大型トカマク装置における多巻線トランスを用いたプラズマ着火装置とポロイダル磁場コイル電源システムへの応用

正員 松川 誠 (日本原子力研究所)

非会員 二宮博正 (日本原子力研究所)

非会員 堀池 寛 (大阪大学)

非会員 大川慶直 (日本原子力研究所)

非会員 長谷川満 (三菱電機株式会社)

A plasma initiator using a multi-winding transformer for large tokamak devices and the application to the poloidal field coil power supply system

Makoto Matsukawa, Member(JAERI), Hiromasa Ninomiya, Non-Member(JAERI), Hiroshi Horiike, Non-Member(Osaka University),
Yoshinao Ohkawa, Non-Member(JAERI), Mitsuru Hasegawa, Non-Member(Mitsubishi Electric Co.)

This paper describes a multi-winding transformer as a plasma initiator in tokamak devices and the application to the design of poloidal field coil power supply system. The scale of tokamak device has been considerably increased based on some experimentally obtained scalings of a energy confinement, because the plasma performance has been improved with the current and size parameters. Since large tokamaks require the hybrid functional poloidal field coil system, the each coil power supplies must prepare the high voltage generation circuit for the plasma breakdown, and it causes increase in the number of current interrupters, disconnectors and the resisters. Therefore, the plasma position and shape control tend to be difficult especially in the start-up phase of the discharge. The plasma initiator proposed in this paper makes the plasma initiation circuit to be simple by unification of the high voltage generation circuit. It has similar ampere-turn and permeance distribution with the tokamak device and produces the magnetic field necessary for plasma breakdown. An application to FER tokamak proposed by JAERI is also presented.

キーワード：トカマク装置、ポロイダル磁場コイル電源、プラズマ着火、電源システム、ブレイクダウン

1. まえがき

JT-60やJETをはじめとした近年のトカマク型核融合実験装置によるプラズマ性能の向上は著しく^{(1)・(2)}、次期装置の設計もより具体的、工学的な段階に移行しつつある。日米欧露の四極による国際熱核融合実験炉(ITER)は、概念設計活動(CDA)を成功裡に終了して、工学設計活動(EDA)へと進展した。また、日本原子力研究所(以下原研と称する)では、同時に国内次期装置として核融合実験炉(FER)の設計も進めている。このような次世代の大型トカマク型核融合装置においては、コイル発熱の抑制および電流密度の向上のために超電導コイルが用いられる⁽³⁾。一方、プラズマの位置形状については、従来に増して広い領域での非円形度や三角形度の制御が要求される。このためにはポロイダル磁場コイルがプラズマに接近している方が有利であるが、次期装置では遮蔽構造材等のために、ポロイダル磁場コイルをプラズマに近づけることができない。プラズマから離れた位置に、単機能ポロイダル磁場コイルを配置してプラズマ断面形状を制御しようとする、コイルの起磁力が互

いに打ち消し合い、空間や電源の利用効率が低下し、コイルの設計が困難になる。このため、コイルブロック数の集約化による起磁力の合理化を行い、プラズマの電流駆動と位置形状制御の機能を併せもつ、ハイブリッド機能ポロイダル磁場コイルを採用する必要がある⁽⁴⁾。

ところが、ハイブリッド機能ポロイダル磁場コイルに各々独立した電源を用意する場合には、プラズマ着火のための高電圧発生回路がコイル数だけ必要となる。さらに、初期励磁電流の自由度を確保するために、抵抗値をある程度選択可能とする必要がある。また、コイル電流定格を下げ、効率的にプラズマに磁束を供給するためには、内周側のコイルは両極性とするのが有利で、電源に対してはいわゆる四象限運転が必要となる。このことは、プラズマ着火直後の低プラズマ電流域、つまりポロイダル磁場コイルの最大励磁付近において、最も高精度の電流制御性が必要とされることを意味している。このように電源システムに対して要求される機能は、単機能ポロイダル磁場コイルの場合よりも厳しいものとなるが、トカマク装置それ自身の工学的成立性が優先される。

