

特集

パルスパワー（その制御と関連現象）

パルスパワー電源の現状と動向

The State of the Art of the Pulsed Power Supply

竹田 昭平*・井上 訓一**

Syohei Takeda Kunikazu Inoue

1. はじめに

わが国において、パルスパワー（Pulsed Power）なる技術用語が一般的に使用されるようになって久しい。パルスパワー技術の歴史的流れは、マルクス発生器の発明を発祥とし、第二次大戦後原子力平和利用の目的で開始された制御熱核融合・プラズマ物理の精力的な研究開発と共に急速に発展したものととらえることができる。

電源技術についても、当初の高速大電流ギャップスイッチを主体とする高電圧大容量コンデンサバンクの制御に始まり、以後大出力レーザ、高強度の電子ビームやイオンビーム発生用の電源、さらにはマルクス発生器と水絶縁の移送素子の組み合わせによる超高速の電源などが一般的に使われるようになり、各種形式に関する研究が進展してきている。

勿論これらと並行して、回転機に代表される慣性的エネルギー蓄積に基づく電源技術も著しい発展を遂げた。

パルスパワー技術の研究に関する成果と動向を知るには、IEEEの主催で西暦の奇数年に開催されているPulsed Power Conference、またはこれと交互に隔年に開催されているPower Modulator Symposiumの会議録（種々の事情により発表のみで掲載されない

報告もある）が参考になる。会議録は共に公開出版されており、後者には高電圧パルス電源、パルス大電力スイッチなどに関する報告が多くみられる。

わが国では、本年5月電気学会より刊行された「大電流工学ハンドブック」が最適である。これは大電流関連の調査専門委員会による調査結果を基に、パルスのみならず直流・交流の大電流発生・制御・応用に関する内外の情勢をとりまとめたものである。

本稿では、標題に関してその概要を述べるにとどめる。詳細については上記の各資料を参照して頂きたい。

2. パルスパワー電源

パルスパワー技術はGJ級のエネルギーを取扱い、電圧・電流レベルはMV・MAにもなり、供給パワーはTWも可能である。このように電力系統では賅うことができない巨大なパワーをパルスの形態で短時間に供給するために、大量のエネルギーを除々に蓄積した後急速に放出すると共に、残存エネルギーを回収してシステムの効率を向上させる必要がある。その概念的システムを図-1に示す。

このシステムにおいて、パルスパワー電源は低レベルで受け取ったパワーをより高いレベルで、したがってより短い時間に放出し、幾つかのステージに順次エネルギーを移送することによってパワーを増幅するも

