

ENRS8AB : Éléments de base du génie électrique

S. Dufour

2A - Département Energie - Année 2024/2025



Sommaire

1	Transformation de l'énergie électrique	3
1.1	La conversion à fréquence fixe	3
1.2	La conversion électronique	7
1.3	Références	10
1.4	Exercices	11

Introduction et plan de l'enseignement

Le propos de l'enseignement est de décrire l'essentiel de ce qu'il faut savoir des différents objets du génie électrique ainsi que de leurs connexions en vue d'utilisations usuelles. Ce polycopié a été élaboré par G. Vinsard et S. Dufour spécifiquement pour dans ce but.

Il y a sept séances école et une séance de travaux pratiques, correspondant à

1. les circuits électriques monophasés ; le couplage inductif ;
2. les circuits électriques triphasés équilibrés ;
3. la production, le transport et la consommation d'énergie électrique (modèles de réseaux électriques) ;
4. la transformation de l'énergie électrique (convertisseurs statiques : transformateurs et dispositifs électroniques) ;
5. la machine asynchrone (son fonctionnement du point de vue de l'utilisateur) ;
6. l'alternateur synchrone ;
7. une séance de démonstration (à l'ENSEM) où les objets et leur fonctionnement seront montrés ;

1 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)
DC	hacheur	redresseur ^a
50Hz AC	onduleur	transformateur ^b
$f \neq 50Hz$ AC	onduleur	redresseur+onduleur

a. Un hacheur peut être mis en cascade du redresseur pour contrôler la tension DC de sortie

b. En plus des transformateurs classiques (à noyau de fer), des transformateurs à semi-conducteurs (SST=Solid State Transformer) commencent à apparaître. Le gradateur est également utilisé.

1.1 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 (noté 1) et l'autre le secondaire (noté 2). 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.

Considérons donc dans un premier temps une inductance couplée sans pertes.

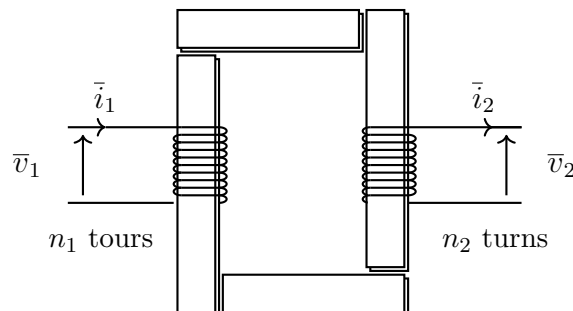


FIGURE 1 – Inductance couplée

Les équations reliant les flux et les courants sont :

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

Les équations de circuit sont :

$$\begin{cases} \bar{v}_1 = j\omega\bar{\varphi}_1 \\ \bar{v}_2 = j\omega\bar{\varphi}_2 \end{cases}$$

Les courants s'expriment comme :

$$\begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\bar{v}_1}{jL_1\omega} + \frac{M}{L_1}\bar{i}_2 \\ \bar{v}_2 = -jL_2\omega\bar{i}_2 + jM\omega\bar{i}_1 \end{cases} \rightsquigarrow \begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\bar{v}_1}{jL_1\omega} + \frac{M}{L_1}\bar{i}_2 \\ \bar{v}_2 = \frac{M}{L_1}\bar{v}_1 - jL_2\omega\left(1 - \frac{M^2}{L_1L_2}\right)\bar{i}_2 \end{cases}$$