しかし、次世代トカマクの運転において高電圧を必要とするのは、主としてプラズマ着火のためのブレークダウン電圧を確保するためであり、着火後は低電圧で十分である。すなわち、比較的短時間の高電圧発生能力と長時間の大電流供給能力を、ハイブリッド機能ポロイダル磁場コイルのもとで効率良く構成することができれば、上で述べた電源システムに対する厳しい要求は軽減できる。

本論文は、起磁力およびパーミアンス分布がトカマク装置と幾何学的に相似な多巻線トランスを、プラズマ着火装置として採用することを提案する。これは、トカマク装置内部に発生するプラズマとポロイダル磁場コイル間の相互作用の逆関数を、トカマク装置の外で多巻線トランスを用いて実現しようとするものである。この結果、プラズマ着火のための高電圧発生回路の簡素化と、着火直後の低プラズマ電流域における制御性が向上する。また、ハイブリッド機能ポロイダル磁場コイルシステムにおいても、単一の高性能電源による高速プラズマ位置制御が可能となる。

2章では従来からのポロイダル磁場コイルと電源システムの構成方法について分類を試み、本システムの位置づけを明らかにする。3章では提案する新システムの構成とその動作原理を述べる。さらに4章でFERへの適用例について述べ、5章で高速プラズマ位置制御への応用に言及する。結論は6章で述べる。

2. ポロイダル磁場コイルと電源構成方法の分類

従来のトカマク型核融合実験装置のポロイダル磁場コイル電源システムは、表1に示すように分類することができる。原研の臨界プラズマ試験装置JT-60は、単機能コイル-独立型電源の代表的なものである⁽⁵⁾。ポロイダル磁場コイルは磁束供給コイルと位置形状制御コイルに分けられ、位

置形状制御コイルはさらに垂直磁場、水平磁場、ダイバータコイルなどに分割されて、各々独立の電源制御系が設けられている。大きな初期励磁電流が必要なのは磁束供給コイルのみで、これは効率良くプラズマに磁束供給を行うために、コイル電流を両極性としているためである。従って、高電圧発生回路⁽⁶⁾は磁束供給コイル用電源のみに設けられる。位置形状制御コイルと磁束供給コイルの磁気結合は可能な限り小さくして、プラズマ着火時における誘導電圧を下げている。このタイプのトカマク装置は、プラズマ位置形状制御パラメータと対応するコイルの関係が明確で、制御システムの構成が容易なのが特長である。反面、起磁力を有効に利用できないので、次世代トカマクには不向きである。

単機能コイル-結合型電源の例としては、米国のダブレットIII装置(DIII-D)がある⁽⁷⁾。垂直磁場コイルが外周側のみに設置されているため、磁束供給コイルとの磁気結合が大きい。このため、プラズマ水平位置制御のために垂直磁場コイル電流を制御すると、同時にプラズマ電流も変化させてしまう。そこで、コイル-電源系を結合して、フィードフォワード的に誘導電圧を補償させている。しかし、このためには磁束供給コイルおよび垂直磁場コイルの巻き数比を適切に設定し、コイルの電圧定格を調整する必要がある。良好なプラズマ着火特性や制御性が得やすいが、コイル設計における拘束条件が増加するという欠点がある。

ハイブリッド機能コイル-結合型電源の例としては、フランスのTORE-SUPRA装置がある⁽⁸⁾。TORE-SUPRAは、円形断面プラズマを基本に設計されており、プラズマ着火のための共通電源と位置形状制御のための制御電源を組み合わせ使用している。ポロイダル磁場コイルは、制御電源の数と等しく、かつ単一のコイルとしてポロイダル断面内に離散

表1 ポロイダル磁場コイルと電源システムの分類
Table 1. Classification of the types of poloidal field coil and power supply system

