

Concevoir une correction du facteur de puissance plus efficace en utilisant des semi-conducteurs à large bande interdite et la commande numérique

Auteur : Rolf Horn, Applications Engineer at Digi-Key Electronics

La correction du facteur de puissance (PFC) est nécessaire pour maximiser l'efficacité des équipements à alimentation secteur, y compris les alimentations CA/CC, les chargeurs de batterie, les systèmes de stockage d'énergie basés sur batterie, les entraînements de moteur et les alimentations secourues. Son importance est telle qu'il existe des réglementations qui dictent des niveaux de facteur de puissance (PF) minimum pour des types spécifiques d'équipements électroniques.

Pour satisfaire à ces réglementations face à la pression constante d'améliorer les performances globales dans des facteurs de forme toujours plus réduits, les concepteurs se tournent vers les conceptions à PFC active qui tirent parti des techniques de commande numérique et des semi-conducteurs à large bande interdite (WBG) comme le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN).

Cet article passe en revue les concepts et les définitions du facteur de puissance, y compris les définitions qui diffèrent entre l'IEEE et la CEI et les normes associées. Il présente ensuite des solutions PFC de fournisseurs tels que

[STMicroelectronics](#), [Transphorm](#), [Microchip Technology](#) et [Infineon Technologies](#), que les concepteurs peuvent utiliser pour implémenter la correction du facteur de puissance en utilisant des semi-conducteurs à large bande interdite et la commande numérique, y compris l'utilisation de cartes d'évaluation.

Présentation et importance de la correction du facteur de puissance

Le facteur de puissance est une mesure du niveau de puissance réactive dans un système. La puissance réactive n'est pas la puissance réelle mais représente l'impact des volts et des ampères qui sont déphasés les uns par rapport aux autres (Figure 1). Comme ils sont déphasés, ils ne peuvent pas contribuer efficacement au travail, mais ils apparaissent toujours comme une charge sur la ligne d'alimentation CA. La quantité de puissance réactive dans un système est une mesure du niveau d'inefficacité du transfert d'énergie. La correction du facteur de puissance active utilise l'électronique de puissance pour modifier la phase et/ou la forme de la forme d'onde du courant absorbé par une charge afin d'améliorer le facteur de puissance. L'utilisation de la PFC augmente l'efficacité globale du système.



Figure 1 : Le facteur de puissance est défini comme le cosinus de θ et représente le rapport entre la puissance réelle absorbée par la charge et la puissance apparente circulant dans le circuit. La différence entre les deux est due à la puissance réactive. Lorsque la puissance réactive approche de zéro, la charge semble plus purement résistive, la puissance apparente et la puissance réelle s'équilibrent et le facteur de puissance devient 1,0. (Source de l'image : Wikipédia)

Un facteur de puissance médiocre peut se produire dans des charges linéaires ou non linéaires. Les charges non linéaires déforment la forme d'onde de la tension ou du courant, ou les deux.

Lorsque des charges non linéaires sont impliquées, on parle de facteur de puissance de distorsion.

Une charge linéaire ne déforme pas la forme d'onde d'entrée, mais peut modifier la synchronisation relative (phase) entre la tension et le courant en raison de son inductance et/ou de sa capacité (Figure 2). Les circuits électriques avec des charges principalement résistives (par exemple, les lampes à incandescence et les éléments chauffants) ont un facteur de puissance de presque 1,0, mais les circuits contenant des charges inductives ou capacitives (par exemple, les convertisseurs de puissance à découpage, les moteurs électriques, les électrovannes, les transformateurs et les ballasts de lampe) peuvent avoir un facteur de puissance bien inférieur à 1,0.

