

# Chargeur de condensateurs de forte puissance utilisant des IGCT dans un convertisseur Boost

Volker BROMMER, Oliver LIEBFRIED et Sigo SCHARNHOLZ

Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), France

**RESUMÉ - Un chargeur de condensateurs de forte puissance utilisant la topologie convertisseur Boost a été développé. Les composants clés de ce chargeur sont des commutateurs semi-conducteurs à forte puissance (IGCT), ainsi qu'une bobine de stockage inductif à densité d'énergie très élevée. Le présent article décrit le design et les investigations correspondants au chargeur en combinaison avec une source d'énergie de forte puissance, un volant d'inertie. Un condensateur de puissance d'une capacité de 900  $\mu$ F a été chargé à 4,8 kV en 100 ms, ce qui correspond à une puissance de charge de plus que 100 kW. Les essais ont démontré un comportement de commutation fiable et robuste. Dans une étape suivante, nous avons étudié et testé les contraintes sur le convertisseur pendant une durée de plusieurs secondes et avec une charge résistive. Avec une puissance d'entrée de plus de 250 kW, le système a été testé sur une durée de plusieurs secondes.**

*Mots-clés— Convertisseur de puissance DC/DC, convertisseur Boost, stockage d'énergie, alimentations impulsives de puissance, condensateurs de puissance, commutateurs semi-conducteurs à forte puissance*

## 1. INTRODUCTION

De nos jours, les bancs de condensateurs constituent les alimentations électriques les plus utilisées pour la génération de courants de forte puissance impulsionnelle. Ceux-ci sont utilisés dans une grande variété de domaines de l'électronique de puissance impulsionnelle, comme les générateurs à forts champs magnétiques ou les lanceurs électromagnétiques à rails [1, 2]. De tels bancs de condensateurs doivent être chargés en général par des chargeurs de condensateur de forte puissance, en général à quelques milliers ou quelques dizaines de milliers de volt. Dans la plupart des cas, une charge rapide est requise, surtout lorsqu'un banc de capacité est utilisé pour une application répétitive. En conséquence, des puissances de charge jusqu'au domaine du MW sont exigées, ce qui implique des systèmes complexes, volumineux et très coûteux.

Les chargeurs de condensateur disponibles dans le commerce sont réalisés comme chargeurs à courant constant, utilisant une topologie 'Full-Bridge' (Pont-H) combinée avec un transformateur de haute tension. De plus, les alimentations à découpage à haute fréquence combinées avec la technologie série-résonance [3] atteignent des rendements allant jusqu'à 90% et plus encore. Ces chargeurs sont très compacts dans le

domaine de quelques dizaines de kW. Lorsqu'une puissance plus importante est demandée, la solution communément utilisée aujourd'hui est la mise en parallèle des unités de charge modulaires [3, 4]. Cependant, dans le domaine des puissances de charge de l'ordre du MW, cette solution implique des systèmes complexes, volumineux et très coûteux. Pour ce qui est de la réduction de volume des chargeurs de forte puissance, des activités utilisant une topologie Pont-H en combinaison avec la commutation de haute fréquence ont été réalisées [5, 6]. Toutefois, l'augmentation de la puissance de charge est accompagnée par la croissance de la complexité des unités de transformation, de commutation, de contrôle et de protection, ce qui entraîne une décroissance du rendement total du système.

Dans le contexte d'un chargeur compact, nous avons exploré le concept d'un chargeur de condensateur sur la base d'une topologie Boost. Sur cette base, des condensateurs de puissance sont chargés à l'aide de courants impulsionnels dans le domaine du kiloampère. En utilisant une bobine de stockage inductive et des commutateurs de type IGCT, un chargeur très compact et à prix avantageux (au détriment d'un moindre rendement) a été réalisé.

Cet article décrit le design, le fonctionnement principal et le montage expérimental du système convertisseur nommé 'Buck-Boost', alimenté par une source de courant de puissance (système à volant d'inertie (MDS)). Les recherches se sont concentrées sur le comportement des composants pendant les procédures de charge rapide (et plus spécifiquement sur les commutateurs IGCT). De plus, dans le contexte d'une charge rapide d'un plus grand nombre de condensateur, les contraintes sur le convertisseur pour une durée de charge de plusieurs secondes ont été évaluées.

