

# 250kV, 8kA直流遮断器の開発

## Development of 250kV, 8kA HVDC Breakers

技術的、経済的に多くの利点をもつ直流送電の、よりいっそうの適用拡大を目指し、定格電圧250kV、定格電流及び定格遮断電流8kAの世界最大容量の直流遮断器を開発した。

本遮断器は、逆電流挿入方式を採用し、逆電流の電源となる転流コンデンサを線路電圧で充電することにより、充電装置のいらぬ簡単な構成とした。また、在来交流機器の利用、全体をSF<sub>6</sub>ガス絶縁として信頼性の高いコンパクトな構造にしたことなどを主な特長としている。

デジタルシミュレーションにより、直流遮断器を系統に適用した場合の効果を確認するとともに、絶縁試験及び新たに開発した等価試験回路により遮断試験を行ない、それぞれの性能を検証した。

有松啓治\* Keiji Arimatsu  
徳山俊二\*\* Shunji Tokuyama  
鈴木光二\*\* Kôji Suzuki  
遠藤奎将\*\* Fumihito Endô

### 1 緒 言

直流送電は、大電力長距離送電、非同期連系、長距離ケーブル送電などに大きな特長をもち、近年増加の一途をたどっている。これに適用する直流遮断器の研究、開発は各機関で行なわれているが、現在まで直流送電系統の本線に直流遮断器が適用され、運転している例はない。これは、信頼性のある大容量直流遮断器の実用化が遅れていたことが大きな原因である。直流遮断器を系統に適用することにより、系統構成及び系統運用の自由度、系統の信頼度などを著しく向上でき、これにより技術的、経済的に多くの利点をもつ直流送電の適用はよりいっそう拡大することが期待できる。

このような観点から、実用規模のプロトタイプ直流遮断器を開発した。

ただし、直流遮断器の開発に当たっては、次に示す課題を解決しなければならない。

- (1) 直流電流には電流零点がないので、遮断のためなんらかの方法で電流零点を発生させること。
- (2) 大きなインダクタンスを含む回路を遮断するので、過電圧の抑制、回路に残留した電気エネルギーを吸収処理する

こと。

- (3) 直流大電流の遮断性能を検証するための等価試験回路を開発すること。

これらの課題に対処するため、以下の章に述べる技術開発を行ない、実用規模の直流遮断器を開発した。

### 2 直流遮断器の適用効果

#### 2.1 直流遮断器の適用系統

直流遮断器は適用する系統の構成、運用などによってその仕様は大きく異なる。今回開発した直流遮断器はUHV直流送電用として計画されている双極2回線系統への適用を想定している。

図1にUHV双極2回線直流送電系統を示す。直流遮断器は送電線路の両端に設置され、線路の地絡事故除去あるいは線路の切換えなどに利用される。系統の定格電圧500kV、定格電流5,000A、送電容量10GWと考え、この系統に適用する直流遮断器の仕様は、定格電圧500kV、遮断電流8kA ( $5,000\text{A} \times \frac{4}{3} \times 1.2$ ,  $\frac{4}{3}$ は過負荷時、1.2は余裕)と想定した。

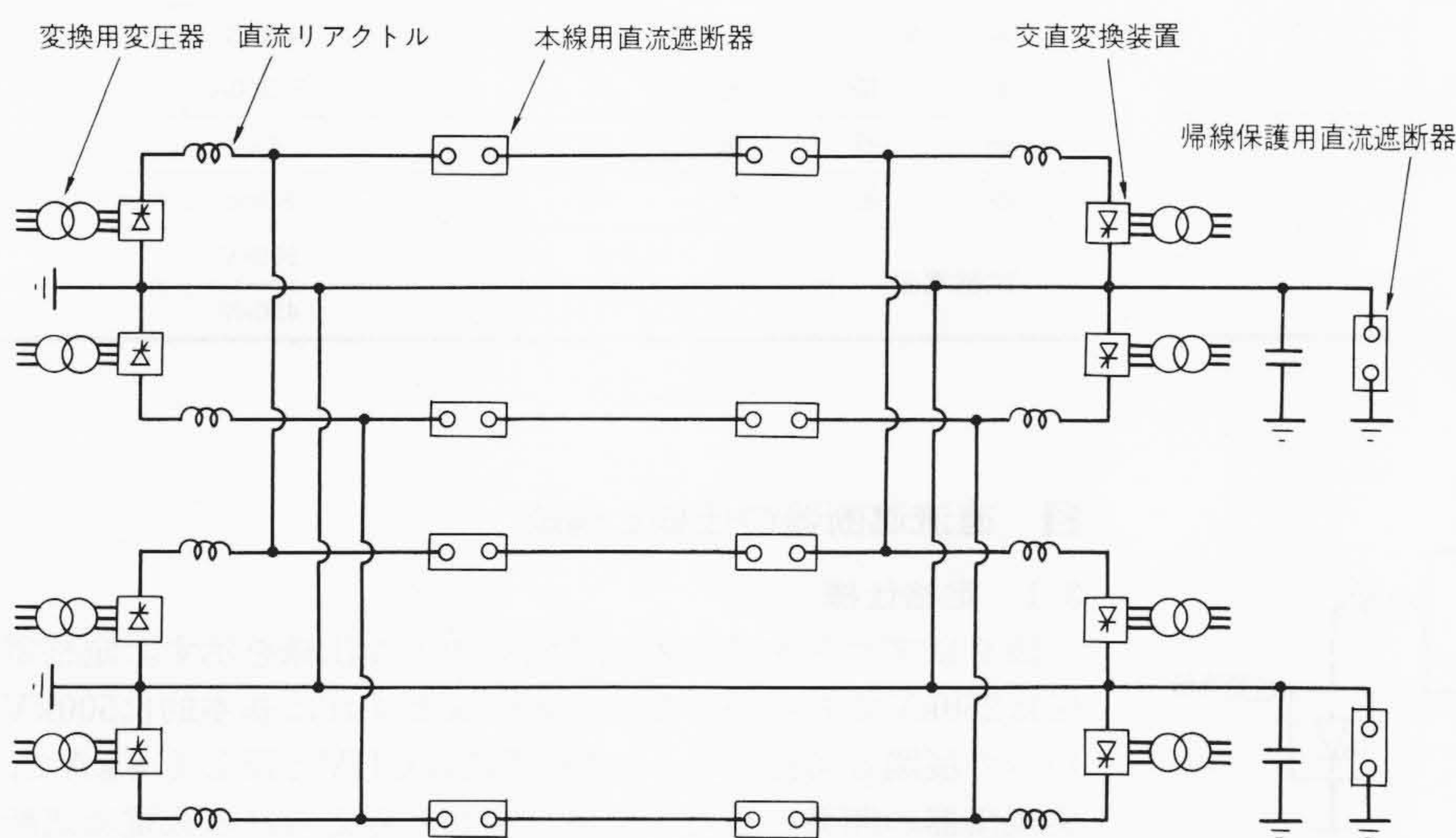


図1 直流送電系統構成 直流遮断器を適用する双極2回線直流送電系統を示す。

\* 日立製作所国分工場 \*\* 日立製作所日立研究所



2.2 直流遮断器の適用効果

直流遮断器を系統に適用した場合の効果、及び今回開発した直流遮断器が系統で所定の性能を発揮することを確認するため、遮断時のデジタルシミュレーションを行なった。

表1に解析条件を、図2に解析に用いたモデル系統を示す。線路電圧500kV、通電電流5,000A、線路長780km、順変換器は定電流制御、逆変換器は定余裕角制御を含む定電圧制御を設定した。直流遮断器は遮断電流8kA、サージアブソーバの制限電圧800kV(500kV×1.6)で、遮断原理は開発した直流遮断器と同一である。