En introduisant le rapport de transformation m comme :

$$m = \frac{M}{L_1} \simeq \frac{n_1 n_2}{n_1^2} = \frac{n_2}{n_1}$$

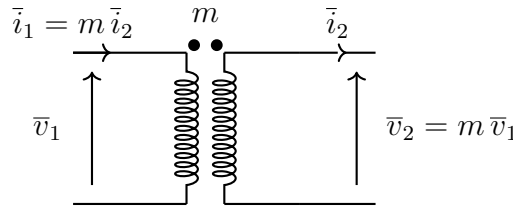
Le rapport de transformation est le rapport entre le nombre de spires au secondaire et celui au primaire. La réactance de fuite est :

$$\lambda\omega = L_2\omega\left(1 - \frac{M^2}{L_1L_2}\right) = \sigma L_2\omega$$

où σ est le coefficient de couplage (compris entre 0 et 1) :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1L_2}$$

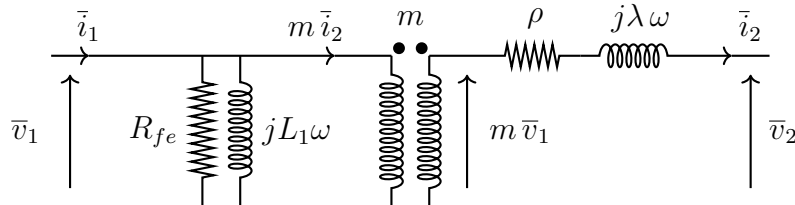
Le schéma du transformateur idéal, qui tient compte uniquement du rapport de transformation est donc :



Il conserve la puissance apparente entre primaire et secondaire :

$$\bar{s}_1 = \bar{v}_1 \bar{i}_1^* = m \bar{v}_2 \bar{i}_1^* = \bar{v}_2 \bar{i}_2^*$$

Le schéma du transformateur non-idéal (en incluant les pertes) est :



Les coefficients additionnels du schéma sont

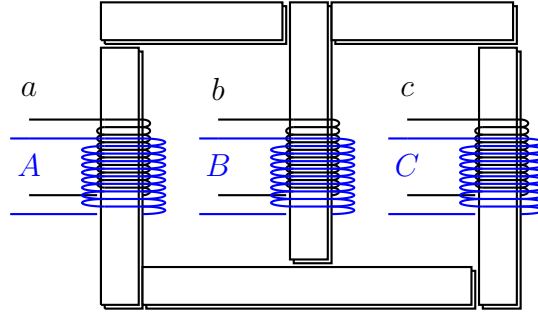
- R_{fe} la résistance modélisant les pertes fer du transformateur tôles du transformateur ;
- $L_1\omega$ la réactance de magnétisation ;
- $\lambda\omega$ la somme de la réactance de fuite du secondaire et de celle du primaire ramenée au secondaire ;

- ρ la somme de la résistance du secondaire et de la résistance du primaire ramenée au secondaire.

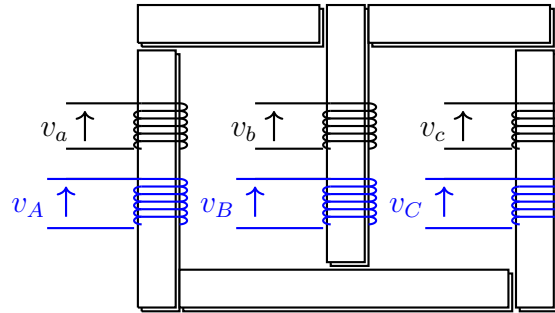
Ce modèle de transformateur est très pratique du point de vue de l'utilisateur. En effet si la tension primaire est connue, alors la tension secondaire à vide est $\bar{v}_2 = m\bar{v}_1$. Ainsi le secondaire peut être vu comme un générateur de tension $m\bar{v}_1$ avec une impédance interne $z_{cc} = \rho + j\lambda\omega$ (impédance de court-circuit). Quelle que soit la charge du transformateur, les pertes fer sont uniquement fonction de la tension primaire $|\bar{v}_1|^2/R_{fe}$ et la puissance réactive de magnétisation du transformateur est $|\bar{v}_1|^2/(L_1\omega)$.

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 transformateur peut également comporter deux enroulements secondaires (de même tension), ou un enroulement secondaire et un tertiaire (de tension différente).



