LES ALIMENTATIONS ÉLECTRONIQUES

CHAPITRE 2

TRANSFORMATEUR

Le transformateur est présent dans presque toutes les alimentations branchées sur le secteur. Il assure l'isolement entre le réseau et l'appareil. De plus, dans les alimentations classiques, il permet d'abaisser la tension efficace du secteur à une valeur compatible avec les nécessités des circuits électroniques.

L'étude du transformateur d'alimentation diffère des théories classiques de l'électrotechnique : d'une part, les courants ne sont pas sinusoïdaux et d'autre part, les approximations faites pour les transformateurs de forte puissance ne sont pas toujours justifiées pour les petites unités.

2.1 Principe

Un transformateur monophasé est constitué d'un noyau ferromagnétique fermé réalisé avec un matériau de forte perméabilité sur lequel sont placés deux enroulements. L'une de ces bobines, appelée *primaire*, est alimentée par une source de tension alternative. Un flux magnétique est alors créé dans le noyau. L'autre enroulement, nommé *secondaire,* est le siège d'une force électromotrice induite.

Si le circuit est fermé sur un récepteur, il apparaît un courant qui donne une force magnétomotrice s'opposant à celle du primaire. Comme le flux est imposé par la tension de la source alternative, la force magnétomotrice résultante est inchangée et le primaire appelle un courant qui permet le maintien de l'état magnétique du noyau. On peut ainsi transférer une puissance du primaire vers le secondaire sans aucun contact électrique.

Dans son principe, l'appareil est réversible, l'un quelconque des enroulements pouvant être choisi comme primaire. En pratique, le rôle des deux bobines est cependant bien défini.

Sur les schémas, un transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles indiqués sur la *figure 2.1*. Le premier fait apparaître les deux enroulements, séparés par un trait qui rappelle la présence du noyau ferromagnétique.

Toutefois, ces symboles sont insuffisants pour connaître totalement le transformateur car les deux extrémités des enroulements ne sont pas équivalentes. En effet, le sens de bobinage détermine le sens du champ magnétique créé et donc les polarités

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

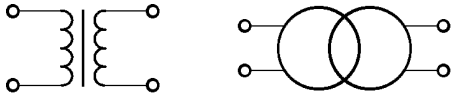

Figure 2.1 – Symboles d'un transformateur monophasé.

instantanées des tensions induites. Les deux possibilités sont le pas à gauche et le pas à droite (*figure 2.2*).

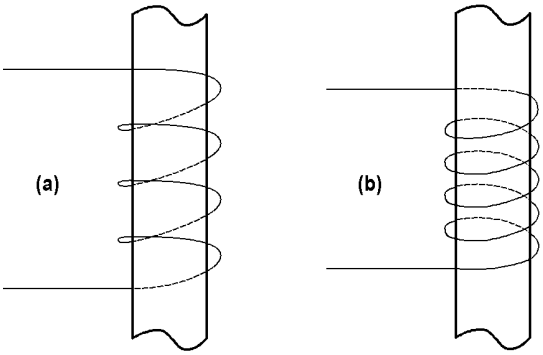

Figure 2.2 – Sens de bobinage : pas à gauche (a) et pas à droite (b).

L'important est de savoir si les deux enroulements sont de même sens ou de sens contraire. On a illustré les deux cas en représentant les deux bobines sur des colonnes opposées du circuit magnétique pour la clarté du schéma, bien que cela ne corresponde pas à la disposition réelle d'un transformateur (*figure 2.3*).

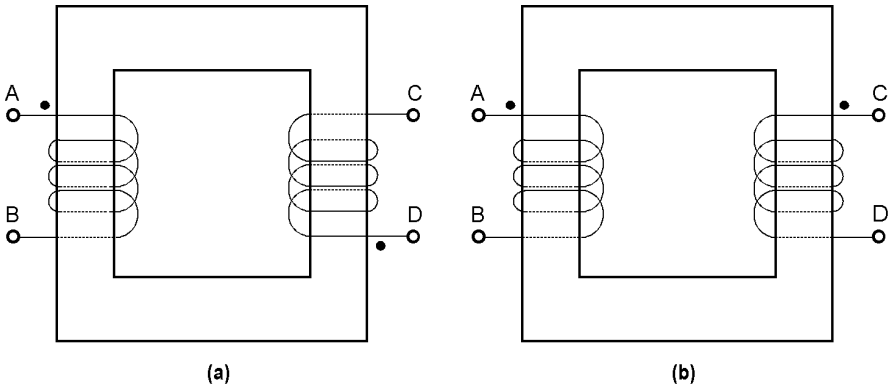

Figure 2.3 – Deux bobinages de même sens (a) ou de sens contraire (b).

