

称号及び氏名	博士（工学） 岩路 寛康
学位授与の日付	2024年3月31日
論文名	「非線形な放電負荷を有する産業装置における電源回路技術に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 小西 啓治 副査 久保田 寛和

論文要旨

産業装置に用いられる放電負荷は、電極間の電界により電極間の気体が絶縁破壊し、電子が放出されて電流が流れるという非線形特性を有している。非線形放電負荷は様々な要因で負荷インピーダンスが大きく変動することに加え、それぞれ特有の課題を有する。よってその駆動には、負荷特性に合わせた高周波、高電圧、および高速制御といった特殊な電源技術が必要であり、電源装置構築にも多くの工夫を必要とする。

例えば、水処理用の誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharge : DBD）式オゾンナイザ装置では、容量性放電負荷をリアクトルと共振させて高効率に駆動する必要がある。しかしながら投入電力により平均的な静電容量が変化する放電特性があるため、電力可変の全領域で、容量性放電負荷と共振用リアクトルで決まる共振周波数がインバータ駆動周波数にマッチングできない問題がある。また、特定の駆動条件で放電が不安定になる問題もある。よってこれらを防いで効率的に駆動することが必須の課題である。

また金属加工用の DBD 式 CO₂ レーザでは、放電生成過程に電極面状態や電界分布が強く関わり、電極面状態や電界不均一、ギャップ長や誘電体厚のばらつき、あるいは放電ガス不純物の影響で不安定放電になる可能性がある。よって、これを解決した電源による安定放電が課題である。また、高ピーク・短パルスの DBD 式 CO₂ レーザでは、駆動周波数とともに出力電流を増加して放電空間への投入電力を増加させる必要があるが、昇圧トランスを用いたインバータ電源では内部インダクタンス低減に限界があり、高ピーク・短パルス化ができない問題がある。よって、内部インダクタンスの増加要因である昇圧トランスを用いずに高電圧電源を構築し、MHz 級の高周波でインバータを駆動することが課題である。

さらに、PFC（Perfluoro-compound : 炭素とフッ素のみで構成される化合物質）ガス分解用マグネトロンでは、印加電圧の変動に対する出力電流や出力電力の変動が非常に大きいという問題やフィラメントのバックヒーティング（陰極逆過熱現象）による異常発振の問題がある。よってこ

れらを回避した電源を構築し、安定に駆動させることが課題である。

以上に述べた各種非線形負荷を有する産業装置の課題に鑑み、本論文では、これら非線形な放電負荷を有する産業装置における電源の主回路構築技術や制御技術を研究の対象とした。これら産業装置の安定化、高性能化について検討し、それぞれの放電負荷のもつ非線形な特性を把握した上で、それぞれの特性に合わせた電源装置を提案し、具体的な設計例を提示するとともに、提案する制御技術の有効性を実証した。

本論文は、緒論、結論を含め全9章で構成される。

第2章では、本論文の議論に必要な誘電体バリア放電(DBD)の特徴に触れ、DBDを用いた応用技術を述べた。これにより3章以降の議論の礎とした。

第3章では、放電を回路的に取り扱うために、マクロ的に見た放電を一種の非平衡系と考え、その平衡点の近傍で放電空間に印加される電圧が変動するという仮定で、放電のインピーダンスの過渡的な変化をモデル化する手法を検討した。実験結果からこのモデルパラメータを決定する方法を考察し、放電現象の「低周波の極限」、「高周波の極限」、「過渡特性」の3つの特性を用いてモデルパラメータを決定する手順を示した。この方法で高周波バリア放電の電流電圧特性をモデル化し、実測との十分な一致が得られたことを示した。これにより放電のマクロ的な回路モデル(マクロモデル)の理論的な基盤が構築でき、そのマクロモデルの設計方法を明確化することができた。

