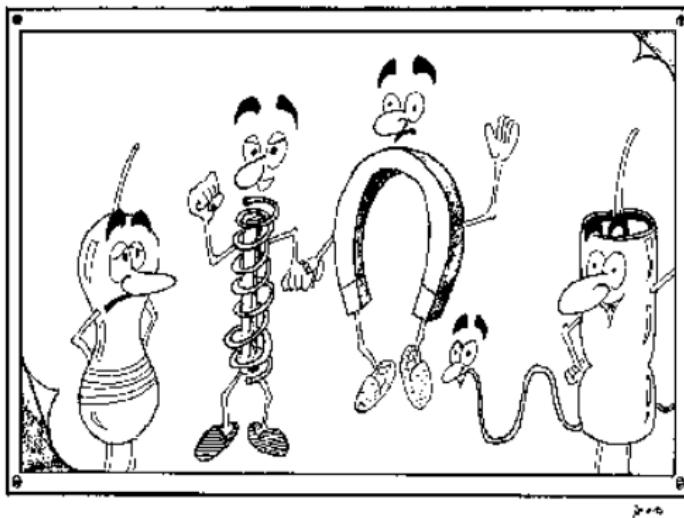


Energie électrique pour la spécialité 2i

Cyril DUEZ

cyril.duez@univ-lorraine.fr



Electrotechnique ?

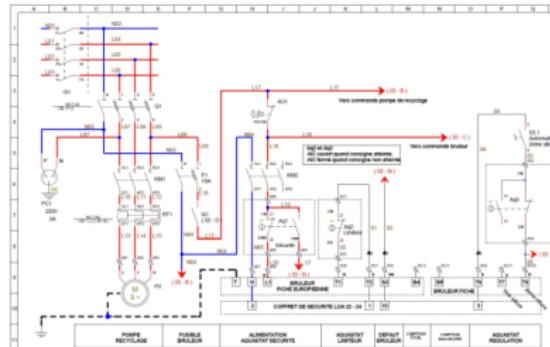
Vous avez dit : Elektro... tek... quoi ?

C'est quoi ce mot ?

Electrotechnique ?

Vous avez dit : Elektro... tek... quoi ?

C'est quoi ce mot ?

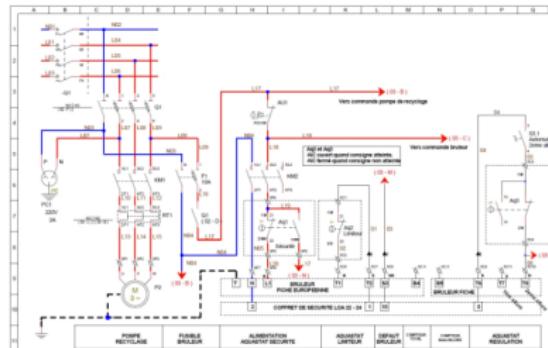


C'est ça l'électrotechnique ?

Electrotechnique ?

Vous avez dit : Elektro... tek... quoi ?

C'est quoi ce mot ?



C'est ça l'électrotechnique ?

OUI mais ce n'est pas que ça !!

L'électrotechnique

C'est aussi et surtout ça ...

Le transport et la distribution



La conversion d'énergie



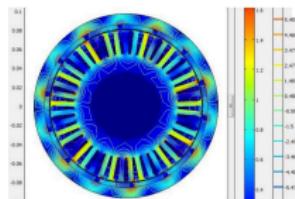
Le transport



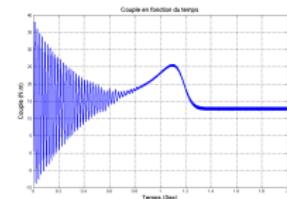
Les énergies renouvelables



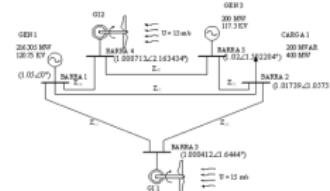
Dimensionnement de machine



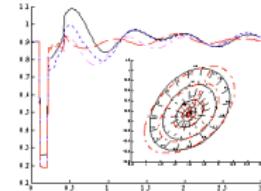
Etude dynamique des machines électriques



Répartition de puissance dans un réseau



Analyse de stabilité d'une éolienne en présence d'un défaut



L'électrotechnique dénomme l'ensemble des applications techniques de l'électricité.

Autrement dit, le terme "électrotechnique" regroupe les disciplines traitant des dispositifs ou des systèmes mettant en jeu de l'énergie sous forme électrique.

Plan de la présentation

Ne partez pas, ça va être intéressant !

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

- Objectifs :

- Analyser, spécifier et concevoir un système électrotechnique ;
- Comprendre la distribution et la conversion d'énergie (transformateurs, dispositifs à base d'électronique de puissance, ...)

- Répartition horaire :

26 heures de Cours et TD sur :

- Rappels d'électricité
- Circuit en monophasé
- Transformateur monophasé
- Circuit en triphasé
- Redressement
- Hacheur série, hacheur 4 quadrants
- Onduleur

- Evaluation :

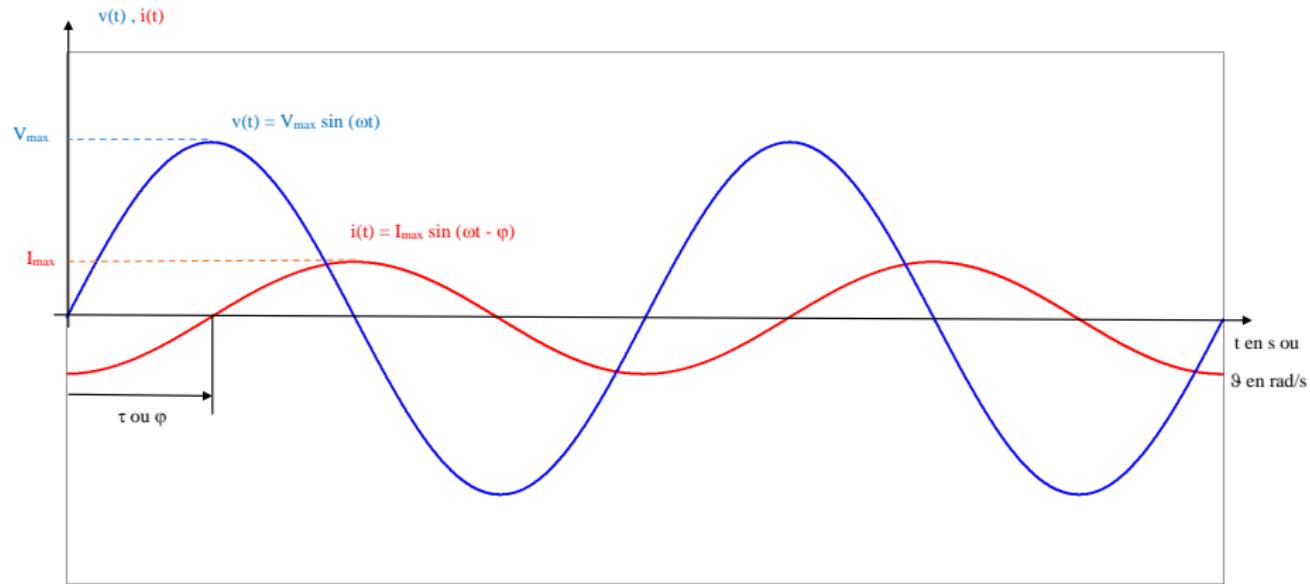
- Colles écrites pendant les séances de Cours et/ou TD
- Examen final (2h)

Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

Rappels

Notations et conventions



Rappels

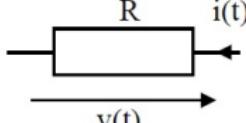
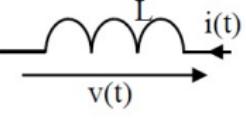
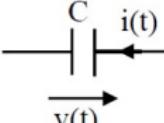
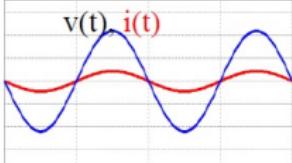
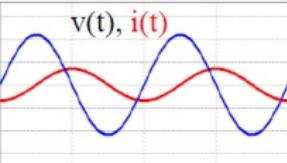
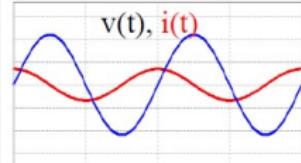
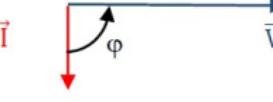
Notations et conventions

A partir des expressions sinusoïdales de la tension $v(t)$ et du courant $i(t)$ de la forme $v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$ et $i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$, nous pouvons adopter les notations suivantes :

- valeur instantanée : $i(t)$ ou i
- valeur efficace : $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$
- valeur moyenne : $\langle I \rangle = \bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$
- valeur maximale : $I_{max} = \hat{I} = I\sqrt{2}$
- valeur complexe : $\underline{I} = I e^{-j\varphi} = I \angle(-\varphi) = [I; -\varphi] = I(\cos \varphi - j \sin \varphi)$ (en régime sinusoïdal)
- vecteur : \vec{I} ou \vec{i}
- déphasage : φ (rad ou deg), retard du courant $i(t)$ sur la tension $v(t)$
- fréquence du signal : f (Hz)
- pulsation : $\omega = 2\pi f$ (rad/sec)

Rappels

Dipôles élémentaires

Dipôle	Résistance	Bobine	Condensateur
Symbole			
Relation temporelle	$v(t) = R i(t)$	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$
Impédance complexe	$\underline{Z} = R$	$\underline{Z} = jL\omega$	$\underline{Z} = \frac{1}{jC\omega}$
Impédance Z $ Z $ en Ω	$Z = R$	$Z = L\omega$	$Z = \frac{1}{C\omega}$
Oscillogramme			
Vecteur de Fresnel	 $\phi = 0$ $v(t)$ et $i(t)$ sont en phase	 $\phi = \pi/2$ $i(t)$ est en quadrature arrière par rapport à $v(t)$	 $\phi = -\pi/2$ $i(t)$ est en quadrature avance par rapport à $v(t)$

Rappels

Puissance en monophasé - Expression de la puissance $p(t)$

Dans un circuit monophasé, si la tension $v(t)$ et le courant $i(t)$ s'expriment de la manière suivante (régime sinusoïdal) :

$$v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$$
$$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

la puissance $p(t)$ est donnée par :

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) \\ &= VI [\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)] \\ &= VI \cos(\varphi) [1 - \cos(2\omega t)] - VI \sin(\varphi) \sin(2\omega t) \end{aligned}$$

En posant :

$$I_R = I \cos(\varphi) \quad I_X = I \sin(\varphi)$$

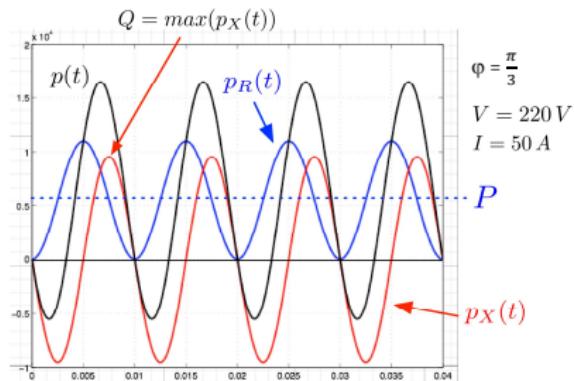
Nous obtenons :

$$p(t) = \underbrace{VI_R [1 - \cos(2(\omega t))]}_{p_R(t)} + \underbrace{(-VI_X \sin(2(\omega t)))}_{p_X(t)}$$

Rappels

Puissance en monophasé - Représentation de la puissance $p(t)$

Dans le domaine temporel, $p(t)$ évolue de la manière suivante :



Les puissances active, réactive et apparente donnent :

$$P = VI_R = VI \cos(\varphi) \text{ en W} \quad Q = VI_X = VI \sin(\varphi) \text{ en var} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI \text{ en VA}$$

Facteur de puissance : $FP \equiv \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$ dans le cas particulier des régimes sinusoïdaux

En notation complexe : $\underline{S} = P + jQ = \underline{V}\underline{I}^*$

$$p(t) = \underbrace{VI \cos(\varphi)}_{\text{puiss. moyenne}} - \underbrace{VI \cos(2\omega t - \varphi)}_{\text{puiss. fluctuante}}$$

Rappels

Puissance en monophasé - Théorème de Boucherot

Théorème de Boucherot : La puissance consommée par N récepteurs soumis à une alimentation monophasée s'exprime par les relations suivantes :

$$\text{Puissance active : } P_T = \sum_{n=1}^N P_n = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$$

$$\text{Puissance réactive : } Q_T = \sum_{n=1}^N Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N$$

$$\text{Puissance apparente : } S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \text{ mais } S_T \neq \sum_{n=1}^N S_n$$

→ N représente le nombre de récepteurs de l'installation

→ P_n et Q_n représentent les puissances active et réactive consommées par chacun des récepteurs

Rappels

Puissance en monophasé - Exemples d'application

Déphasages, puissances actives et réactives dans quelques cas particuliers :

Dipôle	R	L	C	cas général
Impédance complexe				$R + jX$
Déphasage $\varphi = \arg(\underline{Z})$				
Puissance active P				
Puissance réactive Q				

Rappels

Puissance en monophasé - Compensation de la puissance réactive d'une installation

Les charges inductives consomment une puissance réactive Q qui peut perturber le réseau de distribution :

- Augmentation des pertes du réseau
- Diminution de la stabilité du réseau
- Chute de tension à l'extrémité des lignes

Les fournisseurs d'énergie ne facturent la puissance réactive que pour les facteurs $\frac{Q}{P} > 0,4$.

Détermination des valeurs de $\cos \varphi$ qui permettent de vérifier ce critère : Il est souvent nécessaire de compenser la puissance réactive en tête d'installation. Plusieurs dispositifs existent pour permettre de limiter le transit de puissance réactive dans les lignes de transmissions :

- Batteries de condensateurs
- Inductances
- Machines synchrones (fonctionnement en compensateur synchrone)
- FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)

On distingue les compensations passives (fonctionnant en tout ou rien) de celles actives qui fonctionnent graduellement (régulation de la puissance compensée).

Plan de la présentation

1 Objectifs et répartition du module

2 Rappels

3 Le transformateur monophasé

4 Le système triphasé

5 La conversion AC/DC : le redresseur

- Le redresseur non commandé
- Le redresseur commandé

6 La conversion DC/DC : le hacheur

- Le hacheur série
- Le hacheur 4 quadrants

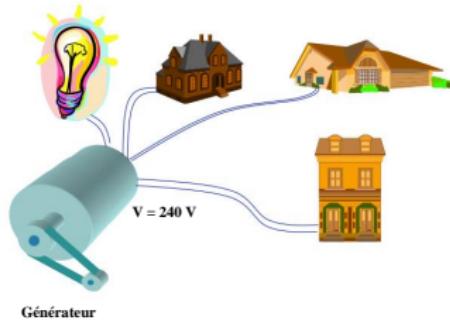
7 La conversion DC/AC : l'onduleur

- L'onduleur pleine onde
- L'onduleur onde décalée
- L'onduleur MLI

Le transformateur

Le transformateur, à quoi ça sert ?

Cas n°1

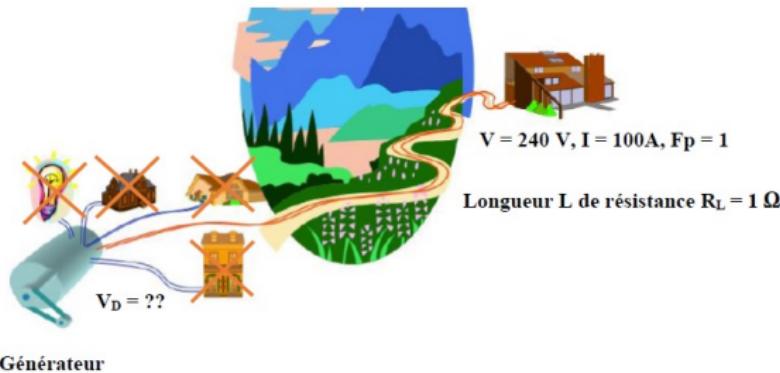


Cas n°2



Le transformateur

Le transformateur, à quoi ça sert ?



