

Exercices de rappel sur l'alimentation triphasée

Problème 1 (Systèmes triphasés équilibrés) :

Un récepteur triphasé alimenté avec un système de tension triphasé équilibré 220/380V-f=50Hz. Le récepteur est constitué des éléments suivants :

- Un four électrique (triphasé, 3 fils) de puissance égale à 2000W.
 - Un moteur asynchrone dont la plaque signalétique porte les indications : 380/660V-50Hz, 15kW, $\cos\varphi = 0.7$, $\eta = 0.8$.
 - 15 tubes fluorescents répartis sur les 3 phases ; les caractéristiques de chaque tube sont les suivantes : 60W, 220V, $\cos\varphi = 0.6$
1. Quel couplage doit-on adopter pour le moteur ?
 2. Donner le schéma de l'installation.
 3. Calculer les puissances active et réactive absorbées par l'installation.
 4. Calculer le courant global absorbé par l'installation.
 5. Calculer la batterie des condensateurs, montés en étoile, à brancher en parallèle sur l'installation pour améliorer le facteur de puissance à 1.
 6. Calculer la batterie des condensateurs, montés en triangle, à brancher en parallèle sur l'installation pour améliorer le facteur de puissance à 1. Conclure pour le choix du couplage des condensateurs.

Problème 2 (Influence d'un condensateur sur les mesures de puissance) :

On dispose d'un système triphasé équilibré, de sens direct, relatifs aux tensions composées (u_{12} , u_{23} , u_{31}), de valeurs efficaces $U = 220$ V et de fréquence 50 Hz.

La tension $u_{12} = U\sqrt{2} \cdot \sin \omega t$ sera prise comme référence et on lui associe sa représentation complexe $\underline{U}_{12} = [U; 0]$

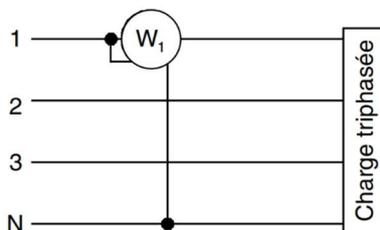
On rappelle que les tensions simples associées, côté réseau, (v_1 , v_2 , v_3) forment aussi un système triphasé équilibré de sens direct tel que $v_1 = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \alpha)$ avec $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$ et $\alpha = \pi/6^\circ$. La représentation complexe associée à v_1 est

donc : $\underline{V}_1 = [V; -\pi/6]$.

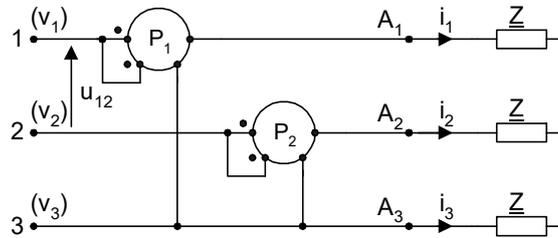
Dans tout le problème, **les tensions du réseau restent équilibrées.**

Ce réseau alimente un récepteur, inductif triphasé équilibré (voir figure ci-dessous), monté en étoile, d'impédance complexe $\underline{Z} = [Z; \varphi]$ (Z est le module de l'impédance ; φ est son argument). La valeur efficace des courants est notée I .

1. On mesure la puissance par la méthode à un wattmètre P_1 déduire l'expressions de la puissance active P .



2. On mesure la puissance par la méthode des deux wattmètres. On relève P_{13}^1 et P_{23}^2 notées respectivement P_1 et P_2 de façon abrégée.



1. Etablir que $P_1 = U \cdot I \cdot \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)$ et $P_2 = U \cdot I \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)$

2. En déduire les expressions de la puissance active P et de la puissance réactive Q en fonction de P_1 et P_2 .

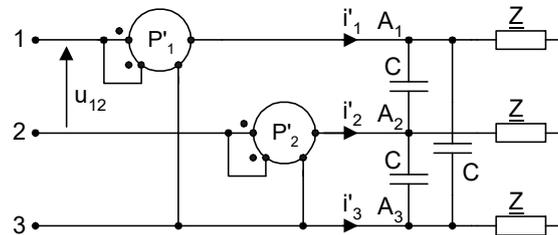
Application numérique : $P_1 = 1041 \text{ W}$ $P_2 = 279 \text{ W}$. Calculer P, Q, $\cos \varphi$, I, Z, \underline{Z} .