Pour conserver une information sur les sens de bobinage avec le symbole du transformateur, une extrémité de chaque enroulement est munie d'un point (*figure 2.4*).

Ces bornes homologues correspondent à des points de même polarité instantanée. En effet, si à un instant donné la borne A du transformateur (a) est à une tension positive par rapport à l'autre extrémité B du primaire, le courant entre par A (le

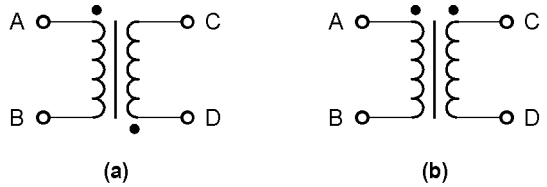

Figure 2.4 – Pointage des enroulements.

primaire est un récepteur) et crée un flux qui induit une force électromotrice dans le secondaire telle que la borne D soit positive par rapport à C. Si une charge est connectée sur le transformateur, le courant sortira à cet instant de la borne D (le secondaire est un générateur). Par contre, sur le transformateur (b), c'est la borne C qui serait positive par rapport à D à cet instant.

Avant de mettre en équations le transformateur, il est nécessaire de bien préciser les conventions de signe adoptées pour les différentes grandeurs électriques et magnétiques. Beaucoup de possibilités existent et il ne faut pas s'étonner de voir dans plusieurs ouvrages des formules qui diffèrent par leur signe : aucune n'est fausse, mais les auteurs ont simplement utilisé des conventions différentes. Pour notre part, nous choisirons les définitions qui suivent au plus près la réalité physique (*figure 2.5*).

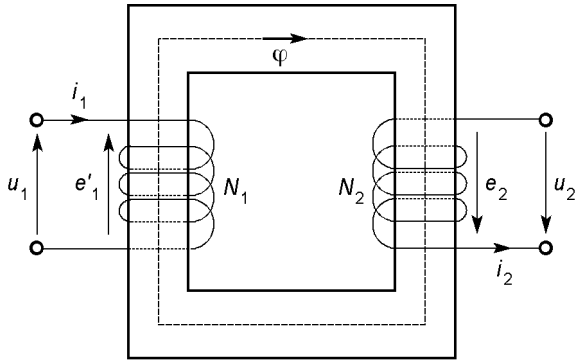

Figure 2.5 – Conventions de signe.

Ces conventions ont de plus l'avantage de faire apparaître des signes + dans les principales relations pratiques. Les enroulements ont été choisis de même sens, ce qui est *a priori* le plus naturel.

La première orientation est arbitraire : on a choisi le sens de parcours du circuit magnétique afin de pouvoir attribuer un signe aux flux. La bobine primaire est ensuite orientée en concordance avec le circuit magnétique : un courant primaire positif crée un flux positif. Par contre, le secondaire est orienté de telle façon qu'un courant positif crée un flux négatif. Cela correspond à la réalité physique puisque le primaire magnétise le noyau tandis que le secondaire tend à le démagnétiser.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Pour les tensions, on utilise la convention récepteur pour le primaire (qui constitue un récepteur vis-à-vis de la source) et la convention générateur pour le secondaire (qui constitue un générateur vis-à-vis de la charge). Pour le primaire, on définit une force contre-électromotrice d'induction (une force contre-électromotrice positive tend à faire circuler un courant négatif) et pour le secondaire, on définit une force électromotrice (une force électromotrice positive tend à faire circuler un courant positif). Encore une fois, ce choix correspond au rôle réel des enroulements.

2.2 Transformateur idéal

Des hypothèses très simplificatrices permettent de rendre compte des propriétés essentielles du dispositif : c'est le modèle du transformateur idéal. On considère que le circuit magnétique a une réluctance nulle et n'est source d'aucune perte, et que les enroulements ont une résistance nulle.

La loi de Faraday exprime la force contre-électromotrice e'_1 du primaire en fonction du flux φ et du nombre de spires N_1 de cet enroulement :

$$e'_1 = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

Le secondaire est traversé par le même flux, canalisé sans aucune fuite puisque la réluctance du circuit magnétique est nulle. La force électromotrice du secondaire s'exprime donc en fonction du flux φ et du nombre de spires N_2 de cette bobine :

$$e_2 = N_2 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

Comme les enroulements n'ont pas de résistance, la tension u_1 appliquée au primaire est égale à la force contre-électromotrice :

$$u_1 = e'_1 = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

Le flux est forcé : la tension de la source impose l'état magnétique du noyau.

