

直流送電用10kVサイリスタ変換装置

10 kV Thyristor Converter Equipment for High Voltage Direct Current Transmission

岩 田 幸 二* 曾 根 田 瑞 夫**
Kôji Iwata Mitsuo Soneda
高 橋 徹 也** 杉 本 光 昭***
Tetsuya Takahashi Mitsuaki Sugimoto

要 旨

大容量高耐圧サイリスタの最近の目ざましい発達により、直流送電を対象とした超高圧大容量サイリスタ変換装置の実現の可能性が大きくクローズアップされてきた。日立製作所ではこの開発のために昨年わが国で始めてのサイリスタ多数個直列接続による高電圧サイリスタ変換装置(10 kV 800 kW)を完成し、工業技術院電気試験所に納入するとともに、引き続き50 kV サイリスタバルブ3個を現在製作中である。

本稿ではサイリスタバルブ製作上の重要な問題点、すなわちサイリスタの特性上の問題、サイリスタ多数個直列接続時の電圧分担の問題およびゲート同時点弧回路方式の問題について日立製作所の考えを述べた。次に前記10 kV 800 kW装置の設備の概要とその試験結果を紹介した。本装置は現在好調に運転しており、今後の超高圧サイリスタ変換装置開発に明るい見通しを与えている。

1. 緒 言

直流送電は(1)周波数の異なる交流系統を直接連係することができる。(2)交流送電のように同期機間の安定度問題がない。(3)短絡電流を増加させることなく任意の大きさの交流系統を連係することができる。(4)直流線路は交流3導体に対して2導体または大地を利用すれば1導体ですむため、線路建設費が著しく安価となり長距離大電力送電に適する。(5)直流ケーブル線路においては充電電流がないために交流線路に比べて損失が少なくその絶縁も低下できる。などの技術的経済的利点を有するため、1954年スウェーデン・ゴットランド島で直流送電が実施されて以来、世界各国においてすでに10指に余る計画が実現をみ、もしくは建設が進められている。わが国においても1965年佐久間周波数変換所が建設されるにいたり改めて直流送電技術の有用性が見直されつつある。これらの交直変換所に用いられている超高圧変換器は従来もっぱらスウェーデン・ASEA社の製作になる高電圧水銀アークバルブであった。しかるに最近のめざましい半導体設計製作技術の進歩により電力用サイリスタの単位出力の増大は止まるところを知らず、年々その記録を更新し、現在ではすでに2,500 V 400 A素子が量産され、さらに高耐圧大容量化に向かって開発が進められている(図1, 2)。これに伴って圧延機駆動用電源、車両用その他一般工業用電源に用いられる直流電圧1,000 V前後の交直変換器は完全に従来の水銀整流器からサイリスタの時代に移り変わるに至り、圧延機駆動用として数10 MW級のサイリスタ変換設備が多数製作されている。ここにおいて直流送電を目標とする超高圧大容量サイリスタ変換装置の開発の可能性が大きくクローズアップされてきた。サイリスタは固体内の電子の動きを利用した装置であるため、アークの特性を利用した水銀アークバルブとは根本的にその性質を異にする。表1に示すとおり両者それぞれ一長一短があり現時点においてその優劣を決することはできないが、以下に示す特長を活用した超高圧サイリスタ変換装置の開発が進められていくことは必至である。

(1) サイリスタには逆弧、消弧、失弧などの異常現象がなく、これに伴った保護制御が省略される。

(2) 複雑な温度制御を必要としない。

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所国分工場

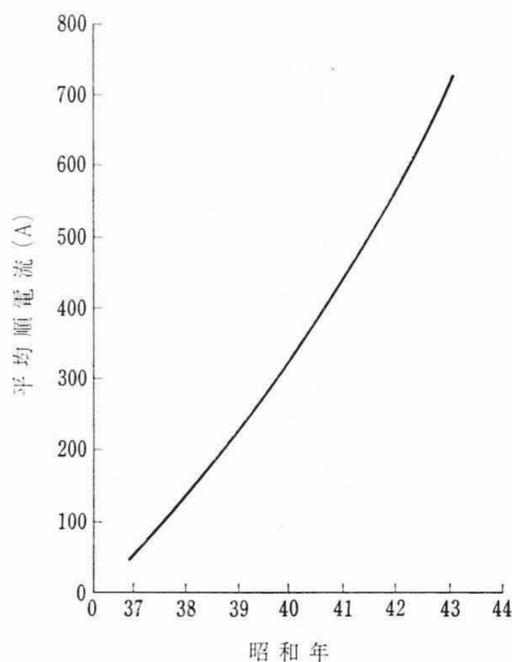


図1 日立サイリスタ電流の変遷

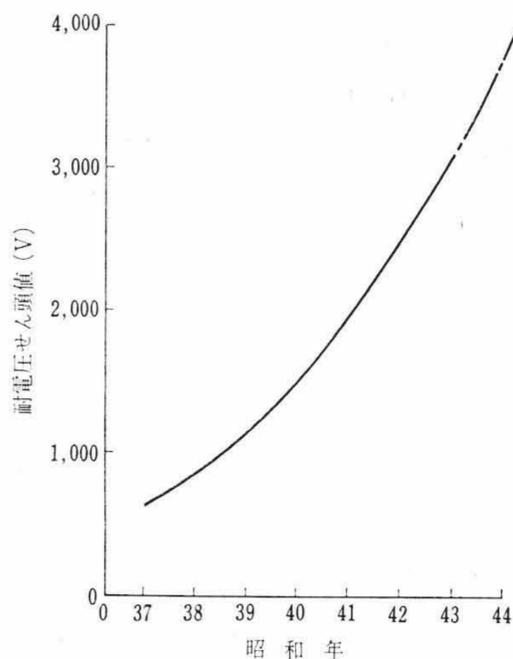


図2 日立サイリスタ電圧の変遷

表1 サイリスタと水銀バルブ得失比較

項目	水銀バルブ	サイリスタ
電圧電流定格	バルブの電圧に応じて制約がある	任意に取り得る
構造	制約あり	比較的自由度が大きい
異常現象	逆弧が必ず起こる	逆弧のような現象はない
バイパスバルブ	必要	制御方式により不要となし得る
付属装置	多い	少ない
制御保護	複雑	簡単
運転準備時間	必要	不要
保守取扱い	複雑	容易
効率	良い	やや劣る ただし無負荷損失はMRより小
建設面	空調されたバルブ室, 化成室 組立室が必要	特別室不要, 屋外も可能
価格	高い	MRより安くなる見込み, 建設費も含めるとさらに有利

