高効率な低圧向けマルチレベル変換器とその空調機用アクティブフィルターへの適用

Application of Highly Efficient Low-Voltage Multilevel Converter to Active Power Filters for Air-Conditioning Systems

新井　卓郎 ARAI Takuro　　張　　剣韜 ZHANG Jiantao

蓄電池や空調機などに用いられる電力変換器は，高効率化が望まれている。これは，省エネだけでなく，冷却器の小型化や削減による軽量化，故障率低減などにも寄与する。低圧向けでは低コストの要望もあり，高価な半導体デバイスや制御回路用ハードウェアを用いた高効率化は難しい。

東芝は，車載機器や情報通信機器などで使われる安価な低耐圧デバイスを利用し，高効率で経済性も考慮した低圧向けマルチレベル変換器を開発した。独自開発の変換器制御アルゴリズムで，損失増加を抑制しながら経済的な汎用マイコンでの制御を可能にした。開発したマルチレベル変換器を日本キヤリア（株）製200 V系空調機用アクティブフィルター（APF：Active Power Filter）に適用し，同空調機に従来使用されていたAPFと比較して，デバイス損失を約70.6 %，APF全体損失を約38.6 %低減し，変換器の冷却ファンやヒートシンクの削減も実現した。

Demand for highly efficient power converters used in storage batteries and air-conditioning systems continues to grow, as they contribute to reduced weight by downsizing and/or eliminating cooling devices, leading to decreased failure rates and enhanced energy conservation. However, introducing expensive dedicated semiconductor devices and control circuits to improve efficiency is hindered by the fact that low-voltage power converters are essential to reduce costs.

With this in mind, Toshiba Corporation has developed a low-voltage multilevel converter that is more efficient and economical by employing inexpensive low-voltage-rated devices commonly used in in-vehicle electronics and information and communication technology (ICT) equipment and incorporating a proprietary algorithm to suppress additional losses by means of a general-purpose microcontroller at low cost. Experiments applying this multilevel converter to a 200 V active power filter (APF) used in air-conditioning systems developed by Carrier Japan Corporation confirmed that it reduces device loss by about 70.6% and overall losses by about 38.6% without using cooling fans and heat sinks compared to conventional APFs.

1. まえがき

蓄電池，太陽光発電（PV）や，空調機などには，交直変換のための電力変換器が必要であり，電力変換器の変換効率向上は，無駄なエネルギー消費を避けるために重要である。また，変換効率を向上させることで，熱として発生する損失を減少させることができれば，冷却器の小型化や削減にも寄与する。特に，故障や騒音といった問題を抱える冷却ファンを不要とすることで，電力変換器の信頼性向上や軽量化にもつながる。

低圧200 V系空調機システムでは，電源高調波対策用の電力変換器としてAPFが用いられている。従来，APFには半導体デバイスとして，600 V耐圧のIGBT（絶縁ゲート型バイポーラートランジスター）を適用した2レベル変換器が用いられてきた。しかし，APFは低歪み（ひずみ）かつ高速なスイッチング制御が要求されるため，従来の2レベル変換器では損失低減に限界があった。スーパージャンクション構造やワイドバンドギャップ半導体デバイスでも低損失化は図れるものの，一般的には高コストなデバイスであるため，コストが優先される用途への適用は難しい[(1)]。

そこで東芝は，低耐圧のSi（シリコン）デバイスによる変換器セルを複数組み合わせることにより高効率なマルチレベル変換器を開発した。ここでは，従来，耐圧の関係で，空調機などの200 V系統用変換器には使われていなかった安価な100 V級のLV-MOSFET（低耐圧パワー MOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスター））を用いた変換器セルを複数組み合わせてマルチレベル変換器を構成している。また，100 V級のLV-MOSFETは，オン抵抗が小さいため低損失化にも寄与する。更に，変換器セルの出力電圧を組み合わせることでマルチレベル出力が可能となり，スイッチング時の電圧の変化幅である電圧ステップを調整でき，圧倒的な低損失化を実現する。また，実用化に向けて，多数のデバイスの制御信号線を削減する独自の制御アルゴリズムを開発[(2)]し，適用することで，損失悪化を招かずにコスト増を抑制した制御装置を実現した。これらにより，低損失化と経済性の両立を図り，日本キヤリア（株）の

