

# Effacité du déphasage des capteurs de courant lors de l'évaluation de l'efficacité des commandes motorisées à haut rendement

Par Hideharu Kondo, Chiaki Yamaura, Yukiya Saito, Hiroki Kobayashi

## 1. Introduction

Dans le contexte mondial de lutte contre le réchauffement climatique, les systèmes de commandes motorisées de plus en plus efficaces utilisés sur les véhicules électriques et pour les applications industrielles attirent l'attention depuis quelques années. Essentielle pour évaluer le rendement et la perte des commandes motorisées, la capacité à mesurer la puissance avec précision exige une certaine expertise.

Cet article est axé sur les caractéristiques des formes d'onde de sortie des onduleurs afin de déterminer les exigences des instruments de mesure de la puissance nécessaires pour mesurer avec précision la puissance de sortie des onduleurs. Il présente en outre une fonction de déphasage par un analyseur de puissance, en mettant l'accent sur l'erreur de phase des capteurs de courant afin de satisfaire ces exigences. Enfin, cet article décrit la vérification, par les auteurs, de l'efficacité de la fonction de déphasage des capteurs de courant.

la composante principale de la forme d'onde à modulation de durée d'impulsion de la tension secteur et de ses harmoniques, avec la fréquence de commutation et ses composantes harmoniques. Un spectre d'au moins 0,1% f.s. existe jusqu'à environ 2 MHz.

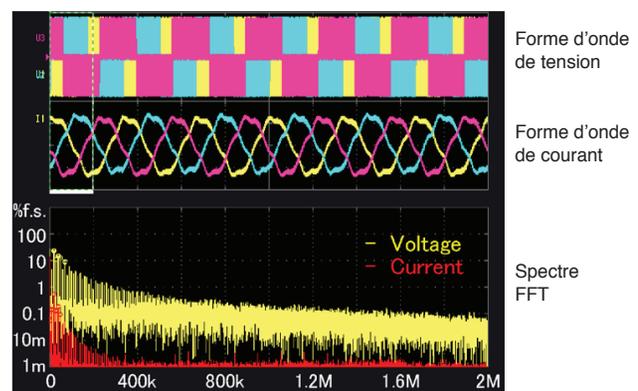


Fig. 1: Forme d'onde et résultats de FFT pour un moteur à entraînement par onduleur (mesurée à l'aide de l'analyseur de puissance Hioki PW6001)

## 2. Caractéristiques des formes d'onde de sortie des onduleurs

Les principales composantes de la puissance de sortie d'un onduleur sont les suivantes : une composante de fréquence fondamentale (jusqu'à 2 kHz), ses composantes harmoniques, la fréquence de commutation (5 kHz à 100 kHz), et ses composantes harmoniques. Parmi celles-ci, c'est la composante de fréquence fondamentale qui domine. La figure 1 illustre la forme d'onde de tension secteur de sortie d'un onduleur, la forme d'onde de courant de secteur, et les résultats de FFT associés pour un système de commande motorisée classique. Le tableau 1 contient des informations détaillées sur la cible de mesure.

Lorsque l'on observe les résultats de FFT de tension, on peut observer l'onde fondamentale, qui est

Onduleur		Moteur		
Élément de Commutation	Fréquence de commutation	Inductance	Résistance	Puissance de sortie
SiC-MOSFET SCH2080KE (ROHM)	20 kHz	3.6 mH	0.9 Ω	120 W

Tableau 1 : caractéristiques de la cible de mesure

L'onde fondamentale, ses harmoniques, la fréquence de commutation, et ses composantes harmoniques peuvent également être observées pour la forme d'onde de courant. Cependant, le spectre observé à des fréquences de 100 kHz et au-delà devient inférieur à 0,1% f.s., et le niveau de courant baisse brutalement dès que la fréquence augmente. Ce phénomène peut être expliqué en considérant le circuit équivalent d'un

moteur relié à un onduleur comme une charge (Fig. 2). L'enroulement du moteur peut être considéré comme une charge R-L composée d'une résistance et d'une inductance reliées en série. Ainsi, l'impédance augmente à des fréquences élevées, et rend la circulation de courant plus difficile.