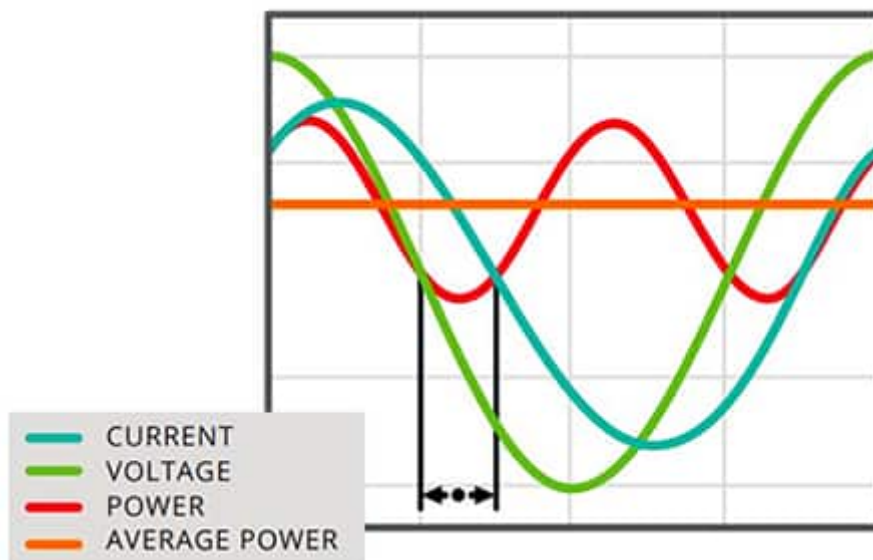


Figure 2 : Puissance

instantanée et moyenne calculée à partir du courant et de la tension CA avec un facteur de puissance inductif — c'est-à-dire avec le courant en retard par rapport à la tension — de 0,71 depuis une charge linéaire. (Source de l'image : [CUI, Inc.](#))

La plupart des charges électroniques ne sont pas linéaires. Les exemples de charges non linéaires incluent les convertisseurs de puissance à découpage et les dispositifs à décharge en arc tels que les lampes fluorescentes, les machines à souder électriques ou les fours à arc. Comme le courant dans ces systèmes est interrompu par une action de commutation, le courant contient des composantes de fréquence qui sont des multiples de la fréquence du système de puissance. Le facteur de puissance de distorsion est une mesure de la réduction de la puissance moyenne transmise à la charge par la distorsion harmonique d'un courant de charge.

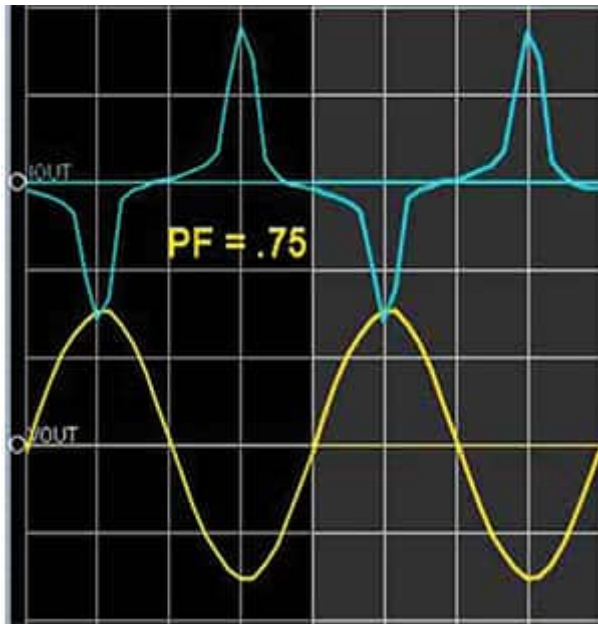


Figure 3 : La tension sinusoïdale (jaune) et le courant

non sinusoïdal (bleu) donnent un facteur de puissance de distorsion de 0,75 pour cette alimentation d'ordinateur, qui est une charge non linéaire. (Source de l'image : Wikipédia)

Différence entre facteur de puissance inductif et facteur de puissance capacitif

Un facteur de puissance inductif indique que le courant est en retard par rapport à la tension, et un facteur de puissance capacitif indique que le courant est en avance par rapport à la tension. Pour les charges inductives (par exemple, les moteurs à induction, les bobines et certaines lampes), le courant est en retard par rapport à la tension, ce qui produit un facteur de puissance inductif. Pour les charges capacitives (par exemple, les condensateurs synchrones, les batteries de condensateurs et les convertisseurs de puissance électroniques), le courant est en avance sur la tension, résultant en un facteur de puissance capacitif.

La distinction entre retard et avance n'équivaut pas à une valeur positive ou négative. Le signe négatif et positif qui précède une valeur PF est déterminé par la norme utilisée — IEEE ou CEI.

Facteur de puissance et IEEE contre CEI

Les schémas de la Figure 4 montrent la corrélation entre les kilowatts (kW) de puissance, la puissance réactive (var) en volt-ampère, le facteur de puissance et les charges inductives ou capacitives pour les normes IEEE et CEI. Chaque organisation utilise des mesures différentes pour classer le facteur de puissance.