## 2. CONVERTISSEUR BUCK-BOOST AVEC DES IGCT

Le circuit électrique est basé sur le principe bien connu d'un convertisseur Boost, c'est-à-dire 'Buck-Boost' [7] (inverse output voltage) constitué d'une source de puissance  $G$ , d'un commutateur  $S_1$  semi-conducteur à forte puissance (IGCT), d'un stockage inductif intermédiaire  $L_s$ , d'une diode de blocage  $D_L$  et d'une capacité  $C_L$  représentant la charge (fig.1). La transmission d'énergie de la source de puissance au condensateur se fait en chargeant et en déchargeant le

stockage inductif (bobine  $L_S$ ) à l'aide d'un commutateur IGCT. Le cycle de charge-décharge de la bobine est déterminé par la fréquence de commutation de l'IGCT. Contrairement aux chargeurs à courant continu, un condensateur est chargé par des courants répétitifs avec des amplitudes de quelques kA. Il est à noter que cette technique ne peut être appliquée qu'aux condensateurs de forte puissance qui sont conçus pour des courants de ce type. Nous utilisons des composants qui peuvent résister à des courants pic de 100 kA et plus.

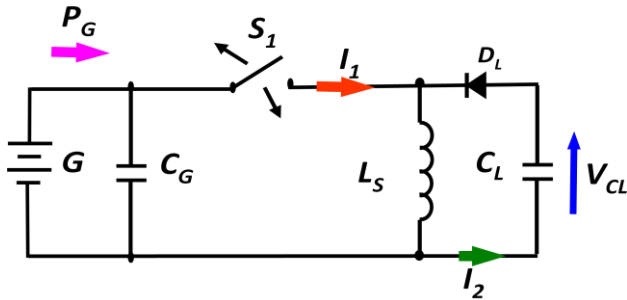


Fig.1 : Topologie du convertisseur Buck-Boost.

En mode opératoire,  $L_S$  est chargé par un courant provenant de la source de puissance  $G$  lorsque  $S_1$  est fermé. Le courant correspondant  $I_1$  peut être calculé comme suit :

$$I_1(t) = I_{10} e^{-(R/L_S)t} + \frac{V_G}{R} (1 - e^{-(R/L_S)t}) \quad \{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t \leq t_{ON}\} \quad (1)$$

avec la résistance  $R$  du circuit de charge, l'inductance  $L_S$  de la bobine de stockage inductif intermédiaire, la tension  $V_G$  du générateur  $G$  et le courant au moment  $t = 0$ . En négligeant la résistance du circuit l'équation (1) se simplifie comme suit :

$$I_1(t) = \frac{V_G}{L_S} \cdot t \quad (2)$$

Au moment  $t = t_{on}$ , le commutateur  $S_1$  ouvre le circuit de charge, la diode  $D_L$  devient conductrice et la bobine est déchargée dans le circuit de charge avec le condensateur  $C_L$ . Le temps  $t$  est remis à  $t = 0$  et le courant de décharge  $I_2(t)$  correspond à l'équation suivante :

$$I_2(t) = I_{20} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - V_{CL0} \cdot \sqrt{\frac{C_L}{L_S}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad \{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t \leq t_{OFF}\} \quad (3)$$

avec  $\omega_0 = (L_S \cdot C_L)^{-\frac{1}{2}}$ , la capacité  $C_L$  à charger, la tension  $V_{CL0}$  du condensateur au moment  $t = 0$  et le courant  $I_{20}$  dans la bobine à  $t = 0$ . Notons que la résistance du circuit de décharge n'est pas non plus considérée.

Appliquer  $V_{CL}(t) = -L_S \cdot \frac{dI_2(t)}{dt}$  à l'équation (3) permet d'obtenir la tension  $V_{CL}(t)$  en fonction du temps :

$$V_{CL}(t) = I_{20} \cdot \sqrt{\frac{L_S}{C_L}} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + V_{CL0} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad \{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t \leq t_{OFF}\} \quad (4)$$

Grâce à ces équations de base, il est possible de calculer pour un cycle de commutation de  $S_1$  le temps de charge et de décharge de la bobine de stockage inductif intermédiaire, en fonction de sa valeur, c'est-à-dire de l'état de charge de la capacité  $C_L$ .

