

特集に寄せて (5 ページに “和文翻訳” 掲載)

## Preface to the Special Issue on “Power Electronics”

Johann W. Kolar

Professor, Swiss Federal Institute of Technology Zurich  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich



Raising the efficiency of energy use and increasing the integration of renewable energy in energy production are today mandatory goals of the energy policy of leading industrial nations. In the case of electrical energy, power electronics, i.e. the electronic control of power flows and the conditioning of electrical voltages and currents by means of high switching frequency power semiconductors represents a key technology in this context. Examples are the feeding of photovoltaically generated DC energy into AC grids with simultaneous assurance of solar cell operation at the maximum power point, and the minimization of transmission losses on the connection of windparks to geographically distant load centres by means of high-voltage DC transmission. On the other hand one should mention here the possibility of avoiding inefficient industrial processes by means of a controllable voltage that is flexible with regard to amplitude and frequency which, e.g., enables high efficiency, variable speed drives to be realized with controlled torque.

Because of the abovementioned advantages, power electronics converters exhibit a considerable variety of application possibilities and over the past few decades have been significantly improved by the continuous development of power semiconductor technology, the employment of digital signal processing, new converter topologies and modulation and control schemes in respect of functionality, cost/performance ratio, physical size and efficiency. In spite of the high state of the technology thus attained, there still exists a demand for a massive further increase in performance, whereby typically not only one performance index but simultaneously several objectives need to be improved, e.g. efficiency and size or costs and efficiency.

New component technologies such as wide band-gap, i.e. SiC and GaN power semiconductors offer a technological basis for the above but because of the high switching speed, this must be complemented by new packaging technologies. Integration of the gate

driver and the power switch is obvious here and in future will also enable programming of the switching behaviour as well as local monitoring. Further enablers are new joining technologies in power semiconductor modules, such as the replacement of soldering by low temperature silver sinter processes, whereby higher operating temperatures and/or lower cooling effort become possible. With regard to passive components one should mention new ceramic capacitor technologies with high energy density and current rating, and new heat management processes such as double-sided cooling and local two-phase cooling. Finally, the technology and design space will be extended by an even broader implementation of digital technology: on the one hand in converter control, and on the other hand for identification procedures as basis for optimal on-line controller parametrization. Furthermore, in the field of power supplies a transition from hard-switching converters operated in continuous current mode is to be expected to converters with discontinuous or triangular-shaped current curves and soft switching; the higher conduction losses compared with continuous current flow are here compensated by the low on-state resistances of new power semiconductors. In order to limit the EMC filtering effort, it is then sensible to employ phase-shifted operation of several systems working in parallel, i.e. interleaving, by means of which a continuous current curve again results. The overall more complicated modulation in this case can be managed through the continuous further development of digital technology (Moore's Law) by means of signal processors or FPGAs.

Furthermore, as always with the further development of established technologies, increased integration of partial functions will take place on all levels. For example, on the converter level integration of motor and inverter is advantageous as it allows an optimal design of an overall system and an easier application for the user. Finally, the further development of simulation tools should be mentioned, which will facilitate a multi-

domain analysis of power electronics converters, e.g. the simultaneous examination of electrical and thermal or magnetic and thermal issues. The challenges here lie mainly in model generation and parametrization.

The present Special Issue of Fuji Electric Review offers for the abovementioned points many direct examples in the form of finished products, e.g. an all-SiC PV inverter of high power, optimized with respect to efficiency and costs, a hybrid Si-SiC inverter traction converter of high efficiency and power density, a variable speed drive for air conditioners with inverter integrated in the motor to reduce size and costs, a new motor series optimized for efficiency, and uninterruptible power supplies with new T-type three-level topology. The significant improvement in performance obtained with these industrial systems over the state-of-the-art impressively confirms the highly dynamic technological progress in power electronics and a comprehensive practical mastery of an extremely broad technology spectrum.

Despite of the very high technological level now attained, the improvement of the performance of power electronics will continue in future. The next development step will presumably focus on cost reduction and the assurance of high reliability and robustness. New production technologies such as the encapsulation of power semiconductors, optical signal paths and heat removal devices in printed circuit boards and 3D additive manufacturing technologies will enable new geometries or increased multifunctional uses of construction elements. The highly integrated and highly compact systems, however, will then require convergence of simulation and measurement procedures in order to simulate no longer measurable quantities on the basis of adapted models directly accompanying measurement.