Calcul de la puissance active absorbée par l'entreprise :

Calcul de la tension que doit fournir le générateur pour assurer 240 V à l'entreprise :

Calcul des pertes en lignes :

Le transformateur

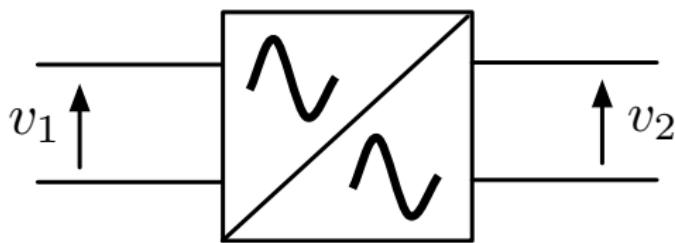
Images de transformateurs



Le transformateur monophasé

Symbole

Convertisseur AC → AC

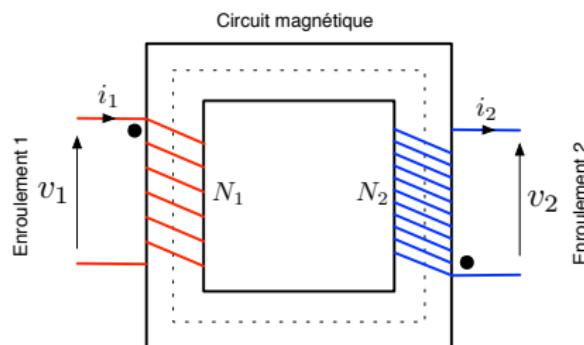
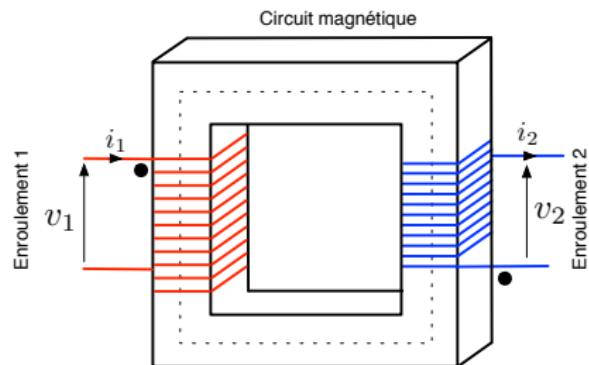


- Si $V_1 > V_2$, le transformateur est dit **abaisseur** (ex : 20kV/400V)
- Si $V_1 < V_2$, le transformateur est dit **élévateur** (ex : 400V/20kV)
- Si $V_1 = V_2$, le transformateur est dit **d'isolation** (ex : 400V/400V)

Le transformateur monophasé

Définition - Constitution

Un transformateur monophasé est un quadripôle formé de deux enroulements enlaçant un circuit magnétique commun. C'est une machine statique qui permet, en alternatif, de modifier la valeur efficace de la tension et du courant au secondaire sans changer la valeur de leur fréquence.



Le circuit magnétique canalise le flux. Il est composé de tôles ferromagnétiques isolées les unes des autres pour réduire les pertes ferromagnétiques.

Le symbole • indique une borne homologue. Des courants positifs entrant par ces bornes créent des flux de mêmes signes (additifs). Les tensions pointées vers ces bornes sont en phase.

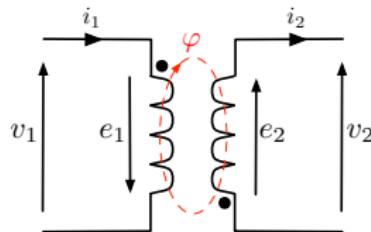
Le transformateur monophasé

Transformateur parfait - Relation entre f.e.m

Un transformateur est considéré comme parfait ssi :

- il n'y a pas de pertes dans les enroulements
- il n'y a pas de pertes magnétiques
- il n'y a pas de fuites magnétiques

Le modèle du transformateur parfait se résume à :



La mise en équation donne :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad v_1 = -e_1$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad v_2 = e_2$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{e_1}{N_1} = -\frac{e_2}{N_2} \rightarrow \frac{e_2}{e_1} = -\frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} = m \quad \text{Rapport de transformation}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur parfait - Relation entre courants

Le théorème d'Ampère, appliqué au transformateur parfait, nous permet d'écrire :

$$\oint Hdl = \sum NI \rightarrow \sum NI = \Re\Phi$$

Si l'on considère que le circuit magnétique du transformateur parfait présente une perméabilité infinie ($\mu_r = \infty$). La réluctance \Re est nulle, ce qui nous donne :

$$\sum NI = N_1\underline{I_1} + N_2\underline{I_2} = 0$$

Par conséquent, la relation entre courants donne :

$$N_1\underline{I_1} = -N_2\underline{I_2} \rightarrow \frac{N_2}{N_1} = -\frac{\underline{I_1}}{\underline{I_2}} = m$$

En valeur efficace, nous obtenons :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur parfait - Analyse des puissances

Les relations en puissances donnent :

- Puissances instantanées :

$$p_1 = v_1 i_1 = -\frac{v_2}{m} (-m i_2) = v_2 i_2 = p_2$$

- Puissances apparentes :

$$S_1 = V_1 I_1 = \frac{V_2}{m} (m I_2) = V_2 I_2 = S_2$$

- Puissances actives :

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) = \frac{V_2}{m} (m I_2) \cos(\varphi_2) = V_2 I_2 \cos(\varphi_2) = P_2$$

- Puissances réactives :

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) = \frac{V_2}{m} (m I_2) \sin(\varphi_2) = V_2 I_2 \sin(\varphi_2) = Q_2$$

- Rendement :

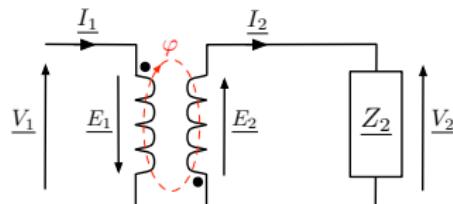
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1$$

→ Conservation des puissances pour le transformateur parfait !

Le transformateur monophasé

Transformateur parfait - Analyse des impédances

Considérons une charge Z_2 alimentée par un transformateur parfait :



La mise en équation donne :

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{V}_2}{\underline{I}_2}$$

Vu du primaire, cette impédance donne :

$$\underline{Z}'_2 = \frac{\underline{V}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{V}_2/m}{m\underline{I}_2} = \frac{1}{m^2} \frac{\underline{V}_2}{\underline{I}_2} = \frac{1}{m^2} \underline{Z}_2$$

- Pour passer un élément du secondaire vers le primaire, on le multiplie par $1/m^2$
- Pour passer un élément du primaire vers le secondaire, on le multiplie par m^2

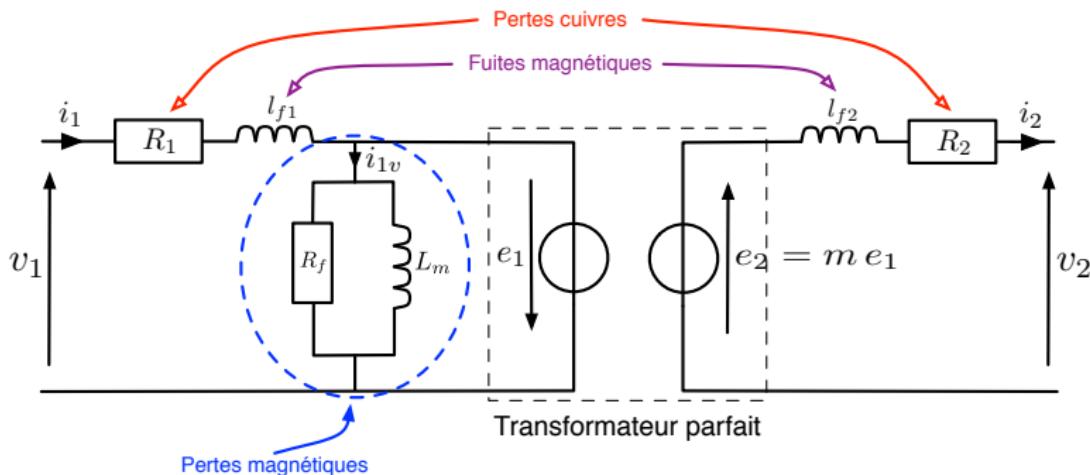
Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Circuit électrique

Pertes dans le transformateur réel :

- **pertes cuivre** ou **pertes Joule** dissipées par les enroulements primaire et secondaire lors du passage du courant
- **pertes fer ou magnétiques** dues à la magnétisation et à l'échauffement du noyau ferromagnétique
- **fuites magnétiques** créées par les lignes de champ non canalisées par le circuit magnétique

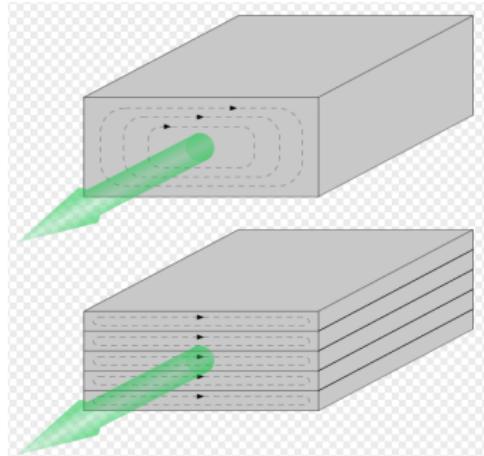
Le schéma électrique équivalent après l'ajout des différentes pertes donne :



Le transformateur monophasé

Petite précision sur les pertes fer

Les pertes fer dépendent de la valeur efficace de la tension d'alimentation V et de sa fréquence f



- **Les pertes par courants de Foucault**

L'induction crée des courant dans les tôles induisant des échauffements

$$p_{Foucault} = (kf^2, kB^2)$$

- **Les pertes par hystérésis**

Le changement d'orientation du flux induit des frottements entre les tôles → pertes par échauffement. Minimisées par l'utilisation de matériaux doux.

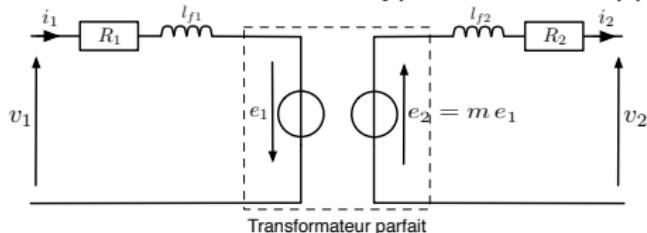
$$Physterisis \simeq fV_{fer}S_h \simeq fV_{fer}B_{max}^2$$

Le transformateur monophasé

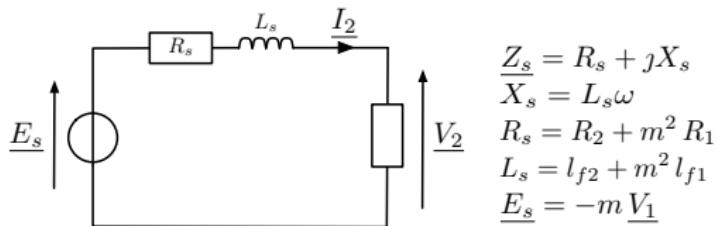
Transformateur réel - Modèle de Kapp

L'hypothèse de Kapp permet de considérer le courant $I_{1v} \ll I_1$.

Le circuit équivalent du transformateur, avec l'hypothèse de Kapp, donne :



- Modèle équivalent de Thevenin (M.E.T) au secondaire :



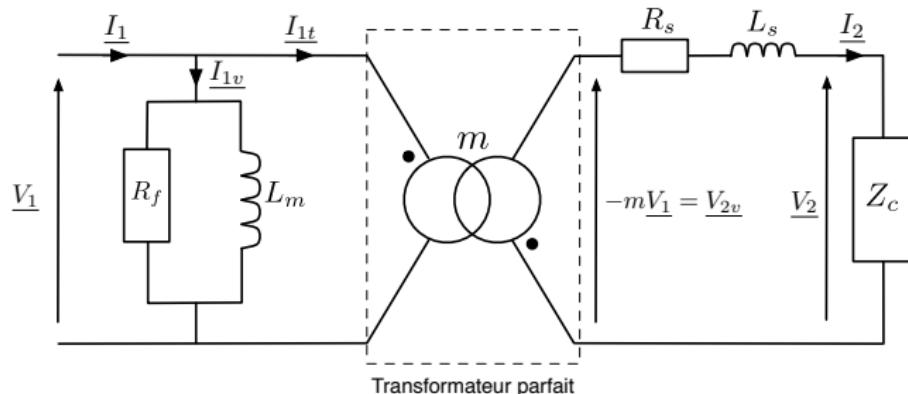
$$\underline{V}_2 = \underline{E_s} - \underline{Z_s} \underline{I}_2 = \underline{E_s} - (\underline{R_s} + j\underline{X_s}) \underline{I}_2$$

$$\underline{V}_2 = -m \underline{V}_1 - \underline{R_s} \underline{I}_2 - j \underline{X_s} \underline{I}_2$$

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Schéma électrique équivalent

En régime sinusoïdal, le modèle équivalent peut se mettre sous la forme :



Avec :

$$R_s = R_2 + m^2 R_1$$

$$L_s = l_{f2} + m^2 l_{f1}$$

$$\boxed{m = \frac{\underline{V}_{2v}}{\underline{V}_1}}$$

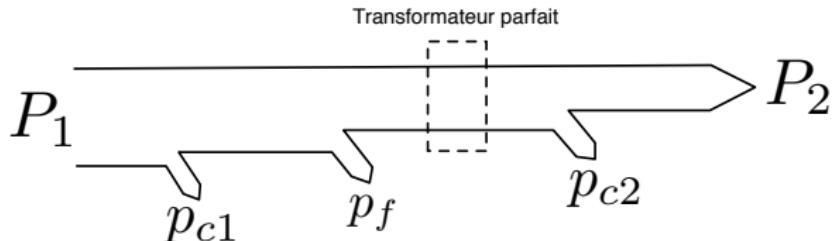
$$\boxed{m = \frac{I_1}{I_2}}$$

- \underline{V}_1 : tension appliquée au primaire du transformateur
- \underline{V}_2 : tension au secondaire du transformateur
- I_1 : courant absorbé par le primaire du transformateur
- I_{1v} : courant de magnétisation
- I_2 : courant débité au secondaire du transformateur
- m : rapport de transformation
- R_f : résistance modélisant les pertes fer du transformateur
- L_m : inductance de magnétisation
- L_s : inductance modélisant les fuites magnétiques au primaire et secondaire
- R_s : résistance modélisant les pertes cuivre des enroulements primaire et secondaire

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Calcul des puissances

L'arbre des puissances du transformateur réel donne :



Les pertes cuivre donnent :

$$p_c = p_{c1} + p_{c2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_1 (m I_2)^2 + R_2 I_2^2 = (m^2 R_1 + R_2) I_2^2 = R_s I_2^2$$

La puissance fournie à la charge par le secondaire du transformateur donne :

$$P_2 = V_2 I_2 \cos(\varphi_2)$$

Le rendement du transformateur se calcule par la relation :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + p_c + p_f}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Essai à vide

La connaissance des paramètres du transformateur permet d'étudier son comportement (pertes, η , tension V_2 , ...) pour différents types de charges (résistive, inductive, capacitive).

A partir de l'essai à vide (notation des grandeurs G_v ou G_0), il est possible de déterminer la valeur des pertes fer et des éléments R_f et L_m du schéma électrique équivalent.

Aucune charge n'est connectée au secondaire du transformateur
Le transformateur est alimenté sous sa tension nominale $V_{1v} = V_1$

- Détermination des pertes fer :

$$I_2 = 0 \rightarrow p_{j2} = 0 \rightarrow P_{1v} = p_{j1} + p_f = R_1 I_{1v}^2 + p_f$$

$$p_f = P_{1v} - R_1 I_{1v}^2$$

$$\text{si : } R_1 I_{1v}^2 \ll P_{1v}$$

$$p_f \simeq P_{1v}$$

- Calcul de R_f et L_m :

De l'essai à vide, nous obtenons :

$$p_f = P_{1v} = \frac{V_{1v}^2}{R_f} \rightarrow R_f = \frac{V_{1v}^2}{P_{1v}}$$

$$Q_{1v} = \frac{V_{1v}^2}{L_m \omega} \rightarrow X_m = L_m \omega = \frac{V_{1v}^2}{Q_{1v}}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Essai en court-circuit

A partir de l'essai en court-circuit (Notation G_{cc} ou G_c), il est possible de déterminer la valeur de pertes cuivre et des éléments R_s et L_s du schéma électrique équivalent.

Le secondaire du transformateur est mis en court-circuit

On alimente le primaire avec une tension $V_{1cc} \ll V_1$ de sorte à obtenir $I_{2cc} = I_2$ nominal.

