

# Chapitre I

## Définitions

### 1 Synoptique d'un montage redresseur

De nombreux équipements à usage industriels ou domestiques font intervenir des circuits électroniques de puissance nécessitant des tensions continues. Pour les dispositifs qui sont reliés à une source de tensions alternatives, il faut procéder à une conversion alternatif-continu éventuellement associée à un transformateur.

Cette conversion est réalisée par un montage redresseur. L'objectif est de produire une tension possédant une valeur moyenne à partir d'une source polyphasée de tensions alternatives.

On peut donner un synoptique d'un montage redresseur typique (fig. I.1).

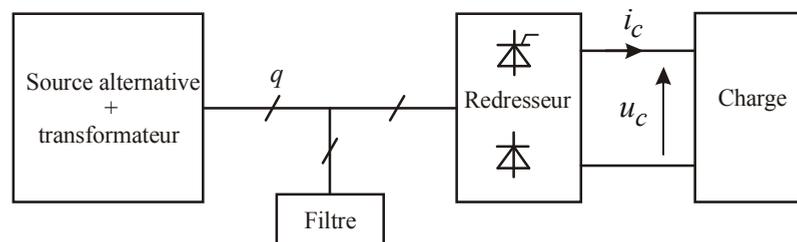


figure I.1 : synoptique d'un montage redresseur

#### 1.1 La charge

On étudie le comportement des dispositifs redresseurs pour différentes charges.

- ✓ **Charges inductives et actives** (RLE) : Elles développent une *f.e.m.* (force électromotrice) comme par exemple la machine à courant continu, une batterie d'accumulateurs, un dispositif photovoltaïque (charge envisageable que dans le cas d'un redresseur tout thyristors)... Pour un bon fonctionnement, le courant dans la charge est très souvent lissé par la présence d'une bobine placée en série.
- ✓ **Capacitives** (RC) : on place en sortie du redresseur un condensateur pour lisser la tension aux bornes du récepteur. Cette charge n'est possible que pour les redresseurs tout diodes.

#### Remarques

- ✓ La charge résistive R est une charge purement thermique qui ne nécessite aucun filtrage. Son étude est donc plus simple et peut s'obtenir à partir des études présentées dans cet ouvrage.
- ✓ La charge RL que l'on voit en cours est une charge qu'on peut qualifier d'étude, mais qui n'a pas de réalité industrielle. La résistance R représente ici un dispositif qui consomme une puissance P.

## 1.2 Le redresseur

La structure d'un redresseur est composée de diodes et / ou de thyristors.

On distingue trois types de montage redresseurs simple alternance ou en pont :

- ✓ **Redresseurs tout diodes, ou redresseurs non commandés.** La relation entre la tension de sortie et celles de la source d'entrée ne dépend que de la structure du redresseur et des tensions d'entrée. Ils sont irréversibles : la puissance s'échange dans le sens alternatif-continu.
- ✓ **Redresseurs tout thyristors, ou redresseurs commandés.** La relation entre la tension de sortie et celles de la source d'entrée dépend d'un paramètre supplémentaire qui est l'angle de retard à l'amorçage. Ils sont réversibles. Lorsque l'échange de puissance se fait dans le sens continu-alternatif, ils fonctionnent en onduleurs non autonomes. Cela signifie qu'ils ne sont pas créateurs de tensions alternatives. La présence d'une source alternative à l'entrée est nécessaire pour obtenir l'extinction des thyristors.
- ✓ **Redresseurs mixtes en pont.** Ils sont constitués de diodes et de thyristors. La présence des thyristors permet de contrôler la tension de sortie. Comme pour les redresseurs tout diodes, ils ne sont pas réversibles.

## 1.3 Le filtre

Du fait des commutations des interrupteurs, les courants circulant en entrée du redresseur ne sont pas sinusoïdaux. Ces courants provoquent, dans l'impédance interne des générateurs constituant la source, une chute de tension non sinusoïdale. Les tensions à l'entrée du redresseur sont donc déformées. Toutes les applications utilisant la même source ont à subir ces déformations dont l'importance dépend de leur distance de connexion par rapport à ce redresseur polluant.

