

125 kV, 37.5 MW 高電圧サイリスタバルブの開発

Development of 125 kV, 37.5 MW High-voltage Thyristor Valves

川上直衛*
Naoe Kawakami

尾形文夫*
Fumio Ogata

吉田甫*
Hajime Yoshida

天野比佐雄**
Hisao Amano

植田明照**
Akiteru Ueda

磯貝時男**
Tokio Isogai

池本徳郎***
Norio Ikemoto

要 旨

機械振興協会納め 125 kV, 37.5 MW 高電圧サイリスタバルブを開発した。このサイリスタバルブは実系統で運転されるものとしては電圧的にも容量的にも現在の世界記録品である。サイリスタバルブは 2,500 V, 400 A サイリスタ 192 個からなり、循環風冷方式である。電圧分担についてはストレイキャパシタンスの影響および異常時の過電圧防止に特に注意して設計した。またゲート方式としては信頼度の高い CT 形ゲート変圧器方式とし、CT 1 本で信号も電力もいっしょに送る方式としてゲート回路の部品数を減らした。現在、佐久間試験所において 275 kV の実系統に接続され、各種の試験が好調のうちに進行中である。

1. 緒 言

1954 年スウェーデン本土とゴットランド島との間で直流送電が実施されて以来、多数の直流送電計画が完成ないしは建設されつつある。これらに使用される変換装置としては ASEA 社の開発した多陽極形水銀整流器が圧倒的優位を占めている。しかし最近、信頼度の高い高電圧、大電流サイリスタを使用した変換装置の開発がド

イツ、アメリカ、スウェーデン、イギリスおよびわが国で積極的に進められており、運転が容易で信頼性の高いサイリスタ変換装置が今後実際に使用されていくことは必然と考えられる。すでに 1970 年の春には ASEA 社がゴットランド島において 50 kV, 200 A のサイリスタ変換装置を水銀整流装置とカスケードに接続して実運転に入れたことが報告されている⁽¹⁾。

日立製作所においては、電子技術総合研究所に昭和 42 年に 10 kV, 80 A⁽²⁾、昭和 43 年に 50 kV, 40 A のサイリスタ変換装置を納入している。これらは現在に至るまで好調に運転されている。これらのサイリスタ変換装置の開発にあたっては安定な電圧分担を確認することが第一の目標であり、そのための分圧回路ならびにゲート点弧回路方式の開発がおもなテーマであった。しかし今回のサイリスタ変換装置は 275 kV の実運転系統に直接接続されて種々の試験が行なわれるので、次の点には特に吟味して設計、製作した。

- (1) あらゆる種類の異常電圧の解明とその分圧方式
- (2) 1 アーム端子間短絡事故時の事故電流保護方式
- (3) 信頼性の高いゲート方式

表 1 はサイリスタ変換装置の仕様を示したものである。図 1 はその外観である。運転にはいっているサイリスタ変換装置としては容量においても電圧においても現在のところ世界記録品である。

表 1 サイリスタ変換装置の仕様		
定 格	(1) 容 量	37,500 kW
	(2) 直 流 電 圧	125 kV
	(3) 直 流 電 流	300 A
	(4) 定 格 周 波 数	100% 連 続
	(5) 定 格 周 波 数	60 Hz
	(6) 結 線 方 式	3 相 全 波
	(7) 冷 却 方 式	循 環 風 冷
	(8) 定 格 交 流 電 圧	100 kV 3φ
	(9) 直 流 電 圧 調 整 範 囲	+100%~-100%
	(10) 直 流 電 流 調 整 範 囲	15%(目標 10%)~100%
	(11) 周 囲 温 度	-5℃~+40℃
絶 縁	(1) バルブ一括大地間 (P側)	
	AC	230 kV 1 分 間
	DC	225 kV 30 分 間
	コ ロ ナ 試 験	160 kV 30 分 間
	インパルス移行サージ	(60±10) μs × (2,500±1,500) μs
	および開閉サージ	±400 kV
	(2) A-R 間一括大地間 (N側)	
	AC バルブ端子間	28 kV 1 分 間
	AC	230 kV 3~5 秒
	DC	225 kV 30 分 間
	コ ロ ナ 試 験	160 kV 30 分 間
	インパルス移行サージ	(60±10) μs × (2,500±1,500) μs
	および開閉サージ	±400 kV
素 子 構 成 お よ び ゲ ー ト 回 路	(1) 素 子	CH03
	(2) 構 成	192 s × 1 p × 6 A
	(3) ゲ ー ト ブ ロ ッ ク	可 能
	(4) 強 制 点 弧 回 路	有
	(5) ゲ ー ト 方 式	CT 形ゲート変圧器方式
	パ ル ス	狭 幅 + 広 幅
	広 幅 発 生 方 式	高 周 波 整 流 方 式
	パ イ パ ス ベ ア	可 能
	パ ル ス ア ン プ	1 台 に て 集 中 制 御
	ゲ ー ト 電 源	100 号/10 号絶縁変圧器による

