

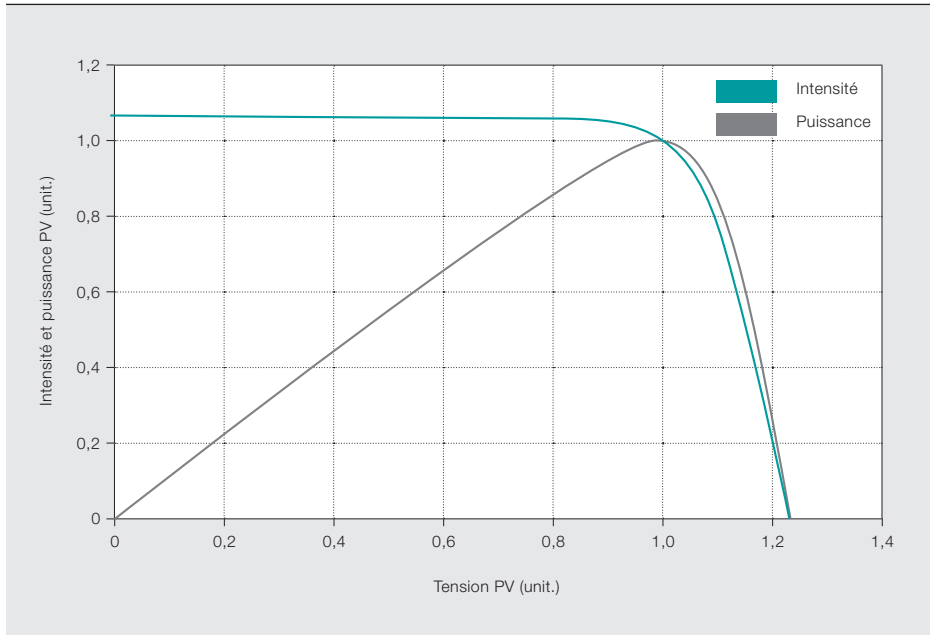


Solutions de premier plan

Évolution technologique et conceptuelle des onduleurs solaires

JUHA HUUSARI, PAOLO CASINI – La conversion photovoltaïque (PV) est un domaine d'application relativement nouveau en électronique de puissance. Les premières technologies étaient basées sur la variation électronique de vitesse pour moteurs électriques et ce n'est que récemment que des solutions développées spécialement pour la conversion PV sont apparues. Pour maintenir une forte présence sur

un marché PV en constante évolution, les entreprises doivent conjuguer adaptation et vision en misant sur les technologies porteuses d'avenir. Fort d'un savoir-faire en électronique de puissance, ABB ne se contente pas d'être un grand fournisseur de produits PV, il est également un pionnier de la conversion PV.



Les nombreux tarifs d'achat préférentiels et autres incitations financières qui ont contribué à faire baisser le prix des modules PV expliquent l'essor de la filière entre 2006 et 2011, surtout en Europe [1]. La chute brutale des subventions à la production qui a suivi a obligé le marché à s'adapter, le coût devenant un facteur décisif de lancement des nouveaux produits. Les efforts de recherche ont également dû être réorientés. ABB a consacré d'importants moyens pour développer des applications PV innovantes, en particulier dans les systèmes de conversion de l'énergie solaire.

Conversion de l'énergie PV

Il s'agit, pour l'essentiel, de garantir le transfert d'un maximum d'énergie électrique des modules PV à la charge raccordée (chauffage ou éclairage domestique) ou au réseau électrique (centrales solaires). Le rayonnement solaire terrestre est capté par la jonction semi-conductrice d'une cellule PV qui génère des porteurs de charge (courant électrique) dans le système. Contrairement à la plupart des générateurs qui

sont des sources de tension, la nature « source de courant » d'une cellule PV oblige à prendre des mesures spécifiques pour réguler de manière efficace la production d'énergie. Les premiers convertisseurs PV affichaient de piètres performances et la communauté scientifique elle-même rechignait à remettre à plat les concepts de régulation de la conversion PV [2]. Depuis, ces lacunes ont été corrigées.