	独立型電源	結合型電源
単機能コイル	<p>(JT-60型)</p> <p>磁束供給コイル 初期励磁、高電圧発生 プラズマ電流維持</p> <p>位置形状制御コイル 水平磁場コイル 垂直磁場コイル ダイバータコイルなど</p> <p>⋮ ← 各コイルブロック</p>	<p>(ダブレットIII型)</p> <p>磁束供給コイル 垂直磁場コイル</p> <p>初期励磁、高電圧発生、プラズマ電流制御</p> <p>⋮ 他位置形状制御磁場コイル</p>
ハイブリッドコイル	<p>(次期大型装置型)</p> <p>すべてのコイルが磁束供給、位置形状制御磁場の発生を分担する。</p> <p>⋮ ← 各コイルブロック</p>	<p>(TORE-SUPRA型)</p> <p>初期励磁、位置形状制御電源</p> <p>すべてのコイルが磁束供給、位置形状制御磁場の発生を分担する。</p> <p>⋮ 各コイルブロック</p> <p>高電圧発生 プラズマ電流維持</p>

的に配置されている。真空容器内のプラズマ着火領域における磁場が、極力小さくなるように初期励磁電流が与えられるのは他のタイプのトカマクと同様であるが、共通電源が印加するプラズマ着火のための高電圧は、全てのポロイダル磁場コイルについて同じ電圧である。また、共通電源はプラズマ着火後も、プラズマ電流の立ち上げ／維持に必要な制御電圧の基本的な成分を受け持ち、制御電源は位置制御等に補助的に使用される。このタイプのトカマクでは、すべてのコイルの電圧定格（すなわち巻き数比）を調整する必要があり、単機能コイル-結合型電源の場合以上に、コイル設計の自由度を拘束する。従って、このようなハイブリッド機能コイル-結合型電源という組み合わせは、中小型装置にこそ適していると言える。

さて、プラズマ電流10MA以上の次世代トカマクでは、前述したようにハイブリッド機能コイルを採用せざるを得ない。また発生する高速中性子の遮蔽のための構造物やトロイダル磁場コイルの設置により、ポロイダル磁場コイルはプラズマから距離をおいた配置となる。しかも原子力機器としての分解組立の容易さ、製作における標準化の要請等から、コイル径やターン数の種類は数通りに限られる。各コイル電流の運転パターンは大きく異なり、その電圧電流定格も大規模であることから、従来はそれぞれに独立した電源を用意する必要があると考えられていた（次期大型装置型）⁽⁹⁾。しかし、これには次に示すような欠点がある。

1) 高電圧発生回路が各コイル毎に必要となり、遮断の同期、信頼性が問題となる。プラズマ着火用とクエンチ保護回路用に別個の遮断回路が必要になる。また、初期励磁電流の大きさに応じた遮断抵抗の組み合わせが必要で、仮に抵抗の数を減らした場合、運転の自由度を拘束する。

2) プラズマ着火直後には、コイルの最大励磁電流且つ最大電圧印加時であるにもかかわらず、最も微妙なプラズマの位置形状制御性が要求される。また、大電流領域で再投入器を必要とする。

本論文では、これらの課題を解決するためのシステムを提案し、その有効性を示す。

図1 FERの鳥瞰図

Fig.1. Bird's-eye view of FER.

3. 多巻線トランスを用いたプラズマ着火装置と電源システム構成法の新概念

原研のFERを次世代トカマクの代表例とし、その装置パラメータを用いて、本論文の主題であるプラズマ着火装置について述べる。FERの鳥瞰図とポロイダル断面図を図1,2に示す。FERは14個のポロイダル磁場コイルが上下対称の位置に配置されているが、下シングルヌルダイバータ配位を基本としているため、起磁力は一部のコイルが上下で異なっている。図3に現在想定している運転パターンを示す。また、各ポロイダル磁場コイル別の最大電力／電圧を表2に示す。これらから明らかなように、最大印加電圧はプラズマ着火時に発生し、初期プラズマの生成以後は緩やかな制御電圧で運転可能である。すなわち、電源システムは、A) プラズマ着火時のみ使用する単一の短時間定格の高電圧電源と、B) 磁束供給、位置形状制御用の各コイル毎に分割された連続定格の低電圧大電流電源の、2種類に分離できる可能性がある。課題はこれらをどのように結合するかである。それに対し、トカマク装置の起磁力およびパリアンス分布と幾何学的に相似な構造をもつ多巻線トランスを介して、これらの電源を統合的に制御するシステムを提案する。以下にその詳細を述べる。

トカマクは基本的に軸対称で、最外殻磁気面における鎖交磁束はどこも等しいため、プラズマ周辺に置いたワンターンコイルの出力電圧はすべて等しい（図2参照）。従って、プラズマ領域の一周電圧を等しくするような電界を印加すれば、プラズマ自身のエネルギーバランスが満足される限り、外部磁場に応じた平衡配位が存在すると考えられ

図2 FERのポロイダル断面図

Fig.2. Poloidal cross-sectional view of FER.

