

Objectif :

Ce module traite de l'analyse et de la synthèse des structures de convertisseurs statiques non-isolés de l'électronique de puissance ainsi que du fonctionnement en régime permanent des machines tournantes traditionnelles.

Pour la partie électronique de puissance, il s'agit de comprendre le fonctionnement, d'analyser les formes d'onde et dimensionner les convertisseurs de base tels que les redresseurs triphasés commandés, les gradateurs, les hacheurs et les onduleurs.

Pour la partie électrotechnique, il s'agit de maîtriser le principe de la conversion électromagnétique, de comprendre la réversibilité et de modéliser en régime permanent les machines synchrones, asynchrones, et à courant continu.

L'association convertisseur- machine sera également abordée dans ce module.

Chapitre 01 : Convertisseurs Continu alternatif.

- Structure d'alimentation sans coupure.
- Principe des convertisseurs (MLI) (PWM).

1. Onduleur de tension: Structure- principe - Application.

Introduction :

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable d'électronique de puissance, présente dans les domaines d'applications les plus variés, dont les plus connus et sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif.

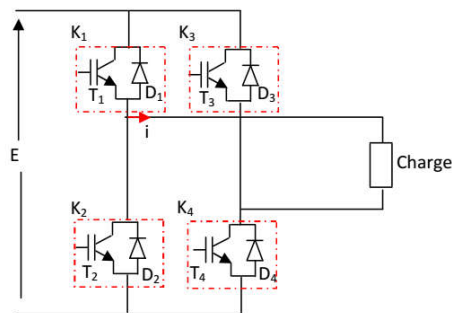
La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandables, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de « Modulation de largeur d'impulsion » (MLI) ou « Pulse Width Modulation » (PWM).

1.1 Onduleur de tension monophasé

L'onduleur en pont est formé de quatre interrupteurs montés en pont de Grätz.

Les commandes des interrupteurs K_1 et K_2 sont complémentaires: $K_1 = \overline{K_2}$ et $K_3 = \overline{K_4}$.

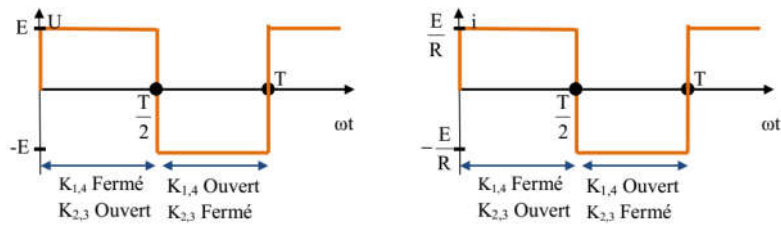
Chaque interrupteur est formé d'un composant commandable et une diode en antiparallèle.



1.1.1 Commande symétrique

a) Analyse du fonctionnement

	$(0 \rightarrow T/2)$	$(T/2 \rightarrow T)$
K_1 et K_4	Fermé	Ouvert
K_2 et K_3	Ouvert	Fermé
U	E	-E
I	E/R	-E/R



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} E dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T -E dt = 0; i_{\text{moy}} = 0 \quad (1.1)$$

c) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T E^2 dt} = E \quad (1.2)$$

1.1.2 Charge résistive et inductive

1.1.2.1 Commande symétrique

a) Analyse du fonctionnement

	$(0 \rightarrow t_1)$	$(t_1 \rightarrow T/2)$	$(T/2 \rightarrow t_2)$	$(t_2 \rightarrow T)$
K_1 et K_4	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
K_2 et K_3	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé
T_1 et T_4	bloqué	passant	Bloqué	Bloqué
D_1 et D_4	passante	bloquée	bloquée	bloquée
T_2 et T_3	bloqué	bloqué	bloqué	passant
D_2 et D_3	bloquée	bloquée	passante	bloquée
U	E	E	-E	-E
I	$E = Ri + \frac{L di}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R}$ $i = \left(-i_M - \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R}$		$-E = Ri + \frac{L di}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E}{R}$ $i = \left(i_M + \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{E}{R}$	