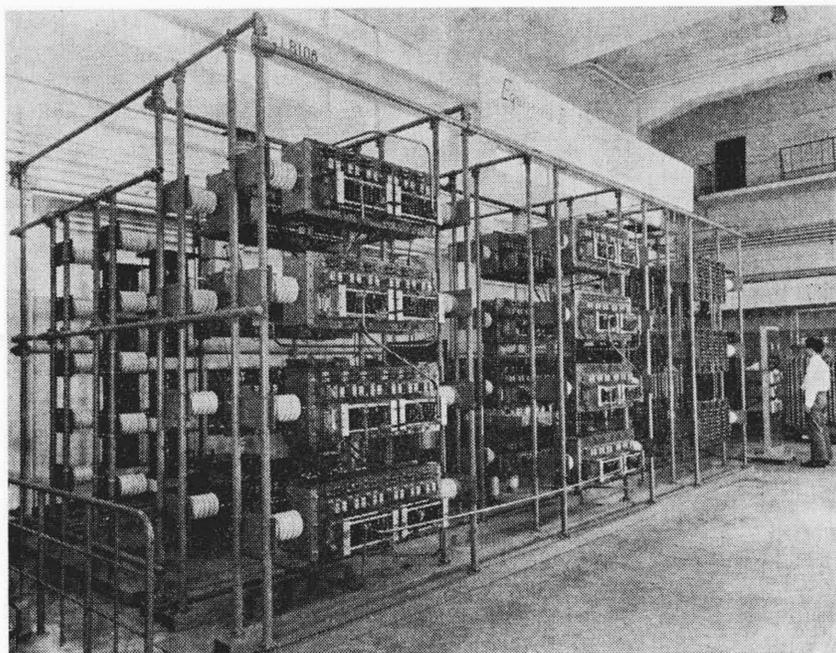


図3 50 kV サイリスタバルブ等価試験設備

- (3) 真空装置, 励弧装置などが不要で付属装置が比較的簡単となる。
- (4) 特別なバルブ室, 化成室, 組立室などが不要で屋外設置も可能である。
- (5) 運転保守が非常に楽になる。
- (6) 予熱時間が不要で, 起動が迅速にできる。
- (7) 電圧定格の自由度が大きく, 構造の制約が少ない。
- (8) 逆弧がないのでバイパスバルブを省略できる。
- (9) 素子の量産による価格の低減が期待できる。

以上の背景のもとに日立製作所では, 直流送電用超高圧サイリスタ変換装置の開発を鋭意進めてきたが, 昨年 DC 10 kV 800 kW サイリスタ変換装置を製作し, 工業技術院電気試験所に研究設備として納入した。

さらに引き続いて 50 kV サイリスタバルブ 2 アームを試作し, バルブとしての等価試験を行ない(図 3), これをもとに 50 kV サイリスタバルブ 3 個(三相分)を目下製作中であり, 近く工業技術院電気試験所に納入される予定である。

本稿は直流送電用高電圧サイリスタ変換装置の基本的問題点を説明するとともに, すでに製作した 10 kV 800 kW サイリスタ変換装置の概要を報告する。

2. 高電圧サイリスタ回路の問題点

サイリスタ高圧変換装置を製作するに当たり, 検討すべき点は

- (1) 高性能サイリスタの開発
- (2) 直並列接続

- (3) ゲート点弧方式
- (4) 制御方式
- (5) 保護方式
- (6) 構造的問題
- (7) そのほか, たとえば誘導障害, ラジオノイズなど

などである。このように検討すべき問題点は非常に多いがサイリスタ高電圧変換装置の開発に当たり, 最小限, 素子の直列接続とゲート点弧方式の開発が必要であると考え, 2本のサイリスタバルブ(多数のサイリスタを直並列に接続, 点弧信号を印加する端子をもち, あたかも1個のスイッチ素子として動作するようにした一体のものをサイリスタバルブと呼ぶことにする。したがって通常はバルブ1本が変換装置の回路の1アームとして用いられる)を用いた等価試験装置により直列接続素子の順逆分担電圧を調べ, 直列接続について検討をした。これと平行してゲート点弧方式について検討を加え制御方式, 保護方式に進み 10 kV 用変換装置の製作, さらに 50 kV 用変換装置の設計製作を行なうという経過を経た。本章ではこの開発過程におけるおもな実験結果や検討結果および今後検討すべき問題点について述べる。

2.1 サイリスタ

サイリスタの電圧定格が高いほど都合がよいことは論をまたない。そしてサイリスタの耐圧は年々向上しており, 将来はいっそう高性能の素子が製作されるであろう。しかし一般にサイリスタの耐圧が増加すれば接合を構成するシリコンウェハの厚さが厚くなりサイリスタの構造上不利となり順電圧降下が大きくなる。これを改善するためにライフタイムを大きくするように製作上注意がはられる。このようにサイリスタ製作上種々改善を加え高性能素子の開発が行なわれているが, 結局耐圧の向上は順電圧降下の増大, ターンオフタイムの増大, 残留蓄積キャリアの増大, 点弧に要するゲート電力の増大ということをとらなう。これら諸量の増大は変換装置の構成上または実用上望ましくない。

たとえば通常サイリスタではターンオフタイム τ_{off} と耐圧の間には

$$\tau_{off} \propto V^{7/8}$$

の関係がある。

特殊のライフタイム制御を行なってターンオフタイムを短くすることも行なわれているが, 一般に高耐圧になるほどターンオフタイムの増大することは避けられない。ターンオフタイムが大きくなると逆変換運転における制御進み角 γ の最小値が大きくなり変換装置の特性において力率が悪くなるなどの不都合を生ずる。

また逆変換運転の場合には他極点弧のために順方向を阻止しているバルブにその時点で電圧変化率がかなり大きい順方向電圧が印加され, いわゆる dv/dt 点弧を生じ, 逆変換装置は転流失敗する。したがって素子の耐圧向上とともに dv/dt 耐量の増大が必要である。

素子には並列に振動防止, 順逆電圧の分担を均一にすることを目的として陽極-陰極間に C, R 直列回路を並列に接続する。点弧時この回路からの放電電流, サージアブソーバ, 整流器用変圧器から流入する電流により生ずるスイッチングパワーは素子の耐圧上昇とともに一般に大きくなる。そのためスイッチングパワー耐量, di/dt の増大を図らなければならない。

これらの理由から将来素子製作技術の格段の進展がある場合は別として, 現在または近い将来開発が完了する 3,000~4,000 V 程度が使用されるであろう。またターンオフ時間も現段階では 200~300 μs 程度で高圧水銀整流器と大差ないものとして装置の設計が進められた。

