

パワーエレクトロニクス機器のスマートグリッドへの接続を実現する小型で高減衰のEMIフィルタ

Compact, High-Performance EMI Filter Circuit Facilitating Smart Grid Connection of Power Electronics Devices

津田 純一 児山 裕史 羽田野 晃

■ TSUDA Junichi ■ KOYAMA Yushi ■ HATANNO Akira

近年、SiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）などの次世代素子の普及や、SJ-MOSFET（スーパージャンクション構造の金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）を低損失で駆動する東芝独自の回路技術A-SRB（Advanced Synchronous Reverse Blocking）などによる低損失化、スイッチングの高周波化により、インバータの小型化と高効率化が進んでいる。しかし、その一方で、高周波化はEMI（電磁干渉）ノイズの増大ももたらしている。特に最近では、広く一般家庭にまで太陽光発電インバータなどパワーエレクトロニクス機器が普及してきており、EMI対策への要求はますます高まっている。

そこで当社は、高周波スイッチングに適した、小型でノイズ抑制性能の高いEMIフィルタを開発した。このフィルタを搭載した定置式家庭用蓄電システム“エネグーン”は、一般財団法人電気安全環境研究所（JET）の第三者認証を取得している。

Inverters offering greater compactness and higher efficiency have been developed in recent years due to the expansion of next-generation devices such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) power semiconductors, the practical application of Toshiba's proprietary technology called the advanced synchronous reverse blocking (A-SRB) method to drive superjunction metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (SJ-MOSFETs) with low loss, and the realization of high-frequency switching. However, high-frequency switching has been accompanied by an increase in electromagnetic interference (EMI) noise. In particular, demand has arisen for EMI countermeasures in line with the widespread dissemination of power electronics equipment such as photovoltaic system converters for home use.

In response to this situation, we have developed a compact, high-performance EMI filter circuit suitable for high-frequency switching. By applying this noise suppression technology, we obtained third-party certification of the eneGoon home storage battery system from the Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories (JET).

1 まえがき

これまでSi（シリコン）素子が主流であったインバータにおいて、近年、低損失で高温動作が可能なSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）など次世代素子が徐々に普及し始めている。一方、SJ-MOSFET（スーパージャンクション構造の金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）を使用して次世代素子並みの低損失を実現する東芝独自の回路技術A-SRB（Advanced Synchronous Reverse Blocking）も実用化されるなど、インバータの高効率化が年々進んできている⁽¹⁾。損失の低減により、従来はインバータなどで大きな体積を占めていた冷却器が小型化できるようになった。また、低損失という特長を生かすことで、より高速のスイッチングが可能になった。これは、例えば系統連系インバータにおいて、出力のリプル電流を抑える交流（AC）リアクトルの小型化などにもつながる。このように、次世代素子の普及は、インバータの高効率化とともに小型化にも寄与している。

しかし、その一方でインバータのスイッチング動作はEMI（電磁干渉）ノイズの原因にもなっており、高周波化によってその発生量は更に増え、これまで以上にEMI対策が重要になっ

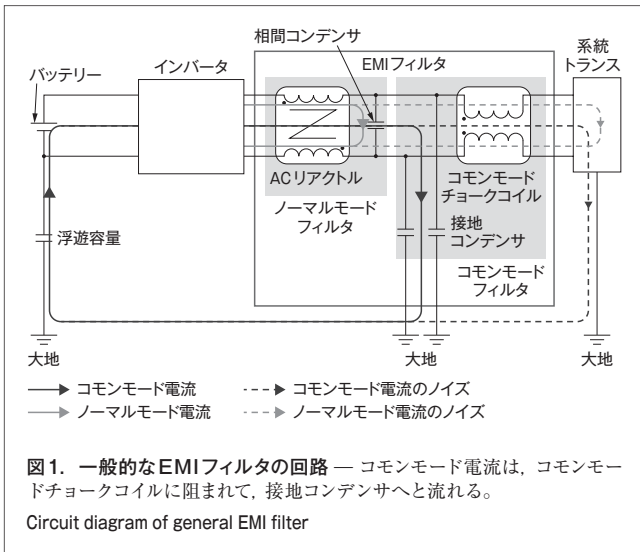
ている。しかし、より高いノイズ抑制性能を備えながら、小型化も実現させるためには、これまでのEMIフィルタの延長線上ではその実現は難しい。

