UDC 621.311.69 : 621.039.6 : 621.316.57.077.65

論文

57-B 56

サイリスタしゃ断器を使ったトカマク形 核融合装置変流器コイル電源の検討

正員 谷 啓 二 (日本原子力研)
 正員 嶋 田 隆 一 (日本原子力研)
 正員 田 村 早 苗 (日本原子力研)
 正員 藪 野 光 平 (日立製作所)
 正員 古 関 庄一郎 (日立製作所)
 正員 石 垣 幸 雄 (日立製作所)

1. ま え が き

近年、トカマク形核融合試験装置はますます大規模化し、所要のプラズマ性能を得るためには、大きなプラズマ電流が必要になっている。現在日本原子力研究所で建設を進めている臨界プラズマ試験装置(以下、「JT-60」と略称する)のプラズマ電流は2.7MAに達する。トカマク形核融合試験装置において、プラズマを発生させる高電圧発生装置を通常「変流器コイル電源」と呼んでいる。これはエネルギーを蓄積できるコイル(これを「変流器コイル」と呼ぶ)と内部にプラズマを作る真空容器とが、変圧器の原理によって電磁結合し、一次側の変流器コイル電流が急変すると、二次側の真空容器内に電圧が誘起され、放電によってその内部にプラズマ電流が流れるようになっている。変流器コイルに高電圧を発生させる方式は大別して2方式ある。一つはコンデンサ方式で、あらかじめ充電しておいたコンデンサを変流器コイルに接続して、変流器コイルに流れるコンデンサの放電電流の急激な変化によって、プラズマを発生させるものである。もう

一つは、誘導性エネルギー蓄積コイル方式で、これはあらかじめ直流電源から変流器コイルを励磁しておき変流器コイル電流を、直流しゃ断器によりしゃ断し、抵抗回路に転流させた後に起る急激な電流変化によってプラズマを発生させるものである。前者は中形の核融合試験装置に適用されるが、装置が大形化すると、コンデンサの設備容量が大きくなって不経済になるため、JT-60のような大形装置では、後者が有利となる⁽¹⁾。

このように、変流器コイル電源は、トカマク形核融合装置における電源設備の中で最も重要な回路の一つになっている。しかも変流器コイルに蓄積された巨大な電磁エネルギーをパルス的に取り扱う回路技術は、直流大電流しゃ断技術⁽²⁾を伴い、現段階では必ずしも確立した技術とは言えない。そこで、JT-60の一連の試作開発の一環として、昭和50年より真空しゃ断器(VCB)形直流しゃ断器⁽³⁾⁽⁴⁾とサイリスタしゃ断器(以下「TCB」と略称する)⁽⁵⁾⁽⁶⁾の試作開発を行なった。

誘導性エネルギー蓄積方式の変流器コイル電源に使用する直流大電流しゃ断技術は、現在、真空しゃ断器(VCB)⁽⁷⁾⁽⁸⁾や空気しゃ断器(ABB)⁽⁹⁾などのような、従来の機械式しゃ断器を使った直流しゃ断器を使う場合が多く、また直流しゃ断器そのものは、核融合試験装置以外でも直流送電への応用も考えられている。一方サイリスタを使った直流しゃ断器は、古くからその利点が認められながらも、本格的な実用段階には緒についたばかりである⁽¹⁰⁾。これは、大容量高速サイリスタの開発の歴史がまだ浅く、またサイリスタ装置が高

Ohmic Heating Coil Power Supply using Thyristor Circuit Breaker in a Thermonuclear Fusion Device. By Keiji Tani, Member, Ryuich Shimada, Member, Sanae Tamura, Member (Japan Atomic Energy Research Institute), Kohhei Kabuno, Member, Shoichiro Koseki, Member & Yukio Ishigaki, Member (Hitachi Ltd).