3. On désire ramener le facteur de puissance à 1. Pour cela, on dispose trois condensateurs identiques, montés en triangle aux bornes du récepteur, comme le montre la figure suivante.

1. Calculer la valeur commune C des trois condensateurs.

2. Calculer la nouvelle valeur efficace I' du courant en ligne.

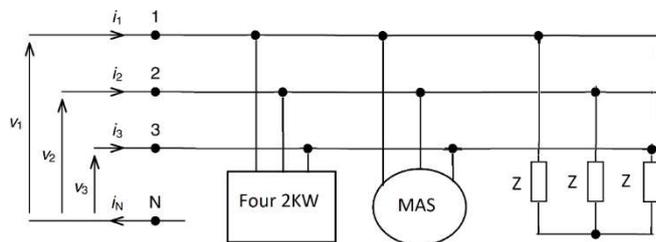
3. Donner les valeurs des nouvelles indications P'1 et P'2 des deux wattmètres.



Correction Problème 1 (Systèmes triphasés équilibrés) :

1- Couplage triangle

2-



3- $P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3 = 21,65 \text{ kW}$; $P_1 = 2 \text{ kW}$, $P_2 = 15/0,8 = 18,75 \text{ kW}$, $P_3 = 15 \cdot 60 = 0,9 \text{ kW}$; $Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 20,33 \text{ kVar}$; $Q_1 = 0 \text{ kVar}$, $Q_2 = P_2 \cdot \text{tg}\phi_2 = 19,13 \text{ kVar}$, $Q_3 = P_3 \cdot \text{tg}\phi_3 = 1,2 \text{ kVar}$

4- $S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 29,7 \text{ kVA}$; $I = 45,12$

5- $C = P_{tot}(\text{tg}\phi - \text{tg}\phi') / (3 \cdot \omega \cdot V^2) = 444,3 \mu\text{F}$; avec $\text{tg}\phi' = 0$, $\omega = 2\pi f$

6- $C' = P_{tot} \cdot \text{tg}\phi / (3 \cdot \omega \cdot U^2) = 148,94 \mu\text{F}$, On remarque que $C' = C/3$ alors le bon choix est le couplage triangle

Correction (Problème 2 Influence d'un condensateur sur les mesures de puissance) :

- $P = 3 \cdot P_1$

- $P_1 = UI \cos\left(\phi - \frac{\pi}{6}\right)$; $P_2 = UI \cos\left(\phi + \frac{\pi}{6}\right)$

- $P = P_1 + P_2$; $Q = (P_1 - P_2)\sqrt{3}$

- $P = 1320 \text{ W}$; $Q = 1320 \text{ VAR}$; $\cos \varphi = 0,707$; $I = 4,90 \text{ A}$; $Z = 25,9 \Omega$; $\underline{Z} = 25,9 \Omega / 45^\circ$

- $C = 28,9 \mu\text{F}$

- $I' = 3,46 \text{ A}$

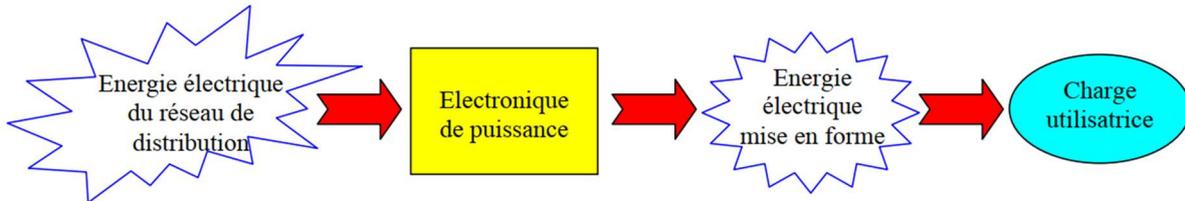
- $P'_1 = 660 \text{ W}$; $P'_2 = 660 \text{ W}$

