

Chapitre 3 : Transformation de l'énergie électrique

L'électricité se rencontre essentiellement sous trois formes : le courant continu (Direct Current) ; le courant alternatif (Alternative Current) de fréquence celle qui est distribuée à l'ordinaire (50 Hz) ; le courant alternatif de fréquence f différente de 50 Hz. Ces différentes espèces d'électricité se convertissent les unes vers les autres par les dispositifs dont les noms figurent dans le tableau :

depuis vers	DC (courant continu)	AC 50 Hz (courant alternatif)	AC $f > 50$ Hz (courant alternatif)
DC	hacheur	redresseur	redresseur
50 Hz AC	onduleur	transformateur ^a	-
$f > 50$ Hz AC	onduleur	via étage continu ^b	transformateur
$f < 50$ Hz AC	onduleur	cycloconvertisseur	-

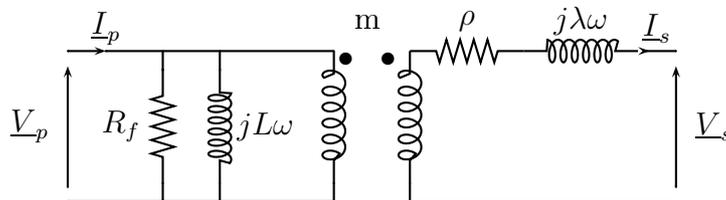
a. Le gradateur est également utilisé.

b. La conversion d'un courant alternatif à 50 Hz vers un courant alternatif de fréquence supérieure se fait par l'intermédiaire d'un étage de conversion vers le courant continu que par l'utilisation du cycloconvertisseur

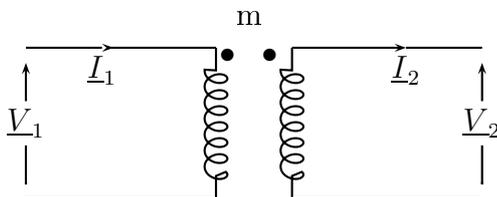
La conversion à fréquence fixe

Le transformateur monophasé

Le transformateur monophasé est composé d'un circuit magnétique autour duquel sont bobinés deux enroulements : l'un est appelé le primaire et l'autre le secondaire. La structure est donc identique à celle des deux bobines couplées vue à la séance 1, mais les équations électriques sont un peu modifiées pour les rendre d'utilisation aisée pour tel ou tel autre usage. Le schéma pratique pour l'utilisateur du transformateur est



où V_p , I_p sont les tensions et courant au primaire ; V_s , I_s sont les tensions et courant au secondaire. L'idéographie



symbolise les liaisons

$$\begin{cases} \underline{V}_1 &= m \underline{V}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2/m \end{cases}$$

qui sont véritablement les relations de transformation de tension et de courant. Le coefficient m s'appelle le rapport de transformation : c'est le rapport du nombre de tours de l'enroulement primaire par le nombre de tours de l'enroulement secondaire. Si la tension est multipliée par m alors le courant est divisé par m de manière que la puissance complexe soit conservée

$$\underline{V}_1 \underline{I}_1^* = \underline{V}_2 \underline{I}_2^*$$

Les autres coefficients du schéma sont

- R_f la résistance modélisant les pertes fer du transformateur ; i.e. les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans les tôles du transformateur ;
- L l'inductance de magnétisation ;
- λ la somme de l'inductance de fuite du secondaire et de celle du primaire ramenée au secondaire ;
- ρ la somme de la résistance du secondaire et de la résistance du primaire ramenée au secondaire.

Il est tout à fait normal que ces coefficients paraissent assez cryptiques en l'absence d'une analyse plus fine du passage du modèle de bobines couplées à celui du transformateur.

Ce modèle de transformateur est très pratique du point de vue de l'utilisateur. En effet si la tension primaire est connue, alors la tension secondaire à vide est $\underline{V}_s = m \underline{V}_p$ et ainsi le secondaire peut être vu comme un générateur d'impédance interne $\rho + j\omega\lambda$ et de force électromotrice $m \underline{V}_p$. D'autre part les pertes fixes dans le transformateur quelle que soit sa charge sont $|\underline{V}_p|^2/R_f$ et la puissance réactive consommée $|\underline{V}_p|^2/(L\omega)$.