Il est à noter que dans le cas des redresseurs simple alternance, la présence d'une composante continue dans les courants en ligne introduit une composante continue dans les tensions alternatives par la présence de la résistance de ligne, provoquant une déformation supplémentaire de ces tensions lors de la conduction des diodes.

Pour réduire cette nuisance harmonique, on agit soit à l'entrée du dispositif polluant en plaçant un filtre passif ou actif, soit à la sortie du redresseur en plaçant un dispositif du type PFC (Power Factor Corrector ou correction du facteur de puissance).

En associant des redresseurs en série ou en parallèle, on réduit également la nuisance harmonique.

## 1.4 La source

Le redresseur est très souvent alimenté à travers un transformateur par une source de tensions alternatives. On trouve généralement en entrée du redresseur une source monophasée ( $q = 1$ ), biphasée ( $q = 2$ ), triphasée ( $q = 3$ ) ou encore hexaphasée ( $q = 6$ ).

Le transformateur permet :

- ✓ d'isoler électriquement la charge du réseau
- ✓ d'adapter la tension du réseau à celle de la charge

- ✓ d'obtenir au secondaire un nombre ( $q$ ) de générateurs multiple de celui du réseau. L'ondulation de la tension redressée voit sa fréquence multipliée et son amplitude diminuée : on minimise ainsi les éléments de lissage.
- ✓ de réaliser une association série ou parallèle de plusieurs redresseurs.

## 2 Définitions des grandeurs utilisées

### 2.1 Variable d'étude

La plupart des relations qui sont établies ne dépendent pas de la fréquence. La variable  $\theta = \omega t$  est préférée à la variable  $t$  afin d'obtenir des développements plus légers.

Les angles sont exprimés en radians dès qu'ils interviennent dans des relations, mais peuvent aussi être notés en degrés dans les chronogrammes pour une lecture plus parlante.

Les valeurs instantanées, notées parfois  $i(\theta), v(\theta), p(\theta), \dots$  sont ici notées  $i, v, p, \dots$  (lettres minuscules) pour éviter des écritures trop lourdes.

### 2.2 Valeur moyenne

La valeur moyenne  $\bar{x}$  d'un signal  $x$   $2\pi$ -périodique se calcule par :  $\bar{x} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x \, d\theta$ .

Remarque : lorsque le contour de l'oscillogramme du signal sur une période est simple (rectangle, triangle), on utilise de préférence l'outil géométrique pour calculer la surface  $S$  comprise entre le contour et l'axe des angles. On a alors :  $\bar{x} = \frac{\text{surface } S}{2\pi}$ .

### 2.3 Valeur efficace

La valeur efficace  $X$  d'un signal  $x$   $2\pi$ -périodique se calcule par :

$$X = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2 \, d\theta}.$$

Elle est toujours notée par une lettre majuscule.

## 2.4 Composantes d'un courant

### 2.4.1 Composantes continue et alternative

On considère un courant  $i$   $2\pi$ -périodique. Il peut se décomposer en la somme d'une valeur moyenne  $\bar{i}$  et d'une composante alternative  $i_a$  :  $i = \bar{i} + i_a$ .

En appliquant la définition de la valeur efficace donnée précédemment (§2.3), on obtient le développement suivant :

$$I^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\bar{i} + i_a]^2 \, d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\bar{i}^2 + i_a^2] \, d\theta + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{i} i_a \, d\theta$$

Le produit  $\bar{i} i_a$  ne donne aucune contribution à la valeur efficace de  $i$ . Seuls les termes  $\bar{i}^2$  et  $i_a^2$  donnent un résultat non nul. Soit :  $I^2 = \bar{i}^2 + I_a^2$  avec  $I_a =$  valeur efficace de  $i_a$ .