Chapitre I : Composants de l'électronique de puissance

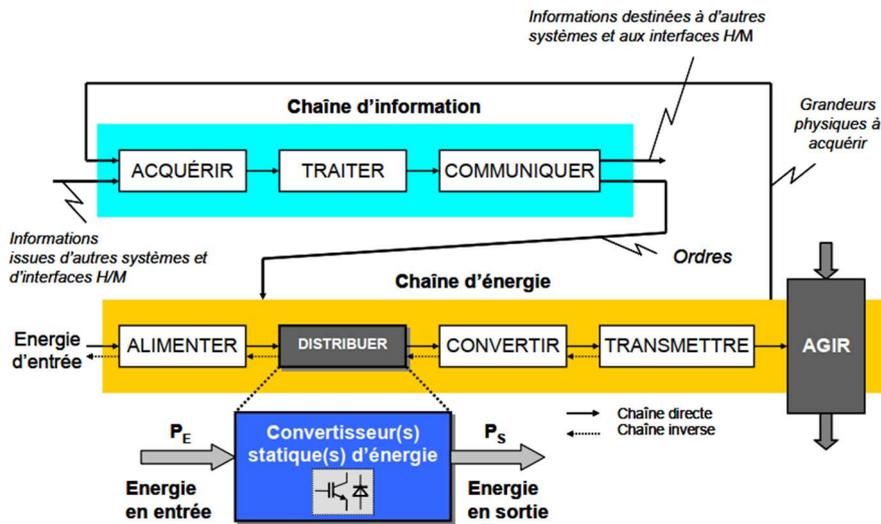
I. Introduction :

Avec le développement des composants électroniques capables de tenir des courants et des tensions de plus en plus élevés, une nouvelle façon de gérer l'énergie électrique s'est développée depuis quarante ans. On la dénomme « électronique de puissance »

Alors l'électronique de puissance est une branche de l'électricité qui traite la **modification de la présentation de l'énergie électrique** pour l'adapter dans les meilleures conditions aux multiples utilisations.



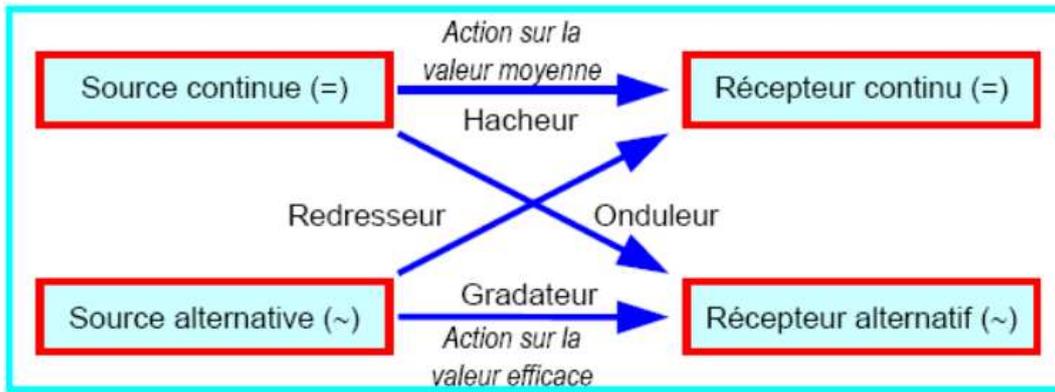
Dans l'architecture fonctionnelle générique d'un système pluri-technique, les convertisseurs statiques de puissance assurent la fonction technique "**DISTRIBUER**" de la chaîne d'énergie. **Ils convertissent l'énergie électrique en énergie électrique de forme différente**, et ne doivent donc pas être confondus avec les convertisseurs électromécaniques (machines, vérins) de la fonction "**CONVERTIR**".



II. Les fonctions principales de l'électronique de puissance :

L'électronique de puissance est chargée d'adapter l'énergie électrique aux besoins de la charge utilisatrice. Elle doit faire avec un bon rendement énergétique, tout en ne perturbant pas le réseau de distribution. L'électronique de puissance utilise des **convertisseurs statiques** construits à partir de composants électroniques.

Les différentes possibilités apparaissent sur le diagramme suivant :

