通信・放送用電源技術の現状と問題点

原 田 耕 介[†], 庄 山 正 仁[†]

現在、多様な分野で用いられている電子機器用電源に対し、小型・軽量化、低価格化、高信頼度が強く望まれている。本稿では、スイッチング電源を中心に電子機器用電源に関連した最近の技術動向を紹介し、解決すべき問題点について言及する。

1. ま え が き

軽薄短小化で代表されるエレクトロニクス技術は、半導体集積回路をはじめとする微細加工技術の発展により達成されたものであり、これにより、従来個別部品で構成されていた電子機器が素材段階で作製されるようになった。この結果、電子機器の著しい普及をもたらした。電子機器の大衆化と同時に、従来人間が行っていた高度の意志決定までも機械化が可能となった。

この中において電子機器に電力を安定供給する電源部分には微細加工技術の適用が容易ではなく、小型・軽量化、低価格化、高信頼度化の面で技術的に大きな進展が望まれている。電子機器のマイクロ化を行うには消費電力が小さいことが望まれるが、この点で、損失を調節することにより出力を安定化していた従来のドロップ方式の電源は、マイクロ化に対し本質的な欠陥を持っている。これに代わり、最近、原理的に低損失のスイッチング電源が広く用いられるようになった。

現在、スイッチング電源は、コンピュータをはじめとする各種端末機器、通信機器、ビデオ装置等ほとんどの電子機器用電源に用いられている。急テンポで成長する電子・情報産業に歩調を合わせ、スイッチング電源の市場は1990年には年間1兆円の規模に達するといわれている。しかし、スイッチング電源の技術は、電源の軽薄短小化つまり小型化と低価格化の面で電子機器と充分整合の取れる状態には至っておらず、

電子工学の中で今なお発展が強く望まれている。

このような電源技術の中において、通信・放送用電源はその大部分が一般電子機器用電源と同様、軽薄短小化に対する問題点を持っているが、通信・放送が関与する環境の特殊性、例えば、広域性や衛星搭載用で代表されるような自立性等、通信ネットワークで結合される一般電子機器とは異なった立場が必要となる。特に、公共性への要求に対しては電源は電子機器の要に位置し、直列系として関与するため、ラインと電子機器の中間において外乱を防止するインタフェースとしての役割も要求される。

このことは、電源に対して価格だけでは割り切れない高信頼性の設計問題があり、電源自体にもシステムの信頼性を高める機能を付加することも要求され、これは交流電源の瞬時電圧降下を補償する無停電電源装置(UPS)の需要拡大となって現れている。

本稿では、これら電子機器用電源に関連した最近の技術動向を紹介し、将来に向けて解決すべき問題点について言及したい。

2. 小型化とスイッチング電源

スイッチング電源は、損失を無視すれば原理的に無損失であり、この面では電源のサイズは充分小さくなるはずである。しかし、実際の場合、スイッチの開閉に伴いスイッチ素子に損失が生じ、断続する電流を平滑して、リップルの少ない電圧を得るためエネルギー蓄積用のリアクトルおよびコンデンサを必要とする。スイッチング損失およびこれらの回路素子は、スイッチング電源の小型・軽量化に対して障害となる。リアクトルおよびコンデンサなどの回路素子を小型化するには、スイッチング周波数の高周波化が有効である。

[†] 九州大学 工学部 電子工学科

"State of the Art in Telecommunications Power Supplies" by Koosuke Harada and Masahito Shoyama (Department of Electronics, Kyushu University, Fukuoka)

図1は、スイッチング周波数を高めた場合、どのような影響が現れるかを示している。高周波化は小型・軽量化およびコストの低減に対しては有効であるが、損失による発熱および雑音等、信頼性に対しては新たな問題が生じる。

図2は、スイッチング電源を高周波化する場合に考慮すべき技術的問題点をまとめたものである。考慮すべき主な点としては、回路方式、スイッチング用半導体素子、平滑コンデンサ、磁性材料、実装技術、電圧調整などの制御回路等があげられる。また、各項目の中で今後解決すべき重要な問題をも示している。ここで高周波化が達成された場合、小型化に直接結びつく部分は磁気素子と平滑コンデンサである。このうち磁気素子は損失による熱を放出することが半導体素子に比べて容易ではなく、小型化の手段として低損失化が特に重要である。変圧器とリアクトルに代表される、磁気素子の損失の主なものが高周波化による鉄損、および表皮効果、近接効果による銅損であり、高周波用低損失材料の開発は特に重要である。現状では、Mn-Zn フェライト、アモルファス磁心、ダストコア等が利用されている。