L'équation (4) décrit seulement la tension du condensateur pendant que le commutateur  $S_1$  est ouvert. Pendant l'intervalle de la fermeture, la tension aux bornes du condensateur reste constante (à cause de la diode  $D_L$ ). La commutation de l'IGCT avec une certaine fréquence résulte en un accroissement par étape de la tension  $V_{CL}$  (courbe bleu dans Fig. 2). Étant donné que l'énergie totale de la bobine  $L_S$  est transférée par chaque cycle de commutation, l'énergie totale du condensateur  $E_{CL}$  peut être calculée comme suit :

$$E_C = f_s \cdot t \cdot \Delta E_C = f_s \cdot t \cdot E_{LS} \quad (5)$$

où  $f_s$  est la fréquence de commutation et  $E_{LS}$  l'énergie stockée dans la bobine  $L_S$ . En appliquant (5) à la formule de l'énergie capacitive, la tension au condensateur en fonction du temps peut être dérivée comme suit :

$$V_{CL}(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot t \cdot E_{LS}}{C_L}} \quad (6)$$

Si  $f_s$  est constant, la charge du condensateur dépend de  $\sqrt{t}$ . En conséquence, la courbe de tension de charge suit une évolution en racine carré.

La puissance  $P_G$  délivrée par le générateur  $G$  peut être calculée par la multiplication de la tension DC du générateur par la valeur moyenne  $I_{AV}$  défini par :

$$I_{AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I_1(t) dt. \quad (7)$$

Le courant moyen est atteint étant donné que la capacité  $C_G$  dans la figure 1 lisse les courants impulsionnels  $I_1$  du côté du générateur. A l'inverse des chargeurs à courant continu, avec lesquels la puissance s'accroît avec la tension de charge des condensateurs, ce convertisseur Boost utilise dès le début la puissance totale délivrée par la source de puissance (voir fig. 2, courbe de  $P_G(t)$ ).

La figure suivante explique la procédure de charge d'un condensateur, les courbes de courant et de tension en fonction du temps ont été simulées à l'aide du logiciel Pspice. En employant le circuit électrique de la figure 1, les paramètres principaux ont été fixés aux valeurs suivantes :  $V_G = 50$  V,  $L_S = 100$   $\mu$ H,  $C_L = 900$   $\mu$ F. Pendant un créneau temporel d'une durée de 100 ms, le condensateur a été chargé à  $V_{CL} = 2,3$  kV avec des courants impulsionnels  $I_2$  d'environ 1,3 kA et une

fréquence de commutation de 222 Hz. La puissance  $P_G$  provenant du générateur a été calculée à plus de 30 kW.

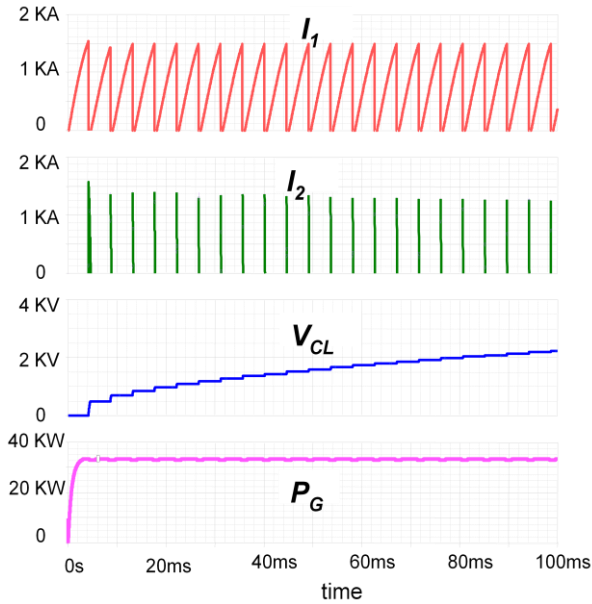


Fig.2 : Comportement principale du convertisseur.  $I_1$ : courant par le commutateur  $S_1$ ;  $I_2$ : courant impulsionnel au condensateur  $C_L$  ;  $V_{CL}$  : tension de charge au condensateur;  $P_G$  : puissance délivrée par le générateur G

## 2.1. COMPOSANTS DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Pour le besoin des expériences en laboratoire, le convertisseur a été construit et il a été connecté à une source de courant de puissance. Les composants clés sont brièvement décrits ci-après.

