65	68	70	72	73	75	76	78	81
pression acoustique LPA à 1 m	50	53	56	57	59	60	61	62	63	66
décharges partielles ^(*)	≤ 10 pC à 1,1 Um									

(*) La puissance assignée est définie en refroidissement naturel dans l'air (AN). Pour des contraintes particulières, elle peut être augmentée de 40 % par adjonction de ventilation forcée (AF). Nous consulter.

(1) Autres possibilités sur demande, nous consulter.

(2) Rappel sur les niveaux d'isolement :

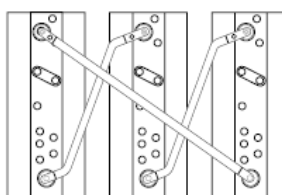
niveau d'isolement assigné (kV)	7,2	12	17,5	24
kV eff. 50 Hz - 1 mn	20	28	38	50
kV choc, 1,2/50 μ s	60	75	95	125

(3) Mesures selon CEI 551.

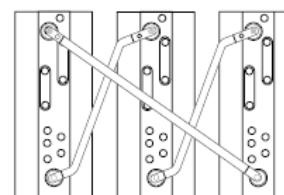
(4) Mesures selon CEI 270.

changement de tension par barrettes de couplage manœuvrables hors tension.

bitension primaire 15/20 kV



20 kV



15 kV

Figure 46

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

Equation Chapter 1 Section 1	1
Les transformateurs.....	1
1. Définition.....	1
1.1. Invention	1
1.2. Symboles	3
1.3. Utilisation	3
2. Principe - équations	5
2.1. <i>Constitution principe</i>	5
2.1.1. Principe de fonctionnement :.....	5
2.1.2. Marque de polarité d'un transformateur	9
2.1.3. Equations	10
3. Transformateur parfait.....	11
3.1. Transformateur parfait	11
3.2. Impédance ramenée.....	12
4. Transformateur réel à vide	15
4.1. Influence de la réluctance du circuit magnétique	15
4.2. Influence des pertes fer	16
5. Transformateur réel en charge.....	18
5.1. Schéma équivalent	18
5.2. Chute de tension.....	20
5.3. Essai et propriétés du transformateur.....	22
5.3.1. Essai à vide	22
5.3.2. Essai en court-circuit.....	23
5.3.3. Chute de tension	24
5.3.4. Rendement.....	24
6. Transformateurs spéciaux	26
6.1. Autotransformateur	26
6.2. Transformateur de tension (TT).....	29
Le voltmètre ayant une très forte impédance, le transformateur de tension est pratiquement à vide.	
On a :	30
6.3. Transformateur de courant (TI).....	30
7. Transformateurs triphasés.....	33
7.1. Principe	33
7.2. Etat magnétique.....	34
7.3. Modes de couplage des enroulements.....	37
7.3.1. Mise en parallèle de deux transformateurs :	38
7.3.2. Rapport de transformation en triphasé :	38
7.3.3. Détermination du déphasage entre une tension primaire et une tension secondaire homologue.....	38
7.3.4. Etablissement des diagrammes de vecteurs de Fresnel associés aux tensions.....	39
Exercices :	51