

パワー半導体の進化と通信用電源

株式会社NTTファシリティーズ 総研本部
研究開発コンサルティング部
EHS&S研究センター 上級研究員
山下 隆司

パワー半導体の進化が通信用電源にどのような影響を与えてきたかについて、これまでの流れと今後の方向性について述べてみたい。パワー半導体は通信用電源の中でも電力変換装置の性能向上に大きく影響している。電力変換装置の性能向上とは、主に変換効率の向上（変換に伴う損失の低減）と小形・軽量化である。

通信用電源における代表的な電力変換装置は、商用交流電源から直流 48V に変換して蓄電池を充電しながら、負荷設備（通信装置）に給電するための整流装置である。しかし以前の本コラムでも述べたように、初期の通信用電源では充電した電池によって負荷設備に直接給電していた。蓄電池の放電時間が半日～1日と長く電圧低下が緩やかであり、負荷設備の電源電圧変動に対する要求も厳しくなかったため、蓄電池電圧をそのまま使用していた。

その後、大容量のため広い設置場所が必要な蓄電池による直接給電から、蓄電池の容量を削減できる浮動充電方式による給電（蓄電池を充電しながら負荷設備に給電）が採用され、浮動充電方式導入の初期には、充電用に商用交流電源で動作する電動発電機が用いられていた。1955年以降になると、半導体による整流素子（整流器またはダイオードとも言う）が開発されたことによって、商用交流電源を変圧器で降圧し、整流素子で直流に変換する整流装置に置き換わっていった。

1955年に導入された最初の整流装置で用いられたのがセレン整流器（セレン整流素子）である。商用交流電源の周波数である 50Hz または 60Hz で動作する変圧器と、セレン整流器、セレン整流器で整流した脈流（変動の大きい直流電圧）を平滑化する出力フィルタ（インダクタとコンデンサ）で構成されていた。出力電圧を一定値に制御するためには可飽和リアクトルが用いられていた。商用交流電源の周波数で動作する変圧器、交流電源の周波数成分の電圧変動を平滑化するインダクタとコンデンサ、出力電圧を制御する可飽和リアクトルは体積・重量が大きく、セレン整流器の電力損失による温度上昇を抑えるための放熱フィンも大きな体積を占めていた。

セレン整流器は素子単体での耐電圧が 30V 程度と小さく、耐圧を稼ぐため多数の素子を直列接続していたため、整流時の電圧降下による損失が大きく、放熱フィンを含めた体積も大きかった。1958年には、耐電圧が 150V 程度と高いゲルマニウムダイオードを用いた整流

装置が導入され、さらに1960年には耐電圧が数100V以上のシリコンダイオードを用いた整流装置が導入開始となった。ゲルマニウムダイオードはセレン整流器と比べて整流時の電圧降下が小さいため、発生損失が低減でき、放熱フィンの体積も減少できた。シリコンダイオードはゲルマニウムダイオードに比べて電圧降下は若干大きくなるが、最大動作温度が高い^{*1}ことで冷却が容易になり、素子の破壊耐力が大きい特徴もあったため、最終的にはシリコンダイオードを用いた整流装置に全面的に置き換わっていった。ただし、商用交流電源を直接整流して直流にするという基本動作は変わらず、可飽和リアクトルによる出力電圧制御方法も同様であったため、変圧器、出力フィルタ、可飽和リアクトルの体積・重量が大きいことに変わりはない。

1960年代にはシリコンダイオードに制御端子（ゲート）を設けた電力用のサイリスタが普及するようになり、整流装置の出力電圧制御が容易に行えるようになった。サイリスタはゲート信号がない場合は非導通状態だが、ゲートに信号を加えると、通常のシリコンダイオードと同様に導通状態になる。一旦導通状態になると、ゲート信号をゼロにしても非導通にはならず、ダイオードの印加電圧がゼロまたは逆方向になるまで導通状態を継続する。

このサイリスタを用いた整流装置は1965年から導入が開始された。サイリスタは商用交流電圧半サイクルの途中でゲート信号を加えることにより、0Vから最大電圧まで連続で電圧を調整することができる。大形の磁性部品を用いた可飽和リアクトルに代わる出力電圧制御として採用することにより、整流装置を小形化することができた。ただし、商用交流周波数で動作する変圧器と出力フィルタの体積・重量は依然として大きなままであった。

変圧器はコア（ケイ素鋼板やフェライト等）と巻線（銅線等）で構成されているが、巻線に一定方向の電圧を印加して時間が経過すると、コアがコアとしての性能を維持できなくなる（コアが飽和するという）。従って、コアが飽和する前に印加電圧を反転させる必要があるが、この時間はコアの体積が大きくなるほど、また巻線の巻回数が多くなるほど長くなる。コアの体積が大きくなることと巻線の巻回数が多くなることは変圧器が大形化することを意味するため、逆にこれらを小形化するためには、印加電圧が反転するまでの時間を短く、すなわち印加電圧の周波数を高くすることが必要である。

商用交流周波数（50Hz）から20kHzに高周波化した場合の変圧器の小形化効果を試算すると約0.0112倍になる^{*2}。これは、例えば商用交流周波数（50Hz）における50kVAの変圧器（三相6kV/210V、モールド型でケイ素鋼板を用いたものの一例）が49.6ℓ、260kgであるのに対して、0.55ℓ、2.9kgにできることになる（ただし、コアの材質が同一で、高周波化によって損失が大きく増加しないことが前提）。出力フィルタ用のインダクタやコンデンサについても、出力電圧の変動成分（リップル電圧）を同等と仮定すると、インダクタンスまたはコンデンサ容量を周波数の増加に反比例して減少できるので、小形化することが可能である。