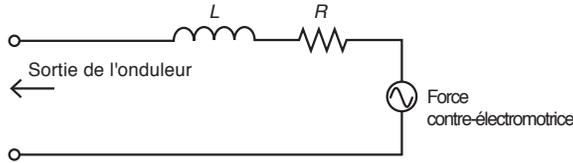


Fig. 2: circuit équivalent de moteur (pour 1 phase)

De la même manière, si l'on observe le facteur de puissance ( $\cos \theta$ ) pour une charge R-L, celui-ci s'approche d'une valeur de 1 lorsque la fréquence est faible, comme par exemple pour l'onde fondamentale et ses harmoniques. Cependant, étant donné que la réactance inductive devient dominante à des fréquences élevées, comme la fréquence de commutation et ses harmoniques, le courant présente une phase en retard, qui provoque un facteur de puissance faible.

La moitié inférieure de la figure 3 illustre une vue agrandie de l'axe temporel des formes d'onde de tension et de courant de sortie d'un onduleur jusqu'à la zone de fréquence de commutation. La forme d'onde de tension est rectangulaire, tandis que celle de courant est triangulaire. Il est apparent que leur relation de phase est caractérisée par la phase en retard du courant, comme cela est décrit ci-dessus, qui provoque un facteur de puissance faible.

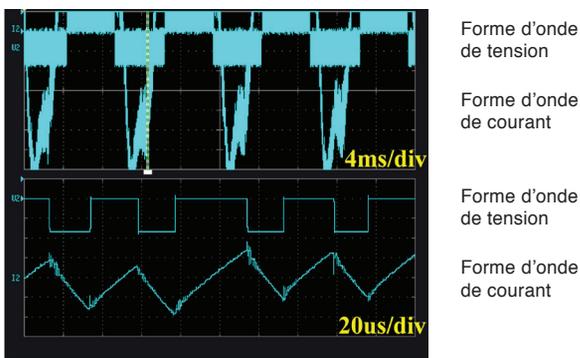


Fig. 3: vue agrandie des formes d'onde de sortie d'un onduleur

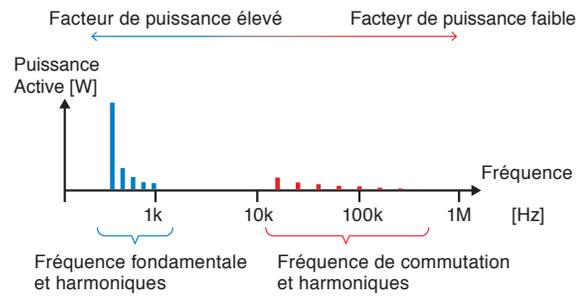


Fig. 4: principales composantes de la puissance active de sortie d'un onduleur et caractéristiques

### 3. Performances requises pour la mesure à haute précision de la sortie d'un onduleur

Cette section décrit les exigences qui doivent être respectées par un instrument de mesure de la puissance afin de mesurer avec précision la puissance de sortie d'un onduleur. Sur la base des caractéristiques décrites ci-dessus, il est important que cet instrument soit capable de mesurer la puissance active non seulement pour une onde fondamentale à facteur de puissance élevé et ses harmoniques, mais également pour une fréquence de commutation à facteur de puissance faible et ses composantes harmoniques.

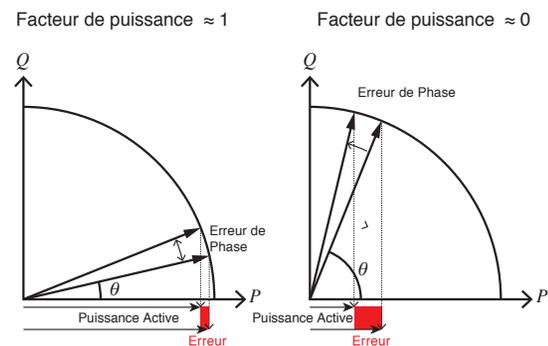


Fig. 5: relation entre l'erreur de phase et l'erreur de puissance active à différents facteurs de puissance

La figure 5 illustre la relation entre l'erreur de phase et l'erreur de puissance active à différents facteurs de puissance. L'erreur de phase de tension et de courant dans le circuit de mesure a davantage d'effet sur la puissance active avec des facteurs de puissance faibles qu'avec des facteurs de puissance élevés. Ainsi, une mesure précise

de la puissance active à la fréquence de commutation et ses composantes harmoniques nécessite des caractéristiques d'amplitude et de phase plates sur une large bande de fréquences (cette dernière tant particulièrement importante). Pour les composantes de puissance constituées d'une tension à onde rectangulaire et d'un courant à onde triangulaire, comme illustré sur la figure 3, la bande de fréquences sur laquelle l'instrument doit présenter des caractéristiques d'amplitude et de phase plates afin de mesurer efficacement avec une précision de 0,1% peut être 5 à 7 fois supérieure à la fréquence de commutation).