また、高周波化により平滑コンデンサの容量を減少させることが可能であるが、帰還に伴う安定性が容量減少により低下するため、容量低減によるマイクロ化

は回路開発も併用して行うことが必要である。平滑コンデンサには、電解コンデンサが利用されるが、電解コンデンサには寿命がある、この予測方法の開発も重要であり、等価直列抵抗を用いた検出方法が検討されている¹⁾。

現在、市販のスイッチング電源は、バイポーラトランジスタでは 100 kHz、MOS-FET では 500 kHz 程度が実用化されており、1 MHz 以上に周波数を高めることも可能となっている。

高圧大電力用の電源は人工衛星をはじめ通信用の TWT、ME 機器、半導体製作装置などに必要であるが、この分野においても電源の小型・軽量化が望まれている。これら高圧大電流を開閉する電力用半導体として、従来より GTO、サイリスタが用いられてきたが、動作周波数が数 kHz 以下と低い。これに対し、最近開発された SIT およびゲート埋め込み型 GTO は 100 kHz 程度のスイッチングが可能であり、高圧大電流用として興味が持たれている。しかし、現状では歩留まりおよび価格の面で問題があり、これに対し、バイポーラトランジスタと MOS-FET の特長を兼ね備えた IGBT が最近注目されている。これは、従来の MOS-FET のドレイン領域に小数キャリアを注入してオン抵抗を下げたものであり、MOS ゲートに電圧パルスを与えれば簡単にオン・オフできる。現在のところ動作周波数は 50 kHz 以下であり、ラッチアップ対策も必要である。

3. スwitchングサージの発生と抑制

スイッチング周波数を高めるためには、スイッチング損失を低減することが必要であり、それには高速のスイッチング素子が用いられる。しかし図3に示すように、スイッチングが高速となれば、回路に存在するインダクタンスや容量成分あるいはダイオードの持つ蓄積電荷の影響によりサージや雑音が発生し、周囲の電子機器に悪影響を及ぼすばかりではなく、電源装置自体の信頼性も著しく低下する。

図1 高周波スイッチングによる影響

図2 スwitchング電源の高周波化に関する技術的問題

このうち、スイッチのターンオフに伴う電圧サージを防止するため、図4に示すR-C、または図5に示すL-Cスナバが、また、電流サージ特にダイオードの蓄積電荷によるサージに対しては、図6に示すアモルフラス等角型磁心による磁気スナバが利用される。

図3 電流サージと電圧サージの発生

図4 RC スナバ回路

図5 LC スナバ回路

4. 電子回路素子と高周波磁気増幅器

磁気増幅器はスイッチング電源において半導体素子と同様、PWM 制御素子として利用することができ、また、ダイオードのリカバリ特性によって生じるサージ電圧を抑制し、低雑音で高信頼性の制御素子として用いられる。しかし、磁気増幅器の高信頼性は、磁心の持つ本質的な特性による。図7は、磁気増幅器とバイポーラトランジスタの等価回路を比較したものであり、この図からわかるように、バイポーラトランジスタの特性を左右する最も大きい要素が電流利得 h_{fe} であるのに対し、磁気増幅器では磁心の等価渦電流抵抗 R_e である。 R_e はロットごとのばらつきが少なく、温度の影響などを受けにくく、 h_{fe} に比べて安定性にお

(a) 降圧型 (buck)

(b) 昇圧型 (boost)

(c) 昇降圧型 (buck-boost)