La source de courant continu (MDS) est un générateur basé sur un volant d'inertie. Ce générateur peut être utilisé avec les fonctions de moteur et de générateur. Il peut stocker une énergie mécanique de 32 MJ à une vitesse de rotation maximale de 12.000 tours/min. En mode générateur, il peut délivrer une puissance électrique de sortie pouvant atteindre 1 MW, ce qui correspond à un courant continu de 4000 A à 250 V.



Fig.3 : Volant d'inertie utilisé comme source de puissance du convertisseur (MDS : Magneto-Dynamic-Storage)

L'IGCT est un commutateur semi-conducteur basé sur un thyristor GTO (Gate-Turn-Off). Il se distingue par de très faibles pertes en conduction (comparable à celles des thyristors) mais également par de faibles pertes pendant la phase de commutation. L'IGCT choisi présente les caractéristiques suivantes : une tension de blocage de 4,5 kV et une capacité d'ouverture sous une charge maximale de 4 kA [8]. Il peut être utilisé jusqu'à des fréquences de 1 kHz. Pour notre montage expérimental (charge d'un condensateur à environ 5 kV), on a utilisé deux IGCT en série. Le volume de l'assemblage des ces deux IGCT avec des composants périphériques (circuits d'atténuation, diodes antiparallèles) est à peu près de 10 dm<sup>3</sup>, les 2 IGCT ont à eux seuls un volume d'environ 4 dm<sup>3</sup>.

Un autre composant clef est la bobine de stockage inductif. Pour des raisons de disponibilité, on a utilisé deux bobines de formation d'impulsions (voir fig. 4), chacune d'un diamètre 190 mm et d'une longueur de 135 mm, ce qui représente un volume d'environ 3,8 dm<sup>3</sup>. Les bobines utilisées présentent une géométrie semblable à celle d'une bobine 'Brooks', caractérisée par un haut facteur de qualité L/R, une très faible résistance effective et enfin une forte densité d'énergie (à des courants très élevés). Une telle bobine est construite à base de fils tressés.

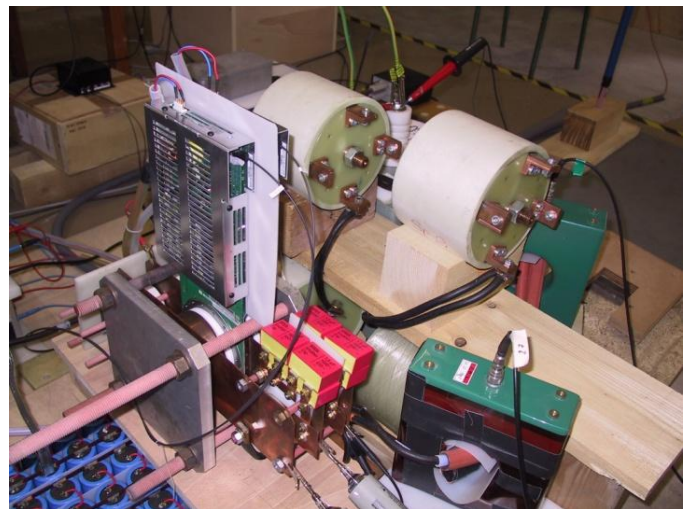


Fig.4 : Montage expérimental avec des composants clés IGCT (deux IGCT en série) et bobine de stockage inductif intermédiaire (deux bobines connectées en série)

## 2.2. CHARGE D'UN CONDENSATEUR DE PUISSANCE

Un condensateur de puissance avec une tension de charge maximale de 10,7 kV et une capacité de 900  $\mu$ F a été utilisé comme charge et connecté au convertisseur (fig.5). Ce type de condensateur est généralement utilisé dans l'électronique de puissance pour générer des courants impulsionnels de plus de 100 kA [9]. Le convertisseur décrit a été testé au cours de plusieurs expériences en augmentant continuellement la puissance de charge.



