鉄道車両・産業向けインバータの高性能化技術

阿部 康(あべ やすし)

田畑 壮章 (たばた まさふみ)

松原 邦夫 (まつばら くにお)

1 まえがき

近年、スイッチング素子である IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の高耐圧化が進み、サイリスタと同様な定格電圧を持つ高耐圧 IGBT が製品化されている。 IGBT は電圧駆動型であるため、サイリスタと比較すると、駆動電力が非常に小さい、安全動作領域が広くスナバレスやアノードリアクトルレスが可能など、幾つかの利点を有し、装置のより一層の小型化・低コスト化が可能である。 このような理由から、IGBT が鉄道車両や産業用向けのインバータへ盛んに適用されている。

しかし、IGBT は素子耐圧の増加につれて、オンオフ時に発生するスイッチング損失が飛躍的に増える傾向にある。 損失の増加に伴い、素子温度も上昇し、3.3 kV 定格を超える高耐圧素子の実用的なキャリヤ周波数は、1 kHz 未満に制限される。キャリヤ周波数が低減されることによってインバータの出力波形に多くの高調波が含まれ、これらがフィルタの大型化と、トランスやインダクタなどの磁気部品から発生する騒音の原因となる。

このような背景のもと、富士電機では高耐圧を確保し、かつ大幅にスイッチング損失を低減できる IGBT の適用技術として、1kV 級の定格電圧を持つ汎用 IGBT を直列接続する技術、およびその適用技術の開発を行っている。汎用 IGBT は高耐圧 IGBT と比較すると、スイッチング損失が非常に小さく、10kHz を超えるキャリヤ周波数で動作させることが可能である。このような素子を多直列接続し、さらにこれらのスイッチングを同期させ、1スイッチとして動作させることで、高耐圧化と低損失化を両立できる。

本稿では、IGBT の直列接続技術と、これを応用したインバータの事例について紹介する。

2 IGBT 直列接続技術

スイッチングデバイスを直列に接続した場合,最も重要な課題の一つは,各スイッチングデバイスに印加される素子電圧を平衡化することである。特に,ターンオフの過

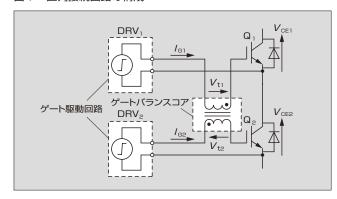
渡動作時には、主回路配線インダクタンス、およびコレクタ電流の変化率 (di/dt) に起因するサージ電圧が発生するため、素子電圧が不平衡になると、特定の素子にコレクターエミッタ間電圧の絶対定格を超える電圧が印加されて、素子破壊を招く可能性が大きい。

富士電機では、非常にシンプルな回路構成でありながら、 直列接続された IGBT の素子電圧を、過渡動作期間におい ても平衡化できる回路方式を開発した。

図1に、本回路方式を適用した IGBT の2直列接続回路を示す。この図において、各素子のゲート配線に接続しているゲートバランスコアが素子電圧平衡用の回路であり、1対1の巻線比をもつ2巻線トランスの一種である。この図のように、各ゲート配線を磁気的に結合させる回路構成としている。

図 2 に示すターンオフ波形を用いて,ゲートバランスコアの回路動作原理を説明する。ここでは, Q_1 のゲート駆動回路 DRV_1 から出力されるゲート信号が, Q_2 のゲート駆動回路 DRV_2 から出力されるゲート信号に比べて,タイミングが $\Delta t_{\rm off}$ の時間だけ早いと仮定する。ゲートバランスコアが接続されていない場合,ターンオフ動作が開始された直後, $\Delta t_{\rm off}$ の時間差により図 2 の破線で示すように, $V_{\rm CE1}$ が先に上昇し始める。 $\Delta t_{\rm off}$ 後, DRV_2 からゲートオフ信号が出力されるため, $V_{\rm CE2}$ も上昇し始めるが,両素子電圧には不平衡が生じてしまう。これに対し,ゲートバ

図 1 直列接続回路の構成





阿部 康

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在,富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。



田畑 壮章

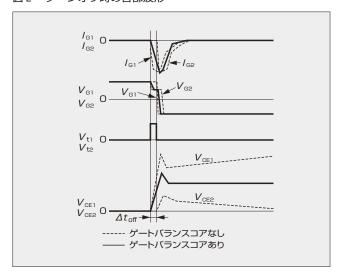
電力変換装置,パワーデバイスの 研究開発に従事。現在,富士電機 アドバンストテクノロジー株式会 社エレクトロニクス技術研究所。 電気学会会員。