解析結果の一例として、図3に1線地絡時の地絡除去の場合を示す。地絡点は図2に示すように線路の中央である。

- シミュレーション結果から以下の点が明らかとなった。
- (1) 開発した直流遮断器は、支障なく地絡を除去でき、事故後150ms程度で系統は安定な状態に回復する。
  - (2) 事故発生後、順変換器側電流は増加するが、定電流制御により直流遮断器が動作する前に定格電流程度に復帰する。
  - (3) 直流遮断器を系統に適用せず、変換器制御と高速断路器との組合せで同様の事故除去を行なった場合(1,000ms)と比較して、事故除去時間は格段に短く、直流遮断器適用の効果が大きいことが分かる。

表1 解析条件 解析モデルについて、デジタルシミュレーションを行なった条件を示す。

| No. | 回線数 | 直流遮断器<br>動作責務 | 遮断条件           | 地 絡 点 | 両端直流遮断器<br>の動作時間差 |
|-----|-----|---------------|----------------|-------|-------------------|
| 1   | 2   | 遮断            | 系統切換           | ——    | 同時                |
| 2   |     |               |                |       | 逆変換器端<br>10ms遅れ   |
| 3   |     |               |                |       | 順変換器端<br>10ms遅れ   |
| 4   |     |               | 地絡除去           | 中央    | 同時                |
| 5   |     |               |                |       | 逆変換器端<br>10ms遅れ   |
| 6   |     |               |                |       | 順変換器端<br>10ms遅れ   |
| 7   |     | 高速再閉路遮断       | 地絡除去<br>(永久地絡) | 順変換器端 | 同時                |
| 8   |     |               |                | 中央    |                   |
| 9   |     |               |                | 逆変換器端 |                   |
| 10  | 1   | 遮断            | 系統切換           | ——    | 同時                |
| 11  |     |               | 地絡除去           | 中央    |                   |
| 12  |     | 高速再閉路遮断       | 地絡除去<br>(永久地絡) |       |                   |

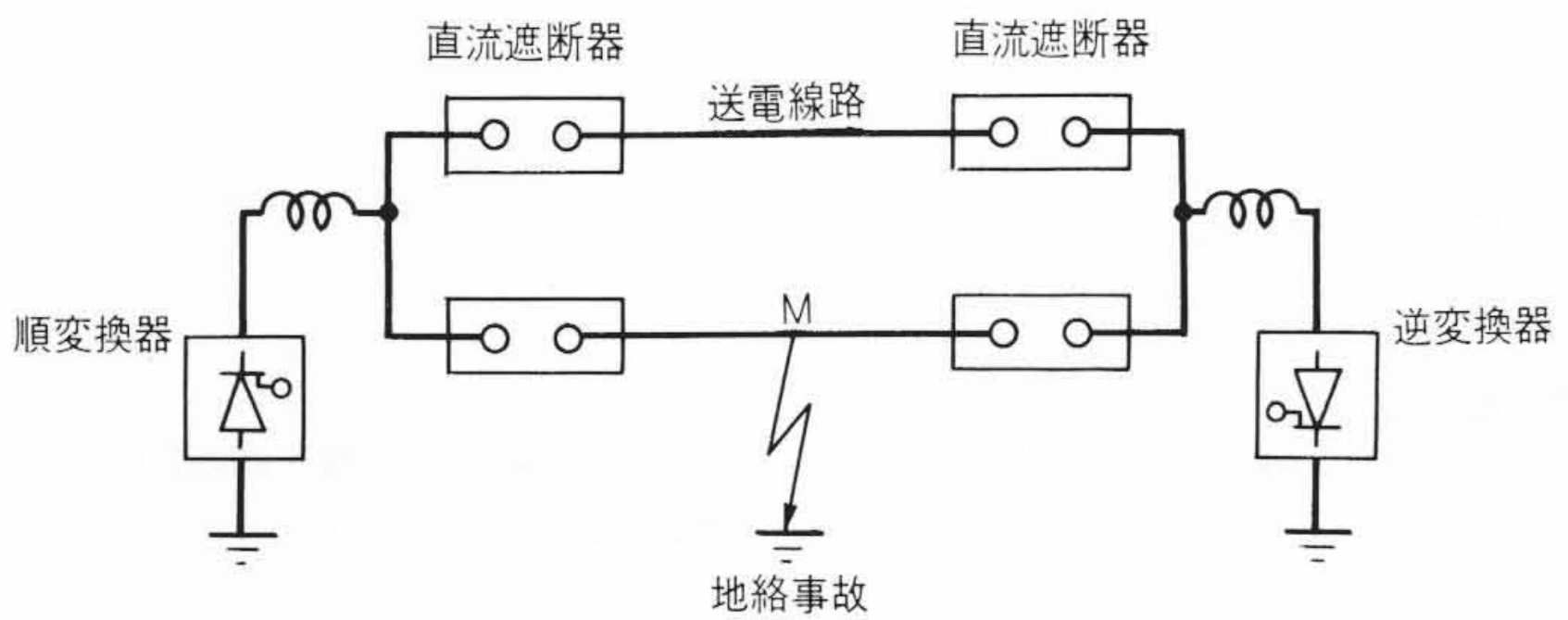
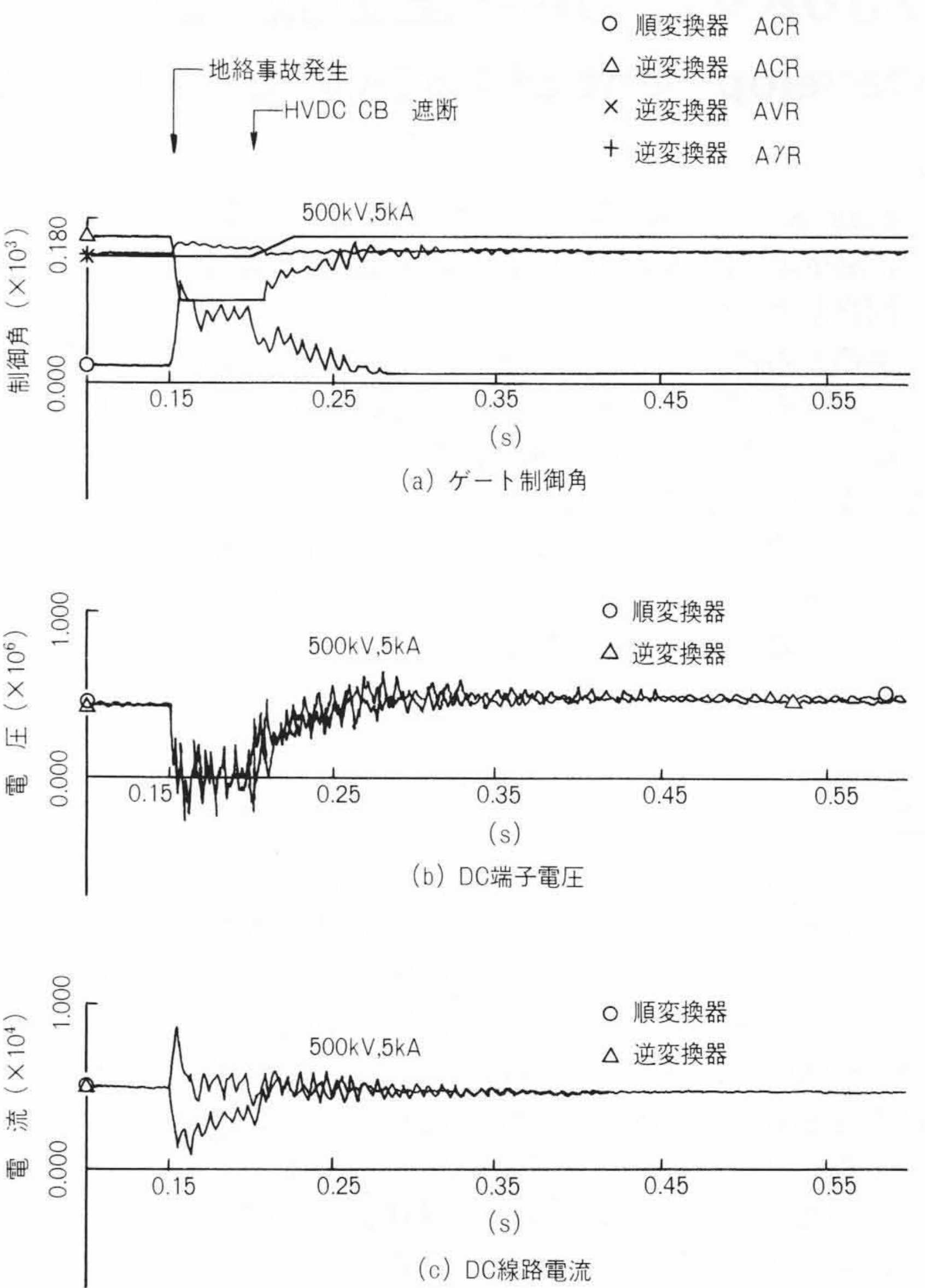