谷 啓二: 正員, 日本原子力研究所

嶋田隆一: 正員, 日本原子力研究所

田村早苗: 正員, 日本原子力研究所

藪野光平: 正員, 日立製作所日立研究所

古関庄一郎: 正員, 日立製作所日立工場

石垣幸雄: 正員, 日立製作所日立工場

価になるという経済性に起因するものである。

そこで、本論文ではトカマク形核融合装置に TCB を使う場合、サイリスタの優れた高速制御性に着目しまた経済性を考慮し、TCB の特性を生かした回路方式を提案しその適用性を述べる。TCB を JT-60 に使用することを想定して、電流 1/7、電圧 1/4 の試験が可能なユニットモデルを製作し、しゃ断性能をはじめ、素子間、ユニット間の電流分担、電圧分担などを中心に実負荷試験を行なった結果を述べる。また、TCB を使った変流器コイル電源の回路方式は種々考えられるので、その中から TCB の特性が生かせる代表的な TCB の多段並列方式と多段繰返し方式の2方式について縮小電磁モデルを製作し、変流器コイル電源における TCB の適用性について検討を行なう。

2. TCB のしゃ断特性

〈2.1〉 TCB の変流器コイル電源への適用 トカマク形核融合試験装置は放電回数が 20~30 万回程度に達するため、変流器コイル電源に使用される直流しゃ断器は多数回繰返し使用に耐える信頼性の高いものでなければならない。TCB はしゃ断性能はもとより高速制御性が可能であるばかりか、無接点、低騒音のため保守点検、調整などが容易であるため転流コンデンサの寿命を考えてもしゃ断器としての寿命は長いと考えられている。

直流しゃ断器としての TCB を変流器コイル電源に適用した場合の基本回路を図 1 に示す。直流しゃ断器は本来変流器コイルを励磁した後、コイル電流をしゃ断する機能をもつしゃ断器なので、図 1 のスイッチ SW_f の位置に TCB を設置してもよい。しかし SW_f の代りに TCB を設けると JT-60 の場合、変流器コイルの励磁時間が秒にも達するため、サイリスタは長時間定格で設計しなければならず、極めて不経済なしゃ断器になってしまう。そこで図 1 に示す方式であれば変流器コイル電流をしゃ断するときだけ一旦 TCB 回路に転流させてからしゃ断するので、短時間定格で設計できるという利点が出てくる。

図 1 において、1 点鎖線で囲んだ部分が TCB で、主サイリスタスイッチ TSW_1 、補助サイリスタスイッチ TSW_{11} 、転流コンデンサ C_{sw1} 、転流リアクトル L_{sw1} などから構成される。

まず、直流電源 THC_s から変流器コイルを励磁する場合、機械スイッチ SW_f を通して行なう。変流器コイル端子間に高電圧を発生させるために、変流器コイル電流をいったん TCB の主サイリスタスイッチ SW_1 に移し、 SW_f を開極して L_f と THC_f を切離

図 1 サイリスタしゃ断器を使った変流器コイル電源の基本回路

Fig. 1. Basic circuit of ohmic heating (OH) coil power supply using thyristor circuit breaker.

す。その後 TSW_1 の電流をしゃ断するまでの時間は、約 0.1s あれば十分で、通電時間が大幅に短縮できる。 TSW_1 に流れている直流電流をしゃ断するため、 TSW_{11} を点弧すると、転流電流によって TSW_1 の電流はしゃ断される。そのため変流器コイル電流は R_1 に移り、変流器コイル端子間に高電圧が発生し、同時にプラズマ回路にもプラズマ電流が流れる。

このように、 SW_f を TCB にする方式に比べ、図 1 の方式は TSW_1 の通電時間からサイリスタの過渡熱インピーダンスが約 1/3 になるので大幅に小形化される。

また、冷却方式の面からは、通電時間が短くなるので自然風冷でよく設備として小形にできる。

但し、保護という面から考えると、しゃ断を中止した場合は、 TSW_1 に変流器コイル電流が流れ続けるためバイパススイッチ SW_2 を設けて投入し、 TSW_1 の温度上昇を抑制する必要がある。

そこで、まず TCB 単独のしゃ断特性を検証するために、図 2 に示すような試験回路を製作した。本回路は TCB のしゃ断特性を検討するのでプラズマ回路は設けていない。

〈2.2〉 TCB の構成 一般にサイリスタ装置はサ

図 2 TCB 試験回路

Fig. 2. Testing circuit for TCB.