松原 邦夫

電力変換装置,パワーデバイスの 研究開発に従事。現在,富士電機 アドバンストテクノロジー株式会 社エレクトロニクス技術研究所。 電気学会会員。

図2 ターンオフ時の各部波形



ランスコアを接続した場合,トランスの動作原理によって ゲート電流 I_{G1} , I_{G2} が同波形になるようにゲートバランス コアが動作する。その結果,各ゲート電圧が同時にしきい 値電圧に達するように制御されるため,図2の実線で示す ように,両素子のゲート波形は同波形となる。以上の原理 により,各素子がターンオフするタイミングが同期し,素子電圧の平衡化が実現される。

3 応用装置

汎用 IGBT モジュールの多直列接続方式を適用したインバータの事例について、紹介する。

3.1 直流電車用補助電源装置

(1) 主変換回路構成

図3に主回路構成,表1にこの回路の定格仕様を示す。この回路は,直流1,500 V 架線に対応しており,一般的な2レベルインバータの構成としている。インバータの出力には,高調波を低減するためのコンデンサとリアクトルで構成されるフィルタが接続され,トランスを通して負荷へ電力を供給している。IGBTには,1.2kV耐圧の汎用IGBTモジュールを適用し,1スイッチあたり3直列接続することによって,3.6kVの耐圧を確保している。このような素子構成とすることにより,3.3kV定格の高圧IGBTを適用した従来機種と比較すると,スイッチング損失が大幅に低減され,キャリヤ周波数を従来の約4倍となる4.98kHzにすることを可能としている。キャリヤ周波数の高周波化により,フィルタの小型化と低騒音化を実現している。

また、図4にゲート駆動回路の外観を示す。このゲート駆動回路は、3 直列接続された IGBT に、同じオンオフ信号を出力できるものである。図4に示す GBC_1 と GBC_2 は、ゲートバランスコアである。これらを、3 素子分のゲート配線がすべて磁気結合されるように接続することで、素子電圧の平衡化を行えるようにしている。また、各素子の電

図3 電車用補助電源の主回路構成

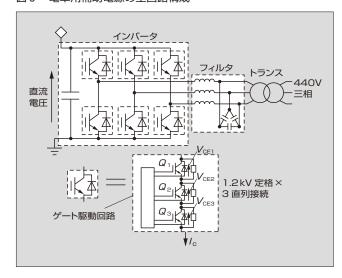
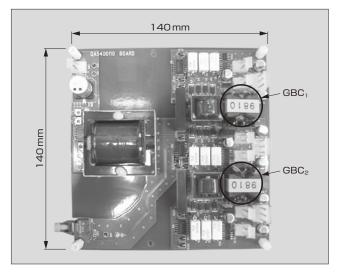


表 1 電車用補助電源の主回路の定格仕様

1,500 V
150kVA
440 V,三相
1.2kV耐圧
3直列接続
4.98 kHz

図4 ゲート駆動回路の外観



位は、三つのトランスによって絶縁されており、一つのトランスは対地とゲート駆動回路間、また残りの二つは素子間を絶縁するような回路構成としている。この構成により、素子間の絶縁トランスは小型のものが適用でき、その結果、ゲート駆動回路全体の小型化を実現している。

(2) 低騒音化

キャリヤ周波数を増加させることによる低騒音化の効果を確認するために、図3の主変換回路を定格運転し、フィルタから発生する騒音を測定した。また、従来機種と同様のキャリヤ周波数である1.26 kHz での条件においても騒

音を測定し、4.98 kHz の結果と比較した。その結果、キャリヤ周波数が1.26 kHz の場合、耳障りとなる2 kHz や4 kHz 付近の騒音の周波数成分が発生するが、キャリヤ周波数が4.98 kHz の場合には、周波数成分が8 kHz を超え

図 5 キャリヤ周波数 1.26 kHz での負荷急変時における出力波 形

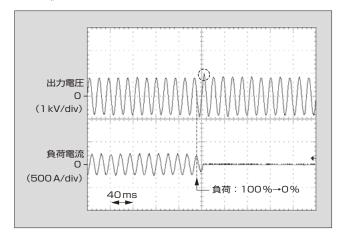
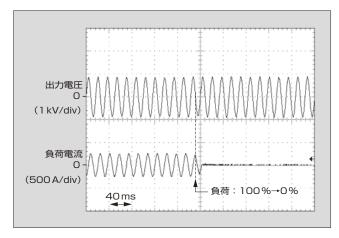