図2 解析モデル 直流遮断器を適用した効果を確認するための解析モデルを示す。



注：略語説明 ACR(定電流制御), AVR(定電圧制御), AYR(定余裕角制御)

図3 計算結果の例 1線地絡時のデジタルシミュレーション結果を示す。

表2 直流遮断器の主な仕様 開発したプロトタイプ直流遮断器の主な定格、仕様を示す。

| 項 目         |        | 仕 様    |
|-------------|--------|--------|
| 定 格 電 圧     |        | 250kV  |
| 過 渡 回 復 電 圧 |        | 400kV  |
| 定 格 電 流     |        | 5,000A |
| 遮 断 電 流     |        | 8 kA   |
| 遮 断 時 間     |        | 50ms   |
| 試験電圧        | 雷インパルス | 900kV  |
|             | DC     | 450kV  |

3 直流遮断器の仕様と構成

3.1 定格仕様

表2にプロトタイプ直流遮断器の主な仕様を示す。定格電圧は250kVであるが、2基直列構成とすれば基本的に500kV用への展開も可能である。遮断電流はUHVと同じく8kAで、実規模器の開発に当たって最も問題と考えられる大電流遮断性能の検証を行なうこととした。遮断直後の過渡回復電圧(サージアブソーバの制限電圧に相当)は、高いほど遮断後の残留エネルギー処理時間は短くなるが、系統及び機器自身の絶縁



上からは低いほうが望ましい。

ここでは、従来から提唱されている1.6puを採用し、400kVとした。

### 3.2 遮断方式

直流に電流零点を発生させる方法には、自励振動方式と逆電流挿入方式があり、日立製作所ではいずれの技術も確立している。自励振動方式は、遮断部アークの負性抵抗特性と並列LC(Inductance Capacitance)との相互作用により、振幅がしだいに増加する振動電流を発生させ、これを直流に重畳させて電流零点を発生させるものである。構造が極めて簡単で、比較的小容量の遮断器には有利である。日立製作所では帰線保護用直流遮断器として実用化し、我が国で初めて北海道一本州間直流連系設備用に納入し、昭和54年以来運転を続けている。

逆電流挿入方式は、あらかじめ充電してあるコンデンサをリアクトルを介して放電し、発生した減衰振動電流を直流に重畳させて電流零点を発生させるものである。容易に大電流遮断が可能であるが、充電装置の開発、高速再閉路技術の開発など、実用化には幾つかの課題があった。今回、これらの課題を解決し、大容量遮断に比較적으로利便な逆電流挿入方式を採用して、高電圧の直流送電本線用の直流遮断器を開発した。

### 3.3 構成と動作原理

図4にプロトタイプ直流遮断器の構成を、図5にその動作シーケンスを示す。転流コンデンサは、充電抵抗を介して常時線路電圧により充電されている。遮断時には、遮断部を開放( $t_1$ )するとともに投入スイッチを投入する( $t_2$ )。転流コンデンサは転流リアクトルを介して放電し( $t_2$ )、発生した振動電流が遮断部を流れる直流電流に重畳して電流零点が発生する( $t_3$ )。遮断部電流遮断( $t_3$ )後、線路の残留電流はサージアブソーバに転流し、吸収処理される( $t_4$ )。電流遮断完了後、切換スイッチを投入( $t_5$ )し、高抵抗( $R_1$ )を短絡して転流コンデンサを急速充電し、再閉路に備える。

遮断直後の過渡回復電圧上昇率を抑制するため、遮断部に並列コンデンサを設けている。

この方式は以下の特長をもつ。

#### (1) 大電流遮断が容易

あらかじめ充電してあるコンデンサを利用するので、直流大電流を容易に遮断できる。

#### (2) 機器構成が小形

線路電圧によってコンデンサを充電するので、特別な充電装置が不要であり、再閉路のための高速度再充電も容易である。このため、機器構成を大幅に縮小することができ、遮断容量当たりの重量が従来の約 $\frac{1}{6}$ (他社比較)に低減した。

線路電圧をコンデンサの充電に利用するには、線路事故時の電圧降下によるコンデンサの放電防止、高速再閉路などの技術開発が必要で、また、その他のどのような線路状態でも遮断性能を維持できる技術が必要である。このため、優れた方式であるにもかかわらず実用化が遅れていた。

今回、高速スイッチで充電抵抗を切り換えることにより、コンデンサの放電時間は長く、充電時間は短くする方式を開発して上記の問題を解決した。また解析により、適用の対象とする系統に対しては、系統の条件にかかわらず遮断性能を維持できることを確認し、本方式の技術を確立した。