図3 FERの標準運転パターン
Fig.3. A standard operational scenario of FER.

る。このように、トカマク装置を変換器として考えれば、通常ポロイダル磁場コイルは1次巻線であり、プラズマは2次巻線に相当する。しかし、ここでは逆にプラズマを1次巻線、ポロイダル磁場コイルを2次巻線とした場合を考える。

すなわち、プラズマとポロイダル磁場コイルの関係が、プラズマ周辺に置いたワンターンコイルのように磁氣的に完全結合であるとする、磁束保存の法則に可逆性があることから、プラズマ電流の変化に応じた電圧が各ポロイダル磁場コイルに誘起される。この点に着目して、本システムではトカマク装置と類似な空間的コイル配置をもつ多巻線トランスを、プラズマ着火装置として採用する。つまり、プラズマ位置に対応して、着火コイルを1次巻線として設置し、各ポロイダル磁場コイルの起磁力に応じて、それぞれの対応する位置に2次巻線を用意する。これは、多巻線トランス内での相互の電磁誘導作用が、トカマク装置で

表2 各ポロイダル磁場コイルの最大所要電力

Table 2. Required maximum electric power of the each poloidal field coils.

コイル名	着火時 (0.6秒まで)		着火後 (0.6秒以後)		
	最大電力	最大電圧	回生電力	力行電力	最大電圧
PF7U	-9	-6.647	-72	3	-2.419
PF6U	5	-2.672	-20	15	-1.162
PF5U	-176	-6.476	-3	11	-0.715
PF4U	-204	-12.860	-3	3	-0.733
PF3U	-223	-9.726	-17	10	-1.345
PF2U	-238	-10.341	-37	22	-1.414
PF1U	-227	-9.860	-47	24	-1.513
PF1L	-236	-9.862	-44	23	-1.478
PF2L	-200	-8.367	-19	17	-0.880
PF3L	-233	-12.432	-14	11	-1.152
PF4L	-226	-13.870	-1	3	-0.948
PF5L	-154	-14.808	-4	1	-2.753
PF6L	-6	-3.624	-8	23	-1.223
PF7L	1	-9.862	-128	-0.4	-6.141

注: 電力はMW, 電圧はkV単位

のプラズマとポロイダル磁場コイル間のそれと逆の関係にするためである。

図4は本システムの概念図であり、トロイダル磁場コイルや支持構造物などは省略している。短時間定格の高電圧電源として、ここでは一般的な電流遮断器と抵抗の組み合わせを想定しており、これは前述のように着火コイルにのみ接続される。FERでは、着火コイルには100kV-30kA程度の容量の高電圧電源を用意する必要がある。また、連続定格の低電圧制御電源、具体的には1.5kV-30kA程度の容量のサイリスタ電源を、各ポロイダル磁場コイルと2次巻線間に直列に挿入する。FERでは、超電導コイルの設計上ポロイダル磁場コイルの最大電流は30kA程度に設定されているが、ITERでは現在40~60kA程度が標準となっており、次第に大電流化の傾向にある。なお、プラズマが十分な電流値(FERでは0.5MA程度)に立ち上がった後は、プラズマ着火装置を電氣的に切り離すため、投入器の使用を想定している。

図4 多巻線トランスを用いたポロイダル磁場コイル電源システム
Fig.4 A poloidal field coil power supply system using a multi-winding transformer.