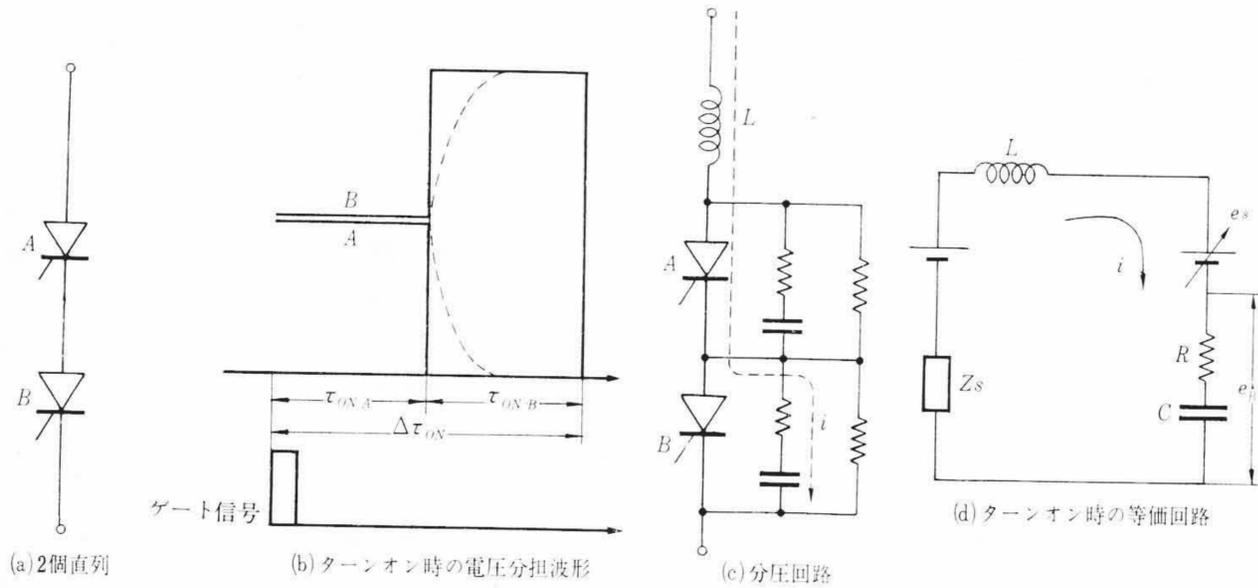


図4 サイリスタ直列時の電圧分担

2.2 直並列接続

素子の並列数は定常電流ではなく直流短絡、逆変換側の転流失敗などの故障時の電流で定まる。しかも一般にこの故障電流を順変換側のゲート制御により制御またはカットアウトする。したがって並列数を定める場合、普通いわれているサイリスタの過電流耐量により算定するのではない。いわゆるサイリスタのゲートブロック能力を考えて算定する必要がある。したがって定常の電流に対してはかなり余裕のある設計になるであろう。しかしながら単位変換装置の電圧容量から考えて500A級のサイリスタを用いる場合、問題になるほど多数の素子を並列接続することはないであろう。

直列接続においては定常時の分担は各素子に並列に接続した分圧用抵抗によりほとんど均一に分圧される。注意すべきはターンオフ時の逆電圧分担、ターンオン時の順電圧分担である。

2.2.1 ターンオン時の分担電圧

図4(a)のように2個の素子を直列に接続した場合を考える。ターンオンタイムは多少相違し、図においてBのほうがAより t_{on} だけターンオンタイムが長いとすると、A、B両素子のターンオン時の電圧は(b)のようになる。実際には素子のライズタイム期間があるので点線のように変化する。

このようにターンオンタイムの長い素子に全電圧が印加されることになる。このようにして遅れて点弧する素子は定格順阻止電圧より大きな電圧が印加され、ブレイクオーバーする。このような場合一般にスイッチングパワー過大となり素子は破壊する。これを防止するためゲートに印加する電圧を大きくし、かつその立上がりを早くして素子のディレイタイムを短くし、このばらつきを小さくする方法、素子を選択してターンオンタイムをそろえる方法も考えられる。しかしこれらの方法には限度があるので(c)のような回路構成が行なわれる。

図4においてAがターンオンしたとすると(d)のような等価回路となりBの端子電圧は $e_B = iR + 1/C \int i dt$ となる。この電圧は回路定数によって決まる。そこで $[e_B]_t = t_{on}$ を求めこの電圧を所望の値におさえるように回路定数を選定する。

このようにして電圧を計算する場合この等価回路においてさきにターンオンする素子の電圧の時間的変化の形態を直線的に下がるか、または指数関数的に下がるかなどの仮定を導入する必要がある。また図のような等価回路では、実際にはアノードリアクトルはかなり大きなものとなり、その浮遊容量を考える必要がある⁽⁴⁾。または整流器用変圧器の浮遊容量などを含めこの図で Z_s で示した電源の内部インピーダンスをいかに考えるか、

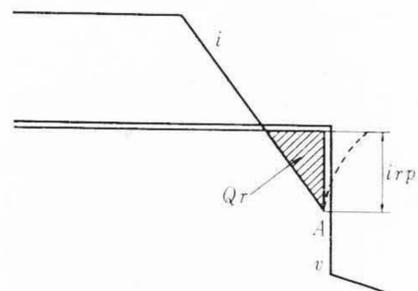


図5 転流時の電圧電流波形

ほかのアームの回路定数の影響などが問題である。この点については別の機会に報告する。

2.2.2 ターンオフ時の逆電圧分担

変換装置の転流時における素子の電圧電流は図5のように変化する。ターンオフ時逆方向に電流が流れてA点で電流が0になり逆電圧が印加される。実際には点線のように減少する。

図の逆方向の電流を回復電流 i_r (その最大値を i_{rp})、回復電流の時間積分値を残留蓄積キャリア Q_r と呼ぶ。

素子により残留蓄積キャリア Q_r が異なるためターンオフ時には直列接続した素子のうち Q_r の最小のものが逆方向阻止能力を回復する。そのため図4(a)の場合、最初に回復した素子に全逆電圧が印加される。このようなことになれば素子は破壊するであろう。

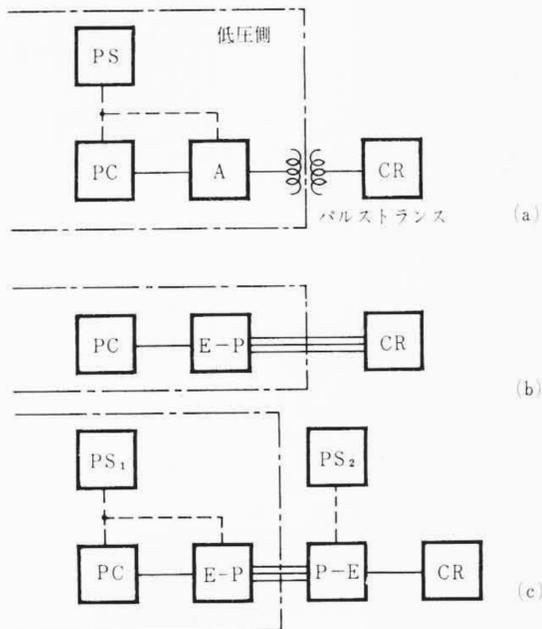
これを防ぐためターンオン時と同様図4(c)のような回路構成として逆電圧の分担を均一にする。

この逆電圧の分担についてはすでに報告した⁽²⁾ので省略するが、逆電圧分担をよくするためには Q_r のばらつき ΔQ_r 、逆電流の最大値 i_{rp} が小さいこと、図4(c)のCが大きくRが小さいことが望ましい。しかしRが小さいことはターンオン時のスイッチングパワーが大きくなるのであまり小さくできない。また素子の耐圧が大きくなるほど直列接続数が減少するので直列接続が容易になる方向に行くが、一般に Q_r が大きくなるので、そのばらつき ΔQ_r も大きくなり、直列接続を困難にする方向となる。このように互いに装置設計上逆行するパラメータが多いのでこの間の協調をとることが必要となる。

2.3 点弧回路

サイリスタ高圧変換装置に点弧パルス印加する場合、制御信号発生回路と各サイリスタとの間は高電圧の絶縁をする必要がある。そこでこの信号伝達方法としては図6のように

(a) 制御信号をパルストランスを介してサイリスタに加え、信



PS : 電源, A : 増幅器, E-P : 電気→光変換器
P-E : 光→電気変換器, CR : サイリスタ

図6 ゲート点弧パルス伝達方式

号回路との絶縁をパルストランスで行なう。

- (b) 光で応動するサイリスタでパルスを構成し電気信号を光に変換し、光をサイリスタに加えて点弧する。この場合絶縁は光の通路で行なわれる。
- (c) 電気信号を光、電磁波などに変換し、これを空間またはオプティカルファイバーのような光伝達素子により導き再び電気信号に変換してサイリスタに印加する。

