

特集に寄せて

Wide Bandgap Power Semiconductors –
Revolution or Evolution for the Energy Transition?ワイドバンドギャップパワー半導体
—エネルギー転換の革命か進化か—

De Doncker, Rik W

Professor and Director Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA),
Director E.ON Energy Research Center and Research Campus Flexible Electrical
Networks (FEN), RWTH Aachen University, Germany

In retrospect, I was undeniably overly optimistic when I wrote in my 1981 master thesis on Power Supplies for Pulsed Power Systems that it would take just one more decade to have wide bandgap devices commercially available as a better alternative to silicon devices for such high energy pulse applications. Today, we must recognize that it took three decades to receive even workable samples. Now, 43 years later, SiC power MOSFETs and GaN HEMTs are commercially available with static and dynamic performance characteristics that outperform silicon devices.

At present, primarily the voltage rating determines the type of wide bandgap material that is used in a given application. Whereas, GaN HEMT power devices can operate close to GHz switching frequencies with breakdown voltages up to 800 V, SiC MOSFET devices are available having 1.2 kV, 3.3 kV up to 10 kV breakdown voltages. Hence, when looking at vehicle electrification, grid and energy management applications, next to silicon IGBTs, SiC MOSFETs are currently the only practical alternative power semiconductor for 400 V_{ac} low-voltage grid applications, 400 V_{dc} or 800 V_{dc} battery electric vehicles, as well as medium-voltage² distribution AC and DC grid connected converter applications. Compared to silicon IGBTs, SiC MOSFETs offer voltage switching speeds that are at least 20 to 30 times faster than IGBTs. Indeed, although converter designers were dreaming of ever faster switches, power devices with switching speeds up to 150 kV/μs or 150 V/ns were not even imaginable a decade ago. Theoretically, ignoring parasitic effects caused by stray capacitances and inductances, faster switching enables higher switching

■和文翻訳（富士電機にて作成）

振り返ってみると、1981年に執筆した修士論文において、あと10年もあれば、高出力用途において、ワイドバンドギャップパワー半導体がSiデバイスよりも高性能な代替品として市販されるようになるだろうと書いたが、それは間違いなく楽観的すぎた。動作サンプルの入手まで30年を要し、43年経った現在では、Siデバイスを静特性、動特性において凌駕する性能のSiC-MOSFETとGaN-^(注1)HEMTが市販されている。

現在のところ、ワイドバンドギャップパワー半導体の材料は、用途ごとに主に定格電圧によって決定される。GaN-HEMTは、耐圧は800Vまでで、GHz近くの周波数でスイッチングが可能である。一方、SiC-MOSFETは1.2kV、3.3kV、さらに10kVまでの耐圧を備えているものが市販されている。したがって、車両の電動化や電力系統制御の用途では、Si-IGBTの次世代デバイスとして今のところ、SiC-MOSFETが唯一の実用可能なパワーデバイスであり、AC400V電圧系統、電気自動車DC400V/800V系統、さらにACおよびDCの中電圧^(注2)系統への電力変換器などの用途で使用されている。Si-IGBTと比較して、SiC-MOSFETは少なくとも20倍から30倍のスイッチング速度で動作する。電力変換回路の設計者は高速スイッチング速度を持つデバイスの出現を期待していたが、150kV/μs（もしくは150V/ns）のような高速スイッチング速度を持つようなパワーデバイスは、10年前には想像すらできなかった。理論的には、浮遊容量・インダクタンスに起因する寄生効果を見れば、高速スイッチングにより高周波化を実現できる。高周波化により、インダクタ、変圧器、コンデンサなどの受動部品の小型化と軽量化が可能となる。体積・質量の低