Les caractéristiques de fréquence de la puissance active à un facteur de puissance de zéro permettent de mesurer les performances d'amplitude et de phase plates. La figure 6 illustre un exemple de caractéristiques de fréquence de puissance active à un facteur de puissance de zéro pour plusieurs modèles d'analyseurs de puissance Hioki. Veuillez noter que ces exemples de caractéristiques décrivent les performances autonomes des instruments.

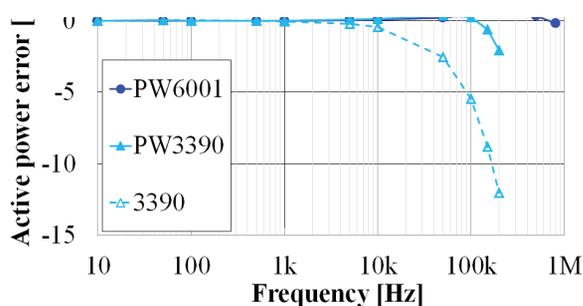


Fig. 6: caractéristiques de fréquence de puissance active à un facteur de puissance de zéro pour des analyseurs de puissance Hioki

Le PW6001 présente des caractéristiques plates jusqu'à 1 MHz, qui reflètent son usage prévu pour mesurer des onduleurs qui utilisent des éléments de commutation SiC.

Le PW3390, qui est conçu pour mesurer des onduleurs qui utilisent des éléments de commutation IGBT, présente des caractéristiques plates jusqu'à 150 kHz. L'instrument est prévu pour dépasser les performances du 3390, le précédent modèle, afin de faciliter la mesure à haute précision de la sortie de l'onduleur.

## 4. Déphasage des capteurs de courant

Lorsqu'un analyseur de puissance est utilisé dans une application de mesure de la puissance à haute précision, il est courant d'utiliser

un capteur de courant pour mesurer les courants supérieurs à 5 A2). Ainsi, afin de mettre en œuvre un système de mesure de puissance dont les caractéristiques d'amplitude et de phase plates s'étendent aux fréquences élevées, il est nécessaire de respecter les exigences de performances ci-dessus non pas pour l'analyseur de puissance lui-même, mais plutôt lorsque l'analyseur de puissance et le capteur de courant sont utilisés en combinaison.

Cependant, les capteurs de courant présentent généralement une erreur de phase qui augmente progressivement dans la zone de hautes fréquences en raison des caractéristiques du noyau magnétique et des circuits du capteur. De plus, les différences de conception des différents modèles de capteurs provoquent une variation de la magnitude de cette erreur. La figure 7 illustre des exemples de caractéristiques de phase pour plusieurs capteurs de courant à haute précision Hioki.

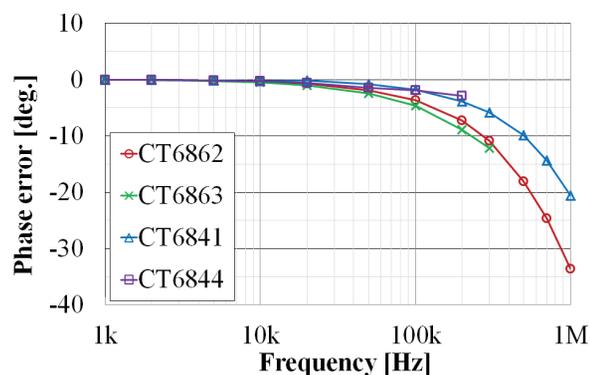


Fig. 7: caractéristiques de fréquence de phase des capteurs de courant

La fonctionnalité de déphasage d'un capteur de courant offerte par les analyseurs de puissance Hioki PW6001 et PW3390 peut être utilisée pour résoudre ce problème. Le déphasage utilise les informations d'erreur de phase propres au capteur de courant pour corriger l'erreur, afin d'améliorer les caractéristiques de phase dans la zone de hautes fréquences, et de réduire l'erreur de mesure de la puissance.

