

電力系統への適用拡大に向けた IEGT 変換器の大容量化技術

Large-Scale IEGT Converter Technology for Power System Application

色川 彰一
IROKAWA Shoichi

武田 秀雄
TAKEDA Hideo

金井 丈雄
KANAI Takeo

電力系統へのパワーエレクトロニクス装置の適用が、今後、更に拡大されるためには、自励式変換器の高効率化が不可欠である。当社は、GTO(Gate Turn-Off thyristor)に比較して大幅に低損失化が可能な IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)を、多直列・多並列に自在に接続する技術を開発し、電力系統で要求される 1 MVA 級の小容量から 100 MVA 級の大容量の変換器まで、共通に適用できる標準化技術を確立した。

The development of a highly efficient self-commutated converter is essential to enlarge the application of power electronics equipment to electric power systems. This paper explains a new technology to freely connect Injection Enhanced Gate Transistors (IEGTs) in series or in parallel. This technology will be commonly applied to voltage-sourced converters ranging from small (1 MVA class) to large-scale (100 MVA class) systems.

1 まえがき

電力系統の多様化に伴い、パワーエレクトロニクス装置の電力系統への適用が拡大している。これまでは、直流(DC)送電や SVC(Static Var Compensator)に代表されるように、サイリスタを用いた、いわゆる他励式変換器が主体であった。しかし、今後、更に適用が拡大されるためには、自己消弧型素子を用いた、より高機能な自励式変換器に期待が掛けられている。

GTOを用いた自励式変換器も、自励式の SVC である STATCOM(Static synchronous Compensator)を中心に実用化されてきている⁽¹⁾。ただし、GTOを用いた変換器は、他励式に比較して損失、コスト面で課題があり、他励式では実現が困難な用途に限定される傾向があった。

より低損失で小型な変換器が期待できる IEGT が開発されている⁽²⁾。電力系統への適用を考えると、小容量だけでなく、高電圧・大電流の変換器も必要であり、IEGTを多直列、多並列に自在に接続できる技術の確立が不可欠である。

ここでは、IEGTを2直列、2並列接続した変換器を試作し、IEGT変換器が1 MVA級の小容量から100 MVA級の大容量まで、幅広く電力系統に適用できることを示した結果について述べる。

2 ポスト GTO としての IEGT

これまで、大容量自励式変換器を支えてきた素子である GTO の構造は、サイリスタと基本的に同じである。異なる点は、約 200 μm 幅の多数個の小さなサイリスタ エLEMENT の集合体とし、各 ELEMENT をゲートで取り囲み、ターンオフ

時には大きなゲート電流を逆方向に流すことにより、強制的に電流を遮断する機能を持つ点である。6 kV・6 kA 級の大容量素子も開発されているが、下記の点が課題である。

- (1) ゲートが電流駆動であり、制御性が劣る。
- (2) 大きなゲート電力と大型のゲート回路が必要である。
- (3) 素子を破壊しないで安全に電流を遮断するためには、遮断後に素子に印加される電圧のピーク値だけでなく、電圧上昇率(dv/dt)も低下させる必要があり、大容量の充放電型スナバ回路^(注1)を素子に並列に接続する必要がある(図1)。

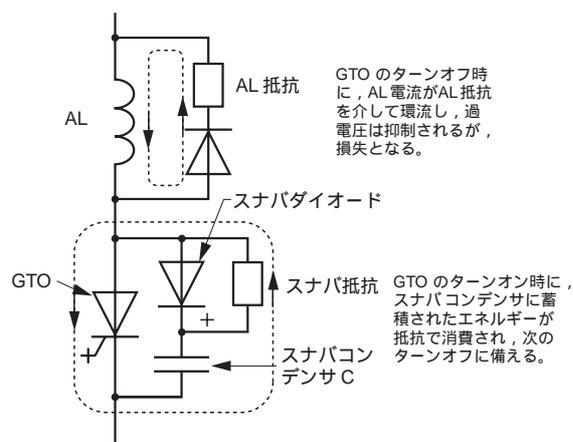


図1 . GTOに必要な保護回路 GTOは電流遮断時の破壊耐量が大きくないため、スナバ回路、ALが必要で、スイッチング時に損失を発生する。

Protection circuits for GTO

(注1) コンデンサ、抵抗、ダイオードから成るダンピング回路で、GTOやIEGTのターンオフ後に掛かる電圧の上昇を抑制する。

(4) 安全に素子をターンさせるには電流上昇率(di/dt)を抑制するため、比較的大きなインダクタンスのアノードリアクトル(AL)を直列に接続する必要がある(図1)。