などの方法およびその組合せが考えられる。直列接続素子の点弧方法として追従点弧方式が考えられ、これを組み合わせることもできる。

(a)のように絶縁をパルストランスのみでもたせる場合は絶縁とパルスの立上がりの関係から高電圧回路では実現は困難であろう。

(b)は大容量光サイリスタの開発に困難さがあり現状ではむずかしい。したがって現在考えられる点弧方式は(c)またはその変形が最も実現の可能性が大きい。

この場合、高圧側の電気信号への変換回路（パルス増幅回路を含む）の電源 PS_2 を得る方法として図7のようなことが考えられる。

(a)は絶縁変圧器を用いるもので、(b)はパルスの陽極-陰極間電圧を利用するものである。事故などで短時間電圧が下がってもこの回路が正常に動作するために小形バッテリーを用いることが考えられる。

多数の素子を直列接続するので1個ずつすべてを図7のように構成することは回路が複雑になるのでたとえば図8のように数個のサイリスタにはパルストランスを用いる方法もある。さらに追従点弧方式を導入することも考えられるが、1個のサイリスタが点弧したことを利用して次段のサイリスタを点弧する追従点弧方式では多数の直列接続では最終段のサイリスタの点弧遅れが大きくなり過電圧が印加される。そこですでに報告した⁽³⁾図9のような回路が考えられる。 PS にはそれぞれ絶縁が必要なため前項のサイリスタの端子電圧を用いる方法が都合がよい。実験の結果によれば10個のサイリスタを0.2 μs の遅れで点弧させることができた。

2.4 制御方式、保護方式

直流送電系全体と関連する事項であるから本報では省略するが検討している事項を列挙する。

- (a) 一般に直流送電系で行なわれる定電流制御、余裕角一定制御、定電力制御などにおける検出方法および回路方式。た

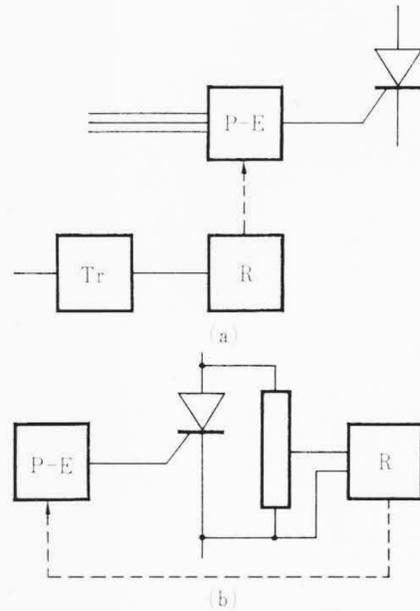


図7 ゲート点弧回路用電源の取り方

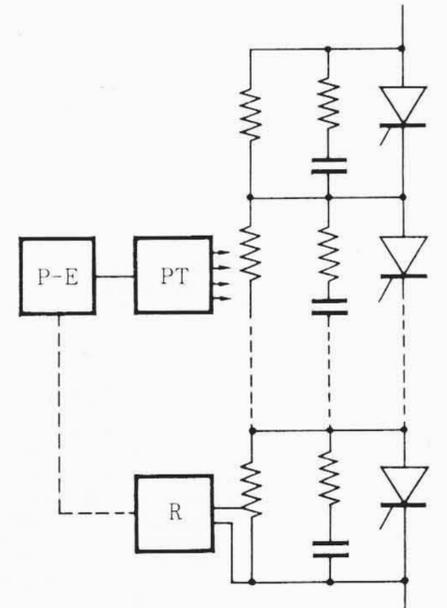
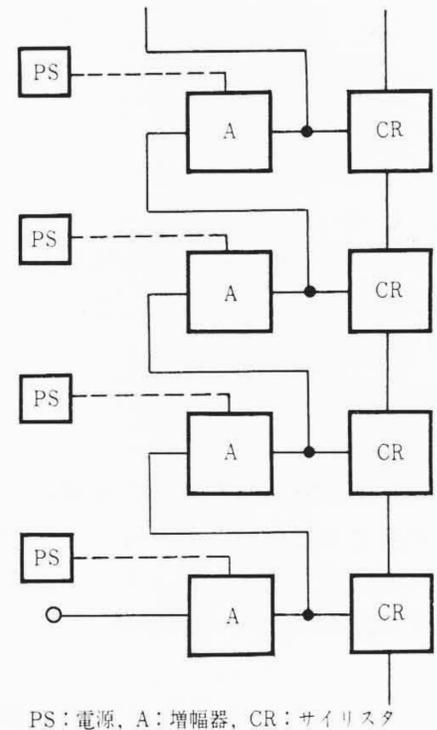


図8 パルストランスグループ方式



PS : 電源, A : 増幅器, CR : サイリスタ

図9 従属点弧の一方式

たとえば余裕角検出について考えると陽極-陰極間電圧を利用するもの、電流、電圧の波形を利用するものが考えられる。これらの方法にはそれぞれ一長一短がある。

- (b) 電流の断続時における現象は直列接続をしていることと関連して現象的には相当複雑で重要な問題である。
- (c) パルス波形の選定においては前項の電流の断続、起動時のことなどを考慮し、前節の点弧回路方式とともに総合的に考える必要がある。
- (d) 潮流の逆転を行なう場合などの制御方式およびその応答時間の決定。
- (e) 転流失敗時の制御保護方法。順変換装置のゲートブロックにより故障電流を除くことが考えられているが、この場合の短絡電流の状態を求め素子の温度上昇を知り装置の構成を決定する。したがって短絡電流の詳細な計算法と制御方式と短絡電流の関係を調べなければならない。また転流失敗などにおける検出回路も検討を要することである。
- (f) 多数の素子を直列に接続しているの、たとえ1個の素子が破壊したとしても一般に短絡状態となり直列数が1個減少したと同様で、ただちに運転に影響するようなことはない。この点がサイリスタパルスが水銀整流器の逆弧のよう

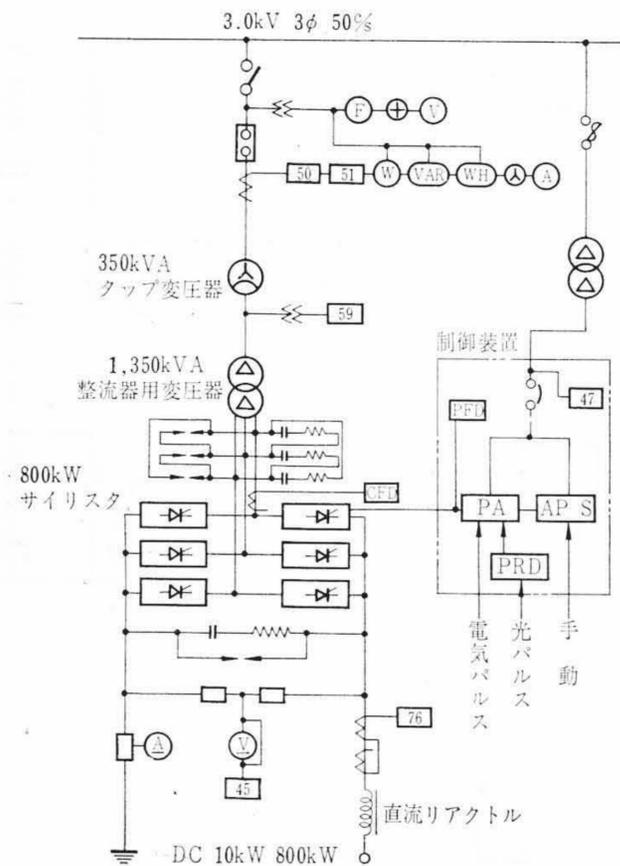


図10 10 kV 800 kW サイリスタ単線接続図

な現象にはならないといわれているゆえんである。しかし破壊素子は早い機会に交換する必要がある。そのため素子破壊を検出、表示する。そのほか各部の故障検出方法。

(g) サージ電圧抑制

2.5 その他

保守点検や故障した素子があった場合の交換点も考慮して変換装置の構造、冷却方式などを考えるべきである。また数十万 kW の装置数となると素子の数も数万個となり、それに付随する部品数も非常に多くなるので信頼度については十分検討を要する。