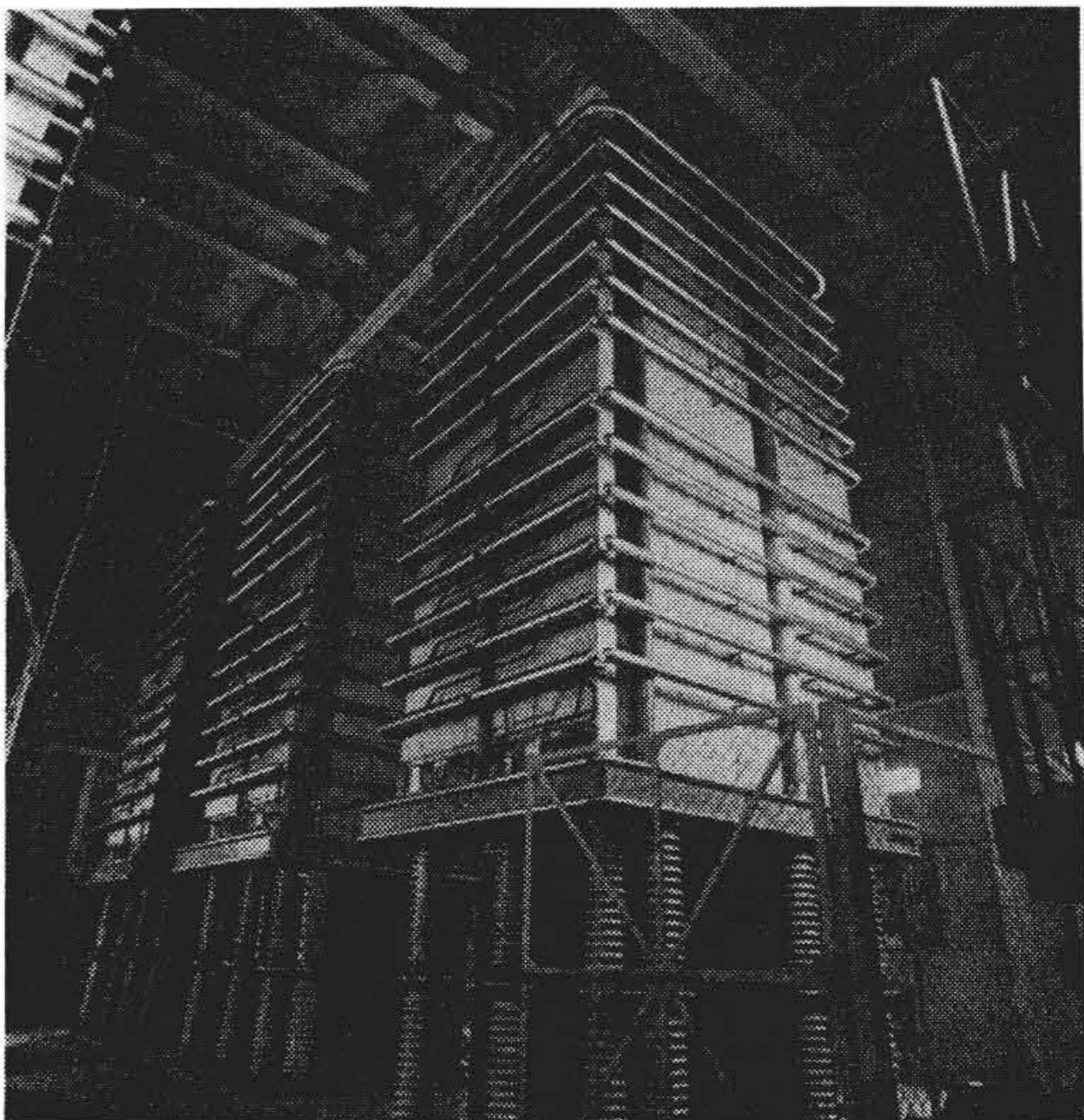


図 1 サイリスタ変換装置

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所日立研究所
*** 日立製作所国分工場

表2 各国サイリスタバルブの比較

	G. E	E. E	SIEMENS	B. B. C	A. E. G	A. S. E. A	東 芝	日 立
出 力 (MW)	360	90	90	40	25	10	37.5	37.5
直流電圧 (kV)	200	100	100	100	150	50	125	125
直流電流 (A)	1,800	900	900	800	500	200	300	300
直 列 数	320		180	192	100	56	192	192
並 列 数	4		1	2	1	1	1	1
冷 却	風 冷	油 浸	油 浸	風 冷	風 冷	風 冷	風 冷	風 冷
ゲート方式	光	光	CT	CT	CT	光	CT	CT
分 圧 方 式	C. R	C. R	C. R ダイオード	アバランシュ Cダイオード	C. R	C. R	C. R	C. R
過電流保護	ゲートシャ断	ゲートシャ断	短絡器	短絡器	短絡器	ゲートシャ断	ゲートシャ断	ゲートシャ断

