

直流送電実証研究用 10 kV, 100 A サイリスタ変換装置

Proto Type 10 kV, 100 A Thyristor Converter System

高林 乍人* 天野 比佐雄** 渡部 篤美**
 Hayato Takabayashi Hisao Amano Atsumi Watanabe
 杉本 光昭*** 川上 直衛****
 Mitsuaki Sugimoto Naoe Kawakami

要 旨

直流送電実証研究用として日立製作所に設置した 10 kV, 100 A サイリスタ変換装置の構成および諸特性の概要について述べている。

1. 緒 言

直流送電用高圧変換器としては、これまで主として水銀整流器が用いられてきたが、サイリスタによる高圧変換器を使用することについて、各国で研究が行なわれている。

日立製作所では直流送電用変換器として、昭和 41 年に 10 kV, 80 A, 3 相ブリッジ変換器⁽¹⁾⁽²⁾を、昭和 43 年には 50 kV 用バルブによる 25 kV, 40 A, 3 相半波変換器を電気試験所に納入した⁽³⁾。また、昭和 43 年より電力中央研究所との共同研究により、直流送電用制御装置の開発を行なってきた⁽⁴⁾。

一方、わが国における高圧変換装置および直流送電の計画としては機械振興協会からの補助金を受け、電力会社、電源開発株式会社、電気試験所、電力中央研究所、超高压電力研究所および東京芝浦電気株式会社、日立製作所の共同研究でサイリスタ変換装置としては世界最大の 125 kV, 300 A, 周波数変換所の試験用設備を製作中である。また、北海道一本州間の連系、高根—安曇地区における、50 Hz—60 Hz 間の連系などが検討段階にはいる。

このような内外の情勢から日立製作所では研究用の直流送電用 10 kV, 100 A, サイリスタ変換装置を設備した。ここでは、この構成および諸特性について述べる。

2. 変換装置の構成

変換装置の写真を図 1 に、また、主回路の回路構成を図 2 に示す。順、逆両変換装置は同一交流母線に接続され、Back to Back 運転をする。

これら順、逆両変換装置はおのこのサイリスタによる 3 相ブリッジ変換器 2 台を直列接続した 12 相回路で構成されている。各 3 相ブリッジ変換器の直流出力は 5 kV, 100 A である。

変圧器は $\text{Y—Y—}\Delta$ 、または $\text{Y—}\Delta—\Delta$ 結線であり、1 次—2 次間および 2 次—3 次間のインピーダンスはそれぞれ 13%, 4% である。

直流リアクトルは可飽和形であり、定格電流におけるインダクタンスは 0.4H, 10% 電流では 1H である。電源フィルタとしては 5, 7, 11, 13 調波用および高域フィルタを用いた。交流リアクトル AL_1 および AL_2 によりそれぞれ転流リアクタンスおよび交流電源のインピーダンスを可変にできる。可変範囲は 20% まで可能である。また、制御装置は電力中央研究所との共同研究で開発した制御方式を基礎にしている。