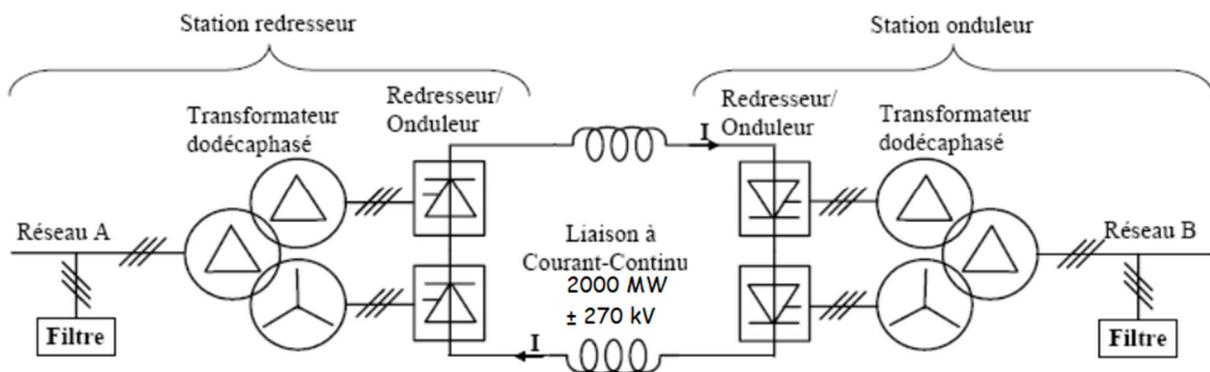


Les pertes en conduction et en commutation des interrupteurs ne doivent représenter qu'une fraction minimale de l'énergie convertie pour avoir un rendement élevé et réduire le poids et le coût des dispositifs de refroidissement.

La notion de **REVERSIBILITE** est très importante. Un convertisseur statique est dit réversible lorsqu'il permet **un transit de l'énergie dans les 2 sens**.

III. Exemple industriel, la liaison France-Angleterre :

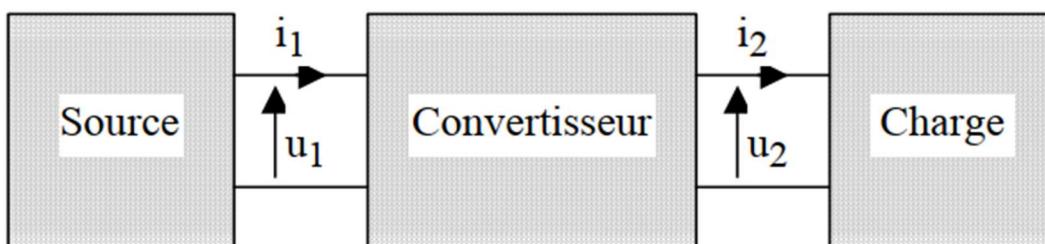
Schéma de principe de la liaison France-Angleterre IFA 2000 (alimentation de 3 millions de foyers britanniques) :



Le HVDC (Haute tension continue) permet de transporter, sur de longues distances, des puissances souvent supérieures à 1 000 MW. Il est dans ce cas technico-économique préférable d'utiliser du courant continu plutôt qu'alternatif classique (HVAC). Le coût élevé de l'électronique de puissance est compensé par deux avantages décisifs :

- 2 conducteurs sont nécessaires au lieu de 3 en tension alternative, ce qui peut compenser le surcoût pour des liaisons longues ;
- au-delà d'une certaine distance, (50 à 100 km environ pour des liaisons sous-marines, 500 à 1 000 km pour les lignes électriques aériennes), les chutes de tension le long d'une liaison alimentée en courant alternatif sont trop importantes pour permettre la transmission (effet capacitif des câbles).

IV. Les sources de courant et de tension :



En électronique de puissance, la charge en sortie est considérée comme une source.

Le sens de l'échange d'énergie n'est pas toujours imposé au départ. Lorsque les rôles de source « source » et de charge peuvent être inversés au cours du temps, on ne parle plus de source et de charge, mais simplement de « sources » qui échangent de l'énergie électrique au moyen d'un convertisseur.

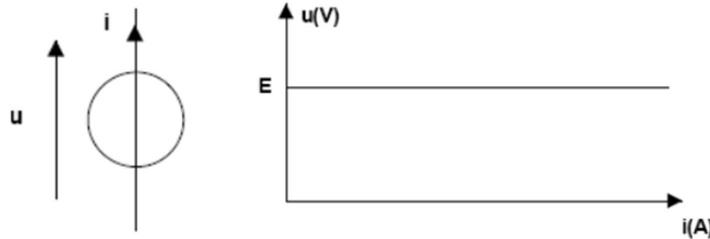
1. Nature et réversibilité des sources :

On distingue :

- les sources de tension alternatives ou continues ;
- les sources de courant alternatives ou continues.