Du fait de sa caractéristique semi-conductrice non linéaire, le générateur PV délivre sa pleine puissance uniquement lorsqu'on le force à fonctionner à un niveau de tension donné → 1. De plus, des facteurs environnementaux comme la température des cellules PV ainsi que l'intensité du rayonnement solaire modifient considérablement les propriétés électriques et la puissance débitée par le générateur. Celle-ci augmente à mesure que la température des cellules baisse et que le flux lumineux s'intensifie. C'est ce qui explique que dans des régions comme l'Europe du Nord, un générateur PV peut produire sa puissance crête (kWc) lors des froides matinées printanières.

Le comportement intermittent du générateur PV est supervisé par le convertisseur à électronique de puissance qui gère l'électricité produite. Une fonction spéciale *MPPT* (*maximum power point tracking*) maximise la production électrique en l'ajustant constamment au niveau désiré par variation du niveau de tension du générateur.

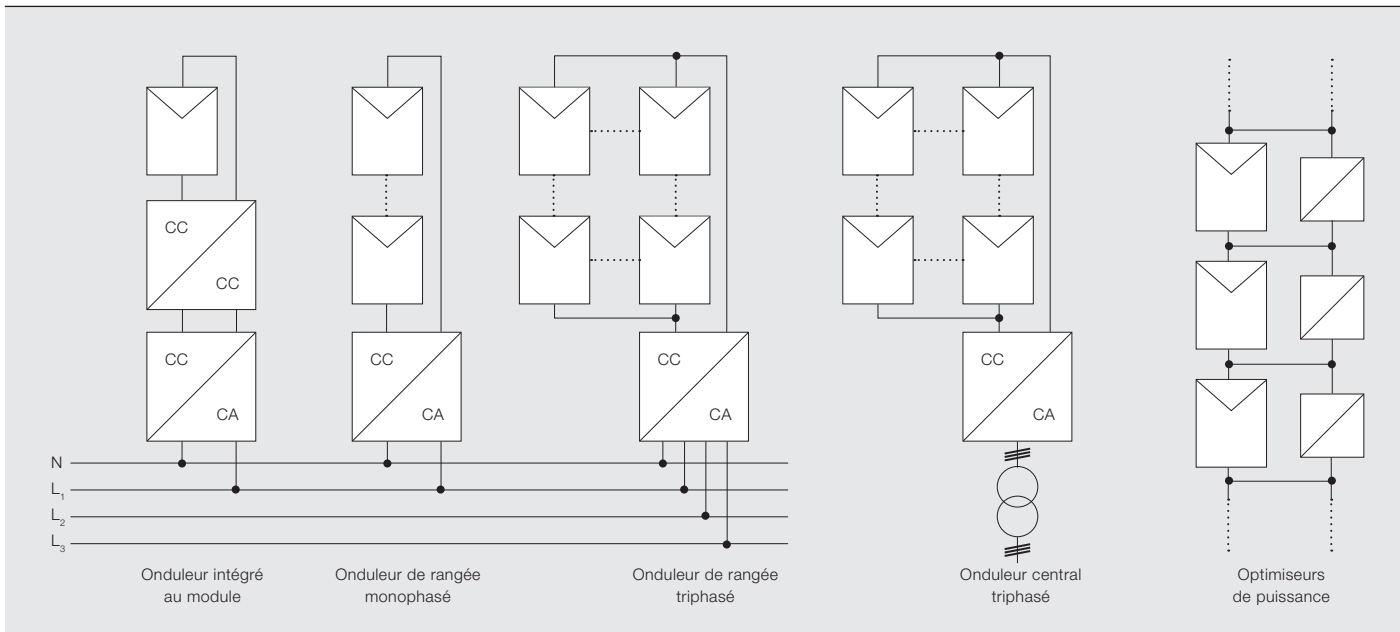
La cellule PV est le composant de base du générateur : de 15 cm de côté et 100 µm d'épaisseur, elle produit en moyenne 2 ou 3 W sous moins de 1 V, selon sa taille et sa technologie. La majorité des cellules est à base de silicium

Contrairement à la plupart des générateurs électriques qui sont des sources de tension, la nature « source de courant » d'une cellule PV impose des mesures spécifiques pour réguler la production d'énergie.

(Si), mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont utilisés, soit traditionnels comme le nitrure de gallium (GaN), le phosphore d'indium (InP) et le diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS), soit plus « exotiques » comme les matériaux organiques et sensibilisés par colorant.

