

小特集

熱プラズマの産業応用における現状

7. 高周波熱プラズマ発生装置の現状と将来

谷口美樹, 原田和彦
(電気興業株式会社)

The Present State and Future Prospects for Radio-Frequency Induction Thermal Plasma Systems

TANIGUCHI Yoshiki and HARADA Kazuhiko

Radio Frequency Administration, Denki Kogyo Co., Ltd. Kanagawa, 243-0303 Japan

(Received 28 April 2000)

Abstract

At the moment, various kinds of Radio-Frequency (RF) electricity or direct-current electricity application systems are used in the field of thermal plasma systems. RF electricity application systems include individual continuous output systems and pulse modulation systems for various frequency zones. In this paper we are going to discuss the applications for such systems. We will also propose new developments and examine future prospects for RF induction thermal plasma systems, these include a wider frequency zone, AM modulation and FM modulation.

Keywords:

industrial utilization, radio-frequency electricity, continuous wave, pulse, AM modulation, FM modulation

7.1 はじめに

高周波による熱プラズマの特徴は、高周波コイルを使用するため無電極型となることである。そのために電極から発生する各種のガスに影響されない、純粋なプラズマが得られる。また、トーチ内において各種の反応性の強いガスを使用することができる。

7.2 高周波電源と熱プラズマの関係について

高周波熱プラズマを工業的に利用する際、目的に応じて、様々な形態の高周波電力発生方式を選択することができる。例えば、インピーダンス変動の大きいプラズマを継続点灯する場合は自励式発振回路が適している。逆に高周波電力や周波数の精度を要求する場合、または、プラズマのインピーダンスを算出する場合には、他励式増幅回路が有利になる。

次に、選択する周波数によって、プラズマの内部まで

author's e-mail: y-taniguchi@denkikogyo.co.jp

高周波電力が浸透するか、外側が高温のプラズマになるか等の差が見られるために、特に直径が数十 mm 程度を超えるプラズマを得る場合には、周波数の選定も重要な要素になる。整理すると、高周波電源の性能を決定する上での大きな選択肢は、自励式発振回路を選択するか、他励式増幅回路を選択するかと、どの周波数を使用するかと、最大高周波電力をどの程度とするかの3点がある。これらが、高周波電源の性能を決定する上で、最も大きな選択肢となる。高周波電源の利用者はこれ以外にも選択の幅を広げることが可能であるが、上記3項目の選択肢の各々の特長と、それらについての詳細な記述は7.4節に委ねるものとする。

7.3 熱プラズマ用高周波電源の形式と特徴

ここでは、典型的な大電力型の高周波発振器の実例について述べる。

7.3.1 他励式大電力型の実際の装置の例

まず高い増幅度を得ることができるカソード接地方式をとった、最大高周波出力・連続100 kWの4極真空管他励式大電力型装置の場合を述べる。この装置の出力周波数は0.5 MHz - 4 MHzで、主なシステム構成はFig. 1のとおりである。

他励式発振器は、もっとも重要な特徴として、プラズマに投入されている高周波電力が比較的正確に把握できることがあげられるが、そのほかにも周波数の安定性に優れ、必要に応じての微調整や周波数変調が可能であることや、パルス変調を初めとするAM変調が容易に行えること、高周波電源と熱プラズマの間の距離を自由に選択できることがあげられる。

この装置において実際に発生した現象の一つとして、整合器で異常放電が発生する場合があった。主な原因として突然プラズマが消えると、プラズマ発生部 - 整合器間に定在波が発生し、主に整合用のVVC(真空可変コンデンサ)を駆動している絶縁軸棒の両端に極めて高い高周波電界が発生することによるものと推定できたが、絶縁軸棒と筐体間や、軸棒そのものの絶縁を強化し、さらに伝送路の一部にアレスタ(定電圧放電器)を設置して、異常電圧発生時に回路構成機器に負担をかけないようにすることによって、その後に異常放電は発生していない。

突然プラズマが消えるという状況は、プラズマに微粒子等を混入していく過程で起こるようである。主な原因としては、プラズマのインピーダンスが急激に変動し、整合器(自動駆動)の動作が追いつかず、プラズマに投入される実効電力が、プラズマの維持電力を下回ってしまうようであるが、例えば、整合器の動作(反応)速