図6 磁気スナバ回路

図7 制御素子の等価回路

(a) 磁気増幅器の理想電圧波形

(b) 蓄積期間の等価回路

(c) 過渡期間の等価回路

図 8 磁気増幅器の動作原理

いて格段に優れている。

図 8 に磁気増幅器の動作原理を示す、磁気増幅器はスイッチング周波数の 0.5 サイクルから 1.5 サイクルの遅れ時間を持ち、スイッチング周波数を高めれば遅れ時間を短くでき、高周波化により安定度が改善できる。これに対して、通常の PWM 制御の場合には、制御回路の遅れはスイッチング周波数に無関係であり、安定度の面からみて磁気増幅器式コンバータは高周波化に適している。ただし、半導体による PWM 制御回路は通常 1 次遅れで表現されるのに対し、磁気増幅器は原理的に高次遅れであり、この点がループ利得を高めた場合、安定性に微妙に影響することがあり、注意が必要である。

現在、磁気増幅器用磁心としてはコバルト系のアモルファス磁心が用いられている。この場合、コンバータのスイッチング周波数は、500 kHz から 1 MHz 程度まで高めることが可能である。しかし、磁気増幅器はダイオードのリカバリ特性により発生する電流サージを吸収する反面、高周波においてデッドアングル（制御不能角）が無視できなくなり、最大出力が制限される²⁾。このようなデッドアングルを除去するためには種々の手段があるが³⁾、このために素子数が増し、磁気増幅器を高周波で利用する場合の問題点となっている。磁気増幅器の利用は無事故、無保全の永久利用

(a) 電流共振型

(b) 電圧共振型

図 9 共振型コンバータの原理

電源を志向するものであり、ライフサイクルコストの立場から、有用な電源方式とみなすことができる。

5. 共振型コンバータと問題点

MHz 以上の高周波化に対しては、共振回路を利用しスイッチにかかる電圧またはスイッチを通る電流を正弦波状にし、スイッチング損失を小さくすると同時に、サージの発生を抑制したスイッチング方式が、共振型スイッチの名前で活発に研究されている^{4)~6)}。この方式では、スイッチング速度を極端に高めることなしにスイッチング損失を原理的に零にでき発生雑音も小さく、スイッチング電源の高周波化の決め手になるものと期待されている。図 9 はこの原理を示している。この方式は、現在利用されている通常のコンバータ回路にそのまま適用される。

電流共振型においては、電流波形が共振回路で決まるから、原理的にオン時間が固定される。したがって、出力電圧の調整はオフ時間を変化させなければならない。これに対し、電圧共振型ではオフ状態にあるスイッチにかかる電圧が正弦波状の共振波形となるため、オフ時間が固定され、出力電圧はオン時間を変化することにより制御される。したがって電流共振、電圧共振いずれの場合においても、出力電圧の制御にはスイッチングの周期、すなわち周波数を変化させることが必要となる。しかし、この場合には周囲との干渉等の問題があり、一定周波数、もしくは、わずかの周波数変化で出力電圧の制御が可能な回路方式の確立が望まれている。

スイッチング周波数を固定したままで共振型コンバータの出力電圧を一定に保つような電圧調整を行うに

(a) 可変インダクタンス回路

(b) 可変容量回路

図 10 可変パラメータ回路

図 11 可変容量回路を用いた半波型電圧共振型コンバータ

図 12 図 11 の回路の負荷特性と効率

は、共振回路を構成する L または C を変化させ、共振周波数を変えることにより達成できる。しかし、 L または C の値を外部信号で連続的に変化させることは、容易ではない。これに対し図 10 に示すような、

図 13 零電圧スイッチングの一例

図 14 非共振型スイッチを用いたコンバータ

インダクタンスまたはキャパシタンスとスイッチを結合し、スイッチの導通期間を制御することにより、これらパラメータを等価的に連続して変化させることができる。この場合、スイッチング周波数が低い場合には L の可変が、高い場合には C の可変が有効である。

このように、可変 L または C の回路では、制御用スイッチは共振型スイッチと同様、零電流または零電圧スイッチングの条件を満足しており、スイッチング損失が原理的に零であることが特徴である。図 11 は可変容量回路の典型的な応用例として、半波型の電圧共振型コンバータを制御する場合を示し、ここでは MOS-FET をスイッチ素子として用いている。図 12 は、スイッチング周波数が 1 MHz の場合の帰還時における負荷特性と効率の実験結果を示し、この図より負荷電流のある範囲内で出力のレギュレーションが充分な精度で行われることがわかり、この場合、最高効率が 93.7% に達している。