本システムの特長を列挙すると、以下の通りである。

1) ポロイダル磁場コイル電源を、連続定格の低電圧制御電源と短時間定格の高電圧電源に機能的に分離できる。このため、時間的に異なるコイル電圧および電流の各最大値で制御電源容量を決定する必要がなく、効率的な電源構成が可能となる。

2) プラズマ着火用の高電圧発生回路が統一されるため、電流遮断の同時性が問題とならず、また信頼性が向上する。

3) コイル毎に電流遮断器と抵抗を用いてプラズマ着火のための高電圧を発生させる従来の方式では、コイル印加電圧を一定にするためには初期励磁電流に応じた抵抗値を選択する必要がある。このため、初期励磁電流値を変化させると、抵抗の変化に伴いコイル電流の時定数も変化して、プラズマ着火特性に大きく影響する結果となる。しかし、本システムでは高電圧発生回路は着火コイルにのみ接続され、また誘導電圧として重畳されるため、コイル電流変化の時定数を一定に保つことが容易で、安定な初期プラズマ特性が期待できる。

4) DIII-D, TORE-SUPRA装置のように、ポロイダル磁場コイルシステムと電源システムを最適化する必要がなく、ポロイダル磁場コイル設計の自由度が向上する。

実際のシステムの設計に当たっては、着火コイルをタップ付きコイルとすることも有用である。つまり、真空容器内の電界分布を微調整することが可能となる。また、磁場のヌル点はポロイダル磁場コイルの初期励磁電流のパターンにより変化させることができ、ブレークダウンの位置を制御可能である。これにより、不安定な位置でのプラズマ着火を避けることができる。

ところで、真空容器の一周抵抗は装置の大型化とともに低くなる傾向にあり、ITERでは $10\mu\Omega$ 以下の真空容器が提案されている。従って、プラズマ着火時の真空容器渦電流

の影響を補償するためには、ポロイダル磁場コイルの磁束供給成分と位置形状制御成分の電流比を、ある程度調整する必要がある可能性がある。この課題に対しても、本システムでは多巻線トランスの二次側にも中間タップを設けたり、逆に補償巻き線を追加することで対応できる。

2章で述べたように、従来のポロイダル磁場コイルは単機能コイルとハイブリッド機能コイルに大別可能であった。同様に、電源システムも独立型電源と結合型電源に分類できた。従来の結合型電源が直接接続型であったのに対し、本システムは磁気的な間接接続型である点が大きな特徴である。

4. FERへの適用例

前章で述べたシステムの有効性を、核融合実験炉(FER)を例にとりシミュレーションにて実証する。すなわち、初期プラズマの立ち上げには、ポロイダル磁場コイル電流に対して、磁束供給成分と位置形状制御成分を、平衡を維持するために適切な割合で与える必要がある。従って、着火コイルによるポロイダル磁場コイルの誘導電流が、そのような電流分布を有することを示せばよい。ここで注意する必要があるのは、初期励磁電流による磁場もプラズマの平衡に寄与する点である。しかし、初期励磁電流は通常プラズマ着火領域の誤差磁場を極力抑制するように与えられるから、ここでは初期励磁電流が零の状態からプラズマを立ち上げる場合をシミュレーションする。その上で、初期プラズマの断面積と比べても十分広い領域にわたって、誤差磁場の強度を下げることのできる初期励磁電流パターンが存在することを示す。

計算の簡単化のために、真空容器や遮蔽構造材等に流れる渦電流は無視する。またコイルには一様分布電流が流れるとし、電源システムは電圧源で表わされるものとする。プラズマは集中定数化したR-L回路で表わす。なお、ポロイ

図5 初期プラズマの平衡配位例
Fig.5. An equilibrium of the initial plasma.

図6 ポロイダル磁場コイル電流分布の比較
Fig.6. Comparison of the poloidal field coil current distribution.

表3 FERと多巻線トランスのコイルパラメータ
Table 3. Coil parameters of FER and the multi-winding transformer.

コイル名	FER			着火トランス		
	大半径(m)	垂直位置(m)	ターン数	大半径(m)	垂直位置(m)	ターン数
PF7U	9.4	3.2	252	3.133	1.067	63
PF6U	9.4	5.0	112	3.133	1.667	28
PF5U	3.0	6.7	224	1.0	2.233	138
PF4U	1.27	5.425	551	0.423	1.808	138
PF3U	1.27	3.875	551	0.423	1.292	138
PF2U	1.27	2.325	551	0.423	0.775	138
PF1U	1.27	0.775	551	0.423	0.258	138
PF1L	1.27	-0.775	551	0.423	-0.258	138
PF2L	1.27	-2.325	551	0.423	-0.775	138
PF3L	1.27	-3.875	551	0.423	-1.292	138
PF4L	1.27	-5.425	551	0.423	-1.808	138
PF5L	3.0	-6.7	576	1.0	-2.233	144
PF6L	9.4	-4.3	168	3.133	-1.433	42
PF7L	9.4	-2.3	392	3.133	-0.767	98
着火コイル				1.2	0.2	1