なお、遮断部、投入スイッチ、切換スイッチなどには、交流用として実績のある機器を適用し、信頼性の確保を図った。

図6に開発した直流遮断器の外形写真を、図7に外形寸法を示す。

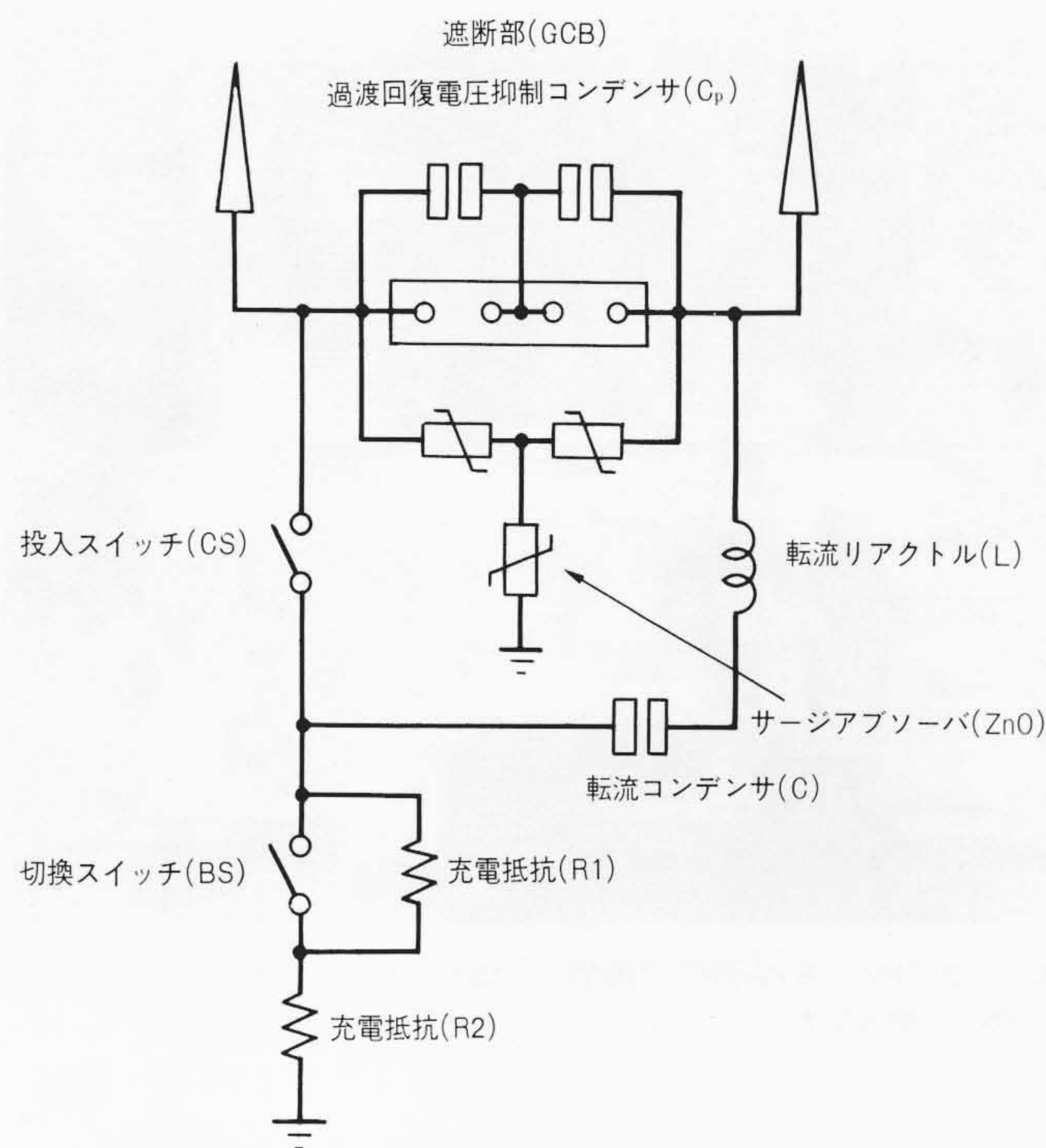


図4 直流遮断器の回路構成 開発したプロトタイプ直流遮断器の回路構成を示す。

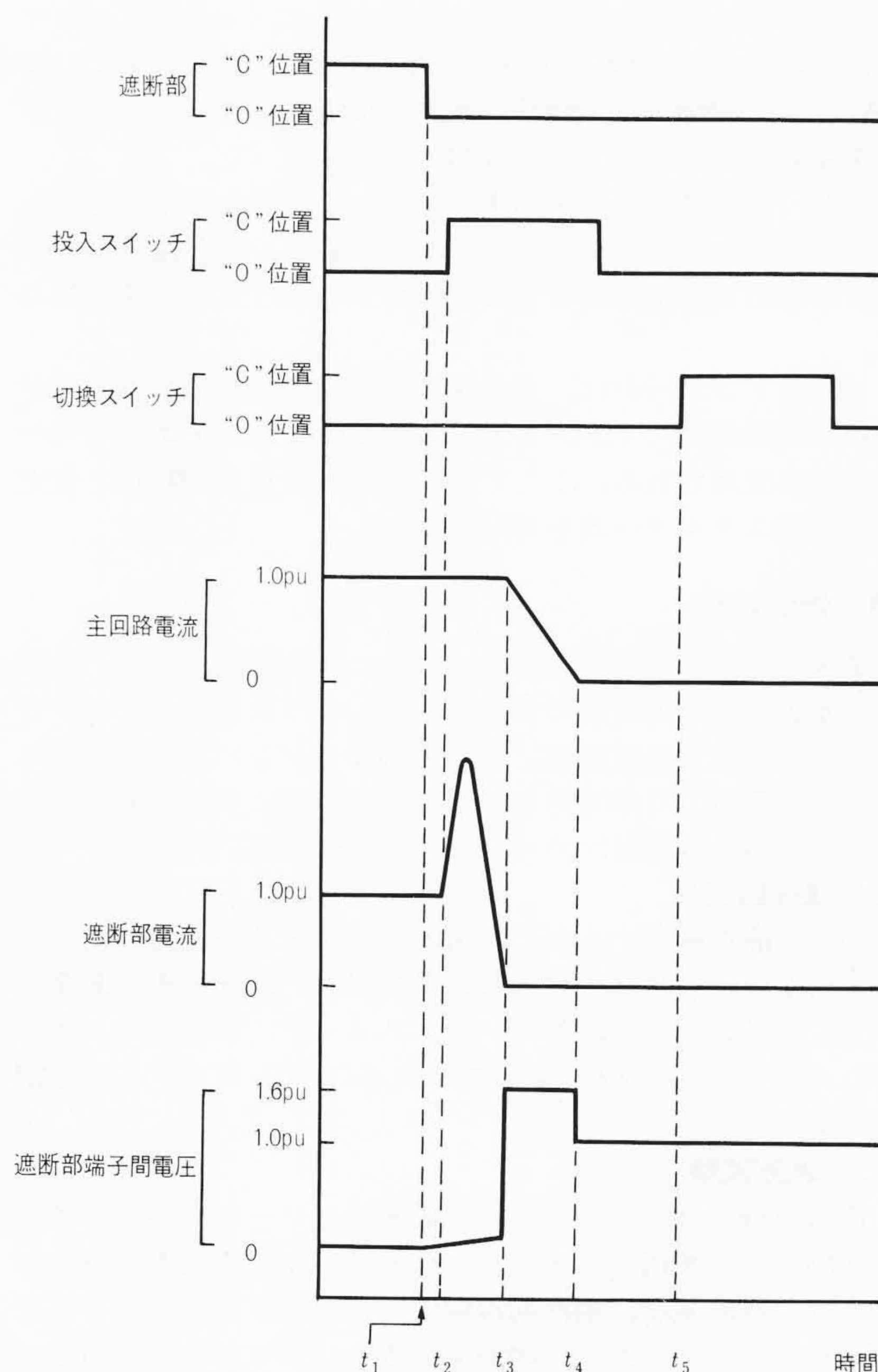


図5 遮断動作のタイムチャート 遮断時の各スイッチの動作と、それに伴う電流、電圧の変化を示す。



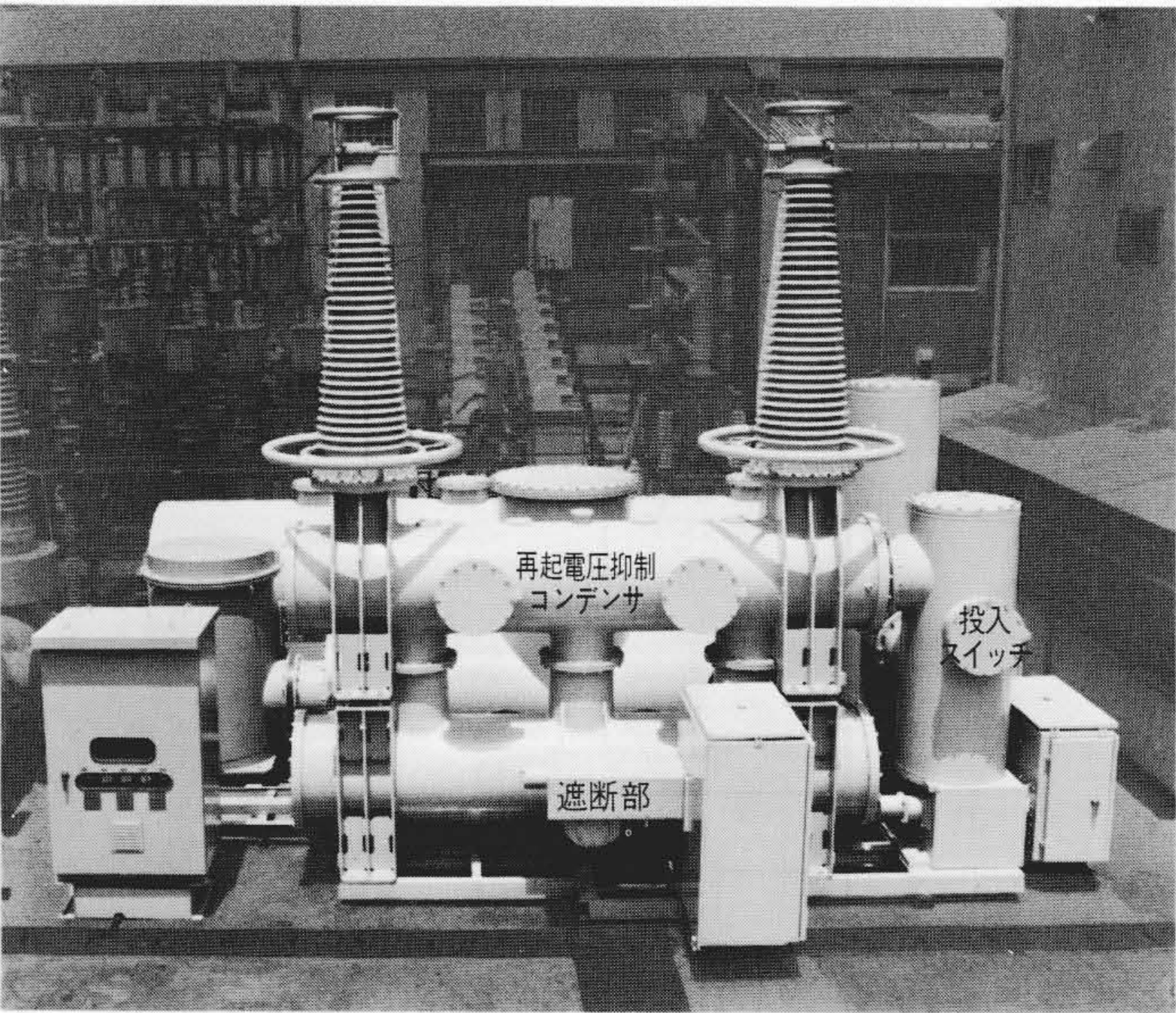


図6 250kV，8kA直流遮断器 開発した大容量のプロトタイプ直流遮断器の外観を示す。

3.4 回路定数の決定

直流に重畳させる逆電流の周波数を高くすれば、転流コンデンサ、転流リアクトルの容量を小さくできる。しかし、電流零点近傍での電流減少率( $di/dt$ )、遮断直後の過渡回復電圧上昇率( $dv/dt$ )が高くなるため、遮断しにくくなる。このため、遮断部には電流零点近傍での遮断特性の優れた362kV，63kA交流ガス遮断器を適用し、過渡回復電圧抑制用のコンデンサを並列に接続して、上記容量の低減を図った。

また、充電抵抗は、線路事故などにより線路電圧が低下した場合のコンデンサの放電時間を十分長く、再閉路責務を満足するため再充電時間を十分短くできるようにその値を選んだ。

サージアブソーバは、遮断後の過渡回復電圧の抑制、及び長距離送電線路のインダクタンスに残留した電気エネルギーの処理に使用される。ここでは、送電線路長を780kmと仮定し、処理エネルギー量を75MJとした。