- Détermination des pertes cuivre :

$$I_{2cc} = I_2 \text{ et } V_{2cc} = 0 \rightarrow P_{2cc} = 0 \rightarrow P_{1cc} = p_{j1cc} + p_{fcc} + p_{j2cc}$$

Les pertes fer p_{fcc} sont négligeables car $V_{1cc} \ll V_1$

$$p_c = p_{j1cc} + p_{j2cc} \simeq P_{1cc}$$

- Calcul de R_s et X_s :

De l'essai en court-circuit, nous obtenons :

$$p_c = P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2 \rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

$$\underline{V}_{2cc} = 0 \rightarrow \underline{E}_{2cc} = -m \underline{V}_{1cc} = \underline{Z}_s \underline{I}_{2cc} = (R_s + jX_s) \underline{I}_{2cc}$$

$$\underline{Z}_s = (R_s + jX_s) = -\frac{m \underline{V}_{1cc}}{\underline{I}_{2cc}}$$

$$\rightarrow X_s = L_s \omega = \sqrt{\left(\frac{m \underline{V}_{1cc}}{\underline{I}_{2cc}}\right)^2 - R_s^2}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Diagramme de Kapp

Le diagramme de Kapp permet de déterminer la valeur efficace de la tension V_2 lors de l'utilisation en charge du transformateur. Cette tension est fonction :

- du facteur de puissance secondaire $\cos(\varphi_2)$ → imposé par la charge
- du courant $i_2(t)$ circulant dans l'enroulement secondaire → I_2 imposé par la charge
- de la tension $v_1(t)$ appliquée à l'enroulement primaire → V_1 imposée par la source

En prenant le vecteur courant \vec{I}_2 comme référence, nous obtenons :

$$\underline{V}_2 = \underbrace{-m\underline{V}_1}_{V_{2v}} - R_s \underline{I}_2 - j X_s \underline{I}_2$$

$$\vec{V}_2 = \underbrace{-m\vec{V}_1}_{\vec{V}_{2v}} - \underbrace{(R_s \vec{I}_2 + X_s \vec{I}_2)}_{\text{chute de tension } \vec{\Delta V}_2}$$

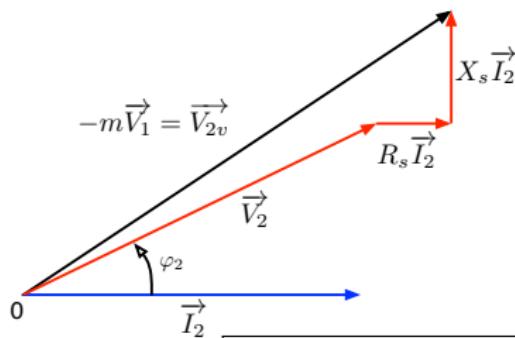
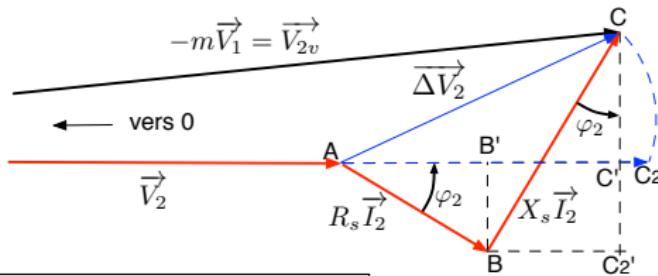


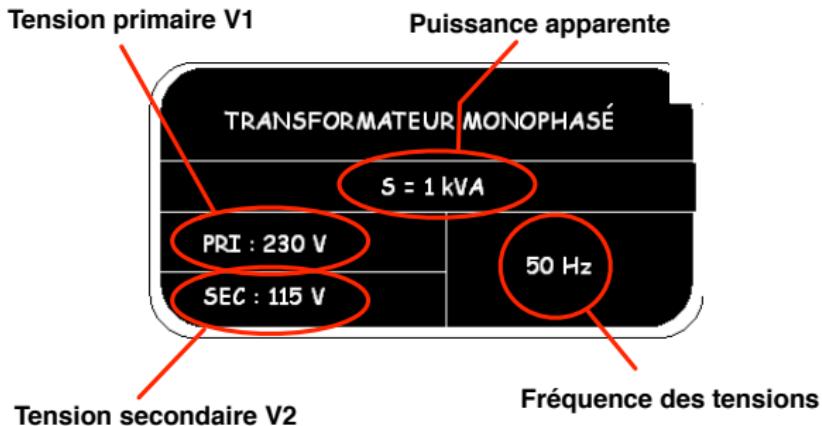
Diagramme pour le calcul de la valeur approchée de la chute de tension



$$\boxed{\Delta V_2 \simeq R_s I_2 \cos(\varphi_2) + X_s I_2 \sin(\varphi_2) \simeq |V_{2v}| - |V_2|}$$

Le transformateur monophasé

Plaque signalétique



Calcul des courants nominaux :

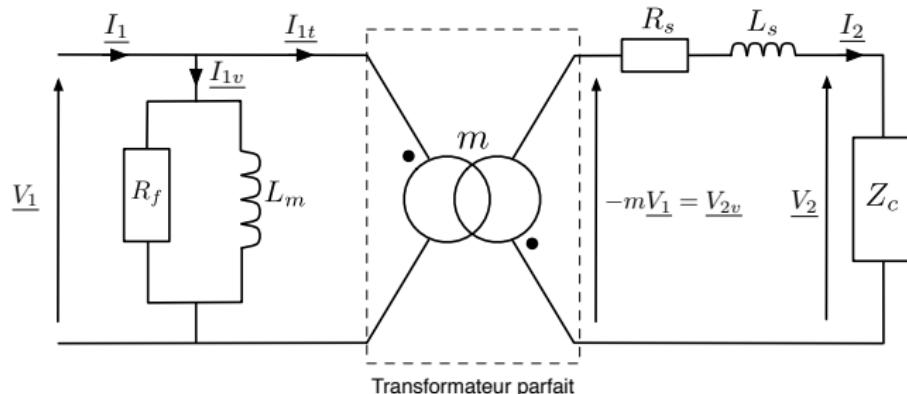
$$I_1 = \frac{S}{V_1}$$

$$I_2 = \frac{S}{V_2}$$

Le transformateur monophasé

Transformateur réel - Résumé

- Transformateur : convertisseur AC - AC (à fréquence fixe)
- Essai à vide $\rightarrow p_f = P_{1v} \rightarrow R_f$ (L_m peut être calculée à partir de Q_{1v})
- Essai en court-circuit $\rightarrow p_c = P_{1cc} \rightarrow R_s$ et X_s
- Le modèle équivalent peut se mettre sous la forme :



Avec :

$$R_s = R_2 + m^2 R_1$$

$$L_s = l_{f2} + m^2 l_{f1}$$

$$m = \frac{V_{2v}}{V_1}$$

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

- m : rapport de transformation
- R_f : résistance modélisant les pertes fer du transformateur
- L_m : inductance de magnétisation
- L_s : inductance modélisant les fuites magnétiques au primaire et secondaire
- R_s : résistance modélisant les pertes cuivre des enroulements primaire et secondaire

Bibliographie :

Vidéothèque :

- Video : Comment est fabriqué un fil électrique
- Video : Animation Transformateur monophasé

Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 **Le système triphasé**
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

Système triphasé

Qu'est ce que c'est ?

- Système utilisé dans le transport et la distribution de l'énergie électrique
- Distribution de 3 phases (L_1, L_2, L_3 ou R, S, T ou A, B, C) + neutre (N)
- Délivre 2 tensions différentes :
 - 130 V/230 V
 - 230 V/400 V
- Système de tensions alternatives de même fréquence (50 Hz)
- Système de tensions déphasées



Système triphasé

Pourquoi du triphasé ?

Utilité du système triphasé par rapport au système monophasé :

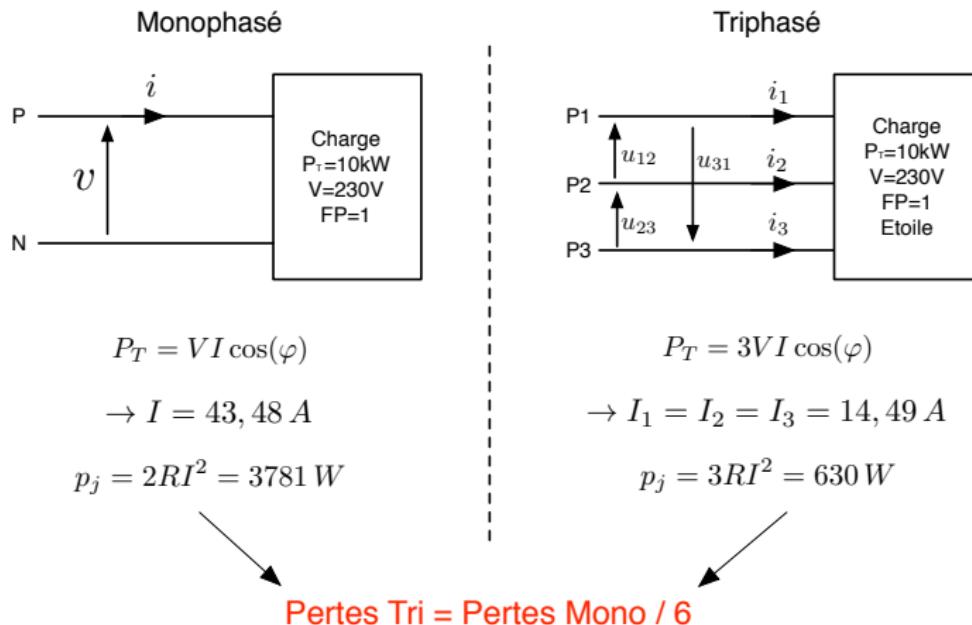
- Transport :
 - 3 fils de phase au lieu de 6 (3x2 en monophasé)
 - Courants plus faibles pour une puissance donnée donc moins de pertes Joule
 - Puissance à transporter plus grande pour une section de fils donnée
- Utilisation :
 - Délivre 2 tensions au lieu d'une en monophasé
 - Possibilité de créer des champs magnétiques tournants
 - Alimentation de moteur triphasé :
 - Meilleur couple au démarrage
 - Meilleur rapport qualité-prix
 - Passage du continu vers l'alternatif plus simple (redressement)
 - Réduction du taux d'ondulation lors de l'emploi de redresseur
 - Puissance instantanée constante dans les récepteurs

Système triphasé

Puissance en triphasé

Comparaison système monophasé - système triphasé

On considère une charge absorbant une puissance $P_T = 10 \text{ kW}$ avec un $\cos(\varphi) = 1$ alimentée par des lignes de résistance $R = 1\Omega$.



Système triphasé

Définition

Un système triphasé c'est :

un ensemble de 3 grandeurs sinusoïdales, fonction du temps, de même **nature**, de même **fréquence** et **déphasées entre elles de $2\pi/3=120^\circ$**

Un système de grandeurs triphasées (généralement de tensions ou de courants) peut s'écrire par les équations suivantes :

$$x_1(t) = \hat{X}_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad x_2(t) = \hat{X}_2 \sin(\omega t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}) \quad x_3(t) = \hat{X}_3 \sin(\omega t + \varphi_3 - \frac{4\pi}{3})$$

Le système est dit **équilibré**ssi $\hat{X}_1 = \hat{X}_2 = \hat{X}_3$ et $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$, ce qui donne à chaque instant t :

$$x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) = 0$$

Dans le cas contraire, on parle de système déséquilibré.

Il est d'usage de remplacer \hat{X} par $V\sqrt{2}$ lorsque l'on parle de tensions et \hat{X} par $I\sqrt{2}$ lorsque l'on parle de courants :

$$\begin{aligned} v_1(t) &= V_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{v1}) \\ v_2(t) &= V_2\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{v2} - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) &= V_3\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{v3} - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_1(t) &= I_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{i1}) \\ i_2(t) &= I_2\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{i2} - \frac{2\pi}{3}) \\ i_3(t) &= I_3\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{i3} - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned}$$

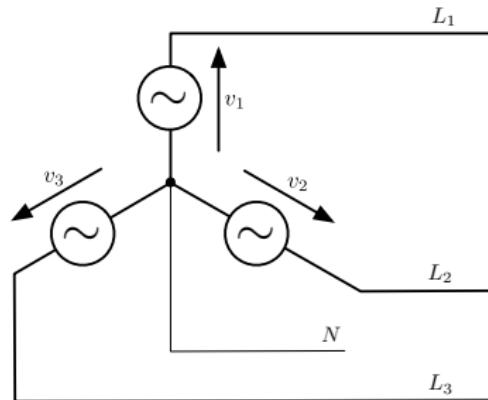
Système triphasé

Réseau EDF

Réseau électrique EDF = système de tensions triphasé équilibré

Réseau électrique EDF = 3 générateurs de tension ($v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_3(t)$)

On raccorde les trois sources de tension de sorte à obtenir un point commun appelé **Neutre** du réseau triphasé

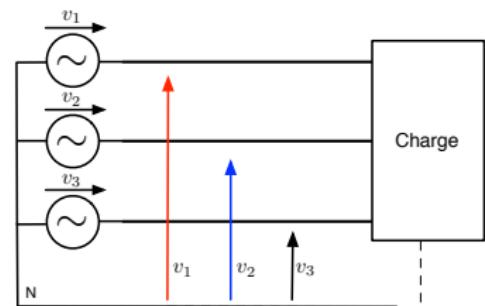
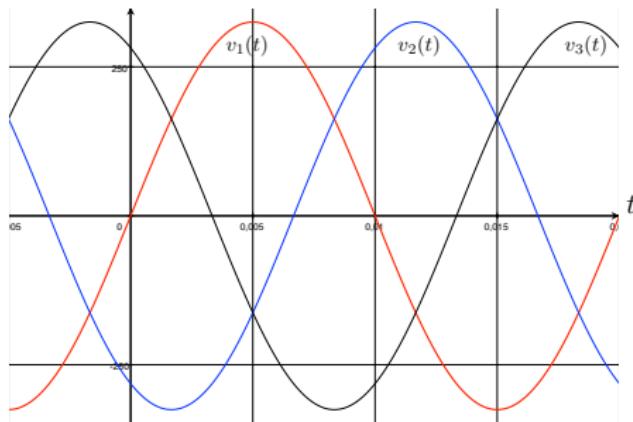


Système triphasé

Représentation temporelle

Si $\varphi_{v1} = \varphi_{v2} = \varphi_{v3} = 0$ et $V_1 = V_2 = V_3 = V$, le système de tensions triphasé donne :

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad v_2(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad v_3(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

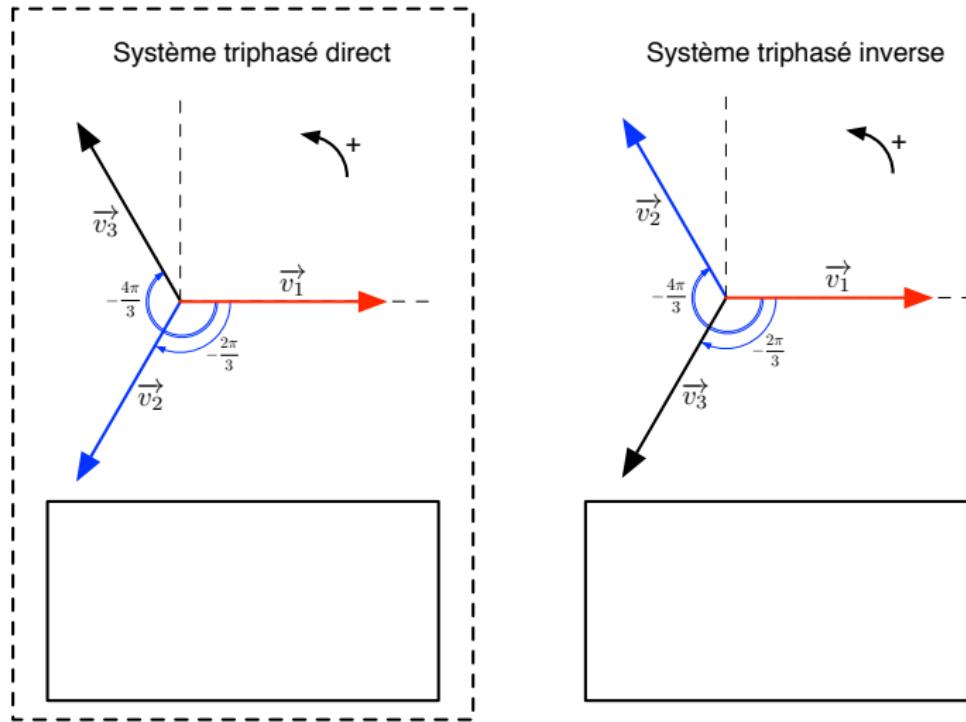


A chaque instant : $v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$

Système triphasé

Représentation vectorielle

Dans le repère de Fresnel, le système de tensions triphasé donne :



Système triphasé

Tensions simples et tensions composées

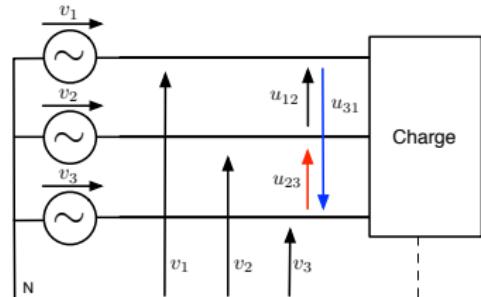
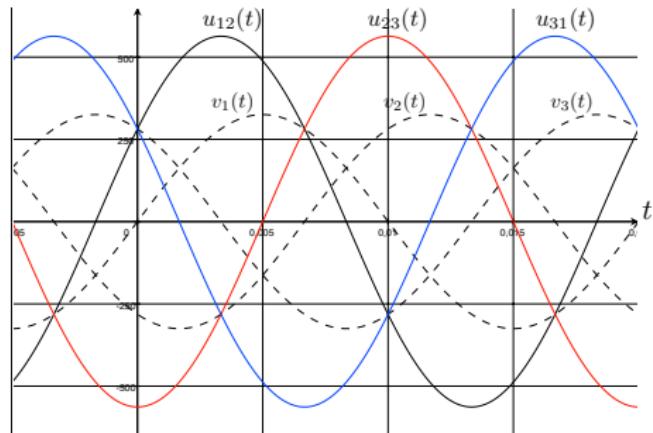
- Différence de potentiel entre fil de phase et fil de neutre → tensions simples $v_{(1,2,3)}(t)$
- Différence de potentiel entre deux fils de phase → tensions composées $u_{(12,23,31)}(t)$