イリスタの直並列数を増やせば設備容量を増加できる性質があるので、TCB の場合もわざわざ実機大の装置を製作しなくても、ユニット構成にしてユニットについて評価すればよい。そこで実機に使用するサイリスタを使って1ユニットを実機と同一構成にし、かつ複数のユニットを製作すればユニットのシャ断性能限界、ユニット間の電流、電圧分担など、ユニット試験によって実機を評価できる。ユニットを構成するサイリスタはダイレクトパラ（直接並列）方式がとれるものを選定し、構成が簡単になるようにした。元来サイリスタの電流分担不平衡の原因としては素子の順電圧降下のばらつき、ターンオンタイムのばらつきなどに起因し、電流分担を均一にするために外部回路を加える方法がとられる。しかし構造が複雑になるので、素子の順電圧降下、ターンオンタイムのそろったものでダイレクトパラ接続を行なった方がよく、本装置でもこの方式を採用した。ユニット間の電流、電圧不平衡をなくすためには、リアクトルを設けて外部回路による方式を採用した。電圧分担については、直流電圧、ターンオン分圧、ターンオフ分圧などをそろえる必要がある。特にターンオン分圧については、1ユニット内のダイレクトパラ接続されてサイリスタのディレイタイムの最小値が直列接続方向で $0.2\mu\text{s}$ 以内になるように素子をそろえた。

よって、TSW₁の素子としては、高速形定格せん頭オフ状態電圧 2,000V、定格平均電流 500A のサイリスタを使用し、TSW₁₁ はターンオフタイムの制約がないので一般形のサイリスタを使用した。

以上から、TSW₁ 1ユニットの仕様は次のように決めた。電圧は電圧の設計の裕度を2として 5,000V ($=2,000\text{V} \times 5s/2$)、電流はサイリスタの定格平均電流が 500A で、通電時間が短時間 (0.1s) のため、素子の過渡熱インピーダンス特性が、連続通電時の 1/3 になることから、3 倍の裕度をとって 6,000A ($=500\text{A} \times 4p \times 3$) とした。

これを JT-60 の直流シャ断器の仕様 (再起電圧 25kV、シャ断電流 92kA) と比較すると電圧縮小比は 1/5、電流縮小比は 1/15 となる。但し、時間縮小比は 1/1 である。

TSW₁は2ユニット製作し、ユニット間の電流不平衡を検討するためにユニット A と B の平均順電圧降下に差をもたせ、それぞれ 1.80V、1.97V のように素子構成を行なった。

〈2・3〉 シャ断試験結果

(i) ユニット単体試験 表1にシャ断条件および試験結果の代表例を示す。設備の都合でシャ断電流

表 1 シャ断条件およびシャ断試験結果

Table 1. Interruption parameters and test results.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
ユニットの素子構成	5s×4p	5s×4p	10s×4p	5s×2p	5s×2p	10s×2p	5s×1p	5s×8p
ユニット構成	A	B	A、B 直列接続	A	B	A、B 直列接続	A	A、B 並列接続
シャ断電流 (A)	3500	3500	3500	3500	3500	6170	3500	3500
時定数調整抵抗 R_1 (Ω)	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	1.5	1.5
再起電圧 (V)	5250	5250	5250	5250	7000	12300	5200	5250
転流コンデンサ C_{sw} (μF)	180	180	210	180	180	210	180	180
転流リアクトル L_{sw} インダクタンス (μH)	211	211	52	211	211	52	211	211
フリーリアクトル LAX インダクタンス (μH)	27	27	27×2	27	27	27×2	27	27
図	第5図		第6図				第7図

図 3 TCB のシャ断特性 (サイリスタ 5s×4p、シャ断電流 3,500A、 $R=1.5\Omega$)

Fig. 3. Interruption characteristics of TCB.