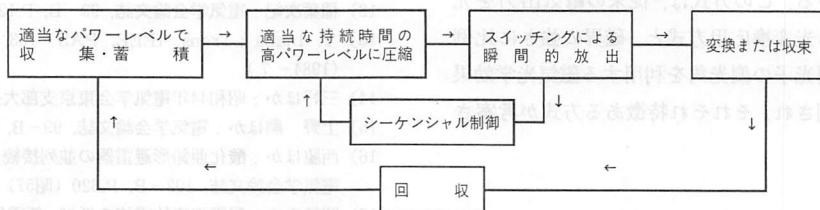


図-1 パルスパワーシステムの概要

* 電子技術総合研究所 エネルギー基礎部プラズマ研究室主任研究官
〒305 つくば市梅園1-1-4

** 株指月電機製作所 コンデンサ事業本部技術開発部部长
〒662 西宮市大社町10-45

表1 エネルギー蓄積とパルスパワー電源の概要

エネルギー蓄積の形式	パルスパワー電源としての特徴	具体的方式または装置
電気的蓄積	<p>最も高度に発展した蓄積技術の一つである。高電圧・低電流で蓄積し、充電電圧がそのまま放電電圧として動作して大電流を放電するので電流を増幅する。</p> <p>またモジュール構成にして直並列接続ができ、エネルギーの取り出し時間すなわち電流立ち上がりが低速から高速の用途まで広範な適用が可能である。エネルギー取り出しには閉路スイッチを使用し、取り出しの効率が良くスイッチも比較的手軽である。</p> <p>インダクタ等に比較して、高い内部インピーダンスと低エネルギー蓄積密度を示し、多数のユニットを使用するので信頼性が重要な問題となることなどが根本的な限界であるかもしれないが、非常にいろいろな用途に手軽に使えるという便利さがある。</p>	<p>高速コンデンサ</p> <p>低速コンデンサ</p>
磁気蓄積	<p>通常は、ソレノイドや同軸構造であるような特殊な形状の導体に電流を流すことにより磁界へエネルギーを蓄積するもので、誘導性エネルギー蓄積方式ともよばれる。高蓄積密度で所要体積が小さいため、数+MJ以上の蓄積領域で安価である。ただし冷却コイルあるいは超伝導コイルを用いる際には、冷却機などの周辺設備を含めた価格を考慮する必要がある。</p> <p>エネルギー取出しには直流開路スイッチが不可欠であり、繰り返し使用ができないヒューズのような特殊なスイッチでは電圧の増幅が可能であるが、それ以外のスイッチでは電流立ち上がりをそれほど速くできない。</p> <p>蓄積は低電圧・大電流で行い、特に蓄積持続時間が短い常伝導コイルの場合には大容量の電力供給源が必要である。</p> <p>蓄積密度はコンデンサより高いが、蓄積持続時間は超伝導インダクタ以外では1秒以下と遥かに短い。従ってより短い時間の蓄積用にのみ有効である。力の発生のように、電流がおもな要件である応用に最良である。</p> <p>その他の問題点としては、パルス電流による磁界のもとでの渦電流損の軽減、繰り返し疲労劣化に関する耐久性などがある。</p>	<p>常伝導コイル</p> <p>冷却コイル</p> <p>超伝導コイル</p>
慣性的蓄積	<p>交流発電機に代表されるように回転機として実現されている。これらはガスタービンやディーゼルエンジンのシャフトに発電機を直結するなどして、最初のパワー源にシステムを直接接続してエネルギー蓄積は勿論変換も可能である。システムが巨大化し、パルスパワー応用の商業化が進むにつれ、最初のパワー源に直接結合できるという利点はますます重要になる。</p> <p>この方式は大容量の蓄積・制御に優れており、蓄積・取り出しのサイクルやパワーレベルの選択を自由に行える。</p>	<p>フライホイール式 交直流発電機</p> <p>ホモポーラ発電機 Compulsator</p>
電気化学的蓄積	<p>電気化学的蓄積装置としての蓄電池は、利用可能な最も高いエネルギー蓄積密度を備えた装置の一つである。しかし高速放電能力が著しく低く、低電流で緩やかに充放電する際に最も効率的に動作するという特性のため、パルスパワー電源としては殆ど使用されていない。</p>	<p>蓄電池</p>

のである。電源の能力は、蓄積エネルギーの放出時間帯がそれぞれマイクロ秒で最高のパワーレベル領域に、秒で最大のエネルギーレベル領域になる。

多数のコンデンサおよびインダクタをスイッチ等で直並列に接続し、電気的パルスをシーケンシャルにより短い時間段階へと圧縮するように設計したパルス圧縮回路網は、典型的なパルスパワー電源の例である。

また集中定数のコンデンサやインダクタで構成する分布定数回路も、しばしばパルスパワー電源として使用する。この回路のコンデンサやインダクタを電圧・電流に応じて変化する非線形素子で置き換えた回路は、非線形分布定数回路として新形式のパルスパワー電源になり得る。現実には、可飽和リアクトルなどの磁気スイッチを用いたパルス圧縮回路は、インダクタンスの変化する分布定数回路にほかならない。

パルスパワーシステムにおける非線形素子は、新たな応用分野を開拓する要素となるであろう。

このようにパルスパワー電源は様々な回路網を介して必要なパワーレベルとパルス時間でエネルギーを負荷に供給し、残存エネルギーを回収する。

電気的入力を受けて電気的出力を供給するコンデンサ、インダクタおよび蓄電池は、配電系統からパワーを得ている小規模な研究所的システムにとって非常に便利なパルスパワー電源の構成素子である。