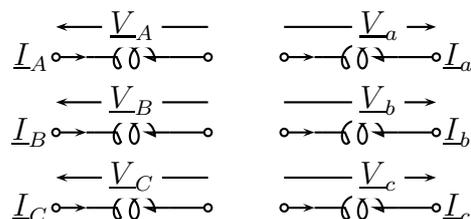
Le schéma du transformateur est donc très pratique d'utilisation, mais il faut retenir cependant qu'il est le résultat d'un certain nombre d'approximations valables seulement au voisinage de son point de fonctionnement nominal.

Le transformateur triphasé

Le transformateur triphasé est composé d'un circuit magnétique comportant trois colonnes sur chacune desquelles sont bobinées au moins deux enroulements : l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire. Le cas où le transformateur comporte deux enroulements secondaires est fréquent.

Ramener le fonctionnement équilibré en triphasé d'un tel transformateur à un schéma monophasé équivalent et donc de décrire chacune des trois phases par le schéma électrique du transformateur monophasé avec une identification claire des coefficients de ce schéma est un exercice assez technique.

Toutefois l'exercice est simplifié si le transformateur est considéré comme idéal ; il ne reste plus que le rapport de transformation à examiner. Pour expliquer cela, convenons de représenter ainsi le transformateur à un seul secondaire



où le primaire est à gauche (grandes lettres), le secondaire à droite (petites lettres) et sont indiquées l'orientation des courants et tensions de phases qui est entrante pour le primaire et sortante pour le secondaire. Les tensions de ligne (i.e. entre deux phases) sont

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{V}_A - \underline{V}_B & ; & & \underline{U}_{BC} &= \underline{V}_B - \underline{V}_C & ; & & \underline{U}_{CA} &= \underline{V}_C - \underline{V}_A \\ \underline{U}_{ab} &= \underline{V}_a - \underline{V}_b & ; & & \underline{U}_{bc} &= \underline{V}_b - \underline{V}_c & ; & & \underline{U}_{ca} &= \underline{V}_c - \underline{V}_a \end{aligned}$$

et bien sûr

$$\begin{aligned} \underline{V}_A &= \underline{V}_p & ; & & \underline{V}_B &= a^2 \underline{V}_p & ; & & \underline{V}_C &= a \underline{V}_p & ; & & \underline{I}_A &= \underline{I}_p & ; & & \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_p & ; & & \underline{I}_C &= a \underline{I}_p \\ \underline{V}_a &= \underline{V}_s & ; & & \underline{V}_b &= a^2 \underline{V}_s & ; & & \underline{V}_c &= a \underline{V}_s & ; & & \underline{I}_a &= \underline{I}_s & ; & & \underline{I}_b &= a^2 \underline{I}_s & ; & & \underline{I}_c &= a \underline{I}_s \\ \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_p & ; & & \underline{U}_{BC} &= a^2 \underline{U}_p & ; & & \underline{U}_{CA} &= a \underline{U}_p & ; & & \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_s & ; & & \underline{U}_{bc} &= a^2 \underline{U}_s & ; & & \underline{U}_{ca} &= a \underline{U}_s \end{aligned}$$

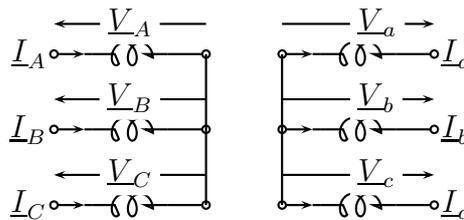
de manière que

$$\underline{U}_p = (1 - a^2) \underline{V}_p & ; & \underline{U}_s = (1 - a^2) \underline{V}_s$$

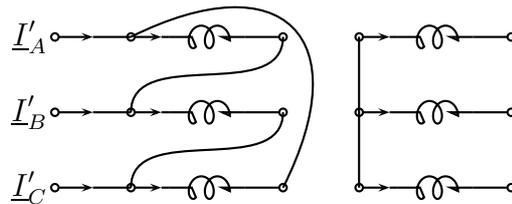
Le rapport de transformation d'une phase primaire par rapport à une phase secondaire est

$$m_0 = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_p} = \frac{\underline{U}_s}{\underline{U}_p}$$

c'est celui qui a lieu dans le cas où le couplage des phases primaire et secondaire est de type étoile :



Mais par contre dans le cas où le primaire est connecté en triangle :



les trois fils sortant du primaire sont parcourus par des courants

$$\underline{I}'_A = \underline{I}'_p & ; & \underline{I}'_B = a^2 \underline{I}'_p & ; & \underline{I}'_C = a \underline{I}'_p$$

où

$$\underline{I}'_p = (1 - a) \underline{I}_p$$

et les tensions de phase ne sont pas accessibles en l'absence de neutre, il faut utiliser les tensions de lignes

