

電気集じん機用短パルス電源の開発

Development of Electrostatic Precipitator Using Short Pulse Power Supply

技術本部 川 畑 理^{*1} 亀 井 俊 典^{*2}
 神戸造船所 富 松 一 隆^{*3} 鈴 木 正 人^{*4}

高電圧かつ大電流の高速スイッチング素子として用いられているサイラトロン管を適用した短パルス電源を開発した。サイラトロン管と直列に磁気アシスト回路を接続することで、逆電流を抑制し長寿命化を達成した。また、もう一組のサイラトロン管と磁気アシスト回路を逆並列に接続することで双方向スイッチを構成し、共振現象を利用した急しゅんなパルス出力を1 Hz以下から60 Hz以上まで広い範囲で出力可能とした。この制御性の良い高電圧短パルス電源を電気集じん機(EP)に適用し製品化した。

We developed a short-pulse power supply using a high-voltage, large-current, high-speed switching element known as a thyatron tube. The reverse current was controlled by serially connecting magnetic assistance circuits to the thyatron tube, and long life time was attained. It operates as a switch when connected with of another pair of thyatrons and the magnetic assistance circuit reverses in parallel, outputting steep pulse using resonance based in the wide range from less than 1 Hz to more than 60 Hz. We improved performance by using a high-voltage, short-pulse power supply applied to an electrostatic precipitator (ESP).

1. ま え が き

EP用の高電圧短パルス電源の出力パルスの幅は、スイッチング素子のスイッチング速度に大きく依存する。スイッチング素子には機械式回転スパークギャップ、半導体素子(GTO, IGBT)等があるが、前者は100 kA/ μ sの急しゅんなスイッチング特性を有するものの、特に低周波パルス出力領域の運転条件に制約があり、また、後者ではスイッチング速度が1 kA/ μ sと遅いため、パルス幅100 μ s以下の短パルス化が難しい状況にあった⁽¹⁾。

1 Hz以下の低繰返しから60 Hz以上の高繰返しまでの幅広い運転範囲で制御性の良いEP用パルス電源を実現するため、大電力高速スイッチング素子として電子管であるサイラトロン管の適用を検討した。今回、当社独自の技術を加えることで、サイラトロン管の寿命に影響する逆電流を抑制することにより 1×10^{10} 以上のショット数を可能にした。このサイラトロン管を高速大電力スイッチング素子として適用したEP用短パルス電源を紹介する。

2. 短パルス電源回路

2.1 主回路構成

表1に本装置の仕様、図1に主回路構成を示す。

本装置は、高電圧直流電源により充電される充電コンデンサと容量性負荷との間に、磁気アシスト回路を直列接続した二本のサイラトロン管をそれぞれ逆並列に配置している。サイラトロン管のアノード電極が負荷側にあるものを順方向サイラトロン、それと直列接続された磁気アシスト回路を順方向磁気アシスト回路と称する。また、もう一方をそれぞれ逆方向サイラトロン管、逆方向磁気アシスト回路と称する。

充電コンデンサは高電圧直流電源からのエネルギーを蓄積する。

サイラトロン管は1素子当りの耐圧及び許容ピーク電流が非常に高い。表2に本装置で使用したサイラトロン管の仕様を示す。

磁気アシスト回路はそれと直列接続されたサイラトロン管の逆電流を阻止する働きを有する。

本装置は、配線経路のインダクタンス及び抵抗と充電コンデン

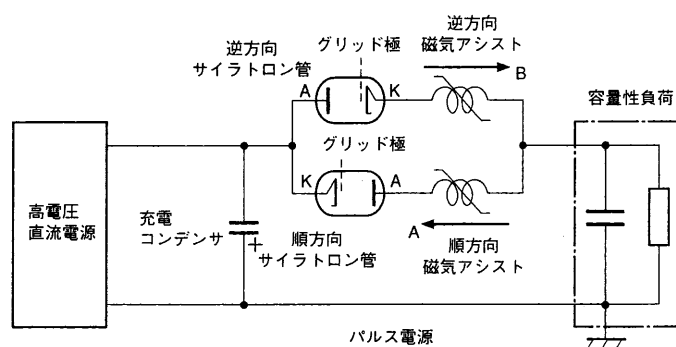


図1 主回路構成 装置の主回路構成を示す。
Main circuit for short pulse power supply

表1 装置仕様
Specification of short pulse power supply

項目	仕様
パルスピーク電圧	60 kV 以上
パルス周波数	0.5~60 pps
パルス幅	10 μ s 以下
連続運転時間	2 年間以上 (60 pps)