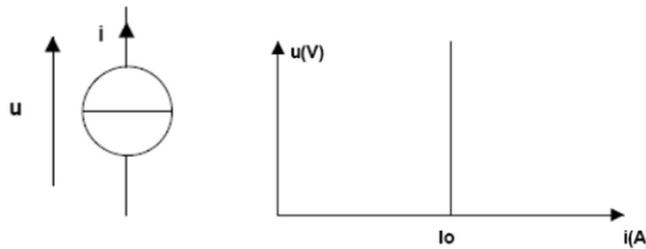
Une source est dite réversible si la puissance fournie peut être positive ou négative, c'est-à-dire qu'elle peut avoir un fonctionnement récepteur ou générateur (ex : batterie, MCC). En électronique de puissance, on emploie le terme de source indifféremment pour les générateurs ou les récepteurs.

2. Les sources de tension :



- Une source est dite de tension lorsque la tension à ses bornes ne peut pas subir de discontinuité lorsque la charge varie.
- Elle impose donc la tension quel que soit le courant absorbé par le récepteur.

3. Les sources de courant :



- Une source est dite de courant lorsque le courant qui la traverse ne peut subir de discontinuité lorsque la charge varie.
- Elle impose le courant quelle que soit la tension imposée par le récepteur.

4. Règles d'interconnexion des sources :

Le convertisseur statique établit et interrompt périodiquement la connexion entre 2 sources grâce à des interrupteurs. Compte tenu des définitions précédentes, il est impératif de respecter les 3 règles suivantes :

Règle 1	<ul style="list-style-type: none"> • Elle impose le courant quelle que soit la tension imposée par le récepteur.
Règle 2	<ul style="list-style-type: none"> • Une source de courant ne peut être ouverte mais peut être court-circuitée.
Règle 3	<ul style="list-style-type: none"> • On ne peut pas connecter directement et instantanément 2 sources de même nature mais uniquement 2 sources de nature différente.

V. Structure des convertisseurs :

La structure des convertisseurs dépend :

- de la nature des sources d'entrée et de sortie (tension ou courant) ;
- du type des sources d'entrée ou de sortie (monophasé, triphasé).

On parle alors de :

Convertisseurs statiques DIRECTS

tension \Rightarrow courant

courant \Rightarrow tension

Convertisseurs statiques INDIRECTS

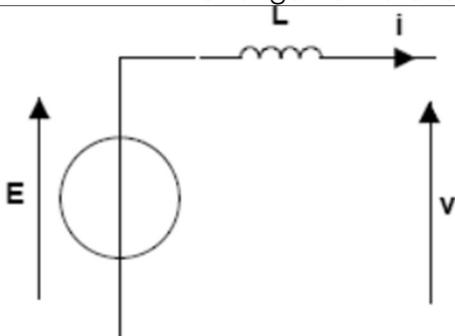
tension \Rightarrow tension

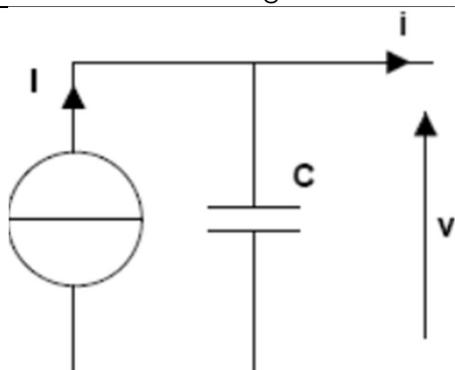
courant \Rightarrow courant

1. Convertisseurs statiques INDIRECTS par modification de la nature des sources :

En modifiant la nature des sources et en utilisant des **convertisseurs statiques DIRECTS** ;

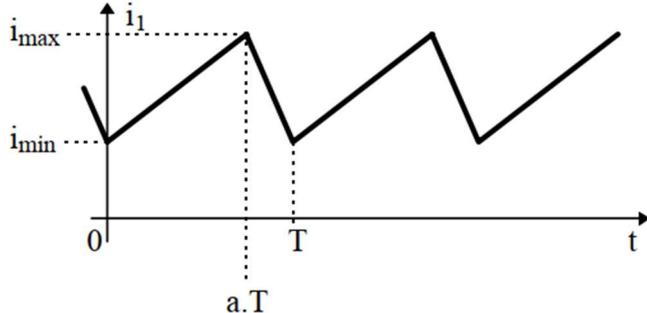
Il faut utiliser des composants supplémentaires qui ne dissipent pas de puissance active, donc soit des inductances, soit des condensateurs. Leur rôle est de modifier la nature des sources d'entrée ou de sortie. Il sera donc possible d'utiliser les structures des convertisseurs statiques DIRECTS.