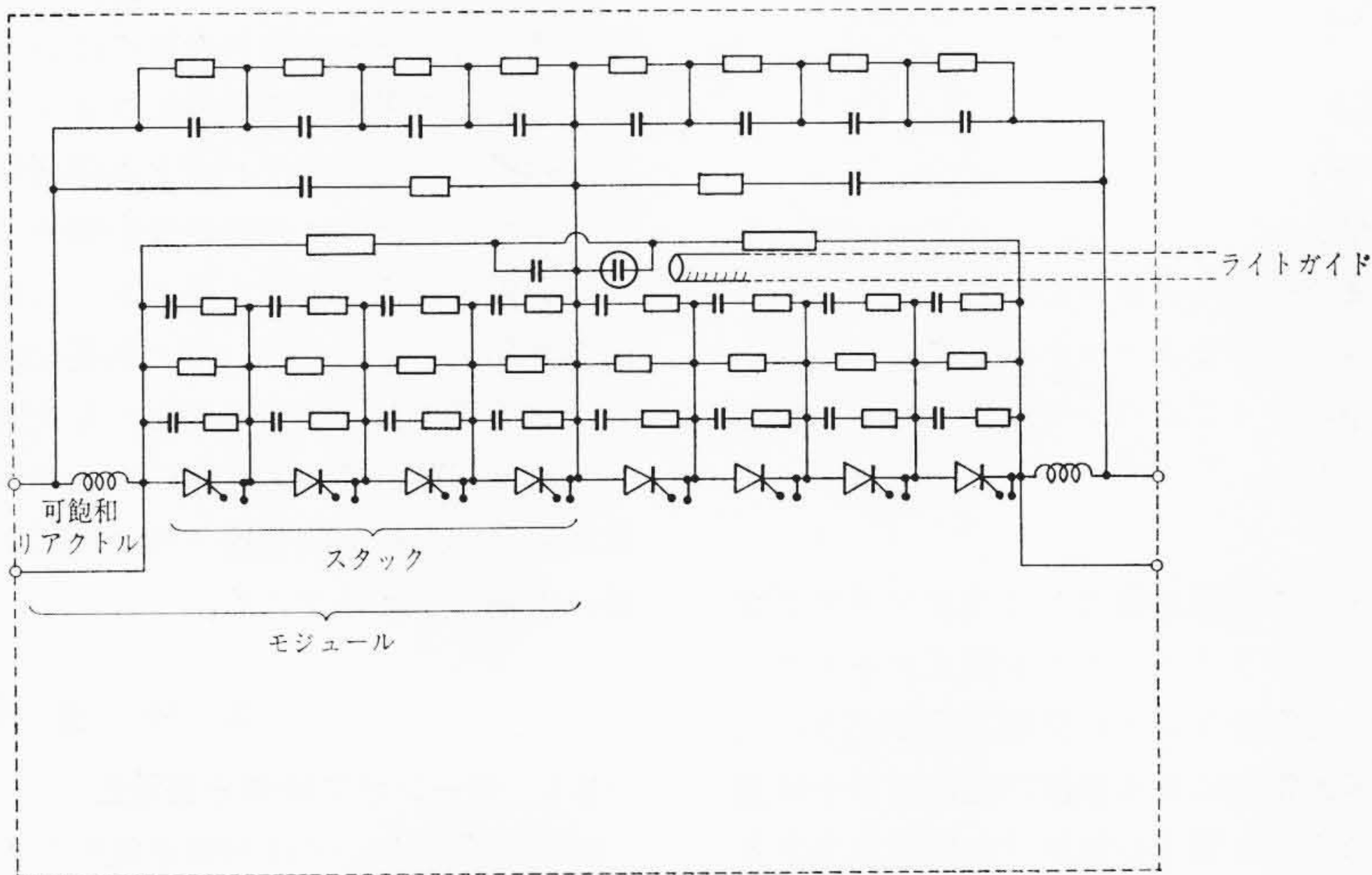


図2 トレイ内分圧回路結線図

2. サイリスタバルブの概要

サイリスタ変換装置においては多数の素子が直列に接続され、電流容量によってはさらに並列にも接続されている。これらの素子は付属回路とともに組み込まれ、外部からの点弧信号によってあたかも1個のスイッチ素子として動作する。このユニットはサイリスタバルブと呼ばれる。各国で開発が進められているサイリスタバルブは表2に示すとおりである。以下、機械振興協会に納入した125 kV, 37.5 MW サイリスタバルブの概要を述べる。

2.1 サイリスタの直列数

サイリスタバルブの絶縁レベルはアレスタの特性との協調上400 kVと定められた。一方、アレスタの放電時あるいは主変圧器二次回路の地絡時などには急峻(しゅん)な電圧変化が発生するので分圧回路としては標準インパルス波形の電圧に対して均等に分圧するように定数を選んである。素子間の電圧分担不平衡率としては回路のストレイキャパシタンスの影響も考え、余裕をみて20%に選んである。したがって

素子耐電圧×素子直列数=480 kV (=400 kV×1.2)
となる。

素子としてはCH03CF形2,500 V, 400 Aサイリスタを使用するので直列数は次の計算により192個となる。

$$480\text{ kV} \times \frac{1}{2.5\text{ kV}} = 192\text{ 個}$$

2.2 事故電流と保護方式

(1) 1アーム短絡

1アーム短絡時には線間短絡電流がサイリスタバルブに流れ

る。この電流はゲートブロックにより通常は半波しか流れないので、サイリスタの接合温度が電流オフ直後に125℃を越さないよう主変圧器のインピーダンスを選んである。またゲートブロックと同時に相手側の変換器(たとえばインバータ側でアーム短絡が発生した場合はコンバータ側の変換器)をインバータ運転として直流リアクトルの電流を減衰させ、交流シャ断器で直流回路電流をシャ断しないようにしてある。

(2) 転流失敗

転流失敗時の直流電流は直流リアクトルにより立上りを抑制され、ゆるい傾斜で直線的に上昇する。電源の瞬時降下などで転流失敗したときは、定電流制御により電流を抑制して自己回復させる。自己回復できない場合はゲート位相をすべてインバータ側にシフトし、直流電流を減衰させたのち交流側シャ断器を開放する。

2.3 分圧方式

バルブの分圧回路は図2に示すとおりである。特性の詳細については次章で述べるがおもな特長は次のとおりである。

(1) アノードリアクトルをフェライトコア入りの可飽和形とし、ターンオン、ターンオフ時のインダクタンスを大きくして分圧を助けた。

(2) バルブダンピング回路の一部を分圧器として接続し、アーム短絡電流を交流側シャ断器で開放し、素子逆流が増大したときにも分圧を確保するようにしてある。

(3) 残りのバルブダンピング回路はモジュール(素子4個およびアノードリアクトル、分圧器を含むバルブ構成単位)分圧器としても動作するようモジュールの端子間に接続されている。

(4) 各モジュールの端子間に直接コンデンサを接続して分圧回

路の周波数特性を改善するとともにキャパシタンスの値を6段階に変えてストレイキャパシタンスを補償するようにしてある。

2.4 ゲート方式

サイリスタバルブのゲート方式としては光電変換方式およびCT形ゲート変圧器方式がある。光電変換方式は絶縁が容易で立上りのすぐれたパルス波形を得やすいなどの特長があるが、現状においては発光素子の信頼度にいま一步の感があるため、今回はCT形ゲート変圧器方式を採用した。この方式ではパルス立上りの良好なゲート変圧器を開発すれば、パルス増幅回路が各バルブに1組で済むので部品数が少なく信頼度の高い設計とすることができる。

2.5 素子特性

素子は標準形の2,500V, 400Aサイリスタであるが、多数の素子が直列に接続されるのでその特性はばらつきの少ないことが望ましい。特に問題となるのは

- (1) 遅れ時間 (t_d)
- (2) ターンオフタイム (t_{off})
- (3) 逆回復電荷 (Q_r)