4 検証試験

直流遮断器に要求される主な性能には、通電、遮断、絶縁などがあり、それぞれの性能を検証しなければならない。しかし、直流には渦電流損、表皮効果などが無いため、通電に関しては交流より楽である。ここでは、特に交流と異なる絶縁、及び遮断の性能についての検証試験結果について述べる。

4.1 絶縁試験

絶縁性能を検証するため、雷インパルス及び直流の絶縁試験を行ない、いずれも良好な結果を得た。試験結果を表3に示す。雷インパルス試験は、投入スイッチ、切換スイッチの「開」、「閉」の組合わせを変えて行なった。オシログラム例を図8に示す。

4.2 遮断試験

直流遮断試験を行なうため、従来、クローバ回路、合成試験回路などを利用してきたが、今回開発した直流遮断器に対しては、遮断電流、過渡回復電圧の両条件を満足させるには容量が不足であった。このため、図9に示す等価試験回路を新たに開発した。

図9 及び遮断試験時のオシログラムの例(図10)により試験

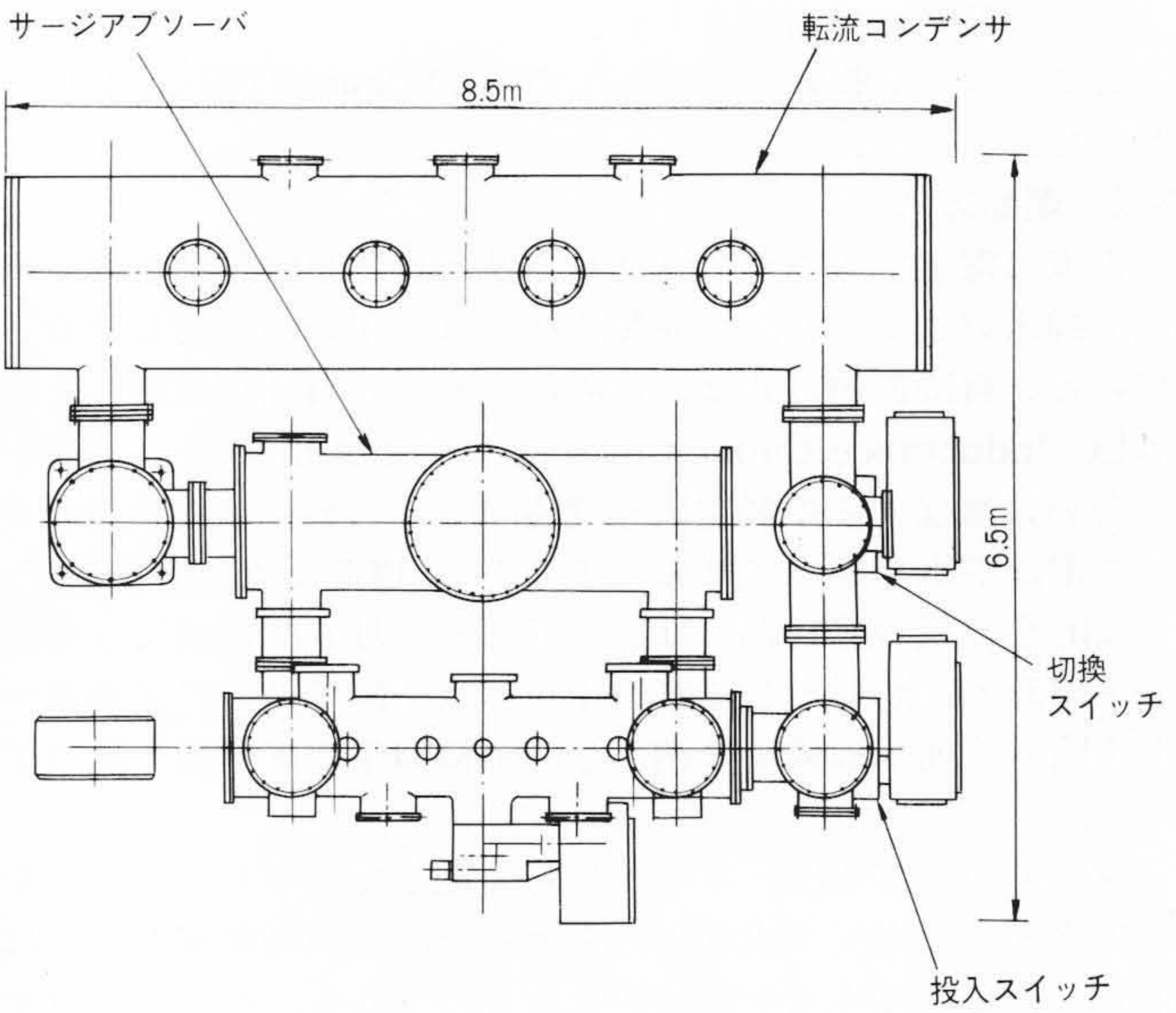


図7 直流遮断器の外形寸法 250kV，8kA直流遮断器の外形寸法を示す。

法を説明する。転流コンデンサは整流器によりあらかじめ充電しておく。発電機を低速運転しておき、低周波交流のピーク付近を直流とみなして遮断する。遮断後、直流リアクトルに残留した電気エネルギーがサージアブソーバに転流し、サージアブソーバの制限電圧で決定される過渡回復電圧が、遮断部の極間に印加される。すなわち、新たに設けた直流リアクトルが遮断直後の過渡状態で電圧を負担し、供試遮断器の極間に所定の電圧を印加することができる。