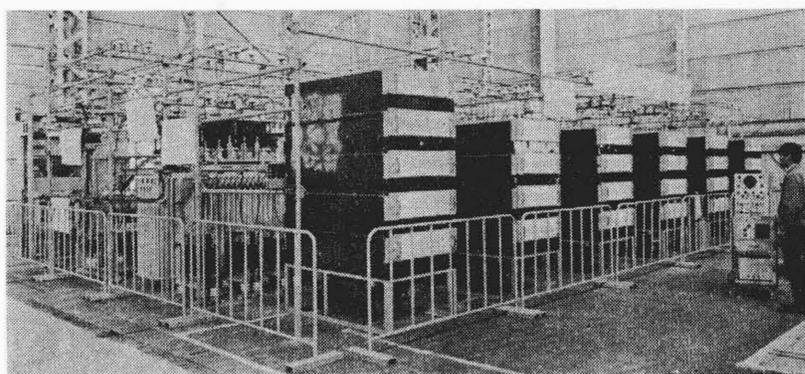


図 1 10 kV, 100 A サイリスタ変換装置

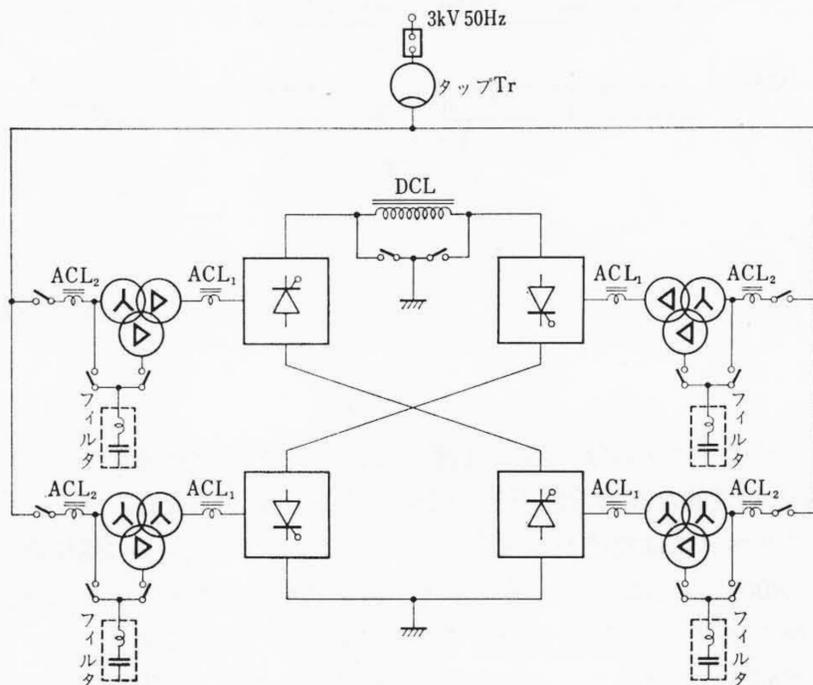


図 2 10 kV, 100 A サイリスタ変換装置の主回路の構成

表 1 サイリスタ変換器の仕様

定格変換電力	500 kW
定格直流電圧	±5 kV
定格直流電流	100 A
定格交流入力電圧	4.3 kV (50 Hz, 3相)
整流方式	3相ブリッジ結線
冷却方式	強制風冷
点弧方式	光+パルストランス方式
構成	(8S×1P)×6バルブ
サイリスタ仕様	
形式	CHO 3-S
定格順逆耐せん頭電圧	2,500 V
定格平均順電流	250 A