L'enroulement de plus basse tension est le plus près du noyau magnétique pour des questions d'isolation. On note (A, B, C) les enroulements des 3 phases du primaire et (a, b, c) ceux du secondaire.



Sur chaque colonne du transformateur, le rapport des tensions primaire et secondaires est celui du nombre de spire :

$$m_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\bar{v}_a}{\bar{v}_A} = \frac{\bar{v}_b}{\bar{v}_B} = \frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_C}$$

Les enroulements au primaire et au secondaire peuvent être connectés en triangle ou en étoile :

La définition du rapport de transformation d'un transformateur triphasé est le rapport de la tension de ligne secondaire sur la tension de ligne primaire :

$$\overline{m} = \frac{\overline{U}_{ab}}{\overline{U}_{AB}}$$

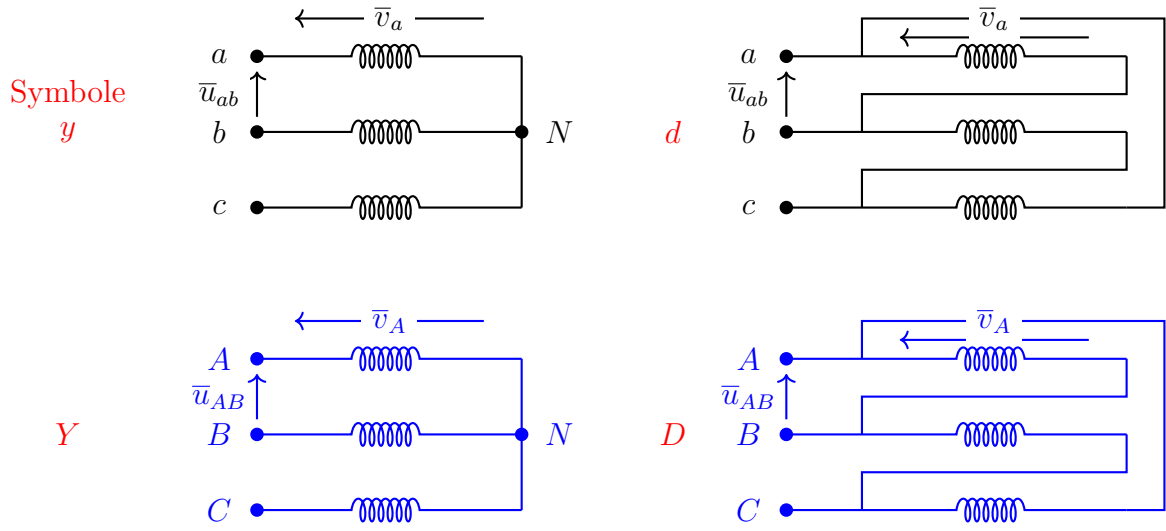


FIGURE 2 – Couplage étoile ou triangle du primaire et du secondaire

$\bar{m}$ est un complexe, contrairement au transformateur monophasé.

Pour le calcul effectif, on suppose que le système de tension primaire est direct :

$$\begin{pmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{pmatrix} = \bar{v}_D \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

Dans le cas d'un transformateur Yy (primaire et secondaire en étoile) nous avons la tension de ligne primaire :

$$\bar{U}_{AB} = \bar{v}_A - \bar{v}_B = (1 - a^2)\bar{v}_D$$

la tension de ligne secondaire :

$$\bar{U}_{ab} = \bar{v}_a - \bar{v}_b = m_0(\bar{v}_A - \bar{v}_B) = m_0(1 - a^2)\bar{v}_D$$

et le rapport de transformation :

$$\bar{m} = \frac{\bar{U}_{ab}}{\bar{U}_{AB}} = m_0$$

C'est donc l'équivalent d'un transformateur monophasé.