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}'_p & ; & \underline{U}'_{BC} = a^2 \underline{U}'_p & ; & \underline{U}'_{CA} = a \underline{U}'_p$$

pour lesquelles

$$\underline{U}'_p = \underline{V}_p$$

Comme d'autre part les tensions de lignes au secondaire sont toujours paramétrisées par

$$\underline{U}_s = (1 - a^2) \underline{V}_s$$

et que le rapport de transformation d'une phase par rapport à une phase primaire reste

$$m_0 = \frac{V_s}{V_p} = \frac{U_s}{U_p}$$

il vient que le rapport de transformation entre l'entrée du transformateur et sa sortie doit être calculé par rapport aux tensions de lignes comme

$$\underline{m} = \frac{U_s}{U_p} = m_0 \frac{U_p}{U_p} = m_0 \frac{(1 - a^2) V_p}{V_p} = m_0 (1 - a^2)$$

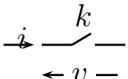
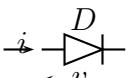
c'est un rapport complexe.

D'autres couplages sont possibles, le travail de les recenser et de déterminer les rapports de transformation est laissé en exercice.

La conversion électronique

Les composants de puissance

En plus des composants déjà connus, les dispositifs utiles à la description de la conversion électronique sont, en première approche, l'interrupteur et la diode.

nom du dispositif	symbole	relation
interrupteur		Si k ouvert $i = 0$, si k fermé $v = 0$
diode		$v i = 0$ et ($i \geq 0$ ou $v \leq 0$)

La relation entre tension et courant aux bornes de l'interrupteur est

$$v i = 0$$

où la branche $v = 0$ correspond à l'état fermé de l'interrupteur ($k = F$) et la branche $i = 0$ à l'état ouvert ($k = O$).

Tous les circuits d'électronique de puissance peuvent être décrits par un graphe reliant les éléments de l'ensemble des composants de circuit électrique déjà décrits au chapitre 1 auquel on ajoute l'interrupteur muni d'une description des conditions dans lesquelles il est ouvert ou fermé.

Il est cependant intéressant d'introduire la diode comme dispositif indépendant puisque contrairement à l'interrupteur elle existe comme composant. C'est un interrupteur qui est ouvert quand $v \leq 0$ (la diode est alors dite bloquée) et fermé quand $i > 0$ (la diode est dite passante). Un qualificatif souvent utilisé pour la diode est que c'est un interrupteur unidirectionnel (le courant ne peut passer que dans un seul sens) et non-commandé (c'est le circuit extérieur à elle qui détermine son état).

L'interrupteur n'est pas un composant mais plutôt une fonction qui peut être réalisée au moyen de deux composants : le transistor et le thyristor.

Le transistor est un composant qui comporte trois bornes appelée l'émetteur, le collecteur et la base : il se comporte comme un interrupteur qui est fermé tant qu'une certaine tension est maintenue sur la base et ouvert autrement.

Le thyristor est également un composant à trois bornes, qui se comporte comme un interrupteur ouvert tant qu'une certaine tension n'a pas été appliquée sur sa base ; ensuite il se comporte comme une diode tant que le courant qui le traverse est positif.

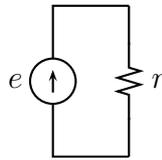
Par opposition à la diode, ces deux composants sont dit commandés puisqu'ils se ferment sous l'action d'une tension de commande. Mais une étude un peu précise de leur fonctionnement nécessiterait plus de temps que l'on souhaite ici en accorder, d'autant qu'elle nécessite quand même l'introduction de quelques notions de physique du solide afin de ne pas rester dans la simple description phénoménologique.

Les transistors et thyristor sont unidirectionnels, pour réaliser avec eux des interrupteurs bidirectionnels il est nécessaire de réaliser des montages comportant plusieurs de ces composants.

Le filtrage

Les deux filtres utilisés sont l'inductance qui, placée en série avec une charge, limite les variations du courant dans cette charge ; et la capacité qui, placée en parallèle à une charge, limite les variations de tensions aux bornes de cette charge.