L'expression temporelle de ces tensions donne :

$$u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t)$$

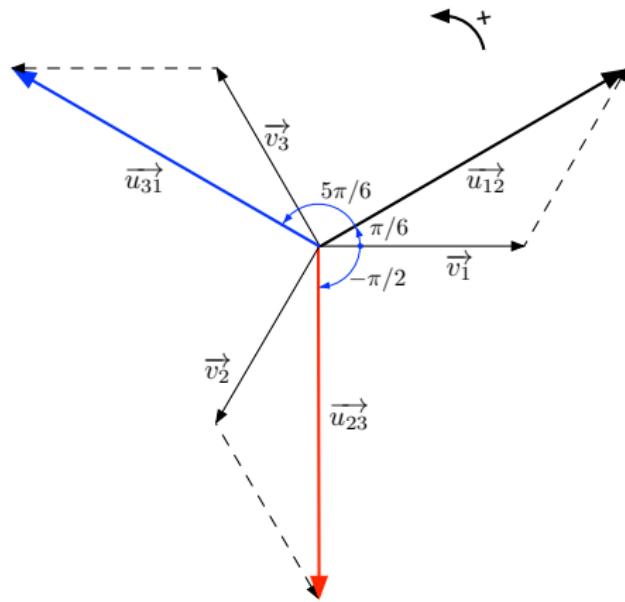
$$u_{23}(t) = v_2(t) - v_3(t)$$

$$u_{31}(t) = v_3(t) - v_1(t)$$



Système triphasé

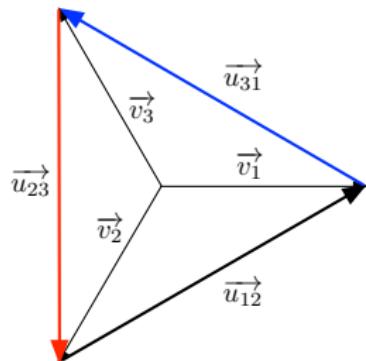
Tensions composées : Représentation vectorielle



$$\vec{U}_{12} + \vec{U}_{23} + \vec{U}_{31} = 0$$

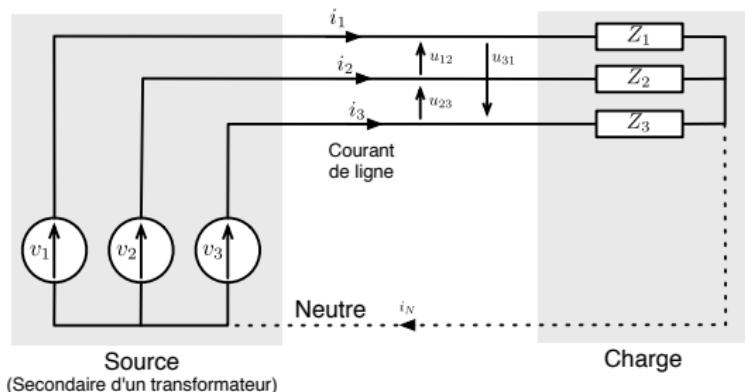
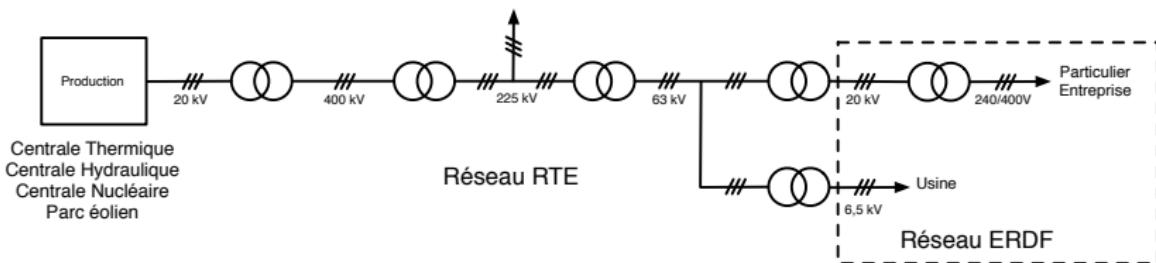
$$\begin{aligned}\underline{U}_{12} &= \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = U e^{j\frac{\pi}{6}} \\ \underline{U}_{23} &= \underline{V}_2 - \underline{V}_3 = U e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ \underline{U}_{31} &= \underline{V}_3 - \underline{V}_1 = U e^{j\frac{5\pi}{6}}\end{aligned}$$

$$U = \sqrt{3}V$$



Système triphasé

Distribution en triphasé



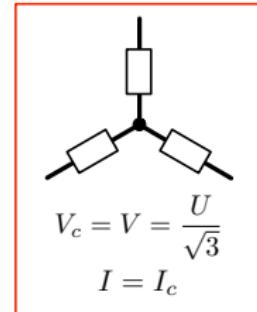
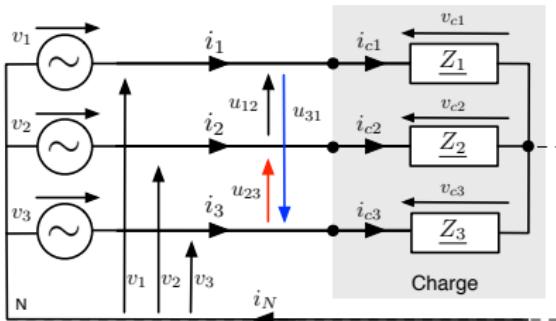
$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = i_N(t) \text{ si le neutre est relié}$$

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0 \text{ si le neutre n'est pas relié}$$

Système triphasé

Couplage en triphasé - Etoile

COUPLAGE ETOILE



- Montage avec fil de neutre :

$$v_{c1} = v_1 \quad v_{c2} = v_2 \quad v_{c3} = v_3$$

$$i_{c1} = i_{l1} \quad i_{c2} = i_{l2} \quad i_{c3} = i_{l3}$$

$$i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} = i_N$$

si la charge est équilibrée ($Z_1 = Z_2 = Z_3$) $\rightarrow i_N = 0$

- Montage sans fil de neutre :

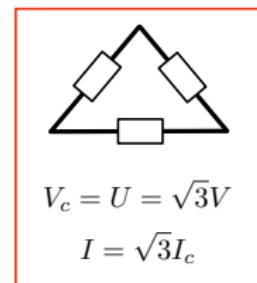
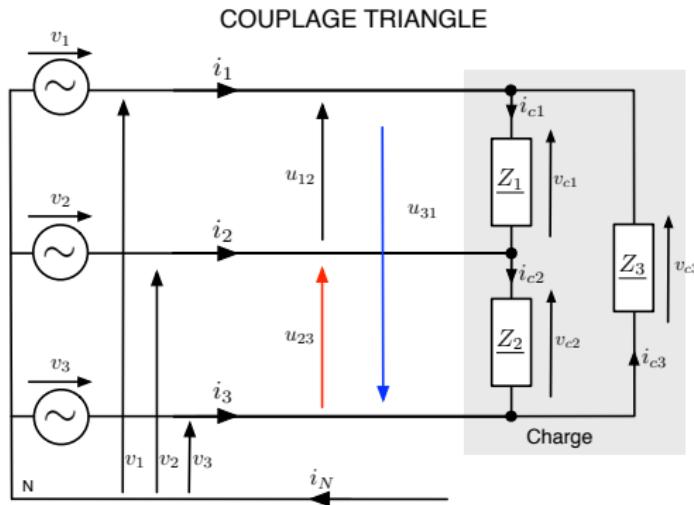
$$i_{c1} = i_{l1} \quad i_{c2} = i_{l2} \quad i_{c3} = i_{l3}$$

$$i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} = 0$$

si la charge équilibrée ($Z_1 = Z_2 = Z_3$) $\rightarrow v_{c1} = v_1 \quad v_{c2} = v_2 \quad v_{c3} = v_3$

Système triphasé

Couplage en triphasé - Triangle



$$v_{c1} = u_{12} \quad v_{c2} = u_{23} \quad v_{c3} = u_{31}$$
$$i_1 = i_{c1} - i_{c3} \quad i_2 = i_{c2} - i_{c1} \quad i_3 = i_{c3} - i_{c2}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Aucune possibilité de raccorder le neutre sur un montage triangle !

Système triphasé

Couplage Etoile - Triangle : récapitulatif

Relations entre les courants et les tensions dans les couplages **équilibrés**

Couplage	Etoile	Triangle
Tensions	$V_c = \frac{U}{\sqrt{3}} = V$	$V_c = U = \sqrt{3}V$
Courants	$I_c = I$	$I_c = \frac{I}{\sqrt{3}}$
Neutre	Potentiel du point commun	Non utilisé

Rappel :

V_c : tension aux bornes d'un éléments de la charge triphasée

I_c : courant circulant dans un élément de la charge triphasée

U : tension composée du réseau

V : tension simple du réseau

I : courant de ligne du réseau

Système triphasé

Puissance en triphasé - 1

La puissance consommée par N récepteurs soumis à une alimentation triphasée s'exprime par les relations suivantes (couplés en étoile ou en triangle) :

$$\text{Puissance active : } P_T = \sum_{n=1}^N P_n = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N$$

$$\text{Puissance réactive : } Q_T = \sum_{n=1}^N Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N$$

$$\text{Puissance apparente : } S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \text{ mais } S_T \neq \sum_{n=1}^N S_n$$

→ N représente le nombre de récepteur de l'installation

→ P_n et Q_n représentent les puissances active et réactive consommées par chacun des récepteurs

Théorème de BOUCHEROT

Système triphasé

Puissance en triphasé - 2

En considérant trois récepteurs identiques (charge triphasée équilibrée) alimentés par une source triphasée équilibrée, les puissances se calculent par les relations suivantes :

- Montage étoile :

$$\begin{aligned}P_1 &= P_2 = P_3 = V_c I_c \cos(\varphi) \\ \rightarrow P_T &= \sum_{n=1}^3 P_n = 3VI \cos(\varphi) = 3\frac{U}{\sqrt{3}}I \cos(\varphi) \\ P_T &= \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \\ Q_T &= \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \\ S_T &= \sqrt{3}UI = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}\end{aligned}$$

- Montage triangle :

$$\begin{aligned}P_1 &= P_2 = P_3 = V_c I_c \cos(\varphi) \\ \rightarrow P_T &= \sum_{n=1}^3 P_n = 3UI_c \cos(\varphi) = 3U\frac{I}{\sqrt{3}} \cos(\varphi) \\ P_T &= \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \\ Q_T &= \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \\ S_T &= \sqrt{3}UI = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}\end{aligned}$$

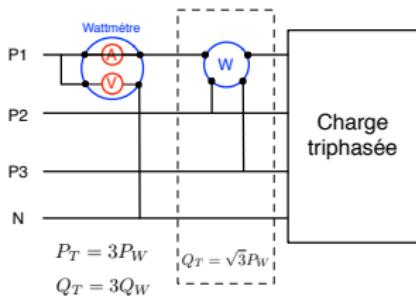
- mêmes expressions en couplage étoile ou triangle.
- l'angle φ représente le déphasage entre la tension et le courant d'un élément (entre v_c et i_c).

Système triphasé

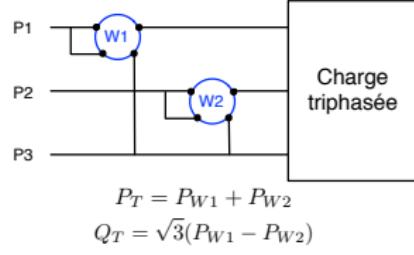
Mesure de puissance en triphasé - 1

La mesure de puissance en triphasé est réalisée grâce à un wattmètre

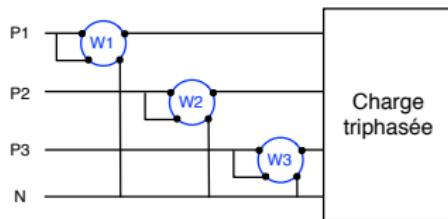
Charge triphasée équilibrée avec neutre



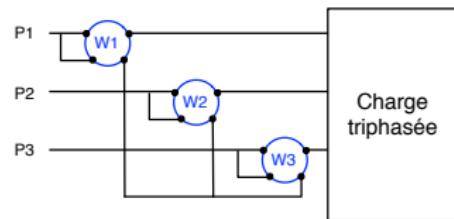
Charge triphasée équilibrée ou déséquilibrée sans neutre



Charge triphasée équilibrée ou déséquilibrée avec neutre



Charge triphasée équilibrée ou déséquilibrée sans neutre



Système triphasé

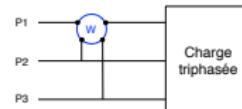
Mesure de puissance en triphasé - 2

Exemple de wattmètres numériques :

- Wattmètre triphasé (monophasé) :



Charge triphasée équilibrée sans (avec) neutre



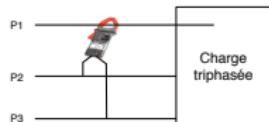
Mesures réalisées :

$$P_T - Q_T - S_T$$

$$FP - I - U$$



Charge triphasée équilibrée sans (avec) neutre



Mesures réalisées :

$$P_T - Q_T - U - I$$

Analyse harmonique

- Analyseur de réseau :



Mesures réalisées :

- courants - tensions
- puissances - harmoniques
- energie - ...

VOLTS/AMPS/HERTZ METER

0:00:10				10:00:00
L1	L2	L3	N	3.55
Urms _Δ	233.97	240.84	255.08	
L12	L23	L31		
Urms _Δ	408.41	431.05	424.98	
L1	L2	L3	N	
Rrms	57	62	56	30
Hz	50.056			

Système triphasé

Résumé

- Système équilibré de 3 tensions déphasées de $\pm 2\pi/3$

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$v_2(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$v_3(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

- Deux niveaux de tension (tension simple V et tension composée U)
- Limitation des pertes lors du transport de puissance
- Permet d'alimenter des charges triphasées connectées en étoile ou en triangle
- Délivre une puissance constante dans le récepteur
- Utilisé dans le transport et la distribution de l'énergie électrique
- Permet de créer des champs magnétiques tournants (cf "machines électriques")

Bibliographie :

Vidéothèque :

- [Video : Comment est fabriqué un câble électrique](#)
- [Video : L'histoire de la distribution électrique en France](#)

Site web :

- [Le blog du transport d'énergie](#)

Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

Le redressement

Pourquoi redresser, quel redresseur et comment le faire ?

Pourquoi ?

Tous les appareils électriques ne fonctionnent pas en alternatif avec une tension efficace égale à celle du réseau de distribution :

- Ordinateur, téléphone mobile, lecteur MP3 (MP4 ...)
- Alimentation des machines à courant continu
- ...

⇒ Nécessité de transformer la tension alternative du réseau en tension continue.

Comment ?

Le passage d'une tension alternative en tension continue s'effectue à partir de circuits composés de diodes, thyristors, IGBTs,

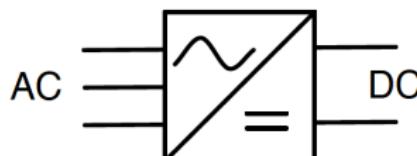
⇒ Tout dépend du niveau de tension et du niveau de courant souhaités.

*On parlera, en électrotechnique, d'**électronique de puissance** !*

Monophasé



Triphasé



Redressement non commandé // redressement commandé

Définition

Il existe deux types de redresseurs :

- **Les redresseurs non commandés**

Ils sont construits à base de diodes, ce qui implique que la valeur moyenne de la tension redressée n'est pas réglable (mise en conduction et blocage "naturel" des diodes).

- **Les redresseurs commandés**

A l'inverse, ces redresseurs sont construits à base d'interrupteurs commandables (thyristor, IGBT,...) ce qui permet, via une commande adaptée, de régler la valeur moyenne de la tension continue de sortie.