度を上げて、急激な負荷変動に対応するような対策を取らないと、解決が困難なようである。

さらに、整合器の動作範囲であるのに整合がとれないことがあったが、これは主な原因として、反射波に高調波が多く存在し、自動整合回路が正常に機能できないことが推定できた。そこで、対処方法として自動整合用の計測回路に、使用周波数のみを通過させるバンドパスフィルタを挿入し、高調波をカットしたところ、大きな改善を見ることができた。

7.3.2 自励式大電力型の実際の装置・結合コイルの例

次にタンクコイルを有効に活用できるコルピッツ型回路を用いた、最大高周波出力・連続100 kWの自励式発振装置の場合について述べる。この装置の発振周波数は2 MHz - 4 MHzで、主なシステム構成はFig. 2のとおりである。

自励式発振器はもっとも重要な特徴として、熱プラズマの状態にあわせて発振周波数が変化するため、整合器を用いなくても高周波電力がプラズマに効率よく投入でき、反面、発振周波数が安定しないということがあげられるが、源発振や前段増幅器、整合器が不要で、システムがシンプルになるという利点がある。

一般に、産業用として使用する機器はこの自励式発振器が多く、100 kW級のもので、全体の機器サイズは2×3 m程度の設置面積に抑えることができる。また、高電力になるほど結合コイルのインダクタンスを十分に得ることができる回路を構成することが難しくなるため、結合コイルと電源装置の距離は短くしなければならない。結合コイルの巻数もプラズマとの結合を十分にとるためには2~3巻以上を取る必要があるが、こういった条件に適しているのが、コルピッツ型回路であり、熱プラズ

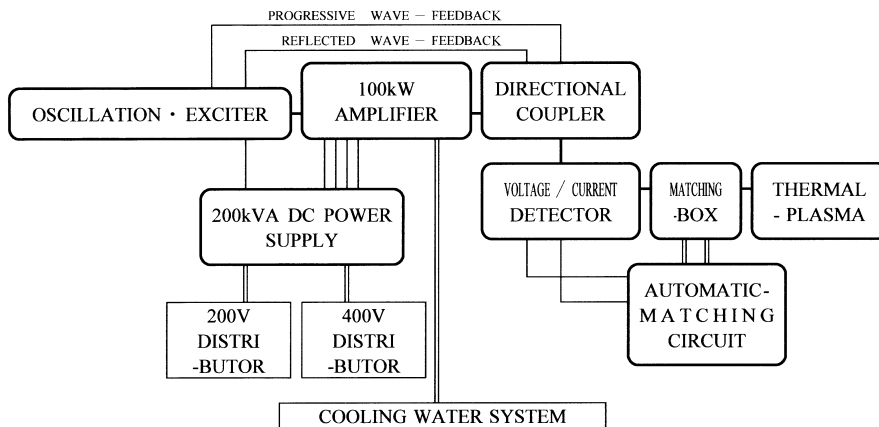


Fig. 1 General composition of separately-excited oscillator system.

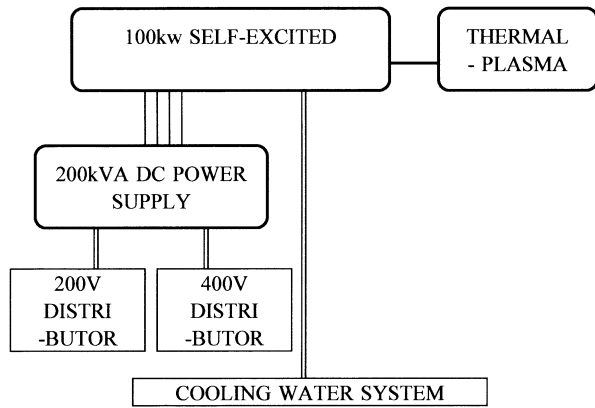


Fig. 2 General composition of self-excited oscillator.