3. DC 10 kV サイリスタ変換装置

現在直流送電に用いられている水銀アークバルブのブリッジ単位の出力電圧は 100 kV ないし 150 kV である。サイリスタ超高压変換器の出力電圧の開発目標もやはりこの程度の電圧を指向することになる。われわれはその第1段階として 10 kV 800 kW サイリスタ変換器およびその付属設備一式を製作し、工業技術院電気試験所に納入した。

本装置はサイリスタを多数個直列に接続して高電圧を変換する場合の基礎的な問題点、すなわち素子の電圧分担の問題、ゲート点弧方式の問題、直列接続に伴う異常現象の問題、サイリスタの信頼性の問題そのほかの研究を主目的として製作された。図10は本装置の単線結線図である。以下にその概要を説明する。

3.1 変換装置としての仕様

本変換装置の仕様は次のとおりである。

定格変換電力	800 kW
定格直流電圧	10 kV
定格直流電流	80 A
定格交流入力電圧	3 kV 50 Hz 三相
整流方式	六相グレース結線(三相ブリッジ結線)
定格	連続

本装置は順変換運転のみならず、既設のシリコン整流器(ダイオード, 750 kW 15 kV 50 A)と組み合わせて、Back to Back 回路を構成し、逆変換運転もできるようになっており、制御率は次のとおりである。

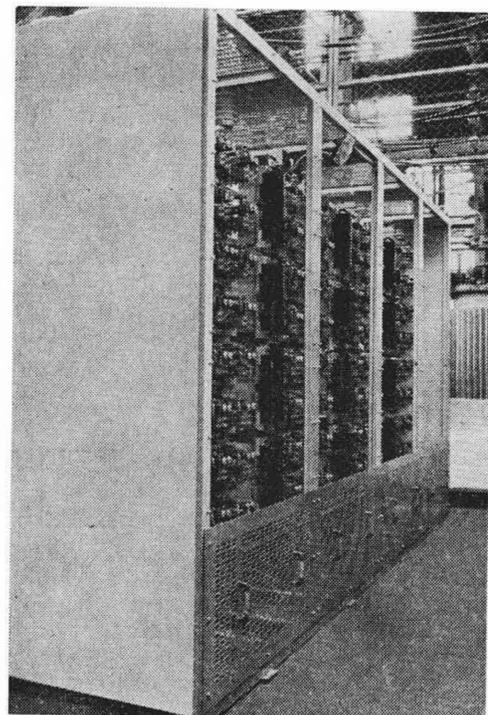


図11 10 kV サイリスタキュービクル

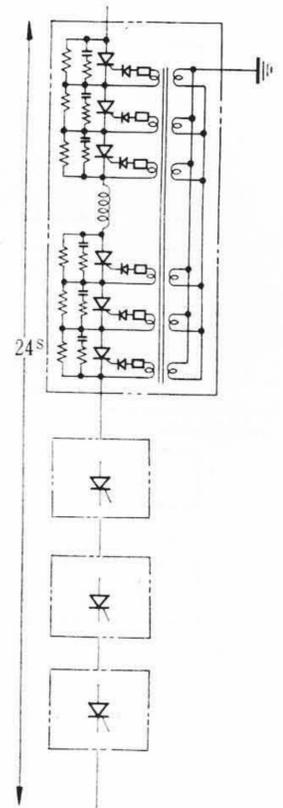


図12 サイリスタ1アームの構成

順変換運転のとき $\alpha=23^{\circ}30'$ で 10 kV DC

逆変換運転のとき $\delta=38^{\circ}$ で 10 kV DC

なお逆変換時転流失敗限界線から決まる最高直流入力電圧は定格直流電流 80 A において 11 kV 以上あるように設計されている。

3.2 サイリスタ変換器

3.1 のほかに次の仕様を有する。

定格交流入力電圧	8,690 V
冷却方式	自然空冷
サイリスタ仕様	形式 CM 02 X
定格順逆耐せん頭電圧	1,200 V
定格過渡逆耐せん頭電圧	1,350 V
定格平均順電流	150 A

構成 24 S × 1 P × 6 A

本器は三相ブリッジの正負母線に接続する 3 アームを各 1 面のキュービクルに収納し計 2 面から成っている。1 面の外観を図 11 に、変換器の基本単位である 1 アームの構成を図 12 に示す。そのおもな特長は次のとおりである。

(1) 主サイリスタは点弧時のターンオンタイムのばらつきが小さく、スイッチングパワー耐量の大きな FI 構造のサイリスタを採用し、その電圧定格は実験研究の便宜上ある程度直列数を多くする必要があるため 1,200 V に選定した。また直列数は外部雷サージおよび開閉サージなどの外部異常電圧、さらに転流時の振動電圧、断続時の振動電圧などの内部異常電圧およびサイリスタアーム内の電圧分担不平衡を十分勘案して 24 に選ばれている。1 アーム内 24 個のサイリスタのターンオンタイムのばらつき、残留蓄積キャリヤのばらつきはそれぞれ $3 \mu s$ 以下、 $100 A \mu s$ でありそれに応じて分圧回路構成部品を決定した。電流定格はある程度実規模に近い電流容量の素子を使わないと実験研究の等価性が失われるため、150 A に選定した。したがって実験設備から要する電流に対してはかなり余裕のあるものとなっている。

(2) 本装置は実験研究をその使用目的とするため、測定の容易さを考えて自然冷却とした。送風機などの冷却装置を付加すれば、容易にその出力を現在の 3~4 倍に増すことができる。

(3) 分圧回路は直流分あるいは低周波分に対する分圧抵抗 R および転流時(すなわち点弧時と消弧時)の高周波分の分圧をつかさどる分圧コンデンサ C の並列回路が各サイリスタに並列に接続さ



図13 サイリスタスタック

れている。分圧コンデンサは消弧時の Q_r のばらつきによる電圧分担不平衡を許容値内に納めるため $0.5 \mu\text{F}$ に選定されている。点弧時のスイッチングパワーを素子の許容値内に収めるため分圧コンデンサには直列に抵抗がそう入されている。その値は 10Ω である。また点弧時の電流上昇率 di/dt の抑制およびディレイタイムのばらつきによる分担不平衡電圧上昇分を吸収する目的で素子 6S に対し 1 個ずつ陽極リアクトルが接続されている。1 アーム内の浮遊容量分布の相違による電圧分担不平衡を考慮して陽極リアクトルは 4 個所に対称に分配されている。これらのリアクトルはその固有共振周波数をサイリスタターンオンタイム相等値よりはるかに高くなるよう設計した。1 個のリアクトルのインダクタンスは $230 \mu\text{H}$ である。サイリスタスタックを図 13 に示す。

なお分圧回路部品は実験研究にフレキシビリティを持たせるため必要員数の 2 倍を同一スタックに常時取り付け、接続変更によりそれぞれの回路定数を 1, 2, 4 の比で変更できるようになっている。