第4章では、大容量円筒多管型オゾンナイザを、安定かつ高効率に駆動する上で問題であった電力変動現象について、放電負荷の特性解析により理論的に説明した。さらに放電を安定駆動する条件を検討し、インバータ出力から見て、負荷が常に誘導性となる駆動が必要であることを示した。これらの検討から、投入電力変化時にインバータパルス幅と同時に駆動周波数も変化させる周波数可変制御方式を提案した。オゾンナイザ装置で電流、電圧波形を測定し、提案方式によって電力変動現象を抑制して安定制御できることを実証した。また電力変動時の電流、電圧特性の詳細分析により、電力変動現象が放電領域の変化と共振回路とのマッチングとの相乗効果によって引き起こされることを明らかにし、本章で述べたオゾンナイザの安定駆動の理論についての実験的裏づけを得た。

第5章では、DBD式CO₂レーザの安定駆動のための電源回路の構築手法を検討した。80 kVA出力電源の構成を示し、誘電体負荷とトランス漏れインダクタンスの共振条件を述べた。また、放電非点灯時の約900 kHzの高周波共振電流によるインバータ還流ダイオードのリカバリ損失について説明し、この損失低減のためのトランス1次側並列リアクトルの挿入条件を述べた。次に、DBD式CO₂レーザの駆動方法として、「コンバータ・インバータハイブリッド制御による電流共振モード固定駆動法」を提案した。放電試験に基づく制御パラメータの設定方法を述べ、制御回路の構築方法を示した。また放電試験により、出力指令に応じた25 kWまでの線形な電力制御と安定放電を確認し、本制御方式がDBD式CO₂レーザの駆動に有効であることを示した。さらにDBD式CO₂レーザの別の駆動方法として、インバータパルス幅や波高値は一定で、一定周期でインバータの運転/休止期間を選択して間欠運転(バースト動作)し、投入電力を調整するインバータPDM(Pulse Density Modulation)制御法を提案した。DBDで生じるレーザの出力安定性に着目し、レーザガスの上準位緩和速度とバースト周波数の関係について検討し、それを基に新たなパラメータとなるバースト周波数設定方法と制御回路構成について述べた。放電試験により投入電力が平均的に制御され、出力4 kWまでの線形なレーザ出力制御と安定放電を実証し、本制御方式がDBD式CO₂レーザの駆動に有効であることを示した。

第6章では、高ピーク・短パルスのCO₂レーザ駆動実現のため、内部インダクタンス増加の要因である昇圧トランスを無くし、高電圧を直接高周波に変換する『5 kV/50 A/2 MHz トランスレス高圧インバータ』を検討した。パワーMOSFETを6直列・4並列接続して高耐圧化したスイッチを1ユニットとし、それを4つ組み合わせたインバータ構成を示した。また、直列ステージ間の同期ずれ時の電圧上昇を抑制するスナバ回路について検討し、分圧を均等化し、電圧上昇が抑制できることを示した。また2 MHz動作時の並列間容量成分による充放電損失が特定のスイッチン

グユニットに偏ることを明らかにし、この損失を均等化するためにインバータ動作のモード入れ替えを検討した。これらにより、従来に比べて周波数が5倍で、ピーク電力が約25倍となる電源開発に成功し、従来の7倍のピーク値と1/10の短パルスのレーザ出力が得られたことを示した。

また、上記インバータのさらなる高繰り返し化を実現するため、インバータ MOSFET のスイッチング損失を低減する「浮遊容量電荷回収回路」を検討した。まず損失増大の要因となるインバータの総浮遊容量を明らかにし、この総浮遊容量電荷を回収する回収回路の構成と動作を示した。次に回路モデルを構築し、シミュレーションにより所望の回路動作が得られることを示した。提案回路の試作試験により、インバータ主回路の52%の損失低減が可能となり、繰り返し周波数を従来比2倍に増加できることを示した。

第7章では、PFCガスの分解除害装置用高出力マグネトロン駆動電源を検討した。マグネトロン出力電流と出力電力の解析を行い、インバータ出力への負荷線形化リアクトルの挿入で、パルス幅に対して出力電流と出力電力をほぼ線形制御できることを明らかにした。これによりマグネトロン出力を検出してパルス幅にフィードバックすれば、簡単に定電力特性が得られることを示した。この解析を基にした50 kHz インバータと倍電圧整流回路を用いた試作電源(5 kW, 1 A)でマグネトロンを駆動し、3.5 kW を越えるマグネトロン出力を線形かつ安定制御できることを実証した。更に、マグネトロン電流増加に応じてフィラメント電圧を適正值に下げるフィラメント駆動回路を試作し、マグネトロン出力を連続変化させる時にもフィラメント温度を所定範囲内に維持できることを示した。以上により、出力を広い範囲で連続的に制御できるPFCガス処理用高出力マグネトロン駆動電源が実現できることを示した。