Par exemple dans un circuit d'une tension débitant sur une résistance



l'introduction en série d'une inductance de lissage fait que le courant dans la résistance est plus lisse qu'il ne l'aurait été sans la présence de cette inductance.

$$e(t) = E + \sqrt{2} \Re\{V \exp^{j \omega t}\} \implies \begin{cases} \text{avec } l & i(t) = \frac{E}{r} + \sqrt{2} \Re\left\{\frac{V}{\sqrt{r^2 + (l\omega)^2}} \exp^{j(\omega t + \varphi)}\right\} \\ \text{sans } l & i(t) = \frac{E}{r} + \sqrt{2} \Re\left\{\frac{V}{r} \exp^{j \omega t}\right\} \end{cases}$$

l'amplitude de la composante fluctuante est réduite de $r/\sqrt{r^2 + (l\omega)^2}$.

La synthèse des convertisseurs

Avec l'idée d'interrupteur commandé et de diode, avec la connaissance des composants de circuit électrique, la discipline qui consiste à trouver des montages réalisant des fonctions souhaitées s'appelle la synthèse des convertisseurs.

Pour l'instant, c'est une technique qui procède de façon inverse : la connaissance a priori de montages de base permet de dégager un catalogue de fonctions parmi lesquelles peuvent se faire les choix.

Références

- [1] B. Hochart, « Le transformateur de puissance », Technique et Documentation (Lavoisier), 1988. (Pour des compléments sérieux sur les transformateurs.)
- [2] C. Lander, « Électronique de puissance », Édiscience, 1989. (Pour une approche générale de l'électronique de puissance.)

Exercices

1. Transformateur monophasé

a) identifier les valeurs des coefficients du schéma équivalent du transformateur : l'essai à vide (comprendre le secondaire à vide et le primaire alimenté) de transformateur monophasé fournit les valeurs

$$V_{p0} = 230 \text{ V} \quad ; \quad I_{p0} = 0.95 \text{ A} \quad ; \quad P_0 = 52.9 \text{ W} \quad ; \quad V_{s0} = 115 \text{ V}$$

l'essai en court-circuit (comprendre le primaire court-circuité, le secondaire alimenté) fournit

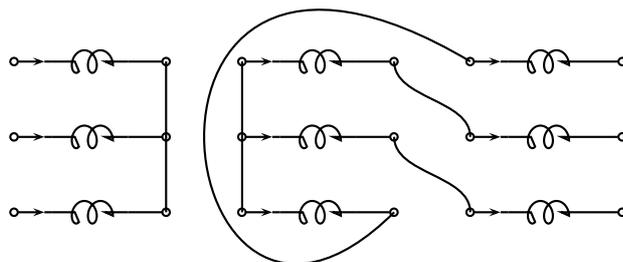
$$V_{scc} = 5 \text{ V} \quad ; \quad I_{scc} = 12.1 \text{ A} \quad ; \quad P_{cc} = 14.7 \text{ W}$$

b) on utilise ce transformateur pour alimenter une charge d'impédance $z = 5 + 4.6j \Omega$ quel est le rendement du transformateur ?

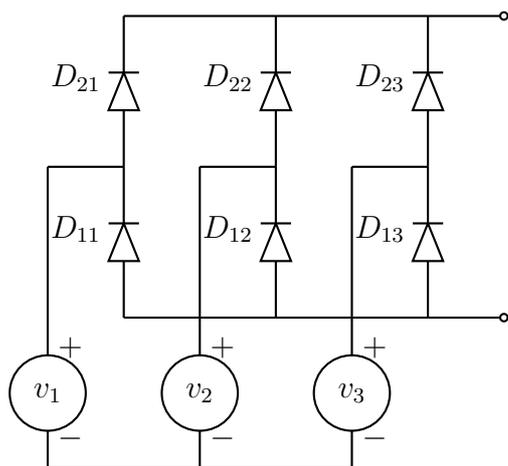
2. Branchements dans un transformateur triphasé

a) Étudier toutes les possibilités de branchement d'un transformateur triphasé à un secondaire.

b) Même question dans le cas où le transformateur possède deux secondaires. On se limitera au montage zig-zag.



3. Étude du pont de Graëtz



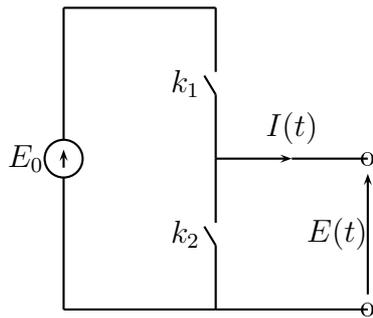
a) Montrer que si on appelle v_1, v_2, v_3 les tensions entre phase et neutre d'une alimentation triphasé, la tension de sortie à vide d'un pont de Graetz est

$$\max\{(v_1, v_2, v_3)\} - \min\{(v_1, v_2, v_3)\}$$

En déduire la valeur de la composante continue de cette tension dans le cas où l'alimentation est équilibrée.

b) Calculer l'ondulation crête à crête de la tension de sortie.

