



RAPPELS SUR

LE TRANSFORMATEUR

1/ INTRODUCTION

L'isolement galvanique entre l'entrée et la sortie des alimentations à découpage est assuré grâce à un *transformateur d'isolement* (fonctionnant à fréquence relativement élevée de manière à réduire sa taille). Ce transformateur peut également contribuer à abaisser ou élever la tension.

Le transformateur constitue un élément important des alimentations à découpage et intervient par ses caractéristiques propres dans le fonctionnement de ces convertisseurs.

Bien que les principes fondamentaux restent les mêmes, les transformateurs d'alimentation à découpage et leur fonctionnement diffèrent sensiblement des transformateurs industriels classiques utilisés en électrotechnique : tensions de forme carrée (ou rectangulaire), courants triangulaires avec éventuellement une composante continue, fréquence de fonctionnement élevée, réalisation technologique, enroulements multiples, éventualité de l'ouverture d'un des enroulements lorsqu'un semiconducteur se bloque...

Le but de ce chapitre est de donner les principes de base qui permettront de comprendre le fonctionnement des convertisseurs continu-continu isolés du chapitre H20.

Nous serons amenés notamment à considérer deux modes très différents de fonctionnement du "transformateur" utilisés dans les alimentations à découpage: fonctionnement effectif en transformateur et fonctionnement en "inductances couplées" qui désigne un fonctionnement où le transformateur fonctionne en stockage d'énergie ou comme l'on dit souvent en "étage tampon".

2/ GENERALITES SUR LE TRANSFORMATEUR

2- 1/ Transformateur à deux enroulements

Un transformateur est constitué par un circuit magnétique fermé ("noyau") sur lequel sont bobinés deux enroulements distincts : un enroulement "primaire" comportant N_1 spires et un enroulement "secondaire" comportant N_2 spires (Figure 1).

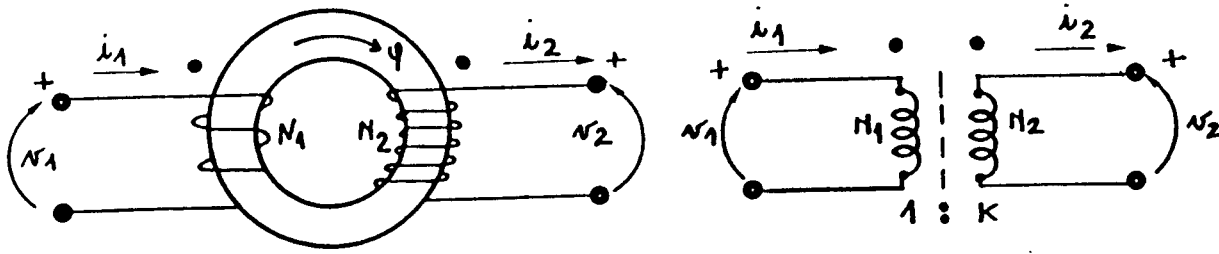


Figure 1 : transformateur à 2 enroulements
conventions et symboles

La forme idéale du circuit magnétique est le tore, qui permet de réduire au minimum les fuites. Sa perméabilité doit être la plus élevée possible; de même, sa résistivité doit être très élevée, pour minimiser les courants induits dans le noyau ("courants de Foucault"). Les transformateurs pour alimentations à découpage utilisent en général des noyaux ferrites qui répondent bien à ces critères.

2 - 2/ Repérage des enroulements

Dans un transformateur, le repérage des sens relatifs des enroulements est indiqué par des points (figure 1).

Signification des points : à partir de leur extrémité repérée par un point, tous les enroulements tournent dans le même sens autour du circuit magnétique commun.

- 1ère conséquence : les points repèrent les extrémités des enroulements par où doivent *rentrez* (ou *sortir*) tous les courants pour créer des flux de même sens dans le circuit magnétique commun.

- 2ème conséquence : si on applique aux bornes d'un enroulement une tension positive côté pointé, les tensions induites aux bornes des autres enroulements sont positives côté pointé. Ceci est très pratique pour raisonner avec les alimentations à découpage. On peut également utiliser ce résultat pour effectuer expérimentalement le repérage des enroulements d'un transformateur.