ダル磁場コイルは超電導コイルのため、抵抗値は零である。

FERの運転シナリオでは、0.5MAまでのプラズマ電流の立ち上げを初期プラズマの生成過程と想定している。ここでは、図5に示すようなプラズマ平衡を仮定した。まず、このプラズマが初期励磁電流零の状態から立ち上げられたものであることを示す。抵抗分による損失を無視すれば、立ち上げに必要な磁束量 Ψ_p は、プラズマの自己インダクタンス L_p とプラズマ電流 I_p の積となる。図5のプラズマの自己インダクタンスは14mHであるため、

$$\Psi_p = L_p I_p = 14(\text{mH}) \times 0.5(\text{MA}) = 7.0(\text{Wb}) \quad (1)$$

である。一方、ポロイダル磁場コイルからの供給磁束量は、各コイルにおける電流変化とプラズマとの相互インダクタンスの積和であり、

$$\Psi = \sum L_{pj} I_j = 7.0(\text{Wb}) \quad (2)$$

となるように設定している。つまり、図5のプラズマは、初期励磁電流零の状態から立ち上げた場合に相当している。次に、着火コイルによる誘導電流が、この平衡に必要な電流分布の主要な成分を与えることを示す。

シミュレーションに使用した多巻線トランスの仕様は、以下のように設定した。つまり、多巻線トランスはトカマク装置と直列に接続されることから、原則として電圧電流定格は同等であることが望ましい。特に電圧については、プラズマ着火時に最も高い印加電圧を必要とすることから、トカマク装置以下とすることはできない。電流については、外周側のポロイダル磁場コイルやダイバータコイルの電流が、プラズマ電流に比例して増加する傾向が強いため、初期プラズマの生成後に多巻線トランスを短絡して不使用にするとすれば、合理化の余地は大きい。しかし、ここでは簡単化のために電流についてもトカマク装置と同じとした。FERと多巻線トランスの大半径の比をS、巻き数比をMとする。多巻線トランスの2次巻線の電流密度を、ポロイダル磁場コイルと等しくすれば、Mは S^2 に比例する。一方、プラズマの電流密度はコイルのそれと比較すると桁違いに小さく、プラズマ着火コイルの電流密度を上げ起磁力を高く設定する方が有利である。さらに、相互インダクタンスに大きな

影響のない範囲内で、コイル断面の縦横比が調整可能である。これらのことから、 $S=3, M=4$ を目安として、表3に示すような多巻線トランスのパラメータを設定した。つまり、多巻線トランスのコイル長の合計はトカマク装置の約12分の1である。なお、SとMの配分は単に装置の外形寸法だけでなく、コイルの最大磁場強度に影響するので、注意が必要である。

図6は、図5に示したプラズマの平衡に必要なポロイダル磁場コイル電流分布と、プラズマ着火装置による誘導電流の分布を比較したものである。実線がシミュレーション結果であり、破線がプラズマ平衡解析コードの結果である。両者は非常に近い分布を有していることがわかる。従って制御電源はこれらの違いを補償するだけの電圧を発生すればよく、合理的な設計が可能となる。ところで、外周側のポロイダル磁場コイルは内周側のコイルに比べて自己インダクタンスが大きいため、着火時により高電圧を必要とする。しかし、コイル電流はプラズマ電流に比例する傾向が強いため、放電の初期には電流は小さい。従って多巻線トランスを用いない場合、外周側のポロイダル磁場コイル電源は、異なる時間の最大電圧と電流によって定格が決まることになり、経済的でなくなる。なお、このシミュレーションで着火コイルに要求される起磁力は約74MATであり、十分に実現可能なものである。

図7は初期励磁パターンの一例で、(a)は磁場パターンを、(b)は磁場強度（すなわち誤差磁場の強度）を示している。真空容器内のプラズマ領域における誤差磁場の強度が数十ガウス以下であることから、初期励磁電流を重畳することによるプラズマ位置形状の変化は問題とならず、プラズマ着火特性は初期励磁電流に大きく依存しないことがわかる。なお、本例の初期励磁によって与えられる磁束は40 Wbである。

JT-60のような磁束供給用の単機能ポロイダル磁場コイル

図7 初期励磁の一例

Fig.7. An example of the initial magnetization.
(a)Magnetic field. (b>Error field strength.