3. エネルギー蓄積

エネルギー蓄積の形式は、電気的、慣性的ならびに化学的蓄積に大別され、電気的蓄積はさらに静電的と磁気的方法に分けられる。これらの蓄積方式に基づくパルスパワー電源の概要を、その具体的方式または装置とともに表1に示す。電源を構成する際には適用目的に応じて蓄積装置の種類、スイッチのタイプ、必要であれば冷却器や駆動用原動機などの付帯的設備を選択するので、蓄積密度や蓄積エネルギー当たりのコスト等を単純に比較することは不可能である。

電気の状態をとるエネルギーは、変成器を介して直接電界（コンデンサ）または磁界（インダクタ）に蓄積される。電気以外では、慣性的システム（フライホイールなど）または電気化学的システム（電池）などにより電気的パルスに変換する。しかしバネ、圧縮気体あるいは重力を利用する蓄積技術は、蓄積密度と変換効率が低いか、または適当な変換技術が無いために積極的には使われていない。

3. 1 静電的方式（コンデンサバンク）

従来より使用されている蓄積または充放電用コンデンサ、非誘電率が常温で約80と非常に高い水を利用する水コンデンサ、最も安価で小型な電解コンデンサ等がある。

これらは誘電体で絶縁された平行平板導体を丸めたり折畳んで多様な形状にして製作できるが、動作原理は同一で誘電体材料が絶縁耐力やキャパシタンスに影響を及ぼす。

エネルギー蓄積用は、以前はヒマシ油とクラフト紙が代表的な誘電体で蓄積密度も低いとされていたが、高分子フィルムを利用し導体の表面やエッジ部分に工夫をこらし耐圧・蓄積密度共に著しい向上がみられる。

水コンデンサは、MV級で動作するある種の高電圧システムにおいて使用される。しかし水の分子が分極して導体間で電荷をリークするので蓄積持続時間が制限される。従って他のタイプのものより、より急速に充放電する必要がある。実質的な蓄積持続時間を延長するために、様々な工夫、試みがなされている。

電解コンデンサは、低電圧での動作に限定され、電圧反転に耐えられないので応用分野が制限される。

3. 2 磁気的方式（誘導性電源）

この方式の蓄積は、パワー供給源の電流でインダクタを励磁し、電流がピークに達した時点で励磁電源を短絡すると同時にこれを切り離して行う〔図-3（b）参照〕。以後インダクタ回路の導体抵抗のために電流は減衰し始める。減衰率はインダクタの時定数で決まり、時定数の約3倍の時間で蓄積エネルギーは有効なレベル以下に低下する。

時定数は、室温で銅またはアルミニウム製の小さなインダクタではミリ秒の範囲であるが、非常に大きなものでは数秒とやや長い。強磁性材のコアでインダクタンスを増加し、低温流体冷却で抵抗を減少させて小さなインダクタの時定数を延長でき、その値は数秒にもなる可能性がある。また蓄積量は電流の二乗に比例するので、低温冷却で励磁電流を上昇させて蓄積密度を増し小型化することも可能である。さらには超伝導インダクタでは、時定数は実質的に無限大といえる。

しかしこれらの時定数は、インダクタのみに関する値である。電源として機能する場合に不可欠なスイッチを含めたシステムでは、スイッチおよびその接続回路の抵抗をも考慮する必要がある。したがって超伝導インダクタの場合には、超伝導スイッチを採用するなどして全体を超伝導化したシステムにおいて初めて時

定数が無限大となる。

超伝導体は電流密度に敏感で、導体内の電流が臨界値を越えるとクエンチを発生する。その際クエンチした導体の焼損を避けるために、電流の一部を常伝導体へ転流するように設計する必要がある。

クエンチは、周囲の磁界が強すぎる場合や磁界が急激に変化しても発生する可能性がある。したがって超伝導インダクタは、高エネルギー密度用あるいは短時間放電用として非常に大きな電流で動作させるには余程注意する必要がある。

このクエンチ現象を積極的に利用しようとするのが、超伝導スイッチである。

誘導性電源は、主としてスイッチの遮断速度や繰返し使用動作などの点で適当な開路スイッチが入手できないという理由で、コンデンサによる方式ほどには広く使用されるにいたっていないのが現状である。