4. Étude d'un hacheur à 2 quadrants



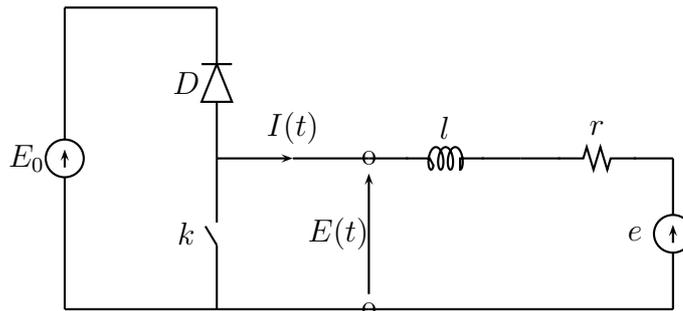
$0 < t < \Theta T$: K_1 fermé; K_2 ouvert
 $\Theta T < t < T$: K_1 ouvert; K_2 fermé
 +périodicité période T
 Θ est le rapport cyclique de K_1

a) Calculer la tension moyenne à vide.

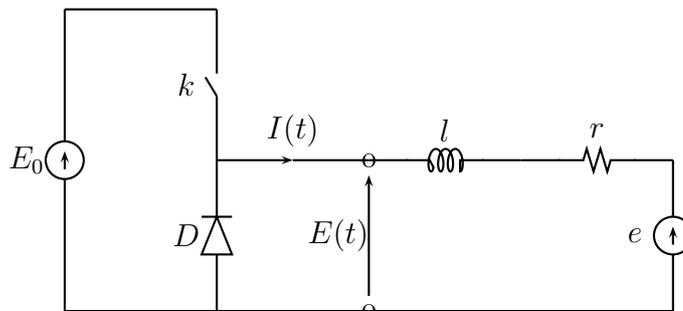
b) On charge sur une résistance r en série avec une force électromotrice e . Quel est le courant moyen ? Tracer qualitativement l'allure de $I(t)$. Toujours qualitativement, qu'arrive-t-il si on intercale une inductance en série entre la charge et le hacheur ?

c) On intercale une inductance de lissage l . Quel est le courant moyen ? Tracer qualitativement l'allure du courant $I(t)$.

d) Expliquer le fonctionnement de

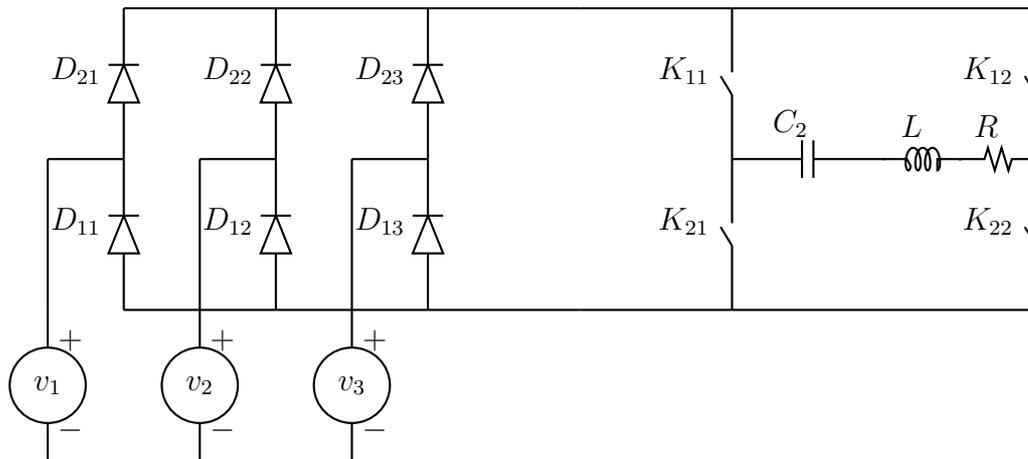


e) Expliquer le fonctionnement de



5. Onduleur à résonance série monophasé alimenté par un pont de Graëtz

Expliquer le fonctionnement de



- a) Quel découplage peut-il être fait pour ramener ce circuit à un circuit plus simple ?
- b) Comment faut-il alors commander les interrupteurs pour injecter un courant voisin d'un courant sinusoïdal de fréquence f à la charge R-L ?
- c) Quelle est la fonction de C_2 ?