一方、共振現象を利用することなくスイッチング損失をほとんど零にし、電圧または電流サージを除去した回路も報告されている。図 13 は、両スイッチがオフになる期間の異なった振動現象を利用して、零電圧スイッチングを実現する回路であり⁷⁾、図 14 は両スイッチがオフ期間、転流用の L によりスイッチの持つ C を充電し、電圧サージと電流サージの両方をも除く回路方式である⁸⁾。この方式は、非共振型スイッチ

とも呼ばれているもので、今後、共振型コンバータと同様、広く実用化が期待される方式である。数 MHz 程度のスイッチング周波数は、これらの方式が混在して利用できる領域であり、今後どのような方向に進むかは予断を許さない。

6. スwitching電源の集積化

スイッチング電源の集積化・小型軽量化は、電源担当者のみならずハードウェア技術者の夢であり、電源の集積化はその最も容易な部分から困難な部分まで次のように4つの段階に分けることができる。すなわち、①制御部分、②半導体スイッチ、③変圧器・リアクトル、④平滑コンデンサ、の順である。このうち半導体スイッチをPWM制御して出力電圧を調整し、同時に過電圧保護、過電流保護を行うための信号処理部分はIC化が最も容易で、制御用ICとしてすでに市販されている。これは発振器、比較器、演算増幅器などを内蔵しており、その動作周波数には限界がある。現在500 kHz程度のものが実用化されているが、MHz程度のものが試作段階では可能となっている。

このような帰還用制御回路は、通常1次遅れの周波数特性で表すことができ、コンバータ本体は平滑回路により最低2次の遅れを有するため、制御回路を通して帰還しループ利得を高めると不安定現象が生じる。コンバータをできるだけ安定にするには、制御回路の遅れができるだけ短いことが好ましい。このためには、演算増幅器の周波数特性ができるだけ高域までのびているものを選定するか、あるいは、微分補償を併用することが必要となる。

このような制御用ICを、主半導体スイッチと一体化することが試みられている。この場合、主回路が大電力で比較的高圧または大電流を取り扱うため、信号処理部分との電気的絶縁の問題が存在する。また、主回路が大電力のスイッチングを行う場合、スイッチング損失による熱損失がアナログ回路を主体とする信号処理部分に影響するため、何らかの熱的絶縁も必要となる。したがって、この場合のスイッチング周波数は

制御用IC単独の場合に比較し少なくとも1桁以上低くなる。スイッチング周波数が低くなればリアクトル、コンデンサ等は大型となり、半導体部分をマイクロ化することに意味がなくなる。

この問題を解決するには、電力部分で発生する熱を急速に発散し、制御部分の間に何らかの形で熱的絶縁を行うことが必要であり、制御部分をアナログ回路を主体としたものからデジタル回路主体のものに改めることもひとつの方法である。また、共振型コンバータの利用はスイッチング損失の減少を可能とし、主スイッチ部分の発熱を低減する効果があり、今後、電源の集積化に対し考慮すべき課題と思われる。

リアクトル、変圧器等の磁気素子は、薄膜技術により巻線の手間を省き微細化することができ、図15はこの例を示している⁹⁾。しかし、薄膜素子を電力用に用いるためには、フェライト基板および導体抵抗の問題等、未解決の問題があまりに多く、実用化に対しかなりの時間が必要であろう。平滑コンデンサは電源の安定性を確保するうえで、ある程度の容量が必要であり、集積化が最も困難な部分と考えられる。このほか、特に低圧大電流の応用に対してはダイオード損失が問題であり、これら多くの重要な問題が未解決のまま残されている。

7. 衛星用電源¹⁰⁾

衛星用電源は、電源システムの中で最も特異なものであり、典型的な自立電源であり、図16はその概要である。このシステムは太陽光の照射中に電力を発生する太陽電池、地球の陰になった時に必要な2次電池、および電圧制御、充電管理を行う電力制御器で構成される。電源システムの重量の大半は太陽電池と2次電池で占められ、衛星全体の重量の約20%にあたり、衛星では重量や容積の制約が特に厳しいため、電源システムの小型・軽量化が強く望まれている。また、独特な振動、熱、高真空、放射線などの動作環境およ