表2 サイラトロン管 (EEV 製) 仕様
Specification of thyatron

項目	仕様
耐電圧	80 kV
ピーク電流	10 000 A
平均電流	10 A
最大繰返し周波数	5 kHz

サ及びEPのキャパシタンスによるLCR共振でEPにパルス電圧を供給する。

2.2 パルス出力動作原理

以下の①～⑧を外部から設定された周波数で繰返すことで連続的にパルス出力を行う。

- ① 高電圧直流電源にて充電コンデンサを設定値まで充電する。
- ② 順方向及び逆方向サイラトロン管のグリッド極にトリガパルス信号を入力する。
- ③ 順方向サイラトロン管がオン、順方向磁気アシスト回路が飽和する。
- ④ 充電コンデンサ容量、負荷の静電容量、配線インダクタンス、

*1 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター主務
 *2 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター

*3 機械・環境装置技術部排煙処理プラント設計課主務 三菱重工技報 Vol. 36 No. 2 (1999-3)
 *4 電子・宇宙技術部装置制御設計課

配線抵抗から決まる共振電流が充電コンデンサから負荷の静電容量に向かって流れる。

- ⑤ 充電コンデンサから負荷の静電容量へエネルギー移動が完了すると、次に逆方向サイラトロン管がオン、逆方向磁気アシスト回路が飽和する。
- ⑥ 逆方向サイラトロン管の順電流が流れ、負荷の静電容量から充電コンデンサにエネルギーが帰る。
- ⑦ 上記③～⑥は充電コンデンサ電圧と負荷電圧がほぼ等しくなる（振動が減衰する）まで繰返される。ただし二回目以降共振電流が流れるとき、各サイラトロン管は既にオン状態である。
- ⑧ 充電コンデンサと負荷電圧が平衡状態になり、主回路電流がなくなるとサイラトロン管はオフする。

2.3 磁気アシスト回路

2.3.1 磁気アシスト回路の概要

磁気アシスト回路はスイッチング素子と直列に接続し、可飽和リアクトルの飽和動作を利用して電流が流れる時間を遅らせるものである。

本装置の磁気アシスト回路に適用した可飽和リアクトルのコアには、高周波特性に優れた薄膜テープ状のアモルファスを何層にも重ねたコアを使用している。アモルファスコアは角型比に優れており、電流の遅延時間が印加電圧と印加時間で管理できるため使用例も多い。

アモルファスコアもその他のコア材と同様にその構成成分によって特性が異なる。本装置に適用したアモルファスコアは、断面積を低減しても高い磁束密度を保持するものを選定している。

本装置の主回路には、短時間ではあるが高周波電流が流れる。よって、表皮効果による配線の損失を無視できない。本装置の導体には編組線、銅板、銅パイプを用いて表面積を確保し銅損を低減している。

磁気アシスト回路はサイラトロン管がオフからオンとなる期間、主回路電流を遅延させる必要がある。前記の薄膜テープを積層したコア1個で構成すると積層数が増加し寸法及び重量が増大するため、本装置ではコア外形を百数十mm程度にした可飽和リアクトルを多直列とした。また多直列にすることで磁気アシスト回路の両端に印加される電圧を分圧し、アモルファスコア表面で発生する沿面放電を抑制している。また高周波の共振電流はピークで約10kAの大電流となるため、コアの磁気飽和によりサイラトロン管に逆電流を流す可能性がある。本装置では磁束密度を確保するため、直列接続した可飽和リアクトルを更に並列接続している。