3. サイリスタ変換器

3.1 サイリスタ変換器としての仕様と構成

表 1 は本変換器の仕様を、図 3 はバルブの構成を示したものである。

* 日立製作所日立研究所 工学博士
 ** 日立製作所日立研究所
 *** 日立製作所大みか工場
 **** 日立製作所日立工場

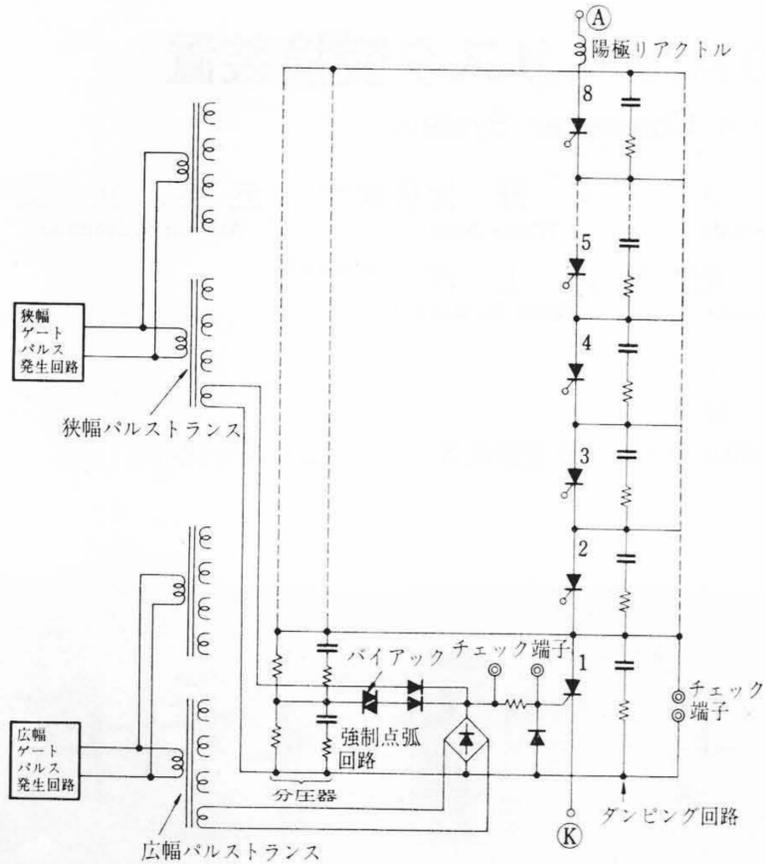
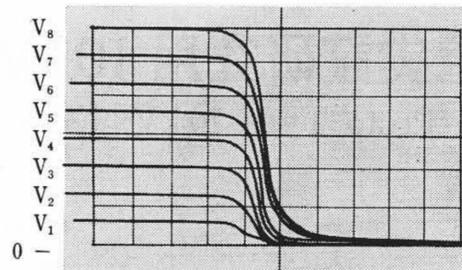
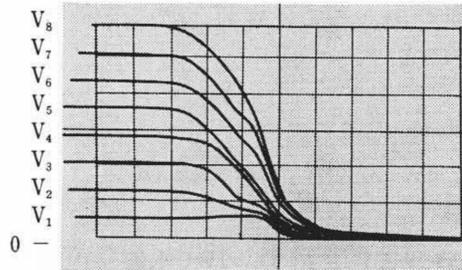


図3 サイリスタバルブの構成



(a) ターンオンタイムのそろっていないアーム



(b) ターンオンタイムのそろっているアーム

(零力率運転 $I_d=30A$)

縦軸：電圧 1kV/div, 横軸：時間 1 μ s/div

図6 ターン、オン時の分担電圧

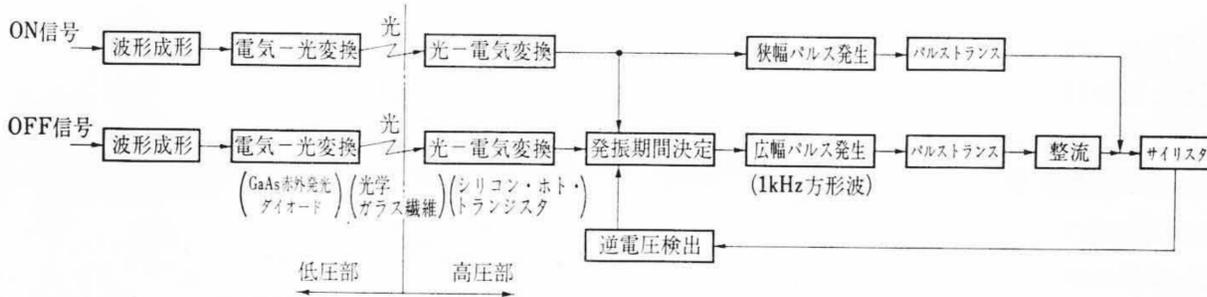
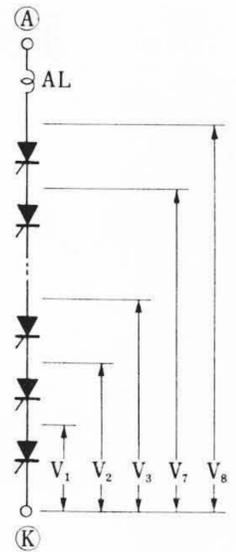