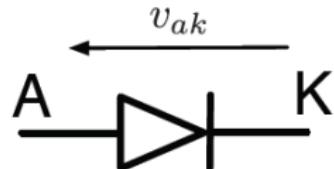
Redresseur de quelques ampères



Redresseur 150 kV à vapeur de mercure (Canada)

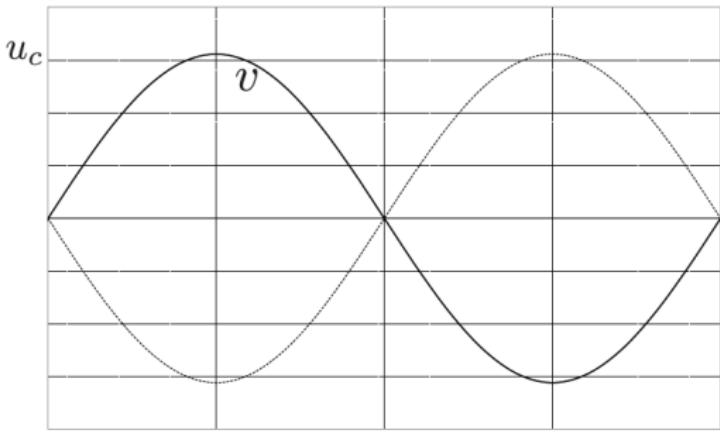
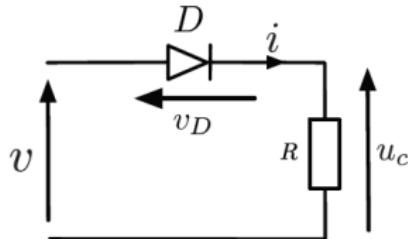
Le redresseur non commandé

Circuit à base de diode(s) - Rappel



- Condition d'amorçage :

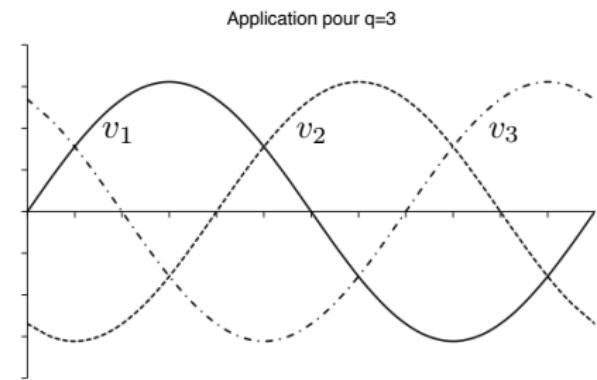
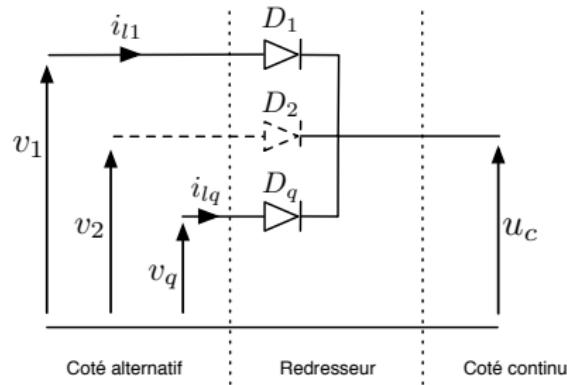
- Condition de blocage :



Le redresseur non commandé

Montage P3 à cathodes communes - 1

- Coté alternatif : Système de q tensions alternatives.
- Redresseur trois diodes à **cathodes** communes.
- Coté continu : Charge résistive.



Règle à adopter :

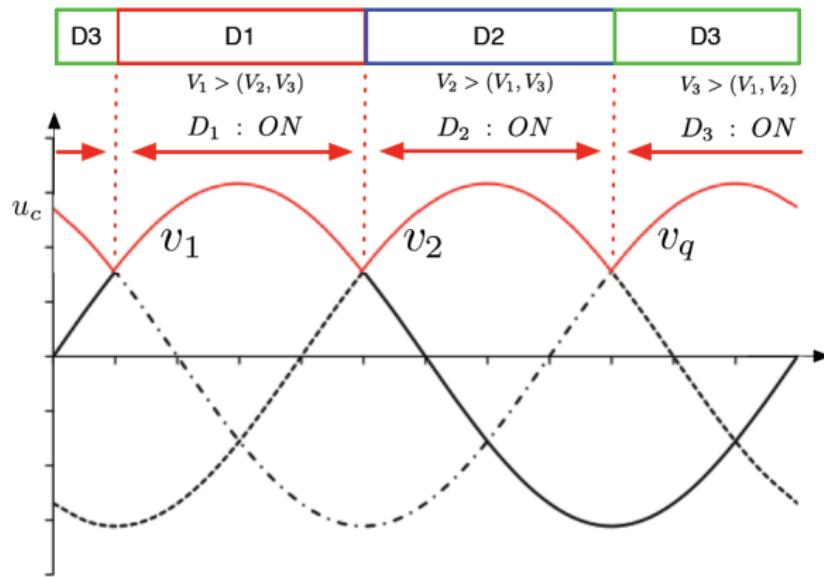
Le redresseur non commandé

Montage P3 à cathodes communes - 2

Mise en application pour le montage cathodes communes avec $q = 3$:

si $v_i > (v_1, v_2, \dots, v_q)$ **alors la diode D_i conduit**

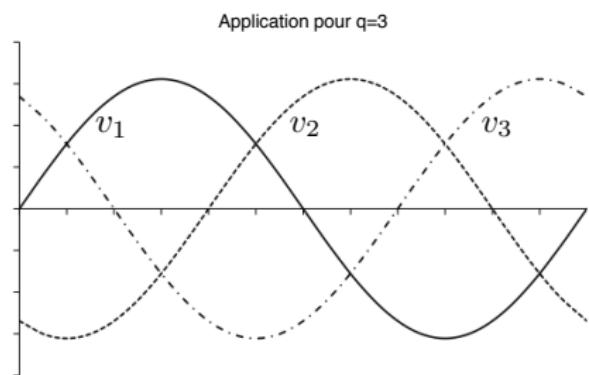
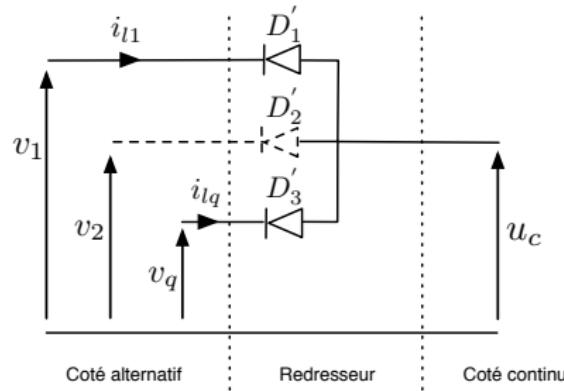
alors, la tension u_c aux bornes de la charge donne :



Le redresseur non commandé

Montage P3 à anodes communes - 1

- Coté alternatif : Système de q tensions alternatives.
- Redresseur trois diodes à **anodes** communes.
- Coté continu : Charge résistive.



Règle à adopter :

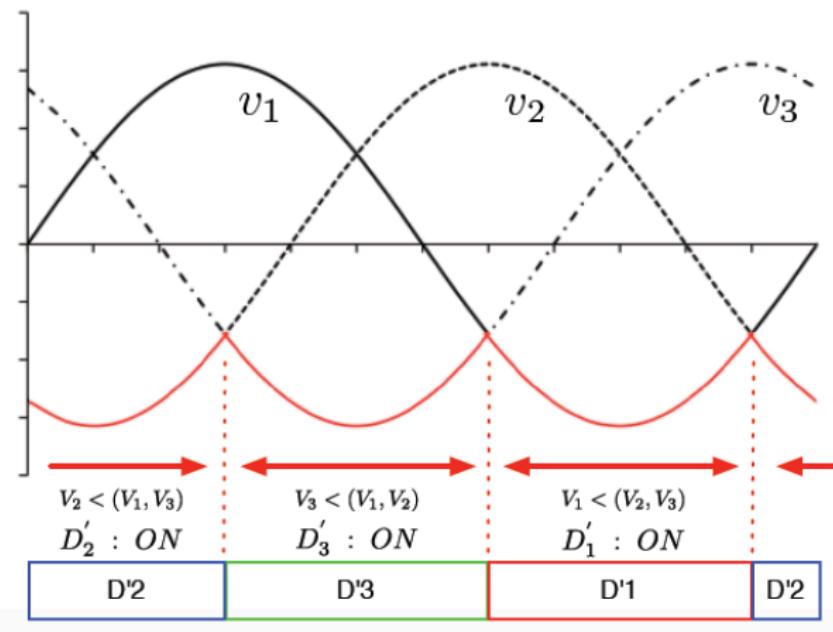
Le redresseur non commandé

Montage P3 à anodes communes - 2

Mise en application pour le montage cathodes communes avec $q = 3$:

si $v_i < (v_1, v_2, \dots, v_q)$ alors la diode D_i conduit

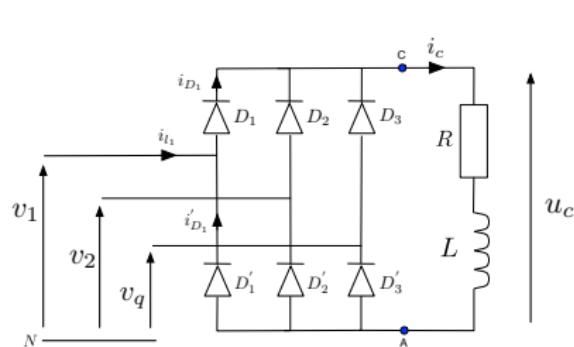
alors, la tension U_c aux bornes de la charge donne :



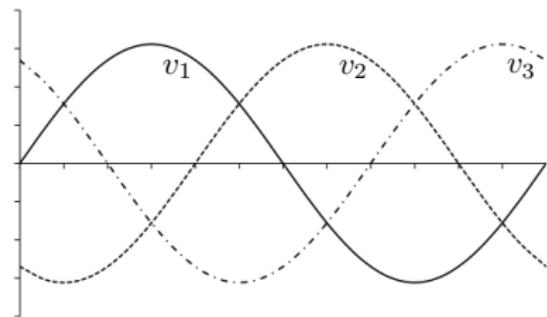
Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - 1

- Coté alternatif : Trois tensions alternatives déphasées de $\pm 2\pi/3$ par rapport à $v_1(t)$.
- Redresseur à six diodes :
 - 3 à cathodes communes
 - 3 à anodes communes
- Coté continu : Charge R-L.



Application pour q=3



Règle à adopter :

- 1 Déterminer les instants de conduction de chaque diode.
- 2 Tracer les tensions entre cathodes (communes) et neutre v_{CN} puis entre anodes (communes) et neutre v_{AN} pour chaque binôme de diodes en conduction.
- 3 Construire la tension u_c à partir des deux tensions v_{CN} et v_{AN} .

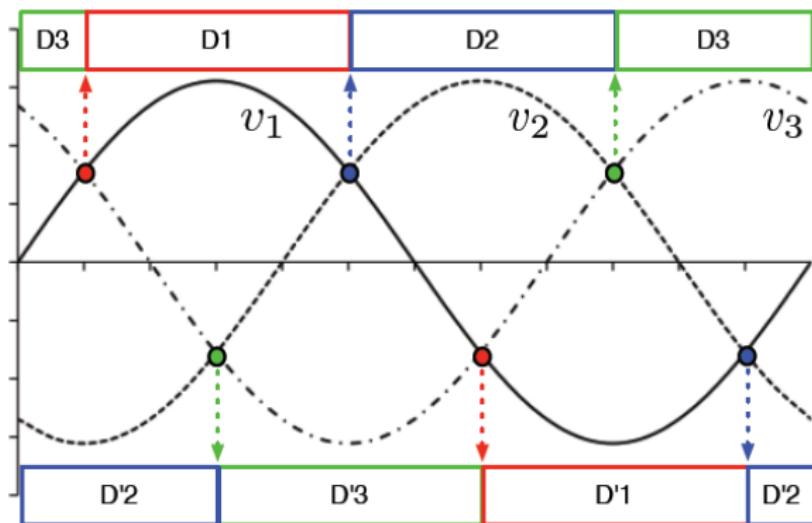
Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - 2

- 1 Déterminer les instants de conduction de chaque diode.

- 2 ...

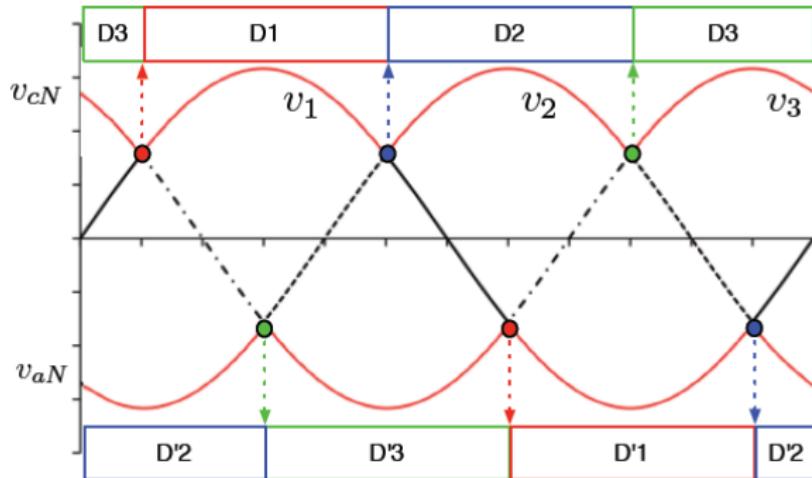
- 3 ...



Le redressement non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - 3

- 1 ...
- 2 Tracer les tensions entre cathodes (communes) et neutre v_{CN} puis entre anodes (communes) et neutre v_{AN} pour chaque binôme de diodes en conduction.
- 3 ...



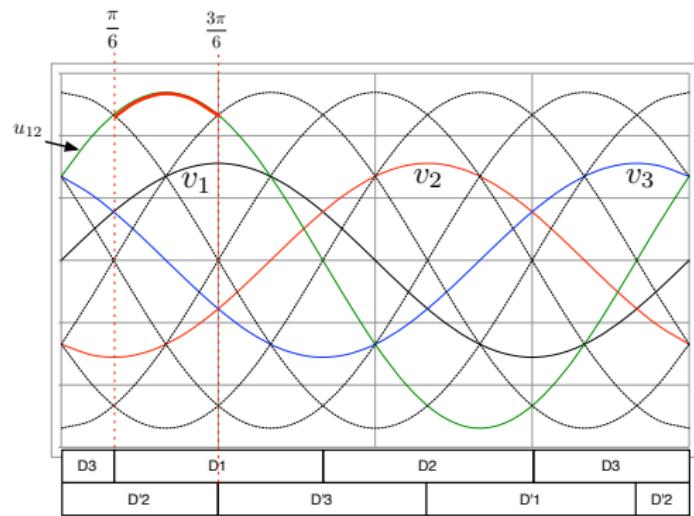
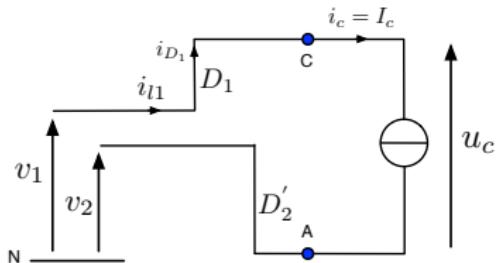
Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - 4

1 ...

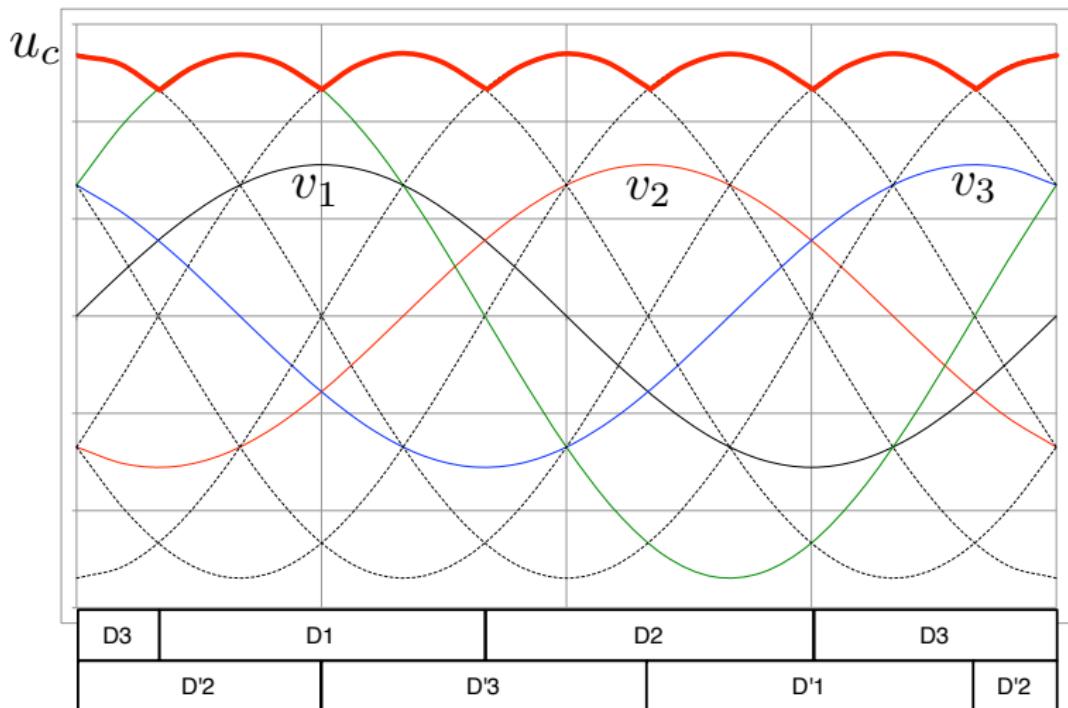
2 ...