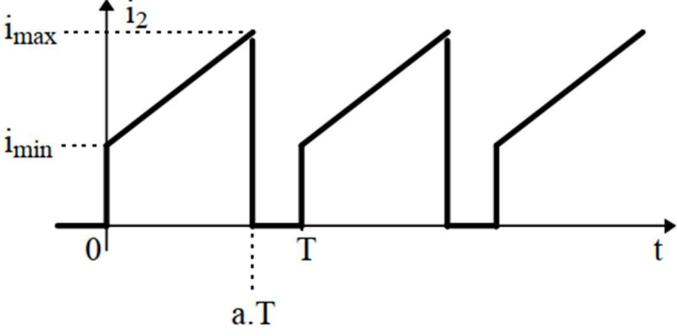
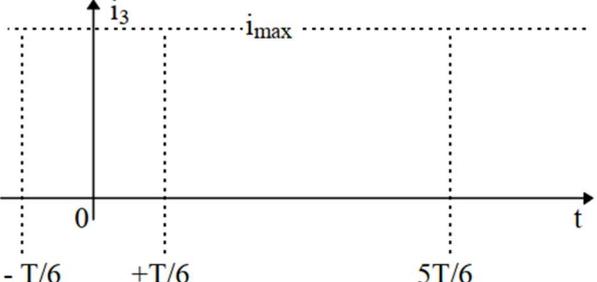
Changement d'une source de tension en source de courant	
	<p>Justification :</p> $u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = E - v$ $\frac{di}{dt} = \frac{E - v}{L}$ <p>Si L suffisamment grand, alors :</p> $\frac{di}{dt} \rightarrow 0 \quad \text{soit} \quad i \rightarrow C^{ste}$

Changement d'une source de courant en source de tension	
	<p>Justification :</p> $i_C = C \cdot \frac{dv}{dt} = I - i$ $\frac{dv}{dt} = \frac{I - i}{C}$ <p>Si C suffisamment grand, alors :</p> $\frac{dv}{dt} \rightarrow 0 \quad \text{soit} \quad v \rightarrow C^{ste}$

VI. Notion de la valeur moyenne et de la valeur efficace d'une fonction périodique :

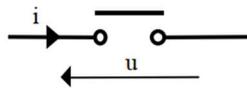
Dans l'électronique de puissance, il est important de revoir des notions d'électricité sans lesquelles il sera difficile de progresser.

	<p>Estimer graphiquement la valeur moyenne de $i_1(t)$ en hachurant les surfaces appropriées. (Sans calcul)</p>
---	--

	<p>Calculer la valeur moyenne de $i_2(t)$ sans utiliser la notion d'intégrale.</p>
<p>Soit une fonction $i_3(t)$ périodique de période T, telle que $i_3(t) = I_{max} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$ sur l'intervalle $\left[-\frac{T}{6}, +\frac{T}{6}\right]$ et nulle sur l'intervalle $\left[+\frac{T}{6}, +\frac{5T}{6}\right]$.</p> 	<p>Représenter ci-contre, le graphe de $i_3(t)$. Calculer la valeur moyenne de $i_3(t)$.</p>

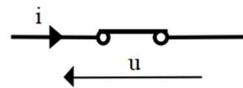
VII. Les interrupteurs :

En électronique de puissance, les composants électroniques actifs fonctionnent en commutation, de façon à consommer le moins d'énergie possible.



Fonctionnement bloqué
(ou ouvert ou non-passant)

$$p = u \cdot 0 = 0$$

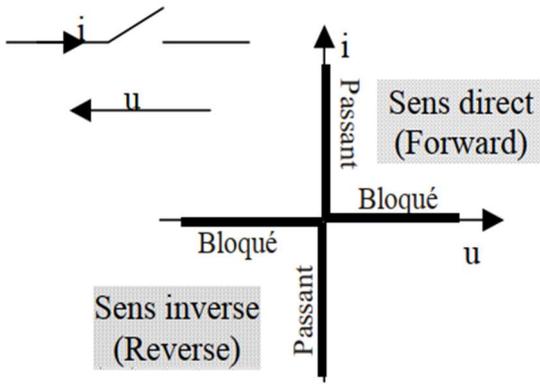


Fonctionnement saturé
(ou fermé, ou passant)

$$p = 0 \cdot i = 0$$

1. Caractéristique statique :

L'interrupteur étant en convention récepteur, la caractéristique statique $I_k = f(V_k)$ d'un interrupteur statique est composée de segments et représente l'ensemble des points de fonctionnement possibles.