Dans le cas d'un transformateur Yd (secondaire en triangle, primaire en étoile) nous avons la tension de ligne primaire :

$$\bar{U}_{AB} = \bar{v}_A - \bar{v}_B = (1 - a^2)\bar{v}_D$$

la tension de ligne secondaire :

$$\bar{U}_{ab} = \bar{v}_a = m_0\bar{v}_A = m_0\bar{v}_D$$

et le rapport de transformation :

$$\bar{m} = \frac{\bar{U}_{ab}}{\bar{U}_{AB}} = \frac{m_0}{1 - a^2} = \frac{m_0}{\sqrt{3}}e^{-\pi/6}$$

Ce transformateur est utilisé pour abaisser la tension : le gain est $\sqrt{3}$ par rapport au transformateur Yy (à nombre de spires donné).

Le schéma équivalent du transformateur triphasé est identique à celui du transformateur monophasé (en remplaçant m par $\overline{m}$). Ce schéma est celui du transformateur étoile-étoile équivalent : ainsi la difficulté du couplage est condensée dans le rapport de transformation, et l'exploitation du schéma équivalent est simplifiée.

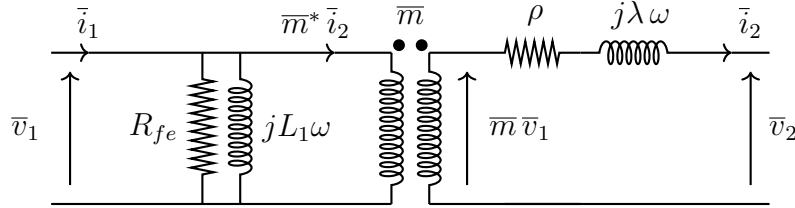
Il est à noter que si

$$\overline{v}_2 = \overline{m} \overline{v}_1$$

alors

$$\overline{i}_1 = \overline{m}^* \overline{i}_2$$

pour conserver la puissance apparente du transformateur idéal.



1.2 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 $v \leq 0$)

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 principalement au moyen d'un composant : le transistor. C'est un composant qui comporte trois bornes appelées 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. Ce composant est dit commandable (contrairement à la diode). Les transistors sont unidirectionnels : pour réaliser avec eux des interrupteurs bidirectionnels il est nécessaire de réaliser des montages comportant plusieurs de ces composants, regroupés sous formes de modules de puissance.

Les transistors de puissance existent sous trois grandes familles :

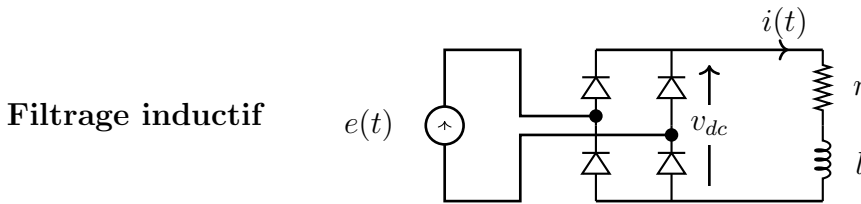
- Les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour des applications de tension élevée ($>10\text{kV}$ possible) et de forte puissance (MW). La fréquence de commutation est de l'ordre de 20kHz . Ils ont remplacé un autre composant : le thyristor (robuste et utilisé en très forte puissance, commandable à l'amorçage par l'application d'une tension à sa base, mais qui se comportait ensuite comme une diode, donc non commandable au blocage).

- Les MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor) sont utilisés classiquement pour des tensions plus faibles mais à des fréquences de commutation de plus de 100kHz pour des composants au Silicium. Des composants émergents à large bande comme les SiC permettent de réduire les pertes en commutation et augmenter la fréquence de commutation jusqu'au MHz.
- Les GaN (Gallium Nitride) ou GaN FET sont des composants à large bande qui permettent d'atteindre quelques MHz mais pour des puissances inférieures à 10kW.