Fig.5 : Montage expérimental avec un condensateur de puissance au premier plan, au milieu le convertisseur et, à l'arrière plan, le générateur MDS

La figure 6 montre le résultat d'une procédure de charge avec une puissance moyenne de sortie calculée de plus de 100kW. Les courbes de gauche montrent la tension et le courant délivrés à la sortie du générateur MDS. Les courbes de droite montrent les courbes de courants impulsions (celles-ci ne sont pas suffisamment nettes, étant donné la résolution temporelle) et la tension de charge aux bornes du condensateur.

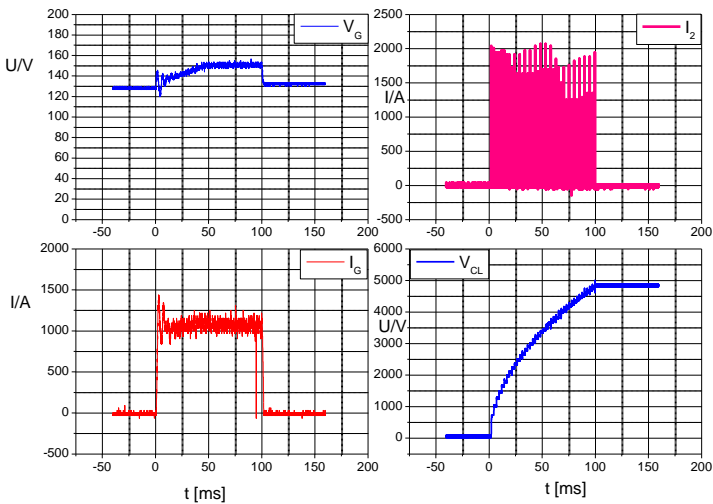


Fig.6 : Courbes des mesures pendant la charge d'un condensateur de puissance de 900 µF à une tension de 4,8 kV en 100 ms.

Lors de cette expérience, la fréquence de commutation des IGCT était de 400 Hz avec un 'turn-on' de 2 ms et un 'turn-off' de 0,5 ms. Le temps de charge était limité à 100 ms. Après cette durée, le condensateur était chargé à environ 4,8 kV. Le générateur MDS délivrait un courant moyen de 1,1 kA sous une tension moyenne de 145 V. Les courants impulsions au condensateur atteignaient la valeur crête d'environ 2 kA. Le rendement énergétique du convertisseur était évalué à environ 65 %. La mesure des tensions de

commutation aux bornes des deux IGCT a montré une répartition presque symétrique, ce qui est aussi dû aux circuits auxiliaires d'atténuation (protection de surtension, snubbers). Finalement, après avoir démontré le bon fonctionnement et la robustesse du montage expérimental du convertisseur Buck-Boost, nous avons effectué une série d'expériences. Le condensateur de puissance a été chargé une cinquantaine de fois, afin d'évaluer une possible altération de la capacité, ce qui n'a pas été le cas. Cela indique que cette procédure de charge pour ce type de condensateurs par des courants impulsions n'est pas nuisible pour les composants.

### 2.3. EXPÉRIENCES AVEC UNE CHARGE RÉSISTIVE

Les expériences effectuées jusqu'à présent avec le convertisseur ont été réalisées sur une durée temporelle relativement courte, dans le domaine de quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes. Au regard d'une charge rapide d'un plus grand nombre de condensateurs, il faut tenir compte de la capacité élevée par rapport à un simple condensateur. Cela résulte en un allongement du temps de charge, ce qui cause l'auto-échauffement des IGCT. Ainsi, les contraintes sur le convertisseur Buck-Boost pendant une durée des plusieurs secondes et sans refroidissement supplémentaire ont dû être évaluées. Nous avons d'abord testé le convertisseur sur une charge résistive en appliquant la plus grande puissance d'entrée possible par l'intermédiaire du générateur MDS. La figure 7 montre le dispositif expérimental avec des résistances de charge (résistances de charbon, valeur totale d'environ 1 Ω).