La fonction de déphasage utilise la technologie de suréchantillonnage virtuel pour effectuer un réalignement en temps réel pour les formes d'onde échantillonnées à une résolution temporelle élevée équivalente à une fréquence 400 fois supérieure à la fréquence d'échantillonnage réelle. En effectuant une compensation de retard pour les formes d'onde à l'aide du concept de temps, les avantages du déphasage peuvent être étendus à la bande de fréquences complète.

Hioki développe des capteurs de courant à haute précision en interne, et vérifie les caractéristiques de phase de chaque modèle de capteur en optimisant les processus de conception et de fabrication

et en mettant en place des contrôles de production stricts. Les informations sur les caractéristiques de phase propres aux capteurs de courant utilisées pour la fonction de déphasage se trouvent dans le manuel d'utilisation de chaque analyseur de puissance Hioki. La figure 8 illustre le résultat d'un déphasage pour les capteurs de courant illustrés sur la figure 7 qui utilisent ces informations sur les caractéristiques de phase. Lorsqu'il est correctement effectué, le déphasage offre des caractéristiques de phase bien supérieures dans la zone de hautes fréquences.

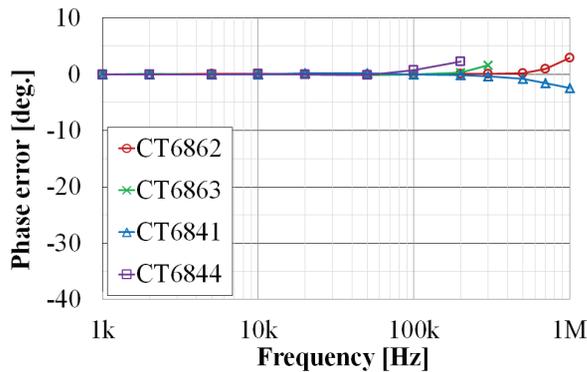


Fig. 8 Caractéristiques de fréquence de phase après un déphasage

## 5. Comparaison de mesures d'efficacité d'onduleurs

Les auteurs ont mesuré l'efficacité de l'onduleur SiC décrit dans le tableau 1 ci-dessus à l'aide de trois modèles d'analyseurs de puissance Hioki, et ont comparé les résultats. Le tableau 2 récapitule les conditions de mesure. Des mesures distinctes à l'aide du PW6001 et du PW3390 ont été effectuées avec le déphasage activé et désactivé.

Élément	Modèle		
	PW6001	PW3390	3390
Entrée (DC)	Câblage 1P2W		
	Capteur de courant CT6862		
	Déphasage OFF/ ON (-10.96deg@300kHz)		N/A
Sortie (PWM)	Câblage 3P3W3M		
	Capteur de courant CT6862 x 3		
	Déphasage OFF/ ON (-10.96deg@300kHz)		N/A
	Fréquence fondamentale 100 Hz		
Analyseur de puissance			
Bande de fréquences			
	sur 2 MHz	sur 200 kHz	sur 150 kHz

Table 2: conditions de mesure

La figure 9 récapitule les résultats de mesure de l'efficacité et de la perte. Le PW6001 et le PW3390 ont présenté des valeurs d'efficacité 0,1% à 0,15% supérieures à celles du

3390 avec le déphasage désactivé. La différence de valeurs était probablement due aux caractéristiques de fréquence de puissance active plus élevées des instruments avec un facteur de puissance de zéro (Fig. 6).

Les valeurs d'efficacité avec le déphasage activé ont été 0,1% à 0,15% supérieures à celles obtenues avec la fonction désactivée. La figure 10 illustre la puissance d'entrée CC P4 et la puissance de sortie à modulation de durée d'impulsion P123 pour les mesures illustrées sur la figure 9. Tandis que les valeurs P4 des PW6001 et PW3390 sont restées inchangées, que le déphasage ait été activé ou non, les valeurs P123 ont été 0,1% à 0,15% plus élevées lorsque le déphasage a été activé que lorsqu'il a été désactivé. Sur la base de ces résultats, la diminution de l'erreur de retard de phase du capteur de courant CT6862 (figures 7 et 8) est facilement apparente avec les valeurs mesurées P123.