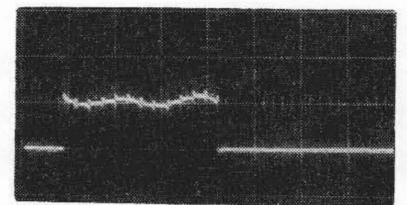
図4 ゲート点弧回路の構成

る。サイリスタの分圧器は直流および低周波電圧を分圧する抵抗 R_s と過渡的な高周波電圧を分圧する (C_A+R_A) からなる。また、各サイリスタには交流パルス素子 Biac により、サイリスタの陽極電圧が 1,800V 以上になると、そのサイリスタにゲート電流を流して点弧させる強制点弧回路を使用している。転流時の振動に対するダンピング回路は各サイリスタに分割して接続されている。陽極リアクトルは一つのバルブに 1 個一括して陽極側に接続している。本装置は実験研究を目的として作られたため、上記定数は大幅に容易に変更できるようにしてある。

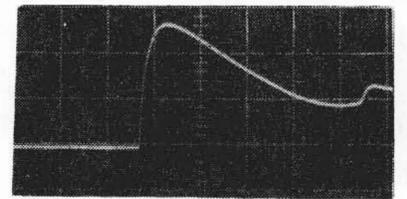
3.2 ゲート回路の構成

ゲート回路の構成は図 4 に示すとおりである。点弧信号は大地からバルブまでは GaAs 赤外発光ダイオード、光学ガラス繊維およびフォト・トランジスタによる光で伝達され、バルブ電位で広幅パルスを作り、それを絶縁パルス変圧器で各サイリスタに分配する方式である。

通常パルス幅は移相回路からの ON, OFF 信号によって決められるが、異常時、たとえば直流電流が断続した場合のようにゲート電流を印加中、サイリスタに逆電圧がかかるときには、それを検出してゲート電流を逆電圧のかかる期間、シャ断するようになっている。広幅パルスは約 1 kHz 方形波を発振させ、パルス変圧器 2 次側で全波整流して広幅パルスとなる。また、別に振幅の大きい急しゅんな立上りのパルスを作る狭幅パルス回路を設け、パルス変圧器を介して広幅パルスに重畳し、立上りが急しゅんなゲートパルスを得



(a) ゲート電流
縦軸：0.84 A/div, 横軸：2 ms/div



(b) ゲート電流 (波頭部)
縦軸：0.84 A/div, 横軸：5 μ s/div

図5 ゲート電流波形

るようにしている。

図 5 の (a) はゲート電流、(b) はその波頭部分を示したものである。

3.3 サイリスタの分担電圧

(1) ターンオン時の分担電圧

図 6 にターンオン時の分担電圧波形を示す。(a) は各サイリスタのターンオン時間が比較的良好にそろっている場合であり、(b) は 1 個だけ、特にターンオンタイムの長いものがはいつた場合である。

(2) ターンオフ時の分担電圧

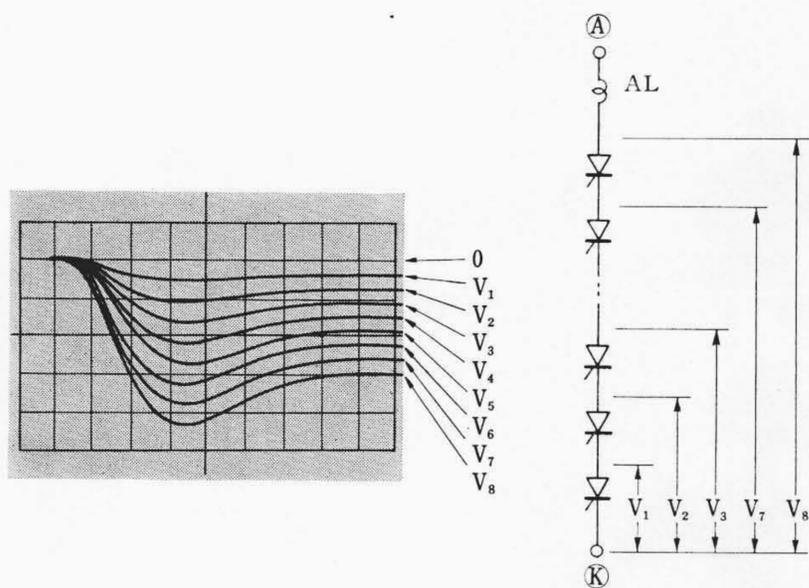
図 7 にターンオフ時の分担電圧波形を示す。ばらつきは $\pm 15\%$ 以内である。