(4) ゲート点弧回路 その詳細は後節にゆずるが、現時点では従属点弧方式には種々の困難があるため、パルストランスにより全直列サイリスタにいっせいにパルスを送給する独立点弧方式を採用した。パルスの立上がりは素子のディレイタイムに影響するため本装置では 24S 間のばらつきも含めて $1.0 \mu\text{s}$ 以内に収めてある。また高電圧静電誘導ノイズに対しても万全の対策が施されている。

3.3 変換器用変圧器および電圧調整用単巻変圧器

それぞれの仕様は次のとおりである。

整流器用変圧器	形式	SUCR-3C
	容量	1,350 kVA
	一次電圧	3.6/3.3/3.0/2.7 kV
	二次電圧	13.65 kV
単巻変圧器	形式	SOB-3AYC
	自己容量	350 kVA
	線路容量	1,400 kVA
	一次電圧	3 kV
	二次電圧	3~0.3 kV 等間隔10タップ

これらの変圧器のタップの選定により変換器の理論無負荷電圧は、11,720 V から 1,535 V まで 25 段階にわたり変えることができ、試運転調整時の便宜を与えている。

3.4 直流リアクトル

次の 2 種類の直流リアクトルが設備されている。

- (a) 空心リアクトル 0.75 H 80 A 12.5 kV
- (b) 鉄心入りリアクトル 0.5/1.0H 40/20 A 50/25 kV

ちなみに変換器の断続限界直流電流は (a) のリアクトルを使用した場合、定格交流入力電圧および点弧制御角 $\alpha \approx 90^\circ$ で約 7% である。

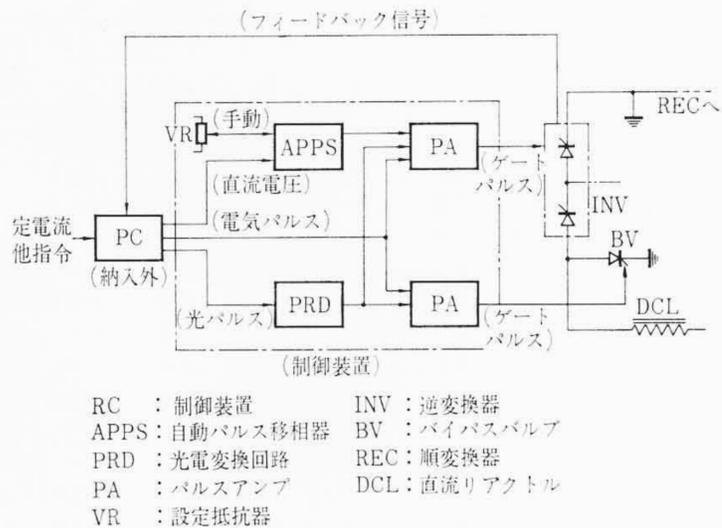


図14 制御ブロック図

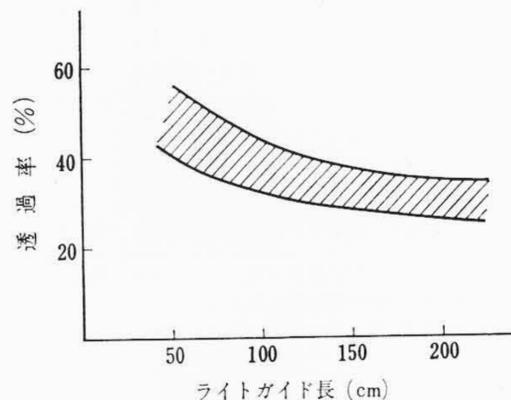


図15 ライトガイドの光透過率

3.5 振動電圧吸収回路

変換器用変圧器およびサイリスタキュービクルなどの分布浮遊容量と漏えいインダクタンスで形成される振動回路により変換器各アームの転流動作時に内部異常振動電圧が発生するが、これを吸収低減するために一般には高電圧バルブの陽極陰極間にコンデンサと抵抗の直列回路から成るバルブダンピング回路が接続される。本装置では外部からの異常電圧を吸収する AC サージアブソーバによりこの作用を兼用させている。また直流電流断続時にサイリスタの分圧コンデンサと直流リアクトルで形成される振動回路により発生する異常振動電圧を吸収低減するために直流側にも振動抑制回路を接続している。一般には変換器の交流側の漏えいインダクタンスと直流リアクトルはその値が大幅に異なるため、前記 2 種類の振動電圧をバルブに並列に接続されたバルブダンピング回路のみで吸収抑制することは困難である。

3.6 制御装置

本制御装置は将来の超高圧用変換器を想定して種々の制御信号により制御できるようにしてある。図 14 は位相制御方式のブロック図である。本制御装置のおもな特長は次のとおりである。

(1) 光制御方式の併用：将来の高圧変換装置は絶縁上の見地から光制御方式が使用されるものと考えられる。このため本制御装置では光信号をライトガイドで受け、光電変換回路を通してサイリスタのゲートパルスを発生させる方式を採用し、切換えによって使用できるようになっている。ライトガイドはガラス繊維よりなり、これを透過する光はある一定の減衰を受けるので、光電変換回路はこの条件を十分考慮して設計した。図 15 はライトチューブの光の透過率の一例を示したものである。

(2) 高圧パルストランスの採用：主回路と制御装置間の絶縁のために 10 kV 用のパルストランスを開発し使用した。一般にパルストランスは絶縁と出力パルスの立上がりしゅん度は互いに相反する方向にあるが、本パルストランスには特殊遊星配置のシリ