On suppose à $t = 0 ; i(0) = -i_M$ et $t = \left(\frac{T}{2}\right) ; i\left(\frac{T}{2}\right) = i_M$

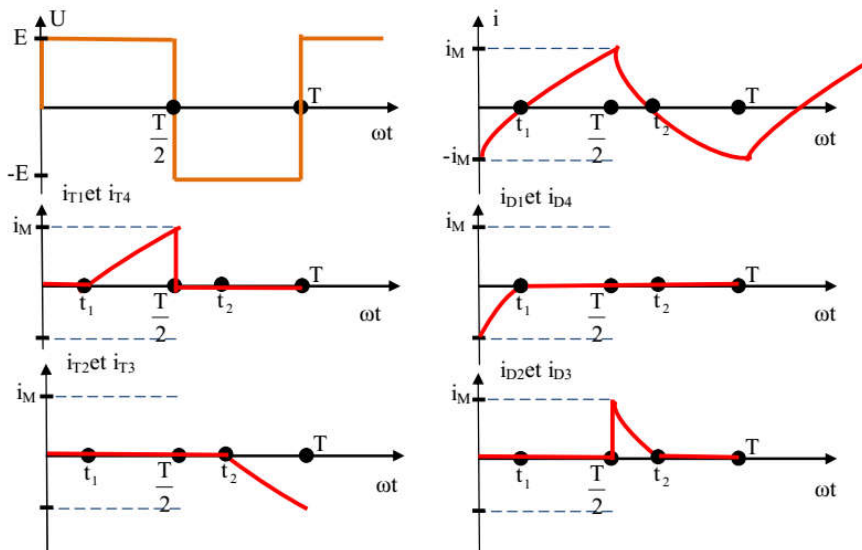


Figure 1.2 Commande symétrique– Charge inductive

1.2 Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés. Il suffit décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $K_{a,b,c} = 1$: interrupteur du demi-bras haut (a, b ou c) fermé.
- $K_{a,b,c} = 0$: interrupteur du demi-bras bas (a, b ou c) fermé.

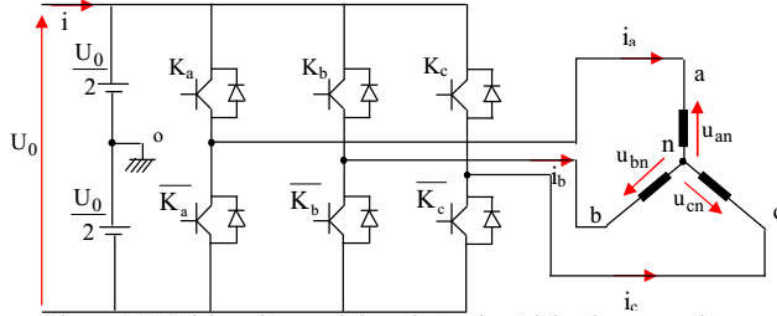


Figure 1.5: Schéma d'un onduleur de tension triphasé avec sa charge

Pour simplifier l'étude, on supposera que:

- la commutation des interrupteurs est instantanée;
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable;
- la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions composées U_{ab} , U_{bc} et U_{ca} , on a:

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{a0} + U_{0b} = U_{a0} - U_{b0} \\ U_{bc} = U_{b0} + U_{0c} = U_{b0} - U_{c0} \\ U_{ca} = U_{c0} + U_{0a} = U_{c0} - U_{a0} \end{cases} \quad (1.3)$$

U_{a0} , U_{b0} et U_{c0} sont les tensions mesurées par rapport au point milieu de la source continue

Soit "n" l'indice du point neutre du côté alternatif. On a:

$$\begin{cases} U_{a0} = U_{an} + U_{n0} \\ U_{b0} = U_{bn} + U_{n0} \\ U_{c0} = U_{cn} + U_{n0} \end{cases} \quad (1.4)$$

U_{an} , U_{bn} et U_{cn} sont les tensions simples de la charge et U_{n0} est la tension fictive entre le neutre de la charge et le point milieu de la source.