La tension présente aux bornes du secondaire est égale à la force électromotrice induite :

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$$

Le quotient des deux tensions est constant :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Le nombre k est appelé rapport de transformation de l'appareil. Certains auteurs préfèrent utiliser le quotient inverse m et écrire :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{m}$$

Si $k > 1$, le transformateur est élévateur, si $k < 1$, il est abaisseur et si $k = 1$, l'appareil est un transformateur d'isolement.

Comme la réluctance du circuit magnétique est nulle, la relation d'Hopkinson impose une condition sur le courant i_1 du primaire et le courant i_2 du secondaire qui s'écrit :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$$

soit :

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{k}$$

Le rapport des intensités est l'inverse de celui des tensions.

Pour établir les relations entre tensions et entre courants lorsque le transformateur est représenté par son symbole, il suffit de suivre ces deux règles : les tensions des extrémités pointées ont même polarité instantanée et les forces magnétomotrices sont munies d'un signe + dans la relation d'Hopkinson si la flèche d'orientation du courant entre par une extrémité pointée, et d'un signe − dans le cas contraire (*figure 2.6*).

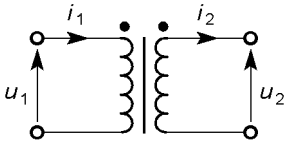

Figure 2.6 – Premier cas.

On remarque que l'on a inversé la position du secondaire par rapport à la disposition réelle. Cela n'a aucune importance puisque le circuit magnétique n'est plus représenté, mais que le sens relatif des bobinages est connu par le pointage.

La représentation est ainsi conforme aux habitudes pour un quadripôle (flèches des tensions vers le haut). Par application directe des règles précédentes, on écrit :

$$\frac{u_2}{u_1} = k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{k}$$

Trois autres cas sont possibles. Pour le deuxième (*figure 2.7*), on a :

$$\frac{u_2}{u_1} = -k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{k}$$

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

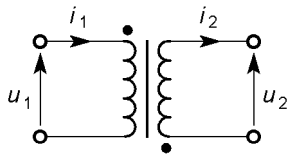

Figure 2.7 – Deuxième cas.

Pour le troisième cas (*figure 2.8*), on écrit :

$$\frac{u_2}{u_1} = k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{k}$$

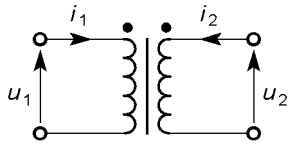

Figure 2.8 – Troisième cas.

Enfin, pour le quatrième cas (*figure 2.9*), on a :

$$\frac{u_2}{u_1} = -k$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{k}$$

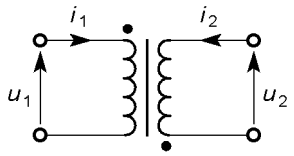

Figure 2.9 – Quatrième cas.

Quatre formes différentes peuvent ainsi être obtenues pour les deux relations de base d'un transformateur, selon les conventions de signe choisies. Dans la suite, nous nous placerons toujours dans le premier cas (signe + dans les deux relations).

Le transformateur idéal transmet l'énergie du primaire vers le secondaire sans aucune perte (rendement 100 %). En effet, la puissance instantanée appelée au réseau est :

$$p_1 = u_1 i_1$$

et la puissance fournie à la charge est :

$$p_2 = u_2 i_2$$

Compte tenu des relations entre tensions et entre courants, on a bien :

$$p_2 = ku_1 \frac{i_1}{k} = u_1 i_1 = p_1$$

Une propriété intéressante du transformateur idéal concerne le transfert d'une résistance en série avec le primaire vers le secondaire, ou l'opération inverse (*figure 2.10*).

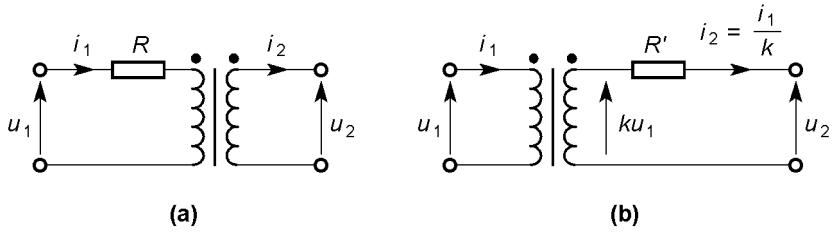

Figure 2.10 – Transfert d'une résistance du primaire vers le secondaire.