は 6,170A までしか流さなかった。まず、ユニット A、B のサイリスタの構成を 5s×4p (5 直列×4 並列) として、シャ断電流 3,500A、再起電圧 5,300V ~ 5,400V でシャ断試験を行ない、問題なくシャ断できた (表1 No.1, No.2)。シャ断電流、再起電圧の各波形を図3に示す。 $t=t_0$ で THC_t の電流を TSW₁に移し、約 0.15s 後にシャ断を行なった。TSW₁の電流がシャ断された後、変流器コイル電流は R_1 に転流するので再起電圧 ($3,500\text{A} \times 1.5\Omega = 5,250\text{V}$) が変流器コイル端子間に印加される。この電圧は TSW₁にも印加され、図4に示すような再起電圧波形となる。これは1ユニットの直列5素子の電圧波形で、電圧分担は表2に示すようになる。これによると電圧分担率は $\pm 5\%$ 以内に入ることがわかる。

次に、1ユニットの並列4サイリスタの内2並列サイリスタにのみ信号を与え、5s×2p の構成でシャ断試験を行なった。A、B いずれのユニットもしシャ断電

しゃ断電流=3500A $R_1=1.5\Omega$ $C_{sw1}=180\mu F$ (5400V)

図 4 TSW₁ の再起電圧波形

Fig. 4. Restriking voltage of main switch TSW₁.

表 2 電流しゃ断後の電圧分担

Table 2. Voltage across thyristors after interruption.

電圧分担 ユニット	5s-4p		5s-2p		5s-1p	
	A	B	A	B	A	B
No. 5	97	100	100	101	97	97
No. 4	104	100	100	95	104	102
No. 3	98	104	98	103	95	97
No. 2	96	96	100	97	102	104
No. 1	105	102	102	104	102	100

(注) 数値は%を示す。

流を問題なくしゃ断した (表 1, No. 4, 5)。特にユニット B については再起電圧 7,000V で試験したが問題はなかった。素子間の電圧分担も良好で表 2 に示すように $\pm 4.5\%$ 以内に入ることがわかった。以上からサイリスタ並列で 3,500A の電流をしゃ断したことは 1 ユニットで考えた場合、素子間の電流不平衡 (10%) 率を考慮しても 6,363A ($=3,500A \times 2/1.1$) の電流をしゃ断できることを意味し、更にしゃ断性能が向上したことになる。

更に、1 ユニットのしゃ断限界を調べるために、ユニット A をサイリスタ 1 並列、すなわち 5s $\times$ 1p の構成でしゃ断試験を行なった (表 1, No. 7)。しゃ断電流は 3,500A、再起電圧 5,250V で試験を行ない、問題なくしゃ断できた。しゃ断後の直列 5 素子の電圧分担不平衡率も $\pm 5\%$ 以内で良好であった。

以上のようにサイリスタ 1 並列にしても 3,500A の電流がしゃ断できたが、電流しゃ断時の接合部の温度上昇を検討する必要がある。今回使用した高速サイリスタの順電圧降下は直流電流 3,500A に対して 2.86V となる。そこで接合部の発生損失は $3,500 \times 2.86 = 10,010W$ となる。これから接合部温度上昇 ΔT_j は過渡熱インピーダンス特性から計算すると、通電時間を 150ms とした場合、 $\Delta T_j = 75\text{deg}$ となる。これは周囲温度を 20°C とすると $T_j = 95^\circ\text{C}$ となる。サイリスタの動作接合温度は 115°C であり、まだ 20°C ほどの余裕はあるが、実際には装置の繰返し運転などにより

冷却フィンの温度上昇を考慮すると、これが限界と思われる。従って、1 ユニットのしゃ断性能は素子間の電流不平衡率を 10% とすると 12,730A ($=3,500A \times 4/1.1$) となる。これによって、当初のしゃ断電流の仕様 (6,000A) に対して約 2 倍以上のしゃ断能力があることがわかった。