200 V系空調機用APFとして，冷却ファンやヒートシンクといった冷却器が不要な変換器を実現[3]した。

ここでは，高効率のマルチレベル変換器と，コスト増抑制を実現する制御技術について述べた後，空調機向けAPFに実装した場合の損失低減効果について述べる。

2. 高効率のマルチレベル変換器

2.1 回路構成とスイッチング損失の低減

図1に，モジュラーマルチレベル変換器（MMC：Modular Multilevel Converter）を適用したAPF（MMC-based APF：以下，MMC-APFと略記）の回路構成を示す。変換器セルは，四つのLV-MOSFETとセルコンデンサーで構成する。100 VのLV-MOSFETを使用した場合，各変換器セルの出力電圧最大値は50 Vほどであり，各相に三つの変換器セルを直列接続することで，交流線間200 V（相電圧115.5 V）を出力できる。

図2に，従来の2レベル変換器とマルチレベル変換器の出力電圧波形とスイッチング損失を示す。マルチレベル変換器は，変換器セルをそれぞれ独立に制御することで，電圧ステップの電圧変化の幅を1/3にできる。電圧変化幅が小さいことでスイッチングに掛かる時間も短縮できるため，2レベル変換器と比較してスイッチング損失は大幅に低減できる。

また，電圧ステップを細かく調整できることで，出力波形が滑らかになり，発生高調波も低減できる。更に，発生高調波が低減できることから，交流フィルターを簡素化でき，2レベル変換器と同じスイッチング回数にもかかわらず，交流フィルターを小型化できる効果も同時に得られる。

2.2 適用デバイスと導通損失の低減

マルチレベル変換器は，変換器セルを直列に接続するため，電圧ステップの電圧変化の大きさに比例してデバイス数が増加する。しかし，MOSFETのオン抵抗は，おおよそ耐圧の2.5乗に比例するため，耐圧が1/6になれば，1/6の2.5乗を6素子分合計したオン抵抗となり，1/15程度に低下する。そのため，高耐圧のデバイスを用いるよりも，直列に接続することで1デバイス当たりの耐圧を下げた方が損失を低減できる。**図3**は，東芝デバイス＆ストレージ（株）の同一パッケージ製品のオン抵抗を箱ひげ図で示したものである（Web上に公開されている仕様を基に作成）。このように，LV-MOSFETは，SiC（炭化ケイ素）-MOSFETと同等のオン抵抗とパッケージサイズを実現している。また，主に車載機器や情報通信機器で使われるため流通量が多く，単価が抑えられるため，コスト増も抑制できる。

3. コスト増抑制を実現する制御技術

空調機向けなどの低圧用途では，電力変換器の制御回路のコストウェイトが比較的高い。**表1**に，各制御ICの特徴を示す。多数のデバイスを制御するには，FPGA（Field-Programmable Gate Array）を用いた専用の制御回路が適しているが，FPGAは高価なハードウェアであるため，実

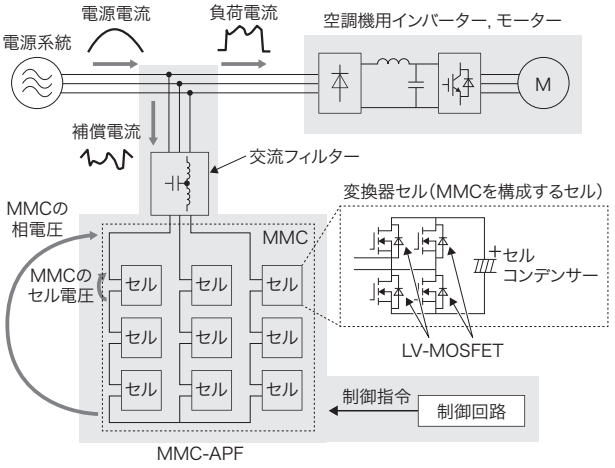


図1. MMC-APFの回路構成

変換器セルを直列接続するMMCでAPFを構成し，負荷電流に含まれる高調波を補償する。

Block diagram of modular multilevel converter-based APF (MMC-APF) circuit configuration