2 - 3/ Conventions de signe

Pour une mise en équation systématique d'un transformateur inséré dans un circuit électrique quelconque, il est logique d'adopter la même convention pour le sens positif du courant au primaire et au secondaire; par exemple, ces deux courants seront comptés positivement s'ils rentrent par le point.

Ceci conduit à écrire des relations où les courants, comme les tensions, sont considérés comme des grandeurs algébriques avec un sens positif *choisi arbitrairement*, sans référence explicite à leurs sens réels.

Dans le cas particulier qui nous intéresse, nous préférons adopter une convention plus physique, d'ailleurs très largement utilisée en électrotechnique, qui a l'avantage de se référer aux sens *réels* des courants et tensions, ce qui facilite la compréhension des phénomènes observés dans les convertisseurs



statiques.

Le primaire d'un transformateur se comportant comme un récepteur vis-à-vis du circuit qui l'alimente, on adoptera au primaire la *convention récepteur* ; si la tension V_1 est positive du côté pointé, le courant I_1 sera compté positif s'il *rentre* par le point (fig.1).

Au contraire, le secondaire se comporte comme un générateur pour la charge qu'il alimente; on adoptera donc au secondaire la *convention générateur* ; si la tension V_2 est positive du côté pointé - ce qui correspond à V_1 positive côté pointé - le courant I_2 sera compté positif s'il *sort* du point.

3/ MODELISATION DU TRANSFORMATEUR PARFAIT

Les hypothèses de ce modèle, appelé souvent "transformateur parfait" sont les suivantes :

- Il n'y a aucune fuite magnétique : tout le flux produit par un enroulement traverse l'autre (coefficient de couplage égal à 1).
- la perméabilité du noyau est infinie c'est-à-dire que sa réluctance est nulle
- la résistance électrique des enroulements est nulle.

3 - 1/ Théorie du transformateur parfait

La figure 2 représente le symbole du *transformateur parfait*

Si on applique une *tension* variable V_1 aux bornes des N_1 spires du primaire, un *flux magnétique* variable ϕ circule dans le tore et traverse *chaque spire* des bobinages primaire et secondaire; une tension induite V_2 apparaît donc au secondaire (ϕ est le flux à travers *une section droite* du tore).

La loi de Faraday permet d'écrire (avec les conventions de la figure 1):

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{et} \quad V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

d'où:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Cette relation entre valeurs *instantanées* des tensions primaire et secondaire entraîne la même relation entre *valeurs crêtes* et *valeurs efficaces*.

Il est important de noter que ce résultat, établi sans faire intervenir les courants, est valable quelle que soit la configuration du circuit au secondaire (enroulement secondaire ouvert ou fermé sur un circuit de charge).

Sur la figure 2, on vérifie que les tensions sont *de même signe sur les extrémités pointées* (V_1 positive côté pointé donne V_2 positive côté pointé)

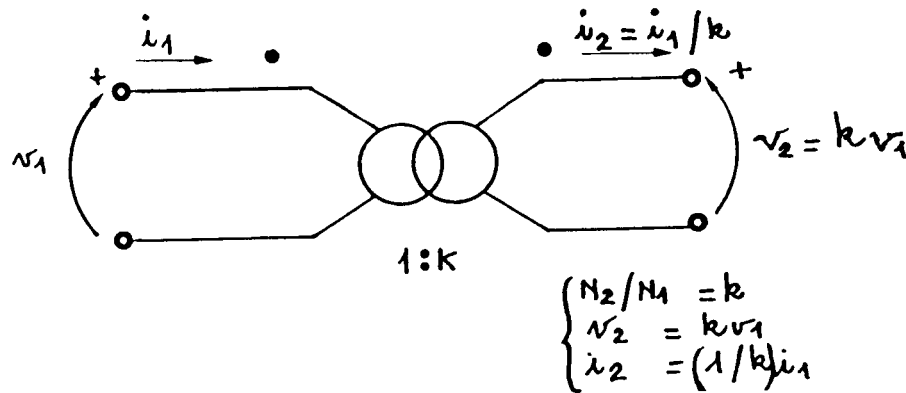


Figure 2 : schéma équivalent du transformateur parfait

Considérons maintenant le cas où le secondaire est fermé sur une charge passive et débite un courant i_2 ; le secondaire fournit donc de la puissance à la charge. Comme v_2 est positive côté pointé, le courant i_2 doit donc *sortir* du point (sens réel du courant).