1 HEMT – High electron mobility transistor. GaN HEMTs are currently lateral devices.

2 Medium-voltage starts at 1,000 V_{ac} or 1,500 V_{dc} according to IEC standards

〈注1〉HEMT：高電子移動度トランジスタ。GaN-HEMTは現在横型デバイスである。

〈注2〉IEC規格によると、中電圧はAC1,000VまたはDC1,500V以上

frequencies. Higher switching frequencies potentially leads to smaller and lighter passive components, such as inductors, transformers and capacitors. Reduction of volume and weight is of particular interest in road vehicle and aerospace applications. With proper low-inductive design of the device package and converter lay-out, faster switching leads to lower switching losses. In addition, as MOSFETs have no forward threshold voltage, their conduction losses at partial load operation tend to be lower than those of IGBTs. Hence, applications which value high efficiencies over a wide operating range, such as PV inverters, heat pumps inverters, high-speed propulsion drives potentially benefit from SiC MOSFETs. Nevertheless, to be commercially successful, the higher cost of SiC versus silicon devices must be offset by a reduction of costs of passive components, cooling systems and energy consumption.⁽¹⁾

No doubt, effective use of the aforementioned fast switching characteristics of wide bandgap semiconductors leads to converter designs that have much higher power densities than what was achievable with silicon devices. For example, a two-phase 800 V_{dc} to 400 V_{dc} synchronous buck-boost SiC automotive DC-to-DC converter switching at 500 kHz was demonstrated with a volumetric power density reaching 100 kW/dm³, whereas the three-phase silicon IGBT variant switching at 20 kHz reached a power density of merely 4 kW/dm³⁽²⁾. To achieve such extraordinary results, many aspects of the circuit had to be reengineered. To lower stray inductance not only the package design and placement of the SiC chips but also an ultra-compact lay-out of the converter had to be realized to lower the overall stray inductance of the converter, in an attempt to reduce over-voltage spikes and high-frequency ringing during the fast switching of SiC MOSFETs. Novel compact 3D-printed liquid cooled heatsinks and 3D-printed bobbins to shape the foil windings of the inductors and intelligent gate drivers that switch smoothly the SiC MOSFETs in picoseconds were developed to operate the SiC MOSFETs at their thermal limits under hard-switching conditions. In practice, circuit designers often slow down significantly the switching transients of SiC MOSFETs in hard-switching converters to limit over-voltage spikes, diode reverse recovery stress and reduce EMI³ high-frequency ringing noise. The latter in an attempt to reduce the cost of EMI filters.⁽⁷⁾ However, in doing so the potential efficiency advantages of SiC devices switching at high frequencies compared to silicon IGBTs switching at lower frequencies are par-

減は、自動車や航空分野への用途において特に重要である。低インダクタンスに設計したパッケージと変換回路レイアウトを用いると、スイッチングの高速化はスイッチング損失の低減につながる。さらに、MOSFET は、動作時にビルトイン電圧がなく、低負荷時の導通損失は IGBT よりも低くなる傾向にある。したがって、太陽電池用インバータ、ヒートポンプ用インバータ、高速駆動システムなど、広い動作範囲にわたって効率を重視する用途において、SiC-MOSFET が有利になる可能性がある。しかしながら、SiC は、Si デバイスと比べて高コストであり、商業的にも成功するには、コスト差を受動部品や冷却システムの削減やエネルギー効率上昇によるシステムコスト低減などで相殺する必要がある。⁽¹⁾

前述したワイドバンドギャップパワー半導体の高速スイッチング特性を活用することで、Si デバイスで実現してきたものよりもはるかに高い電力密度を持つ変換回路設計が可能になる。例えば、DC800 V から DC400 V 対応の二相式同期 SiC 車載昇降圧 DC-DC コンバータはスイッチング周波数 500 kHz で動作し、電力密度が 100 kW/dm³ に達する。一方で、三相式 Si-IGBT コンバータではスイッチング周波数が 20 kHz で 4 kW/dm³ の電力密度に留まる。⁽²⁾ SiC 搭載変換器において、このような高電力密度を得るためには、変換回路を多方面から再設計する必要があった。浮遊インダクタンスを低減するには、SiC チップのパッケージ設計と配置だけでなく、変換回路の超小型レイアウトを実現して変換回路全体の浮遊インダクタンスを低減しなければならなかった。その結果として、SiC-MOSFET の高速スイッチング中の過電圧スパイクや高周波リングが低減した。3D プリントによる斬新で小型の水冷冷却器やインダクタのアルミニウム巻き線を成型するためのボビン、そして、SiC-MOSFET をピコ秒で滑らかにスイッチングするゲートドライバ⁽⁵⁾⁽⁶⁾を開発して、SiC-MOSFET をハードスイッチング条件下の熱的限界点で動作させている。実態としては、回路設計者は、ハードスイッチング回路において、SiC-MOSFET のスイッチング速度を大幅に減速させて、過電圧スパイクやダイオードの逆回復ストレスを抑制し、さらに^(注3)EMI 高周波リングノイズを低減させることが多い。後者は EMI フィルタ⁽⁷⁾のコストを削減するためである。しかし、そうすることで、Si-IGBT に対する、SiC の高周波スイッチング特性を生かした効率面の優位性が失われてしまう。どのような用途で、ワイドバンドギャップパワー半導体の特性を生かすことができるのかという疑問は依然として残っている。これらのとおり、ワイドバンドギャップ半導体製品の商業的に成功に至るまでには、まだエンジニアリング的な作業が残っている。