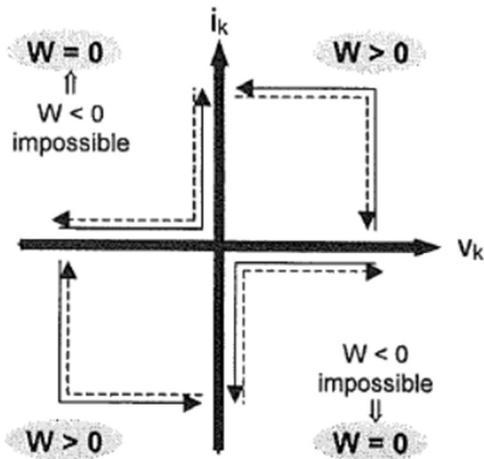
L'interrupteur idéal possède les propriétés suivantes :

- supporte (bloque) des **tensions directes** (> 0) ou **inverses** (< 0) de valeur arbitraire avec un courant nul à l'état ouvert ;
- conduit des courants de valeur quelconque avec des chutes de tension nulles à l'état fermé ;
- commute de façon instantanée de l'état ouvert à l'état fermé et vice versa ;
- nécessite une puissance nulle pour la commande.

On peut envisager des interrupteurs à 2, 3 ou 4 segments adaptés à la nature et aux réversibilités des sources et des charges du convertisseur.

2. Caractéristique dynamique :

C'est la trajectoire suivie par le point de fonctionnement pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment. La caractéristique dynamique dépend du semi-conducteur utilisé et de l'environnement extérieur de l'interrupteur. Celui-ci étant toujours dissipatif, le trajet du point de fonctionnement sera toujours dans les quadrants où $i_k \cdot v_k > 0$:



Passage de l'état ouvert (O) à l'état fermé (F) : **"AMORÇAGE"**

Passage de l'état fermé (F) à l'état ouvert (O) : **"BLOCAGE"**

Energie de commutation : $W = \int v_k(t) \cdot i_k(t) \cdot dt$

$W = 0 \Rightarrow$ commutation **spontanée** (le long des axes)

$W > 0 \Rightarrow$ commutation **commandée**

3. Les semi-conducteurs de puissance :

	La diode	Le transistor MOS	L'IGBT
Commande - symbole	<p>Blocage spontané lors du passage par zéro du courant décroissant. Amorçage spontané lors du passage par zéro de la tension croissante</p>	<p>Amorçage et blocage commandés par V_{GS}</p>	<p>Amorçage et blocage commandés par V_{GE}</p>

Caractéristique idéale			
Propriétés	Unidirectionnel en courant : $i_D > 0$ Unidirectionnel en tension : $V_D < 0$	Uni(bi avec diode)directionnel en courant : $i_D > 0$ Unidirectionnel en tension : $V_{DS} > 0$	Unidirectionnel en courant : $i_C > 0$ Unidirectionnel en tension : $V_{CE} > 0$
Pertes en conduction	 $P = V_0 \langle i_D \rangle + R_D I_{Deff}^2$	 $P = R_{DS(on)} I_{Deff}^2$	 $P = V_{CE(on)} \langle i_C \rangle$
Choix	$V_{RRM} > (v_R)_{max}$ $I_{F(AV)} > \langle i_D \rangle$	$V_{DSS} > (v_{DS})_{max}$ $I_{D DC} > I_{Deff}$	$V_{CES} > (v_{CE})_{max}$ $I_{C DC} > I_{Ceff}$

F : **Forward (direct)** AV : **Average (moyen)** RRM : **Reverse Repetitive Maximum** DC : **Direct Current**

4. Les territoires des composants de puissance :

Résumé des domaines d'utilisation des interrupteurs de puissance actuels :

Thyristor = Diode commandée à la fermeture.

GTO = Thyristor commandé à la fermeture et à l'ouverture (Gate Turn-Off).

MCT = Thyristor MOS commandé à la fermeture et à l'ouverture (MOS Controlled Thyristor).