などである。しかし素子をあまり細かくクラスわけして使用することは不経済であるので、遅れ時間のみをクラスわけしてばらつきを抑え、ターンオフタイムと残留キャリアについては最大値を限定して分圧回路と協調をとるようにした。

2.6 素子故障検出回路

モジュールの2個の分担電圧の不均衡を検出してネオンランプを点灯させる。ネオンランプの点灯をライトガイドを経てフォトセルで検出し、バルブベースにおいて事故トレイの位置を表示する。同時に絶縁パルス変圧器を経て接地電位にある保護回路に信号を伝達する。この回路はモジュールの中で1素子が短絡すれば検出できるように調整してある。

2.7 構造

サイリスタバルブは図1に示されているように点検の便を考慮してトレイ式となっている。トレイはサイリスタトレイ24個とゲートトレイ2個からなり、これらがエポキシFRPからなる絶縁フレームに収納されている。絶縁フレームの背面にはCT形ゲート変圧器を組み込んである。この絶縁フレームは碍子(がいし)により、大地から絶縁して支持されている。絶縁フレーム自体は6バルブとも同一構造であるが、絶縁碍子には非接地側3バルブが140号碍子を、また接地側3バルブが30号碍子を使用している。碍子のほかに信号伝達用の絶縁パルストランス4個(ゲート回路用2個、故障信号伝達用2個)と冷却風循環用の絶縁風道が床面に取り付けられている。地下室には冷却風循環用のファンと空気-水の熱交換器および結露防止用のヒータが設置してある。

サイリスタトレイにはサイリスタ4個からなるスタック、アノードリアクトル、分圧器、バルブダンピング回路からなるモジュール2組とCT形ゲート変圧器の二次回路および素子故障検出回路を収

納している。

トレイのケースは銅板製であり、2モジュールの midpoint 電位を与えてシールド効果を持たせている。したがってトレイ内絶縁は常用電圧として

$$110 \text{ kV} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{2} = 2.3 \text{ kV}$$

を考えればよくトレイ端子間電圧の半分で済む。

トレイの端子間にAC 12 kV (バルブ端子間耐圧値の約125%相当)を印加してコロナ発生などの異常のないことを確認した。

2.8 冷却

絶縁上じんあいの侵入を極力防止することが必要なので循環風冷水冷方式としてある。冷却空気はトレイ部を下から上に吹き抜けて素子、アノードリアクトル、抵抗器類を冷却後CT形ゲート変圧器室を通して空気-水の再冷器にはいる。じんあいの侵入を防止するためファンの風吸込部風道にフィルタを通して漏れ空気を吸い込むための吸込口を設けてバルブ本体部分を正圧としている。

バルブダンピング回路の発生損失は零力率運転のとき最大で、バルブ全損失の約半分にも達する。しかし定格電圧で運転するときには制御角が小さいので、零力率運転時の数分の一になる。今回のものは試験用であり零力率運転にも長時間使用されるので、バルブダンピング回路の熱的容量はこの条件から決定された。実際の商用装置の場合は定格運転連続で考えればよいので、バルブダンピング回路は大幅に小形化される。

3. 分担電圧

3.1 ターンオフ時の分担電圧

転流終期においては飛躍逆電圧の上に振動電圧が加算される。これを各スタックが分担するわけであるが、各素子の間に逆耐圧回復特性にばらつきがあるのでスタックの分担電圧には多少のばらつきを生ずる。このため素子の特性ばらつきと協調をとって分圧回路を設計してある。工場試験においては等価試験および零力率組合試験を行なって分担電圧を測定しばらつきが約10%であることを確認した。なお転流振動の周波数は約1 kHzと低く、したがってスタックとモジュールの分担電圧波高値はほとんど同じであった。

3.2 ターンオン時の分担電圧

ターンオン時には主として遅れ時間のばらつきに基づく過渡時電圧のはね上がりが発生する。これに対してはアノードリアクトルと補償コンデンサ回路が有効に働く。工場試験においてはターンオフ時と同様にしてターンオン時の分担電圧の測定を行なったが、スタック端子における過渡時電圧上昇は認められなかった。なおターンオン直前の分担電圧にはターンオフ時の分担電圧の不均衡の影響が残るが、そのばらつきはターンオフ直後よりも小さくなっている。