With regard to the fields of application of power electronics, we can expect an expansion of the present areas to direct coupling to medium voltage with isolated medium frequency converters, e.g. for the

supply of DC distribution systems. At the same time, in the low power area, with utilizing microelectronics manufacturing technologies, a new branch of power electronics will be established that may be termed micro-power electronics. Finally, with the increasing spread of power electronics, one will need to consider during the design process not only minimal manufacturing costs but also the support of recyclability in order to enable a resource-conserving circular economy to be established. Considerations regarding materials use and costs should then also be addressed in academic research, as has been the case for several years at the Power Electronic Systems Laboratory at ETH Zurich.

In conclusion it should be highlighted that in central fields of application, a paradigm change is to be expected from the consideration of a single converter to the design of entire power supply chains. The demand for efficient power conversion at any given instant will be replaced by the demand for the assurance of an efficient and reliable energy supply with minimal overall costs over the lifetime of a power supply system. At the same time, apart from the analysis of the detailed functioning of converters, the investigation of interactions of converters, e.g. in micro and pico-grids will also gain significantly in importance. The power electronics converter will then become a standardized functional block, similar to integrated circuits in analogue and digital technology, which several decades ago arose from discrete circuits. The realization of smart grids and ultimately smart multi-energy carrier grids, which apart from electrical energy also integrate other energy carriers, will hence be supported to a significant extent. The necessary expansion of technological competence from the components to the system and in addition to other disciplines apart from power electronics, however, presents a massive challenge, but on the other hand offers fascinating possibilities for creativity, technological innovation and ultimately economic success!

特集に寄せて (3 ページに“原文”掲載)

## パワーエレクトロニクス機器の特集に寄せて

Johann W. Kolar

スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) 教授

エネルギーの利用効率の向上、および再生可能エネルギーの普及と促進は、今日では主要工業国のエネルギー政策における必達目標となっている。このような状況下において電気エネルギーでは、高周波スイッチングパワー半導体による電力制御と電圧や電流の品質の調整を行う、パワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術が重要となっている。例えば、太陽光発電では最大電力点追従により最高発電効率で直流エネルギーを交流グリッドに送ることや、風力発電では長距離送電に起因する送電ロスを高圧直流送電によって削減することが挙げられる。その一方で、出力電圧と周波数を自由に制御できるコンバータにより、高効率なトルク制御可変速ドライブが実現でき、産業プロセスを効率化できる。

以上のような利点から、パワエレ技術を使ったコンバータは非常に広い応用範囲があり、過去数十年にわたるパワー半導体技術の継続的な発展、デジタル信号処理の採用、新しいコンバータのトポロジと変調方式の採用によって、機能性、コストと性能のバランス、装置サイズと変換効率が大幅に向上してきている。このように高い性能が達成されているにもかかわらず、大幅な性能向上に対する要求が尽きることはなく、一つの性能指標のみならず、例えば変換効率とサイズ、またはコストと効率といった複数の性能指標を同時に改善する必要がある。

SiC (炭化けい素) および GaN (窒化ガリウム) のようなワイドバンドギャップパワー半導体を使った新しいデバイス技術は、先に述べたような性能を向上する上で技術的な基盤を提供するものである。同時に、スイッチング速度が速いために新しいパッケージ構造などの新技術が必要となる。さらに、ゲートドライバとパワー半導体スイッチの一体化によって、将来的には、装置のローカルモニタリングに加えて、スイッチング挙動の制御が可能となるであろう。さらなる性能向上のためのキーテクノロジーとして、はんだ接合に代わる低温銀焼結プロセスなどのパワー半導体モジュールにおける接合技術などがある。これによってより高い温度における動作や冷却構造の簡略化が可能になる。受動部品に関しては、高エネルギー密度と高電流定格

を備えた新しいセラミックコンデンサ技術と、両面冷却や気液二相冷却などに代表される新しい冷却技術について注目しておく必要がある。コンバータそのものの制御やオンラインで最適な制御パラメータを決定するための基盤技術としてのデジタル制御技術は、より大きな広がりを見せるだろう。さらに電源分野においては、電流連続モードで動作させるハードスイッチングコンバータから、電流不連続モードまたは電流臨界モードで動作させるソフトスイッチングコンバータへの移行が期待されている。電流不連続モードで問題となる高い導通損失は、次世代パワー半導体の低いオン抵抗によって改善される。EMC フィルタを設計する場合には、複数のシステムを並列に動作させる位相シフト型システム、すなわちインターリーブ型のコンバータの採用が考えられるが、これは電流連続モードで動作するため慎重な選択が必要である。これらの複雑な変調方式の採用は、DSP (Digital Signal Processor) または FPGA (Field Programmable Gate Array) などのデジタル制御装置のさらなる性能向上 (ムーアの法則) により容易になるだろう。