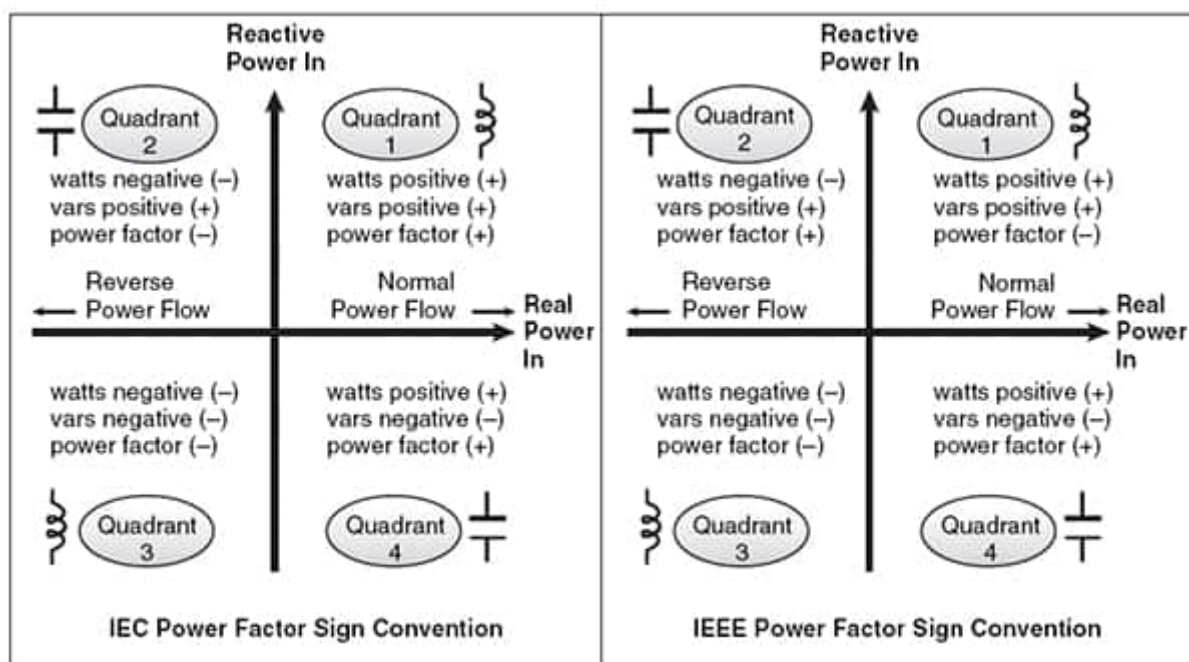


Figure 4 : Selon la CEI (à gauche), le signe du facteur de puissance dépend uniquement du sens du flux de puissance réelle et est indépendant du fait que la charge soit inductive ou capacitive. Selon l'IEEE (à droite), le signe du facteur de puissance dépend uniquement de la nature de la charge (c'est-à-dire capacitive ou inductive). Dans ce cas, il est indépendant du sens du flux de puissance réelle. (Source de l'image : Schneider Electric)

Selon la CEI (partie gauche de la Figure 4), le signe PF dépend uniquement du sens du flux de puissance réelle et est indépendant du fait que la charge soit inductive ou capacitive. Selon l'IEEE (partie droite de la Figure 4), le signe PF dépend uniquement de la nature de la charge (c'est-à-dire capacitive ou inductive). Dans ce cas, il est indépendant du sens du flux de puissance réelle. Pour une charge inductive, le facteur de puissance est négatif. Pour une charge capacitive, le facteur de puissance est positif.

Normes PF

Les autorités réglementaires telles que l'UE ont fixé des limites d'harmoniques pour améliorer le facteur de puissance. Pour être conformes à la norme européenne actuelle EN61000-3-2 (basée sur la norme CEI 61000-3-2), toutes les alimentations à découpage dont la puissance de sortie est supérieure à 75 watts (W) doivent inclure la correction du facteur de puissance. La certification d'alimentation 80 PLUS par EnergyStar exige un facteur de puissance de 0,9 ou plus à 100 % de la puissance de sortie nominale et requiert une correction du facteur de puissance active. La dernière édition de la norme CEI au moment de la rédaction du présent document est [CEI 61000-3-2:2018](#), « *Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-2 : Limites - Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)* ».

Les convertisseurs de puissance à découpage non corrigés ne répondent pas aux normes PFC actuelles. Une considération qui affecte le facteur de puissance est le type d'entrée CA utilisé : monophasé ou triphasé. Les alimentations à découpage monophasées non corrigées ont généralement un facteur de puissance d'environ 0,65 à 0,75 (selon la convention IEEE pour le signe PF décrite ci-dessus). La raison est que la plupart des unités utilisent un redresseur/condensateur en amont pour produire une tension de bus CC. Cette configuration ne consomme du courant qu'à la crête de chaque cycle de ligne, créant des impulsions de courant étroites et élevées qui entraînent un faible facteur de puissance (voir Figure 3, ci-dessus).

Les convertisseurs de puissance à découpage triphasés non corrigés ont un facteur de puissance plus élevé, souvent proche de 0,85 (également selon la convention IEEE pour le signe PF). La raison est que même si un redresseur/condensateur est utilisé pour produire une tension de bus CC, il existe trois phases qui améliorent de manière additive le facteur de puissance global. Cependant, ni les convertisseurs de puissance à découpage monophasés ni les convertisseurs triphasés ne peuvent satisfaire aux réglementations actuelles sur le facteur de puissance sans l'utilisation d'un circuit de correction du facteur de puissance active.