図3は現地調整試験時測定したバルブの電圧波形およびスタックの分担電圧波形の一例である。

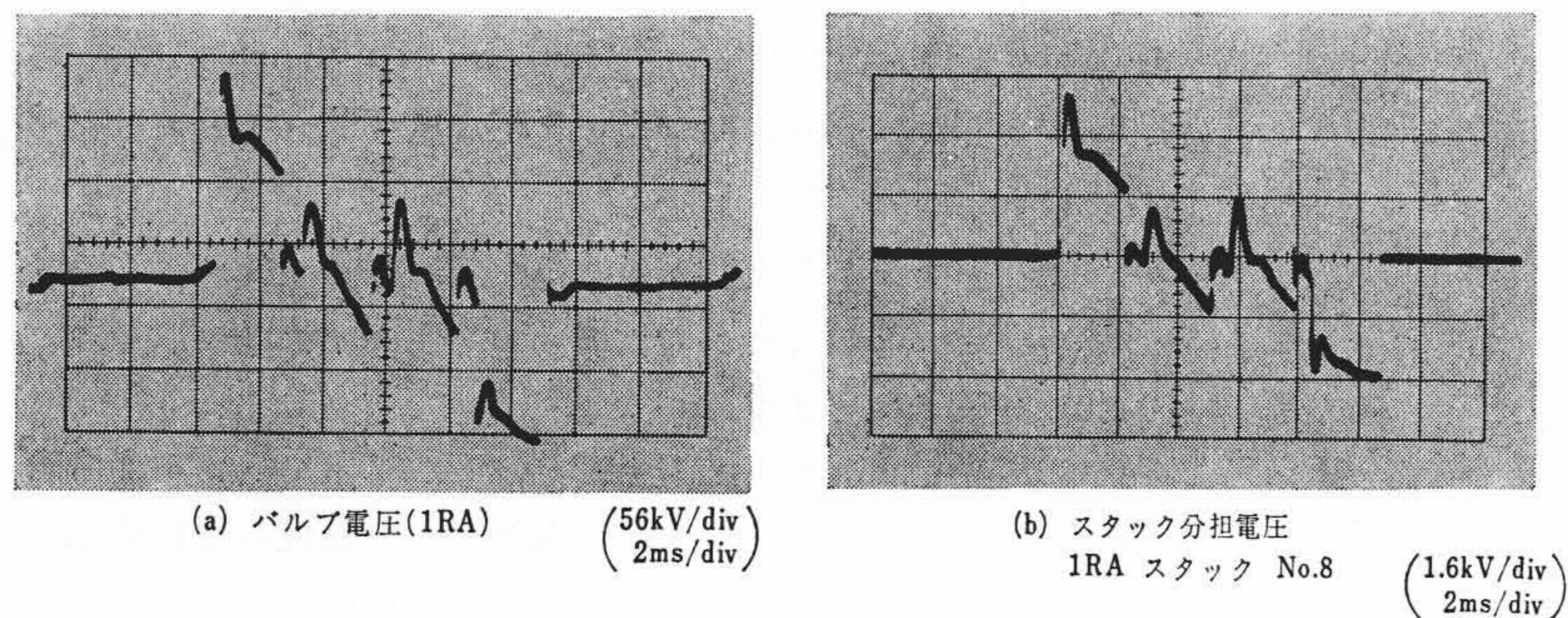


図3 分担電圧

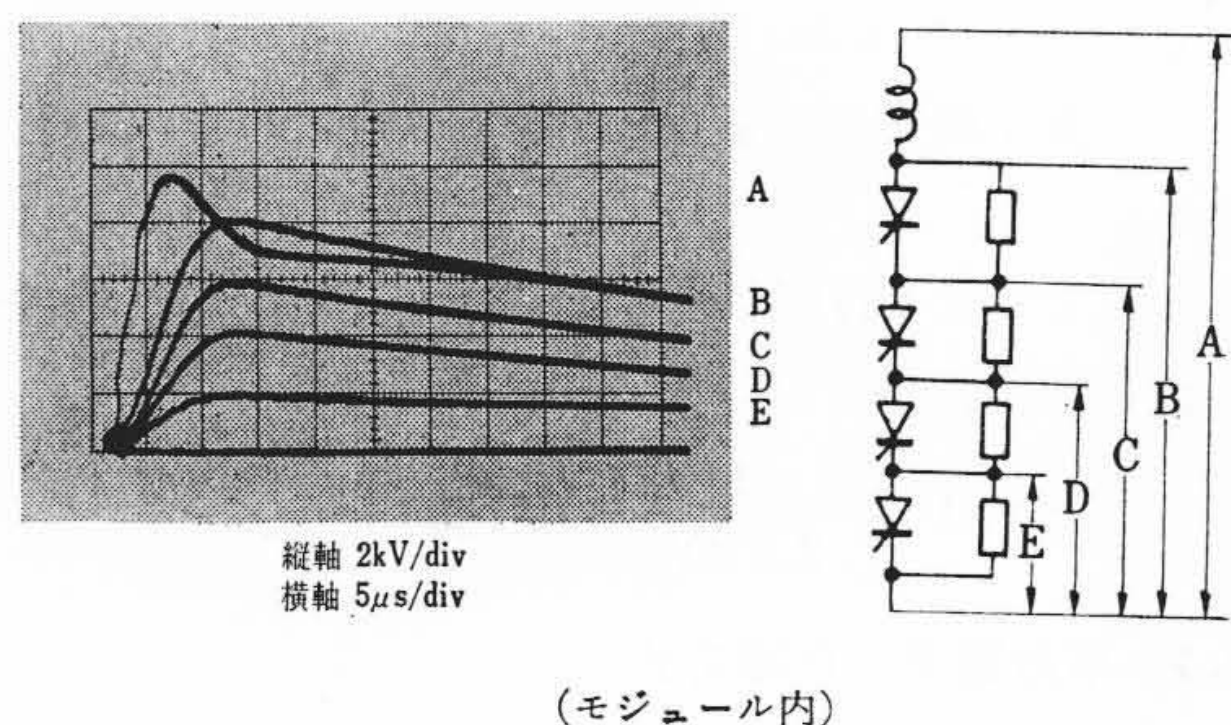


図4 インパルス分担電圧

3.3 インパルス分担電圧

バルブ端子間に標準波形のインパルスを印加し、モジュールおよびスタックの分担電圧を調べた。モジュールの分担電圧には $\pm 20\%$ 程度のばらつきが見られたが、これは補償キャパシタンスを6分割にしたためであり、分割数を増せばさらに小さく押えることはできる。しかしスタックの分担電圧は100%以下、すなわち印加電圧をスタックの数で割った値以下であり、全く問題ないことを確認した。これは電圧立上りの急峻(しゅん)な部分はアノードリアクトルで吸収されるためである。

なおバルブ全体としては端子間に400 kVの標準波形のインパルス電圧を順逆両方向に印加して異常のないことを確認した。図4は1モジュール相当の試験電圧をモジュールに加えたときの素子の分担電圧の波形を示したものである。

3.4 開閉サージ分担電圧

約 $60 \times 2,500 \mu\text{s}$ の開閉サージ波形をバルブに印加したとき、モジュールの分担電圧のばらつきは $\pm 10\%$ 以下であった。また400 kVのサージ電圧を順逆両方向に印加してバルブに支障のないことを確認した。なおこの程度の立上り時間になるとモジュールとスタックの分担電圧波形にはほとんど差はなかった。