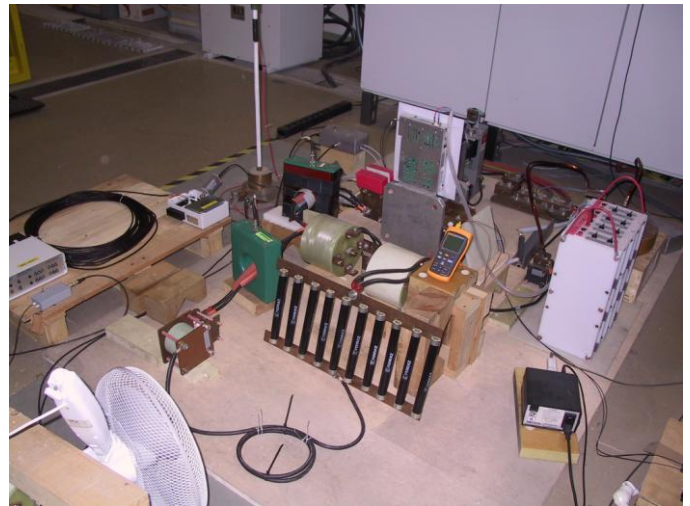


Fig.7 : Montage expérimental avec une charge résistive. On a utilisé des résistances tubes de charbon en série avec des résistances disques de charbon.

Au lieu d'utiliser un condensateur comme charge et du fait que la tension de charge monte avec le temps, les contraintes de tension impulsionnelle aux bornes des résistances, et ainsi aux bornes des IGCT, restent dans cette configuration à peu près constant à travers du temps. Pour cette raison, on a pu étudier et déterminer les limites de puissance, car on n'était pas dépendant du temps d'opération du système.

La figure 8 montre les résultats obtenus avec le convertisseur Buck-Boost et une charge résistive. Avec une puissance

d'entrée de plus de 250 kW, c'est-à-dire un courant d'entrée de 1700 A sous une tension de 150 V, nous avons testé le convertisseur à 400 Hz jusqu'à une durée de 3 secondes. Pendant cette phase, les commutateurs IGCT ont dû commuter des courants impulsionnels de 3,8 kA au maximum. La tension aux bornes d'un IGCT est générée par la commutation du courant dans le circuit de charge résistive et elle atteint une valeur maximale de 3,7 kV. De plus, avec une sonde de température, on a mesuré les valeurs maximales après le temps d'opération du convertisseur. Il a été constaté que l'augmentation de la température mesurée sur les IGCT était très modérée ( $\Delta T$  d'environ 4 K). Jusqu'à présent, les résultats montrent un comportement de commutation fiable et robuste, même en présence de contraintes extrêmes.

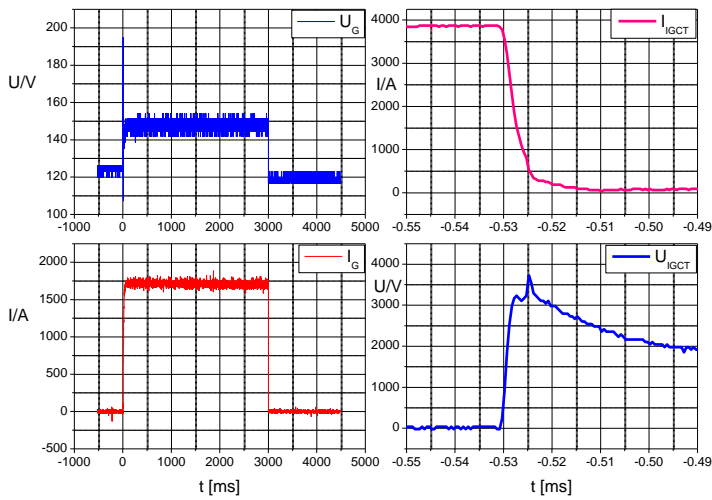


Fig.7: Expériences avec une charge résistive. La puissance d'entrée du convertisseur Buck-Boost atteint plus de 250 kW. La durée des contraintes est de 3 secondes. Les courbes de gauche montrent la tension et le courant d'entrée du convertisseur, les courbes de droite montrent le courant et la tension impulsionnelle au niveau de l'IGCT.