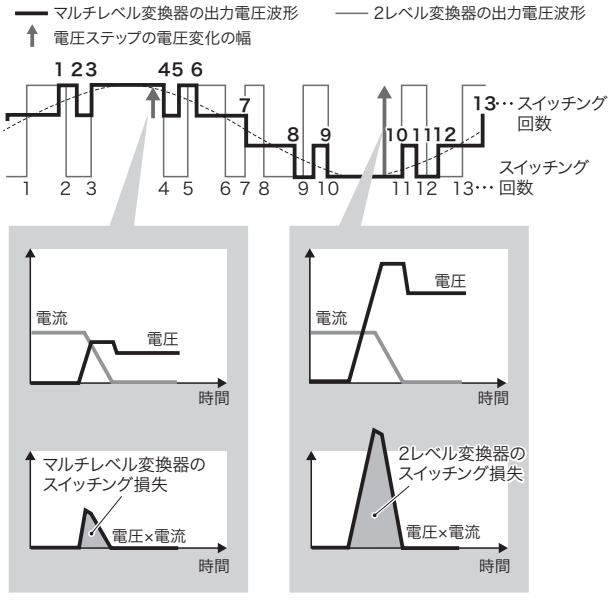
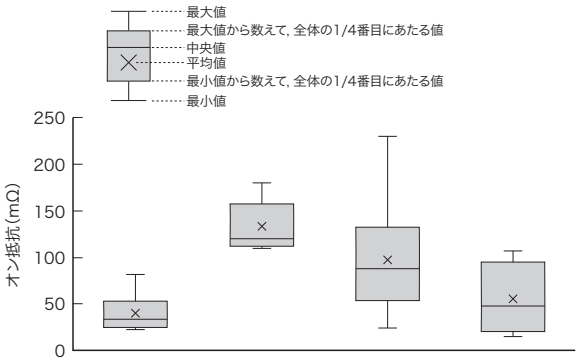


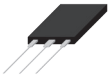
図2. 出力電圧波形とスイッチング損失の比較

マルチレベル変換器は，同じスイッチング回数でも電圧ステップが小さいため，スイッチング損失は大幅に低減でき，高調波も小さくできる。

Comparison of output voltage waveforms and switching losses of two-level and multilevel converters

用化に際してはFPGAの採用による制御回路のコスト増は許容されにくい。一方，汎用マイコンは，ゲート信号数はFPGAより少ないものの，パッケージ化されて設計がしやすく，価格も安い。そこで，経済的な汎用マイコンを利用できるように，必要な制御信号数を削減しつつ，損失増加を抑制する制御アルゴリズムを開発した。



半導体素子	100 V耐圧 LV-MOSFET (6直列分*1)	600 V耐圧 IGBT (V_{ce}/I_c@10 A*2)	600 V耐圧 SJ-MOSFET	650 V耐圧 SiC-MOSFET
半導体パッケージの規格名	SOP Advance	TO-3P	TO-247	TO-247
パッケージタイプ				
パッケージ面積	30 mm²×6個	520 mm²	334 mm²	334 mm²

SJ-MOSFET：スーパージャンクション構造のMOSFET

*1：100 V耐圧LV-MOSFETのオン抵抗は，6直列分であり，1素子のオン抵抗の仕様値を6倍したものである

*2：コレクター電流I_cが10 Aのとき，コレクター–エミッター電圧V_{ce}をI_cで割った値

図3. デバイスのオン抵抗の比較

100 V耐圧のLV-MOSFETのオン抵抗は，直列化しても600 V耐圧より低くSiC-MOSFETと同等のオン抵抗を持つ。

Comparison of on-resistance for each type of device

3.1 従来の制御方法

図4(a)，(b)に，従来の変換器セルの制御方法である変調法を示す。図4(a)は，スイッチングレグごとに異なるゲート信号を与える制御方法で，ユニポーラー変調と呼ばれる。全て独立に制御できるため，セルコンデンサーに電流を流さず損失を発生させないゼロ電圧モードが利用できる。しかし，信号は6個／相×3相分が必要で，ゲート信号数が多くても12個程度の汎用マイコンは適用できない。

