

太陽光発電用インバータ向け eGaN® FET



Steve Colino, Michael de Rooij PhD; Efficient Power Conversion Corporation

EPCのeGaN® FETは、同等のMOSFETに比べて、同じオン抵抗 $R_{DS(on)}$ に対してデバイスが小型で、容量とインダクタンスが非常に低く、逆回復電荷 Q_{RR} がゼロという特徴があります。これは、スイッチング損失を低減するので、より高い効率、および/または、より高いスイッチング周波数を実現できます。太陽光発電 (PV: Photo-Voltaic) 用インバータのサイズとコストは、熱管理と、大きなエネルギーの蓄積とフィルタリングに使う受動素子によって決まります。効率、および/または、スイッチング周波数を高めるためにeGaN FETを使うと、システムのサイズとコストを削減できます。

生産可能で信頼性の高い耐圧600 VのGaNデバイスは、多くの企業にとって困難な挑戦でした。これは、オン状態の損失が管理可能なレベルに $R_{DS(on)}$ を低減するために、十分に大きなチップを製造することが難しかったからです。現在、最も高周波で最も効率が高いPVインバータは、DC-DCブースト(昇圧)・フロントエンド・コンバータやDC-ACインバータの中で、200 VのeGaN FETを使った4レベルのアーキテクチャを採用することで実現できます。

4レベル・インバータの動作

図1は、2段階変換の手法に基づくPVインバータの簡単な回路ブロック図です。第1のコンバータは、最大電力点追従制御回路(MPPT: maximum power point tracker)として機能し、中間リンク・バスにエネルギーを供給します。このバスは、直流電圧、または、低い周波数(商用電源の2倍)で変調された電圧です。出力インバータは、直流電圧または中間バスを、商用電源網に供給する「交流電流」に変換するために使われます。この構成を実現するために、適切な回路構成が必要になります。

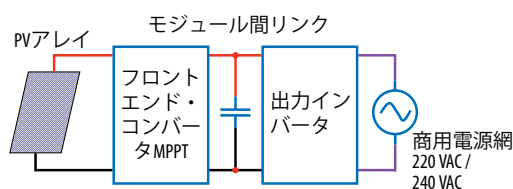


図1: 太陽光発電 (PV) インバータの簡単な回路ブロック図

4レベル・インバータの基礎は、バス電圧を3個のコンデンサで分割して、低耐圧FETの利用を可能にすることです。耐圧600 Vのデバイスの代わりに、EPC2010C [1] などの耐圧200 Vのデバイスを使うことができます。EPC2010Cは、耐圧200 VのeGaN FETで、 $R_{DS(on)}$ の最大値が25 m Ω 、ゲート電荷 Q_G は標準値で5 nC、出力容量 Q_{OSS} は40 nC、 Q_{RR} はゼロです。PVインバータは、PVアレイの広い動作範囲にわたって高いエネルギーを確実に生成するために、変換効率が非常に高いことが要求されます。eGaN FET技術は、導通損失とスイッチング損失の両方に対して、従来のIGBTやMOSFETを上回る利点があるので、PVインバータで使うための理想的な候補になります。

図2に、PVインバータでの使用に適した4レベル・ハーフブリッジ構成を示します。直流リンク・コンデンサによってバス電圧を3分割し、各レベルのトランジスタは、適切な分圧電圧にクランプされます。例えば、375 Vのバスは、各125 Vのレベルに3分割され、Q1は、D1によって最初の125 Vのレベルにクランプされることになります。出力から電流が流入すると仮定すると、Q1、Q2、Q3