Ecrivons que la réluctance \mathcal{R} du circuit magnétique est nulle: les ampères-tours du secondaire viennent se soustraire à ceux du primaire (avec les conventions de la figure 1, puisque i_2 *sort* du point), et on a :

$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = \mathcal{R} \cdot \Phi = 0$$

Dans un transformateur idéal, les ampères-tours du secondaire *compensent exactement* ceux du primaire; d'où:

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

soit encore:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{k}$$

Il en découle :

$$v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2$$

La puissance instantanée P_1 absorbée par le primaire est à tout instant égale à la puissance P_2 fournie par le secondaire.

Le transformateur ne fait que *transmettre* au secondaire la puissance qu'il absorbe au primaire.

3 - 2 / Transparence du transformateur parfait

Le transformateur idéal est caractérisé par un simple rapport de transformation k , sans dimension.

La tension au secondaire est l'image de la tension au primaire: $v_2 = k v_1$

De même, i_2 est l'image de i_1 : ($i_2 = i_1 / k$)

Si $k = 1$, on retrouve au secondaire les mêmes courant et tension qu'au primaire; le

transformateur apporte simplement un isolement entre primaire et secondaire.

Comme les grandeurs de sortie (courant, tension) sont des images des grandeurs d'entrée, on dit que le transformateur est *transparent* : il ne modifie pas la nature des branches auxquelles il est connecté.

Par exemple: si le primaire d'un transformateur parfait est fermé sur une source de tension, le secondaire se comportera comme une source de tension. De même, la source connectée au secondaire sera "vue" au primaire, à travers le transformateur transparent; sa nature ne sera pas modifiée et seule sa valeur sera éventuellement modifiée dans le rapport k . La figure 3 illustre ces différents cas.