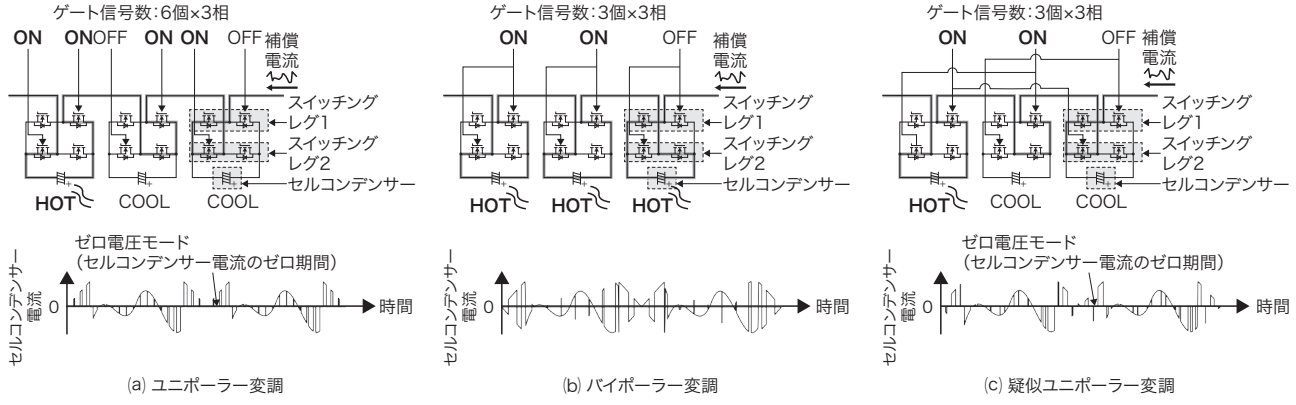
図4(b)は，変換器セルごとに異なるゲート信号を与える制御方法で，バイポーラー変調と呼ばれる。信号は3個／相で済むため，汎用マイコンの適用が可能になるが，変換器セル内の二つのスイッチングレグが相補動作となるため，電流が必ずセルコンデンサーに流れる。そのため，セルコンデンサーの損失が増大し，効率悪化やコンデンサーの大型化

表1. 変換器用制御ICの比較

Comparison of characteristics of converter control integrated circuits (ICs)

	FPGA	汎用マイコン
ゲート信号数	～数十個	多くても12個程度
設計しやすさ	難しい（専用設計）	簡単
使用言語	ハードウェア記述言語	プログラム言語
組み込み機能	なし	PWM機能など
価　格	高	低

PWM：パルス幅変調



HOT：損失発生　　COOL：損失発生なし

図4. 変換器セルの制御方法

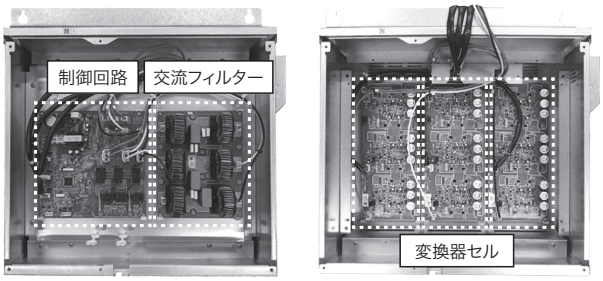
開発した制御方法である疑似ユニポーラー変調は，少ないゲート信号数でセルコンデンサーの損失を抑制できる。汎用マイコンを利用でき，低コストと高効率化の両立が可能である。