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.

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.



Pour illustration, on utilise un redressement monophasé double alternance (PD2 car les diodes conduisent 1/2 du temps) de la figure ci-dessus. La tension en sortie de redresseur est

$$v_{dc}(t) = |e(t)| = E_0 + \sqrt{2} \Re\{V \exp^{j 2\omega t}\}$$

en négligeant les harmoniques supérieurs à 3. Si E est la valeur efficace de $e(t)$ alors :

$$E_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \quad V = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \frac{2}{3}$$

Ainsi pour une tension de 230V, la valeur de E_0 est de 207V.

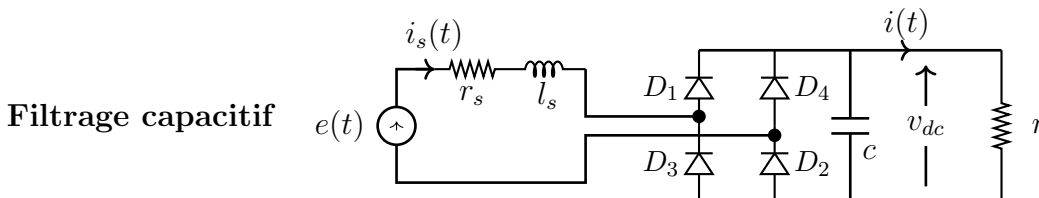
Sans inductance ($l = 0$) le courant $i(t)$ dans la charge est :

$$i(t) = \frac{E_0}{r} + \sqrt{2} \Re\left\{\frac{V}{r} \exp^{j 2\omega t}\right\}$$

l'image de la tension $v_{dc}(t)$. Avec inductance,

$$i(t) = \frac{E_0}{r} + \sqrt{2} \Re\left\{\frac{V}{\sqrt{r^2 + (l2\omega)^2}} \exp^{j (2\omega t + \varphi)}\right\}$$

Le courant moyen est identique mais l'amplitude de la composante fluctuante est réduite d'un facteur $r/\sqrt{r^2 + (l2\omega)^2}$.



Si toutes les diodes sont bloquées, alors les équations des mailles donnent :

$$\begin{cases} v_{D1} + v_{D2} = e(t) - v_{dc}(t) \\ v_{D3} + v_{D4} = -e(t) - v_{dc}(t) \end{cases}$$

Le courant dans la source est nul ($i_s(t) = 0$) et dans la charge le courant :

$$i(t) = \frac{v_{dc}}{r} = -c \frac{dv_{dc}}{dt}$$

provient de la charge de la capacité. Les diodes étant de constitution symétrique, $v_{D1} = v_{D2}$ et $v_{D3} = v_{D4}$. Ainsi :

$$\begin{cases} e(t) > v_{dc}(t) & (D_1, D_2) \text{ conduisent} \\ -e(t) > v_{dc}(t) & (D_3, D_4) \text{ conduisent} \end{cases}$$

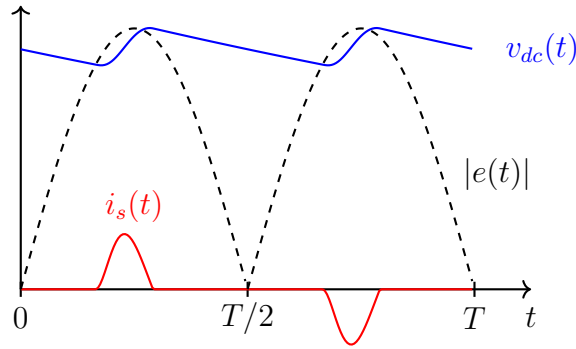
Si $e(t) > v_{dc}(t)$, les équations sont :

$$\begin{cases} e(t) - r_s i_s(t) - l_s \frac{di_s}{dt} = v_{dc}(t) \\ i_s(t) = \frac{v_{dc}}{r} + c \frac{dv_{dc}}{dt} \end{cases}$$