On peut écrire pour le circuit (a) :

$$u_2 = k\,(u_1 - Ri_1)$$

et pour le circuit (b) :

$$u_2 = ku_1 - R'\frac{i_1}{k}$$

Les deux relations sont identiques à condition que :

$$R' = k^2 R$$

On peut donc déplacer une résistance du primaire vers le secondaire, en multipliant sa valeur par le carré du rapport de transformation. Inversement, il est possible de déplacer une résistance du secondaire vers le primaire en divisant sa valeur par le carré du rapport de transformation. Ces deux propriétés sont également valables pour les inductances. Ces résultats sont utilisés pour modifier des schémas afin d'en faciliter l'emploi.

2.3 Transformateur réel

Le comportement des transformateurs s'écarte en plusieurs points de celui qui est prévu avec le modèle idéal. Tout d'abord, les enroulements présentent une certaine résistance, soit r_1 pour le primaire et r_2 pour le secondaire, ce qui conduit à des pertes par effet Joule. Ensuite, il existe des fuites de flux. Les lignes de champ ne se referment pas toutes dans le matériau ferromagnétique, certaines ont leur trajet partiellement dans l'air (*figure 2.11*).

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

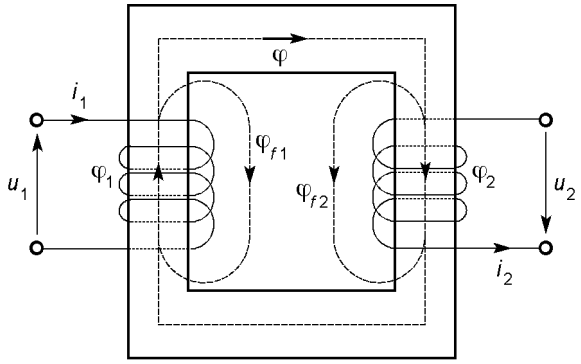

Figure 2.11 – Fuites de flux.

Le flux qui traverse le primaire est ainsi un peu différent de celui qui traverse le secondaire. En appelant φ le flux dans le circuit magnétique commun aux deux enroulements, φ_{f1} et φ_{f2} les flux de fuites pour le primaire et pour le secondaire, on peut exprimer les flux réels φ_1 et φ_2 dans les deux bobines :

$$\varphi_1 = \varphi + \varphi_{f1}$$

$$\varphi_2 = \varphi - \varphi_{f2}$$

Les réluctances des circuits magnétiques des fuites sont constantes car elles sont dues essentiellement à l'air (la réluctance de la partie ferromagnétique est très faible) et on peut écrire deux relations d'Hopkinson :

$$N_1 i_1 = \mathcal{R}_{f1}\varphi_{f1}$$
$$N_2 i_2 = \mathcal{R}_{f2}\varphi_{f2}$$

On en déduit l'expression de la force contre-électromotrice du primaire et celle de la force électromotrice du secondaire :

$$e'_1 = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi_1}{\mathrm{d}t} = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} + \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{f1}} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

$$e_2 = N_2 \frac{\mathrm{d}\varphi_2}{\mathrm{d}t} = N_2 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} - \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{f2}} \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

On définit alors les inductances de fuites des deux bobines par :

$$l_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{f1}}$$
$$l_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{f2}}$$

On a ainsi :

$$e'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt}$$
$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} - l_2 \frac{di_2}{dt}$$

Les lois des mailles appliquées aux circuits primaire et secondaire s'écrivent :

$$u_1 = e'_1 + r_1 i_1$$
$$u_2 = e_2 - r i_2$$

soit finalement :

$$u_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} + r_1 i_1 + l_1 \frac{di_1}{dt}$$
$$u_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} - r_2 i_2 - l_2 \frac{di_2}{dt}$$

En toute rigueur, le flux ne dépend pas seulement de la tension de la source, mais aussi de l'intensité au primaire. Toutefois, dans la pratique, la chute de tension dans r_1 et l_1 reste faible par rapport à la tension appliquée. On peut continuer à considérer que le flux est imposé par la source qui alimente le primaire, bien que ce résultat ne soit qu'approché.