(ii) ユニット組合せ試験 ユニット A, B を使ってユニット組合せ時のしゃ断試験を行なった。まずユニット A, B を直列に接続し、しゃ断直後のユニット間の電圧分担を測定した。表 1 には、しゃ断電流 3,500A (No. 3) の場合と 6,170A (No. 6) の場合のしゃ断試験結果を示し、再起電圧は 12,300V まで印加した。図 5 には各ユニットの電圧波形を示す。電圧分担不平衡率は 2% 以内であり、ユニット間の電圧分担については問題はないことがわかった。

次に、ユニット A, B を並列接続した場合のしゃ断特性を検討した。まず電流分担を悪くするために、ユニット A, B の平均順圧降下をそれぞれ 1.80V, 1.97V にし、しゃ断時の逆電圧時間に与える影響を調べた。電流しゃ断時の 2 ユニットの逆電圧時間の波形の一例を図 6 に示す。図よりユニットに印加される電圧は 2 段となる。最初一方のユニットの電流が零となると、非導通ユニットには、もう一方の導通状態のユニットに流れる電流の変化によって $L_{AX1} \cdot di/dt$ の電圧が印加される。 L_{AX1} は TSW₁ の各ユニットのアノードリアクトルのインダクタンスを示す。その後、導通状態のユニットの電流も零になると、両ユニット

図 5 直列接続ユニットの電圧波形

Fig. 5. Restriking voltage between series units.

図 6 TSW₁ の逆電圧波形

Fig. 6. Inverse voltage of main switch TSW₁.

図 7 逆電圧時間差としゃ断電流の関係
Fig. 7. Relation of interruption time difference of two units to interruption current.

には時定数調整抵抗 R_1 に流れる電流で決まる電圧が印加される。

このように、図6より両ユニットの電流不平衡によってしゃ断後の逆電圧時間差 Δt_{AB} が生ずることになる。従って、しゃ断電流と逆電圧時間差 Δt_{AB} の関係を実験によって求めると図7のようになり、しゃ断電流が大きくなるほど、逆電圧時間差 Δt_{AB} は小さくなる。これは、しゃ断電流が大きくなるほど、しゃ断のための転流電流が大きくなり電流上昇が早くなるため、ユニットの電流降下が早くなることに起因する。

なお、各ユニットの平均順電圧降下が前述の条件の場合、しゃ断電流 3,000 A のときの電流不平衡率は $\pm 9.6\%$ で、電流が小さいときでも $\pm 10\%$ 以内になることがわかった。

更に、実機の場合を想定してシミュレーションによって、ユニット間の電流不平衡の検討を行なった。TSW₁ の構成はこれまでのユニット試験の結果から、ユニット 9 並列 $\times$ 6 直列となる。実機はユニット間の電流不平衡率を $\pm 10\%$ としているが、極端に悪い状態を想定し $\pm 20\%$ の不平衡があった場合のシミュレーションを行なった。9 並列のユニットの内、1 ユニット (No.1) のみ $+20\%$ だけ大きい電流が流れ、他の 8 ユニット (No.2, ..., 9) で均等に -2.5% ずつ計 -20% 流れるとした。解析結果を図8に示す。時間 0.1ms で TSW₁₁ が点弧し、転流電流 (TSW₁₁ の電流) によって、約 0.4ms で TSW₁₁ の電流はしゃ断されるので、電流値の小さい No.2~No.9 ユニットの電流が同時にしゃ断される。この時点で No.1 ユニットには、2.3kA の電流がまだ流れている。時間 0.48ms で No.1 ユニットの電流も零となるが、これ

図 8 電流不平衡がある場合の解析
Fig. 8. Simulation of unbalanced currents interruption.