(5) スwitchングに伴い、上記のスナバ回路、ALで損失が発生する。

これらの課題は大きく二つに分けられる。一つはゲート方式に起因し、もう一つはswitching時の破壊耐量に起因するものである。当社は、これらの課題を解決する素子として、GTOとは異なる構造のIEGTを開発している。4.5 kV・1.5 kAのIEGTの外形とゲート回路基板を図2に示す。ポスト径は125 mm、最大遮断可能電流は3 kAで、環流ダイオードを内蔵している。ゲートを制御性に優れた電圧駆動とし、必要なゲート電力を10 mW以下と、GTOに比較して3倍以上低減でき、ゲート回路も、図2に示すように基板1枚に小型化される。

また、switching時の破壊耐量が大幅に改善され、必要なスナバ回路、ALは低減される。小容量の変換器でIEGTを多直列接続しない場合は、充放電スナバやALは不要となる。

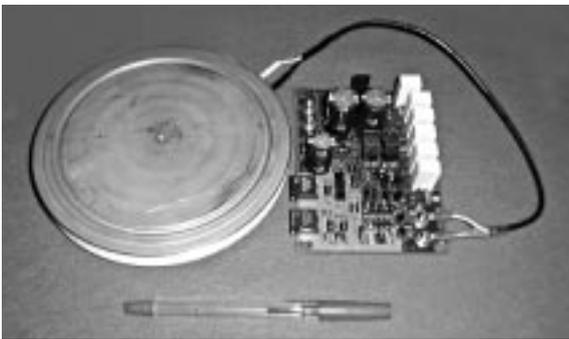


図2 . IEGT(4.5 kV・1.5 kA)素子とゲート回路基板 IEGTのポスト径は125 mmで、環流ダイオードを内蔵し、最大遮断可能電流は3 kAである。

IEGT (4.5 kV・1.5 kA) and gate drive printed circuit board

3 多直列接続時の低損失スナバ回路

変換器の高電圧大容量化のためには、IEGTを多数個直列に接続しなければならない。この場合は、各素子間の電圧分担を均一にするために、各素子に個別に充放電スナバ回路が必要となる(図3)。

IEGTは、GTOに比較してターンオフ時の dv/dt 耐量が高いため、充放電スナバ回路の容量は、電流遮断時における各素子間の電圧分担を設計基準以内にするために必要最小限の容量でよい。しかし、IEGTにはターンオフ時に、DCコンデンサとIEGTとの間の浮遊インダクタンスに蓄えられたエネルギーにより、直流電圧よりも高い電圧が過渡的に