3.3 慣性的方式(交直流機)

交直流回転機によりエネルギーの変換を行うが、パルスモードの動作ではこの術語による分類はあまり正確な意味を持たない。

3.3.1 直流機とホモポーラ発電機

直流機では半導体制御で変速駆動できる整流子型が代表的であるが、近年パルスパワー応用の目的でホモポーラ発電機が著しい発展を遂げている。

ホモポーラ発電機は構造が単純で内部インピーダンスの低い唯一の無整流子直流回転機であり、整流子型直流機に付随する問題を殆ど回避することが出来る。

最も簡単なものは、軸方向の磁界内で回転する単一体の導電性ディスク状ロータの外周と軸との間に電圧を発生するものである。発生電圧は、ロータが切る磁束密度とロータの角速度の積に比例する。また蓄積エネルギーはロータの角速度(発生電圧)の二乗に比例するが、ロータ外周部と集電子の滑り接触技術が角速度を制限している。

ディスク状、ドラム状、糸巻状など多数のロータに対して内部帰路導体、外部帰路導体構成などのトポロジカルな変形が可能である。また出力電圧上昇の目的で、同一軸上で回転する複数のロータの電気的出力を直列に接続したり、その際の機械的ストレスを緩和するために隣合うロータの回転方向を交互に変える方式なども考えられている。

単一体であるロータ全体が電機子導体として機能するので内部インピーダンスは極端に低く、実効キャパシタンスがロータの慣性モーメントに比例し供給磁束

の二乗に反比例するコンデンサの特性を示す。このため、パルス圧縮回路でコンデンサとして使用できる。

通常のコンデンサとの基本的相違は機械的充電にあり、低電圧(数千ボルト)でキャパシタンスが極端に大きい(数万ファラッド)コンデンサといえる。

磁界を切るロータのパスが唯一であるのが原因で出力電圧が低く長距離のパワー移送には不向で、その応用範囲が制限されていた。しかし内部インピーダンスが低いので、低インピーダンス負荷に対して大出力電流を供給して有効に動作する。

核融合実験装置用のパルスパワー電源として、交流発電機と同等規模のホモポーラ発電機をとの考えもある。しかしこの発電機は将来のシステムにとって魅力的であるかもしれないが、交流発電機を電源とするように開発されたマグネットを効率的に駆動することはできないだろう。したがってホモポーラ発電機を使うためには、それに適合するように特別に設計されたマグネットが必要である。

3.3.2 交流機と Compulsator

一般に使用されている交流機(同期機または交流発電機)は、最も高度に開発された回転機であり最大のパルスパワー電源である。

電力機器の大電流試験以外交流パルスモードでは殆ど使用されず、長時間継続の直流パルスを作るために半導体制御の直流変換器と共に使用される。

この慣性的蓄積を行う巨大な交流発電機は、大規模な磁気閉込め核融合実験に対して最も有力なパルスパワー源として機能している。

パルス継続時間は通常数秒で、この間に発電機周波数が60~70%に低下する。パルスの間、定出力電圧を維持するため界磁制御を行う。

前述のように回転機では発生電圧が磁束密度と角速度に関係するが、磁束密度や回転数には材料で制限される限度があるため電機子巻線の巻数を増して出力電圧を上昇させている。しかし内部インダクタンスは巻数の二乗に比例するので、高速に立ち上がる電流の出力を得ることは困難である。この問題を解決したのが Compulsator (Compensated Pulsed Alternator) である。

Compulsator は同期機の変形であるが、通常の同期機と構造的に異なるのは、回転する電機子巻線と直列に接続された付加的固定巻線を備えている点である。

電機子巻線が回転し始めると、両巻線には電流が流れ始める。同時に両巻線に挟まれた磁束が圧縮され、

両巻線が接近するにつれ内部インダクタンスは減少する。両巻線の相対的な位置の角度が零になったとき、インダクタンスは最小になる。このようにして磁束の圧縮と内部インダクタンスの低下という二つの効果により、高速立ち上がりの電流パルスが発生する。