Utilisation des semi-conducteurs à large bande interdite et de la commande numérique pour une PFC active

L'utilisation de techniques de commande numérique et de semi-conducteurs de puissance à large bande interdite, notamment le GaN et le SiC, offre aux concepteurs de nouvelles options pour les circuits à PFC active qui peuvent offrir des rendements et des densités de puissance plus élevés par rapport aux conceptions PFC basées sur des conceptions à PFC passive ou à commande analogique.

Les concepteurs peuvent remplacer les contrôleurs analogiques par des techniques de commande numérique avancées ou compléter la commande analogique par des éléments de commande numérique supplémentaires, notamment des microcontrôleurs, pour atteindre des performances PFC maximum. Dans certains cas, les semi-conducteurs à large bande interdite peuvent également être utilisés pour améliorer les performances PFC.

La baisse du coût des composants a accéléré la mise en œuvre de deux méthodes PFC différentes : les conceptions à entrelacement et les conceptions sans pont. Chaque approche offre des avantages différents :

- Avantages de la PFC à entrelacement :
 - Rendement supérieur
 - Amélioration de la répartition de la chaleur
 - Courant efficace réduit dans l'étage PFC
 - Modularité
- Avantages de la PFC sans pont :
 - Rendement supérieur
 - Réduit de moitié les pertes dans le redressement d'entrée
 - Amélioration de la répartition de la chaleur
 - Densité de puissance plus élevée

Le contrôleur PFC à entrelacement à trois canaux associe commande analogique et numérique

Le contrôleur [STNRGPF01](#) de STMicroelectronics est un circuit ASIC configurable qui combine la commande numérique et analogique et peut commander jusqu'à trois canaux dans une PFC à entrelacement (Figure 5). Le dispositif fonctionne en mode de conduction continue (CCM) à fréquence fixe avec un contrôle en mode courant moyen et implémente un contrôle de signaux mixtes (analogique/numérique). La boucle de courant interne analogique est effectuée par le matériel, garantissant une régulation cycle par cycle. La boucle de tension externe est effectuée par un contrôleur proportionnel-intégral (PI) numérique avec réponse dynamique rapide.