表 2 電 圧 分 担 不 平 衡 率

エレメント位置	U P			V P			W P			U N			V N			W N		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	—	-2.5	2.7	—	-9.0	4.5	—	0	3.3	—	+3.5	5.4	+22.0	+2.5	8.0	—	+8.0	5.5
2	—	+7.0	2.7	—	+1.0	4.5	+4.5	0	4.8	—	-1.5	5.6	+1.5	+2.5	7.0	—	+8.0	3.4
3	—	+12.0	2.9	—	-4.0	3.5	+13.5	0	4.7	+12.5	-6.5	6.4	+1.5	+2.5	7.0	—	+8.0	4.0
4	—	-7.5	3.0	—	+1.0	4.5	—	+4.5	2.7	—	-1.5	5.2	—	+2.5	7.1	—	-5.5	5.4
5	—	+2.0	3.0	—	+1.0	4.0	—	0	3.4	—	+3.5	5.4	+1.5	-7.0	7.3	—	-14.5	5.5
6	—	+2.0	3.0	—	+1.0	4.0	+9.0	-4.5	4.5	+7.0	+8.5	5.6	+1.5	+2.5	7.2	—	-1.0	3.3
7	—	+2.0	2.9	—	+11.0	4.0	—	0	4.5	+7.0	-1.5	5.9	+1.5	-11.5	7.3	—	+8.0	3.6
8	—	+2.0	3.7	—	+6.0	4.4	—	0	3.4	—	+8.5	5.7	+12.0	-2.5	7.5	—	+3.5	2.5
9	—	-2.5	3.6	—	-9.0	4.0	+9.0	-4.5	4.5	—	+8.5	5.5	+12.0	-2.5	7.9	+16.5	-1.0	6.5
10	—	+7.0	3.6	+7.0	-9.0	4.8	—	-9.0	3.0	—	-1.5	5.6	+12.0	+7.0	7.7	+7.5	+3.5	6.5
11	—	+7.0	3.5	—	+6.0	4.0	—	+4.5	4.3	—	+3.5	5.5	+12.0	-7.0	8.0	—	+3.5	3.0
12	—	+2.0	3.6	—	+1.0	4.6	+13.5	0	5.9	—	-1.5	5.6	+17.0	-2.5	8.2	+7.5	-1.0	5.9
13	—	+7.0	3.1	—	-4.0	4.2	+18.0	0	5.6	—	+3.5	5.5	+17.0	+7.0	8.7	+7.5	-1.0	6.5
14	—	+2.0	3.8	—	+1.0	4.7	+13.5	0	4.6	—	-1.5	5.8	+22.0	+2.5	8.8	+21.0	-1.0	6.9
15	—	-2.5	2.6	—	+11.0	4.6	—	0	5.3	—	-6.5	3.0	+17.0	+2.5	9.1	—	+3.5	5.5
16	—	-2.5	3.1	—	-4.0	4.0	—	0	3.1	—	-1.5	6.0	+7.0	-2.5	9.2	—	-5.5	5.1
17	5.5	+2.0	3.9	—	-4.0	4.4	—	-9.0	2.7	+7.0	-1.5	6.0	—	-2.5	9.6	+12.0	+3.5	6.8
18	5.5	-7.5	3.9	—	-4.0	4.5	+9.0	0	4.9	+7.0	-6.5	6.2	+22.0	+7.0	9.7	+24.0	-1.0	5.7
19	—	-7.5	3.7	+8.5	-4.0	5.1	—	0	3.8	+7.0	-1.5	6.4	—	-2.5	4.8	—	-5.5	5.0
20	7.5	-12.5	3.9	+5.5	+1.0	5.1	—	+4.5	2.9	—	-16.5	6.0	—	+2.5	3.7	+12.0	-1.0	5.6
21	—	-2.5	3.4	+4.0	+1.0	5.0	+9.0	0	5.2	+17.5	+3.5	6.6	+24.0	+7.0	9.3	+21.0	+3.5	7.1
22	5.5	-2.5	3.9	+5.5	+1.0	5.1	—	+9.0	3.2	+12.5	+3.5	6.8	—	-2.5	4.6	—	-10.0	5.5
23	—	+2.0	3.5	+5.5	+16.0	5.0	—	+9.0	4.0	—	-1.5	5.0	+12.0	-2.5	10.0	+12.0	-1.0	7.0
24	—	-7.5	3.1	11.0	-4.0	5.2	—	0	3.8	+7.0	+3.5	6.9	+24.0	-2.5	10.0	—	-10.0	4.6

備考 A: 順電圧分担不平衡率 (%) (ターンオン直後)
 B: 逆電圧分担不平衡率 (%)
 C: 点弧時間 (ターンオンタイム) (μ s)

コンゴム電線を採用し、この問題を解決している。パルストランスは二次側多巻線のものを数個並列接続して使用されているが、各パルストランスの対地分布容量、漏えいインダクタンス、サイリスタゲートまでの距離などについて十分検討を加え、サイリスタの分圧に異常のないようにした。

(3) ダブルパルス方式の採用: 種々の負荷、制御条件を検討した結果、数百 μ s 程度の幅のパルスを P, N 側アームに同時に与えるダブルパルス方式を採用した。

3.7 保護装置

本変換装置は研究用のものであるため、一般のものより過酷な使用条件を満たす必要がある。したがって次に述べる保護装置を設け万全を期した。

3.7.1 過電圧、過電流保護

開閉サージ、雷サージなどに対しては変換器の交流、直流側のバルブダンピング回路と受電端アレスタで協調をとった。なお試験用にバルブダンピング回路と並列に放電間げきを設けた。変換器の交流、直流側にはおのおの交流 (50, 51), 直流 (76) 過電流継電器を設け過負荷、短絡保護用とした。

3.7.2 その他の保護

(1) 転流失敗検出装置とバイパスバルブ: 転流失敗時はこの検出装置(CFD)により検出し、ただちにバイパスバルブにより転流の回復を試み、引き続き転流失敗が継続すれば機器を停止する。

(2) パルスアンプ故障検出装置: 本変換器のサイリスタ素子は比較的多数のため、ゲートパルスを増幅するパルスアンプを設け、かつパルスアンプ自体の故障検出装置(PFD)を設け、パルスアンプの故障時は変換器をただちに停止し、保護するようにした。

(3) 素子劣化検出装置: 変換器の各アームのサイリスタ直列数は 24 であり、この劣化検出装置 (71E) を設けた。71E は 24 個の素子を 12 個ごとの 2 グループに分け、各グループのサイリスタと分圧用インピーダンスの中間間電圧を検出する。高圧側と低圧側との絶縁のため検出電圧はネオンランプにより光に変換し、ライトガイドにより低圧側に導き補助継電器を動作させる方式とした。図 16 は検出方式を示したものである。

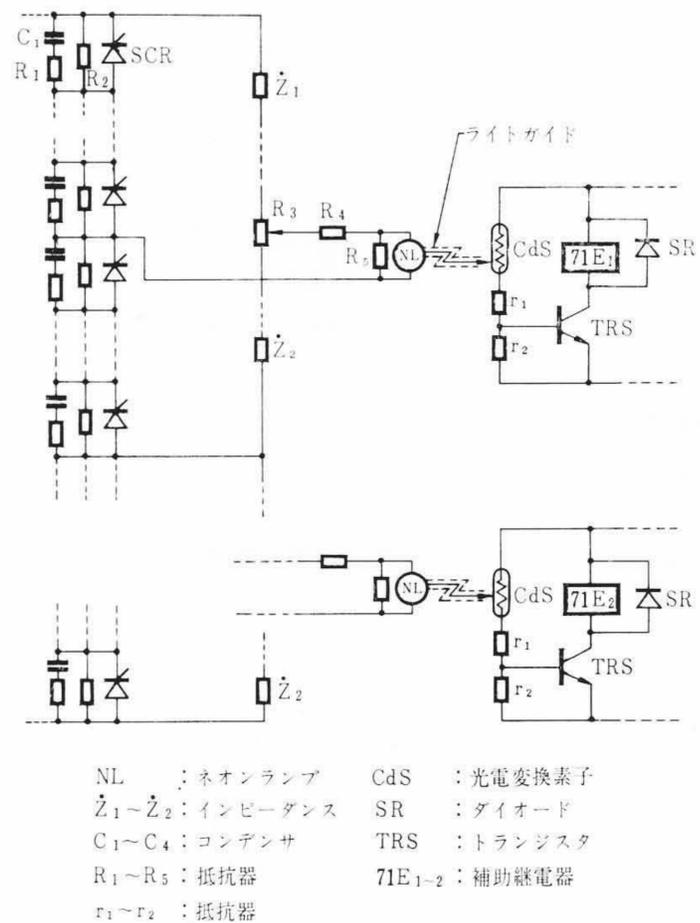


図 16 サイリスタ素子劣化検出装置

NL : ネオンランプ CdS : 光電変換素子
 $Z_1 \sim Z_2$: インピーダンス SR : ダイオード
 $C_1 \sim C_4$: コンデンサ TRS : トランジスタ
 $R_1 \sim R_5$: 抵抗器 71E₁₋₂ : 補助継電器
 $r_1 \sim r_2$: 抵抗器

3.8 その他の機器

交流受電設備はもとよりそのほかに負荷抵抗器 (20 kW 1 kV \times 10 台), 無効電力供給装置, 交流線路用リアクトルが設置され種々の実験研究の便宜を図っている。