Photo p. 33

Installation photovoltaïque de 181 kilowatts-crête en toiture d'une usine ABB à Helsinki (Finlande)



De 2 à 96 cellules sont montées en série pour former un module ou panneau PV, la conversion étant plus facile à des niveaux de tension élevés. La puissance des modules s'échelonne en général de 5 à 350 W, les grandes centrales solaires étant réalisées avec des modules plus puissants. Ces derniers sont eux-mêmes alignés en série pour former une rangée PV. Pour des raisons de sécurité, la tension maximale d'une rangée par rapport à la terre est limitée à 1000/1500 V au sein de l'Union européenne et à 600 V aux États-Unis, ce qui détermine la puissance maximale de la rangée. Une rangée PV de 1000 V de tension assignée produit d'ordinaire 5 kW de courant continu (CC); c'est pourquoi le calibre des onduleurs PV commercialisés pour les installations multirangées est généralement un multiple de 5 kW.

On distingue trois grands types de convertisseur d'énergie PV: les micro-onduleurs qui s'intercalent entre un à quatre modules PV et le réseau électrique en courant alternatif (CA), les onduleurs de rangées PV (*string*) monophasés ou triphasés qui interfacent une à vingt rangées PV et, enfin, les onduleurs centraux triphasés, souvent d'une puissance supérieure à 100 kVA. Il existe également des produits de « niche » comme les optimiseurs de puissance qui sont des convertisseurs CC-CC de faible puissance servant à maximiser la puissance produite dans les rangées PV existantes → 2. À l'exclusion des optimi-

seurs de puissance, ABB propose des convertisseurs et des solutions pour toutes ces catégories d'installation.

Valoriser au maximum l'énergie solaire

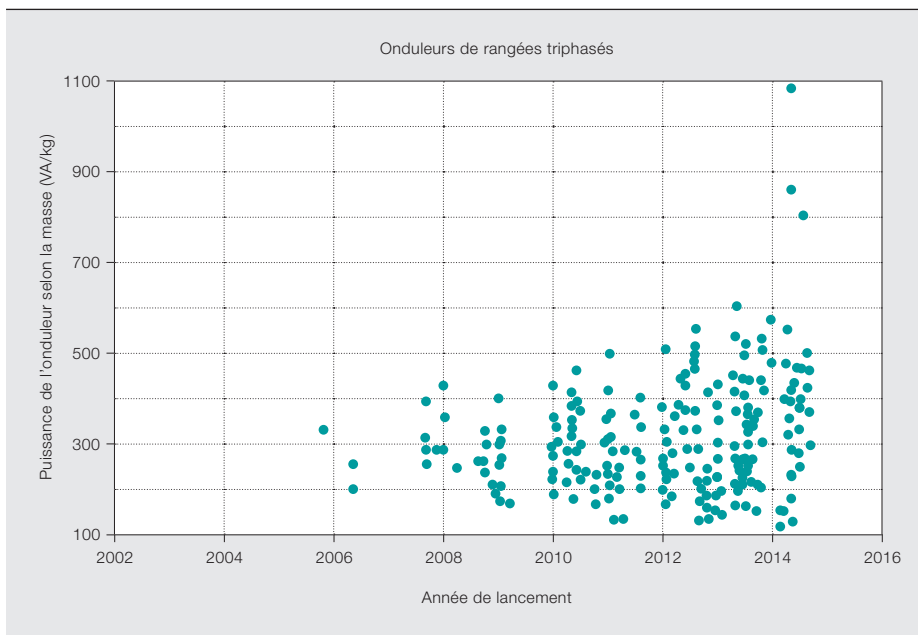
Pendant longtemps, c'était la taille des installations PV qui déterminait la puissance des onduleurs: micro-onduleurs pour les petites installations, grosses stations d'onduleurs pour les grandes centrales. Cette règle change avec la tendance à construire des systèmes de forte puissance équipés d'onduleurs de rangées. Plusieurs facteurs expliquent cette évolution: tout d'abord, une production solaire accrue avec plusieurs onduleurs qui maximisent l'extraction de puissance pour un coût d'installation moindre; ensuite, une meilleure disponibilité avec l'arrêt d'une partie restreinte de l'installation en cas de défaillance d'un onduleur.