### 3. CONCLUSION

Un chargeur de condensateur potentiellement compact et de forte puissance a été développé à l'ISL en utilisant la topologie convertisseur Buck-Boost. Les composants clés de ce chargeur sont les commutateurs de type IGCT et la bobine de stockage inductif à densité d'énergie élevée. Lors des expériences en laboratoire, le convertisseur a été connecté à une source de courant de forte puissance, un volant d'inertie (MDS). Un condensateur de puissance avec une capacité de 900  $\mu F$  a été utilisé comme charge et il a été chargé à environ 4,8 kV en 100 ms, ce qui correspond à une puissance de charge de plus que 100 kW. Le rendement énergétique du convertisseur était d'environ 65 %. Il a été constaté que cette procédure de charge rapide n'a pas eu d'influence sur les caractéristiques du condensateur. Dans une prochaine étape, les contraintes sur le convertisseur ont été étudiées pendant une durée des plusieurs

secondes et avec une charge résistive. Avec une puissance d'entrée de plus de 250 kW, le système a été opéré à 400 Hz jusqu'à une durée de 3 secondes. Il a été constaté que l'augmentation de la température mesurée sur les IGCT était seulement de quelques kelvins. Les commutateurs ont montré un comportement de commutation fiable et robuste, même en présence de contraintes extrêmes. La densité de puissance avec le montage expérimental actuel est d'environ de 12 kW/dm<sup>3</sup>. Si l'on tient compte seulement des composants essentiels, les commutateurs IGCT et la bobine de stockage inductif intermédiaire, cette densité de puissance atteint d'environ 25 kW/dm<sup>3</sup>.

Nos prochains travaux vont encore se concentrer sur l'augmentation de la puissance de charge (mise en série/parallèle des IGCT), ainsi que sur la tension de charge des condensateurs. Notre objectif est d'atteindre 10 - 20 kV, ce qui est le niveau de tension usuel pour nos applications de puissance impulsionnelle à l'ISL. Sur la base des résultats des expériences avec une charge résistive, il est planifié de charger plusieurs condensateurs en parallèle avec ce convertisseur. Concernant la source de courant, l'utilisation de batteries de haute puissance comme alternative au MDS est aussi planifiée. En effet, la nouvelle génération des cellules Li-Ion de forte puissance est très prometteuse pour la réalisation d'un système compact, constitué de la source d'énergie et du chargeur de condensateurs.

### 4. REFERENCES

- [1] Zherlitsyn S., Herrmannsdoerfer T., Skourski Y., Sytcheva A. and Wosnitza J. "Pulsed-magnet design at the Dresden High Magnetic Field Laboratory", 2006 *J. Phys.: Conf. Ser.* **51** 583 doi:10.1088/1742-6596/51/1/133
- [2] Hundertmark, S.; Schneider, M.; Vincent, G., "Payload acceleration using a 10 MJ DES railgun," *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, vol., no., pp.1,5, 15-19 May 2012.
- [3] CCDS Power Supply, *Operations & Maintenance Manual* General Atomic Energy Products, San Diego, California, 1998
- [4] Capacitor charger KL 30XX, *Operation Manual*, Poynting GmbH, Germany, 2009.
- [5] Giesselmann, M.G.; Vollmer, T.T.; , "High-power compact capacitor charger," *IEEE Pulsed Power Conf. (PPC '09)*, pp.918-921, June 28 2009-July 2, 2009.
- [6] Raymond J. Allen, Craig N. Boyer, Jesse M. Neri, Mike Veracka, "Development of a 150-kW, Battery Powered, Rapid Capacitor Charger for a Small Railgun in Burst Mode Operation at 3 RPS", *IEEE Int. Power Modulators and High Voltage Conf.*, 27-31 May 2008, pp. 106-108#.
- [7] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook", USA, Academic Press, 2001.
- [8] IGCT-Datasheet: Part number 5SHY35L4512, *Short form catalogue 2012*, ABB Switzerland Ltd/Semiconductors, www.abb.com/semi-conductors, 2012.
- [9] Spahn, E.; Zornigebel, V.; Sterzelmeier, K.; Buderer, G.; Brommer, V., "50 kJ ultra-compact pulsed power supply unit for various applications," *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, vol., no., pp.7 pp.,0-0 0.