すなわちサイクルの一点（普通は電圧ピーク）で内部インピーダンスが最小になる交流発電機で、サブミリ秒のパルス発生用に好適である。

この発電機は殆どの原動機で容易に駆動できるが、ホモポーラ発電機が停止するまでパルスを発生し続けるのに対して、僅かに減速するだけである。したがって、パルス当たりの放出エネルギーを同一にするためにはホモポーラ発電機よりも大型になる。

またインダクタンスの周期的変化により自己整流作用が発生し、バーストまたは繰り返しのパルスモードでの連続運転により良く適合できる。

一般的には抵抗負荷で最も良く作動するが、容量性負荷に対しても満足のいく動作を良好に行う。ただし誘導性負荷に対しては、全く不適である。

以上の各エネルギー蓄積方式に基づくパルスパワー電源が、相対的にカバーし得るパルス幅の領域を図-2に示した。

4. エネルギー移送とスイッチ

方式が半ば固定化されているエネルギー蓄積に対して、エネルギーを移送するためのスイッチに関する技術開発は多面化する需要に応じてますます盛んになってきている。

前述したように、その特性上高速のエネルギー放出を期待できない交直流発電機では、メカニカルに機能する特殊な投入スイッチを除けば、サイリスタに代表される半導体変換器で制御しながら蓄積エネルギーを

負荷へと移送する。

これらの半導体に関する技術は電力用機器への適用を目的に発展してきたもので、電圧・電流の立ち上がりがさらに高速なパルスパワー分野の需要に応えるまでには到っていない。しかしGTOを始め新しい素子が次々に開発され、半導体を利用できる領域が広がっていくものと期待される。

パルスパワーシステムにおいては、電気的に蓄積したエネルギーをスイッチングによって次のステージへと移送・蓄積しながらパワーを増幅する。蓄積する装置がコンデンサかインダクタかによって、それぞれ閉路スイッチまたは開路スイッチが必要になる。

4.1 コンデンサからの移送

コンデンサは、閉路スイッチによって蓄積されたエネルギーを急激に放出する〔図-3 (a) 参照〕。

コンデンサ電圧がプリセット値に達した時に始動するスパークギャップのような単純なスイッチが多く用いられる。図のように負荷が誘導性である場合、単極性の長時間パルスを得るためにクローバをおこない、さらに電流減衰を補うためには低速バンクによってパークローバをおこなう。またクローバスイッチを開路し各コンデンサバンクにエネルギーが還流した時点で、それぞれのスイッチを開路することによりエネルギー回収が可能である。

閉路用スイッチとしては、大きなパワーを高速で制御できる素子であるギャップスイッチが最も良く使われてきているが、大出力レーザの進歩につれて高速高繰り返し動作が要求されるようになり、その改良に関する研究が行われている。