図15 薄膜導体を用いた高周波変圧器

図16 衛星用電源システム

び保全が困難である点を考慮した高信頼度設計も同時に要求されている。

太陽電池に関する最近の技術動向として、使用素子および素子が実装される基板関連の技術開発があげられる。使用素子の技術開発では、常温での効率が14%を上回るシリコン系素子や、さらに高効率のGaAs系素子の開発が進められており、一方では、素子自体やカバーガラスの厚み低減による薄型・軽量化がなされている。実装基板関連の技術開発では、材料面でCFRPの採用、構造面では柔軟構造の採用等による軽量化が行われている。

2次電池は衛星搭載機器の代表的寿命限定品目であり、静止衛星用で10年、周回衛星用で2年程度が限界寿命といわれている。従来より、電池素子には寿命や耐過充電性能の面で完全密閉型NiCd電池素子が採用されている。しかし最近、電池素子の軽量化・長寿命化に向け、NiCd電池の正極と燃料電池の負極を組合せたNiH電池、 O_2-H_2 燃料電池と水分解装置を組合せた2次電池等の開発が進められている。

電力制御器の主要機能は、2次電池の充電管理、電力供給ライン電圧(バス電圧)を所定の特性内に維持することである。この場合、電力制御器内でバス電圧を安定化する安定化バス方式と、それぞれの負荷側にあるDC-DCコンバータで電圧の安定化を行う非安定化バス方式がある。

最近の傾向としては、レギュレータの故障波及範囲の分散・局限化や、発熱の分散・定常化および軽量化の期待等を伴った非安定化バス方式が注目されている。太陽電池余剰電力によるバス電圧上昇を抑制する機能は、動作点を変更して太陽電池の出力自体を絞ることにより行われる。衛星の大型化に伴い、2次電池の充電管理にはスイッチング技術を用いたレギュレータが使用されているが、最近、この充電機能を拡張し、太陽電池最大出力追尾機能と太陽電池余剰電力処理機能を持たせた簡素な構成の電力制御器も開発され

ている。

8. 無停電電源 (UPS)

電源の故障対策は、通信・放送システムの公共性からみて特に重要な課題である。例えば、商用電源は誘導雷により0.1~0.01秒程度の極めて短時間の電圧降下はかなりの頻度で起こっており、これに対し、電子計算機をはじめとする情報処理装置は鋭敏に反応する。このような外部からの擾乱に対し、商用電源と電子機器の間に電力用インタフェースを挿入することが求められている。無停電電源(UPS: Uninterruptible Power Supply)はこのための装置である。UPSの需要は現在急速に拡大しており、これに対する技術的要求もますます厳しいもので、表1はUPSに対する問題点をまとめたものである。

このようなUPSは、以前はモータゼネレータが利用されていたが、可動部分があるため現在ではそのシェアは10%以下となり、静止型のものが主流となっている。容量も単機で最大500kVA、並列運転により2000kVA程度のものまで利用されている。一方、最近パソコンなどの電源にもUPSが利用され始め、1kVA以下の小容量のものも需要が拡大している。

UPSにはいろいろな回路方式が開発利用されている。大別すると、整流装置とインバータを直列に配した直列方式と、商用電源に対しインバータを待機させた並列方式に分類でき、図17はこの構成を示している。現在利用されているUPSの大部分は直列方式であり、高周波リンクによるPWM方式が多く用いられ、サイクロコンバータ方式も利用されている。

直列方式にバイパススイッチを入れれば、見かけ上並列方式として利用できるが、このままでは定電圧特

表 1 UPS に関する問題点

1. 高信頼性
2. 重量, サイズ
3. 高効率
4. 低波形歪み(負荷との協調性)
5. 無効電力の回生
6. 保持時間
7. 低 EMI
8. 低騒音
9. 保全性
10. 価格