図8 プラズマ位置形状制御のための磁場パターン

Fig.8. The magnetic field patterns to be used for the plasma position and shape control.

(a)Vertical field, (b)Radial field, (c)Quadru-pole field, (d)Hexa-pole field.

は、プラズマ領域に平衡磁場をつくらない。そのため、プラズマ電流の変化に応じて垂直磁場コイル電流等を高速制御する必要がある。しかし、多巻線トランスを用いた電源システムの場合には、プラズマ電流駆動用の磁束供給成分と同時に、位置形状制御の磁場成分が発生するため、フィードバック制御に要する電圧を低く抑えることが可能である。また、初期励磁電流パターンを、多巻線トランスによる誘導電流と独立に調整可能なため、着火領域の制御も容易である。

ここでは、初期プラズマとして図5に示したように非円形度1.5の外付けリミター配位（プラズマ断面の縦横比が1.5で、外周側の一点で第一壁に接している平衡配位）を想定したが、位置形状磁場成分を制御することによって、プラズマ位置や断面形状を制御することも可能である。図8は、水平磁場、垂直磁場、四重極磁場および六重極磁場の一例を示したものである。このような成分の誘導電流の大きさを制御するように、必要に応じて多巻線トランスの巻数比を調整すれば良い。同様に、着火コイルの幾何学的中心位置を等価的に変更可能とするために、中間タップを設けることも重要である。

5. 高速プラズマ制御への応用

多巻線トランスは、プラズマ着火時だけでなく、高速なプラズマ制御を行う上でも有用である。例えば、プラズマ電流制御に適用する場合、プラズマ着火コイルの励磁電源を高速応答電源としておけば、初期立ち上げ完了後に高電圧発生回路を短絡するだけで良い。数Hz以下の低周波領域は従来通りに制御電源により行い、100Hz以上の高周波領域はプラズマ着火コイルに接続された単一の高速応答電源を用いることにより、より効率的な電源システムとすることができる。

また、FERのような非円形度の高いプラズマ断面形状を

有するトカマクでは、高速な垂直位置制御性が要求される。このような場合には、多巻線トランスの内部に水平磁場制御用のコイルを追加して高速応答電源を接続すれば、プラズマ垂直位置制御の有力な手段にできる。すなわち、図9(a)に示すように上下に巻方向の異なるコイルを設置して、この電流を高速制御すれば、同図(b)に示すようにプラズマ領域に水平磁場を発生させることができる。これは以下のような利点を有する。

つまり、プラズマ断面位置形状の高速制御のためには、コイルに高電圧を印加する必要がある。しかし、要求される電流の変化幅は、磁束供給成分に比較すると数分の一以下であり、それほど大きいものではない。従って、低電圧制御電源の電圧増強によりプラズマ断面位置形状の高速制御を実現しようとする、きわめて利用効率の悪い電源となって不経済である。そこで、高速磁場制御用の高電圧小電流のコイルを、別個にトカマク装置に設置することが考えられるが、誘導電圧のために、他のコイル電源も相応の応答性能が要求される結果となる。これは電源を、いわば磁氣的に並列に接続することに原因がある。ところが、本システムのように電源を磁氣的に直列に接続すると、このような不合理は生じない。従って、高速な平衡磁場制御を一括して行うことが可能となる。このことは、サイリスタ変換器などの高価な半導体電力変換器を高速制御電源とし、より安価なダイオード整流器などを低速制御電源とする、複合電源システムの可能性を開くものである。

なお、水平位置制御に適用する場合は、多巻線トランスの内外周に巻方向が逆のコイルを設置すれば、上の議論が同様に成立する。さらに必要ならば、図8に示したプラズマの断面形状を制御するような磁場パターンの電流を誘起する磁場制御コイルを構成することも可能である。

6. あとがき

図9 水平磁場制御への応用例

Fig.9. An application to the horizontal field control.