確立された技術のさらなる開発に伴い、機能の統合が全てのレベルで行われることになる。例えば、装置レベルの統合においては、モータにインバータを統合することにより装置全体の最適設計を可能にするのみならず、ユーザの利便性を向上することができる。最後に付け加えたいのは、装置特性の多面的な解析を容易とするための、電気-熱特性や磁気-熱特性を同時に解析可能なシミュレーションツールの開発の重要性である。ここでの課題は、主に部品のモデル化と正しいパラメータの抽出にある。

本特集号では、上述のコンバータの性能向上に関して多くの適用事例を紹介している。例えば、効率とコストに関して最適化された高出力の All-SiC モジュールを搭載した太陽光発電向けパワーコンディショナ (PCS)、高効率で高密度の Si-SiC ハイブリッドモジュールを搭載したインバータ、サイズとコストを抑えるためのモータに一体化されたインバータ付きエアコン用可変速ドライブ、効率について最適化されたモータの新シリーズ、RB-IGBT を適用

した T- タイプの 3 レベルトポロジーを採用した無停電電源装置 (UPS) などがある。これらの最先端の産業システムにおける性能の大幅な向上は、パワエレにおけるダイナミックかつ高度な技術的進歩、ならびに極めて広範囲な技術要素の獲得が総合的かつ実践的に達成されたことを深く印象づけるものである。

既に非常に高い技術的レベルに到達しているパワエレ分野だが、今後も性能は継続して改善されるであろう。次の開発ステップとしては、おそらくコスト低減、高信頼性とロバスト性の確保に焦点が当てられることになる。プリント基板へのパワー半導体、光信号経路、放熱デバイスのパッケージ化技術や、3D プリントなどの新しい生産技術が、コンバータを構成する要素や素材を多機能化し、性能向上に貢献するだろう。ただし、高度に集積化された非常にコンパクトなシステムでは、直接測定できない信号を観測するために、シミュレーション技術と測定技術が統合された、動的な信号推定技術が必要となるだろう。

パワエレの応用分野に関しては、例えば直流給電システムに代表される中圧絶縁型コンバータのさらなる発展が期待できる。同時に、低容量領域では、マイクロエレクトロニクス技術を活用して、名付けるなら、マイクロパワーエレクトロニクスと呼ばれる新しいパワエレの分野が確立されるだろう。さらに、パワエレ機器のさらなる普及に伴い、循環型社会実現へ貢献するために、設計プロセスにおいて製造コストの削減のみならずリサイクル性まで考慮する必要が出てくるだろう。これら使用材料のコストや特性に関する研究は、大学においても研究すべきものであり、実際、スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETHZ) のパワーエレクトロニック・システムズ・ラボラトリー (PES) では数年間研究を行ってきた。

結論として、これからの応用分野の中心として期待されるのは、単一のコンバータのみを考慮した設計から給配電系統全体を考慮した設計へのパラダイムシフトである。いついかなる時でも効率的に電力変換を行うという要求は、電源システムのライフサイクルコストが最小で、効率的かつ信頼性の高いエネルギー供給を保證するという要求に

置換えられることになる。それと同時に、単一のコンバータの詳細な機能の分析とは別に、例えばマイクロおよびピコグリッドシステム内のコンバータ同士の相互作用に関する研究の重要性も大きく増すであろう。数十年前にディスクリート部品で構成されていた電子回路が集積化され単一パッケージの IC・LSI へと変化したように、今後はパワエレにおけるコンバータも標準化された機能ブロックへの集積化・パッケージ化が進むだろう。スマートグリッドや、電気のみならず複数のエネルギー媒体を用いる超スマートグリッドは、これら次世代のパワエレ技術によって強力にサポートされるだろう。部品からシステムへの、またパワエレから他分野への技術的拡大の実現には多くの難題が存在する。一方でそれらは、創造性を高め、技術革新を起こし、そして最終的には経済的成功を収めるための魅力ある挑戦である！

(社内にて翻訳)



\*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。