本試験回路により行なった8kA遮断時のオシログラムの例を図11に示す。最初の電流零点で直流は遮断され、遮断直後には所定の過渡回復電圧が極間に印加されて遮断成功している。

表3 絶縁試験結果 雷インパルス及び直流の絶縁試験結果を示す。

| No. | 試験条件                 | 試験電圧      | 結果 |
|-----|----------------------|-----------|----|
| 1   | 雷インパルス<br>(回路条件は4種類) | ±900kV    | 耐圧 |
| 2   | 直流                   | 450kV×45分 | 耐圧 |
|     |                      | 540kV×10分 | 耐圧 |



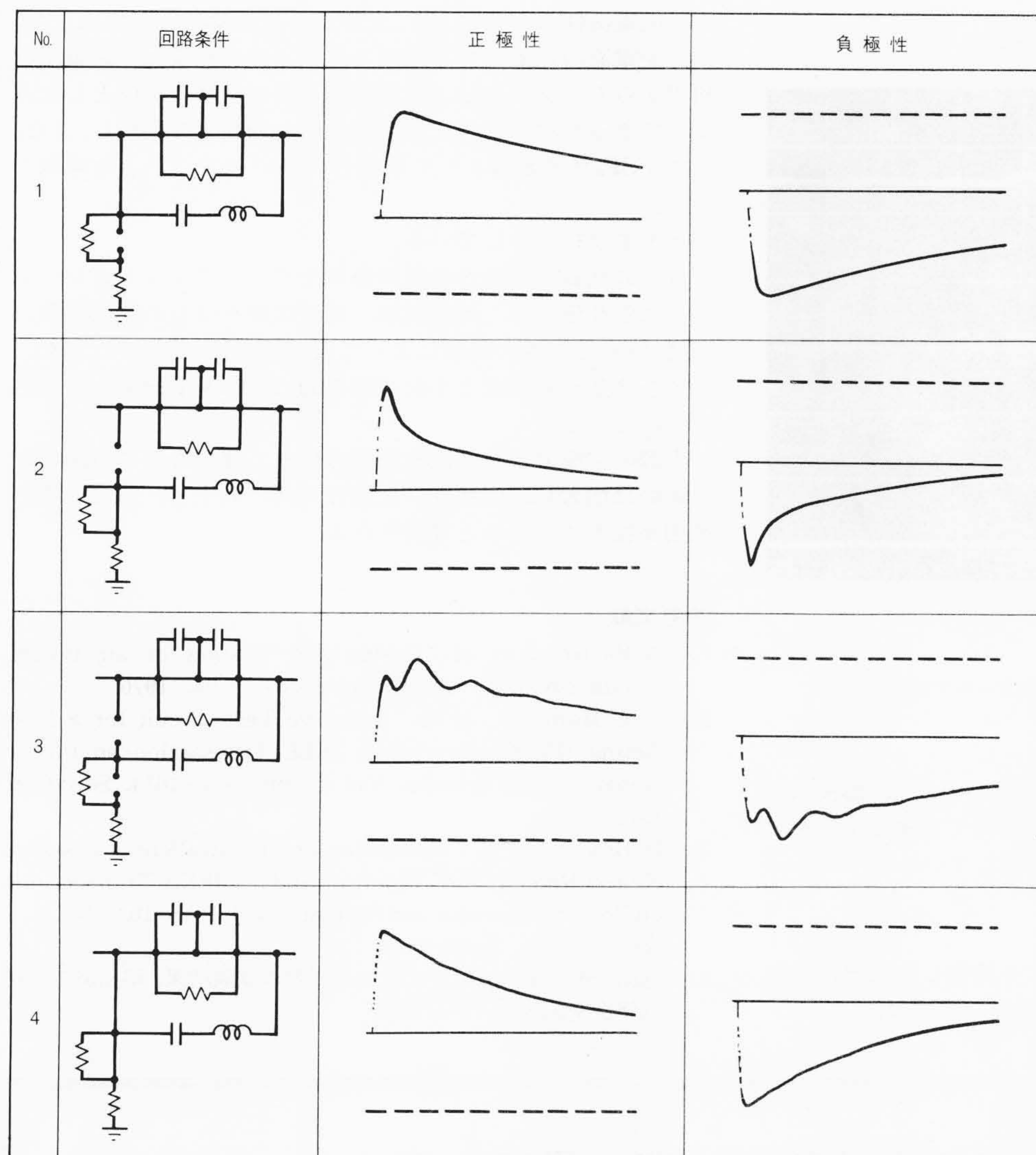
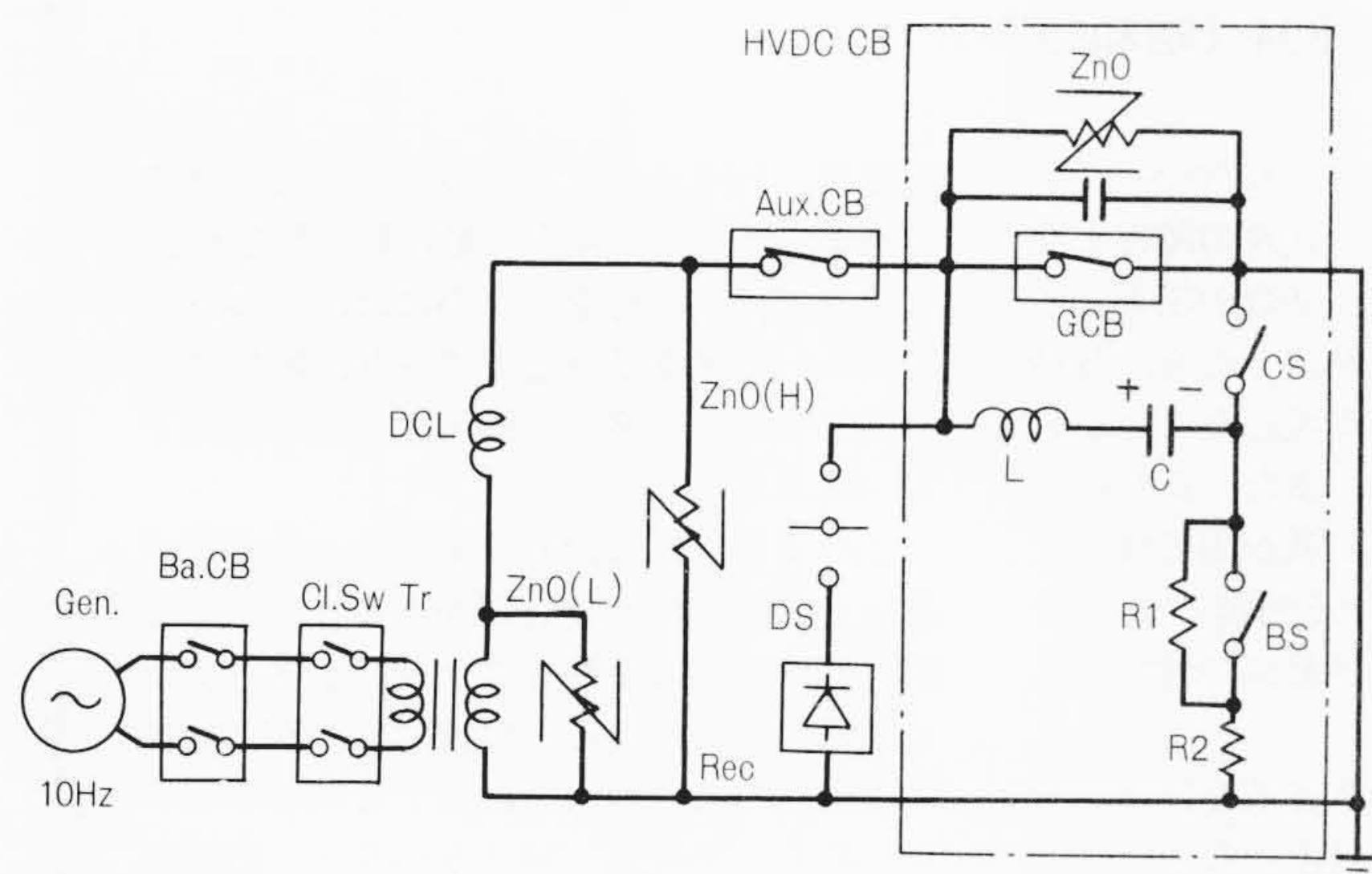