は他のユニットの電流が零となってから 0.07ms 後である。No.2 の逆電圧時間は 0.204ms であるので No.1 の逆電圧時間が 0.134ms と短くなる。TSW₁ の逆電圧時間は 0.05ms あれば十分なので、このような極端な不平衡が生じても十分しゃ断できる時間である。

3. 縮小電磁モデルによる実験

〈3・1〉 回路構成 TCB を実際の変流器コイル電源に使用した場合の適用性を検討するために、図1に示す方式を基本とした変流器コイル電源の縮小電磁モデルを製作した。縮小電磁モデルは再起電圧 200V、電流 180A で、JT-60 の仕様 (再起電圧 25kV、電流 92kA) と縮小率を比較すると電圧は $1/125$ 、電流は約 $1/500$ の規模の装置である。時間は約 $1/4$ で製作した。回路は JT-60 の変流器コイル電源を想定して変流器コイル (空芯) L_f の他に二つの誘導性エネルギー蓄積コイル IES₂, IES₃, 変流器コイルと電磁結合したプラズマ回路、真空容器、およびサイリスタしゃ断器 (TCB) などで構成した。プラズマは実際の気

図 9 TCB 多段並列方式による変流器コイル電源の縮小電磁モデル

Fig. 9. Characteristics of OH coil power supply simulator using multi-stage TCBs.

図 10 TCB 多段繰返し方式による変流器コイル電源の縮小電磁モデル

Fig. 10. Characteristics of OH coil power supply simulator using single TCB.

体放電を模擬するのは難かしいのでインダクタンスと抵抗から成るコイルで模擬した。真空容器もコイルで模擬した。TCB を使った変流器コイルの電源の縮小電磁モデルの回路構成例を図 9 と図 10 に示す。図 9 は TCB 多段並列方式、図 10 は TCB 多段繰返し方式と呼ぶことにする。

〈3・2〉 TCB 多段並列方式の動作特性 ここでは 3 台の TCB を使ってプラズマ電流を 3 台で立上げる場合の動作特性について検討した。プラズマ電流を 3 段で立上げる場合の動作特性試験結果を図 11 に示す。変流器コイル電源 THC_r より変流器コイル L_r を励磁 (120A) しておき、 $t=t_1$ において変流器コイル電源をインバータ運転して TSW₁ を点弧すると④のような波形の電流が TSW₁ に流れる。TSW₁ が導通状態になるので、①の波形でもわかるように変流器コイル端子間電圧はほぼ零となる。次に $t=t_2$ において

補助サイリスタ TSW_{11} を点弧すると、転流電流によって TSW_1 の電流は零となり TSW_1 はオフ状態になる。その結果 L_f の電流は R_1 に転流し変流器コイル端子間電圧は④のような電圧波形となる。このため変流器コイルと電磁結合したプラズマ回路では、 TSW_1 が断後スイッチ SW_p を点弧すると第1段目のプラズマ電流が②の波形のように立上がる。

次に、第2段目のプラズマ電流を立上げる前準備として $t=t_3$ で、第1段目と同様の動作により、TCB₂の主サイリスタ TSW₂を点弧して、誘導性エネルギー蓄積コイル IES₂の電流 ($I_{IES_2}=50\text{A}$)を TSW₂に移す。その後 $t=t_4$ において第1段目と同様にTCB₂のしゃ断動作によってIES₂の電流は R_1 に移り、変流器コイル端子間電圧は、①のように再び急速に高くなる。これによって、プラズマ電流も更に立上る。IES₂の電流は L_f の電流に比べ小さいため、プラズ

図 11 TCB 多段並列方式による試験結果

Fig. 11. Experimental results with OH coil power supply simulator using multi-stage TCBs.

図 12 TCB 多段繰返し方式による試験結果

Fig. 12. Experimental results with OH coil power supply simulator using single TCB.

マ電流の立上りはそれほど早くない。

更に、第3段目のプラズマ電流を立上げる場合も第1段目、第2段目と同様の動作、すなわち I_{ES2} の電流 I_{ES2} ($=50A$) の転流しゃ断動作を $t_5 \sim t_6$ の間で行なう。

$t=t_7$ において図9に示すサイリスタ Th_3, Th_4 を点孤し、電源 THC_f から変流器コイル電流を制御することによって、プラズマ電流を一定に制御できる。

なお、真空容器もプラズマ回路と同様にインダクタンスと抵抗の回路で模擬してあるため、変流器コイルと結合によってコイル端子間電圧の変化にそって図11に示すような電流が流れる。ただ、プラズマ回路と異なる点は真空容器の定数は数msのため電流の変化も早い。