Algorithms to control converter cells in multilevel converter

を招く。

3.2　開発した制御方法

図4(c)は，開発した制御方法の疑似ユニポーラー変調である。バイポーラー変調と同じゲート信号を利用するが，変換器セル間で信号を入れ替える点に特徴がある。これにより，変換器セル内の二つのスイッチングレグは，あたかも別のゲート信号で制御されているようになるため，ゼロ電圧モードが利用できる。損失悪化せずに，経済的な汎用マイコンが適用可能になり，高効率化と経済性の両立が実現できる。



(a) 上層
(制御回路・交流フィルター)

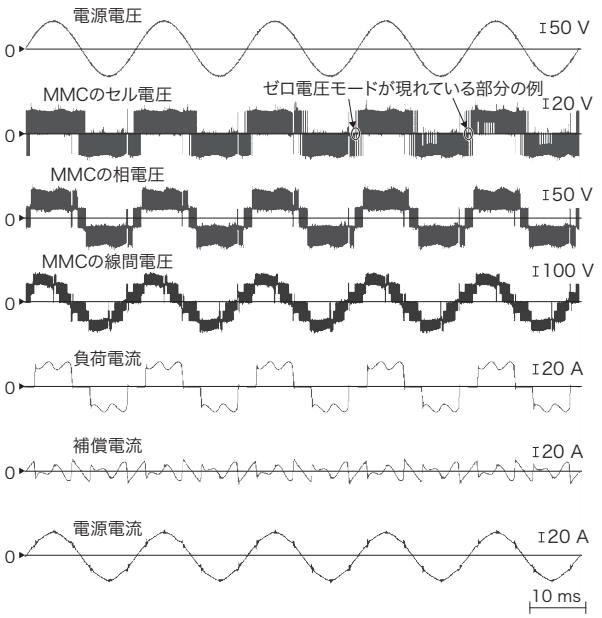
(b) 下層(変換器セル
(1相当たり3セル×3相))

＊西尾元紀 ほか,「低耐圧Si-MOSFETを適用した空調機用MMCアクティブフィルタの損失分析」[3]を基に作成

図5. MMC-APFの筐体構造[3]

2層構造で筐体に収められており，上層に制御回路と交流フィルター，下層に変換器セルを配置した。

Housing structure of MMC-APF for air-conditioning systems



＊西尾元紀 ほか,「低耐圧Si-MOSFETを適用した空調機用MMCアクティブフィルタの損失分析」[3]を基に作成

図6. MMC-APFの動作波形[3]

MMCのセル電圧にはゼロ電圧モードが現れ，MMCの相電圧はマルチレベル波形となり，MMC-APFによって系統電流は正弦波に補償されている。

Waveform data during operation of MMC-APF

4. 空調機向けAPFへの応用と検証結果

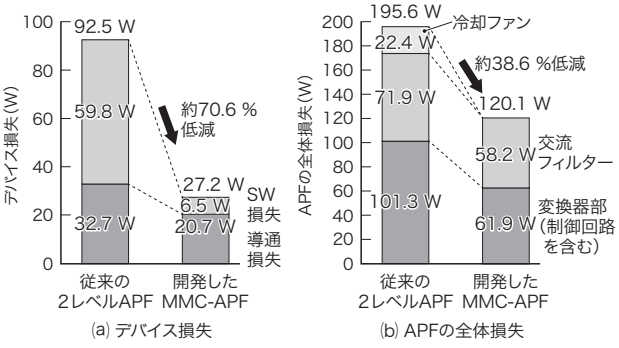
開発したMMC-APFとその制御技術を，日本キヤリア(株)製200 V系空調機に適用した。**図5**に，開発したMMC-APFの筐体(きょうたい)の外観を示す。スイッチング周波数は5 kHzで，定格補償電力は4.4 kVAである。冷却器の削減が可能なレベルまでデバイス損失を小さくできたため，図5に示すような冷却ファンやヒートシンクを含まない筐体構造を実現した。高調波も小さいことから交流フィルターも従来比1/3に小型化した。