4.2 インダクタからの移送

インダクタは、スイッチを開路した時にエネルギーを放出する〔図-3 (b) 参照〕。

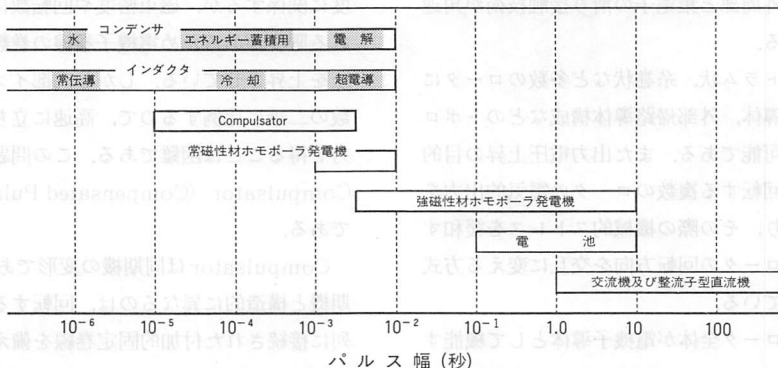
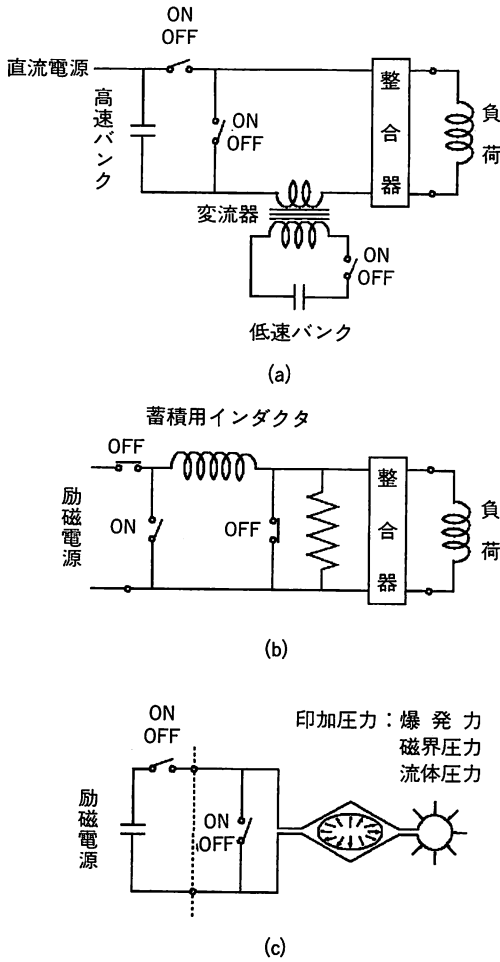


図-2 パルスパワー電源の適用可能なパルス幅の領域



整合器：電流変成器，パルス成形回路，伝送回路等

図-3 エネルギー移送

簡単なスイッチとしてはインダクタ電流がピークに達した後に溶断するように設計されたヒューズなどがある。しかし正確なタイミングが必要な時、繰返し運転をする場合あるいは効率を考慮する際にはしばしばより精密なスイッチが要求される。

適用領域の広い汎用性スイッチとして、半導体素子が有力である。また高温超伝導体の研究成果次第で、超伝導スイッチの実用化が期待できる。

4. 3 爆薬によるパルスパワーの生成

コンデンサとインダクタによるパルス生成の特殊な変形として爆薬による磁束の圧縮が可能である。

パルスパワー源としての爆薬の特徴は、高蓄積エネルギー密度と極端に高いパワーレベルでエネルギーを放出する能力である。

図-3 (c) に示すように通常はインダクタをコンデンサバンク等で励磁し、次に磁束を圧縮するために爆薬を起爆する。その結果、回路のインダクタンスが減少し、それに比例して回路内の電流は増大する。しかしインダクタは破壊される。

このパルスパワー生成方式は、爆発の激しい作用により殆どの応用面でシステムの有効性が制限されることや、単発 (single-shot) の装置であることなどが現段階での限界である。

5. おわりに

パルスパワー電源について全体的に極めて大まかに述べたが、パルスパワーシステムにおいて電源の担う役割は、要求されるエネルギーを適切なパワーレベルで供給するのみならず時間的特性、すなわち必要とされる電圧電流波形を生成することにある。

この波形成形技術にとって最も重要な機能を果たすが、各種のスイッチである。特に高速で作動するパルスパワーの制御には、高電圧のもとでの高速応答が要求される。そのうえ最近では高繰返し動作をも要求されるようになり、始動特性向上のみならず寿命延長を図る必要がある。

また電源規模が拡張されるにしたがって構成素子の単器容量増大のみでは対応することが不可能になり、多数の素子の直並列運転が必要になってくる。その際には、各素子の動作状況を監視し、安定した特性を発揮させ電源としての信頼性を向上させるシステムが必要になってくる。

現在パルスパワー技術は、制御熱核融合研究、高エネルギー粒子加速器、レーザー、電磁発射機およびレーダ・ソナーなどの先端的検出システム等に利用されてきている。一方民生面では、金属成形や石油パイプラインのような巨大な金属部品の溶接等を含む多数の商業的応用がみられる。

また研究室規模では、種々雑多なシステムで使用されているものと思われ、今後ますます増大する多様な需要に答えるべく発展するであろう。