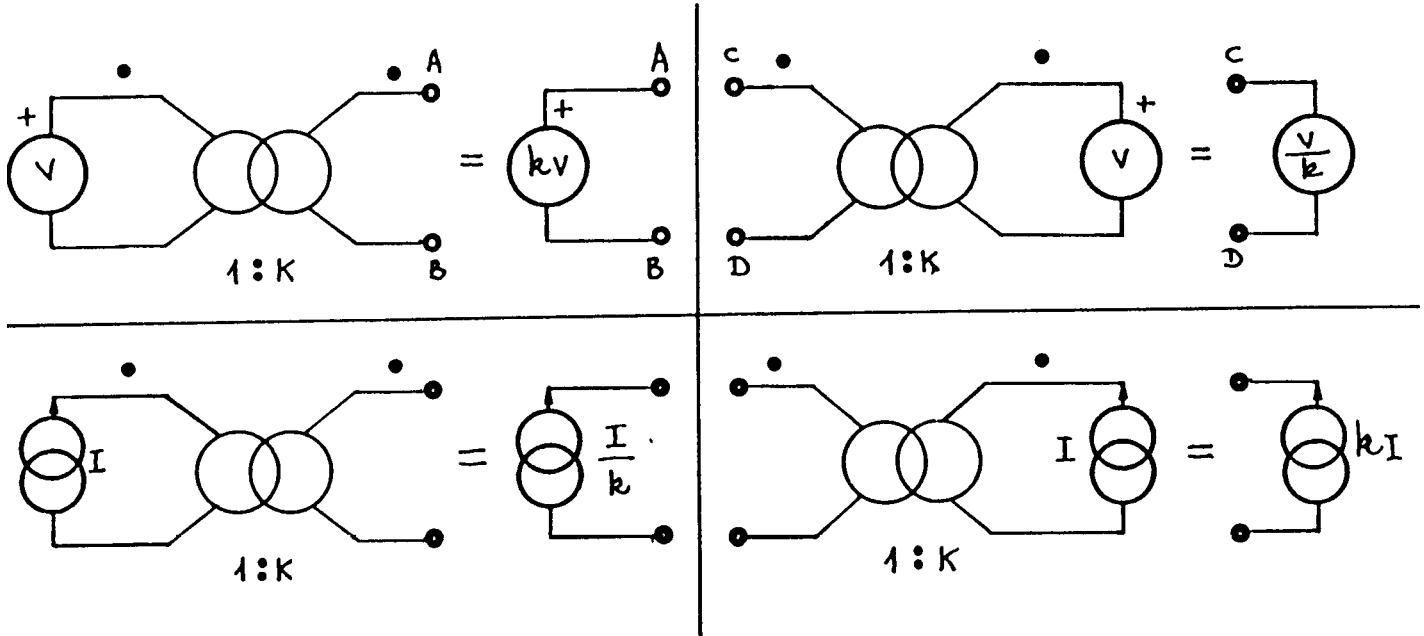


Figure 3 : transparence du transformateur parfait

3 - 3/ Propriété d'adaptation d'impédance

Si on branche une impédance Z au secondaire, cette impédance sera soumise à la tension V_2 et traversée par le courant I_2 ; quelle que soit leur forme, on pourra écrire, en utilisant la notion d'impédance généralisée (transformée de Laplace) :

$$V_2(p) = Z(p) \cdot I_2(p)$$

Regardons ce que cela entraîne côté primaire. D'après les relations entre courants et tensions dans un transformateur parfait, on obtient:

$$V_1(p) = Z(p) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 I_1(p)$$

Tout se passe comme si le générateur alimentant le primaire voyait une impédance Z égale à Z/k^2 .

Par raison de symétrie, toute impédance branchée côté primaire pourra être ramenée au secondaire, multipliée par k^2 .

Cette propriété d'adaptation d'impédance, qui traduit sous une autre forme la transparence du transformateur, est très utilisée en électronique; elle permet aussi de simplifier les raisonnements faisant intervenir des transformateurs en ramenant tout, soit au primaire, soit au secondaire.

4 / MODELISATION DU TRANSFORMATEUR PRENANT EN COMPTE LA RELUCTANCE

Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes :

- il n'y a pas de fuites magnétiques
- la perméabilité du circuit magnétique n'est pas infinie et la réluctance \mathcal{R} ne peut plus être considérée comme nulle.
- la résistance des enroulements est négligeable.

4- 1/ Théorie du transformateur prenant en compte la réluctance

Les équations électriques donnant V_1 et V_2 restant les mêmes que celles du modèle précédent, on a toujours: $V_2 / V_1 = k$

La relation entre les ampères-tours primaires et secondaires s'écrit maintenant:

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \mathcal{R} \cdot \varphi$$

que l'on peut mettre sous la forme :

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 + \frac{\mathcal{R} \varphi}{N_1} = I'_1 + I_m$$

Ceci traduit que le courant primaire se compose maintenant de deux parties:

- une composante $I'_1 = (N_2 / N_1) \cdot I_2$ qui est l'image du courant au secondaire.
- une composante $I_m = \mathcal{R} \cdot \varphi / N_1$, due à la réluctance du noyau, et qui sert à le magnétiser . Ce

courant porte le nom de "*courant magnétisant*". Lorsque le secondaire est ouvert ($I_2 = 0$), le courant magnétisant I_m s'identifie au courant primaire I_1 .

En faisant intervenir le flux total $\Phi_1 = N_1 \cdot \varphi$ à travers les N_1 spires du primaire, on obtient:

$$\Phi_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} I_m$$

Le terme (N_1^2 / \mathcal{R}) qui traduit une relation de proportionnalité entre le flux φ et le courant I_m est homogène à une inductance dite "*inductance magnétisante*". Cette inductance s'identifie avec l'inductance propre du primaire. C'est l'inductance que l'on mesurera aux bornes du primaire lorsque le secondaire est ouvert.