(a) An example of the horizontal field control coil.

(b) The field pattern due to the induced current.

トカマク装置と幾何学的に相似な起磁力およびパーミアンス分布を持つ多巻線トランスを用いることにより、トカマク型核融合実験装置の次世代装置クラスにおける電源システムを合理的に構成する方法を示した。ポロイダル磁場コイルと電源システムは、本来非常に密接な関係にあって相互に影響し合うものである。しかし、本論文で提案した多巻線トランスを用いることにより、ハイブリッド機能ポロイダル磁場コイルを前提としたトカマク装置においても、性能の異なる電源を組み合わせることで、最適なシステムが構成可能となった。FERを例にとると、ポロイダル磁場コイル長をわずか12分の1延長するだけで、初期プラズマの生成に必要な多巻線トランスが構成できた。本文が、今後のトカマク型核融合実験装置における電源システムの開発指針を与える一助になれば幸いである。

本論文をまとめるに当たり、有益な助言を頂いた日本原子力研究所ITER開発室松田慎三郎氏、並びに室員の皆様に対し深く感謝します。

(平成5年3月10日受付、同5年9月2日再受付)

文 献

- (1) M. Shimada: "JT-60U high power heating experiments", 14th Int. Conf. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus., (Wurzburg, Germany), A-1-3, (1992).
- (2) M. Keilhacker: "Resent JET results and consequences for future devices", ibid, A-1-1.
- (3) 多田、高津他: "解説: ITER, 6. 工学設計概要", プラズマ・核融合学会誌, VOL. 65/NO. 2, P167.
- (4) 嶋田: "ハイブリッドポロイダル磁界コイルによるトカマクプラズマの電流、平衡制御", 電気学会論文誌A, 昭和57年9月号, P483.
- (5) 小林他、: "大型核融合装置の空心変流器コイルおよび

垂直磁場コイル配置の最適設計", 日本原子力研究所報, JAERI-M, 5898 (1974年11月).

(6) 嶋田、谷: 電気学会論文誌B, 54B-93, p. 773 (1979).

(7) R. Stambaugh, A. Adcock, R. Callis, et al., Proc. 11th Symp. Fusion Technol., Oxford, Vol. 1, p. 1011, (1980).

(8) B. Bareyt, H. Beuzit, et al., "The TORU SUPRA poloidal field system power supplies", Proc. 14th Symp. Fusion Technol., Avignon, p. 875, (1986).

(9) Y. Shimonura, et al., "ITER poloidal field system", ITER documentation series, No. 27., IAEA, (1991).

松川 誠 (正員) 昭和32年5月7日生。57年3月長岡技術

科学大学工学研究科電気電子システム専攻修士課程修了。同年4月日本原子力研究所入所。臨界プラズマ試験装置JT-60の設計・製作および実験に参加して現在に至る。

二宮 博正 (非会員) 昭和24年8月29日生。昭和49年3月北海道大学工学部原子工学科修士課程修了。同年4月日本原子力研究所入所。JT-60の設計・製作及び実験研究に従事して現在に至る。工学博士。

堀池 寛 (非会員) 昭和24年12月27日生。昭和53年3月大阪大学大学院原子力工学専攻博士課程修了。日本原子力研究所入所後、JT-60の中性粒子入射装置の開発、大電流化改造等に従事。平成5年3月より、大阪大学工学部助教授。工学博士。

大川 慶直 (非会員) 昭和19年2月2日生。昭和37年3月東京電気大学高等学校電力科卒業。現在、日本原子力研究所那珂研究所ITER開発室勤務。核融合実験炉のための研究開発に従事。

長谷川 満 (非会員) 昭和31年9月28日生。59年3月名古屋大学大学院理学研究科後期博士課程修了。60年4月三菱電機に入社。63年4月から、国際核融合実験炉(ITER)及び核融合実験炉(FER)の設計に参加。現在は本社核エネルギー開発部に所属。理学博士。