La relation établie montre que la valeur efficace d'une grandeur variable est toujours supérieure à sa valeur moyenne. Elles sont égales uniquement pour une grandeur continue.

### 2.4.2 Composantes continue, fondamentale et harmonique

Un courant périodique de forme quelconque peut aussi s'écrire :  $i = \bar{i} + i_f + i_h$

$\bar{i}$  : composante continue = valeur moyenne de  $i$

$i_f$  : composante fondamentale de  $i \quad \mapsto \quad i_f = I_f \sqrt{2} \sin(\theta - \varphi_f)$

$i_h$  : composante harmonique de  $i =$  somme des courants sinusoïdaux de pulsation multiple de  $\omega$ .

On remarque que  $i_a = i_f + i_h$ .

Les courants harmoniques conduisent à un surdimensionnement des transformateurs placés en amont, et augmentent les pertes par effet Joule. Côté réseau, ils provoquent dans les générateurs et lignes, des chutes de tension non sinusoïdales déformant ainsi les tensions du réseau. Dans le cas des montages de forte puissance, ce problème est souvent déterminant dans le choix d'un montage redresseur.

En appliquant la définition de la valeur efficace, on obtient le développement suivant :

$$I^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\bar{i} + i_f + i_h]^2 d\theta$$

Les produits  $\bar{i} i_f(\theta)$ ,  $\bar{i} i_h(\theta)$  et  $i_f i_h$  ne donnent aucune contribution à la valeur efficace de  $i$ . Seuls les termes  $\bar{i}^2$ ,  $i_f^2$  et  $i_h^2$  donnent un résultat non nul.

$$I^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\bar{i}^2 + i_f^2 + i_h^2] d\theta \quad \mapsto \quad I^2 = \bar{i}^2 + I_f^2 + I_h^2$$

## 3 Grandeurs liées à la charge : étude de la tension $u_{co}$

Lorsque l'on admet l'hypothèse d'une source et d'un redresseur sans pertes, on peut considérer que les tensions du réseau sont alternatives sinusoïdales. On note  $u_{co}$  la tension aux bornes de la charge.

On cherche à exprimer tous les paramètres définis ci-dessous par les données nécessaires à connaître pour dimensionner les éléments du montage redresseur :

Dans le cas d'une charge inductive et active, on se doit de connaître :

- ✓ La valeur moyenne du courant qui circule dans la charge  $\overline{i_c}$
- ✓ Son ondulation maximale admissible  $\Delta i_c$
- ✓ Les différents paramètres de la source : nombre de phases  $q$ , valeur efficace des tensions  $V$  et leur fréquence  $f$ .

Dans le cas d'une charge capacitive, on se doit de connaître :

- ✓ La valeur moyenne du courant qui circule dans la charge  $\overline{i_c}$
- ✓ L'ondulation crête à crête  $\Delta u_{co}$  de la tension  $u_{co}$
- ✓ Les différents paramètres de la source : nombre de phases  $q$ , valeur efficace des tensions  $V$  et leur fréquence  $f$ .

### 3.1 Valeur moyenne de la tension redressée $u_{co}$

La valeur moyenne de la tension redressée est notée  $\overline{u_{co}}$ .

Exceptée pour la charge purement thermique, les charges sont contrôlées par la valeur moyenne de la tension, comme c'est le cas par exemple d'une machine à courant continu, d'une batterie d'accumulateurs, d'un dispositif photovoltaïque...