図 6 キャリヤ周波数 4.98 kHz での負荷急変時における出力波 形



る帯域に移動する傾向が得られた。これにより、騒音レベルを A レンジの実測値で約 4 dB 低減できることを確認した。

(3) 出力電圧制御応答

一定の電圧・周波数の交流電力を出力する補助電源装置 では,負荷として接続されるエアコンディショナなどの投 入・遮断に伴う負荷急変が発生した場合でも,波形のひず みや電圧不平衡が少ない安定した電圧を出力することが求 められる。ここでは、負荷急変を模擬的に発生させ、キャ リヤ周波数の高周波化による制御応答への効果を検証した 結果について述べる。騒音の測定時と同様、キャリヤ周 波数を 1.26 kHz と 4.98 kHz に設定し、フィルタのリアク トルもこれらに応じて変更した。負荷急変は定格負荷運 転中に負荷線を切り離して無負荷へ切り替えて行った。図 5, 図6はそれぞれ、キャリヤ周波数1.26kHz, 4.98kHz のときの出力電圧・電流波形である。キャリヤ周波数が 1.26 kHz では、負荷急変が発生すると出力電圧に10%程 度の過渡的な電圧上昇が発生する(図5の破線の丸印内)。 これに対して、キャリヤ周波数を 4.98 kHz とすると、負 荷急変した場合においても,出力電圧が変動することなく, 良好な過渡応答特性が得られている。これは、キャリヤ周 波数の増加に伴い、制御のサンプリング数が増加したこと と、フィルタリアクトルのインダクタンス値が小さくなり、 負荷急変時にフィルタコンデンサに流れ込むエネルギーが 減少したためである。以上の評価結果から、キャリヤ周波 数を高周波化することで,負荷急変時の出力安定度を改善 できることが実証できた。

3.2 3.3 kV 入出力インバータ

ここでは,汎用 IGBT の直列接続技術を適用した,3.3 kV 定格の系統および高圧モータに直接接続できるインバータについて紹介する。

図7,図8にそれぞれ,主回路構成,整流部の入力電圧 波形を示す。この回路は,入出力が3.3kV電圧に対応した,

図7 3.3 kV 入出力インバータの主回路構成

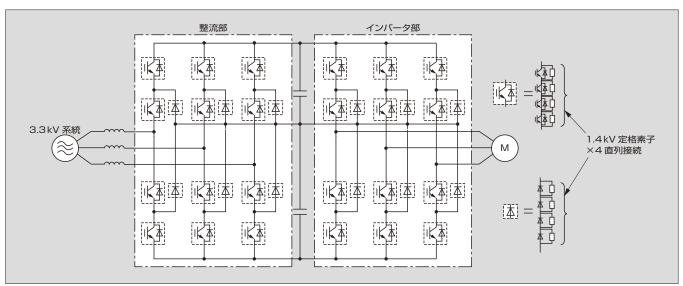


図8 整流部入力電圧波形

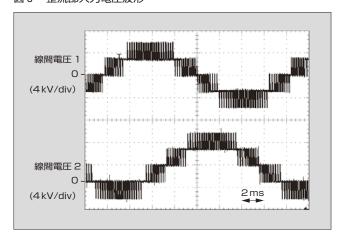


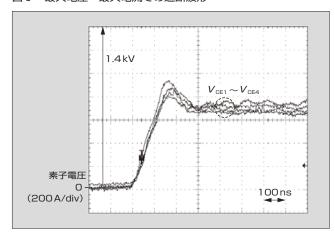
表 2 3.3 kV入出力インバータの主回路の定格仕様

直流 電圧	5,400 V
出力	3.3kVrms, 825kVA
IGBT	1.4kV
素子直列数	4直列接続
キャリヤ周波数	4.8 kHz

整流部とインバータ部の組合せで構成されている。また回路方式には、ダイオードクランプ形の 3 レベル回路方式を適用している。ここに適用されている IGBT とダイオードは、図7に示すように 1.4 kV 定格素子を 4 直列接続して構成しており、等価的な素子耐圧は 5.6 kV となる。この回路の定格仕様は、表2 のとおりである。スイッチング損失が小さいことで、キャリヤ周波数は 4.8 kHz と非常に高い周波数に設定することを可能としている。

図9に、直流電圧と素子電流がそれぞれ最大電圧と最大電流の場合における1スイッチ分の素子遮断波形を示す。これは、4直列接続されたIGBTの各コレクターエミッタ間電圧を測定した波形である。これらの波形から、素子ターンオフ時における過渡電圧バランスは良好に保たれており、ゲートバランスコアが効果的に動作していることが

図9 最大電圧・最大電流での遮断波形



分かる。さらに本回路には、主配線のインダクタンスを抑制したバスバー構造を採用することにより、素子のピーク電圧を、コレクターエミッタ間電圧の最大定格に対して約65%に抑制できており、より信頼性を高めた回路を実現できた。

4 あとがき

鉄道車両や産業向けのインバータに関して、富士電機の IGBT 直列接続技術を適用した事例について紹介した。今後、顧客のニーズを先取りした製品開発が行えるよう、パワーエレクトロニクス分野の技術開発を積極的に推進していく所存である。

参考文献

- Abe, Y. et al. A Novel Method for Loss Reduction in High-Voltage Inverters. IEEE Industry Applications Conference 40th IAS Annual Meeting. 2005, p.1849–1854.
- (2) 阿部康ほか、IGBT 直列接続適用 3.3 kV トランスレス 3 レベルインバータ、平成 18 年電気学会産業応用部門大会、2006, p.521.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する 商標または登録商標である場合があります。