2.3.2 磁気アシスト回路動作

本装置におけるパルス出力時の磁気アシスト回路の動作を図2に示す。同じタイミングでトリガパルスを両サイラトロン管のグリッド極に与えると順方向サイラトロン管のみオンする。これはサイラトロン管は順電圧が印加されないとオンしないという特徴を利用したものである。順方向サイラトロン管がオンすると充電コンデンサ電圧は順方向磁気アシスト回路に印加され瞬時にコアが飽和し、図2の主回路電流(A)の矢印に示す方向に電流が流れる。

次に逆向きの共振電流が流れる瞬間、逆方向サイラトロン管に順電圧が印加されオンし逆方向磁気アシスト回路に電圧が印加される。また、同時に順方向磁気アシスト回路にも同じ電圧が印加される。しかし、順方向磁気アシストには前の動作で主回路電流が流れており、転流する瞬間にはその電流を阻止するように電圧が誘起されるので、適切な電流遅延時間をそれぞれのコアに対し

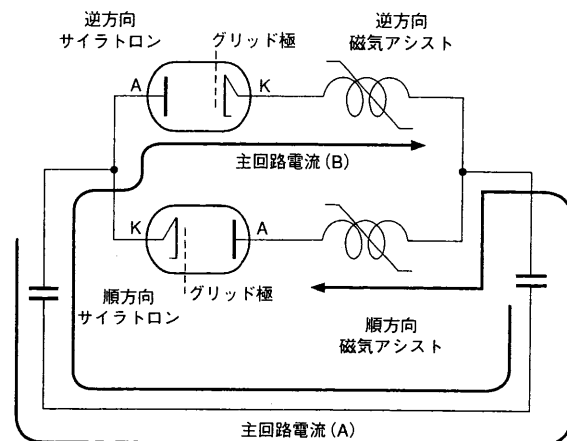


図2 磁気アシスト回路動作 磁気アシスト回路による電流の流れを示す。

Explanatory drawing of magnetic assist

て選定すれば、必ず先に逆方向磁気アシスト回路が飽和し、図2の主回路電流(B)が示す経路で逆方向サイラトロン管の順電流が流れる。

逆方向磁気アシスト回路のコアは飽和している期間、電流が流れることで更に磁界の強さが増すが、順方向磁気アシスト回路には電流が流れず、また電圧も印加されないで $B-H$ 曲線上のある1点からほとんど状態変化しない。よって、二回目以降でも図2の主回路電流(A)の矢印方向に電流が流れる場合には順方向磁気アシスト回路側が先に飽和する。

以後磁気アシスト回路が同様に動作しサイラトロン管劣化原因である逆電流を抑制する。

2.4 サイラトロン管駆動回路

サイラトロン駆動回路を図3に示す。サイラトロン管駆動回路はタイミング回路、トリガ電圧生成回路、オンバイアス回路、オフバイアス回路、ヒータ電源回路で構成される。それらは各サイラトロン管に各々1回路設置した。

順方向及び逆方向の各サイラトロン管のカソード電位は大地電位から最大約60kVの電位差を持つ。そのため各サイラトロン管駆動回路は72kVの絶縁トランスでそれぞれ大地電位と絶縁した。外部トリガ発信回路とのサイラトロントリガ信号、故障出力等の信号は光信号に変換し入出力している。

タイミング回路は外部トリガ発信回路から光信号を受信し、サイラトロン管のグリッド極に与えるトリガ電圧信号のパルス幅及び出力タイミングを後段の回路に与える。

トリガ電圧生成回路では、タイミング回路からのパルス幅指令に応じた急しゅんなパルス電圧を発生する。

サイラトロン管は半導体素子のサイリスタと同様に、順電流がなくなるとオフする特徴を持つ。本装置では2本のサイラトロン管に電流が交互に流れ無電流期間が存在するため、その間オン状態を維持する必要がある。サイラトロン管内部には水素ガスが封入されており、トリガ電圧発生回路の出力が内部の水素を励起しプラズマが生成されることによりオンとなる。このプラズマを維持するため、グリッド極から減衰電流がなくなるまで電流を流込む必要がある。オンバイアス回路はその電流を供給するもので、前述のトリガ電圧生成回路が急しゅんなパルス電圧を出力した直後から動作を始める。