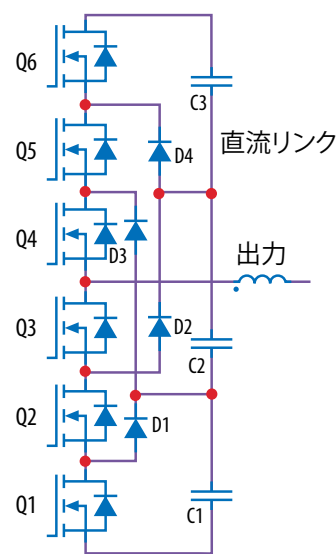


図2: 4レベルのハーフブリッジ構成

は、すべてオン、そして、Q4、Q5、Q6は、いずれもドレインからソースへの電圧が125 Vです。電流の吸い込みと吐き出しの両方の方向に対するスイッチの転流シーケンスが図3です。このシーケンスは、各デバイスに過電圧が加わらないことを保証するために必要です。スイッチング・シーケンスのタイミングは、各バス・コンデンサがスイッチング期間中のある時点で全負荷電流を流すので、バス・コンデンサの電圧バランスが確実になるように調整することができます。このタイミング・シーケンスは、シンプルな低コストのマイクロコントローラを用いて実装することができます。

そして、4レベル構成は、1個必要なフロントエンド・コンバータと、2個必要なインバータの両方のビルディング・ブロックとして使うことができます。

フリーホイール・ダイオード

図2のD1からD4は、各レベルのクランプ・ダイオードです。これらは、転流シーケンスの間に短いパルス電流が流れるだけですが、蓄積された電荷は、各サイクルの間に能動的に回復されます。逆回復損失は、特性を左右します。ダイオードの転流による逆回復損失を低減するために、SiCダ

イオードが使えます。2倍の電圧が瞬間的に出現するスイッチング条件があるので、D2、D3の場合、各バス・コンデンサの電圧の2倍の定格電圧を備えていなければなりません。ダイオードのD1とD4には、さらに Q_{RR} 損失を低減するために、eGaN FETのEPC2012C [2]のゲートを短絡して、置き換えることができます。

ZVSのスイッチング間隔で、図3に示したコンバータのボディ・ダイオードが導通している間に、最後のFETがオンしたと同時に各FETがオンすることがあります。図3に示すハード・スイッチングの場合には、すべてのデバイスが、そのボディ・ダイオードを使って確実に導通するようにするために、十分な負荷電流が存在することが分かっている場合だけ、各FETは同時にオフにすることがあります。

ゲート駆動

各eGaN FETには、それぞれのソースを基準にして4.5 V~5 Vのゲート駆動電圧が必要です [3]。絶対最大ゲート駆動電圧は6 Vなので、各ゲート駆動の電圧源を安定化するように注意しなければなりません。基本的なブートストラップは、フローティング状態のFETのそれぞれに使われますが、Q5とQ6のソースは、決して接地レベルにならないので、ブートストラップは、図4に示すように、十分なゲート駆動電圧を提供するために、カスケード接続されなければなりません。eGaN FETのゲート・ドライバである米テキサス・インスツルメンツ社のUCC27611 [4]は、5 Vのレギュレータを内蔵し、吐き出しと吸い込みの独立した駆動端子を備えているので、このアプリケーションに最適です。UCC27611の回路ブロック図が図5です。

各ゲートを駆動するための信号は、所望のスイッチング速度に対して、十分に高い dv/dt 特性でバス電圧を超えて高く振れなければなりません。米シリコン・ラボラトリーズ社のSi8610BC [5]は、デジタル・アイソレータで、同様の条件の下で使える200 Vのハーフブリッジ開発基板EPC9003 [6]に搭載されています。

熱管理

2.4 kWを供給するハーフブリッジの効率は、150 kHzで98%と見積もられています。消費電力は、各ハーフブリッジの6個のデバイスにわたって広がっているので、熱管理が容易です。ウエハ

レベルのパッケージは、基板の中へ、および表面から外への両方で効果的な熱の経路を提供します [7]。最善のシナリオは、表面に引かれる熱と共に、基板を介して周囲への効果的な熱の経路を持っていることです。