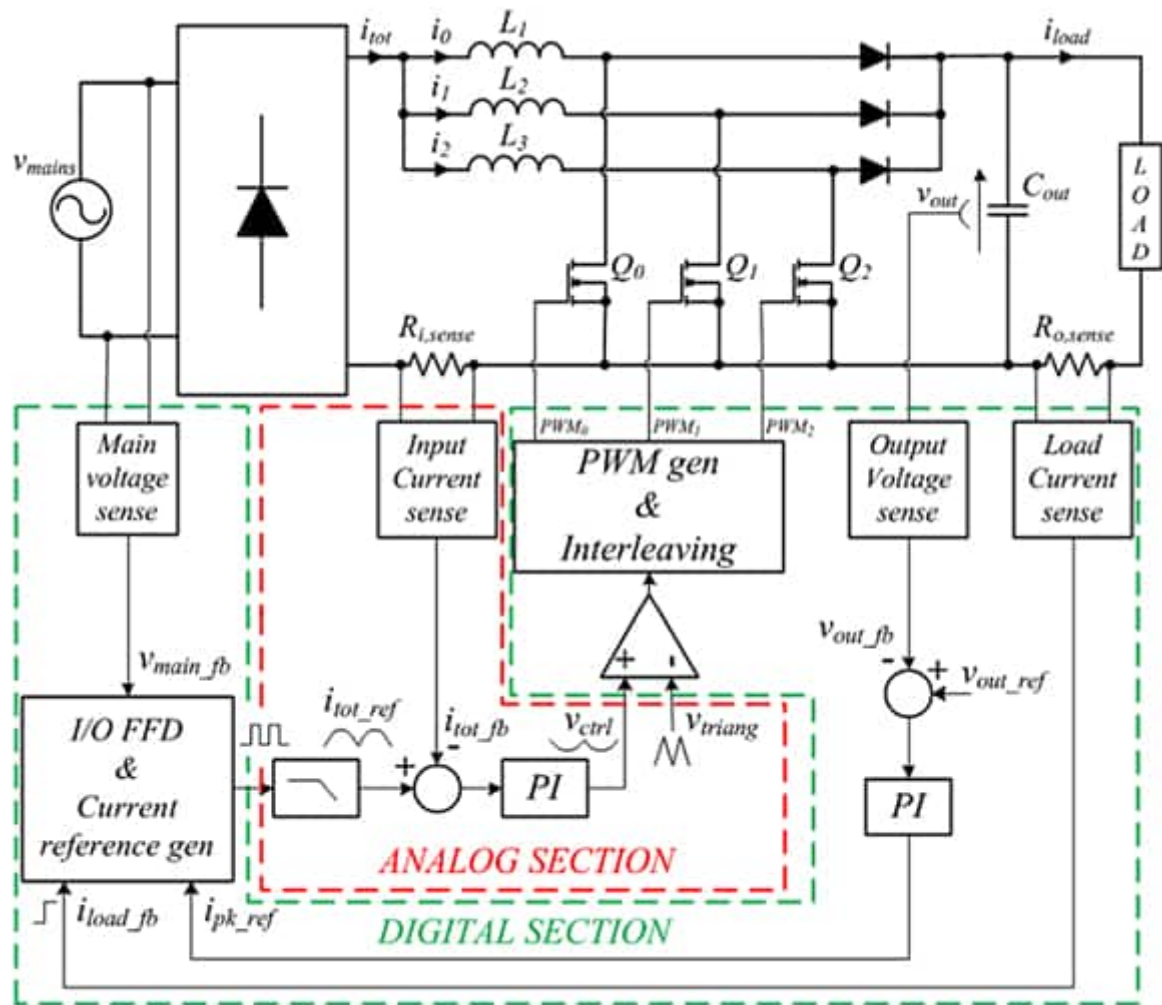


Figure 5 : Un schéma fonctionnel du STNRGPF01 montre la section de commande analogique interne (en rouge) et la section de commande numérique externe (en vert) dans une application PFC à entrelacement triphasée. (Source de l'image : STMicroelectronics)

Le STNRGPF01 met en œuvre une stratégie de délestage flexible qui active le nombre correct de canaux PFC en fonction de l'état de charge réel. Grâce à cette fonction, le STNRGPF01 est toujours en mesure de garantir le meilleur rendement énergétique pour une large gamme d'exigences de courant de charge.

Le contrôleur implémente plusieurs fonctions : contrôle du courant d'appel, démarrage progressif, gestion du refroidissement en mode rafale et indication de l'état. Il présente également un ensemble complet de protections embarquées contre les surtensions, les surintensités et les défaillances thermiques.

Pour aider les concepteurs à démarrer, STMicroelectronics propose également la carte d'évaluation de gestion de l'alimentation PFC 3 kW [STEVAL-IPFC01V1](#) basée sur le STNRGPF01 (Figure 6). Les fonctionnalités et les spécifications incluent :

- Plage de tensions d'entrée : 90 à 265 V_{CA}
- Plage de fréquences de lignes : 47 à 63 Hertz (Hz)
- Puissance de sortie maximale : 3 kW à 230 volts (V)
- Tension de sortie : 400 V

- PF : > 0,98 à 20 % de charge
- Distorsion harmonique totale : < 5 % à 20 % de charge
- Contrôle de signaux mixtes
- Fréquence de commutation : 111 kilohertz (kHz)
- Régulation cycle par cycle (boucle de contrôle de courant analogique)
- Contrôle avec anticipation de la charge et tension d'entrée
- Délestage de phase
- Fonctionnement en mode rafale

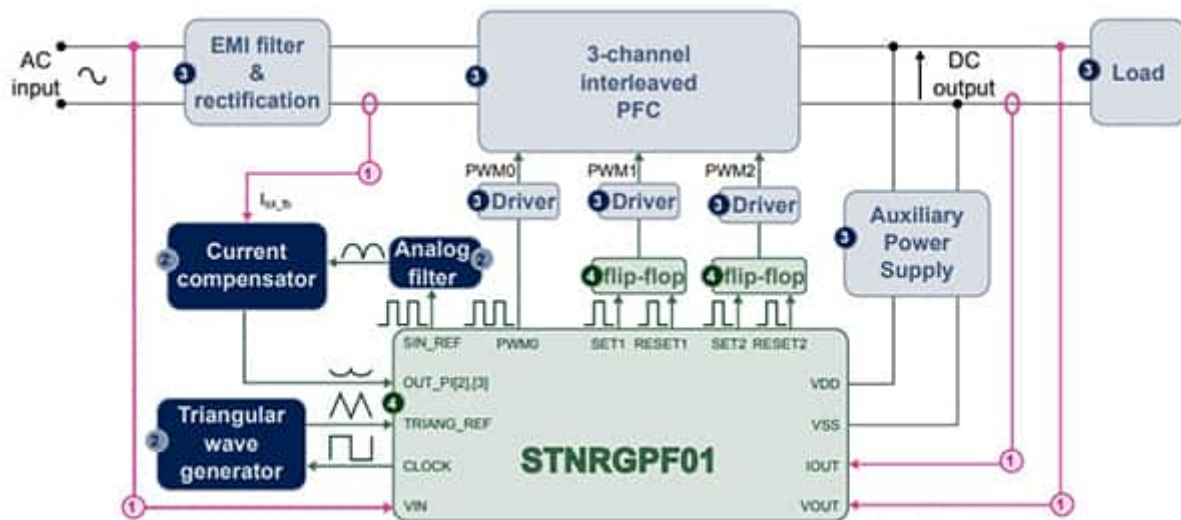


Figure 6 : Schéma fonctionnel du STEVAL-IPFC01V1 montrant : 1. signaux de mesure E/S ; 2. circuits analogiques ; 3. étage de puissance ; 4. section de commande numérique avec contrôleur numérique STNRGPF01, dans une PFC à entrelacement triphasée. (Source de l'image : STMicroelectronics)