(3) インパルスの分担電圧

図 8 はバルブ単体に立上り 1 μ s、ピーク値 11.6 kV のインパルス印加したときの分担電圧波形を示したものである。陽極リアクトルと分圧器のために各サイリスタにかかる電圧波頭は 20 μ s になる。

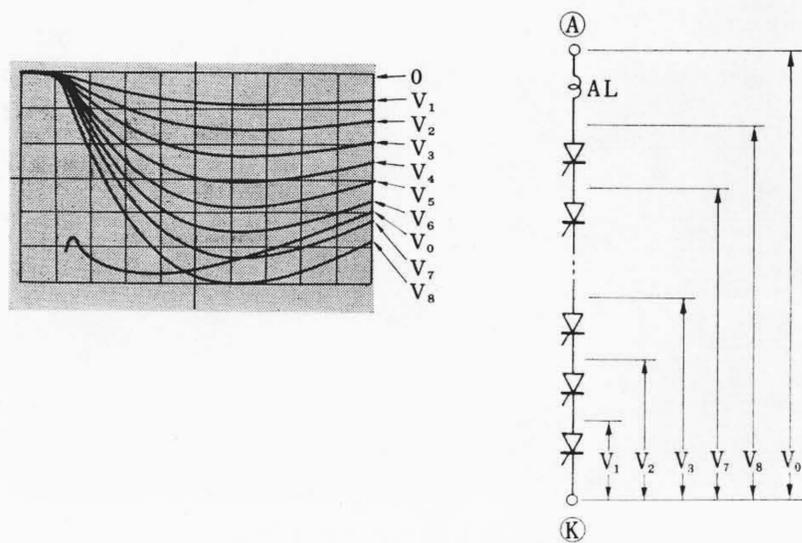
3.4 転流直後の振動電圧

図 9 は 1 台の変換器を零力率運転したときの転流直後の振動電圧



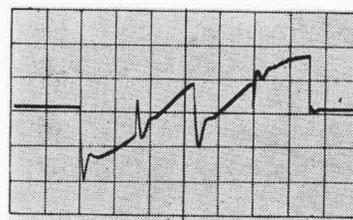
(零力率運転 $I_d=30A$)
縦軸：電圧 2 kV/div, 横軸：時間 100 μ s/div

図7 ターンオフ時の分担電圧



縦軸：電圧 2 kV/div, 横軸：時間 4 μ s/div

図8 インパルス電圧の分担電圧



(零力率運転 $I_d=30A$)
縦軸：電圧 4 kV/div, 横軸：時間 2 ms/div

図9 バルブの陽極-陰極間電圧波形

であり、振動電圧の最大値は交流電圧最大値の約 1.33 倍である。なお、この場合には図 2 の回路に実規模で想定される変圧器の漂遊容量および高周波用ブロッキング回路の等価定数が追加されている。

3.5 ターンオン時の電流振動

ターンオン直後の電流振動は変圧器の漂遊容量、ブロッキング装置、ダンピング装置、陽極リアクトルなどにより生ずるものであるが、これによってバルブ電流が断続し、部分的にブロック状態になるサイリスタが出ると、そのサイリスタに過電圧がかかるので、どのような運転条件の場合でもバルブ電流は断続しないようにしなければならない。

図 10 は図 9 同様に実規模装置を模擬した場合のターンオン時のサイリスタ電流波形であり、電流の断続が起こらない。

4. 制御、保護方式

本装置の制御保護回路は実規模の変換装置に、そのまま適用されることを考慮して構成されている。

基本的な制御は、順変換器：定電流制御あるいは定電力制御、逆変換器：定余裕角制御である。起動、停止回路は交流系統に与える影響を軽減するために、いわゆるソフトスタートおよびソフトストップが行なわれるように構成されている。

保護回路としては、主トランス 1 次側に設置する過負荷リレー（過電流リレー）のほかにアーム短絡、直流側短絡のような非常に過酷な故障に対して、しゃ断器によらずゲート操作により高速度に電流をしゃ断する回路を備えている。