4-2/ Schéma équivalent

D'après ce qui précède, on peut représenter un transformateur de réluctance non nulle par un schéma équivalent (figure 4) comportant:

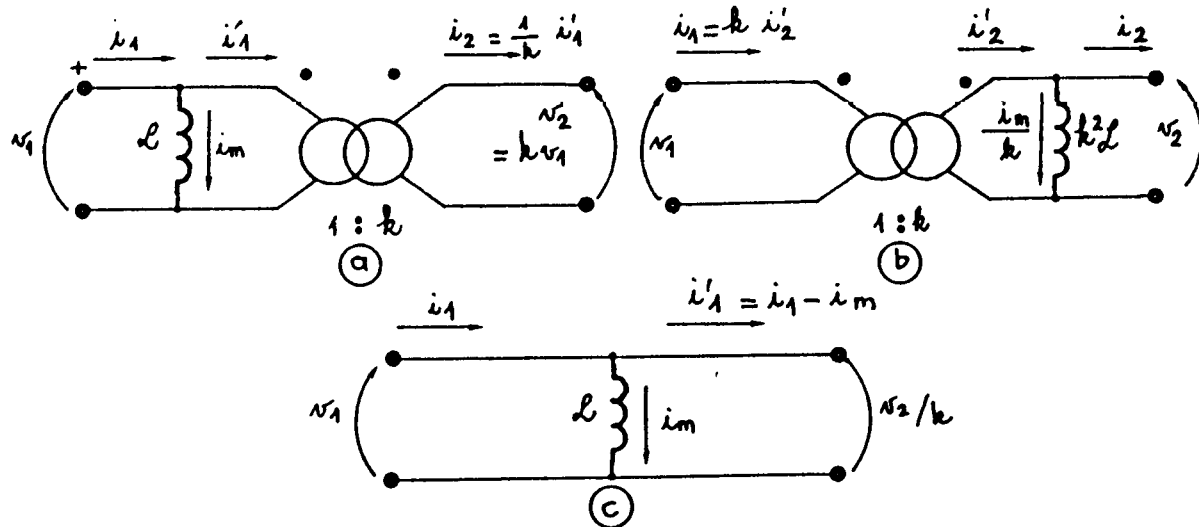


Figure 4 : schémas équivalents du transformateur avec inductance magnétisante

- un transformateur parfait de rapport k dont le courant primaire est i_1' , image de i_2
- une inductance $\mathcal{L} = N_1^2 / \mathcal{R}$ représentant l'inductance magnétisante, traversée par le courant magnétisant $i_m = \mathcal{R} \cdot \phi / N_1$

L'inductance magnétisante, qui traduit le fait que la réluctance du noyau n'est pas nulle, peut être représentée

- soit au primaire, avec la valeur \mathcal{L} (figure 4a)
- soit au secondaire, avec la valeur $k^2 \mathcal{L} = L_2$ (figure 4b), en vertu de la propriété d'adaptation d'impédance;

En ramenant tout au primaire on aboutit au schéma simplifié de la figure 4c.

On peut de la même manière tout ramener au secondaire.

4 - 3 / Règles fondamentales

4-3-1/ Première règle

Avec les hypothèses faites on peut écrire

$$V_1 = N_1 d\phi / dt$$

Puisque ϕ est l'intégrale de la tension, cette dernière ne doit pas présenter de composante continue

En effet s'il y a une composante continue sur la tension, le flux ϕ , et donc le courant I_m croissent indéfiniment (avec les hypothèses simplifiées du modèle 1). D'où l'énoncé de la première règle :

En régime permanent la tension moyenne au primaire (donc au secondaire) d'un transformateur doit être nulle

4-3-2/ Deuxième règle

L'énergie magnétique emmagasinée dans un transformateur est égale à :

$$W = \frac{1}{2} \mathcal{L} I_m^2 = \frac{1}{2} \mathcal{R} \phi^2$$

L'énergie, et par conséquent le flux, ne peuvent pas subir de discontinuité. D'où le résultat fondamental suivant :

Dans un transformateur le flux ϕ est une variable d'état.