オフバイアス回路は負電圧をグリッド極に印加し、サイラトロン管の誤点弧を抑制する。

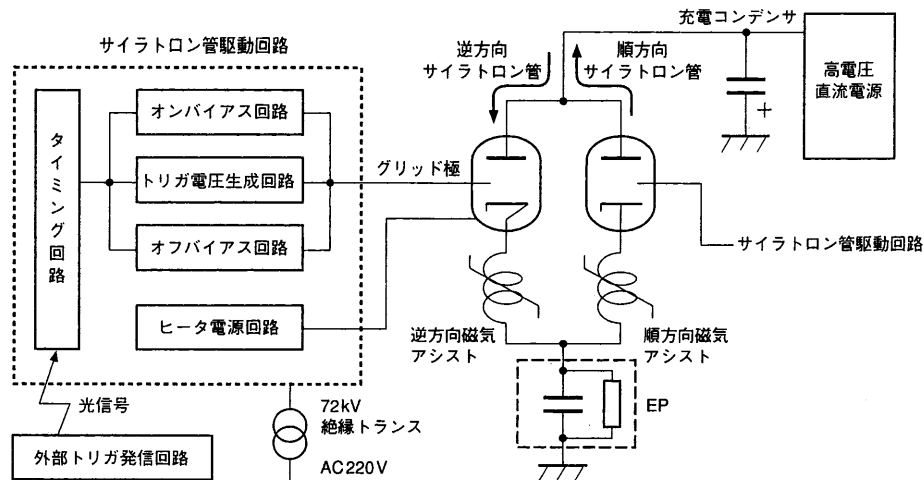


図3 制御回路構成 サイラトロン管を駆動する制御回路構成を示す。
Circuit of control system

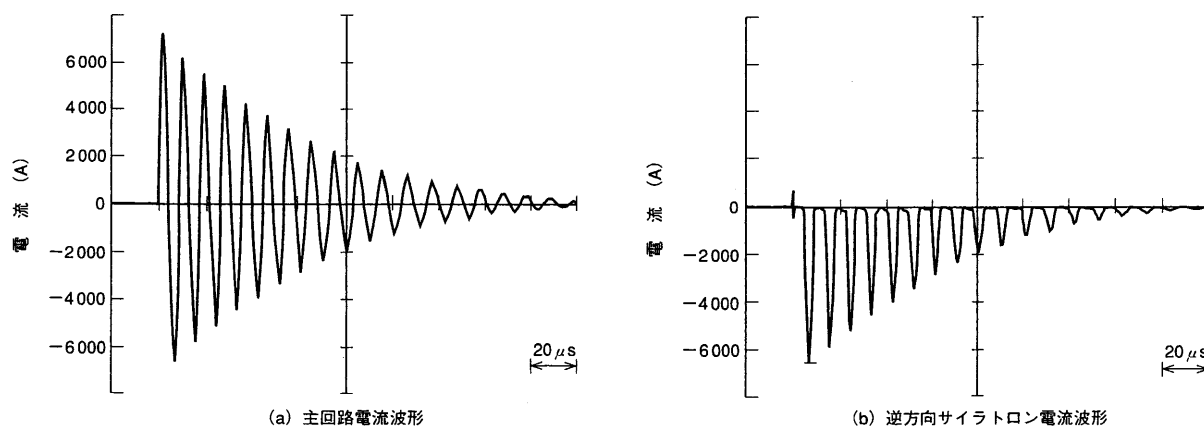


図4 主回路電流波形及び逆方向サイラトロン波形 磁気アシスト回路による逆電流阻止を示す。
Current waveform of main circuit and reverse thyatron