3.5 異常時の分担電圧

(1) 順過電圧

インバータ運転時は余裕角制御により、素子が順耐電圧を回復するにじゅうぶんな余裕時間を確保している。しかしこれは一種の予測制御であるため、非常に急峻な交流電圧変化が発生したときは追従できず、余裕角が小さくなることがありうる。このとき余裕時間が素子のターンオフタイム程度であると直列素子中一部の素子は順耐電圧を回復することができず、残りの素子に全電圧が印加される。このような現象を防止するため、万一、余裕角が限度以下となった場合はバルブを強制的に再点弧させる回路を設けている。

(2) 逆過電圧

起動時、あるいは電源急変時に直流電流が断続するとゲートパルスがはいっている状態で素子に逆電圧がかかる。この場合、逆方向の漏れ電流が増加し、分担電圧の不平衡が増大する可能性がある。このため逆電圧を検出してゲートパルスをカットし、逆電圧がなくなれば再びゲートを生かす回路を設けている。

これらの保護回路は予期どおりの動作を行なうことを工場組合せ試験において確認した。

4. ゲート点弧方式

4.1 構成

ゲート点弧回路の総合ブロック線図は図5に示すとおりである。

このようにゲート点弧方式は絶縁された共通一次導体を持ったCT形ゲート変圧器方式で、ゲート点弧信号と点弧電力とは分離せず高周波の方形波交流によって1組のゲート変圧器で各サイリスタに分配される。

ゲート変圧器の二次電圧は全波整流されたあと、そのままゲート点弧信号となる。そのパルス幅はバルブが導通すべき期間中存在する広幅パルスである。

ゲートパルス発振回路は各バルブの最下段に置かれ、制御装置から絶縁パルス変圧器を通した発振起動、停止信号によって制御される。その電源は大地電位にある補助電源から絶縁変圧器を介して供給される。

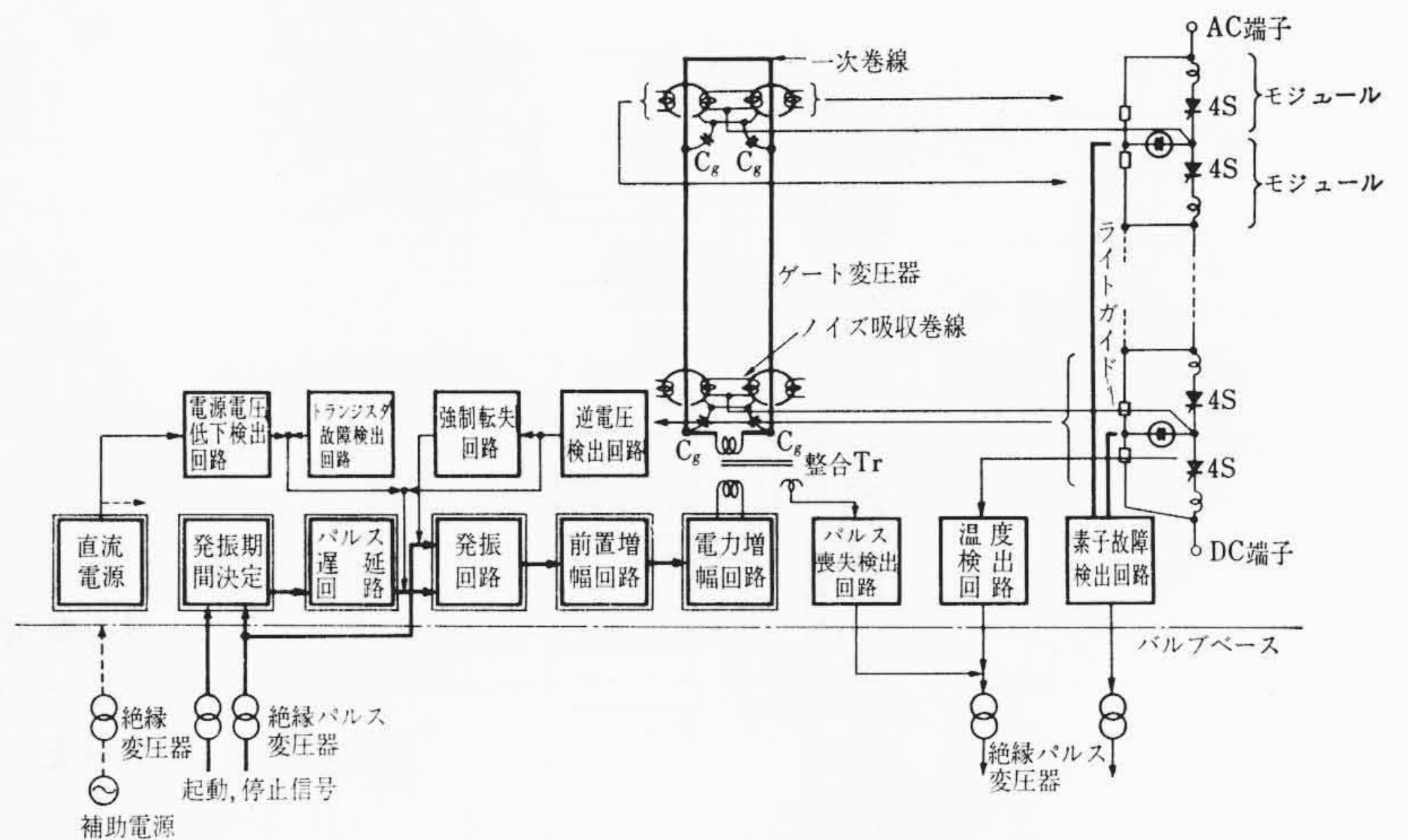


図5 ゲート点弧回路ブロック線図

4.2 特色

以下このゲート点弧回路全体としての特色を述べる。

(1) CT形ゲート変圧器方式であるため、各サイリスタの電位にはゲート信号の電力増幅器は必要ないので次のような利点が生じた。

- (a) 各サイリスタ近くに特別の電源を置く必要がない。
- (b) 各サイリスタ電位におけるゲート回路が簡単化され、信頼度が向上する。
- (c) 電力増幅回路は1バルブに1組でよい。