マ発生用の一般的な自励式発振器としては多く用いられる。

しかし、自励式発振器による熱プラズマ発生方法も、プラズマ状態の変動に対して万能であるというわけではない。例えば急激なプラズマ状態の変化（多くはガス流量の変化や不純物の導入による）や、真空系の性能等によってプラズマのインピーダンスが変化した時にはプラズマを維持しきれない場合もある。また、その他の要因によっても、例えばプラズマがプラズマトーチの内壁に接触してトーチを破損するという現象を引き起こす場合があり、熱プラズマユーザが多く直面する問題である。これらの個別の原因は、十分には解明されていないものもあるが、7.6節で触れるように、今後、熱プラズマを期待する成果に役立てるべく制御していくにあたっては、様々な要素を勘案した上でプラズマ状態の解析、シミュレーションを行い、不確定要素を取り除いていく必要があるが、電源の状態制御（周波数や電力の安定）については、自励式発振器は他励式発振器に対して自由度が少ない点があることも否めない。

7.4 高周波熱プラズマ装置の要点

7.4.1 他励式と自励式の比較

システムとしての価格は他励式は自励式に比較して高額になり、システム構成としても他励式の方が複雑になる。これは、他励式では高周波増幅器本体と直流電源のほかに、源発振器や励振増幅器、負荷との整合を取るための整合器などが自励式のシステムに加えて必要になるためであり、構成全体としても大型化する傾向にある。

操作性も、システムの複雑さに関連して、他励式の方がより煩雑になる傾向にあるが、多くの操作は自動化が可能であり、本質的な点では、他励式には整合作業が伴

うという点を除いては大きく異なるものではない。

高周波のコントロール並びに把握という面から見れば、他励式は自励式に対しての利点が大きく、高周波電力の周波数の安定度という面では、圧倒的に他励式の方が勝っている。また、プラズマ部に伝送される高周波電力値の計測についても、方向性結合器などによる直接的な測定ができる他励式の方が長じており、自励式においては、高周波電力の正確な計測は困難な点が多い。高周波出力電力の安定性や再現性において、他励式は自励式に勝る点が多く、周波数や高周波電力等の主要な定数が任意に制御できるという点でも長じている。整合器の状態からプラズマインピーダンス等が推定できるという利点もある。以上のことから他励式は比較的、研究用途に適していると言える。他方、他励式に対し、高周波のパラメータや、プラズマの状態などの詳細は把握が難しい自励式は、単位エネルギーあたりのコストを低く抑えることができるという点からも、産業用途に適していると言える。

7.4.2 周波数の違いによる特徴

周波数が高くなると表皮効果により、比較的外側の温度が高くなる[1]。例えば半径が数十mm以上のプラズマの中心部まで高周波電力を到達させる場合には、1~2 MHz以下の周波数を選択する。逆に、表面付近が高温のプラズマを得るには、周波数を高く選ぶこととなる。高周波が導電体に浸透する表皮深さ(1/e深度) δ_s は、プラズマの体積抵抗の平方根に比例し、周波数の平方根に反比例する。

7.4.3 パルス変調の特徴

例えば、高周波電力のパルスコントロールという手法を選ぶことができる。パルス変調は、低く抑えた平均電力(発生熱量)において、高いピーク電界をプラズマに与え、様々な電界条件の元での熱プラズマ反応を活用することができる。

通常熱プラズマとして生成される20~30mmの半径を持つプラズマは、MF, HF帯(1~10MHz)の高周波電力に対しては、その電界のマイクロ秒単位の時間変化に対して追従することはできないが、10ms以上程度の周期、すなわち数十Hz程度の周波数で変動する電磁界強度に対しては、プラズマの状態も変動すると考えられる。このことから、プラズマの時間的な平均電力が自由に調整でき、かつ、連続発振による電界では得られない強電磁界印加がパルスオン時に、また、励起電磁界がない高速冷却効果がパルスオフ時に得られる、さらにこれらは、従来までの平衡状態熱プラズマに対して、熱的平