3 Construire la tension U_c à partir des deux tensions v_{CN} et v_{AN} .



Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - 5



Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - Calcul de la valeur moyenne \bar{U}_c

Rappel :

$$\bar{X} = \frac{1}{T_{(sec)}} \int_0^{T_{(sec)}} x(t) dt \quad \text{ou} \quad \bar{X} = \frac{1}{T_{(rd)}} \int_0^{T_{(rd)}} x(\theta) d\theta$$

Le calcul de la valeur moyenne de la tension u_c donne :

$$\bar{U}_c =$$

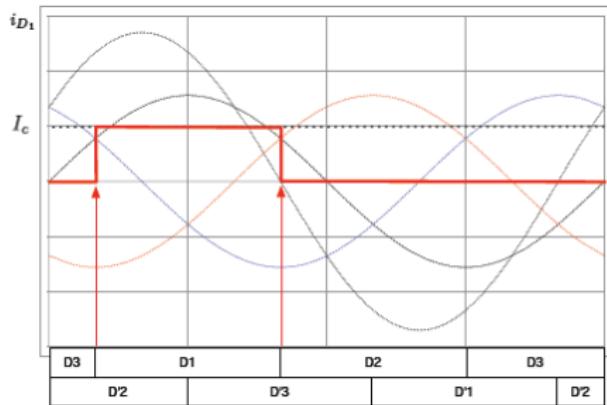
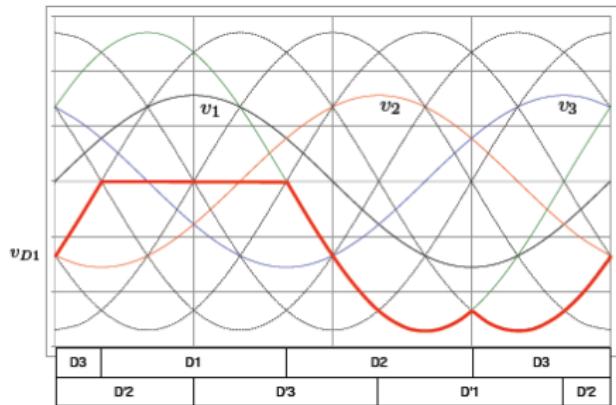
$$\bar{U}_c = \frac{6}{T} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V\sqrt{6} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta$$

$$\bar{U}_c = \frac{6V\sqrt{6}}{2\pi} \left[-\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\pi/6}^{\pi/2}$$

$$\bar{U}_c = \frac{3\hat{V}\sqrt{3}}{\pi} = 1,6540 \hat{V}$$

Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - Analyse de la tension et du courant d'une diode ($v_D(t)$ et $i_D(t)$)

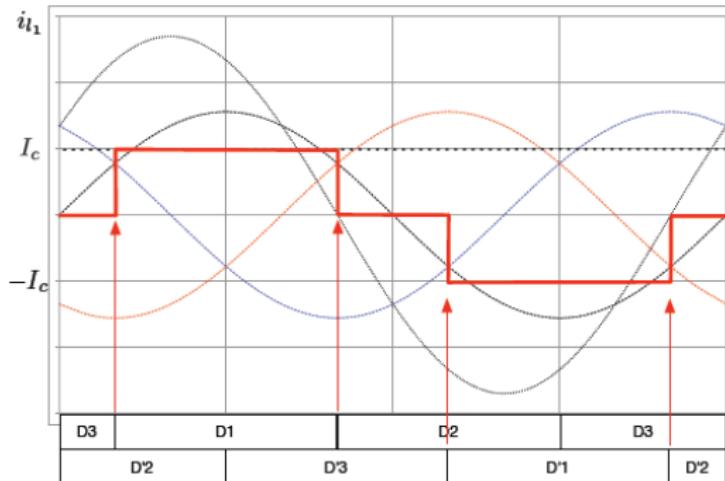


Le choix du composant est réalisé notamment à partir des valeurs maximales de la tension inverse et du courant direct qu'il subira.

Le redresseur non commandé

Montage PD3 (Pont de Graëtz) - Analyse du courant $i_L(t)$

Hypothèse : On considérera que l'inductance L permet d'assurer un courant constant $i_c(t) = I_c$ dans la charge.



$$\overline{i_L} = 0$$

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_L(\theta)^2 d\theta} = \left(\frac{1}{T} 2I_c^2 \frac{T}{3} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c$$

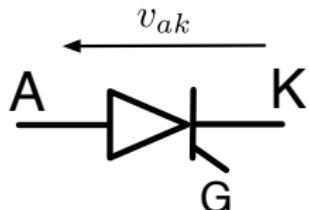
Le redresseur non commandé

Résumé

- Permet la transformation d'une (ou plusieurs) tension(s) alternative(s) $v_q(t)$ (valeur moyenne nulle) en tension continue $u_c(t)$ (valeur moyenne non nulle).
- La valeur moyenne de la tension redressée $\overline{U_c}$ n'est pas réglable (montage à base de diodes).
- En triphasé, la valeur moyenne de la tension redressée $\overline{U_c}$ est fonction de la valeur efficace V de la tension coté alternatif $v_q(t)$.
- Transfert de la puissance unidirectionnel (le transfert de puissance ne peut se faire que de la source vers la charge).
- Il existe d'autres montages redresseurs à base de diodes (P2, PD2, P2 à point milieu, redresseurs filtrés). Leur étude est basée sur le même principe que celui décrit précédemment.

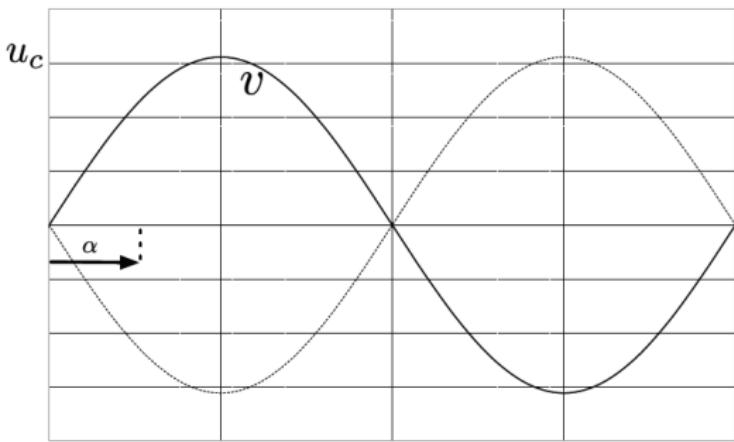
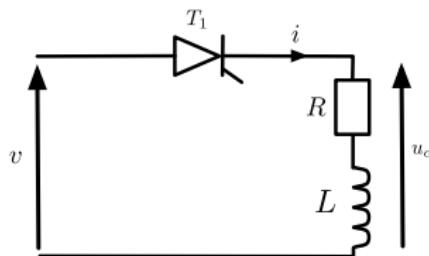
Le redresseur commandé

Circuit à base d'interrupteur(s) - Rappel



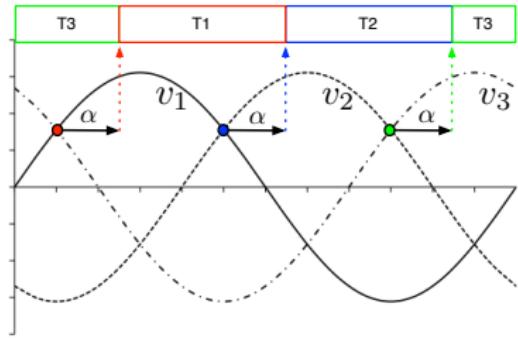
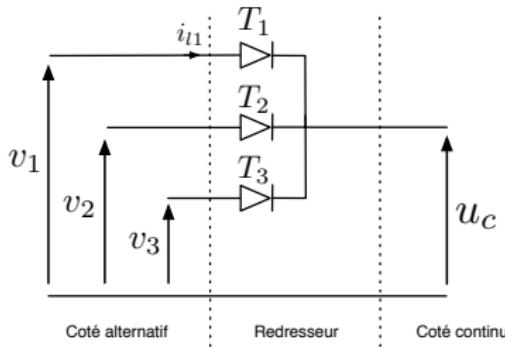
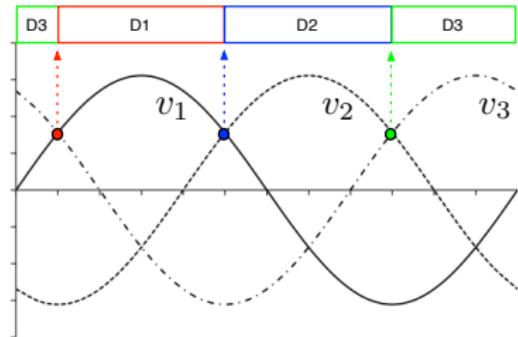
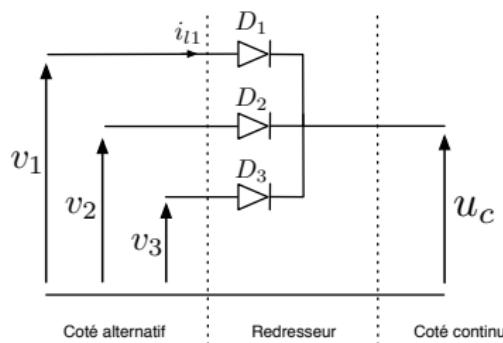
- Conditions d'amorçage :

- Condition de blocage :



Le redresseur commandé

Comparaison P3 tout diodes - P3 tout thyristors



Le redresseur commandé

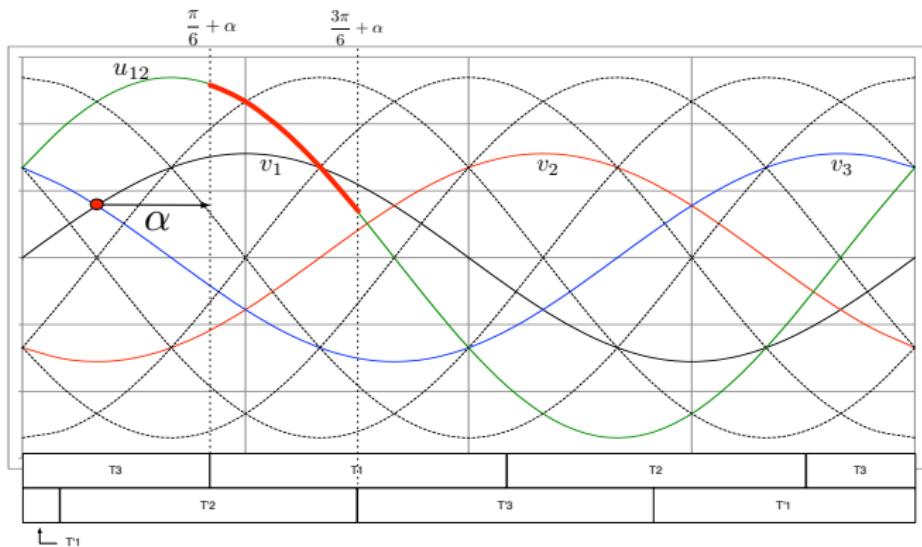
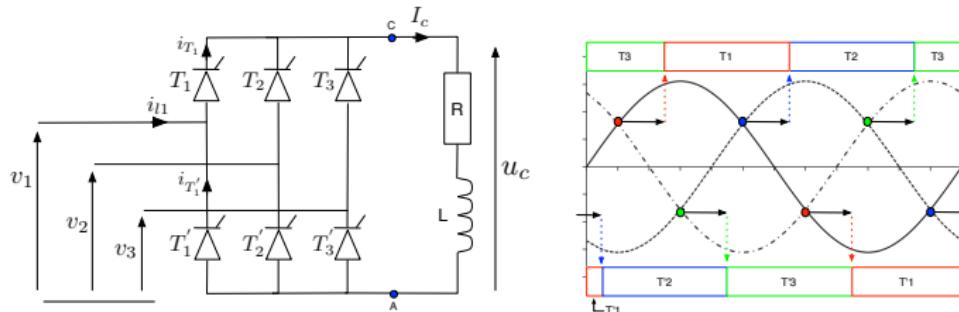
Comparaison P3 tout diodes - P3 tout thyristors

La valeur moyenne de $u_c(t)$ donne :

$$\begin{aligned}\overline{U_c} &= \frac{1}{T} \int_0^T u_c(\theta) d\theta = \frac{3}{T} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V\sqrt{2} \sin(\theta) d\theta \\ \overline{U_c} &= \frac{3V\sqrt{6}}{2\pi} \cos(\alpha)\end{aligned}$$

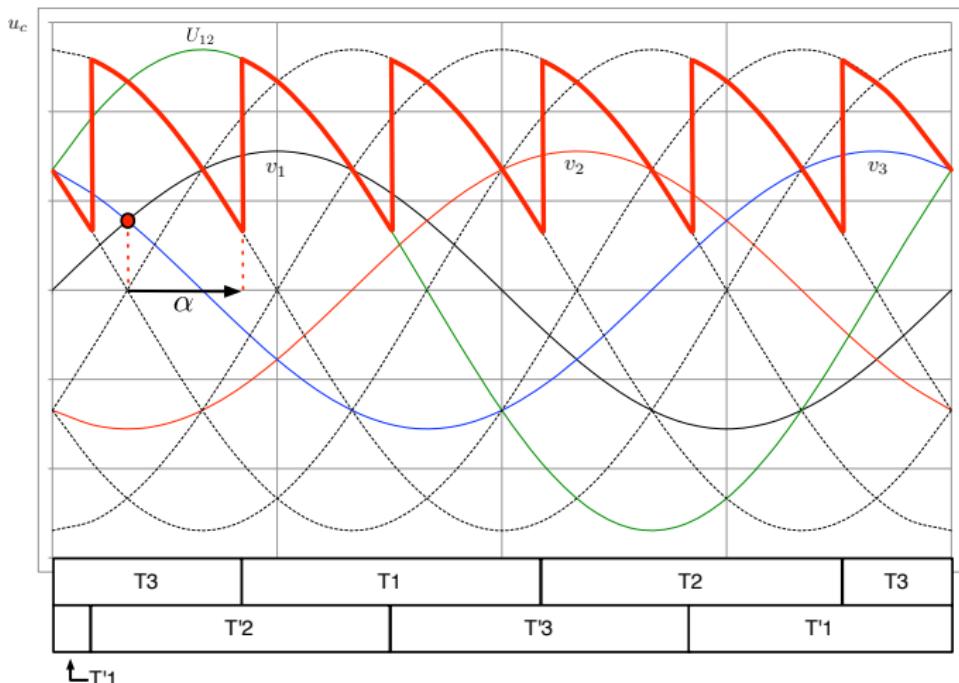
Le redresseur commandé

Montage PT3 - 1



Le redresseur commandé

Montage PT3 - 2



Le redresseur commandé

Montage PT3 - Calcul de la valeur moyenne $\overline{U_c}$

Rappel :

$$\overline{X} = \frac{1}{T_{(sec)}} \int_0^{T_{(sec)}} x(t) dt \quad \text{ou} \quad \overline{X} = \frac{1}{T_{(rd)}} \int_0^{T_{(rd)}} x(\theta) d\theta$$

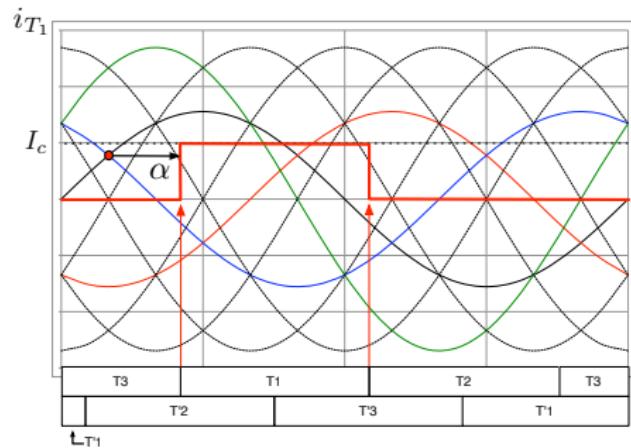
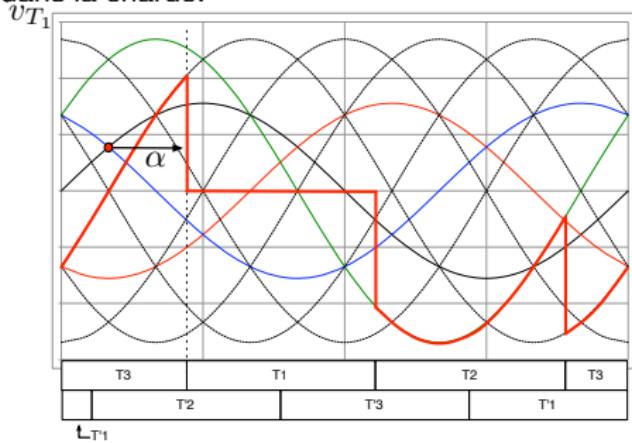
Le calcul de la valeur moyenne de la tension $u_c(t)$ donne :

$$\begin{aligned}\overline{U_c} &= \frac{6}{T} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} V\sqrt{6} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \\ \overline{U_c} &= \frac{3V\sqrt{6}}{\pi} \cos(\alpha)\end{aligned}$$

Le redresseur commandé

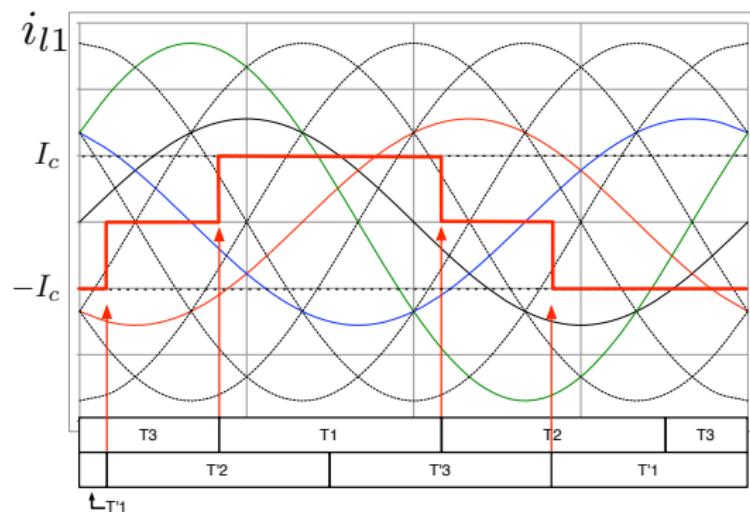
Montage PT3 - Analyse de la tension et du courant d'un interrupteur : $v_T(t)$ et $i_T(t)$

Hypothèse : On considérera que l'inductance L permet d'assurer un courant constant $i_c(t) = I_c$ dans la charge.