Il est très important de remarquer que cette énergie, qui traduit le fait que le noyau a été magnétisé (création d'un flux ϕ), est *stockée dans le circuit magnétique* (constitué ici uniquement du tore puisqu'on suppose qu'il n'y a pas de fuites), *et non pas dans un enroulement* ; (on montre d'ailleurs que l'énergie magnétisante que peut stocker un noyau magnétique est proportionnelle à son volume).

Cette énergie pourra donc être récupérée aussi bien côté secondaire que côté primaire, indépendamment du fait qu'elle a été créée par le courant primaire.

Afin de pouvoir écrire des relations portant sur les grandeurs *électriques*, sans faire intervenir explicitement le flux magnétique, il est commode de faire intervenir la notion *d'Ampères-tours magnétisants* définis, d'après les relations écrites plus haut par :

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \mathcal{R} \phi = N_1 \cdot I_m$$

La deuxième règle peut donc s'énoncer :

Dans un transformateur, les ampères-tours magnétisants ne peuvent pas subir de discontinuité.

Ainsi, toute discontinuité du courant au primaire devra être compensée par une discontinuité au secondaire (ou éventuellement dans un troisième enroulement) telle que les ampères-tours magnétisants ne subissent pas de discontinuité.

Un exemple de discontinuité de ce type est observable dans le convertisseur type "fly-back" : le courant I_m côté primaire s'annule brusquement et est remplacé instantanément par un courant I_m/k au secondaire.

Conséquence pour les alimentations à découpage :

On pourra ouvrir un enroulement de transformateur (provoquer le blocage d'un semiconducteur) à condition d'*assurer la continuité du flux, donc des ampère-tours magnétisants*; pour cela, il suffit que le courant magnétisant puisse circuler dans un autre enroulement. Eventuellement, on ajoutera un troisième enroulement, spécialement prévu à cet effet. Cet enroulement est appelé : " enroulement de démagnétisation".

5/ FONCTIONNEMENT DU TRANSFORMATEUR EN INDUCTANCES COUPLEES

Il s'agit d'un mode particulier de fonctionnement du transformateur que l'on rencontre dans les alimentations du type "fly-back", dans lequel les deux enroulements, primaire et secondaire, *ne conduisent jamais en même temps*. Pour étudier ce fonctionnement nous utiliserons le modèle décrit au paragraphe 4.

- Lorsque le secondaire est ouvert: l'enroulement primaire se réduit à une inductance $L_1 = \mathcal{L}$.

(fig. 5a) Le courant primaire I_1 se confond avec le courant magnétisant I_m . Le noyau stocke une énergie $W = 1/2 \mathcal{L} I_1^2$ comme on vient de le voir. On a toujours $V_2 = N_2 / N_1 \cdot V_1$ (mais $I_2 = 0$!!!)

- Lorsque le primaire est ouvert: le secondaire se réduit à une inductance $L_2 = k^2 \mathcal{L}$ (fig. 5b).

On a: $V_2 / V_1 = N_2 / N_1$ et: $I_1 = 0$.