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre est isolé alors:

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \quad (1.5)$$

Donc:

$$U_{n0} = \frac{1}{3}(U_{a0} + U_{b0} + U_{c0}) \quad (1.6)$$

Par remplacement l'équation (1.4), on obtient:

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{2}{3}U_{a0} - \frac{1}{3}U_{b0} - \frac{1}{3}U_{c0} \\ U_{bn} = -\frac{1}{3}U_{a0} + \frac{2}{3}U_{b0} - \frac{1}{3}U_{c0} \\ U_{cn} = -\frac{1}{3}U_{a0} - \frac{1}{3}U_{b0} + \frac{2}{3}U_{c0} \end{cases} \quad (1.7)$$

Alors:

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{U_0}{3}(2K_a - K_b - K_c) \\ U_{bn} = \frac{U_0}{3}(-K_a + 2K_b - K_c) \\ U_{cn} = \frac{U_0}{3}(-K_a - K_b + 2K_c) \end{cases} \quad (1.8)$$

Le tableau suivant, donne, pour huit configurations que prendre le montage par l'état fermé (1) ou ouvert (0) des trois interrupteurs K_a , K_b et K_c ,

K_a	K_b	K_c	U_{an}	U_{bn}	U_{cn}	i_{k1}	i_{k2}	i_{k3}	i
1	1	1	0	0	0	i_{an}	i_{bn}	i_{cn}	0
1	0	1	$U_0/3$	$-2U_0/3$	$U_0/3$	i_{an}	0	i_{cn}	$-i_{bn}$
1	1	0	$U_0/3$	$U_0/3$	$-2U_0/3$	i_{an}	i_{bn}	0	$-i_{cn}$
1	0	0	$2U_0/3$	$-U_0/3$	$-U_0/3$	i_{an}	0	0	i_{an}
0	1	1	$-2U_0/3$	$U_0/3$	$U_0/3$	0	i_{bn}	i_{cn}	$-i_{an}$
0	0	1	$-U_0/3$	$-U_0/3$	$2U_0/3$	0	0	i_{cn}	i_{cn}
0	1	0	$-U_0/3$	$2U_0/3$	$-U_0/3$	0	i_{bn}	0	i_{bn}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

On peut commander l'onduleur de manière que:

1.2.1 Commande 120°

La commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.

1.2.2 Commande 180°

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°.

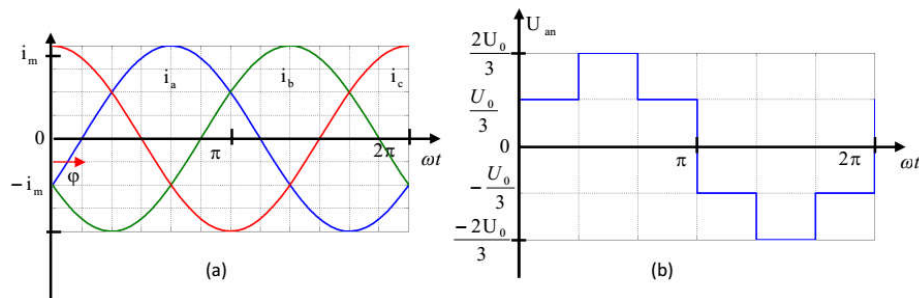
On va se limiter à l'étude seulement de cette dernière, c'est-à-dire la commande en pleine onde (180°), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit:

- ✓ K_a est fermé pour: $0 < \omega t < \pi$ et $\overline{K_a}$ est fermé pour: $\pi < \omega t < 2\pi$,
- ✓ K_b est fermé pour: $\frac{2\pi}{3} < \omega t < \frac{2\pi}{3} + \pi$ et $\overline{K_b}$ est fermé pour: $\frac{2\pi}{3} + \pi < \omega t < \frac{2\pi}{3} + 2\pi$,
- ✓ K_c est fermé pour: $\frac{4\pi}{3} < \omega t < \frac{4\pi}{3} + \pi$ et $\overline{K_c}$ est fermé pour: $\frac{4\pi}{3} + \pi < \omega t < \frac{4\pi}{3} + 2\pi$.