Le rapport des tensions n'est pas constant, mais on peut se ramener à la relation valable pour un transformateur idéal en ne considérant que les grandeurs :

$$u'_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

et :

$$u'_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

On a ainsi :

$$\frac{u'_2}{u'_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

En ce qui concerne les courants, une autre modification apparaît car la réluctance du circuit magnétique est faible, mais n'est pas nulle. La relation d'Hopkinson s'écrit donc :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R}\varphi$$

Le rapport des courants n'est pas constant, mais on peut écrire :

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2 + \frac{\mathcal{R}\varphi}{N_1}$$

Cette relation peut devenir :

$$i_1 = i_{1t} + i_0$$

en posant :

$$i_{1t} = k i_2 \quad \text{et} \quad i_0 = \frac{\mathcal{R}\varphi}{N_1}$$

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

i_{1t} est appelé courant de travail ou courant utile, car c'est lui qui assure le transfert d'énergie du primaire vers le secondaire.

Le transformateur réel peut être décrit par un schéma équivalent pour rendre compte de l'ensemble des imperfections (*figure 2.12*).

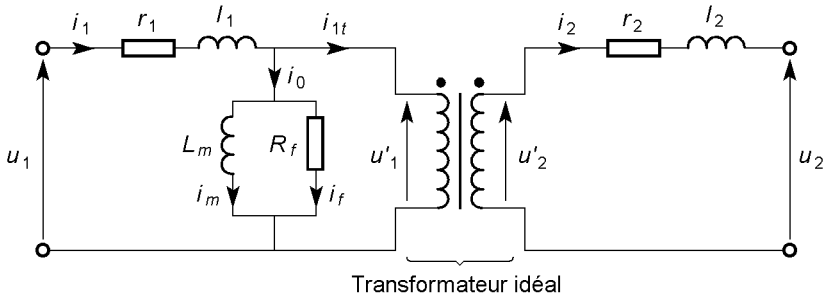

Figure 2.12 – Schéma équivalent du transformateur réel.

Ce modèle fait intervenir un transformateur idéal fictif, associé à des résistances et des inductances. Les lois des mailles pour l'entrée et la sortie du circuit donnent bien :

$$u_1 = u'_1 + r_1 i_1 + l_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

$$u_2 = u'_2 - r_2 i_2 - l_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

Le transformateur idéal assure les relations :

$$u'_2 = k u'_1$$

$$i_{1t} = k i_2$$

La branche placée en parallèle sur le primaire permet d'avoir :

$$i_1 = i_{1t} + i_0$$

Si la réluctance du circuit magnétique était constante, cette branche ne comporterait qu'une bobine idéale d'inductance :

$$L_m = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}}$$

On aurait bien :

$$u'_1 = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = L_m \frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t}$$

Cependant, les non-linéarités du matériau magnétique (saturation et hystérésis) compliquent les choses. Les effets magnétiques et énergétiques peuvent toutefois être correctement décrits en modélisant la branche considérée par une inductance L_m en parallèle avec une résistance R_f. Ce dernier élément permet de rendre compte des pertes ferromagnétiques (dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault). La justification précise de cette représentation sera faite au paragraphe suivant dans le cas particulier d'une tension d'alimentation sinusoïdale.

Le schéma équivalent complet décrit bien le fonctionnement du transformateur, mais son usage est difficile et surtout ses paramètres sont de mesure délicate. On préfère donc utiliser un schéma simplifié plus commode d'emploi. Pour cela, on estime que la circulation du courant i_0 dans r_1 et l_1 n'apporte qu'une chute de tension négligeable. La branche L_m, R_f est reportée à l'entrée du schéma (*figure 2.13*), puis la résistance et l'inductance sont ramenées au secondaire (*figure 2.14*). Du fait de la multiplication par k^2 de la résistance et de l'inductance du primaire, on a :

$$R_S = r_2 + k^2 r_1$$

$$L_S = l_2 + k^2 l_1$$

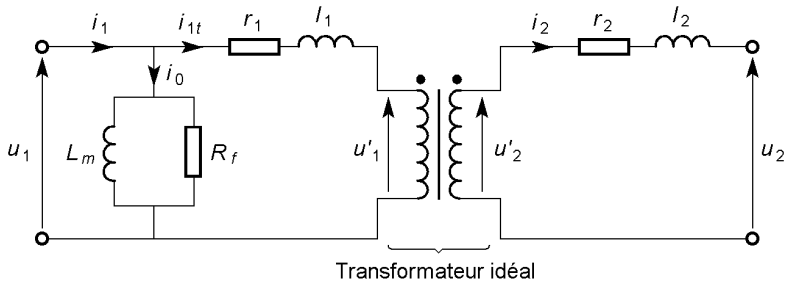

Figure 2.13 – Schéma équivalent approché.