Autre évolution intéressante pour les grandes centrales solaires: l'exploitation de données climatiques pour affiner les prévisions à court terme et optimiser la production d'énergie. En suivant, par exemple, le mouvement des nuages à proximité de l'installation, le contrôleur central peut ajuster à l'avance le fonctionnement d'un ou de plusieurs onduleurs afin d'optimiser la puissance (MPPT). De surcroît, ces données servent à prédire la production à court terme, au bénéfice du gestionnaire du réseau.

En suivant le mouvement des nuages à proximité de l'installation, le contrôleur central peut ajuster à l'avance le fonctionnement d'un ou de plusieurs onduleurs afin d'optimiser la puissance.

Les dispositifs à semi-conducteurs rapides sont la clé de voûte de l'onduleur PV qui, avec les éléments de stockage d'énergie passifs, convertit l'énergie solaire.

3 Évolution de la densité de puissance des onduleurs PV sans transformateur en coffret mural



Citons également l'arrivée des téléserVICES et le raccordement des onduleurs PV à des réseaux de stockage et de partage de données pertinentes comme l'historique de la production d'énergie. Là encore, ces informations aident le gestionnaire du réseau à équilibrer l'offre et la demande.

Nouvelle génération de dispositifs à semi-conducteurs

Les dispositifs à semi-conducteurs rapides sont la clé de voûte de l'onduleur PV qui, avec les éléments de stockage d'énergie passifs, convertit l'énergie solaire. Si la grande majorité de ces onduleurs intègre des dispositifs au Si, des dispositifs au carbure de silicium (SiC) ont récemment fait leur apparition. Offrant une tenue à des tensions et des températures supérieures pour une commutation encore plus rapide, ils permettent de réaliser des convertisseurs moins encombrants et au rendement plus élevé [3]. Pour autant, cette technologie est onéreuse et la fiabilité à long terme des composants SiC reste à prouver. Malgré ces inconvénients, elle trouvera sa place dans les onduleurs PV au cours des prochaines années, comme en témoignent la recherche ABB [4] et les produits qui l'utilisent.

Les avantages du GaN sur le SiC font encore débat au sein de la filière. Les dispositifs au GaN autoriseraient une commutation ultrarapide avec un rendement et une densité de puissance

accrus. Aucun démonstrateur n'a, à ce jour, validé ces hypothèses.

Si la technologie SiC est arrivée à maturité, ce n'est pas le cas des dispositifs au GaN. Actuellement, seule une poignée de produits GaN existe sur le marché et aucun module de courant élevé n'est disponible, notamment du fait de la jonction semi-conductrice GaN latérale dont les propriétés rendent difficiles la mise en parallèle de nombreuses puces GaN et, donc, la fabrication de modules de courant élevé. Des GaN en boîtier permettent d'atteindre 20 à 30 kW ; pour des puissances supérieures, des modules sont obligatoires.

Densité de puissance des onduleurs de rangées PV

Ces dix dernières années, les paramètres de conception des onduleurs de rangées ont complètement changé. Les produits de première génération visaient des rendements élevés avec plusieurs optimiseurs MPPT. Si la deuxième génération de produits privilégiait un rendement de conversion maximal, la suivante mettait l'accent sur les systèmes mono-étagés. Aujourd'hui, la baisse des coûts et la hausse de la densité de puissance sont les deux objectifs prioritaires. Chaque nouvelle génération confronte les concepteurs de l'électronique de puissance à des défis différents.

L'accroissement de la densité de puissance répond à plusieurs besoins. Par souci de sécurité, les industriels ont fixé à 75 kg la masse maximale d'une armoire transportable par deux personnes. Pour un coffret mural, la capacité de charge de la structure de montage et du mur lui-même impose également des limites. Enfin, les coûts de transport par watt installé doivent être réduits.

L'évolution de la densité de puissance des onduleurs de rangées triphasés sans transformateur en coffret mural (<75 kg) → 3 reflète les efforts croissants des fabricants dans ce sens.

Pour autant, cette densité de puissance a ses limites. Si les filtres passifs pèsent lourd, il en va de même du dispositif de refroidissement, de l'enveloppe et des différentes protections. Or certaines obliga-

photovoltaïque moderne, les progrès réalisés dans les onduleurs solaires ciblent l'optimisation de leur rendement productif et la réduction du coût total de possession, soit les dépenses cumulées d'investissement et d'exploitation sur le cycle de vie de l'installation.