ce qui correspond à l'alternance positive sur i_s et e . Si $-e(t) > v_{dc}(t)$, les équations sont :

$$\begin{cases} -e(t) + r_s i_s(t) + l_s \frac{di_s}{dt} = v_{dc}(t) \\ -i_s(t) = \frac{v_{dc}}{r} + c \frac{dv_{dc}}{dt} \end{cases}$$

ce qui correspond à l'alternance négative sur i_s et e . Le filtrage capacitif permet de réduire l'ondulation de tension mais entraîne une conduction discontinue du courant source, ce qui est génère des harmoniques.



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.

1.3 Références

- [1] M. Lambert, « Les transformateurs électriques : fonctionnement, mise en œuvre et exploitation », Dunod, 2016. (Pour les aspects fonctionnels des transformateurs.)
- [2] P. Barrade, « Électronique de puissance : méthodologie et convertisseurs élémentaires », PPUR, 2006. (Pour une approche générale de l'électronique de puissance.)

1.4 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

$$V_{10} = 230 \text{ V} \quad ; \quad I_{10} = 0.95 \text{ A} \quad ; \quad P_0 = 52.9 \text{ W} \quad ; \quad V_{20} = 115 \text{ V}$$

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

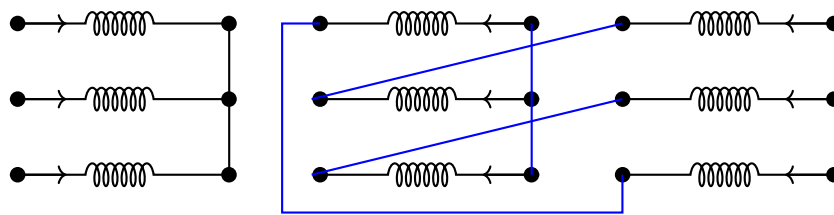
$$V_{2cc} = 5 \text{ V} \quad ; \quad I_{2cc} = 12.1 \text{ A} \quad ; \quad P_{cc} = 14.7 \text{ W}$$

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

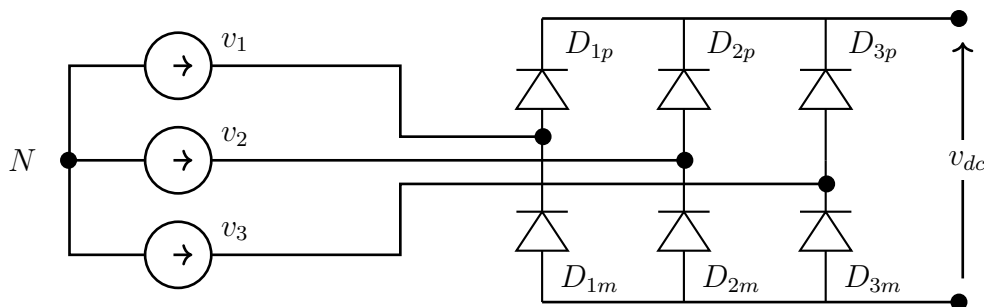
2. Branchements dans un transformateur triphasé

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 ci-dessous.