(2) 電力増幅回路は1,200V, 10A級パワートランジスタを必要数組合わせたプッシュ・プル増幅回路で、これらのトランジスタが破壊するとゲート回路はいったん停止するが、1アームでトランジスタの破壊数が2個以内であれば自動的に再起動するように構成されている。

(3) ゲート点弧信号は高周波交流による伝達方式であるため、ゲート変圧器の飽和に関係なく任意のパルス幅のゲート点弧信号が得られる。

また発振起動時の発振変圧器、整合変圧器およびゲート変圧器などの飽和を防止するために、起動時の発振器出力の極性は必ず発振停止時の出力の極性と逆にしてある。

(4) ゲートパルス波形は急峻な立上りと高い波高値を持った狭幅パルスを広幅パルスに重ねる方式としてあるため、サイリスタのターンオン時間のばらつきを小さくすると同時にゲートの過負荷を防止し、ゲート回路の入力電力を低減している。

(5) またゲートパルス幅は広幅であるが、次の場合には直ちにゲートカットしてバルブを保護するようにしてある。

- (a) バルブが導通しているべき期間中に、バルブに逆電圧がかかった場合
- (b) 電力増幅回路のパワートランジスタが1アームにつき3個以上破壊した場合
- (c) ゲートパルス発振回路の電源電圧が規定値以下に低下した場合

(6) ゲート回路は1バルブに1組でよいので二重系にすることが容易である。信頼性上重要な部分には二重系を採用して信頼性の向上を図っている。

(7) ゲート変圧器の二次回路にはノイズ吸収のためコンデンサと抵抗を接続したほか、ノイズストッパとしてツェナーダイオードを直列接続した(これについては5.5で述べる)。

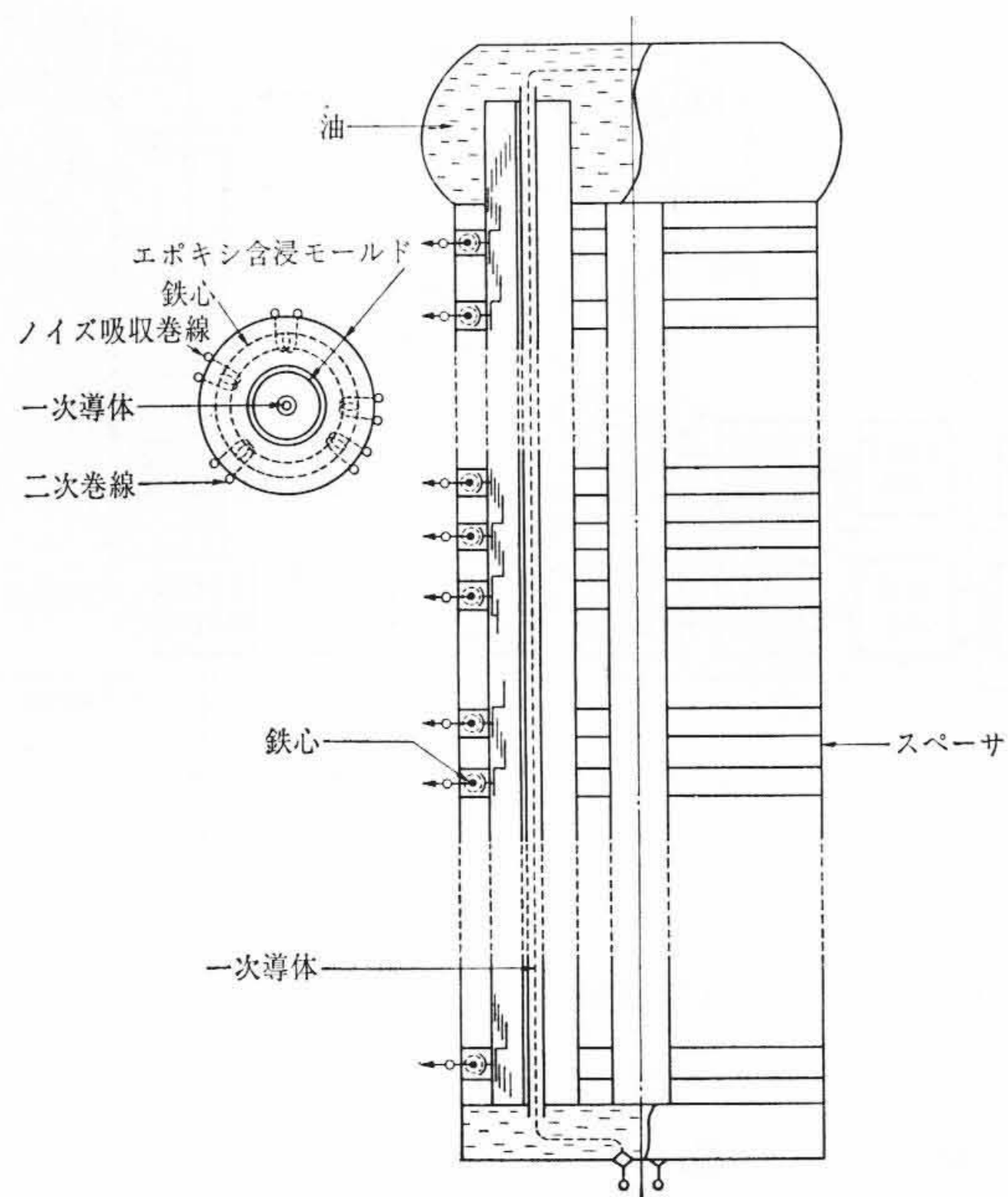


図6 CT形ゲート変圧器の構成

5. 信号伝達用ブッシング CT 形ゲート変圧器

5.1 仕様および概略構造

サイリスタゲートの点弧用として、ブッシング CT 形ゲート変圧器に日立独特の加圧含浸モールド法を採用し、エポキシ樹脂製品の集合体として完成した。製作仕様の概略は下記のとおりである。