図 17 UPS の基本構成

図 18 位相差制御型インバータ回路

性を持たせることができない。これに対し、定電圧変圧器で電圧調整を行う方式が実用化されている。この方式は、出力の定電圧変圧器が3つのポートを持つためトライポート方式と呼ばれ、常時商用電源が定電圧変圧器により与えられるため、整流器による電力損失がない分だけ高効率であることが特長である。トライポート方式では、商用電源と出力巻線とが充分距離を持つため、電源雑音の影響を受けにくいことが特長であり、トライポート方式は、最大450 kVA用のものが市販されている。

このようなUPSも比較的小型のものは、OA機器等に併用されるため、DC-DCコンバータと同様、重量とサイズが重要となる。小型化に対しては高周波リンクを持つ直列方式が出力フィルタを小型にできるため有利であるが、結合変圧器が低周波の設計になるため小型化できない欠点がある。これに対し、図18に示すように、変圧器の1次側と2次側を並列インバータ構成にし、各インバータの位相差を商用周波で変調することにより変圧器のマイクロ化が可能となり、興味ある方式と思われる¹¹⁾。

9. む す び

以上、電子機器用電源技術の現状と動向を主として、スイッチング電源を中心に紹介した。電源がどのような所で利用される場合でも、そのマイクロ化は現在最も切実な問題となっている。これを達成する方法として、スイッチング周波数の高周波化と集積回路技術の適用が2本柱となっているが、スイッチング周波数の高周波化はその発展が予想以上に早く、これに対して半導体・磁性材料およびコンデンサ材料・部品の開発がその後を追う形になっている。新しい材料の出現により、電源の様態は今後大きく変わることが予想される。

これらの電源技術に関する新しい研究成果は、1988年より新たにIEEEに発足したPower Electronics Societyが主催するPESC (Power Electronics Specialists Conference) およびAPEC (Applied Power Electronics Conference) ならびに同じIEEEのCommunication Societyが主催するINTELEC (International Telecommunications Energy Conference) で報告され、企業がその結果を活用する形態が世界的に定着している。また、我が国でも電子情報通信学会の電子通信用電源技術研究会が毎年5回開催され、この分野の発展に貢献している。PESCは昨年4月、日本で開催され、また、INTELECは1983年に次いで1991年、再度日本開催が決定している。日本の電源技術も世界におけるこの分野の発展に大きく寄与していることは喜ばしい限りである。

最後に、UPSに関する資料の提供ならびに有用なご助言を頂いた山洋電気の関野取締役様に謝意を表します。

(1989年2月9日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 原田, 甲木, 藤原, 森田: 電学論D, **107**, 5 (May, 1987)
- 2) K. Harada, T. Nabeshima and R. Hiramatsu: IEEE Trans., **PE-2**, 3, pp. 234-238 (July, 1987)
- 3) T. Nabeshima, K. Harada, R. Hiramatsu, T. Kohchi and S. Komatsu: IEEE INTELEC'85, pp. 449-454 (Oct., 1985)
- 4) F.C. Schwartz: IEEE Trans., **IECI-23**, 2, pp. 133-141 (May, 1976)
- 5) N.O. Sokal and A.D. Sokal: IEEE Jour. of Solid State Circuits, pp. 168-176 (June, 1975)
- 6) K. Liu and F.C. Lee: IEEE PESC'86, pp. 58-70 (June, 1986)
- 7) K. Harada and K. Murata: IEEE PESC'83, pp. 355-359 (June, 1983)
- 8) K. Harada and H. Sakamoto: To be Presented at PESC'89 (June, 1989)
- 9) A.F. Goldberg, J.G. Kassakian and M.F. Schlecht: IEEE PESC'87, pp. 379-386 (June, 1987)
- 10) 桑島: 信学技報, 電子通信用電源技術, PE83-14, pp.79-81 (Feb., 1984)
- 11) K. Harada, H. Sakamoto and M. Shoyama: IEEE Trans., **PE-3**, 4, pp. 406-411 (Oct., 1988)

原田 耕介 昭和28年、九州大学工学部電気工学科卒業。33年、同大学院博士課程修了。43年、同大学電子工学科教授。スイッチング電源、磁気センサ、信頼性工学、バイオマグネティックス等の研究に従事。工学博士。

庄山 正仁 昭和56年九州大学工学部電気工学科卒業。61年、同大学院博士課程修了。同年、同大学電子工学科助手。スイッチング電源の研究に従事。工学博士。