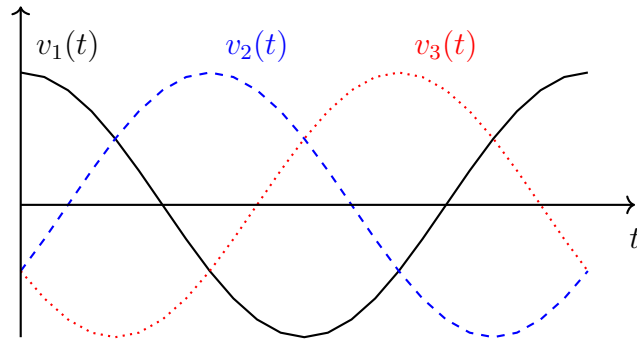
3. Étude du pont de Graëtz



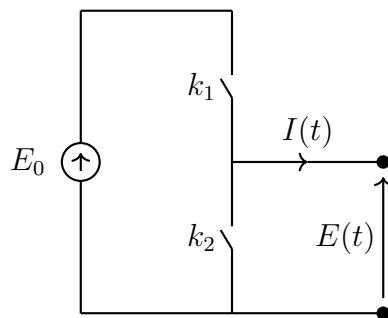
Le pont est alimenté par un système triphasé direct de tension (v_1, v_2, v_3) de valeur efficace V (tension phase-neutre). Montrer que la tension de sortie à vide d'un pont de Graëtz est :

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

En déduire la composante continue de v_{dc} ainsi que l'ondulation crête à crête de la tension de sortie. Calculer le premier harmonique non nul.



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

Θ est le rapport cyclique de K_1

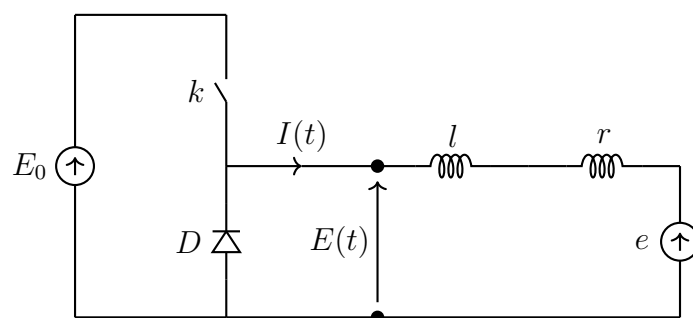
T est la période de découpage

a) Calculer la tension moyenne à vide.

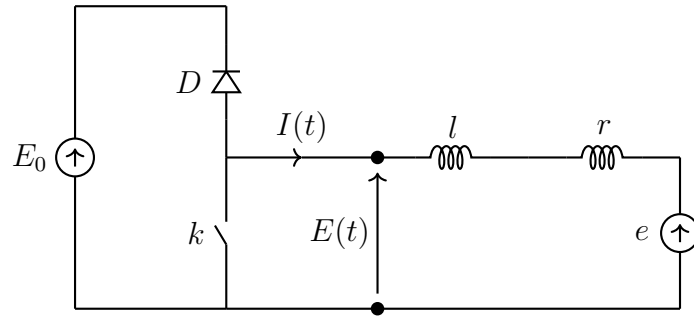
b) On charge sur une résistance r en série avec une force électromotrice e . Quel est le courant moyen ? Tracer qualitativement l'allure de $I(t)$. Toujours qualitativement, qu'arrive-t-il si on intercale une inductance en série entre la charge et le hacheur ?

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

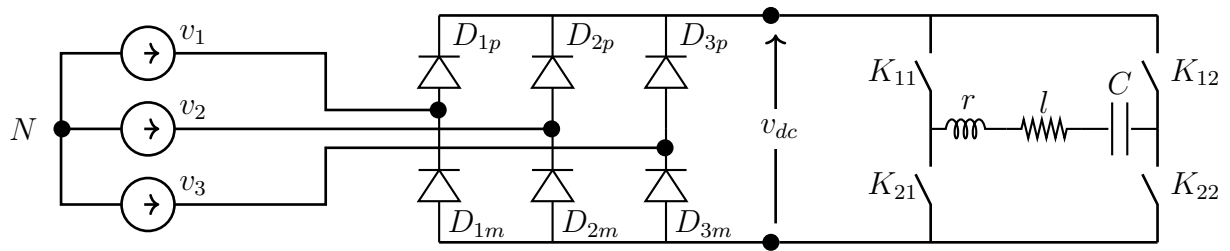
d) Expliquer le fonctionnement de



e) Expliquer le fonctionnement de



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



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