第8章では、LEDやLD等のp-n接合電流駆動素子に順方向電流を流して発光させ、その単体発光を数10個～数100個単位で合成した高出力発光光源において、数個の電流駆動素子が開放状態に至った場合にも、開放前の電流駆動素子に流れていた電流を直列回路からバイパスさせ、主回路電流を継続的に流すことができる『自己導通型電流バイパス回路』を提案した。提案回路の構成と動作、および設計法について詳細に述べた。また回路の構成素子であるヒューズについて、第3章のマクロ的なモデル化手法を応用したシミュレーションモデルの構築方法について述べ、ヒューズモデルを利用した回路シミュレーションにより、MOSFETへの通電時間1 msec以下で回路が正常に動作することを確認した。試作回路によるダイオード開放時の電流バイパス動作では、ヒューズ溶断時間0.8 msで、60 Aの電流を継続的に流せることを実証した。本回路の損失は、同等の電流容量をもつダイオード(通電電圧 $V_{on} = 1.5$ V)を並列接続したバイパス回路に比べて1/10以下であり、回路の小型化が実現できることを示した。

最後に9章で、結論として本論文についての総括をした。

審査結果の要旨

本論文は、非線形な放電負荷を有する産業装置における電源の主回路構築技術と制御技術について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 放電を回路的に取り扱うために、放電インピーダンスの過渡的な変化をモデル化する手法を検討し、放電のマクロ的な回路モデルの理論的基盤の構築とマクロモデルの設計方法を明確化した。
- (2) 大容量円筒多管型オゾナイザを安定かつ高効率に駆動するための手法として、投入電力変化時にインバータパルス幅と同時に駆動周波数も変化させる周波数可変制御方式を提案し、有効性を実証した。また、電力変動時の電流、電圧特性の詳細分析により、オゾナイザの安定駆動理論の実験的裏づけを行った。
- (3) DBD 式 CO₂ レーザの安定駆動のための電源回路の駆動方法として、「コンバータ・インバータハイブリッド制御による電流共振モード固定駆動法」を提案し、提案制御方式の有効性を実証した。さらに DBD 式 CO₂ レーザの別の駆動方法として、PDM (Pulse Density Modulation) 制御法を提案し、線形なレーザ出力制御と安定放電を実証した。
- (4) 高ピーク・短パルスの CO₂ レーザ駆動実現のため、「5 kV/50 A/2 MHz トランスレス高圧インバータ」を検討し、従来に比べて周波数が 5 倍で、ピーク電力が約 25 倍となり、従来の 7 倍のピーク値と 1/10 の短パルスのレーザ出力が得られた。また、インバータ損失を低減する「浮遊容量電荷回収回路」を提案し、インバータ主回路損失を 52% 低減できることを実証した。
- (5) PFC ガスの分解除害装置用高出力マグネトロン駆動電源を検討し、マグネトロン出力を線形かつ安定制御できることを実証した。さらに、マグネトロン電流の増加に応じてフィラメント電圧を適正値に下げるフィラメント駆動回路も提案し、出力を広い範囲で連続的に制御できる駆動電源を実現した。
- (6) LED や LD 等を数 10 個～数 100 個単位で合成した高出力発光光源において、数個の電流駆動素子が開放状態に至った場合にも、開放前の電流駆動素子に流れていた電流を直列回路からバイパスさせ、主回路電流を継続的に流すことができる「自己導通型電流バイパス回路」を提案し、試作回路によるダイオード開放時の電流バイパス動作より提案回路の有効性を確認した。

以上の諸成果は、放電負荷を有する様々な産業装置の高性能化、高機能化に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。