3 EMI – Electromagnetic interference. Wide bandgap devices can produce conducted EMI beyond 30 MHz, requiring more sophisticated filter designs.

〈注3〉 EMI：電磁障害。ワイドバンドギャップパワー半導体は、30 MHz を超える伝導性 EMI を発生させる可能性があり、より高度なフィルタ設計が必要になる。

tially lost. Hence, the question when and where to use wide bandgap devices is a valid one. Consequently, it remains an engineering task to have a commercially successful product.

Clearly, soft-switching converters, predominantly DC-DC converters, such as dual active bridge converters⁽⁸⁾, which use the stray capacitance of the semiconductor as a resonant capacitor thereby greatly decoupling the circuit stray inductance from the device package stray inductance, avoid to great extend the aforementioned EMI and overvoltage spike issues. Hence, soft-switching or quasi-resonant DC-DC converters can push wide-bandgap semiconductors up to their limits. Compact single and three-phase on-board AC-to-DC chargers are being installed in plug-in hybrid and full electric vehicles. SiC based converters are finding their way in compact DC fast charging stations that can charge 400 V_{dc} or 800 V_{dc} batteries at power levels ranging from 50 kW up to 350 kW. Work is ongoing to develop charging stations that can charge batteries of trucks and small all-electric aircraft up to 3 MW. The target is to charge a 500 kWh battery in just about 15 min.

Whether wide bandgap devices will replace IGBTs in inverters for propulsion systems of passenger electric vehicles, where the maximum speed is around 18,000 rpm is still an open question. Three-phase rotating field machines with (expensive) multi-slot, two-layer wave windings, which are typically used in induction machines and permanent magnet synchronous machines, do not require elevated switching frequencies to fulfil the acoustic noise and efficiency requirements. Actually, the lower the switching frequency, the more efficiently the drive operates. On the other hand, low-cost machines with block windings, such as switched reluctance machines, are prone to produce annoying tonal acoustic noise as they excite much stronger the so-called zero-breathing vibration mode of the stator⁽⁹⁾. These vibration modes have eigenfrequencies that are an order of magnitude higher than the fundamental frequency of the machine, i.e. up to 4 kHz. Algorithms have been developed that actively dampen such vibration modes reducing the emitted noise by 20 dB, making a low-cost machine nearly as quiet as a rotating field wound machine⁽¹⁰⁾. However, to compensate effectively 4 kHz vibrations SiC inverters switching at frequencies around 40 kHz and higher are needed. Hence, it can be anticipated that mass production of e-Axles drives, i.e. the integration of high-speed machine, inverter and gearing system, are implemented based on low-cost high-speed machines (up to 30,000 rpm) using SiC inverters that actively control smooth torques and dampen the stator vibrations that cause most acoustic noise.