En supposant les courants de sortie sinusoïdaux de la forme:

$$i_a = i_m \sin(\omega t - \varphi), \quad i_b = i_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \text{ et } i_c = i_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right)$$

avec i_m : la valeur maximum du courant de sortie de l'onduleur.



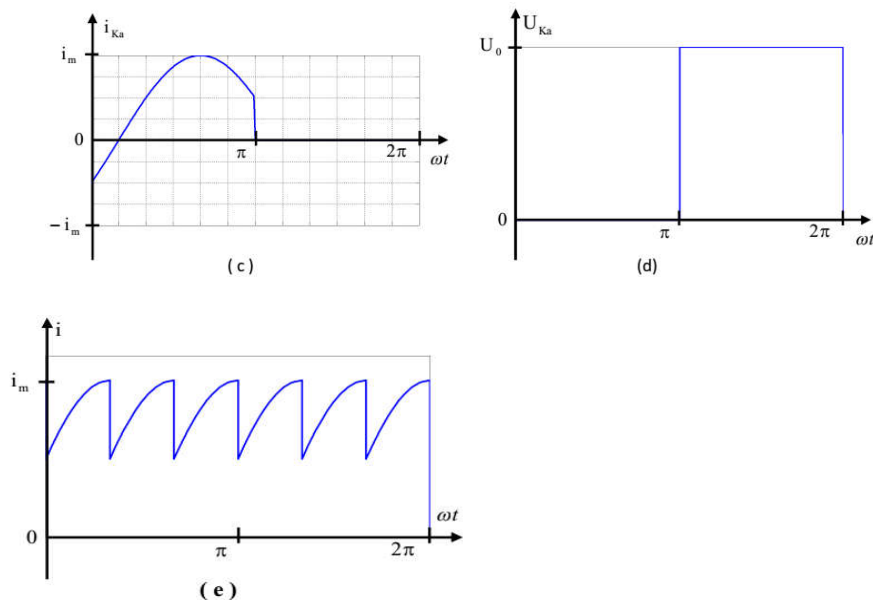


Figure 1.6 Formes d'ondes a) trois courants de sortie b) Tension U_{an} c) Courant i_{ka} d) Tension U_{ka} e) Courant i

a) Valeur moyenne

$$U_{an} = 0$$

b) Valeur efficace

$$U_{an} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_0$$

1.3 Technique de modulation par largeur d'impulsion (MLI)

Dans le cas d'une technique MLI sinusoïdale, un signal de référence sinusoïdal (V_{ref}) oscillant à la fréquence désirée (f_{ref}) est comparé à une porteuse triangulaire (V_{tri}) de grande fréquence (f_{tri}), voir figure 1.7.

La fréquence de la porteuse triangulaire détermine la fréquence de commutation de l'onduleur.

La fondamentale des harmoniques de tension de sortie est l'image du signal de référence. En outre, la tension de sortie n'est pas sinusoïdale pure et se compose des harmoniques de tension oscillant aux fréquences multiples du signal de référence.

Le rapport de modulation d'amplitude m_a est défini comme suit :

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{tri}}$$

Où :

V_{ref} : est l'amplitude du signal de référence,

V_{tri} est l'amplitude de la porteuse triangulaire.