当社はこの課題を解決するため、インバータの高周波化に適した新たなEMIフィルタを開発し、製品への適用を進めている。

2 EMIフィルタ技術

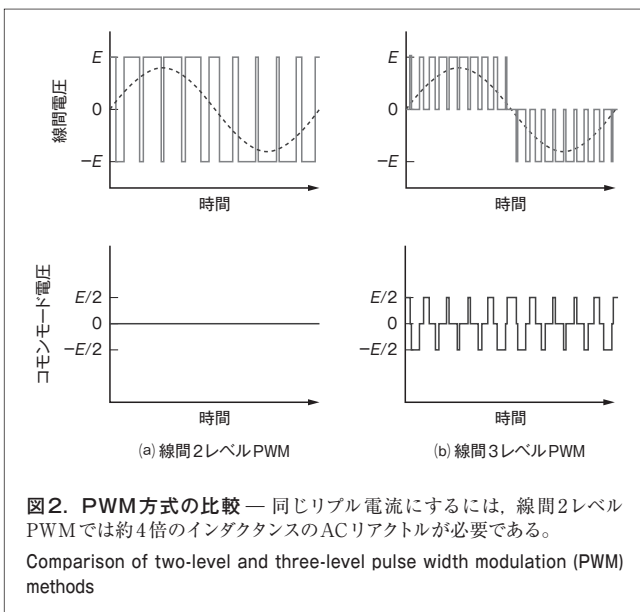
インバータから発生するノイズは、電源の相間で流れるノーマルモードノイズと、アース線などを通して大地に流れるコモンモードノイズの2種類に分類される。EMIフィルタは、この2種類それぞれに対応するフィルタが一体となって構成されている。

図1は、住宅用太陽光発電インバータなど系統連系用单相200Vの、一般的なEMIフィルタの回路を示したものである。このうちノーマルモードフィルタは、ACリアクトルと相間コンデンサで構成される。このフィルタは、EMIの規制対象周波数帯域である150kHz以上のノーマルモードノイズが系統に流れるのを抑えるほか、インバータのスイッチングによって流れる低



周波のリップル電流を抑える正弦波フィルタとしての役割も果たしている。一方、コモンモードフィルタは、電源ライン各相とアースを接続する接地コンデンサとコモンモードチョークコイルで構成される。

フィルタのノイズ抑制性能は、ACリアクトルやコモンモードチョークコイルのインダクタンス、及び相間コンデンサや接地コンデンサの容量が大きいほど、大きな効果が期待される。しかし、接地コンデンサについては、その容量が大きいと電源ラインからアースに大きな漏れ電流が流れるおそれがある。これは、例えば電源の漏電遮断器を動作させて停電を引き起こすなどの問題につながるため、接地コンデンサの容量はおのずと制限されてしまう。このため、コモンモードノイズに対しては十分な抑制効果が期待できない。その対策として、図2に示すような、線間2レベルPWM (パルス幅変調) 方式が一般的



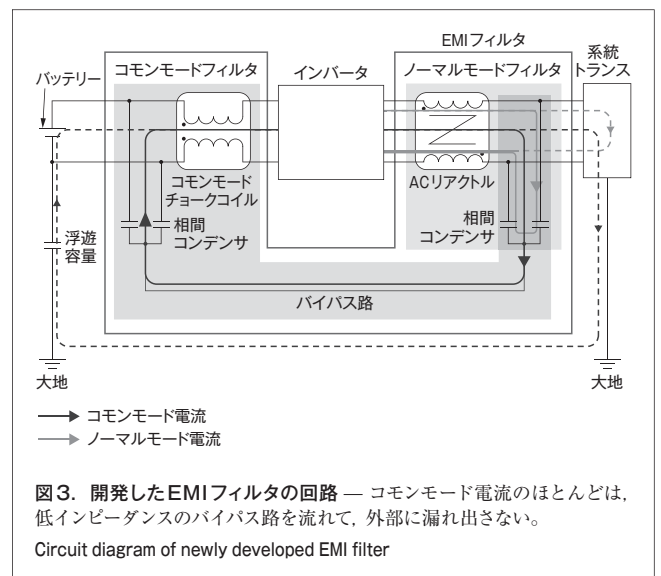
に採用されている。この方式は、線間電圧を E として、一方の相が $+E/2$ の電圧を出力する場合、もう一方の相は常に反対の $-E/2$ を出力する。コモンモードノイズの発生源となるコモンモード電圧は二つの相の出力電圧の平均値であり、この方式では基本的に0となることから、コモンモードノイズの発生そのものが小さく抑えられる。