### 3.2 Indice de pulsation $p$

L'indice de pulsation  $p$  donne la relation entre la fréquence  $f$  des tensions de la source et la fréquence  $f_{ond}$  de l'ondulation de  $u_{co}$ . Soit :  $f_{ond} = p f$

### 3.3 Ondulation crête à crête $\Delta u_{co}$

L'ondulation crête à crête est définie par :  $\Delta u_{co} = u_{co,max} - u_{co,min}$

### 3.4 Facteur d'ondulation $F_{ov}$

Le facteur d'ondulation est défini par :  $F_{ov} = \frac{\Delta u_{co}}{2u_{co}}$

### 3.5 Analyse harmonique de l'ondulation de $u_{co}$

Les premières composantes harmoniques de  $u_{co}$  sont suffisantes pour caractériser l'ondulation du courant dans la charge. Cela permet de définir l'inductance de la bobine de lissage  $L$  pour obtenir l'ondulation souhaitée. La valeur efficace de cette ondulation provoque des pertes Joule supplémentaires dans la charge.

### 3.6 Puissance active $P_c$ mise en jeu dans la charge

On exprime en fonction de  $V$  et  $\overline{i_c}$  la puissance active  $P_c$  mise en jeu dans la charge.

## 4 Grandeurs liées aux éléments semiconducteurs

Il s'agit de définir les contraintes électriques supportées par les éléments semiconducteurs.

Pour les charges inductives, on admet que le courant dans la charge est suffisamment peu ondulé pour confondre sa valeur instantanée avec sa valeur moyenne ( $i_c \approx \overline{i_c}$ ).

On étudie également si le régime transitoire apporte des contraintes supplémentaires pour le dimensionnement des éléments semiconducteurs.

### 4.1 Facteur de forme du courant dans une diode, un thyristor

Le facteur de forme d'un courant est le rapport de sa valeur efficace à sa valeur moyenne :  $F_{f.i_d} = \frac{I_d}{i_d}$  ou  $F_{f.i_t} = \frac{I_t}{i_t}$ . Il s'agit d'un nombre sans unité. Excepté pour une grandeur continue, le facteur de forme est toujours supérieur à 1.

Le calcul du facteur de forme est déterminant pour le dimensionnement des composants. Pour un facteur de forme important (pour fixer les idées, on peut dire supérieur ou égal à 3), le vieillissement des composants est accéléré.

### 4.2 Tension inverse maximale aux bornes d'une diode, d'un thyristor

La tension inverse maximale aux bornes d'une diode, d'un thyristor est notée  $u_{d.i.max}, u_{t.i.max}$ . Elle est déterminée par les caractéristiques de la source et de la charge.

### 4.3 Tension directe maximale aux bornes d'un thyristor $u_{t.d.max}$

La tension directe maximale aux bornes d'un thyristor est notée  $u_{t.d.max}$ . Elle est déterminée par les caractéristiques de la source et de la charge.

## 5 Grandeurs liées à la source : étude du courant en ligne $i_\ell$

Une source polyphasée est constituée de  $q$  générateurs reliés au redresseur. Il s'agit de caractériser les courants et les puissances échangées. On distingue le courant en ligne  $i_\ell$  du courant dans un générateur  $i_g$  car celui-ci dépend du couplage des générateurs.

Il est nécessaire de caractériser l'importance des courants harmoniques en définissant des critères, complétant ainsi les éléments de comparaison des montages redresseurs.

### 5.1 Intensité du courant en ligne $i_\ell$

La valeur efficace  $I_\ell$  du courant en ligne  $i_\ell$  ainsi que sa valeur moyenne  $\overline{i_\ell}$ , qui existe dans le cas des redresseurs simple alternance, caractérisent ce courant.

## 5.2 Composante fondamentale du courant en ligne $i_{\ell.f}$

La composante fondamentale  $i_{\ell.f}$  du courant en ligne  $i_{\ell}$  véhicule la puissance active  $P$  et réactive  $Q$ . On utilise cette propriété pour déterminer sa valeur efficace  $I_{\ell.f}$ .

## 5.3 Facteur de forme du courant en ligne $F_{f.i_{\ell}}$

Le facteur de forme du courant en ligne est donné par le rapport :

$$F_{f.i_{\ell}} = \left[ \frac{I_{\ell}}{i_{\ell}} \right]_{1/2 \text{ période}}.$$

Il s'agit d'un nombre sans unité. Excepté pour une grandeur continue, le facteur de forme est toujours supérieur à 1.