Le rapport de modulation de fréquence m_f est défini comme suit :

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{ref}}$$

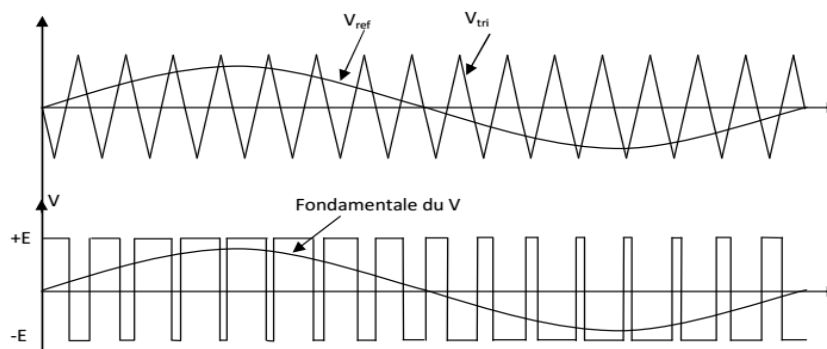


Figure 1.7 Les signaux de la technique MLI bipolaire.

Dans la technique MLI bipolaire, les interrupteurs S_1 , S_2 , S_3 , et S_4 de l'onduleur en pont sont commandés en comparant les valeurs de V_{ref} et V_{tri} :

Si $V_{ref} > V_{tri}$, S_1 et S_2 sont fermés, S_3 et S_4 sont ouverts, et la tension de sortie est $+E$.

Si $V_{ref} < V_{tri}$, S_1 et S_2 sont ouverts, S_3 et S_4 sont fermés, et la tension de sortie est $-E$.

1.4 Alimentation sans coupure

Une alimentation sans interruption statique typique est composée d'un redresseur, d'un onduleur, et d'un ensemble de batteries. La configuration de chaque bloc peut varier d'une application à une autre.

1.4.1 Domaines d'application

Les alimentations sans interruption trouvent plusieurs domaines d'application tel que :

- les équipements médicaux,
- les systèmes de sécurité,
- les systèmes de stockage de données,
- les systèmes informatiques, les équipements de secours, les télécommunications,
- les traitements industriels, et les systèmes de gestion en ligne.

1.4.2 Caractéristiques d'alimentation sans interruption

Généralement, une alimentation sans interruption idéale devrait avoir les caractéristiques suivantes :

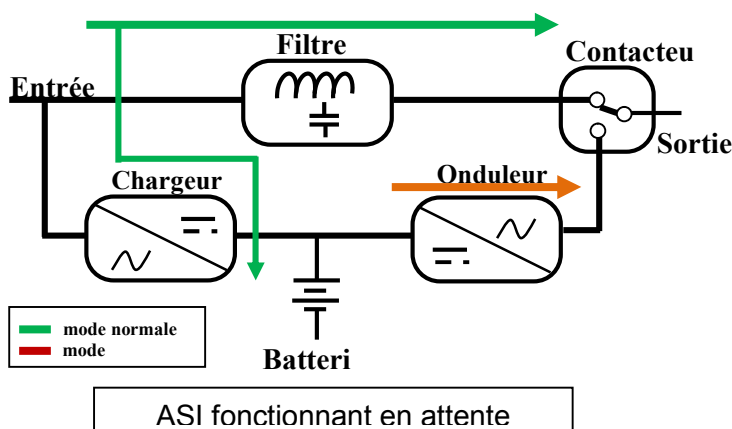
- Une tension de sortie sinusoïdale régulée ayant un faible taux de distorsion d'harmonique (THD) indépendant des variations de la tension d'entrée ou de la charge linéaire. Un temps de transfert nul du mode normale au mode de secours et vice-versa.
- Un courant d'entrée sinusoïdal avec un facteur de puissance unitaire.
- Une précision élevée.
- Une aptitude au recours à la source auxiliaire en cas de défaut interne.
- Un rendement élevé.
- Une faible interférence électromagnétique (EMI) et un faible bruit acoustique.
- Un isolement électrique de la sortie, de l'entrée et de la batterie.
- Un entretien réduit.
- Un prix réduit, un faible poids et une taille non volumineux.