Le redresseur commandé

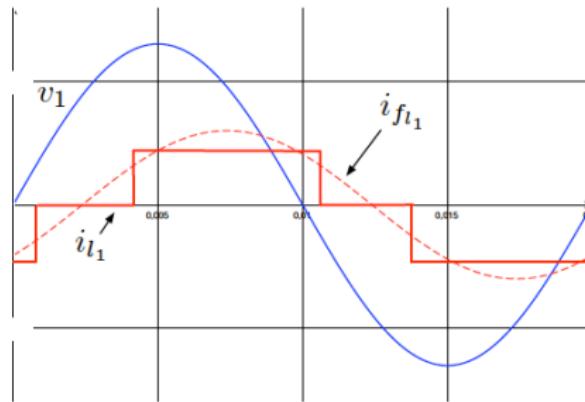
Montage PT3 (Pont de Graëtz) - Analyse du courant $i_l(t)$



$$I_{l_1} =$$

Le redresseur commandé

Montage PT3 - Déphasage tension/courant



→ Présence de puissance déformante D

Le redresseur commandé

Résumé

- Permet la transformation d'une (ou plusieurs) tension(s) alternative(s) $v_q(t)$ (valeur moyenne nulle) en tension continue $u_c(t)$ (valeur moyenne non nulle).
- La valeur moyenne de la tension redressée $\overline{U_c}$ **est** réglable (montage à base d'interrupteurs) grâce à l'angle d'amorçage α .
- En triphasé, la valeur moyenne de la tension redressée $\overline{U_c}$ est fonction :
 - de la valeur efficace V de la tension coté alternatif $v_q(t)$
 - de l'angle d'amorçage α des interrupteurs
- Transfert de puissance bidirectionnel (le transfert de puissance peut se faire de la source vers la charge ou de la charge vers la source → fonction de l'angle α)
- Il existe d'autres montages redresseurs à base d'interrupteurs (P2, PT2, Pont mixte : mélange de diode(s) et d'interrupteur(s)). Leur étude est basée sur le même principe que celui décrit précédemment.

A retenir :

- C'est la source qui impose la forme de la tension aux bornes de la charge
- C'est la charge qui impose la forme du courant fourni par la source

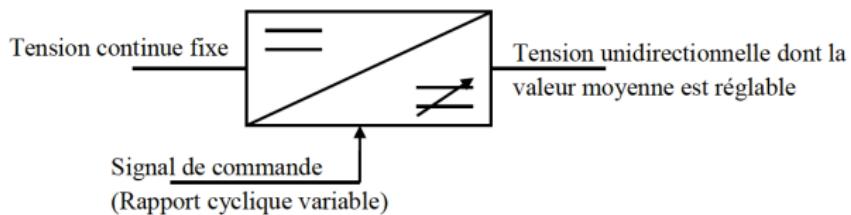
Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

Le hacheur

Principe de fonctionnement

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une tension continue fixe (en provenance d'un redresseur par exemple) en une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. Ce sont des convertisseurs continu-continu.

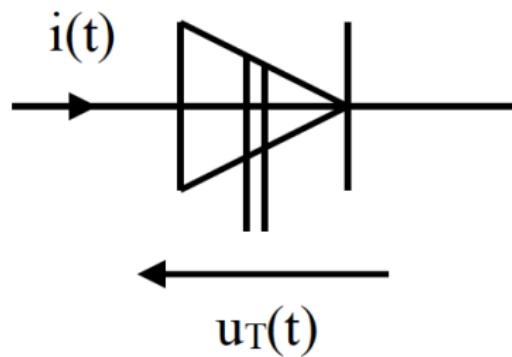


Le hacheur

Définition

Ils sont principalement utilisés en association avec un redresseur pour la variation de vitesse des machines à courant continu.

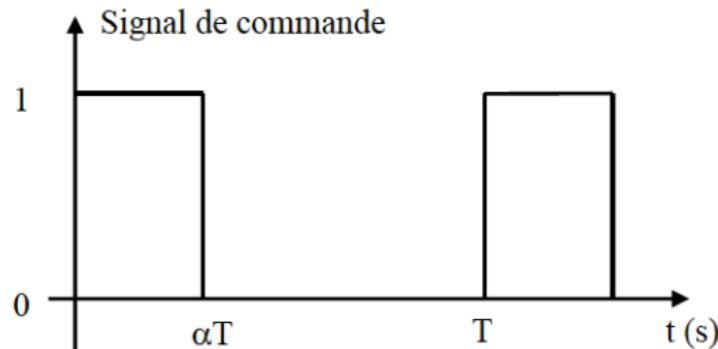
Ces montages utilisent des interrupteurs statiques unidirectionnels (montage à thyristors ou à transistor en commutation) commandés à l'ouverture et à la fermeture (d'où le symbole avec 2 « gâchettes », l'une pour l'ouverture et l'autre pour la fermeture).



Le hacheur

Signal de commande

On représente usuellement la commande de cet interrupteur par un signal logique :



T est la période de hachage et α le rapport cyclique ($0 < \alpha < 1$).

Lorsque le signal de commande est au niveau haut, alors l'interrupteur est fermé (passant) : $u_T(t) = 0$ et $i(t) > 0$.

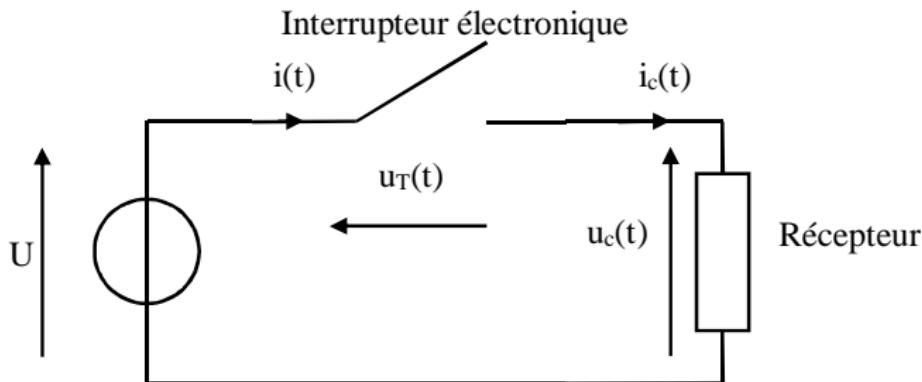
Lorsque le signal de commande est au niveau bas, alors l'interrupteur est ouvert (non passant) : $u_T(t) \neq 0$ et $i(t) = 0$.

Le hacheur série

Principe

Le principe de base consiste en un découpage à haute fréquence d'une tension continue U afin d'obtenir une tension de sortie :

- égale à U lorsque l'interrupteur est fermé
- nulle lorsqu'il est ouvert



Le hacheur série

Principe

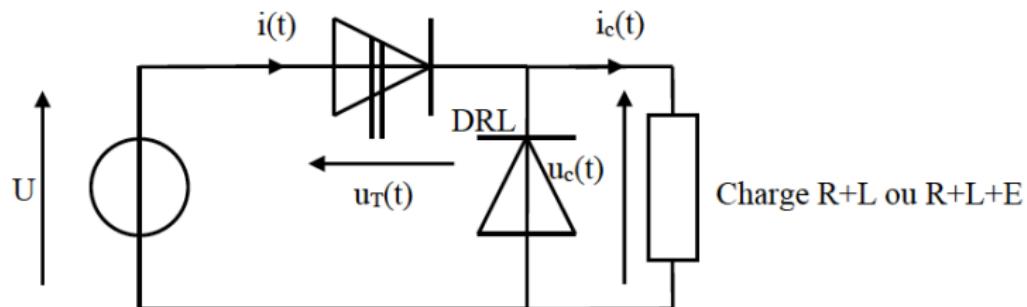
- Ce montage est destiné à alimenter des récepteurs (que l'on appelle charge) avec une tension dont la valeur moyenne $\langle u_c(t) \rangle$ de $u_c(t)$ est réglable.
- Il est typiquement associé avec l'induit d'une machine à courant continu afin d'assurer un réglage de la vitesse.
- Pour assurer le réglage de la valeur moyenne et donc de la vitesse on agit sur la durée d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur par action sur le rapport cyclique.

Le hacheur série

Fonctionnement

Le hacheur série est appelé aussi abaisseur de tension ou buck converter.

On suppose que générateur et récepteur sont parfaits : la tension d'entrée U et le courant $i_c(t)$ absorbé par la charge sont parfaitement constants ($i_c(t) = I_c$).



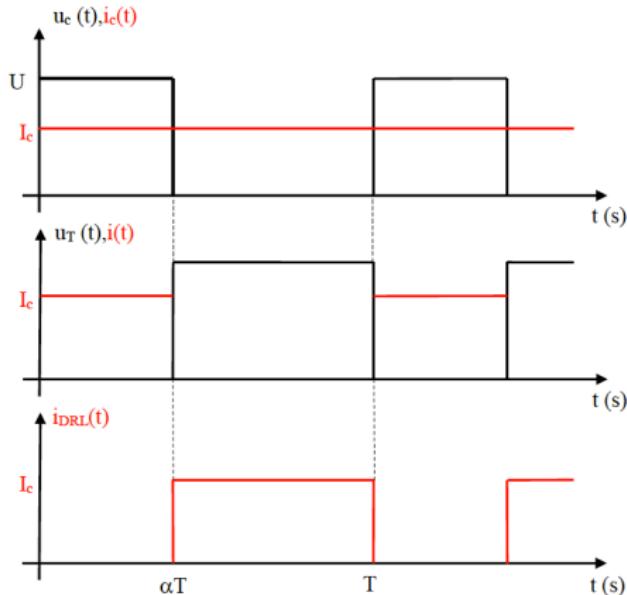
Le hacheur série

Fonctionnement

- La charge peut-être une résistance en série avec une bobine ou plus généralement l'induit d'une machine à courant continu représenté alors par son modèle équivalent de Thévenin (résistance et fém en série). Il est nécessaire dans ce cas d'ajouter une bobine en série afin d'assurer la linéarité du courant $i_c(t)$.
- Le courant dans la charge étant constant $i_c(t) = I_c$, il est indispensable d'ajouter une diode (appelée diode de roue libre) en parallèle afin d'assurer la continuité du courant lorsque l'interrupteur est ouvert.

Le hacheur série

Evolutions temporelles des courants et des tensions



Valeur moyenne de $u_c(t)$

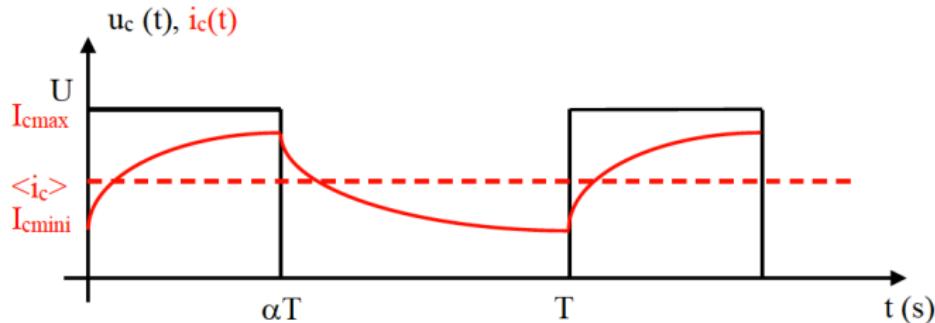
La valeur moyenne de la tension de sortie est proportionnelle au rapport cyclique :

$$\langle u_c \rangle = \alpha U$$

Le hacheur série

Remarques

- Le courant délivré par la source de tension continue n'est pas constant, il est donc nécessaire d'avoir une source acceptant les discontinuités de courant.
- Dans le cas d'un montage réel, le courant $i_c(t)$ n'est pas parfaitement constant mais ondule autour de sa valeur moyenne (il ne passe cependant jamais par 0) :



On montre que l'ondulation de courant est donnée par :

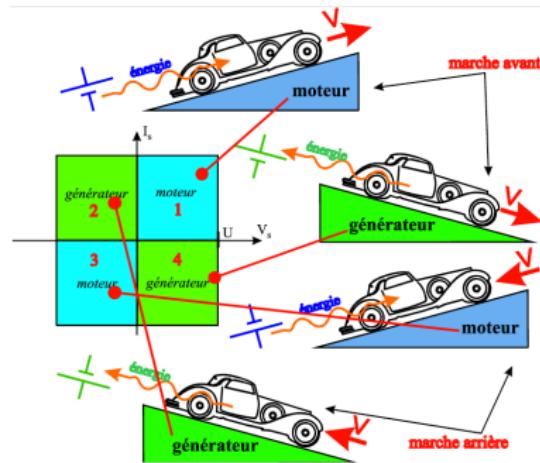
$$\Delta I_c = I_{c_{maxi}} - I_{c_{mini}} = \frac{(1-\alpha)\alpha U}{L_f}$$

Pour que cette ondulation soit la plus faible possible afin de tendre vers une valeur constante, il faut soit augmenter l'inductance de la bobine soit la fréquence de hachage.

Le hacheur 4 quadrants

Principe

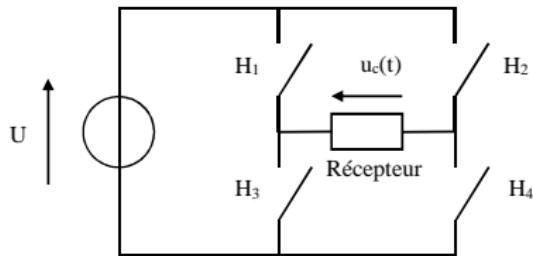
- Le montage hacheur série ne permet pas la réversibilité de la tension et du courant dans la charge.
- Si cette charge est une machine à courant continu, ce qui est en général le cas, il est alors impossible d'inverser le sens de rotation de la machine (par action sur $< u >$) et le couple (par action sur $< i >$).
- Un bon nombre d'applications industrielles nécessitent cette réversibilité (monte-chARGE, convoyeur, ...). Le moteur doit alors fonctionner dans les 4 quadrants mécaniques :



Le hacheur 4 quadrants

Principe

- Le montage utilisé est cette fois constitué de 4 interrupteurs électroniques qui permettent l'inversion de la tension $u_c(t)$ aux bornes du récepteur.

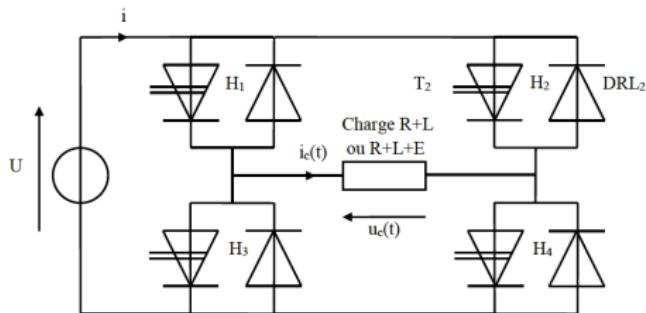


- Le courant dans la charge (le récepteur) étant constant et les interrupteurs électroniques ne pouvant laisser passer le courant que dans un seul sens, il est comme précédemment indispensable d'ajouter une diode (appelée diode de roue libre) en parallèle sur l'interrupteur.
- L'interrupteur H est donc l'association en parallèle d'un transistor T et d'une diode de roue libre DRL.

Le hacheur 4 quadrants

Schéma du hacheur 4Q

Le montage utilisé est constitué de 4 interrupteurs électroniques associés avec une diode de roue libre.



La commande des interrupteurs T_1 et T_3 d'une part et T_2 , T_4 d'autre part, doit être complémentaire pour que la source de tension d'entrée ne soit jamais en court-circuit et la charge jamais en circuit ouvert.