## 5.4 Taux de distorsion harmonique $TDH - F_{i_{\ell}}$ ou $TDH - G_{i_{\ell}}$

On peut distinguer deux taux de distorsion harmonique (TDH) :

- ✓ Le TDH calculé par rapport au fondamental :  $TDH - F_{i_{\ell}} = \frac{I_{\ell.h}}{I_{\ell.f}}$

Ce dernier est celui défini selon la norme CEI 61002-2-2.

- ✓ Le TDH global, calculé par rapport à la valeur efficace :  $THD - G_{i_{\ell}} = \frac{I_{\ell.h}}{I_{\ell}}$

Ils rendent compte de l'importance des harmoniques du courant en ligne. Ils sont généralement exprimés en pourcentage. Le  $THD-G$  reste nécessairement inférieur à 100 %.

# 6 Etude des puissances

## 6.1 Définitions

On considère une charge monophasée quelconque, alimentée par une tension  $v$  et parcourue par un courant  $i$ .

La tension  $v$  et le courant  $i$  sont des grandeurs périodiques, mais pas nécessairement sinusoïdales. Leurs expressions sont les suivantes :

$$v = \bar{v} + v_a = \bar{v} + v_f + v_h = \bar{v} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi_{v.n})$$

$$i = \bar{i} + i_a = \bar{i} + i_f + i_h = \bar{i} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\theta + \varphi_{i.n})$$

### 6.1.1 Puissance instantanée $p$

La puissance instantanée  $p$  est une puissance dépendante du temps.

Elle est définie par :  $p = vi$ .

### 6.1.2 Puissance active $P$

La puissance active  $P$  s'exprime en Watts (W) et est égale, par définition, à la valeur moyenne de la puissance instantanée  $p$ , soit :  $P = \overline{p} = \overline{vi}$

ATTENTION : il est très important de noter dès à présent que  $\overline{vi} \neq \overline{v}\overline{i}$  (sauf si l'une des deux grandeurs est constante).

On montre que :  $P = \overline{v}\overline{i} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n$  avec  $\varphi_n = \varphi_{v.n} - \varphi_{i.n}$

La puissance active est la puissance qui peut être utilisée par une charge. Elle peut être ensuite convertie en puissance mécanique (moteur), en puissance lumineuse (lampe), en chaleur (résistance), en puissance chimique (électrolyse), ...

### 6.1.3 Puissance réactive $Q$

La puissance réactive  $Q$  caractérise une puissance alternative, échangée par des grandeurs sinusoïdales de même fréquence entre la charge et la source. Elle existe si la charge est inductive, capacitive et parfois si elle est non linéaire. La puissance réactive s'exprime en var (voltampères réactifs).

Elle se calcule par :  $Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n$  avec  $\varphi_n = \varphi_{v.n} - \varphi_{i.n}$

### 6.1.4 Puissance apparente $S$

La puissance apparente  $S$  regroupe l'ensemble des puissances échangées par la charge et la source. Elle s'exprime en VA (voltampères) et se calcule par :  $S = VI$

Sa connaissance permet le dimensionnement d'un transformateur, d'un alternateur, ...

### 6.1.5 Puissance déformante $D$

La puissance déformante  $D$  existe si l'une, au moins, des deux grandeurs (courant et tension) n'est pas sinusoïdale. On peut l'exprimer en vad (voltampères déformants). Elle rend compte de l'importance des harmoniques (les harmoniques traduisent la déformation d'un signal par rapport à la sinusoïde prise comme forme de référence).

Elle se calcule par :  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$  Soit :  $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$

### 6.1.6 Facteur de puissance $F_p$

On définit le facteur de puissance  $F_p$  par :  $F_p = \frac{P}{S} \leq 1$ .

On l'appelle également facteur d'utilisation.