デュアルアクティブブリッジコンバータ⁽⁸⁾など、主に DC-DC コンバータとして使用されるソフトスイッチング変換器は、半導体の浮遊容量を共振コンデンサとして使用しており、それによって回路の浮遊インダクタンスはデバイスパッケージの浮遊インダクタンスから切り離され、前述の EMI および過電圧スパイクは大きな問題にはならない。したがって、ソフトスイッチングまたは疑似共振による DC-DC コンバータは、ワイドバンドギャップ半導体の性能を限界まで引き出すことができる。小型の単相式および三相式車載 AC-DC 充電器がプラグインハイブリッド車や電気自動車に搭載されている。SiC 搭載変換器は、50 kW から 350 kW の範囲で DC400 V または DC800 V のバッテリーを充電できる小型 DC 急速充電ステーションに適している。さらに、3 MW までのトラックや小型電動航空機のバッテリーを充電できる充電ステーションの開発が進められており、500 kWh のバッテリーを約 15 分で充電することを目標としている。

ワイドバンドギャップパワー半導体が、最高約 18,000 rpm の乗用電気自動車で使用される駆動用インバータにおいて、IGBT を置き換えるか、未だ議論が続いている。誘導機および永久磁石同期機などで使用される（高価な）マルチスロット二層波巻線を備える三相回転機は、ノイズや効率の要件を満たすために、スイッチング周波数を上げる必要がない。実際、スイッチング周波数が低いほど、モータドライブ装置の効率が上がる。一方、スイッチトリラクタンス機のようなブロック巻線を有する低コストの回転機は、固定子のいわゆるゼロブリージング振動を強く励起するため、不快な騒音を発生する傾向がある⁽⁹⁾。この振動モードの固有振動数は、回転機の基本周波数より一桁高い最大 4 kHz となる。このような振動モードをアクティブに減衰させるアルゴリズムが開発されており、騒音を 20 dB 低減し、低コストの回転機を巻線形の回転機とほぼ同等にまで静音化する⁽¹⁰⁾。しかし、4 kHz の振動を効果的に補償するためには、スイッチング周波数が約 40 kHz 以上の SiC インバータが必要となる。したがって、高速回転機、インバータおよびギア機構を一体化した e-Axles 量産化時には、滑らかなトルク制御と騒音の主要因となる固定子振動を減衰させる SiC インバータ駆動の低コストな高速回転機（最高 30,000 rpm）が適用されると予想される。

References

- (1) A. Stippich et al., “Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles,” in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol.2, no.4, pp.249-258, December 2017, doi: 10.24295/CPSSPEA.2017.00023.
- (2) A. Wienhausen, “High integration of power electronic converters enabled by 3d printing,” PhD Thesis RWTH Aachen University, 2019, DOI: 10.18154/RWTH-2019-08746.
- (3) A. Stippich, “Exploiting the full potential of silicon carbide devices via optimized highly integrated power modules,” PhD Thesis RWTH Aachen University, 2021, DOI: 10.18154/RWTH-2021-08122.
- (4) C. Luedecke, “Compensating asymmetries of parallel-connected SiC MOSFETs using intelligent gate drivers,” PhD Thesis RWTH Aachen University, 2022, DOI: 10.18154/RWTH-2022-09587.
- (5) G. Engelmann “Reducing device stress and switching losses using active gate drivers and improved switching cell design,” PhD Thesis 2018 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2018-228973.
- (6) J. Henn, “Gate driver integrated closed-loop control for electromagnetic emissions and switching losses of wide bandgap power electronic converters,” PhD Thesis 2022 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2023-07726.
- (7) K. Oberdieck, “Measurement and mitigation of electromagnetic emissions of propulsion inverters for electric vehicles,” PhD Thesis 2020 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2020-09215.
- (8) M. Neubert, “Modeling, synthesis and operation of multiport-active bridge converters,” PhD Thesis 2020 RWTH Aachen University, 10 kV SiC MOSFETs for 5 kVdc to +/- 375 Vdc DAB converter, DOI: 10.18154/RWTH-2020-10814.
- (9) A. Hofmann, F. Qi, T. Lange and R. W. De Doncker, “The breathing mode-shape 0: Is it the main acoustic issue in the PMSMs of today’s electric vehicles?,” 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China, 2014, pp. 3067-3073, DOI: 10.1109/ICEMS. 2014. 7014021.
- (10) A. Klein-Hessling, A. Hofmann and R. W. De Doncker, “Direct instantaneous torque and force control: A novel control approach for switched reluctance machines,” 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Coeur d’Alene, ID, USA, 2015, pp. 922-928, DOI: 10.1109/IEMDC. 2015. 7409171.





＊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。