En une décennie, les industriels se sont efforcés d'améliorer les rendements de la conversion de puissance des onduleurs PV, qui atteignent 98 % pondérés et 99 % crête. Mais cet accroissement inévitablement asymptotique du rendement et le faible gain différentiel du retour sur investissement, au vu du surcoût des topologies et des technologies de contrôle-commande améliorées, ont progressivement braqué les projecteurs sur la réduction du coût total de possession, en particulier le coût des « composants du système PV hors modules », que les anglophones appellent *BOS (balance of system)*.

Ces composants annexes constituent un intéressant terrain d'innovations pour faire baisser le coût du BOS, qui représente 60 % du coût d'une centrale, contre moins de 10 % pour l'onduleur lui-même. Il y a quelques années, le passage progressif de la tension réseau de 600 à 1000 V a permis de réduire de 25 % le coût BOS côté CC. La filière PV est aujourd'hui au seuil d'un bouleversement similaire avec l'arrivée prochaine des modules de 1500 VCC, qui vont révolutionner le marché des onduleurs industriels en obligeant les fabricants à revoir de fond en comble les topologies et les composants électroniques et électromécaniques de leurs produits.

Les dépenses annuelles d'exploitation et de maintenance d'une centrale PV équivalent environ à 1,5 % du budget d'investissement initial. La maintenance des onduleurs, traditionnellement refroidis à l'air, en absorbe à elle seule une bonne part, surtout s'ils sont installés sur des sites éloignés et contraignants. Au cours des quelque 20 années de durée de vie prévisibles, le budget d'exploitation contribue donc pour beaucoup au coût global de la centrale. Réduire les coûts de maintenance et de logistique, et simplifier l'installation constituent des leviers supplémentaires d'évolution de la conception mécanique des onduleurs industriels. L'apparition soudaine d'onduleurs pour l'extérieur au catalogue de plusieurs fabricants fut le premier pas

dans cette direction ; viendront ensuite des solutions de refroidissement innovantes à la maintenance moins coûteuse. Les onduleurs PV traditionnels refroidis à l'air (IP20), dont les filtres et l'électronique doivent être nettoyés à intervalles réguliers, seront progressivement remplacés par des appareils étanches (IP54 ou IP65) à refroidissement liquide ou diphasique.

Configurations ingénieuses et refroidissement amélioré riment avec densité de puissance en hausse et coûts logistiques et d'installation en baisse. Dans un marché qui bascule vers les pays émergents aux implantations en sites isolés, cette évolution revêt une importance particulière.

Les téléservices et le raccordement des onduleurs PV à des réseaux de stockage et de partage de données permettent d'optimiser la production d'énergie.

tions ne peuvent être contournées comme, par exemple, l'épaisseur de l'enveloppe et les protections imposées par la normalisation (CEI 62109, notamment). Plus le niveau de puissance est élevé, plus les protections sont volumineuses, augmentant la masse de l'enveloppe et son indice de protection (IP).

Ces besoins accrus obligent les concepteurs à innover et à se tourner vers la prochaine génération de composants semi-conducteurs.

Solutions pour centrales solaires

Si tous les maillons de la chaîne PV ont bénéficié de développements technologiques, ce sont les centrales solaires raccordées au réseau électrique qui ont connu le rythme d'innovation le plus impressionnant. Depuis le tout début du

Juha Huusari

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
juha.huusari@fi.abb.com

Paolo Casini

ABB Discrete Automation and Motion,
Power Conversion
Terranuova Bracciolini (Italie)
paolo.casini@it.abb.com

Bibliographie

- [1] *Global market outlook for photovoltaics 2014–2018*, European Photovoltaic Industry Association.
- [2] Nousiainen, L., *et al.*, « Photovoltaic generator as an input source for power electronic converter », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n° 6, p. 3028–3038, juin 2013.
- [3] Weizer, C., *et al.*, « Silicon carbide high power devices », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 43, n° 10, p. 1732–1741, octobre 1996.
- [4] Ho, C., *et al.*, « A comparative performance study of an interleaved boost converter using commercial Si and SiC diodes for PV applications », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n° 1, p. 289–299, mai 2012.