3.9 試験結果

サイリスタは工場において、絶縁試験、低圧通電試験、温度試験、高圧印加試験などの通常の試験のほかに、定格交流入力電圧 8,690 V, 直流電流 10 A, 制御角約 90 度で零力率負荷試験を行ない 6 アームのすべての素子の順および逆方向電圧分担不平衡率を測定し、当初の設計予想どおり十分満足すべき結果を得た。表 2 は測定結果

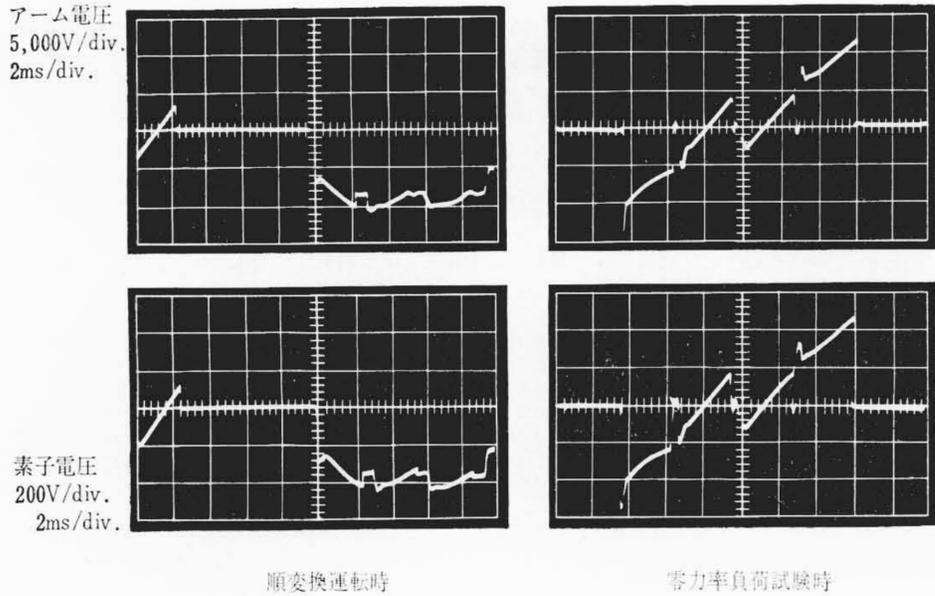


図 17 高圧負荷試験時陽極陰極間電圧

で、表中A欄の数値の記載ないものは100%電圧からただちにターンオンに移行したことを示したものである。

現地試験では交流電源投入遮断時の開閉サージ、整流器用変圧器の雷サージ移行率を測定し、サイリスタの外來サージに対する保護協調が十分取れていることを確認するとともに、変圧器二次巻線の各転流モードにおける浮遊容量および周波数特性を測定しバルブダンピング回路の定数が適正であることを再確認した。またサイリスタの順変換および逆変換運転における高圧実負荷試験を行ない動作の安定性を確認した。図17は順変換運転時および零力率負荷試験時における1アーム全体および該アームの1素子の陽極陰極間電圧波形を示したものである。サイリスタの大きな特長は水銀アークバ

ルブのような逆弧、消弧、失弧などの異常現象が全くないことであり、上記の試験により改めてこのことが再確認された。過電圧、過電流および電圧分担に対して十分な対策が施されるならば、従来の低圧用サイリスタと同様に信頼度の高い直流送電用サイリスタ変換器が得られよう。

4. 結 言

以上高電圧サイリスタ変換器の問題点、10 kV 研究設備の概要および試験結果について報告したが、本装置により高い信頼度を有する直流送電用超高圧サイリスタ変換装置の開発に対して、明るい見通しと確信を得ることができた。

今後は引き続き直流送電用サイリスタ変換装置の実用化のためにさらに高電圧のサイリスタバルブの開発および制御、保護方式の研究を推進し、わが国において一日も早く実現することを期している。

終わりに、10 kV 変換装置の製作試験に当たり、種々のご指導を賜った東京大学山田教授、工業技術院電気試験所山田前所長、日高部長、近藤室長、堀米、十川、沢田の各位ならびに終始ご指導をいただいた日立製作所日立工場毛利、浅野両部長はじめ所内関係者諸氏に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 植田, 天野, 岩田: 電気学会東京支部大会論文集 (41. 11) No. 182
- (2) 植田, 岩田, 天野: 電気4学会連合大会論文集 (42. 4) No. 740
- (3) 植田, 天野, 岩田: 電気学会東京支部大会論文集 (42. 10) No. 196



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第791407号

田 沢 卓

洗 濯 機

従来の洗濯機用パルセータは円板の上面に放射状の翼を形成したもので、翼によって洗濯物を摩擦して洗浄作用をなすものであるため布いたみが激しいという欠点があった。この考案は比較的ゆるやかな摩擦作用によって従来と同等の洗浄作用を得ようとするもので

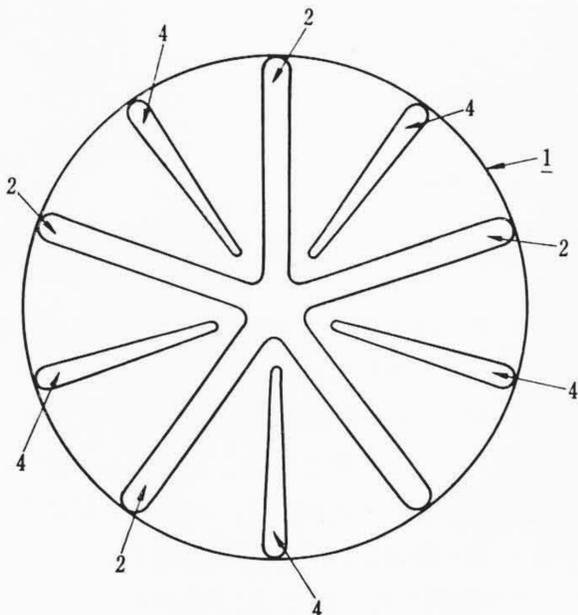


図 1

ある。すなわちパルセータ1の面上に5本の主翼2を放射状に設け、この主翼間をほぼ凹形の二次曲面で連結し、二次曲面の最低部に主翼よりも小さい補助翼4を放射状に形成したものである。

主翼2を有するパルセータでは、主翼によって作られる水流に乗って布はパルセータの中央に引き込まれ、パルセータにより摩擦されて側方に放出されるのであるが、布がパルセータ上面をおおうような状態に移動したとき、布は二次曲面の部分でこの曲面に押し付けられるため引張力を受ける。この引張力は布の織目を拡張するような作用をなすものであるが、本考案はこの状態において織目が拡張されたところを補助翼4によってこするようにしたため、ちょうど洗濯板上に洗濯布を引き伸しておいてたわしなどでこすのと同じ作用をなすので、補助翼による摩擦作用はわずかであっても織目の拡張という前提が加わっているため、著しく洗浄効果は向上するのである。したがって主翼などで布を強くこすする必要はなくなり、パルセータに与える動力は小さくても良く、布いたみの少ない洗濯機を提供することができる。(岩田)

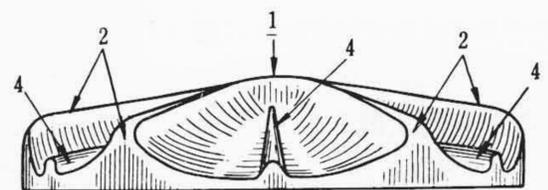


図 2