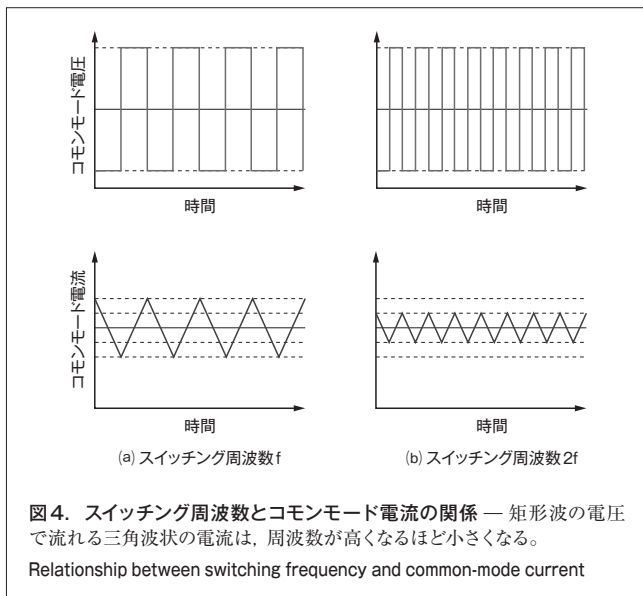
ただし、線間2レベルPWM方式は、線間3レベルPWM方式に比べると、1回のスイッチングにおける線間電圧の変化は2倍で、かつ等価スイッチング周波数は $1/2$ となるため、4倍のリップル電流が発生する。したがって、リップル電流を抑えるために、ACリアクトルのインダクタンスは4倍必要になる。インダクタンスはACリアクトルの体積に大きく関わってくるため、EMIフィルタの小型化を阻害する大きな要因になっている。

2.1 高性能な小型EMIフィルタ

新たに開発したEMIフィルタは、コモンモード電流をフィルタ内部に流して閉じ込める、専用のバイパス路を設けたことに特徴がある。その回路を図3に示すが、バイパス路は入出力のそれぞれに設けた相間コンデンサの中性点をつないで構成する。出力側の相間コンデンサは、ACリアクトルとノーマルモードフィルタも構成する。相間コンデンサの場合、大地への漏れ電流の問題が起こらないため、接地コンデンサに対して数十倍から数百倍の容量が得られる。このため、コモンモードノイズに対する抑制効果は、一般的なEMIフィルタに比べて格段に高まる。高減衰のコモンモードフィルタの実現で、従来は難しかった線間3レベルPWM方式を適用できるようになり、その結果、ACリアクトルの小型化を実現できるようになった。

また、一般的なEMIフィルタの場合、接地コンデンサを通過していったんインバータの外部に流れ出たコモンモード電流が、再びインバータの入力側へと戻ってくる。この電流は、インバータの入力端子においてEMIノイズとして観測される。太