同期整流型ブースト・コンバータまたはDC-ACインバータ

この200 VのeGaN FETベースのマルチレベル・ハーフブリッジは、同期整流型ブースト・コンバータ、またはインバータのいずれかで使うことがで

きます。転流のタイミングは両方とも同じなので、コントローラのプログラミングでは、余計な作業をしなくても良くなります。

まとめ

窒化ガリウムは、低容量、低インダクタンス、 Q_{RR} がゼロ、小型という基本的な利点を備えています。今、マルチレベル構成のEPC2010Cを使えば、ヒートシンク、エネルギーの蓄積、および全体的な太陽光発電用インバータのサイズを小さくするために、これらの利点を活用することができます。

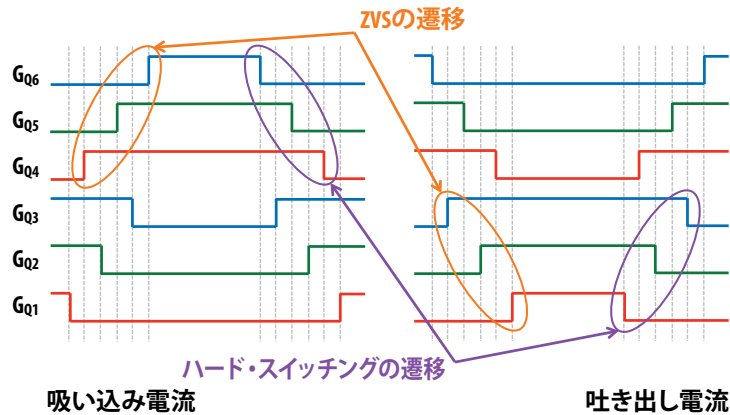


図3: トランジスタのスイッチング・シーケンス

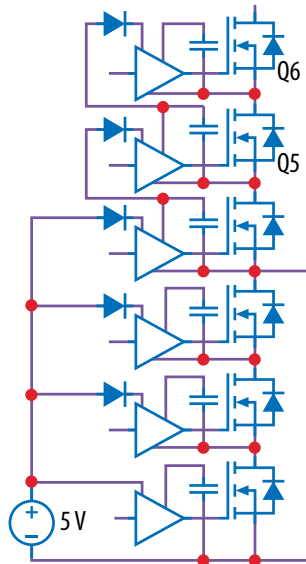


図4: マルチレベルのeGaN FETのゲート・ドライバ

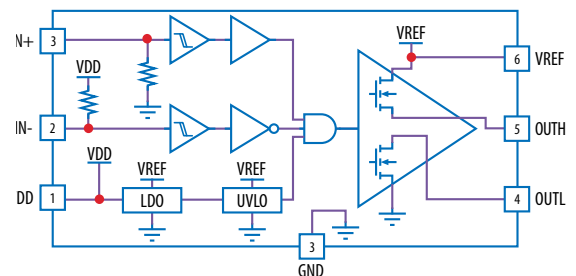


図5: UCC27611の回路ブロック図

References:

- [1] EPC2010C datasheet, <https://epc-co.com/epc/jp/製品/gan-fetとic/epc2010c>
- [2] EPC2012C datasheet, <https://epc-co.com/epc/jp/製品/gan-fetとic/epc2012c>
- [3] S. Colino, B. Bell, Y. Xi, "Gate drive design for enhancement-mode GaN FETs", EETimes, September, 2011, https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279058
- [4] UCC27611 datasheet, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc27611.pdf>
- [5] Si8610BC datasheet, <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si8610-2x.pdf>
- [6] EPC9003C Quick Start Guide, https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/EPC9003_qsg.pdf
- [7] J. Stridom, "eGaN® FET- Silicon Power Shoot-Out Volume 8: Envelope Tracking", Power Electronics, April, 2012, <https://powerelectronics.com/gan-transistors/egan-fet-silicon-power-shoot-out-volume-8-envelope-tracking>