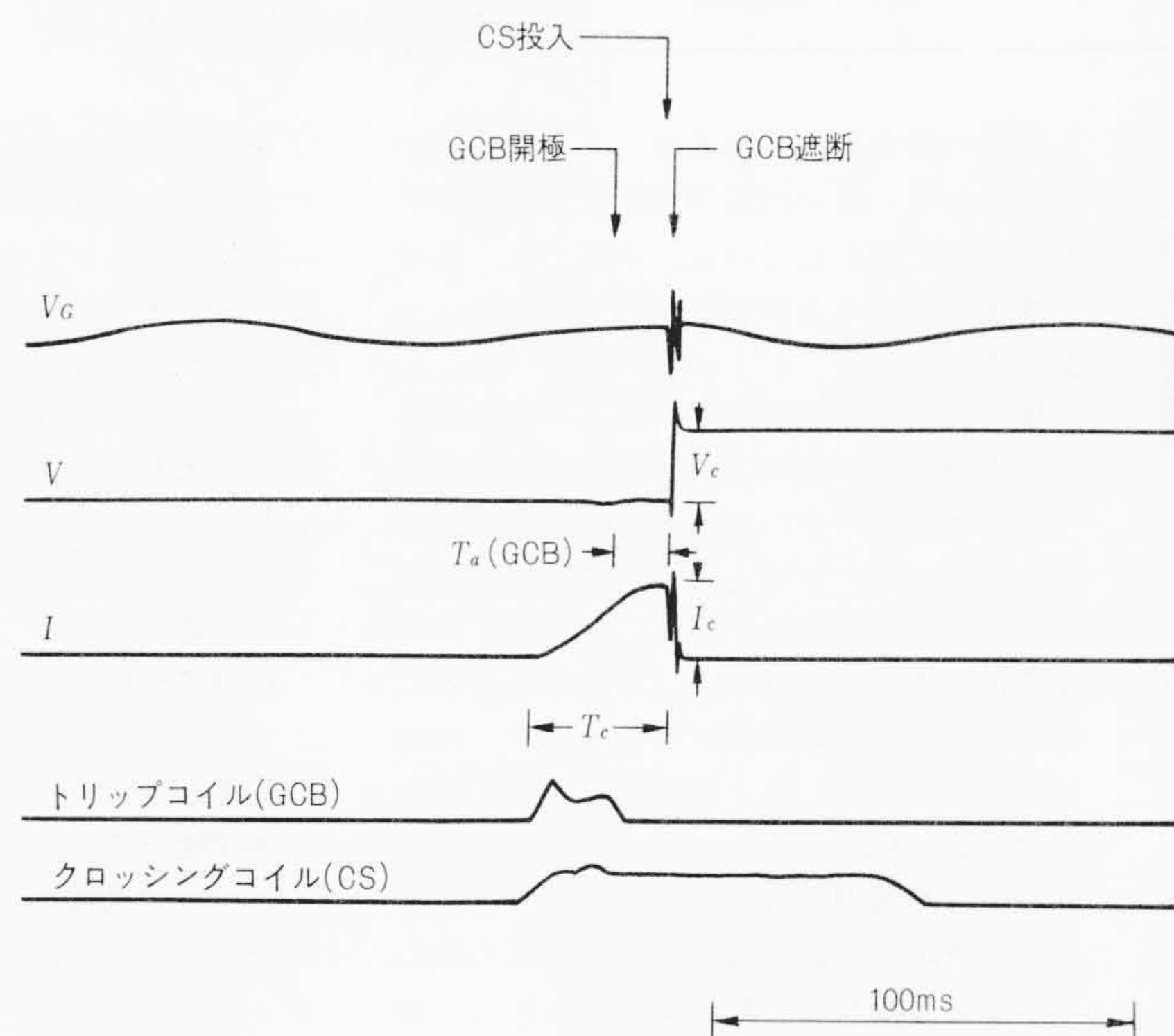
図8 雷インパルス絶縁試験オシログラム例 種々の回路条件で絶縁試験を行なったオシログラム例を示す。



注：略語説明

- |                  |                  |
|------------------|------------------|
| Gen.(短絡発電機)      | HVDC CB(供試直流遮断器) |
| Ba.CB(バックアップ遮断器) | GCB(遮断部)         |
| Cl.Sw(投入スイッチ)    | L(転流リアクトル)       |
| Tr(変圧器)          | C(転流コンデンサ)       |
| DCL(直流リアクトル)     | CS(投入スイッチ)       |
| ZnO(L) } (非線形抵抗) | ZnO(サージアブソーバ)    |
| ZnO(H) }         | BS(切換スイッチ)       |
| Aux.CB(補助遮断器)    | R1 } (充電抵抗)      |
| DS(断路器)          | R2 }             |
| Rec(整流器)         |                  |