En plus du contrôleur de signaux mixtes STNRGPF01, cette carte d'évaluation inclut des MOSFET de puissance silicium à canal N, 600 V, 34 ampères (A) à faible valeur Q_g [STW40N60M2](#) et des circuits intégrés d'attaque de grille [PM8834TR](#).

PFC totem-pôle sans pont avec FET GaN

Les topologies PFC sans pont ont été développées pour éliminer les chutes de tension et les inefficacités associées à l'utilisation du redressement à pont de diode. La PFC totem-pôle sans pont a été rendue possible par l'émergence des semi-conducteurs de puissance à large bande interdite tels que le GaN et le SiC (Figure 7). Dans une conception totem-pôle classique (a), deux FET GaN et deux diodes sont utilisés pour le redressement de ligne. Dans une modification totem-pôle sans pont (b), les diodes sont remplacées par deux MOSFET silicium à faible résistance pour remplacer les chutes de courant-tension (IV) des diodes et améliorer le rendement.

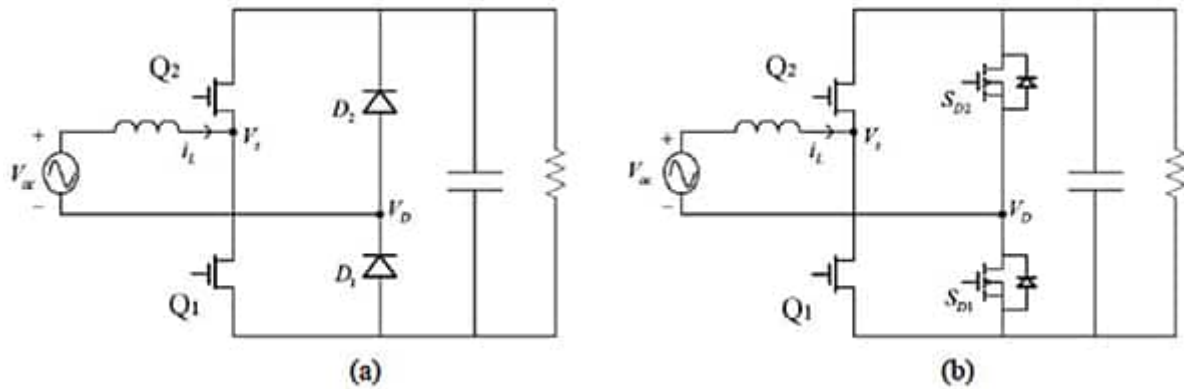


Figure 7 : Deux FET GaN et deux diodes sont utilisés pour le redressement de ligne dans une conception totem-pôle classique (a) ; dans un circuit modifié (b), les diodes sont remplacées par deux MOSFET silicium à faible résistance pour remplacer les chutes de courant-tension des diodes et améliorer le rendement dans le totem-pôle sans pont. (Source de l'image : Transphorm)

La charge de recouvrement inverse (Q_{rr}) nettement inférieure des transistors à haute mobilité électronique (HEMT) GaN par rapport à celle des MOSFET silicium simplifie la conception totem-pôle sans pont (Figure 8). Dans ce schéma simplifié de PFC totem-pôle en mode CCM, l'accent est mis sur la réduction des pertes par conduction.