波 頭 峻 度	1 μ s 以下
インパルス耐圧値	± 400 kV
開閉インパルス耐圧値	± 400 kV
商用周波耐電圧値	230 kV, 1 分間
商用周波長時間耐圧値	160 kV, 30 分間
直流長時間耐圧値	225 kV, 30 分間
耐 震 性	0.3G (水平加速度)

ブッシング CT 形ゲート変圧器の概略図は図 6 に示すとおりである。一次巻線の絶縁は、その外周にあるリングコア内径を最小にするためエポキシ含浸形モールド品が適しており、二次巻線は特殊鉄心を使用したモールド品で一次導体の周囲に 24 段積み重ね左右 2 列に配し、ボイドレス FRP 絶縁柱で懸垂支持されている。

一次巻線にはブッシング形を採用し、軸方向、半径方向ともにコンデンサ分圧により電位調整し、上記絶縁仕様を満たしている。

二次巻線には特殊ケースで保護された鉄心にモールド時のクラック発生を防ぐ特殊緩衝層を設け、モールド用樹脂硬化時の残留応力をなくし、耐冷熱サイクル性のすぐれた構造をもっている。また鉄心にはノイズ吸収巻線を設け、一次巻線の漂遊静電容量を通して流れる充電電流がサイリスタゲートにノイズ電流として流れないようにしてある。

5.2 鉄 心 材 料

鉄心材料を選定するにあたって次の事項をおもな条件として検討した。

- (1) 高周波で励磁電流が小さいこと。
- (2) 飽和磁束密度が高いこと。

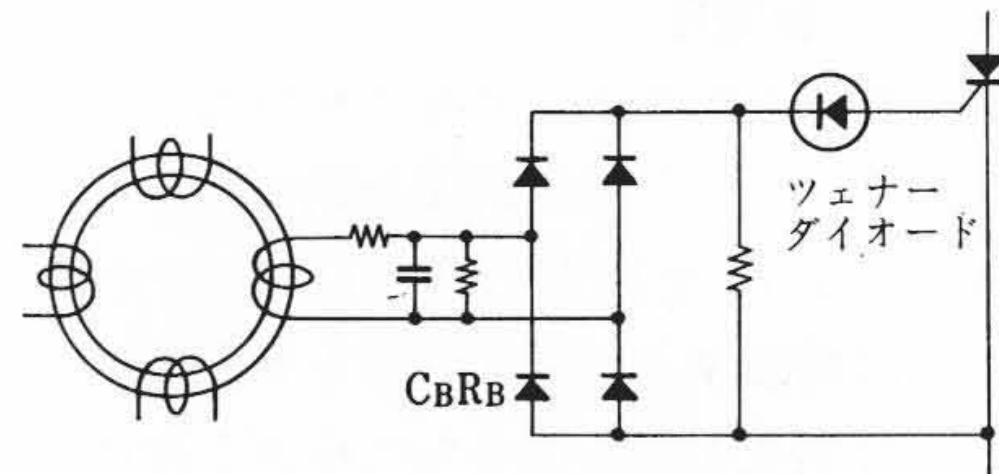


図7 ノイズバイパス回路

鉄心断面積を小さくするため高い周波数で駆動することが望ましいが、その場合、励磁損失が大きくなることが必要である。また負荷電流に対して励磁電流が大きくなると、前述のように各鉄心の一次コイルは直列になるので励磁電流のばらつきによっては二次電圧が不均等になることも起こり得る。

5.3 ノイズ対策

(1) バルブ電圧変化によるゲート変圧器の電流

ゲート変圧器とサイリスタの接続は図 5 のようになっているため、各サイリスタ・モジュールとゲート変圧器の一次コイル間にはキャパシタンス C_g が存在し、バルブ電圧が変化するとき、このキャパシタンスの充電電流が一次導体に流れる。この電流は二次巻線に電圧を誘起してサイリスタを誤点弧させるおそれがある。

この充電電流は最下段が最も大きくなり、それは

$$i_{\text{noise}} = 600, C_g \cdot \frac{dv_s}{dt}$$

ここで、 v_s : 1 モジュールあたりの電圧

(2) ノイズ吸収巻線

上記ノイズ一次電流が二次コイルに現われないように、各鉄心にノイズ吸収巻線を設け、左右同位置にある鉄心（同一トレイ内のサイリスタをトリガする）のノイズ吸収巻線を互いに接続する。その接続方法は正常動作時に直列逆極性になるようにする。ノイズ電流は左右同方向なので、この電流による磁束を打ち消すような電流がこのノイズ吸収巻線に流れる。

(3) バイパス回路

さらに図 7 のようなノイズ・バイパス回路を二次回路に設けた。コンデンサ C_B は高周波ノイズを、 R_B は低周波ノイズを吸収する。

6. 結 言

以上、サイリスタバルブの概要を報告し、特に分担電圧とゲート方式とについては詳しく述べた。このサイリスタバルブは佐久間の試験所に持込まれ、スケジュールに従って各種の試験および測定が着々と進められている。この結果については別途報告されることになろう。今回の 125 kV 実規模サイリスタバルブ製作の結果、将来の商用大容量サイリスタバルブの製作について明るい見通しを得ることができた。

終わりに臨み、このような機会を与えていただいた機械振興協会の関係各位ならびに現地試験にご尽力いただいている超高压電力研究所、電源開発株式会社、電力中央研究所をはじめとするサイリスタ試験研究委員会の関係各位に心から感謝する。

参 考 文 献

- (1) Electrical World Jan. 5 (1970) p. 89~90
- (2) 岩田ほか 3 名: 日立評論 50, 690 (昭 43-8)