ヒータ電源回路は、電源電圧からサイラトロン管用ヒータに適合した電圧に変換する変圧器で構成される。

3. 電源単体試験

試作した電源装置に模擬負荷を接続し回路動作の検証を実施した。

3.1 磁気アシスト回路の逆電流抑制

図4(a)に主回路電流波形、(b)に逆方向サイラトロン管に流れる電流波形を示す。図4(b)の波形は(a)の波形の負側の電流しか流れておらず(a)の波形を整流した波形となっている。これは磁気アシスト回路がサイラトロン管の劣化進行の原因となる逆電流を阻止しているのである。

3.2 連続出力試験

図5に低頻度域として2 pps 設定時、図6に60 pps 設定時のパルス出力電圧波形を示す。また、図7に図5及び図6のパルス電圧の拡大波形を示す。10 μs のパルス幅を実現し、安定した出力結果を得た。

4. 電気集じん装置への適用

電気集じん装置（以下、EP と称す）は、EP 内を通過する排ガス中のダストをコロナ放電によって帯電させ、静電気力によって集じん極上に移動・捕集する。大容量の排ガスを少ない圧損で効

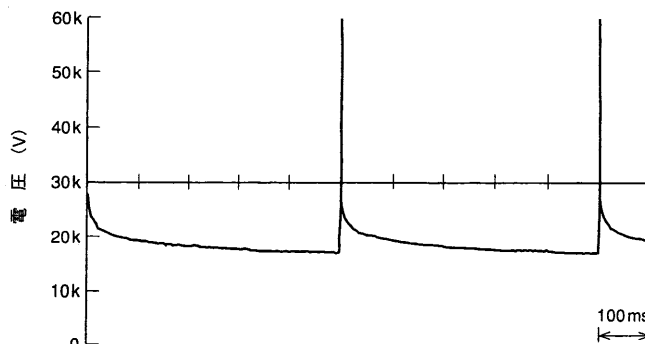


図5 2 pps 設定時出力電圧波形 低頻度パルス出力電圧波形を示す。
Output voltage waveform (2 pps)

率的に処理が可能なることから、ボイラ用や産業用等の環境保全対策装置として幅広い分野で利用されている。

EP 内を通過するガス内でコロナ放電を発生させた場合の放電極及び集じん極間の放電特性は、ダストの条件によって異なる。電気抵抗率が高いダストは集じん極上の微小な電流でも電界強度が大となり、ある電流値以上になるとダスト層の絶縁破壊強度以上になるため層内で絶縁破壊を生じ、その結果捕集したダストの一部を再度ガス中に散布する。この現象を逆電離現象といい、電極間の電界強度が十分確保できないのみならず、逆極性イオンが帯

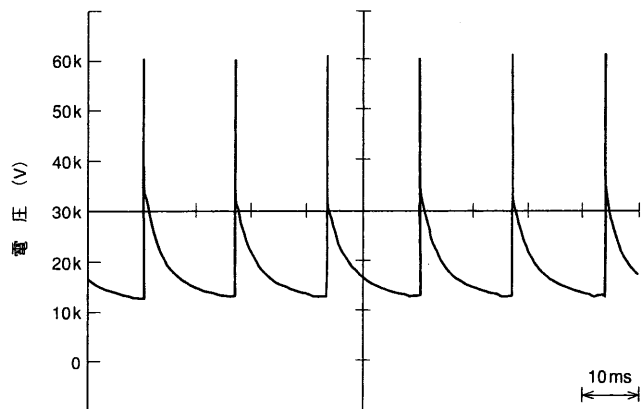


図6 60 pps 設定時出力電圧波形 高周波パルス出力電圧波形を示す。
Output waveform (60 pps)

電したダストを中和するように作用するため、ダストの帯電量が低下し集じん性能は著しく低下する。

逆電離現象対策の1つとしてパルス荷電がある。高電圧パルスを印加することにより、放電極の汚れ等の影響を受けず一様なコロナ放電が発生する。高電圧パルスでダストを一様に帯電させ、その後はエネルギーの供給を遮断することでダスト層での電界強度を絶縁耐圧以下に抑制して運転することにより逆電離現象まで至らせない。帯電したダストはその間 EP の静電容量に残存している電界によって集じん極へ移動し捕集される。