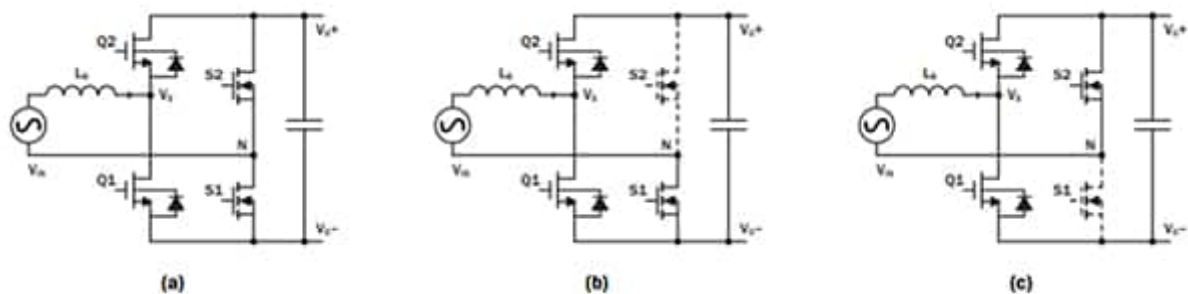


Figure 8 : Le schéma simplifié de PFC totem-pôle en mode CCM comprend deux HEMT GaN à commutation rapide (Q1 et Q2) fonctionnant à une fréquence de modulation de largeur d'impulsion élevée et agissant en tant que convertisseur élévateur, et deux MOSFET à très faible résistance (S1 et S2) fonctionnant à une fréquence de lignes beaucoup plus lente (50 Hz/60 Hz). (Source de l'image : Transphorm)

Le circuit inclut deux HEMT GaN à commutation rapide (Q1 et Q2) et deux MOSFET à très faible résistance (S1 et S2). Q1 et Q2 fonctionnent à une fréquence de modulation de largeur d'impulsion (PWM) élevée et agissent en tant que convertisseur élévateur. S1 et S2 fonctionnent à une fréquence de lignes beaucoup plus basse (50 Hz/60 Hz) et agissent en tant que redresseur synchronisé. Le trajet de courant primaire n'inclut qu'un commutateur rapide et un commutateur lent, sans chute de diode. Le rôle de S1 et S2 est celui d'un redresseur synchronisé, comme illustré dans 8(b) et 8(c). Pendant le cycle CA positif, S1 est activé et S2 est désactivé, ce qui force la ligne neutre CA liée à la borne négative vers la sortie CC. Le contraire s'applique pour le cycle négatif.

Pour permettre le fonctionnement en mode CCM, la diode de substrat du transistor esclave doit fonctionner comme une diode indirecte pour que le courant d'inductance circule pendant le temps de récupération. Le courant de la diode doit cependant rapidement être réduit à zéro et passer à l'état de blocage inverse dès que le commutateur principal est activé. C'est le processus critique pour une PFC totem-pôle, qui avec la valeur Q_{rr} élevée de la diode de substrat des MOSFET Si

haute tension, entraîne des pics anormaux, de l'instabilité et des pertes de commutation élevées associées. Le faible valeur Q_{rr} des commutateurs GaN permet aux concepteurs de surmonter cet obstacle.

Les concepteurs peuvent étudier le fonctionnement du circuit à l'aide de la carte d'évaluation PFC totem-pôle sans pont 4 kW [TDTTP4000W066C](#) de Transphorm. Cette carte utilise le module plug-in (PIM) numérique dsPIC33CK256MP506 [MA330048](#) de Microchip Technology comme contrôleur. La conversion monophasée à très haut rendement est réalisée avec les FET GaN Gen IV (SuperGaN) [TP65H035G4WS](#) de Transphorm. L'utilisation des FET GaN de Transphorm dans la branche de commutation rapide du circuit, et de MOSFET à faible résistance dans la branche de commutation lente du circuit, résulte en des performances et un rendement améliorés.

La PFC totem-pôle bidirectionnelle associe les FET silicium et les FET SiC

Pour les concepteurs de véhicules électriques à batterie interconnectés au réseau et de systèmes de stockage d'énergie basés sur batterie, Infineon propose la carte d'évaluation [EVAL3K3WTPPFCSICTOBO1](#), un correcteur PF totem-pôle de 3300 W avec capacité de puissance bidirectionnelle (Figure 9). Cette carte PFC totem-pôle sans pont délivre une haute densité de puissance de 72 W par pouce cube. Le totem-pôle implémenté dans la carte EVAL3K3WTPPFCSICTOBO1 fonctionne en mode CCM à la fois en mode redresseur (PFC) et en mode onduleur, avec une implémentation de commande numérique complète utilisant le microcontrôleur série [XMC1000](#) d'Infineon.