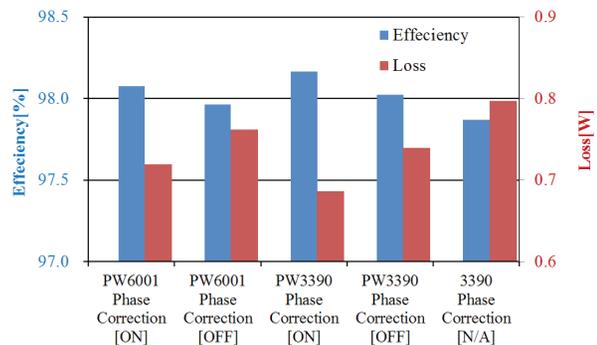


Fig. 9: comparaison de l'efficacité et de la perte d'onduleur par modèle

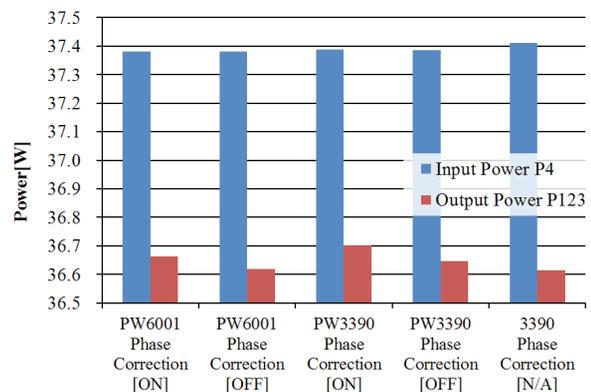


Fig. 10 Comparaison de la puissance d'entrée et de sortie de l'onduleur par modèle

Enfin, une comparaison des valeurs de perte illustrées sur la figure 9 révèle que les valeurs de perte obtenues avec le PW6001 et le PW3390 avec le déphasage activé ont été inférieures de 0,1 W (équivalent à 12%) à celles obtenues avec le 3390. Ce test a mesuré un moteur de petite taille en guise de charge, mais une différence de perte de 12% pour un onduleur de 10 kW efficace à 95% équivaut à une puissance de 60 W, soit une différence suffisante pour avoir un impact sur la conception thermique.

Afin d'évaluer avec précision l'efficacité jusqu'à 0,1% et la perte jusqu'à 1 W dans un système de commande motorisée à haut rendement, il est important de s'assurer que le système de mesure de la puissance présente des caractéristiques d'amplitude et de phase adéquates. Les résultats des mesures effectuées par les auteurs illustrent l'efficacité de la fonction de déphasage des capteurs de courant.

Étant donné que l'onduleur mesuré utilisait une fréquence de commutation de 20 kHz, le PW6001 et le PW3390 avaient une bande de fréquences adéquate, et il n'y a eu aucune différence significative de résultats de mesure entre les deux instruments. Cependant, des différences entre les deux modèles peuvent se produire si la fréquence de commutation augmente à nouveau.

## 6. Conclusion

Cet article était axé sur la puissance de sortie des onduleurs, et a décrit les exigences qui doivent être respectées par les instruments de mesure de la puissance afin de faciliter la précision des mesures. Il a identifié qu'il était important que le déphasage des capteurs de courant respecte ces exigences, et a vérifié l'efficacité de cette technique en comparant des mesures réelles. En matière d'électronique de puissance, il existe de nombreuses opportunités de mesurer la puissance à des fréquences élevées et avec des facteurs de puissance faibles<sup>3)</sup>, en-dehors des systèmes de commandes motorisées, et le déphasage peut être utilisé efficacement avec ces applications. Nous avons hâte de communiquer davantage d'informations utiles à ce sujet à nos lecteurs dans un avenir proche.

## References

- 1) Hayashi, K, "High-Precision Power Measurement of SiC Inverters," Bodo's Power Systems, September 2016, pp.42-47.
- 2) Yoda, H, et al. "Current Measurement Methods that Deliver High Precision Power Analysis in the Field of Power Electronics" Bodo's Power Systems, April 2016, pp.38-42.

3) Hayashi, K, "Measurement of Loss in High-Frequency Reactors," Bodo's Power Systems, February 2017, pp.18-22.