〈3.3〉 TCB 多段繰返し方式の動作特性

ここではTCBの高速制御性の特長を生かすために、1台のTCBを使って、プラズマ電流を3段で立上げる場合の動作特性について検討した。変流器コイル、誘導性エネルギー蓄積コイル IES_2, IES_3 には、あらかじめそれぞれの電源 (THC_f, THC_2, THC_3) から励磁しておく。励磁電流はいずれのコイルも $60A$ とした。実験結果を図12に示す。 $t=t_1$ において TSW_1 に変流器コイル電流を転流させると TSW_1 には③のような波形の電流が流れる。 $t=t_2$ で第1段目のしゃ断動作として TSW_1 の電流をしゃ断すると変流器コイル端子間には⑦に示す波形の電圧が印加される。これによって $t=t_4$ までプラズマ電流は立上がる (第1段目立上がり)。その間、転流コンデンサの電圧はパワーバック回路のサイリスタ TSW_3 を点孤することによって電圧極性を反転させ、電圧波形は④のようになる。

第2段目立上げの準備として、 $t=t_3$ において電源 THC_f を投入すると、 IES_2 の電流は $IES_2 \rightarrow Th_4 \rightarrow THC_f \rightarrow Th_3 \rightarrow TSW_1 \rightarrow TSW_5 \rightarrow IES_2$ の回路を流れる。 $t=t_4$ で TSW_2 を点孤して、第2段目のしゃ断動作を行ない、 TSW_1 の電流をしゃ断すると、 IES_2 の電流は転流コンデンサ C 、時定数調整抵抗 R_1 に流れ、 L_f 端子間に高電圧が発生する。しかし、 C への逆充電が大きくなり、第1段目より約60%程高い140Vに達する。このように高くなるのは、電源 THC_f が約40Vで投入されているためである。以上から、プラズマ電流は $t=t_6$ まで更に立上がる (第2段目立上がり)。

第3段目立上げの準備として $t=t_5$ において IES_3 の電流を TSW_1 に移す。 TSW_2 を点孤すると第3段目のしゃ断動作を行ない TSW_1 の電流はしゃ断され、 IES_3 の電流は転流コンデンサ C を逆充電すると共に時定数調整抵抗 R_1 に流れる。これによって L_f 端子間に約140Vの電圧が発生しプラズマ電流は更に立上がる (第3段目立上がり)。バイパスサイリスタ TSW_4 に印加される電圧は波形⑤に示すように $t=t_6$ において、 TSW_1 の電流しゃ断後、転流コンデンサ C の電圧が初期の充電電圧 (100V) の約1.6倍になっているため、 C の電圧と L_f 端子間の電圧との差電圧、すなわち TSW_4 に印加される電圧も高くなることがわかる。

なお、TCB主サイリスタスイッチ TSW_1 には③に示す波形の電流 (60A, 通電時間5ms) が10ms間隔で3回流れる。このため、 TSW_1 には多段並列方式の場合より通流時間が3倍 (15ms) になる。しかし、こ

れによるサイリスタ接合部の温度上昇は変らない。それは次の理由による。サイリスタの過渡熱インピーダンスは通流時間が 500ms 程度までは通流時間に対しリニアな関係にあり、通流時間が3倍になると過渡熱インピーダンスは約 1.5 倍になる。しかし通流しない時間が 10ms あるため、平均通電電流は $25\text{A} (=60 \times (3 \times 5\text{ms}) / (3 \times 5\text{ms} + 2 \times 10\text{ms}))$ と 60A に対し半分以下である。一方サイリスタの接合温度も、通電時間が ms オーダになると通電電流に対し、リニアになるので、過熱インピーダンスの 1.5 倍になっても、平均通電電流が低いので、相殺する結果となる。従って、多段繰返し方式にしても、TSW₁ の容量の増大はない。

以上の動作により、1 台の TCB を 3 回繰返ししゃ断動作に使うことによってプラズマ電流の 3 段立上げ動作が可能であることがわかった。特にプラズマ電流の立上げ段数が増えれば、この TCB 多段繰返し方式の効果がますます大きくなる。