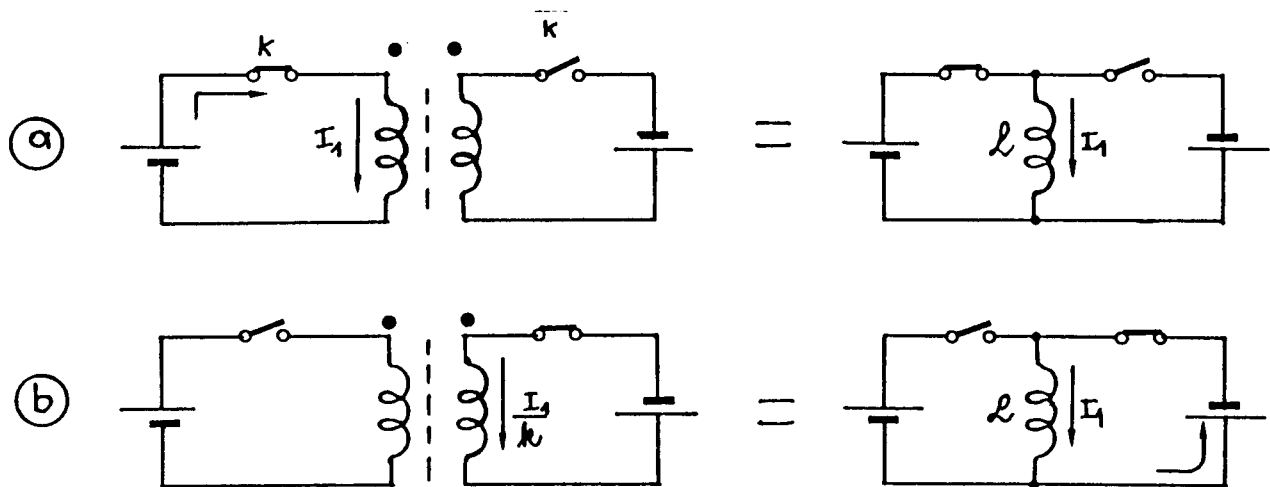


Figure 5 : Transformateur fonctionnant en inductances couplées

L'énergie précédemment stockée *dans le noyau* à travers le primaire peut alors être récupérée au secondaire. Rappelons, d'après ce que l'on a vu au paragraphe précédent, qu'il est impératif que cette énergie ne subisse pas de discontinuité, c'est-à-dire que l'ouverture du circuit primaire s'accompagne de façon simultanée de la fermeture du circuit secondaire.

Ce mode de fonctionnement se distingue radicalement du fonctionnement classique en transformateur car

- le transfert de puissance du primaire vers le secondaire n'est pas instantané; il se fait en deux temps: stockage d'énergie puis récupération.

- on n'a plus de transparence primaire-secondaire: celui des deux enroulements qui conduit se comporte comme une inductance. Selon le cas on verra une inductance, soit au primaire, soit au secondaire.

Pour ce fonctionnement, il est préférable alors de parler de "fonctionnement en inductances couplées", plutôt que de transformateur, bien que la relation $V_2 / V_1 = N_2 / N_1$ reste valable.

6/ INFLUENCE D'UN TRANSFORMATEUR SUR LA NATURE DES SOURCES

Par suite de la présence d'une branche courant (inductance magnétisante \mathcal{L}) pouvons-nous continuer à considérer que le transformateur est transparent et reflète toujours la nature de la branche connectée aux bornes de l'autre enroulement ou bien aurons-nous une branche courant ?

Pour répondre à cette question, nous serons, ici encore, amenés à distinguer les deux types de fonctionnement du transformateur :

- primaire et secondaire conduisant tous les deux en même temps : fonctionnement effectif en transformateur

- un enroulement ouvert : transformateur se réduisant à une inductance

Dans les alimentations à découpage, le blocage d'un semiconducteur peut faire passer d'un cas à l'autre.

6-1/ Un des deux enroulements est ouvert (fonctionnement en inductances couplées)

Supposons par exemple que le circuit secondaire est ouvert (cas où le secondaire "voit" un semiconducteur bloqué). Le schéma équivalent correspondant est représenté sur la figure 6. Vu au primaire, le transformateur se réduit à \mathcal{L} ; la partie du convertisseur située en amont du transformateur voit une branche courant. Cette configuration ne sera donc possible que si cette partie du convertisseur se comporte, elle, comme une branche tension.

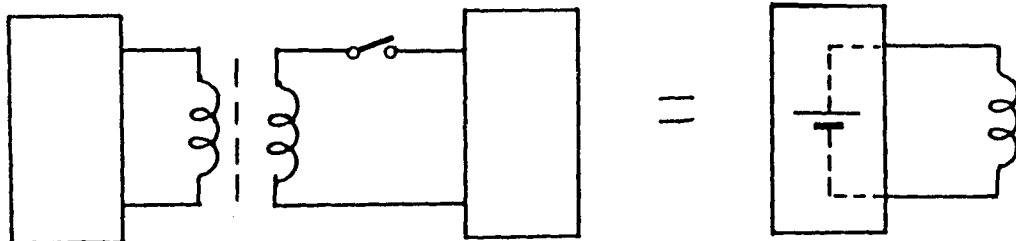


Figure 6 : Influence d'un transformateur sur la nature des sources lorsqu'un des deux enroulements est ouvert