図9 等価試験回路 遮断性能を検証したインダクティブな等価試験回路を示す。

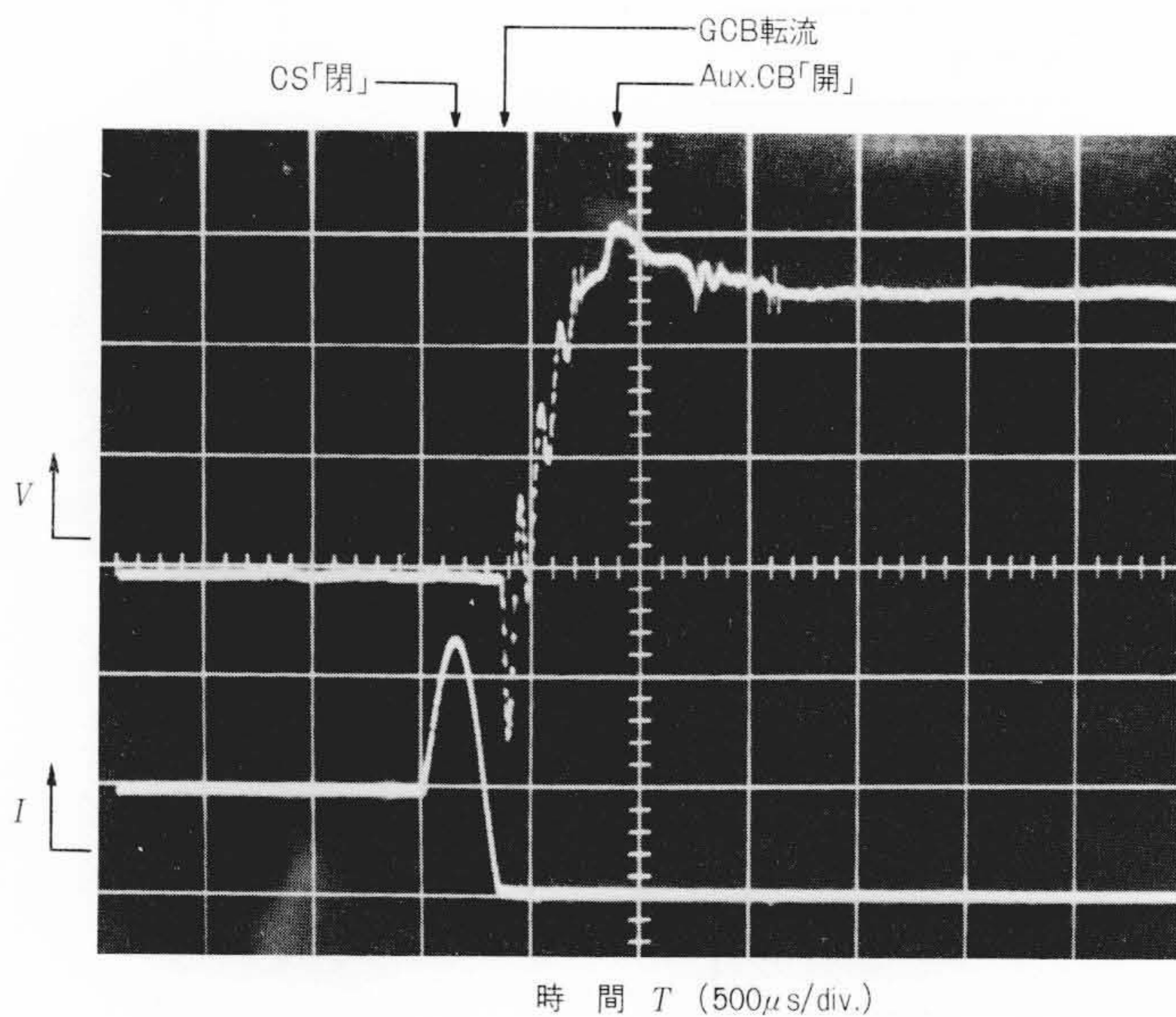


注：略語説明

- |                |              |
|----------------|--------------|
| $V_G$ (電源電圧),  | $I$ (直流電流)   |
| $V$ (GCB極間電圧), | $V_c$ (転流電圧) |

図10 遮断時のオシログラム例 オシログラム例により、等価試験回路による遮断試験法を示す。





注：略語説明 V(GCB極間電圧), I(直流電流)

図11 遮断時オシログラム 8 kA遮断時のオシログラム例を示す。

その他、高速再閉路動作あるいは各スイッチ(遮断部投入スイッチ、切換スイッチ)の機械的寿命についても検証試験を行ない、満足すべきものであることを確認している。

## 5 結 言

直流送電のよりいっそうの適用拡大を目指し、世界最大容量の250kV、8 kA直流遮断器を開発した。本器は、

- (1) 逆電流挿入方式により、大容量の直流遮断を可能にした。
- (2) 逆電流の電源となる転流コンデンサの充電に線路電圧を利用する方法を開発し、充電装置不要の簡単な構成とした。
- (3) できるだけ在来の交流機器を組み合わせて利用し、また、全体をSF<sub>6</sub>ガス絶縁として信頼性の高いコンパクトな構造とした。

などを主な特長としている。

直流遮断器の系統への適用効果をデジタルシミュレーションにより確認し、絶縁試験、遮断試験をはじめ開閉試験、温度試験、その他の試験によって実用性能を検証した。また、本器を2基直列構成とすれば基本的に500kV系統用への展開が可能である。

本器の完成により、直流系統の構成、運用などの自由度が飛躍的に増大し、信頼性、経済性が共に向上し、直流送電の適用が拡大するものと期待される。

## 参考文献

- 1) A.Ekström, et al.: Design and Testing of an HVDC Circuit Breaker, CIGRE Paper No.13-06, 1976
- 2) G.A.Hofmann, et al.: Inductive Test Circuit for a Fast Acting HVDC Interrupter, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.92, pp.1605~1614, Sep./Oct. 1973
- 3) D.Brandt, et al.: Paralleling and Deparalleling Tests on Nelson River HVDC Bipoles 1 and 2, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No. 4, pp.762~770, April 1984
- 4) 徳山, 外: 強制振動方式直流遮断器の試験結果, 昭和58年, 電気学会全国大会, No.1163

## 論文抄録

## 医用超音波診断技術の最近の動向

日立製作所 片倉景義

電気学会雑誌 104—10, 891~894 (昭和59-10)

最近の超音波診断装置は、その診断能力の向上から、種々の医学領域で診断法としての地位を確立している。本稿では、装置の構成及び基本となる技術の動向について紹介する。

超音波による診断法には以下の特長がある。(1) 通常の照射パワーが10mW程度であり、生体作用の中心は熱作用であることから安全性が高いと考えられる。(2) 生体組織と音波との相互作用が強いことから、微少な変化を抽出可能である。(3) 簡単な装置により実時間の断層撮像が可能であり、精密な診断が見落としなく可能となる。このような特長から、肺など特殊な部位以外で基本的な診断装置となっている。

超音波診断装置のなかで最も普及の進んでいる装置が断層診断装置である。この装置は、送受波器(以下、探触子と呼ぶ)により超音波を送受波し、得られた受波信号振幅を輝度変調表示する。探触子位置を移動させることにより、被観察断面の映像を得る装置である。昭和50年ごろまでは、この

ような探触子移動を手動により行なっていたことから再現性が悪く、普及の障害となっていた。しかしその後、多数の圧電素子配列を使用する電子走査装置となり、毎秒20こま程度の実時間性を実現したことから大幅に再現性が向上した。また、新しい音波ビーム形成法が主として我が国で種々考案され、大幅な分解能向上が可能となった。現在、我が国の装置が世界最高の性能をもっている。

断層診断装置はパルス状音波を使用することから、距離分解能の向上のためには、送波するパルスを短縮化する必要があるが、医用探触子では、感度低下を生ずることなく短パルス送波を可能とするため、圧電振動子と生体との機械的整合を目的とする音響インピーダンスの整合層が使用されている。この部分の設計は数値設計が広く利用されている。医用での探触子のもう一つの特色は、生体との整合性の良さから有機物圧電体の導入が進んでいる点であり、低誘電率性などの特色の最も生かされる乳腺診

断装置に利用され始めている。また、他の特色は、数百個の素子を配列する点である。高分解能撮像を行なうためには、不要振動の少ない圧電素子が必要であり、特にこの目的のためにチタン酸鉛系圧電体が開発され、利用されている。

このような断層診断装置のほかに、超音波による血液の流速計測がある。この基本は、血球運動により音波が受けるドップラー効果の利用にある。最近では、がん組織の周辺での血行増大を検出する試みなどが見られる。その他、10メガヘルツ～数ギガヘルツまでの音波が種々利用され、各種の医用情報を提供している。

最近では、病変部位の発見にとどまらず良性悪性の判定まで要求され、生体の弾性の非線形性あるいは生体中音速の病変依存性なども検討されている。今後超音波の診断能力も一段と向上し、有用性も更に増大すると考えている。