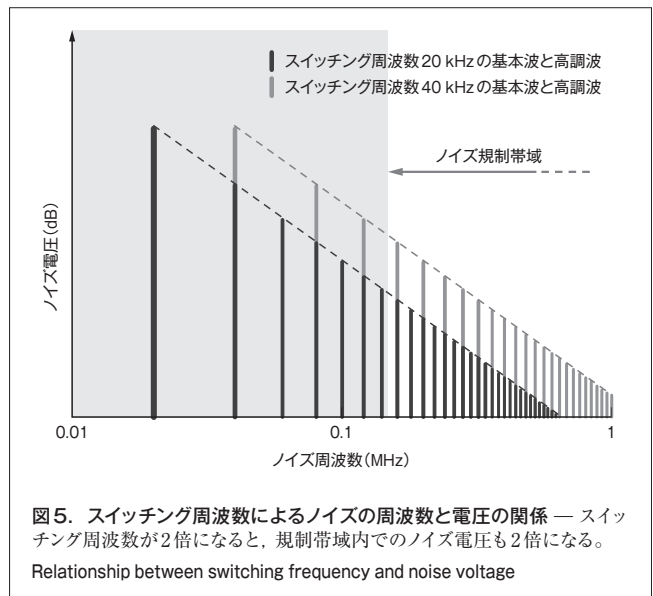


陽光発電インバータなどでは、入力端子に対してもEMIの規制があるため、別途入力側にもEMIフィルタを付けるなどの対策が必要になってくる。

一方、開発したEMIフィルタでは、コモンモード電流はフィルタ内部に閉じ込められて、インバータの外部に流れないため、このフィルター一つで、出力だけでなく入力のノイズも抑制できる。

ところで、開発したEMIフィルタでは、コモンモードチョークコイルをバイパス路の内側に配置することで、コンデンサに過大なコモンモード電流が流れ込むのを防いでいる。ただし、この位置にあることで、コモンモード電流は全て励磁電流となって通過する。従来のEMIフィルタでは、低インピーダンスの接地コンデンサに分流してコモンモードチョークコイルにはほとんど流れないが、これに比べると励磁電流に大きな差がある。このため、コアが磁気飽和しないように、励磁電流の大きさに応じた体積が必要となるが、この課題は、スイッチング周波数を上げることで解決できる。

図4は、コモンモード電圧が矩形(くけい)波と仮定した場合にコモンモードチョークコイルに流れる励磁電流を模式的に表している。周波数が高くなってスイッチングの時間間隔が短くなるほど、電流の変化分も小さくなって励磁電流が抑えられる。キャリア周波数が数kHz程度のインバータでは、コモンモードチョークコイルが大きくなりすぎるために、この方式のフィルタ回路は実現が難しかったが、最近の高周波化の流れによって小型化が可能になった。また一方で、スイッチング周波数が人の可聴周波数帯域にある場合、耳障りなうなり音が発生するため、特に太陽光発電インバータなど家庭環境で使用される機器では、この帯域を超える17~20kHz程度の高い周波数が選択される。この程度の周波数であれば、コモンモードチョークコイルの体積は十分小さくできることから、開



発したEMIフィルタは高周波のインバータに非常に適した回路と言える。

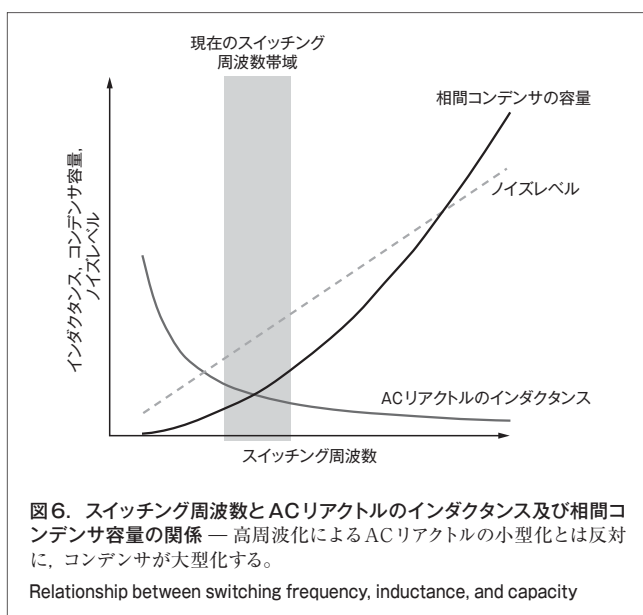
2.2 高周波化におけるEMI対策の課題

しかし、更に高周波化を推し進める場合には、特にノーマルモードでのノイズ増大への対策が大きな課題になってくる。150 kHz以上のEMI規制帯域に入るようなスイッチング周波数の高調波がノイズのスペクトルとして現れる。インバータが発生するノイズの電圧の大きさは、例えばn次の高調波であれば、スイッチング周波数である基本波のおよそ1/nとなり、より高次の成分ほどノイズレベルは低くなる。このため、図5のように、スイッチング周波数が低い場合には規制帯域に現れるノイズレベルは低いですが、スイッチング周波数が高くなるにつれて、レベルの高い、より低次の成分が規制帯域にかかってくる。