本装置を適用した場合、 $10\mu\text{s}$ のパルス幅であれば従来の商用周波数で間欠的に荷電制御を行う間欠荷電方式に比べ更に 10～20 % の集じん性能の改善効果があり、かつ同じ割合の集じん面積の小型化が可能になる⁽²⁾⁽³⁾。

図8にEP用パルス電源装置の外観を示す。

5. ま と め

パルス幅 $10\mu\text{s}$ 以下かつ 1 Hz 以下の低繰返しから 60 Hz 以上の高繰返しまでの幅広い運転範囲で、制御性の良い EP 用パルス電源を高速スイッチング素子にサイラトロン管を適用することで実現した。

近年のスイッチング素子の進歩は目覚ましく、本報で紹介したサイラトロン管以外にも今後大電力高速スイッチング素子が登場してくると思われる。

また大電力半導体スイッチング技術の分野では、本装置で適用した磁気アシスト回路を組合せることで、従来のスイッチング速度が向上することが確認されている⁽⁴⁾。

今後はそれらの高速スイッチング素子の特徴の把握、駆動技術の蓄積を実施し新しいアプリケーションを見いだしていくとともに、環境装置ではこれまでに得られた技術を基礎にして新技術を

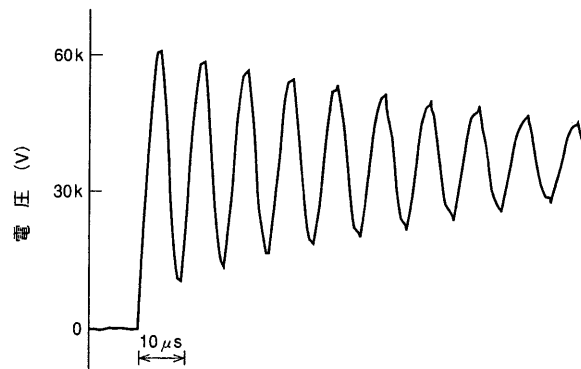


図7 拡大パルス電圧波形 パルス幅 $10\mu\text{s}$ を示す。
Zoom up voltage waveform

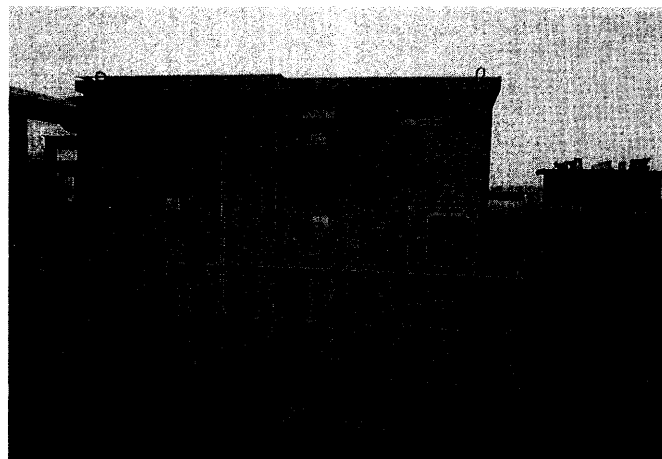


図8 EP用パルス電源装置 EP 上部に設置されたパルス発生装置を示す。
Electrostatic Precipitator using short pulse power supply

適用し、より高性能で信頼性の高い荷電システム技術の開発に取り組んでいく所存である。

参 考 文 献

- (1) 川畑 理, 高速・高繰返し大電力パルス発生技術の応用とその課題, 平成10年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集〔I〕 (1998) S.2～S.5
- (2) 片山博幸ほか, 新荷電方式集じん技術について, 三菱重工技報 Vol.31 No.4 (1994) p.252～254
- (3) 土屋喜重ほか, 省エネ高性能集塵技術—新荷電方式EP—, 動力第220号 (1994) p.37～46
- (4) 遠藤文彦, パワーデバイスを用いたスイッチング技術 平成10年度電気学会産業応用部門全国大会 講演論文集〔I〕 (1998) S.6～S.9