そこで商用交流周波数の50/60Hzよりも高い周波数の交流電圧を発生させて変圧器で電

圧変換すれば、変圧器や出力フィルタ、それらで構成される整流装置を小形化できることになる。実際には商用交流電源をまず整流して直流電圧に変換し、半導体スイッチング素子によって高周波の交流電圧（矩形波電圧）に変換して変圧器で電圧変換後、再度整流して直流48Vを出力する。これが高周波スイッチング整流装置の原理である。

1987年に最初に登場した高周波スイッチング整流装置（ユニット出力が48V 25A）は、半導体スイッチング素子としてバイポーラトランジスタを用いたものであった。商用交流電源を整流した約300Vの直流をバイポーラトランジスタで20kHzの矩形波電圧に変換（スイッチング）し、その矩形波電圧を高周波変圧器と出力フィルタを經由して直流48Vを出力する。これにより商用交流電圧を直接変圧器で電圧変換して直流48Vを得る方式と比較して、整流装置の体積・重量を約1/3に低減できた。高周波スイッチング整流装置では、交流電圧を直接変圧器で電圧変換して整流する場合と比較して、高周波スイッチング回路や出力側の高周波交流電圧を整流する回路、複雑な電圧制御回路などが追加されて部品数は増加するが、変圧器や出力フィルタ（インダクタとコンデンサ）が大幅に小形・軽量化できたことが、整流装置として小形・軽量化できた理由である。同じ1987年には、スイッチング周波数を40kHzとした、ユニット出力が48V 100Aの高周波スイッチング整流装置も開発された。

バイポーラトランジスタは耐電圧400Vで20～40kHz程度のスイッチングが行える素子であったが、整流装置をさらに小形・高効率化するためには、耐電圧・高速動作・発生損失の点で限界があった。そこで、高耐電圧で高速動作（耐電圧600V以上、数10kHz動作）が実現できるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor：絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）の登場に合わせて、高周波動作でも低損失が実現できる直列共振回路（スイッチング周波数20～85kHz）を採用することによって、1990年に整流装置（ユニット出力が48V 100A）の小形化（30%減）と高効率化（90%→93%）を実現した。

1996年には、スイッチング素子としてさらに高速・低損失動作が実現できるMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor：金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）とB-SIT（Bipolar-mode Static Induction Transistor：バイポーラモード静電誘導トランジスタ）を採用し、スイッチング周波数は20kHz程度であるが、ソフトスイッチング（部分共振）回路の採用と合わせてさらに損失を低減した。ただしこの開発タイミングでは、整流装置を高調波抑制対策ガイドラインに適合させるため、入力電流をほぼ正弦波状にするPFC（Power Factor Correction：力率改善）回路を新たに追加した。これは損失が発生する高周波スイッチング回路が2段に増加したことを意味するため、従来の整流装置との比較では、高調波抑制をしながら効率を同等に維持する結果となった。実際には冷却方式をそれまでの自然空冷方式から、冷却ファンを用いた強制空冷方式に変更することにより体積も約2/3に低減している。

パワー半導体の進化と新しい変換回路の採用によって整流装置の性能は向上してきたが、これらの改良は 2000 年頃までには一段落し、その後は大容量化や経済化、直流 380V 対応機器の開発にシフトしている。これは、IGBT や MOSFET 登場後の素子の性能が年々向上しているものの、整流装置に適用した場合の体積・重量・効率に対する改善効果が少なくなってきたことが理由として考えられる。

現在パワー半導体の性能向上が期待されているのは、広く用いられている Si (シリコン) による素子に対して、GaN (Gallium Nitride: 窒化ガリウム) や SiC (Silicon Carbide: 炭化ケイ素) を用いた素子である。先行して普及し始めているのは、GaN や SiC による MOSFET であり、Si による素子に比べて高速・低損失動作が実現できる。GaN MOSFET は比較的小容量領域、SiC MOSFET は高耐電圧・大容量領域でその特性が活かせると考えられている。実際 GaN MOSFET は 100W 程度以下の電源アダプター、SiC MOSFET は大容量 UPS (Uninterruptible Power Supply: 無停電電源装置) や電気自動車、電车用インバータ等の領域で適用事例がある。

これらの素子を適用することにより、整流装置の性能も向上できる可能性があるが、素子の高速・低損失動作を活かすためには、変換回路方式だけでなく、素子の高速駆動方法、高度な実装技術 (パルス電流が流れる配線部分の最短化、最適な部品配置、効果的な冷却方法等) が重要になってくる。また、整流装置は小形・高効率化の改善余地が限られているので、コストダウンを意識した装置のモジュール化や標準化の検討も併せて必要である。

パワー半導体素子は高速・低損失動作に向けて継続的に進化しているが、素子の耐電圧や電流容量によって適合する領域が異なるので、それぞれの素子に適した適用領域を見極め、素子の性能を効果的に引き出す回路技術や実装技術に注力することが必要である。

*1: ゲルマニウムダイオード 60°C に対してシリコンダイオードは 135°C (いずれも開発当時の値)

*2: 山下他: 1MHz DC-DC コンバータの特性 (昭和 60 年度電子通信学会総合全国大会予稿 S21-13)

(2022 年 6 月 13 日 山下 隆司)