このため、EMI対策の観点からは、本来であれば高周波化に伴ってフィルタの特性を上げなければならない。しかしその一方で、リップル電流に注目すれば、高周波化によってACリアクトルのインダクタンスが下げられることによる小型化への期待も大きい。両者を成立させるには、ノーマルモードフィルタのもう一つの構成要素である相間コンデンサの容量を上げる必要がある。

図6は、スイッチング周波数fに対するACリアクトルのインダクタンスと相間コンデンサの容量の関係を表しているが、インダクタンスは1/fに、コンデンサの容量はf²に比例する。コンデンサの体積はおおむね容量に比例することから、更に高周波化を進める場合にはコンデンサが大型化してしまい、EMIフィルタの小型化に反する結果となる。

ACリアクトルに着目した高周波化による小型化のメリットについては、電気学会の論文でも報告されている⁽²⁾。しかし、いっそうの高周波化にあたっては、コンデンサも含めた検討が必要であり、更には、スイッチング損失の増加によるインバー



タの効率低下も考慮する必要がある。

3 開発したフィルタを搭載した定置式 家庭用蓄電システム“エネグーン”

図7に示したのは、開発したEMIフィルタを搭載した定置式の家庭用蓄電システム“エネグーン”である。定格出力は3kWで、蓄電池は当社製リチウムイオン電池 SCiB™ (6.6 kWh) を搭載し、2時間での急速充電が可能である。電力需要の少ない深夜などにためた電力を日中に利用することで電力需要のピークを抑制できるほか、安い深夜電力を利用するため電気代を節約でき、停電時では家庭内で電気を使うこともできる。また、太陽光発電と組み合わせることで、日中に電力をより多く使えるようになるとともに、余剰電力は電力会社に売電する



こともできる。

このような家庭環境で使われる系統連系機器に対しては、産業用機器よりも更に厳しいノイズ基準を満たすことが要求される。今回開発したEMIフィルタ搭載のエネグーンはこの基準をクリアし、一般財団法人 電気安全環境研究所 (JET) の第三者認証を取得した。

4 あとがき

今後、次世代素子の普及などによってインバータの高効率化と高周波化が加速するにつれ、EMI対策の重要性がますます高まってくる。今回は系統連系用のフィルタ回路について述べたが、回路の一部を変更することでモータドライブへの適用も可能であり、漏れ電流による障害防止を目的として東芝エレベータ (株) のスパーセル™にも採用されている⁽³⁾。

EMI対策を必要とする機器は今後ますます増えてくものと予想され、フィルタ技術の性能向上と実用化の推進でそれらの普及に貢献していく。

文 献

- (1) 餅川 宏 他. 住宅向け太陽光発電用パワーコンディショナに適した高効率インバータ回路方式. 東芝レビュー. 67, 1, 2012, p.26-29.
- (2) 荒木隆宏 他. “ワイドバンドギャップデバイスを用いたモータドライブ用PWMインバータの基礎検討”. 電子デバイス半導体電力変換合同研究会資料. 浜松, 2012-10, 電気学会. 2012, p.55-60.
- (3) 野島秀一 他. “エレベータにおける漏れ電流低減方法の提案”. 平成22年電気学会全国大会資料. 東京, 2010-03, 電気学会. 2010, p.238-239.



津田 純一 TSUDA Junichi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部主務。高調波・EMI抑制技術の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



兎山 裕史 KOYAMA Yushi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



羽田野 晃 HATANO Akira

東芝ホームテクノ (株) 機器技術統括部 機器技術部担当部長。家庭用蓄電システムの開発・設計に従事。

Toshiba Home Technology Corp.