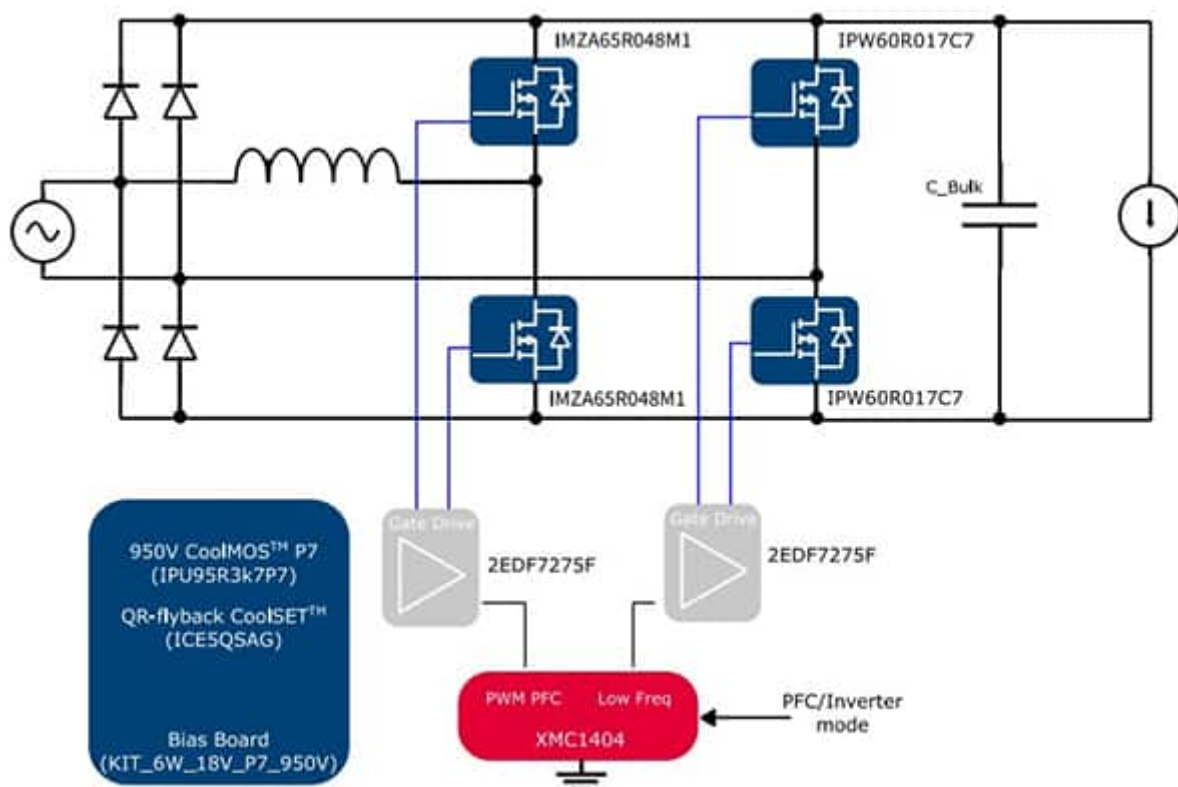


Figure 9 : Un schéma fonctionnel de la carte d'évaluation PFC totem-pôle 3300 W EVAL3K3WTPPFCSICTOBO1 montre la topologie qui fournit la densité de puissance de 72 W par pouce cube spécifiée de la carte. (Source de l'image : Infineon Technologies)

Cette PFC totem-pôle utilise une combinaison de MOSFET SiC CoolSiC 64 milliohms ($m\Omega$), 650 V [IMZA65R048M1](#) et de MOSFET de puissance silicium CoolMOS C7 17 $m\Omega$, 600 V [IPW60R017C7](#) d'Infineon. Le convertisseur fonctionne exclusivement à une tension

secteur élevée (176 V RMS minimum, 230 V RMS nominaux) en mode CCM avec une fréquence de commutation de 65 kHz, et atteint un rendement de 99 % à mi-charge. Les autres dispositifs d'Infineon utilisés dans cette solution totem-pôle bidirectionnelle de 3300 W (PFC/CA/CC et onduleur/CA/CC) incluent :

- Circuits d'attaque de grille isolés [2EDF7275FXUMA1](#)
- Contrôleur indirect QR [ICE5QSAGXUMA1](#) avec un MOSFET CoolMOS P7 950 V [IPU95R3K7P7](#) pour l'alimentation auxiliaire de polarisation
- Microcontrôleur [XMC1404](#) pour l'implémentation de contrôle PFC

Conclusion

Un faible facteur de puissance introduit des inefficacités dans le réseau électrique et dans les convertisseurs de puissance, rendant la correction du facteur de puissance nécessaire pour une variété d'équipements alimentés par le réseau CA, avec des réglementations dictant des niveaux de facteur de puissance minimum pour des types spécifiques de dispositifs électroniques. Pour satisfaire à ces exigences réglementaires tout en répondant à la nécessité de réduire les facteurs de forme et d'augmenter les performances, les concepteurs ont besoin d'une alternative aux techniques simples et économiques de correction du facteur de puissance passive.

Comme illustré, les concepteurs peuvent implémenter des conceptions à correction du facteur de puissance active en utilisant des techniques de commande numérique et des semi-conducteurs à large bande interdite tels que le SiC et le GaN pour atteindre des facteurs de puissance plus élevés et des conceptions plus compactes.

<https://www.digikey.fr/fr/articles/design-more-effective-power-factor-correction-using-wide-bandgap-semiconductors-and-digital-control>