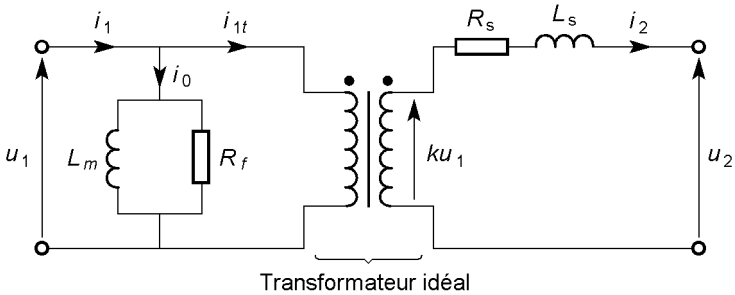

Figure 2.14 – Schéma équivalent avec résistance et inductance ramenées au secondaire.

2.4 Transformateur en charge sur redresseur

Le transformateur d'une alimentation continue classique fonctionne dans des conditions particulières. Le primaire étant branché sur le réseau, la tension appliquée est sinusoïdale, de fréquence 50 Hz et de valeur efficace 230 V :

$$u_1 = U_1\sqrt{2}\cos\omega t \quad \text{avec} \quad U_1 = 230\ \text{V} \quad \text{et} \quad \omega = 314\ \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$$

Le secondaire débitant sur un redresseur muni d'un filtre capacitif, le courant a la forme d'impulsions. Dans le cas d'un redressement monophasé, les impulsions

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

sont unidirectionnelles (*figure 2.15*) et l'intensité moyenne n'est pas nulle. Par contre, dans le cas du redressement biphasé (pont de Graetz), les impulsions sont bidirectionnelles (*figure 2.16*) et l'intensité moyenne est nulle.

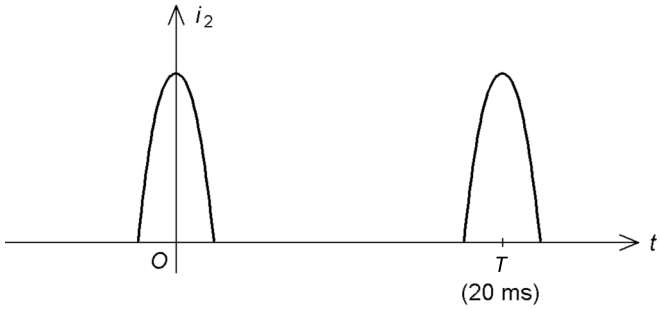

Figure 2.15 – Allure du courant appelé par un redresseur monophasé.

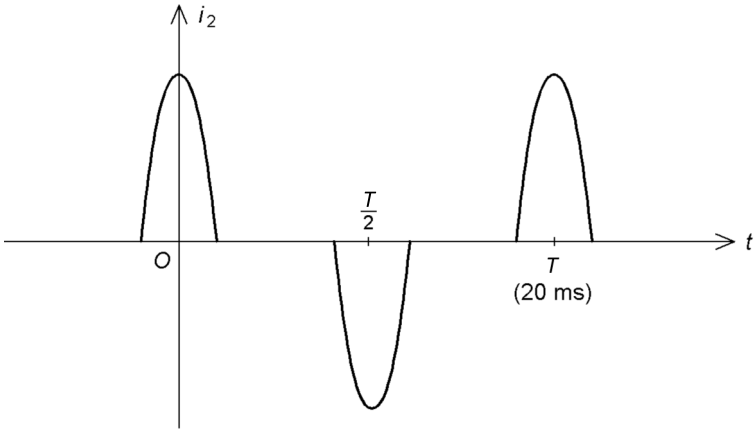

Figure 2.16 – Allure du courant appelé par un redresseur biphasé en pont de Graetz.

Le flux est forcé par la tension appliquée au primaire. En négligeant la chute de tension dans r_1 et l_1, on a :

$$u_1 \approx N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

et donc :

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1} \cos \omega t$$

On en déduit :

$$\varphi = \frac{U_1\sqrt{2}}{N_1\omega} \sin \omega t + \Phi_0$$

Φ_0 est une constante d'intégration qui n'est nulle que si le courant débité par le transformateur est alternatif (cas du redressement biphasé). Dans le cas contraire