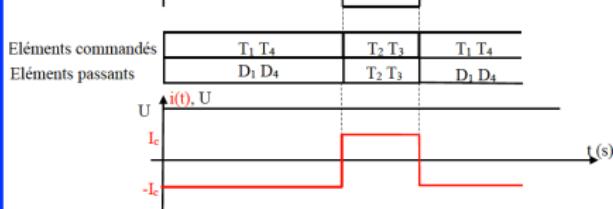
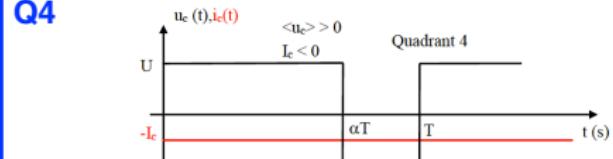
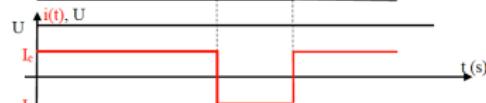
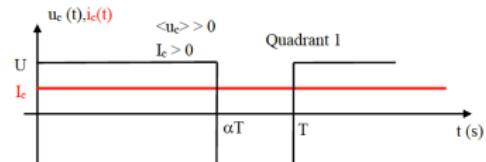
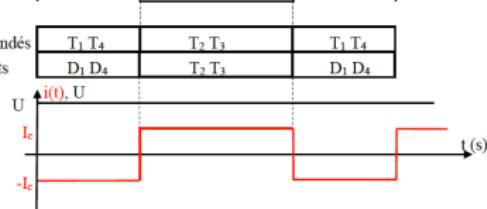
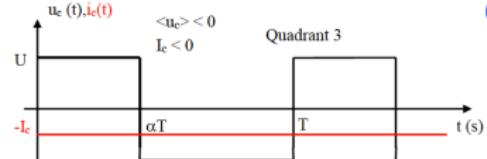
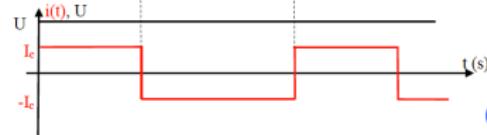
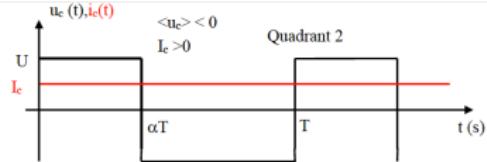
La commande des interrupteurs peut être séquentielle (réduction du nombre de commutations) ou continue (réduction des temps morts liés au changement de loi de commande).

Dans le cas où la charge est une machine à courant continu, on a besoin d'inversions rapides de la tension et du courant, on adopte par conséquent plutôt une commande continue :

- T_1 et T_4 fermés de 0 à αT
- T_2 et T_3 fermés de αT à T .

Le hacheur 4 quadrants

Fonctionnement dans les 4 quadrants



Le hacheur 4 quadrants

Valeur moyenne de la tension $u_c(t)$

Valeur moyenne de la tension $u_c(t)$

La valeur moyenne de la tension de sortie est liée au rapport cyclique α :

$$\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1)U$$

Les remarques énoncées pour le hacheur série sont toujours valables. Attention cependant au cas particulier $\langle i_c \rangle = 0$.

A retenir :

- C'est la source qui impose la forme de la tension aux bornes de la charge
- C'est la charge qui impose la forme du courant fourni par la source

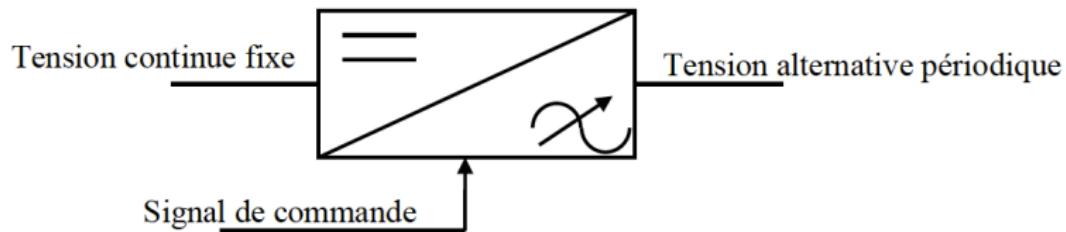
Plan de la présentation

- 1 Objectifs et répartition du module
- 2 Rappels
- 3 Le transformateur monophasé
- 4 Le système triphasé
- 5 La conversion AC/DC : le redresseur
 - Le redresseur non commandé
 - Le redresseur commandé
- 6 La conversion DC/DC : le hacheur
 - Le hacheur série
 - Le hacheur 4 quadrants
- 7 La conversion DC/AC : l'onduleur
 - L'onduleur pleine onde
 - L'onduleur onde décalée
 - L'onduleur MLI

L'onduleur

Principe de fonctionnement

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une tension continue fixe (en provenance d'un redresseur par exemple) en une tension et un courant alternatifs de valeur moyenne nulle. Ce sont des convertisseurs continu-alternatif.



On ne parle dans cette partie que des onduleurs autonomes, dont la fréquence des grandeurs de sorties ne dépend que de la commande des interrupteurs.

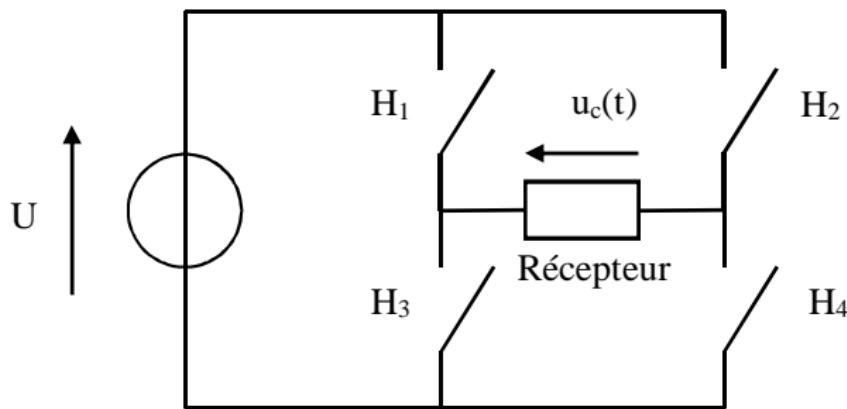
L'onduleur

Principe de fonctionnement

- Les onduleurs à fréquence fixe sont utilisés pour réaliser des alimentations de secours (type informatique). On cherche à maintenir constante l'amplitude de la tension de sortie.
- Les onduleurs à fréquence réglable sont utilisés en association avec un redresseur pour la variation de vitesse des machines à courant alternatif.
- Ces montages utilisent le même type d'interrupteurs statiques que les hacheurs. La structure des onduleurs monophasés est d'ailleurs la même que celle des hacheurs 4 quadrants mais avec une logique de commande différente.
- La valeur moyenne du signal de sortie devant être nulle, le rapport cyclique est maintenu égal à 0,5. On modifie la période des signaux de commande et l'amplitude de la tension d'entrée afin de régler la valeur efficace et la fréquence de la tension de sortie.

L'onduleur pleine onde

Principe

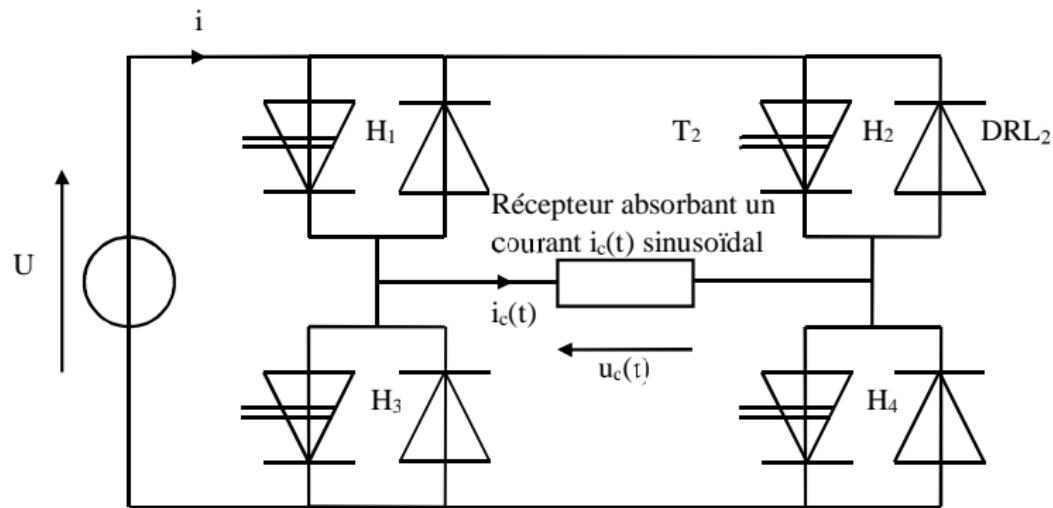


- Interrupteurs H_1 et H_4 fermés de 0 à $T/2$
- Interrupteurs H_2 et H_3 fermés de $T/2$ à T

L'onduleur pleine onde

Principe

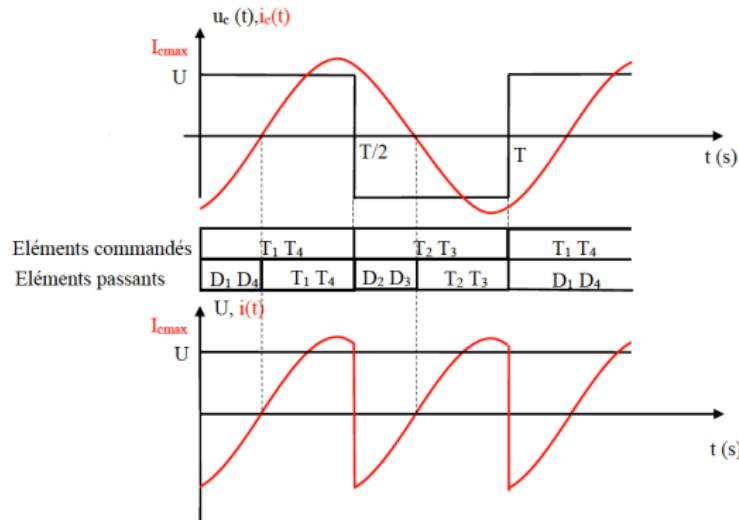
Ces montages destinés à alimenter des récepteurs fonctionnant en courant alternatif, les interrupteurs H doivent comme pour le hacheur 4 quadrants être constitués d'un interrupteur statique unidirectionnel commandé à l'ouverture et à la fermeture (un transistor en commutation) et une diode de roue libre.



L'onduleur pleine onde

Fonctionnement

C'est le mode de fonctionnement le plus simple, puisqu'on réalise une commande symétrique des interrupteurs T_1, T_3 et T_2, T_4 (rapport cyclique = 0,5). La charge est un récepteur de courant alternatif et on supposera qu'il absorbe un courant parfaitement sinusoïdal.



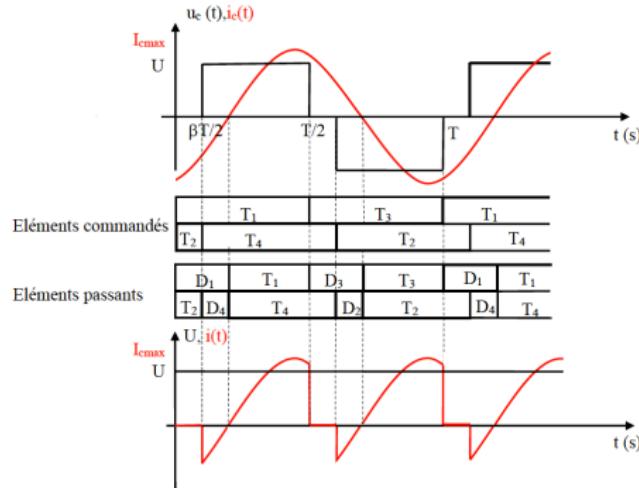
$$u_c(t) = \frac{4U}{\pi} (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots)$$

son THDU est donc très élevé (THDU = 48%).

L'onduleur onde décalée

Fonctionnement

Exemple : la commande décale d'un temps $\frac{\beta T}{2}$ ($0 < \beta < 1$) la mise en conduction des interrupteurs :



L'étude de la tension de sortie montre que sa valeur efficace est donnée par : $U_c = U\sqrt{1 - \beta}$.
Sa décomposition en série de Fourier est :

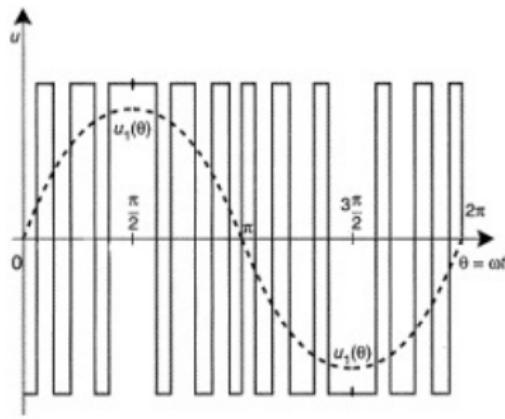
$$u_c(t) = \frac{4U}{\pi} \left(\cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cos\left(\frac{3\beta\pi}{2}\right) \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos\left(\frac{5\beta\pi}{2}\right) \sin(5\omega t) + \dots \right)$$

Les harmoniques 3, 5, 7, ... ont une amplitude plus faible que pour une commande symétrique. Pour une valeur de β judicieusement choisie, il est possible de supprimer l'harmonique de rang 3, 5 ou 7,

L'onduleur MLI

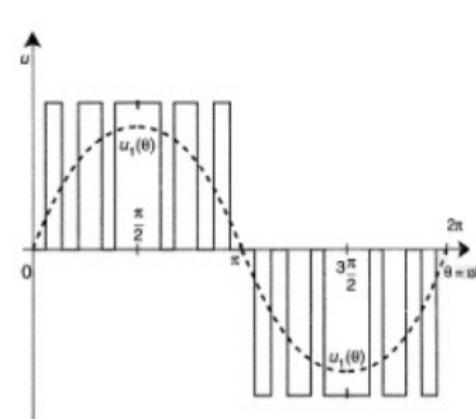
Fonctionnement

La commande décalée permet la suppression d'un harmonique mais ceux restants ont une fréquence encore trop voisine de celle du fondamental. Le principe de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou Pulse Width Modulation (PWM)) et de disposer de plusieurs angles de réglage afin de supprimer le plus grand nombre d'harmoniques notamment ceux proches du fondamental.



Onduleur MLI pleine onde

Le rang du premier harmonique du signal après le fondamental est fonction du nombre d'impulsions par période.

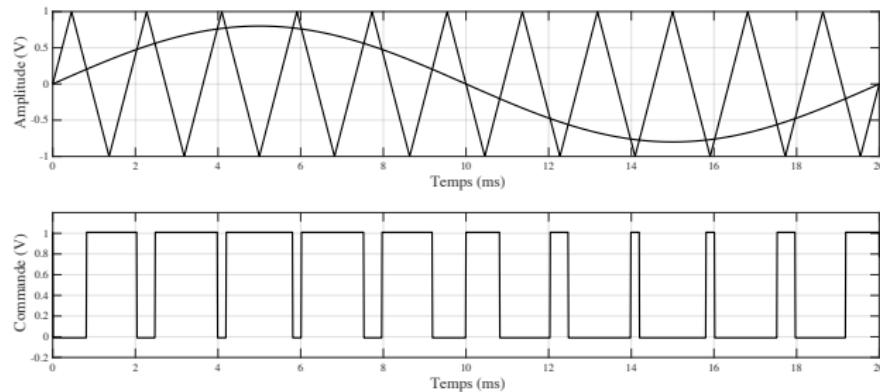


Onduleur MLI demi-onde

L'onduleur MLI

Fonctionnement

- La modulation de largeur d'impulsions consiste donc à commander les interrupteurs de manière à délivrer au récepteur (en général un moteur asynchrone) une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives et modulées en largeur.
- Dans les réalisations industrielles les plus anciennes, on utilisait une technique de commande analogique qui consiste à comparer une onde sinusoïdale (modulante) dont la fréquence est celle que l'on veut imposer au récepteur avec une tension triangulaire (porteuse) de fréquence élevée.

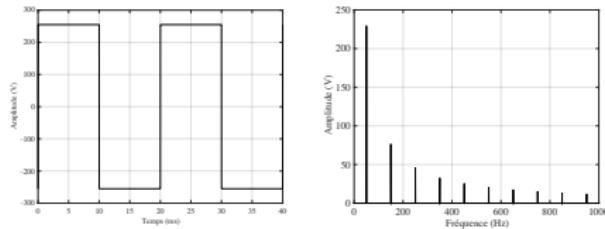


- L'apparition des microprocesseurs a permis de transposer le principe précédent en technique numérique, la modulation est maintenant entièrement réalisée par microprocesseur.

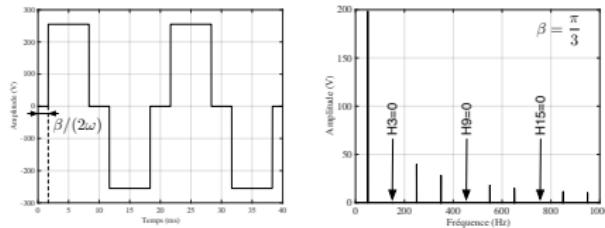
L'onduleur

Comparaison des trois modes de commande

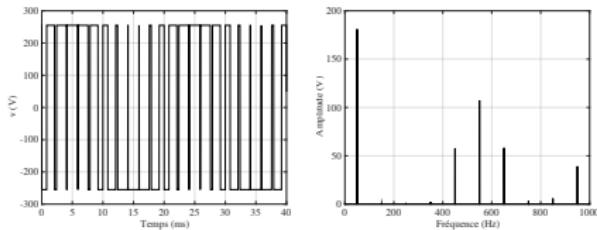
Pleine Onde



Onde décalée



MLI comparée
Asinus /Atri = 1 et Ftri/Fsinus = 11



MLI comparée
Asinus /Atri = 0.5 et Ftri/Fsinus = 11