4.1　制御性能の検証結果

図6に，MMC-APFの動作波形を示す。空調機用インバーターの負荷電流は高調波を多く含んでいるが，MMC-APFが補償電流を流すことで，電源電流は低歪みな正弦波に補償できている。変換器セルの電圧であるMMCのセル電圧にはゼロ電圧モードが現れており，疑似ユニポーラー変調の効果が確認できる。図4(c)のようにゲート信号の分配を変えているが，三つの変換器セルの合計電圧(MMCの相電圧)は4レベルのマルチレベル波形に制御されている。このように，汎用マイコンを利用しつつ，電圧ステップの電圧変化の幅は従来の2レベル変換器の1/3となっており，スイッチング損失低減と高調波低減を両立した。

4.2　損失低減効果の検証結果

図7に，従来この空調機に使用されていた2レベルAPF



(a) デバイス損失　(b) APFの全体損失

SW損失：スイッチング損失

＊西尾元紀 ほか,「低耐圧Si-MOSFETを適用した空調機用MMCアクティブフィルタの損失分析」[3]を基に作成

図7. MMC-APFの損失測定結果[3]

開発したMMC-APFにより，デバイス損失は約70.6 %低減し，冷却ファンやフィルター，制御回路を含めた全体損失も約38.6 %低減した。

Results of measured power losses for APF with conventional two-level converter and MMC-APF

と，開発したMMC-APFの損失測定結果を示す。2レベルAPFは600 V耐圧のIGBTを用い，スイッチング回数が同一になるように，スイッチング周波数15 kHzで動作させた。MMC-APFは素子数が6倍に増加しているものの，スイッチング損失は約1/9，導通損失は約2/3となり，デバイス損失は約70.6 %低減という圧倒的な低損失化を実現した。これにより，熱として発生する損失を低減することで，デバイスの冷却器を削減することに成功した。また，マルチレベル波形によって交流フィルターの損失低減も実現した結果，APFの全体損失は従来の2レベル変換器と比較して約38.6 %低減した。

5. あとがき

当社は，安価なLV-MOSFETを利用した高効率の低圧向けマルチレベル変換器を開発した。また，これに適用するための，経済的な汎用マイコンで実現できる制御技術を開発した。更に，開発した技術を200 V系統向け空調機用APFに適用し，デバイス損失を従来比約70.6 %，APF全体損失は従来比約38.6 %低減でき，デバイス損失を低減することで，冷却ファン削減も実現できた。

開発技術は，空調機のみならず，蓄電池などの再生可能エネルギー関連機器向け電力変換器への適用も可能で，省エネで信頼性の高い電力変換器の提供を続けていく。

謝　辞

開発に際して，貴重なご意見と実用化に尽力いただいた日本キヤリア(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文　献

(1) Schweizer, et al. "Heatsink-less Quasi 3-level flying capacitor inverter based on low voltage SMD MOSFETs", 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). European Power Electronics and Drives Association. Warsaw, Poland, 2017-9, IEEE., 2017, p.1–10.
(2) 新井卓郎，ほか．MMCのセルコンデンサ電流を低減できる変調法の提案とアクティブフィルタへの応用．電気学会論文誌D（産業応用部門誌）．2023，**143**，8，p.590–599.
(3) 西尾元紀，ほか．“低耐圧Si-MOSFETを適用した空調機用MMCアクティブフィルタの損失分析”．2024年電気学会産業応用部門大会論文集．水戸，2024，電気学会，p.1–7.

新井　卓郎　ARAI Takuro, Ph.D.
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
電機応用・パワエレシステム技術開発部
博士(工学)　電気学会・IEEE会員
Electrical/Mechanical Systems and Power Electronics R&D Dept.

張　　剣韜　ZHANG Jiantao, Ph.D.
総合研究所 インフラシステムR&Dセンター
電機応用・パワエレシステム技術開発部
博士(工学)　電気学会会員
Electrical/Mechanical Systems and Power Electronics R&D Dept.