4. ま と め

トカマク形核融合試験装置における変流器コイル電源に使用するサイリスタしゃ断器 (TCB) の試作開発および TCB を使った変流器コイル電源回路方式の検討を行ない次の結論を得た。

(1) 定格せん頭オフ状態電圧 2,000V、定格平均電流 500A の高速サイリスタを直接並列方式によって構成した 1 ユニットのサイリスタスイッチ (5s×4p) は、短時間定格で通電 (0.15s) する今回開発した並列方式の変流器コイル電源回路において 12.7kA の電流をしゃ断できることがわかった。これは、当初の仕様値 6kA に対し約 2 倍のしゃ断能力があることを示している。また電流しゃ断後の再起電圧もユニット 2 直列で 12.3kV まで実施し、これも当初の仕様値 10kV に対し 1.25 倍の性能があることを示している。このように TCB を変流器コイル電源に使う場合、短時間定格で通電できる回路方式によってスイッチの構成を大幅に縮小できることがわかった。スイッチ 1 ユ

ニット内の素子間の電圧分担、およびユニット間の電圧分担は良好で ±5% 以内のばらつきに抑えることができた。

サイリスタスイッチユニット間で、仮に電流不平衡が生じて、電流しゃ断後の逆電圧時間のばらつきはしゃ断電流が大きくなるにつれて小さくなる。これによって、大容量 TCB の場合でも、ユニットの並列接続は問題ないことがわかった。

(2) TCB を変流器コイル電源に使用して、プラズマ電流の多段立上げを行なうとき、TCB は高速制御が可能なので多段にする必要はなく、1 台の TCB でプラズマ電流の多段立上げ動作が可能なることがわかった。このため、(1)によって低減できたしゃ断器の容量は更に大幅に低減できることがわかった。

終りに、本研究に際し終始御指導を賜りました、日本原子力研究所大型トカマク開発部 吉川允二次長、日立製作所日立工場 加沢義彰副技師長、尾形文夫、古山昌之両主任技師、同日立研究所 植田明照主任研究員に感謝の意を表します。

(昭和 56 年 5 月 28 日受付、同 56 年 12 月 26 日再受付)

文 献

- (1) 嶋田・谷・田村：「誘導性エネルギーによるトカマクプラズマ電流の立上げ」電学誌 A, 99, 49 (昭 54-2)
- (2) 通商産業省資源エネルギー庁直流送電技術検討委員会編：「直流送電技術と系統問題」218 (昭 53-11)
- (3) 嶋田・谷・吉田・岸本・田村：「JT-60 用大電流直流しゃ断器の開発」核融合連合講演会, e-1 (昭 53-2)
- (4) 嶋田・谷・吉田・岸本・田村, 他：「JT-60 用大電流直流しゃ断器の開発 (VCB 方式)」核融合連合講演会 e-2 (昭 53-2)
- (5) 谷・嶋田・田村, 他：「大容量 TCB の試作開発」昭 52 電気学会全大 No. 922, 1188
- (6) 谷・嶋田・薮野, 他：「JT-60 用大電流直流しゃ断器の開発 (TCB 方式)」核融合連合講演会 e-3 (昭 53-2)
- (7) 嶋田・谷・岸本・田村, 他：「核融合実験装置 JT-60 用直流しゃ断器の寿命」電学誌 99, 425 (昭 54-7)
- (8) 嶋田・谷・岸本・田村, 他：「核融合実験装置用直流しゃ断器の解析と実証試験」〔JT-60 への適用〕電学誌 B, 99, 773 (昭 54-12)
- (9) D. Dokopoulos, D. L. Smart: The Poloidal Field Circuit in the Joint European Torus (JET)", Proceedings of the 9th Symposium on Fusion Technology (June, 1976)
- (10) 古関・石井・大引, 他：「ヘリオトロン E のジュール加熱電源の通電試験」昭 56 電気学会全大 No. 49, 56 (昭 56)