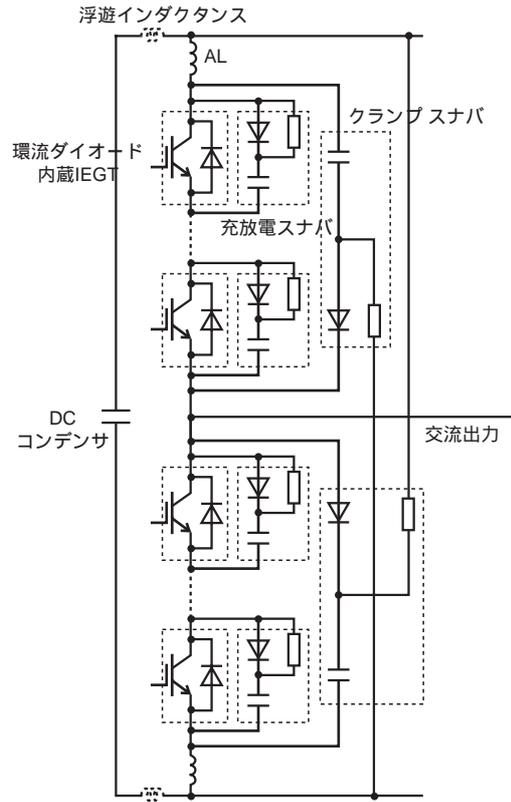


図3 . IEGT変換器の低損失スナバ回路 IEGTを多直列接続するときに、損失を極力増加させないスナバ回路構成を示している。

Low-loss snubber circuit

印加される。この電圧のピーク値を、IEGTの耐電圧よりも低く抑制するために、充放電スナバ回路で不足する分を図3に示すクランプスナバ回路を併用することで対処する。クランプスナバは充放電スナバと異なり、IEGTがターンオンしてもコンデンサに充電された電荷はDC電圧以下には放電されず、充放電スナバに比較して損失が大幅に少ない。消費されるエネルギーは、浮遊インダクタンスと遮断電流にだけ依存し、コンデンサの容量を増加させても変わらない。

IEGTの電流switching時に発生する電圧分担の不平衡の要因としては、IEGT素子の個別のターンオン、ターンオフ時間のバラツキ、ゲートタイミングの不ぞろい、IEGTに逆並列に接続される環流ダイオードの逆回復電荷量のばらつきなどが挙げられる。ただし、ゲートタイミングは調整可能で、充放電スナバの容量を低減することも可能である。

4 試作器による直並列自在接続技術の検証

大容量化の方策として、直列接続によるDC電圧の高電圧化のほかに、並列接続による大電流化の方向も考えられる。サイリスタやGTOと異なり、IEGTは電流が増加して温度が高くなると、素子の順方向電圧降下が高くなる特性とすることができ、素子を並列接続したときの電流バランスが定常状

態では自然にとれる性質がある。過渡的にも電流バランスが許容値内にあれば、素子の直列及び並列が自在に可能となり、電力系統で求められる種々の定格の自励式変換器を、すべて標準の構成部品で製造できることになる。

直並列接続の最小単位として、図2に示した4.5 kV・1.5 kAの IEGT を2直列、2並列接続したアームから成るハーフブリッジ変換器を試作した⁽³⁾。主回路構成を図4に、1アーム分を構成するモジュールを図5に示す。

直流電圧を4.5 kVとし、2並列で4 kAを遮断した際の IEGT の電圧と電流の波形を図6に示す。ゲートタイミングの調整は特にしていないが、電圧、電流とも不平衡は±10%以下と良好であった。

図6(a)で、IEGT に印加される電圧にはピークが二つ存在する。IEGT で電流を遮断すると、DC コンデンサと IEGT 間の浮遊インダクタンスに流れていた電流は、まず充放電スナバ回路に流れ、IEGT 極間の電圧が上昇する。その電圧が主回路のDC電圧に達すると、クランプ スナバへの充電も開始する。1回目のピーク電圧①は、クランプ スナバ回路の浮遊のインダクタンスが大きいために生じているものである。その後、主回路の浮遊インダクタンスに蓄えられたエネルギーの残りを充放電スナバとクランプ スナバですべて吸収し、2回目のピーク電圧②に達する。

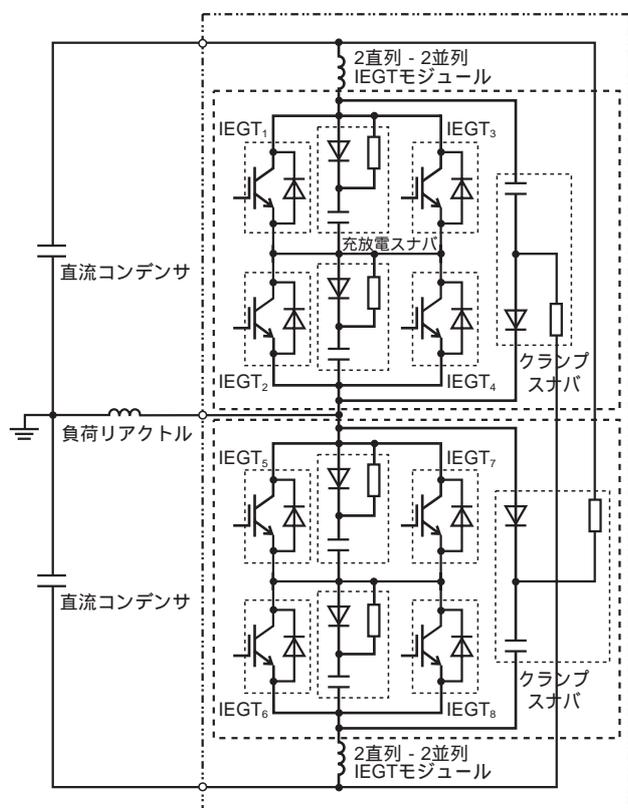
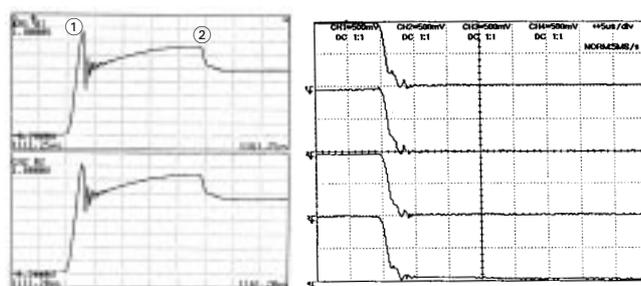