Aucune topologie des ASI ne répond à toutes ces exigences simultanément. Chaque topologie essaye d'améliorer un ou plusieurs de ces caractéristiques provoquant une grande variété de configurations des ASI.

Le choix d'une topologie particulière dépend de l'application et de l'optimisation des caractéristiques désirées.

En attente passive

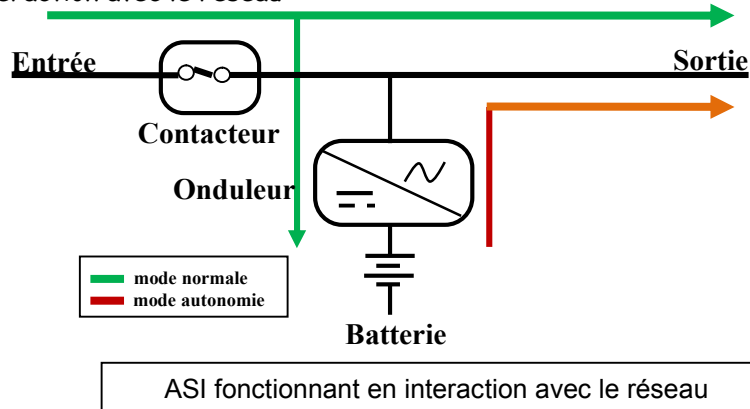
ASI fonctionnant en attente passive



- En mode normal, l'onduleur est en attente passive, isolé de la charge par l'interrupteur d'ASI. La charge est branchée directement au réseau, ou par l'entremise d'un filtre ou conditionneur qui élimine certaines perturbations électriques. Le chargeur, branché sur le réseau, assure la recharge de la batterie.
- En mode autonome, l'alimentation de la charge est transférée du réseau vers l'onduleur via l'interrupteur d'ASI. Le temps de permutation de l'interrupteur, le plus souvent particulièrement court, est de l'ordre de 10 ms.

En interaction avec le réseau

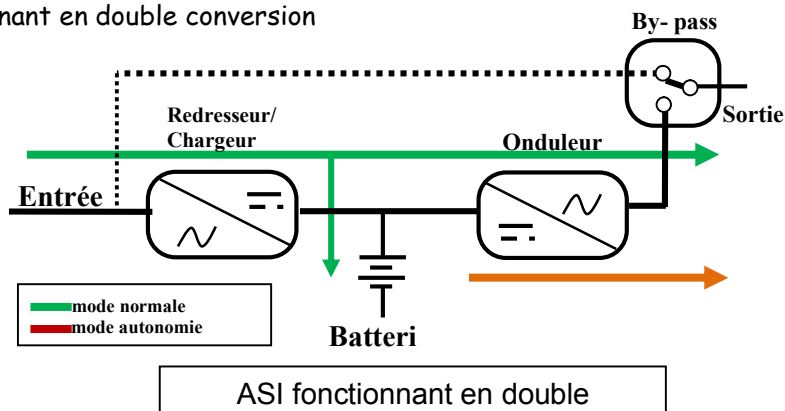
ASI fonctionnant en interaction avec le réseau



- En mode normal, la charge est alimentée par le réseau conditionné constitué par l'onduleur en parallèle (en interaction) avec le réseau. L'onduleur, à fonctionnement réversible, conditionne la puissance de sortie et assure la recharge de la batterie.
- En mode autonome, l'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Le contacteur de puissance coupe l'alimentation d'entrée pour éviter un retour d'alimentation depuis l'onduleur.

À double conversion

ASI fonctionnant en double conversion



- En mode normal, l'onduleur est en série entre le réseau et la charge. La puissance apportée à la charge transite en permanence par le duo chargeur-onduleur qui exécute une double conversion alternatif/continu - continu/alternatif.
- En mode autonome, l'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge.