

L'énergie verte :

Le système d'alimentation sans coupure (SASC) à double conversion en ligne à efficacité élevée Mitsubishi de la série 9900A

Dean Richards, B. Ing. (spécialisé), Ing., MIET

Mitsubishi Electric Power Products Inc. : Directeur des ventes et de l'ingénierie, Division des SASC, É.-U.*

Junichiro Onishi, B. Éc. (spécialisé)

Mitsubishi Electric Corporation : Directeur général adjoint, Service du marketing outre-mer, Japon**

Résumé : Le présent document technique expose la topologie, la conception et la technologie révolutionnaire des SASC Mitsubishi de la série 9900A et les avantages écologiques qu'ils offrent aux clients. Dans ce document, nous analysons la tendance de la technologie des SASC à double conversion, en plus d'effectuer une évaluation technique des topologies de convertisseur à deux niveaux par rapport à celles à trois niveaux et de fournir des détails sur les méthodes de commande et de communication connexes. Nous expliquons également la conception du module d'alimentation transistorisé à trois niveaux (MATTN) et des circuits intégrés utilisés dans les SASC de la série 9900A, et évaluons la fiabilité de la topologie des circuits à trois niveaux.

I. Introduction

Les systèmes d'alimentation sans coupure (SASC) représentent l'un des éléments clés de l'infrastructure fondamentale sur laquelle tous les secteurs commerciaux reposent aujourd'hui. Des différentes topologies de SASC actuellement offertes, les SASC à double conversion en ligne se démarquent comme étant la topologie privilégiée parce qu'ils présentent un risque réduit de perte de charge critique et, par conséquent, de pertes importantes pour les entreprises découlant des problèmes de qualité de l'alimentation. Les SASC à double conversion en ligne assurent à la charge critique l'alimentation conditionnée continue de la plus haute qualité et fiabilité. Toutefois, pour atténuer les risques de perte de la charge critique, il fallait toujours faire un compromis, de sorte que l'efficacité globale du système était inférieure à celle des SASC hors ligne ou de secours. Ce compromis était nécessaire en raison des pertes plus importantes dues à la commutation des dispositifs d'alimentation à semi-conducteurs dans les circuits à double conversion en ligne traditionnels.

Aujourd'hui, nous constatons de façon évidente le «virage vert» et «l'écologisation des centres de données». En effet, la réduction de la consommation d'énergie dans les installations critiques, grâce à une meilleure efficacité de l'énergie utilisée, et le coût de possession constituent désormais l'une des principales priorités dans le processus de prise de décisions concernant les besoins en matériel. De nos jours, non seulement faut-il un SASC en ligne hautement fiable et de grande qualité qui s'intègre en toute transparence à l'infrastructure d'alimentation générale, mais il doit également être compact et léger, en plus d'offrir une efficacité opérationnelle élevée dans tout le spectre de charge. Pour répondre à ces exigences, Mitsubishi a mis au point le SASC de la série 9900A, notre SASC le plus efficace et le plus innovateur jamais conçu.

Nous allons maintenant discuter du SASC Mitsubishi de la série 9900A et de sa technologie révolutionnaire offrant des avantages écologiques aux clients – l'énergie verte.

II. Nouvelle tendance dans la technologie des SASC

Une analyse des tendances dans l'évolution technologique des dispositifs d'alimentation à semi-conducteurs et du nouveau besoin de fréquences de commutation plus élevées dans des applications électroniques d'alimentation, comme les SASC, démontre que le transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) est le dispositif d'alimentation le plus perfectionné procurant aux SASC une fiabilité et un rendement supérieurs. En 1992, Mitsubishi Electric a innové en utilisant des transistors IGBT dans les sections de l'onduleur et du convertisseur de ses SASC. Aujourd'hui, les transistors IGBT sont couramment employés dans les sections de l'onduleur des SASC où il est important d'obtenir une commande instantanée et une commutation en circuit/hors circuit du dispositif. [Il est important de souligner que l'utilisation d'un transistor IGBT est essentielle pour bénéficier des avantages de commutation qu'offre ce dispositif, mais c'est la façon dont le dispositif est commandé qui permet d'obtenir des spécifications et un rendement optimaux.] Dans la section du convertisseur d'un SASC, il est possible d'opter pour une variété de configurations : uniquement des transistors IGBT, une utilisation combinée de transistors IGBT et de diodes, ou un redresseur commandé au silicium (appelé aussi thyristor). En règle générale, c'est la puissance en kVA du module du SASC qui détermine le choix de la topologie de convertisseur; un SASC plus gros est plus susceptible d'utiliser des transistors IGBT et des diodes (pour une plus grande efficacité) ou des redresseurs commandés au silicium.

Dans les SASC de plus grande capacité, la tension triphasée est généralement de 480 V (plutôt que de 208 V), en conformité avec la tension de distribution nationale qui a été conçue à l'origine pour réduire les coûts et améliorer l'efficacité de la distribution en raison des pertes dues aux câbles. La tendance à l'écologisation a pour effet de stimuler l'intérêt à l'égard de la construction de gros centres de données suivant la méthode de la conception-construction, alimentés par un système de distribution de 575 V/600 V dans le but d'accroître les réductions de coût et l'efficacité. On étudie également l'utilisation d'un système de distribution à tension moyenne dans de grands centres de données, et même si à l'heure actuelle il

n'existe pas de SASC en ligne dans cette plage de tension (il existe certains systèmes à tension moyenne de type interactif), il s'agit d'un point de discussion intéressant qui nous amène à parler de la topologie de l'onduleur et du convertisseur à trois niveaux du SASC de la série 9900A.

Fidèle à sa réputation sur le plan des innovations technologiques, Mitsubishi Electric lance des SASC reposant sur un onduleur et un inverseur à trois niveaux.

III. Topologie du circuit

La figure 1 représente le schéma unifilaire décrivant la séquence des opérations d'un SASC à double conversion en ligne à efficacité élevée de la série 9900A. Le circuit principal ne comporte aucun transformateur et possède des sections d'onduleur et de convertisseur à transistors IGBT à trois niveaux commandées par modulation d'impulsions en durée entièrement numérique, ainsi qu'un hacheur bidirectionnel à transistors IGBT.

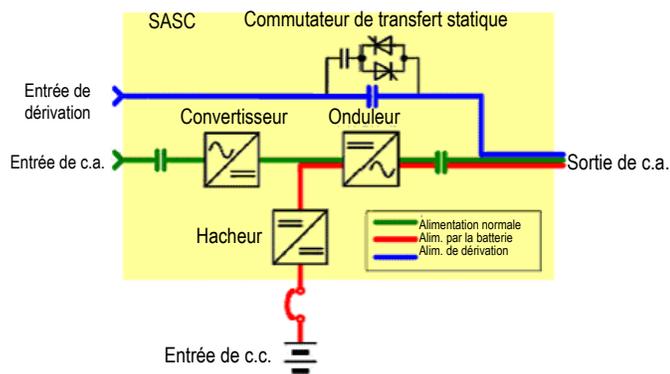
Figure 1. SASC de la série 9900A

Aperçu de la fiche technique :

- Capacité du module du SASC : 80, 100, 150 et 225 kVA
- Facteur de puissance de sortie : 0,9
- Entrée/sortie : triphasées, 3 fils, 480 V, 60 Hz
- Tension d'entrée de c.c. : 480 V (nominale)
- Système à module unique ou système à plusieurs modules (jusqu'à 4 modules de SASC en parallèle)



Schéma unifilaire



Remarque : Nous mettons actuellement au point des modules de SASC de la série 9900 de plus grande capacité. Nous envisageons la possibilité de concevoir des modèles de 480 V et de 575 V/600 V.

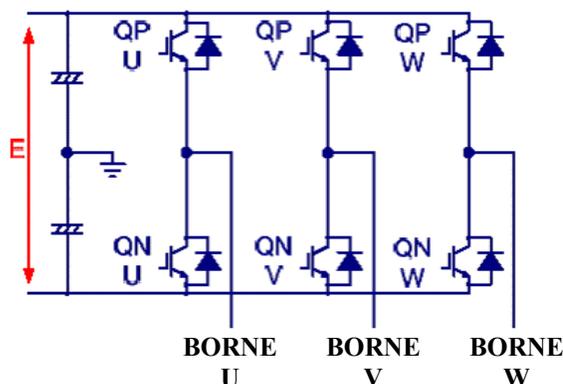
A. Topologie du convertisseur à trois niveaux

Dans des applications de conversion d'alimentation, comme les SASC, l'expression «double conversion» désigne le processus consistant à transformer ou à convertir la tension de c.a. d'entrée en une tension de c.c. à travers un redresseur ou ce que nous appelons la section du convertisseur (entrée) pour ensuite transformer ou convertir à nouveau cette tension de c.c. en une tension de c.a. à travers de ce que nous appelons la section de

l'onduleur (sortie). Dans le but de simplifier la description qui suit de la topologie du circuit à trois niveaux, nous utiliserons l'expression «topologie du convertisseur» pour désigner les circuits de conversion de l'alimentation, sauf indication contraire à cet effet.

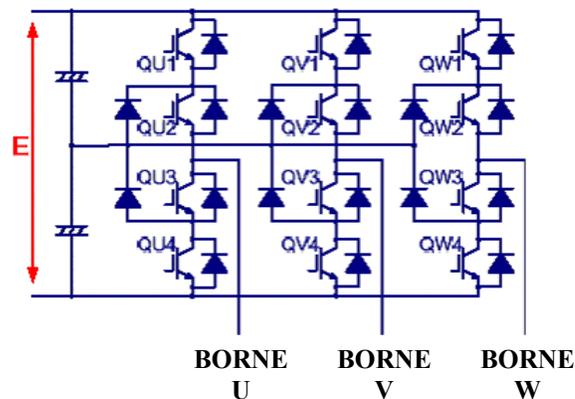
Dans le marché de la conversion d'alimentation de faible tension (jusqu'à 600 V), nous retrouvons presque exclusivement la topologie de convertisseur de tension de c.c. à deux niveaux. La figure 2 illustre la configuration du circuit d'un convertisseur à deux niveaux traditionnel.

Figure 2. Topologie du convertisseur à deux niveaux traditionnel



Par opposition, le marché de la conversion d'alimentation à tension moyenne offre une certaine variété, notamment des systèmes axés sur une topologie de convertisseur à trois niveaux. La figure 3 représente la configuration du circuit d'un convertisseur à trois niveaux.

Figure 3. Topologie du convertisseur à trois niveaux



Pour bien comprendre cette tendance, il est important de souligner qu'avec l'émergence des dispositifs d'alimentation à transistors IGBT pour répondre au besoin de fréquences de commutation plus élevées dans des applications électroniques d'alimentation, le désir de réduire considérablement les pertes dues à la commutation des semi-conducteurs et d'obtenir des filtres plus petits et plus légers a toujours été un facteur important. (Ce facteur explique à lui seul pourquoi bon nombre de SASC de grande capacité offerts actuellement dans le marché ne disposent pas de sections de convertisseur à transistors IGBT en raison des frais qui y sont associés et des pertes plus

importantes dues à la commutation, ce qui affecte l'efficacité générale du système, mais aussi parce que la commutation naturelle de la forme ondulatoire de la tension sinusoïdale d'entrée de c.a. permet de bloquer automatiquement le redresseur et les diodes à cause des caractéristiques de conduction inhérentes de ces dispositifs.) Par conséquent, les pertes dues à la commutation des transistors IGBT, ainsi que le poids et la dimension des filtres, ne représentent pas de nouveaux problèmes; cependant, compte tenu du fait que l'on exige maintenant des SASC en ligne plus compacts, moins lourds et plus efficaces, il est devenu évident qu'il fallait désormais se concentrer sur la recherche d'une solution à ces problèmes. En étudiant les applications d'alimentation importantes et les catégories de systèmes à tension plus élevée pour mieux définir l'évolution du marché de la conversion d'alimentation de tension moyenne, nous avons constaté que la solution technologique à ces problèmes consistait à mettre en application la topologie de convertisseur à trois niveaux dans les SASC.

Comme on peut le voir, le circuit du convertisseur à deux niveaux traditionnel comprend deux transistors IGBT d'alimentation dans chaque circuit de phase du convertisseur et dans les trajets du courant. Dans le cas d'un convertisseur à trois niveaux, le circuit comprend quatre transistors IGBT d'alimentation dans chaque circuit de phase du convertisseur et dans les trajets du courant. En ce qui concerne les SASC de 480 V, on utilise généralement dans un circuit à deux niveaux des transistors IGBT d'une tension nominale de 1 200 V pour la structure du convertisseur. Dans le cas d'un circuit à trois niveaux présentant la même tension nominale aux bornes, on utilise des transistors IGBT de 600 V.

B. Évaluation de la topologie à trois niveaux par rapport à celle à deux niveaux

Les pertes par conduction sont attribuables aux dispositifs à semi-conducteurs à l'état passant et dépendent du courant et de la tension de saturation. Les pertes dues à la commutation sont réparties entre les dispositifs à semi-conducteurs sollicités lors d'une commutation dès qu'il y a un changement d'état. Ces pertes dépendent de la tension, de l'intensité de courant, de la fréquence de commutation et de la température de jonction du dispositif. À première vue, on pourrait croire qu'en augmentant le nombre de transistors IGBT dans le circuit du convertisseur d'une topologie à trois niveaux, on pourrait observer davantage de pertes dues à la commutation. Par conséquent, tout indique que nous ne ferions qu'accentuer le problème que nous tentons de résoudre. Toutefois, lorsque nous poussons l'analyse un peu plus loin, nous constatons que c'est plutôt le contraire qui est vrai. Pour une tension de raccordement de c.c. donnée, les dispositifs d'alimentation d'un convertisseur à trois niveaux exigent la moitié de la tension de blocage comparativement à un convertisseur à deux niveaux, ce qui améliore les caractéristiques de commutation et de conduction à une intensité de courant donnée. En raison de cette tension plus faible appliquée aux semi-conducteurs d'alimentation, nous pouvons utiliser des diodes et des transistors IGBT présentant une plage de tension plus faible sans aucun compromis sur le plan du rendement et de la fiabilité. Par exemple, les transistors IGBT de 600 V présentent des tensions à l'état passant qui sont inférieures d'environ 10 % comparativement à celles d'un transistor IGBT de 1 200 V présentant la même technologie et la même intensité de courant nominale [V_{CE} dans le graphique 1]. De même, l'énergie perdue lors de la commutation d'un

transistor IGBT de 600 V présentant la même technologie et la même intensité de courant est divisée par 5 [$E_{passant}$ et $E_{bloqué}$ dans le graphique 1]. Cela signifie que la connexion en série de deux transistors IGBT de 600 V dans le trajet du courant du circuit de phase d'un convertisseur permettrait d'obtenir environ la moitié de la perte due à la commutation d'un transistor IGBT de 1 200 V tout en réduisant de plus de la moitié la perte par conduction.

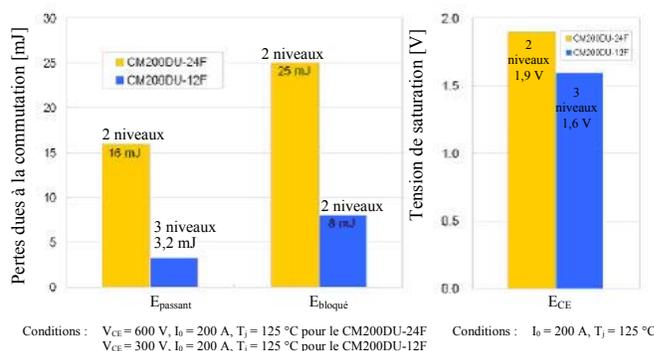
Le graphique 1 illustre l'évaluation des pertes dues à la commutation et des pertes par conduction de transistors IGBT d'une topologie de convertisseur. Nous avons comparé les deux transistors IGBT (2/3 niveaux) Mitsubishi de 1 200 V/600 V suivants :

Transistor IGBT Mitsubishi CM200DU-24F de 1 200 V (2 niveaux)

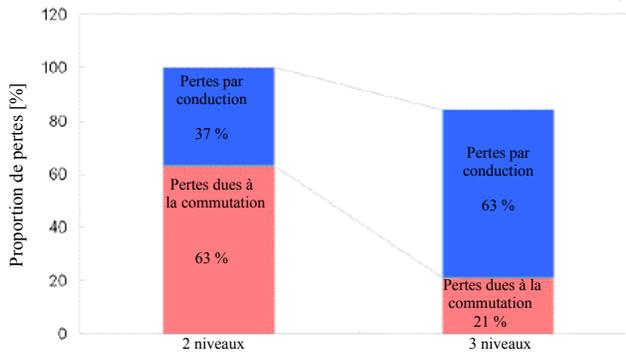
Transistor IGBT Mitsubishi CM200DU-12F de 600 V (3 niveaux)

Pour cette évaluation, nous présumons que la technique de modulation, la fréquence de commutation, la fréquence porteuse et la technologie des deux convertisseurs sont comparables. Le graphique 2 illustre les pertes par conduction approximatives et les pertes approximatives dues à la commutation d'un SASC. Malgré des pertes par conduction plus élevées (deux dispositifs dans le trajet du courant), nous pouvons constater que la topologie à trois niveaux présente dans l'ensemble des pertes dans les semi-conducteurs moins élevées comparativement à la topologie traditionnelle à deux niveaux. Par conséquent, la topologie à trois niveaux permet d'obtenir une amélioration globale de l'efficacité de la conversion d'énergie. Même si nous n'aborderons pas ce point en détail dans le présent document, le contrôle de la porteuse modulée et la fréquence de commutation du circuit du convertisseur influent également sur les pertes dues à la commutation. En règle générale, la fréquence de commutation est proportionnelle aux pertes qui y sont associées (un plus grand nombre de commutations peuvent être effectuées au cours d'une alternance). Par conséquent, nous pouvons affirmer que les pertes sont plus faibles dans les topologies de convertisseur à trois niveaux lorsque la fréquence de commutation augmente. La fréquence de commutation des circuits des convertisseurs des SASC 9900A s'établit à 7,2 kHz.

Graphique 1. Pertes par conduction et pertes dues à la commutation des transistors IGBT de 1 200 V/600 V



Graphique 2. Pertes totales dans les transistors IGBT d'un SASC (approx.)



C. Commande du convertisseur à modulation d'impulsions en durée

Grâce à la modulation d'impulsions en durée (MID), les dispositifs d'alimentation à semi-conducteurs d'un convertisseur agissent comme une série de commutateurs qui passent à l'état passant et à l'état bloqué à plusieurs reprises au cours de chaque alternance de tension. Par conséquent, la tension de sortie est contrôlée en faisant varier la largeur des impulsions et la durée de conduction de chacun des dispositifs. Les explications qui suivent sur la MID et les détails du circuit sont axées sur la transformation de la forme d'onde de la tension de sortie d'un SASC après conversion de la tension de raccordement de c.c. et concernent spécifiquement la section de l'onduleur du SASC. Les signaux de gâchette des dispositifs d'alimentation sont déterminés par le circuit de commande à MID, lequel compare la forme d'onde d'un signal de référence à une forme d'onde porteuse et produit une commutation du dispositif à travers une matrice prédéfinie programmable par l'utilisateur (FPGA) spécifique à la demande de charge et aux signaux du système de commande en boucle fermée. Un SASC doit maintenir la régulation de la tension de sortie sinusoïdale dans toutes les conditions de charge transitoire et de régime permanent. Par conséquent, le rendement dynamique d'un SASC dépend en grande partie des systèmes de commande appliqués. Le système de commande du convertisseur à trois niveaux à MID du SASC 9900A fait appel à un système de commande numérique directe (DDC) avec boucle d'asservissement du courant et boucle de commande de tension par phase qui offre non seulement un contrôle instantané de la distorsion et de la tension de sortie, mais qui procure également une protection inhérente contre les surintensités en raison du limiteur pour la boucle d'asservissement du courant. De plus, nous obtenons un contrôle simple et fiable du fonctionnement en parallèle des onduleurs, ainsi qu'une synchronisation et un partage instantanés du courant de charge (nous abordons l'utilisation en parallèle du SASC à la section VI intitulée «Avantages du SASC de la série 9900A pour les clients»).

Le système de commande fait appel à un processeur de signal numérique (DSP) qui contrôle la régulation de tension des circuits de conversion d'alimentation du convertisseur, de l'onduleur et du hacheur bidirectionnel et, par conséquent, commande le SASC. Dans le cas du SASC 9900A, la fréquence d'échantillonnage du DSP s'établit à 57,6 kHz, ce qui signifie que le système de commande effectue un échantillonnage 960 fois au cours d'une période de la tension de sortie. Ainsi, la tension de sortie par phase est contrôlée avec une grande

précision. L'Annexe 1 présente les résultats d'un essai type concernant la réponse transitoire et la régulation de tension d'un module de SASC 9900A de 225 kVA lorsque 100 % de la charge est appliquée au système ou est fournie par ce dernier. Cet essai a été réalisé sans que la batterie soit reliée au module du SASC et confirme que l'utilisation d'un transistor IGBT est important si l'on désire bénéficier des avantages qu'offre ce dispositif sur le plan de la commutation. Mais la façon dont il est commandé joue un rôle clé dans l'obtention de caractéristiques techniques optimales et d'un rendement maximum du SASC.

Par conséquent, le mode de commutation et de conversion des transistors IGBT permet la synthèse de la forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur.

La figure 4 représente la synthèse de la forme d'onde du circuit d'un convertisseur à deux niveaux traditionnel. La tension de sortie à chacune des bornes varie entre deux niveaux : $+E/2$ volts et $-E/2$ volts. Cette variation de tension (dv/dt) à la borne est par conséquent égale à E volts. La tension ligne à ligne (par exemple les bornes U et V) présente trois niveaux de tension ($+E$, 0 et $-E$ volts) et offre quatre modes possibles de commutation, comme indiqué dans le tableau 1. La figure 5 illustre le train d'impulsions à durée variable (tension ligne à ligne) d'un convertisseur à deux niveaux traditionnel. Comme nous l'avons mentionné, la description de ce convertisseur représente la conversion de la tension de sortie du système. Par conséquent, il faut utiliser des circuits de filtrage de sortie de plus grande capacité pour supprimer les composantes à haute fréquence et obtenir une forme d'onde uniforme de la tension de sortie sinusoïdale à partir du train d'impulsions. [Il est important de prendre note que tous les SASC ont besoin de circuits de filtrage de sortie pour créer une forme d'onde de tension sinusoïdale uniforme.]

Figure 4. Synthèse de la forme d'onde d'un convertisseur à deux niveaux

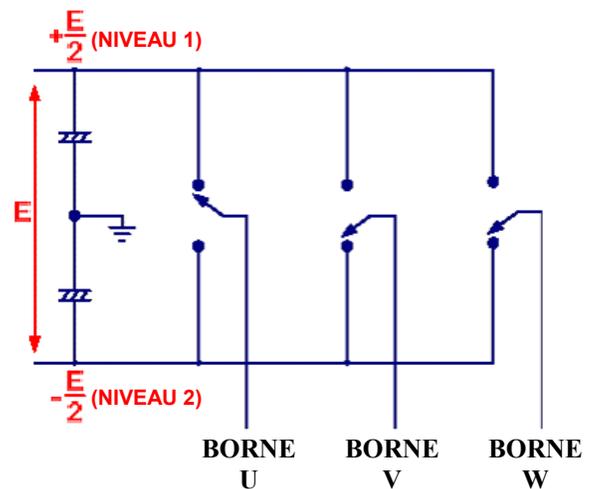
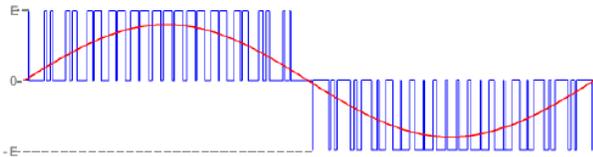


Tableau 1. Modes de commutation d'un convertisseur à deux niveaux

Borne U	Borne V	Tension ligne à ligne (U - V)
$+\frac{E}{2}$	$+\frac{E}{2}$	0
$+\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	+ E
$-\frac{E}{2}$	$+\frac{E}{2}$	- E
$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	0

Figure 5. Train d'impulsions à durée variable d'un convertisseur à deux niveaux



La figure 6 illustre la synthèse de la forme d'onde obtenue à l'aide d'un convertisseur à trois niveaux. Nous supposons que la tension de sortie à chaque borne présente l'un des trois niveaux suivants : $+E/2$ volts, 0 et $-E/2$ volts. La variation de tension (dv/dt) à la borne est par conséquent égale à $E/2$ volts. En raison de ce niveau supplémentaire de tension, le nombre de modes de commutation augmente. La tension ligne à ligne (par exemple les bornes U et V) présente cinq niveaux de tension ($+E$, $+E/2$, 0, $-E/2$ et $-E$ volts) et offre neuf modes possibles de commutation, comme illustré dans le tableau 2. La figure 7 illustre le train d'impulsions à durée variable (tension ligne à ligne) d'un onduleur à trois niveaux. Il faut utiliser des circuits de filtrage plus petits pour obtenir une forme d'onde de tension de sortie sinusoïdale à partir du train d'impulsions.

Figure 6. Synthèse de la forme d'onde d'un convertisseur à trois niveaux

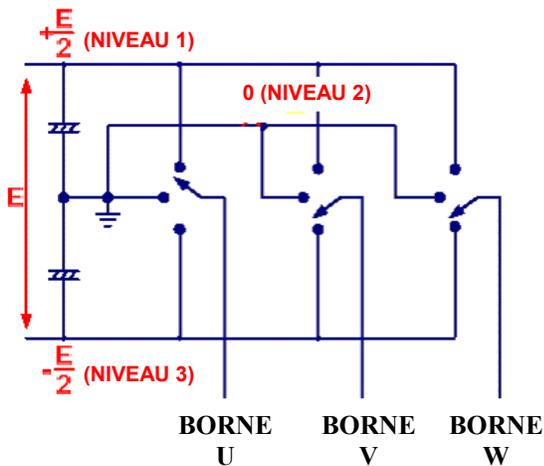
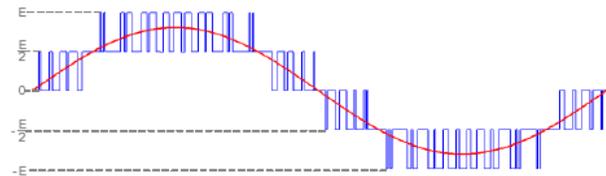


Tableau 2. Modes de commutation d'un convertisseur à trois niveaux

Borne U	Borne V	Tension ligne à ligne (U - V)
$+\frac{E}{2}$	$+\frac{E}{2}$	0
$+\frac{E}{2}$	0	$+\frac{E}{2}$
$+\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	E
0	$+\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$
0	0	0
0	$-\frac{E}{2}$	$+\frac{E}{2}$
$-\frac{E}{2}$	$+\frac{E}{2}$	- E
$-\frac{E}{2}$	0	$-\frac{E}{2}$
$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{2}$	0

Figure 7. Train d'impulsions à durée variable d'un convertisseur à trois niveaux



Nous constatons que le train d'impulsions à durée variable de sortie d'un convertisseur à trois niveaux suit beaucoup plus la forme d'onde sinusoïdale comparativement à la topologie du circuit d'un convertisseur à deux niveaux traditionnel. Cette synthèse améliorée de la forme d'onde se traduit par une réduction substantielle du bruit (bruit acoustique et interférences électromagnétiques) en raison de la variation de tension $E/2$ (dv/dt), et nécessite également un circuit de filtrage plus petit pour obtenir la forme d'onde de tension de sortie sinusoïdale uniforme qu'exige un SASC.

D. Composants passifs

Les composants passifs, comme les filtres, ont une influence considérable sur le poids, le coût et les pertes des convertisseurs d'alimentation. Dans le cas d'un convertisseur à trois niveaux, nous pouvons observer des réductions liées au c.a., c.c., dv/dt et aux filtres de mode commun. Dans la suite des explications concernant la synthèse de la forme d'onde et de contrôle par MID, nous aborderons uniquement les filtres de c.a.

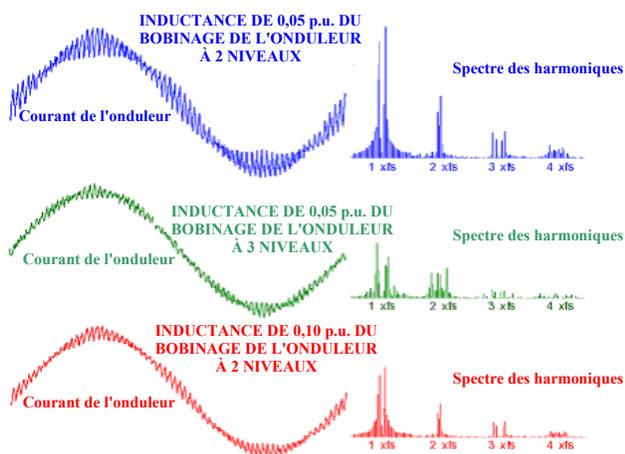
La tension aux bornes du convertisseur à trois niveaux renferme beaucoup moins de hautes fréquences en raison de la conception à trois niveaux, et la tension de commutation efficace est environ 50 % de celle d'un convertisseur à deux niveaux ($E/2$ par rapport à la variation de tension E (dv/dt)). Par conséquent, les harmoniques de courant qui en résultent sont réduites dans une même proportion. Étant donné que les pertes de hautes fréquences sont proportionnelles au carré de composante de

hautes fréquences du courant, l'utilisation d'un convertisseur à trois niveaux à une inductance donnée permettra d'obtenir des pertes beaucoup plus faibles. Par ailleurs, il est possible d'utiliser un filtre de c.a dont l'inductance est plus faible dans une topologie à trois niveaux pour respecter des spécifications données au chapitre de la tension et des harmoniques de courant. La figure 8 illustre la comparaison entre des topologies de circuit de convertisseur avec différentes valeurs (inductance) du bobinage de filtrage. Les résultats simulés démontrent l'intensité de courant de l'onduleur et le spectre des harmoniques qui y est associé à une fréquence de commutation établie (FS) pour les configurations suivantes :

- Onduleur à deux niveaux avec bobine de filtrage de 0,05 p.u.
- Onduleur à trois niveaux avec bobine de filtrage de 0,05 p.u.
- Onduleur à deux niveaux avec bobine de filtrage de 0,10 p.u.

Pour obtenir l'ondulation de courant et le spectre des harmoniques d'un convertisseur à trois niveaux, un convertisseur à deux niveaux exige l'utilisation d'une bobine plus importante dans le circuit de filtrage. Par conséquent, la topologie du convertisseur à trois niveaux est beaucoup plus compacte et légère, et présente des pertes moins importantes comparativement aux configurations traditionnelles à deux niveaux.

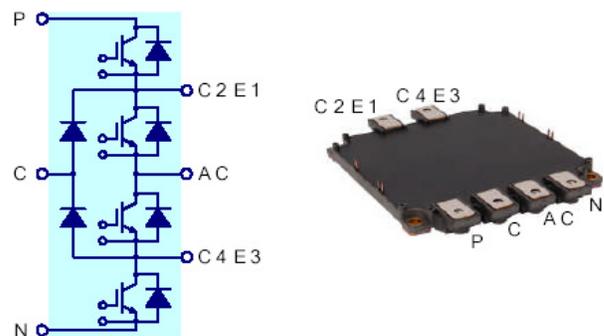
Figure 8. Comparaison des bobinages de filtrage



IV. Module d'alimentation transistorisé à trois niveaux (MATTN)

En plus des avantages démontrés de la topologie du convertisseur à trois niveaux, un volume de production élevé justifie l'intégration de circuits complets de convertisseur dans l'un des modules d'alimentation à semi-conducteurs. Cette optimisation permet d'obtenir une conception compacte, ainsi qu'une amélioration des contraintes, du bruit et des pertes du composant. La figure 9 représente un module d'alimentation transistorisé à trois niveaux (MATTN) et la configuration de son circuit, conçu et utilisé pour les SASC de la série 9900A.

Figure 9. Module d'alimentation transistorisé à trois niveaux (MATTN)



Dans le MATTN, on utilise le transistor IGBT le plus perfectionné pour former un circuit intégré du convertisseur offrant une plus grande efficacité en réduisant les pertes de puissance des semi-conducteurs, en améliorant la fiabilité grâce à des caractéristiques thermiques et électriques supérieures et en atténuant le bruit électromagnétique.

V. Évaluation de la fiabilité

Le convertisseur à trois niveaux comporte un nombre plus élevé de pièces, ce qui pourrait donner lieu à un compromis au chapitre de la fiabilité. Toutefois, une analyse plus approfondie révèle qu'il existe d'autres effets qui compensent la perte de fiabilité associée au nombre de pièces. Le MATTN améliore la fiabilité en raison de son circuit intégré de convertisseur et des avantages qui en découlent, mais exige l'utilisation inévitable de composants supplémentaires, notamment des portes, des câbles et des capteurs. Lorsque nous analysons les défaillances des composants électroniques d'alimentation, le taux de défaillances des semi-conducteurs IGBT est très faible comparativement à d'autres composants du système. En effet, ce sont les câbles, les circuits de commande et les ventilateurs qui sont les principales sources de défaillances. Cependant, toutes les causes de défaillances sont ou peuvent être influencées de façon positive par de bons choix effectués au moment de la conception. Plus particulièrement, les pertes plus faibles qu'offre le convertisseur à trois niveaux peuvent permettre d'abaisser la température ambiante des portes de telle sorte que le nombre de défaillances est statistiquement égal à celui d'un convertisseur à deux niveaux malgré le fait qu'on ait doublé le nombre d'unités. De même, la durée de vie utile d'un condensateur peut être augmentée en diminuant le courant ondulateur. La dimension et le nombre de ventilateurs de refroidissement, composant qui peut représenter une proportion importante du nombre total de défaillances d'un système, peuvent être réduits, plus particulièrement dans les applications comportant un convertisseur à hautes fréquences. [Il est important de souligner qu'en ajoutant des configurations de ventilateur redondantes dans un SASC (exigence typique dans les spécifications), on compromet la fiabilité. De plus, le débit d'air normal de refroidissement peut être modifié lors d'une défaillance d'un ventilateur; par conséquent, il peut être nécessaire également de prévoir des circuits d'amortissement mécanique. D'un point de vue conceptuel, le choix d'un ventilateur de grande qualité, présentant une longue durée de vie utile, représente une solution beaucoup plus fiable pour refroidir des sections individuelles de convertisseur.] Évidemment, l'évaluation complète de la fiabilité est différente dans chaque cas; cependant, un convertisseur à trois niveaux n'est pas automatiquement inférieur

à un convertisseur à deux niveaux lorsqu'il est question de la fiabilité globale d'un système.

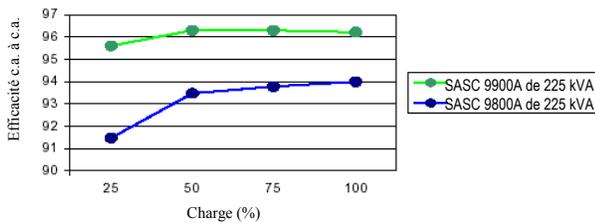
VI. Avantages du SASC de la série 9900A pour les clients

La discussion qui suit porte sur les caractéristiques et les avantages supérieurs que présente le SASC de la série 9900A. Aux fins d'évaluation, nous comparons le SASC Mitsubishi de la série 9800A avec ce module de SASC faisant appel à la topologie de convertisseur à deux niveaux et à un transformateur à isolation de sortie.

A. Efficacité

Le graphique 3 illustre l'efficacité type de c.a. à c.a. des modèles de SASC Mitsubishi 9900A et 9800A de 225 kVA.

Graphique 3. Efficacité des modules de SASC de 225 kVA



Nous constatons que le module de SASC 9800A, doté d'un dispositif hybride diode/transistor IGBT pour une plus grande efficacité (en raison d'une perte plus faible due à la commutation), procure une efficacité pouvant atteindre 94 %, laquelle chute à 91,5 % à une charge plus faible. Cette efficacité est déjà l'une des meilleures dans l'industrie pour des SASC, plus particulièrement dans le cas des modèles plus puissants offerts dans cette gamme (modules de SASC pouvant atteindre 750 kVA et fonctionner en parallèle). Cependant, nous constatons également que le module de SASC 9900A présente une efficacité de beaucoup supérieure avec un taux de 96,3 %, laquelle chute à seulement 95,6 % à une charge plus faible. Il s'agit d'un point important dont il faut tenir compte puisqu'en règle générale, une charge variant entre 30 % et 50 % seulement est appliquée aux modules de SASC, surtout dans les applications redondantes parallèles. Par conséquent, l'efficacité à une charge moindre revêt une plus grande importance pour les utilisateurs, puisqu'elle permet de calculer de façon réaliste les pertes totales et le coût de possession.

De façon typique, les courbes d'efficacité affichent une baisse à une charge plus faible en raison des pertes constantes associées au transformateur et aux bobinages de filtrage, et des pertes variables découlant des dispositifs d'alimentation à semi-conducteurs. Les pertes dues aux semi-conducteurs sont reliées à l'amplitude du courant de charge par rapport à l'intensité nominale du dispositif et à l'influence exercée par la fréquence de commutation. Les pertes par conduction ou attribuables à l'état passant diminuent plus rapidement (dépendance quadratique) que les pertes dues à la commutation (dépendance linéaire) lorsque l'intensité de courant du dispositif diminue. Dans le cas du SASC de la série 9900, les pertes dues au noyau de fer des bobinages de c.a. sont faibles en comparaison et les pertes dues à la commutation des transistors IGBT sont considérablement réduites, ce qui permet d'obtenir une courbe d'efficacité plus plane.

En résumé, l'efficacité du SASC de la série 9900A repose sur l'utilisation d'une conception sans transformateur et d'une topologie de convertisseur à trois niveaux afin de réduire les pertes attribuables au bobinage de filtrage et l'ensemble des pertes attribuables aux semi-conducteurs. Cette conception permet aux clients de réaliser d'importantes économies au chapitre du fonctionnement d'un SASC, mais il est important également de tenir compte des économies découlant d'une réduction de la capacité de refroidissement nécessaire (en étant plus efficaces, les modules de SASC dégagent moins de chaleur, ce qui réduit les besoins en climatisation). En conclusion, le SASC de la série 9900A joue un rôle important au chapitre de l'«efficacité» dans le coût de possession d'un centre de données.

B. Encombrement et poids

Le tableau 3 présente les dimensions et le poids des SASC Mitsubishi des séries 9800A et 9900A.

Nous constatons que les SASC de la série 9900A sont beaucoup plus légers et moins encombrants comparativement aux SASC de la série 9800A. Le poids plus léger et l'encombrement plus faible des SASC de la série 9900A ont été obtenus en utilisant une conception sans transformateur et une topologie de convertisseur à trois niveaux compacte (circuit intégré comportant un MATTN personnalisé), laquelle exige des composants de filtrage plus petits et une capacité de refroidissement moins grande. Par conséquent, les SASC de la série 9900A occupent moins de place dans un centre de données.

Tableau 3. Dimensions et poids

SASC de la série 9900A		
kVA	Dimensions LxPxH (cm / po)	Poids (kg / lb)
80	70,1 x 83,3 x 204,7 / 27,6 x 32,8 x 80,6	388 / 855
100	70,1 x 83,3 x 204,7 / 27,6 x 32,8 x 80,6	388 / 855
150	89,9 x 83,3 x 204,7 / 35,4 x 32,8 x 80,6	526 / 1 160
225	89,9 x 83,3 x 204,7 / 35,4 x 32,8 x 80,6	558 / 1 230
SASC de la série 9800A		
kVA	Dimensions LxPxH (cm / po)	Poids (kg / lb)
80	Sans objet	Sans objet
100	109,9 x 75,7 x 202,4 / 43,3 x 29,8 x 79,7	934 / 2 060
150	119,8 x 75,7 x 202,4 / 47,2 x 29,8 x 79,7	1 170 / 2 580
225	139,9 x 75,7 x 202,4 / 55,1 x 29,8 x 79,7	1 478 / 3 260

C. Intégration complète des transistors IGBT

On utilise des transistors IGBT d'alimentation dans les sections de l'onduleur et du convertisseur du module de SASC 9900A. Jumelés à des systèmes de commande numérique directe, ils offrent des avantages supérieurs aux niveaux de l'entrée et de la sortie des SASC.

Entrée du SASC

Avec une section de convertisseur (redresseur) à transistors IGBT, on obtient un faible taux de distorsion harmonique du courant d'entrée sans circuits de filtrage supplémentaires. De façon typique, le taux de distorsion harmonique du courant d'entrée est de 3 % à 100 % de la charge, et de 5 % à 50 % de la charge. Autre avantage d'une section à transistors IGBT, il est

possible de contrôler le facteur de puissance d'entrée par unité. Ces deux avantages procurent d'excellentes caractéristiques sur le plan de la compatibilité des générateurs : il n'est pas nécessaire d'opter pour un générateur surdimensionné pour compenser la composante harmonique élevée, et il n'y aura aucun problème au niveau du courant d'excitation parce qu'on prévient tout facteur de puissance capacitif lorsque la charge est faible. Bon nombre de SASC dotés de circuits de filtrage d'entrée pour abaisser le taux de distorsion harmonique du courant d'entrée à un niveau acceptable comportent des contacteurs qui éliminent l'élément capacitif du circuit de filtrage au-dessous d'une charge donnée. Cette conception règle tous les problèmes de compatibilité des générateurs reliés au facteur de puissance capacitif, mais elle pourrait à plus long terme occasionner des problèmes ayant des répercussions sur la durée de vie utile du générateur. Nous n'aborderons pas dans le présent document les questions concernant la présence d'une composante harmonique élevée et de courants inverses significatifs. Par ailleurs, les considérations relatives à la résonance entre le générateur et les filtres d'entrée du SASC sont négligeables, ce qui représente un autre avantage des SASC dont la conception repose sur des transistors IGBT.

Ainsi, le SASC de la série 9900A permet de gagner de l'espace parce qu'il n'exige pas de circuits de filtrage supplémentaires pour les harmoniques d'entrée et qu'il utilise également un générateur plus petit. Cette conception a pour effet de rehausser le caractère écologique du système puisqu'on obtient une infrastructure d'alimentation plus petite.

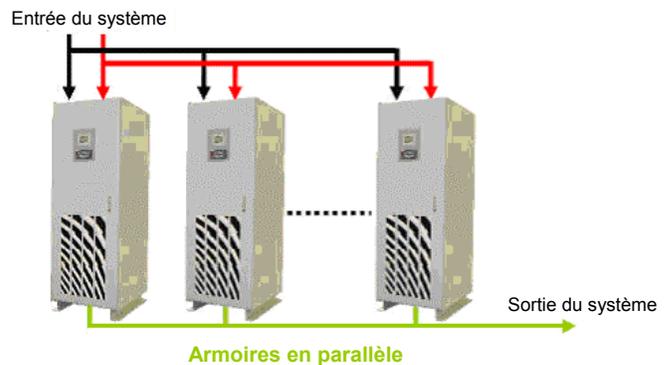
Sortie du SASC

Avec une section d'onduleur à transistors IGBT et des méthodes de commande numérique directe, la forme d'onde de la tension de sortie par phase peut être contrôlée instantanément avec grande précision. Cette réponse rapide de l'onduleur permet d'obtenir un rendement et des caractéristiques de sortie d'excellente qualité. Bien qu'il ne soit pas typique d'observer des variations de charge de 100 % dans les SASC (on voit couramment des variations de charge de 50 % dans des applications à plusieurs modules redondants parallèles), il est utile d'évaluer la sortie et la technologie de commande d'un SASC. Dans le cas d'un module de SASC 9900A, la fluctuation de la tension transitoire à une variation de charge de 100 % (sans batterie branchée) est $<2\%$. L'Annexe 1 présente les résultats types obtenus lors d'essais.

D. Système à plusieurs modules de SASC

Le SASC 9900A peut être utilisé dans des applications de systèmes à module unique ou de système à plusieurs modules pour répondre à toutes les exigences en matière de configuration. Il est possible de brancher en parallèle jusqu'à quatre modules de SASC de puissance (kVA) similaire pour créer un système redondant ou accroître la capacité d'un système. La figure 10 illustre un système à plusieurs modules de SASC Mitsubishi.

Figure 10. Système à plusieurs modules de SASC



Les systèmes à plusieurs modules de SASC Mitsubishi présentent une conception, une configuration et une approche différentes comparativement aux SASC statiques parallèles. Au lieu d'utiliser un circuit de commutation statique de dérivation commun et une armoire de commande du système, chaque module de SASC d'un système en parallèle possède son propre circuit de commutation statique de dérivation interne et son système de commande, en plus de ses propres circuits de commande parallèles internes. Les modules de SASC communiquent à l'aide d'une technologie de contrôle de courant inverse sans capteur pour assurer le bon fonctionnement, le partage de la charge et la synchronisation du système. Une armoire branchée en parallèle est utilisée pour relier ensemble toutes les sorties des SASC. On obtient ainsi des SASC parallèles procurant une redondance complète du système (y compris un circuit de dérivation), une grande fiabilité et une souplesse totale. Il est possible d'ajouter facilement des modules de SASC pour créer ou grossir des systèmes à plusieurs modules, ou même d'en enlever pour les utiliser dans des applications à module unique lorsque la demande de charge le permet.

VIII. Conclusion

Nous avons étudié la conception sans transformateur et la topologie de convertisseur à transistors IGBT à trois niveaux des SASC de la série 9900A pour expliquer les avantages que présentent ces systèmes pour les clients du point de vue écologique. Nous avons démontré que les SASC de la série 9900A répondent effectivement à la tendance actuelle du marché qui exige des SASC en ligne présentant une qualité, une fiabilité et une technologie supérieures qui peuvent s'intégrer en toute transparence à l'infrastructure d'alimentation globale d'une installation, tout en étant compacts et légers, et offrant une grande efficacité opérationnelle dans tout le spectre de la charge. Les SASC de la série 9900A répondent aux besoins fondamentaux des infrastructures modernes. En raison de la demande sans cesse croissante, le coût total de possession des centres de données est comprimé. Par conséquent, l'efficacité devient un aspect important à prendre en considération en vue d'obtenir un fonctionnement plus économique et un rendement plus rapide des investissements. Même si elles sont généralement éclipsées par les économies sur le plan financier, la durabilité et l'incidence environnementale devraient également être des facteurs prédominants dans le choix d'équipements d'infrastructures, lesquels doivent être conçus pour réduire l'utilisation de matières premières. Le présent

document «L'énergie verte» traite des besoins actuels du marché et propose un SASC pour répondre à ce besoin.

[Remarque des auteurs : Cinq brevets internationaux ont été demandés pour le SASC de la série 9900A.]

Auteurs :

***Dean Richards** a obtenu un baccalauréat spécialisé en génie électrique et électronique de l'Université Swansea, du Royaume-Uni en 1995. Il débute sa carrière avec la British Steel Plc. en 1988 comme apprenti électricien. Il est promu ingénieur électricien avant de se joindre à la Mitsubishi Electric Corporation en 1997. Jusqu'en 2001, M. Richards travaille comme ingénieur électricien au service des appareils électroniques d'alimentation et des SASC de Mitsubishi à Kobe, au Japon. Jusqu'en 2006, il occupe différents postes dans les services du génie et du marketing du siège social de Mitsubishi à Tokyo. M. Richards s'est joint à Mitsubishi Electric Power Products Inc. en 2006. Il assume actuellement les fonctions de Directeur des ventes et de l'ingénierie de la division des SASC de Warrendale, en Pennsylvanie.

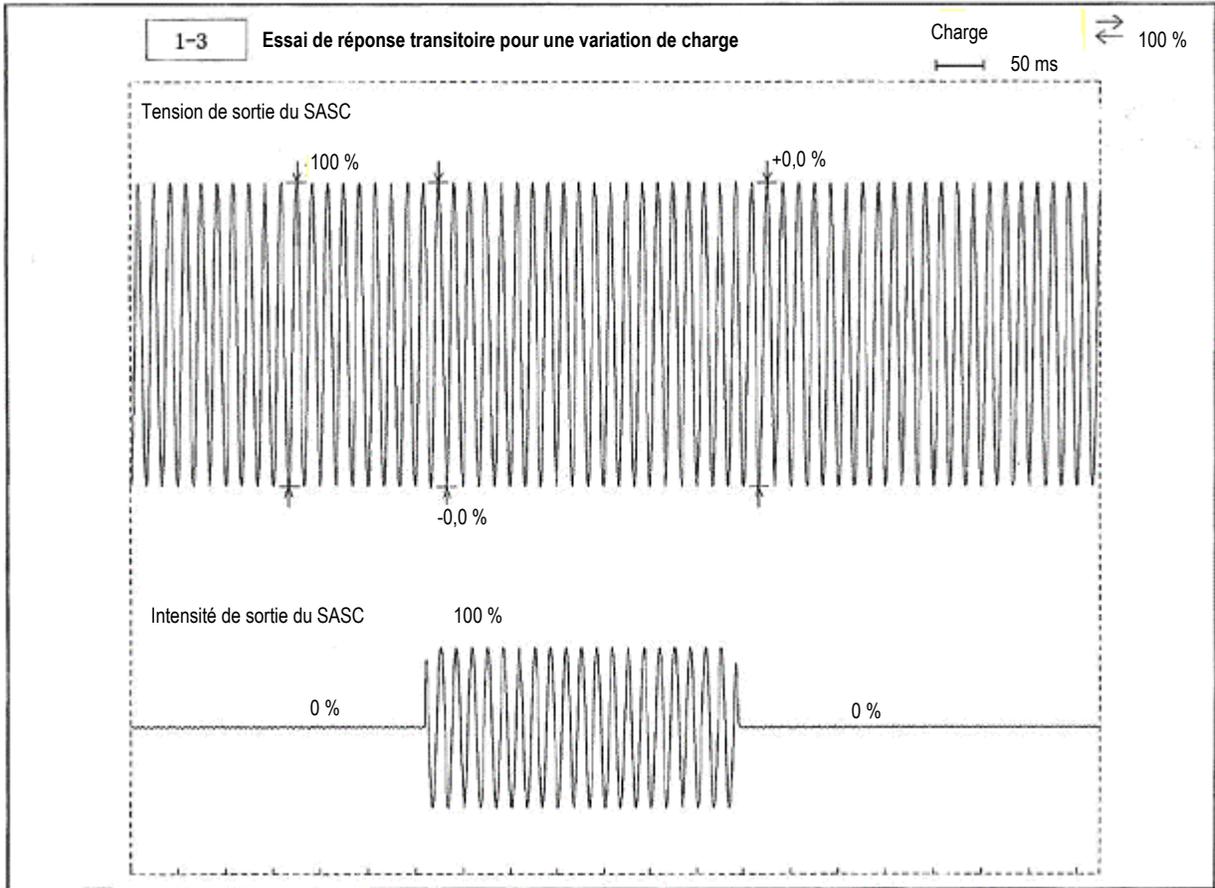
****Junichiro Onishi** a obtenu un baccalauréat spécialisé en économie de l'Université CHUO du Japon en 1985. Après s'être joint à la Mitsubishi Electric Corporation en 1986, il travaille initialement à Kobe pour ensuite occuper différents postes tout au long de sa carrière. Il assume actuellement les fonctions de Directeur général adjoint, Service du marketing outre-mer pour le Groupe des services publics au siège social de Mitsubishi à Tokyo.

Références :

1. ALQ-C10085 : Mitsubishi UPS Inverter Control, auteur : Dean Richards.
2. ALN-H0824 : Mitsubishi IGBT, auteurs : Dean Richards, Takahiro Kawahara.
3. ALQ-C10094 : 9800A UPS Converter, auteur : Dean Richards.
4. Comparison of Three-Level Converters versus Two Level Converters for Low Voltage Drives, auteurs : Ralph Teichmann, Steffen Bernet.
5. IGBT Data Sheets : CM200DU24F, CM200DU12F, documents disponibles à l'adresse www.mitsubishichips.com.
6. A survey of the Reliability with an analysis of faults on variable frequency drives, auteurs : O. Thorsen, M. Dalva.

ANNEXE 1. Réponse transitoire de la tension de sortie du module de SASC 9900A de 225 kVA et régulation pour une variation de charge de 100 % (aucune batterie branchée)

(8 / 16)



Fiche technique du SASC Mitsubishi 9900A

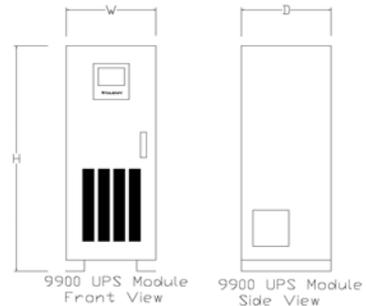
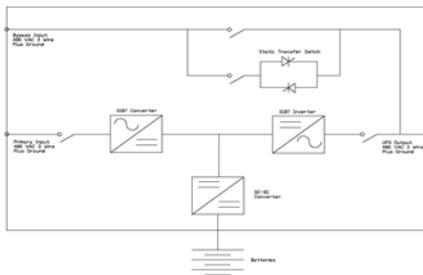
Nous, de Mitsubishi Electric Power Products Inc., sommes conscients que dans le monde numérique ultra-rapide d'aujourd'hui, une seule seconde d'indisponibilité peut coûter des millions de dollars à votre entreprise. C'est pour cette raison que nous avons mis au point le système d'alimentation sans coupure (SASC) 9900A – notre SASC le plus innovateur.

Mitsubishi mise sur les technologies les plus perfectionnées afin que le 9900 procure à votre matériel la meilleure protection qui soit. Vous bénéficierez ainsi des avantages suivants :

- Une plus grande fiabilité
- Une efficacité optimale
- Une énergie verte

Le SASC 9900A est pourvu d'un redresseur et d'un onduleur à transistors bipolaires à porte isolée (IGBT) de quatrième génération, et fait appel à un système de commande numérique directe (DDC) par traitement numérique des signaux (DSP). Grâce à cette combinaison unique, le SASC 9900A représente le système le plus efficace dans l'industrie offrant une fiabilité sans pareille.

kVA	Tension	Tension	Facteur de puissance de sortie	Dimensions (LXPXH)	kg / lb	Branchements en parallèle	Courant continu (c.c.)
80	480 V c.a.	480 V c.a.	0,9	70,1 cm x 83,3 cm x 204,7 cm (27,6 po x 32,5 po x 80,6 po)	400 / 882	Jusqu'à 4 modules	480 V c.c.
100	480 V c.a.	480 V c.a.	0,9	70,1 cm x 83,3 cm x 204,7 cm (27,6 po x 32,5 po x 80,6 po)	400 / 882	Jusqu'à 4 modules	480 V c.c.
150	480 V c.a.	480 V c.a.	0,9	90,4 cm x 83,3 cm x 204,7 cm (35,4 po x 32,5 po x 80,6 po)	519 / 1 146	Jusqu'à 4 modules	480 V c.c.
225	480 V c.a.	480 V c.a.	0,9	90,4 cm x 83,3 cm x 204,7 cm (35,4 po x 32,5 po x 80,6 po)	560 / 1 235	Jusqu'à 4 modules	480 V c.c.



Caractéristiques standard

- Convertisseur et onduleur entièrement numériques, dotés de transistors IGBT
- Homologué UL 1778
- Branchement en parallèle d'un maximum de quatre (4) modules
- SASC à accès frontal
- Faible encombrement et poids léger

Entrée de c.a.

- 480 V c.a., trois fils, 60 Hz
- Plage de tension de +15 %, -20 %
- Rapport du générateur de 1 à 1
- Taux de distorsion harmonique <3 % sans filtre d'entrée
- Résistance aux surtensions : répond aux normes IEEE 587 et ANSI C62.41-1991
- Facteur de puissance : 0,99

Mitsubishi Electric Power Products Inc.
530 Keystone Drive
Warrendale, PA 15086
Téléphone : 724-772-2555

Environnement

- Température de fonctionnement : de 0 à 40 °C
- Faible bruit acoustique : 70 dBA à un (1) mètre
- Humidité relative : entre 5 % et 95 % (sans condensation)
- Altitude : entre 0 et 2 255 m (7 400 pi)

Sortie de c.a.

- 480 V c.a., 3 fils, 60 Hz
- Facteur de puissance : de 0,9 à 1,0 à la puissance nominale
- Fréquence : 60 Hz +/- 0,01 %
- Précision de la tension : +/- 1 %
- Durée de rétablissement : 20 millisecondes
- Charge non équilibrée : +/- 2 %
- Variation de charge (100 %) : +/- 2 %
- Taux de distorsion harmonique de la tension : 2 % maximum à 100 % de la charge linéaire
- Surcharge : 125 % pendant 2 minutes, 150 % pendant 1 minute

Batterie

- Tension nominale de 480 V c.c.
- Batterie au plomb-acide à régulation par soupape (VRLA) ou pile liquide
- Ondulation inférieure à 2 %