図4．試作器の主回路構成 IEGT の多直列、多並列接続技術を検証するために試作した、ハーフブリッジ変換器の主回路構成を示す。
Circuit diagram of half-bridge converter for verification



図5．2直列 2並列 IEGT モジュール この試作モジュールにより、IEGT の直並列接続技術を検証した。
IGBT module consisting of 2 series - 2 parallel IEGTs



(a) 電圧波形(400 V/div.,5 μs/div.) (b) 電流波形(1 kA/div.,5 μs/div.)

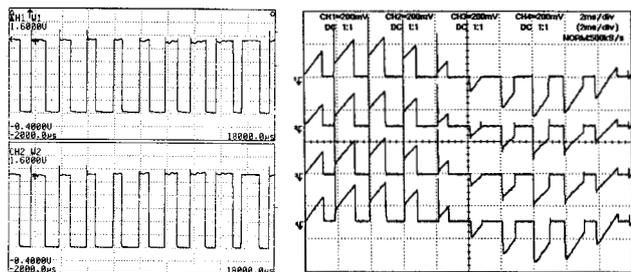
図6．電流遮断時の直並列 IEGT の電圧、電流分担 4.5 kV, 4 kA の遮断結果を示す。2直列間の電圧分担, 2並列間の電流分担とも10%以下に抑制されている。

Voltage and current waveforms in case of turn-off

これらの浮遊インダクタンスは、実装技術の改良により低減できる。充放電スナバ コンデンサの容量は、このケースでは並列接続される二つの IEGT 素子に共通で1 μFであり、GTO に比較すると1/4程度であるが、クランプ スナバ回路の浮遊インダクタンスを低減することで1回目のピーク電圧が低下することから、GTO に比較して1/10以下にすることが可能である。

同じ回路条件で500 Hzの周波数でスイッチングし、50 Hz、500 Armsを出力したときの電圧電流波形を図7に示す。やはり、電圧、電流の不平衡は10%以下と良好であり、連続運転でも直並列接続が可能であることを示している。

充放電スナバは、電圧分担を均一化する役目のほか、電流遮断時に IEGT に印加される電圧の dv/dt を抑制することから、遮断時の IEGT の電流と電圧との積である IEGT 素子のターンオフ損失を低減する役目も果たす。しかし、スナバ回路での損失も含めた合計のターンオフ損失は、スナバコンデンサ容量を0.3 μFと小さくした方が低減できる。電圧



(a) 電圧波形 400V/div., 2ms/div. (b) 電流波形(1kA/div., 2ms/div.)

図7. 連続運転時の直並列 IEGT の電圧, 電流分担 4.5 kV, 500 A の連続通電試験結果を示す。2 直列間の電圧分担, 2 並列間の電流分担とも 10 % 以下に抑制されている。

Voltage and current waveforms in case of continuous operation

不平衡の条件を満たし, かつ, スナバコンデンサと IEGT のスイッチング損失の合計が最小となる容量が, 最適な充放電スナバ容量となる。このような最適化をすることにより, 9 パルスの変換器を対象にして評価すると, 従来の GTO 変換器に対して, 損失を 40 % 以下に低減することが可能である。

直列接続した IEGT 素子間のターンオフタイミングを意図的にずらしたときに生じる電圧分担の不平衡を図8 に示す。ゲートタイミングのずれに比例して, 不平衡分も増加するが, 充放電スナバを個別に設置しているため, 感度はそれほど高くない。

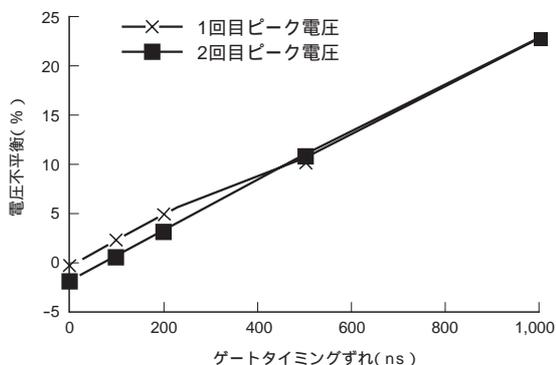


図8. 直列接続 IEGT 間の電圧不平衡とゲートタイミングの関係 充放電スナバ回路の効果で, ゲートタイミングのずれが電圧不平衡率に及ぼす影響は少ない。

Voltage unbalance between IEGTs connected in series

並列接続した IEGT 素子間のターンオフタイミングを意図的にずらしたときに生じる電流分担の不平衡を図9 に示す。並列素子間には, 特に電流バランス リアクトルなどを挿入していないため, ゲートタイミングのずれの電流バランスに対する感度は, 電圧分担バランスに対するものよりも高く, 管理が必要である。

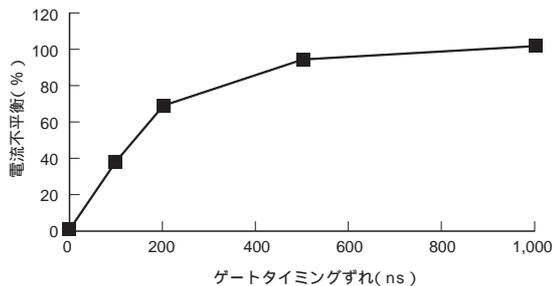


図9. 並列接続 IEGT の電流不平衡とゲートタイミングの関係 並列素子間の電流不平衡率を抑制するためには, ゲートタイミングのずれを調整する必要性が高い。

Current unbalance between IEGTs connected in series

5 あとがき

IEGT は容易に直並列接続でき, 個別に配置する充放電スナバ回路と, アーム単位で配置するクランプ スナバ回路との組合せで, 従来の GTO による変換器よりも, 大幅に低損失化が図れることが確認できた。電力システムで要求される小容量から大容量に至る変換器に対し, 同一の構成部品で製作できる。パワーエレクトロニクス装置はスケールメリットよりも量産メリットの方が大きく, IEGT 変換器の電力システムでの適用拡大が期待される。

謝 辞

IEGT 変換器の大容量化の開発にあたり, ご指導いただいた東京電力(株)の関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Ichikawa, F., et al. "Operating Experience of a 50 MVA Self-Commutated SVC at the Shin-Shinano Substation". IPEC-Yokohama '95. 1995-04, 電気学会. 1995, p.597 - 602.
- (2) 北川光彦; 大橋弘通. IEGT とその実用化. OHM. 84, 4, 1997, p.32 - 36.
- (3) Nakajima, T., et al. "Development of IEGT Series and Parallel Connection Technology for High Power Converters". IPEC-Tokyo 2000. 2000-04, 電気学会. 1995, p.670 - 675.



色川 彰一 IROKAWA Shoichi

電力システム社 電力事業部 電力変電技術部主幹。直流送電, 静止形無効電力補償装置のシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。IEEE 会員
Transmission, Distribution & Hydraulic Power Systems & Services Div.



武田 秀雄 TAKEDA Hideo

電力システム社 府中電力システム工場 パワエリシステムエンジニアリングセンター主査。直流送電, 静止形無効電力補償装置のシステムエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Power Systems



金井 丈雄 KANAI Takeo

情報・社会システム社 府中情報・社会システム工場 パワーエレクトロニクス部グループ長。電力システム用自励式変換器の開発設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Information and Industrial Systems & Services