衡状態から逸脱した非平衡効果を導入できる。

つまり、高周波の入、切（または強、弱）に伴ってプラズマを発生・維持すると、熱プラズマの特徴である超高温反応場と低温場の繰り返し、またそれぞれの状態の間の遷移過程を併せ持つ新しい反応場を得ることができる。この反応場では、熱プラズマの持つ高エネルギー状態を維持しながらトータルエネルギーを押さえることが可能である。すなわち、熱損傷を軽減でき、高速の状態遷移に伴う高濃度の活性化学種の生成が期待できる[2]。

無機材質研究所と金沢大学工学部らのグループは、周波数 1 MHz の固体素子インバータ電源を、パルスオンの時間が 5 ms、オフ時間が 5 ms のパルス化した高周波電力によって、パルス・オン時に約 12,000 K、パルス・オフ時は最低で約 6,000 K まで降下するプラズマを発生することに成功している。この時は、パルス・オフ時にも高周波電力を完全に停止したのではなく、電力レベルで、オン時の 25% 程度の電力を高周波コイルに伝送している。

7.4.4 FM 変調の特徴

これは他励式増幅器を利用した場合に可能な手法であるが、周波数を広範囲に変化させることによって、半径方向の広い範囲にわたって高温の熱プラズマを発生することが原理的には可能である。ただし、範囲の広い周波数にわたって整合を取ることが困難であることから、2 - 3 種類の異なる周波数を組み合わせて、高周波電力をプラズマに投入し、複合周波数で熱プラズマを加熱することが現実的である。この技法は、低温プラズマの一部では使用されている。

7.5 整合技術について

特に、他励式高周波共振器を用いて熱プラズマを発生させる場合には、高周波電源とプラズマ発生部の間に整合器を用いて、電源側から見た負荷のインピーダンスマッチングをとる必要がある。インピーダンス整合方法については VVC 共振型・電流駆動可変インダクタンス型等が考えられ、一般的には VVC を用いた整合回路がよく使われるが、プラズマのインピーダンスが急激に変動した時などの負荷追従速度に限界があり、プラズマの維持ができない場合がある。

この問題解決の一法として、電流可変インダクタンスを用いる方法がある。

7.6 熱プラズマ発生システムの展望

ここまでは主に、熱プラズマ発生装置の高周波電源側

に立脚した視点から述べてきた。しかし熱プラズマに影響を与えるのは、高周波電源だけではなく、プラズマ発生部の形状や真空系の性能、その他システムとしての構成であり、各々の要素だけに着目していても問題解決にならない場合が多いと考えられる。

必要な現象を得るためのプラズマ制御を行うには、多くの構成要素を総合的に把握しなければならない。例えばハード面では、高周波熱プラズマの構成は概略、高周波電源・整合器・プラズマトーチの 3 構成からなるが、極言すればそれらが無限大のインピーダンスから、短絡に近いインピーダンスまで対応できるプラズマ発生システムでなければならない。また、ソフト面では、熱プラズマの化学的性質、物理現象など、広範囲なプラズマの性格を分析理解していなければならない。そしてそれらの項目が一方に向かうベクトルをもっていなければならない等、電気、機械、化学、物理の専門分野からなる総合技術を基幹として熱プラズマシステムは成り立っている。

今後の熱プラズマの利用を拡大していくためにも、専門家からなる協調（密接な情報交換）は必要である。負荷側、すなわち熱プラズマの解析をもとに、負荷コイルの形状、巻数、コイルの結合度等、より適切な値が得られるよう、高周波電源の設計を進めていく必要がある。また、熱プラズマの制御技術については経験則に基づくノウハウが多く残されており、今後、プラズマ制御に関して、より細部に踏み込んだ情報交換・整理を行うことによって、各地で行われている熱プラズマ研究のベーシックな部分が有機的に結びつき、本質的な研究に労力を集中することが可能になることが期待される。

そこで要求される各種のコントロールが可能な高周波電源・整合回路・結合コイルやプラズマトーチを提供していくのが、高周波システムメーカーの今後の課題かも知れない。

参考文献

- [1] 渡辺隆行, 坂野美菜: 第12回専門講習会テキスト「プラズマを利用した廃棄物処理・リサイクル」プラズマ・核融合学会 (1999) p.93.
- [2] 作田忠裕, 田中康規, 香月 真, 石垣隆正: 日本金属学会誌 63, 2 (1999).