4.1 制御回路とその特性

制御回路の概略の構成は図 11 に示すとおりである。以下おもな点について簡単に説明する。

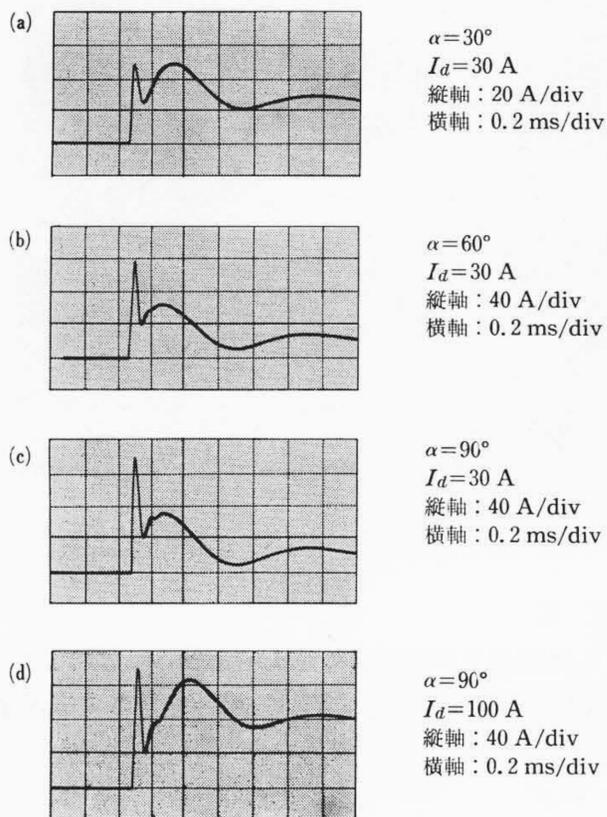


図10 ターンオン時の電流波形

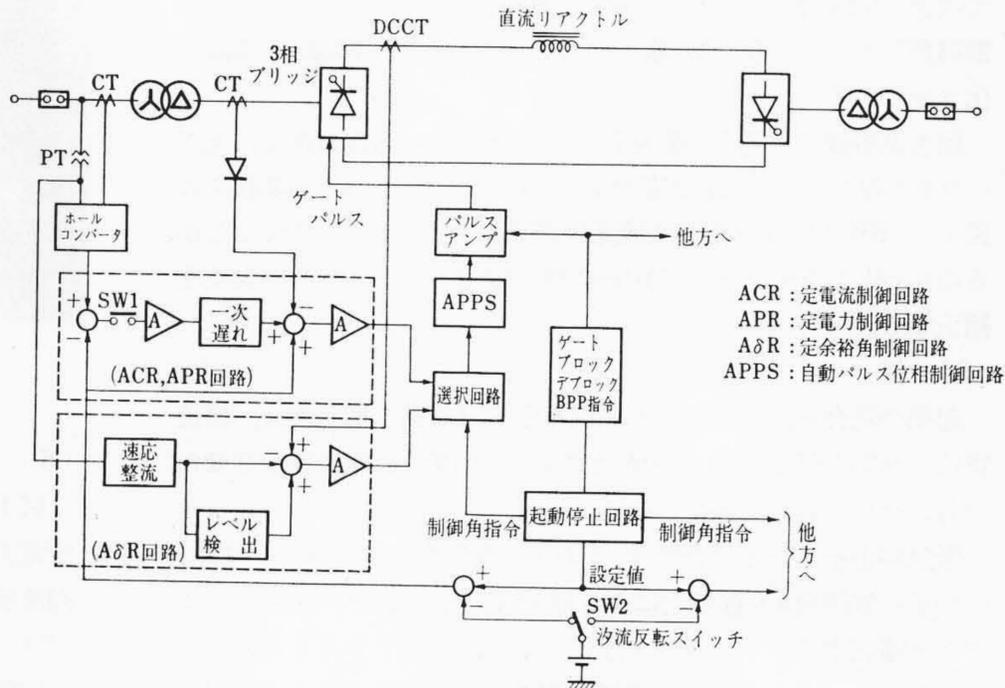


図11 制御回路ブロック図

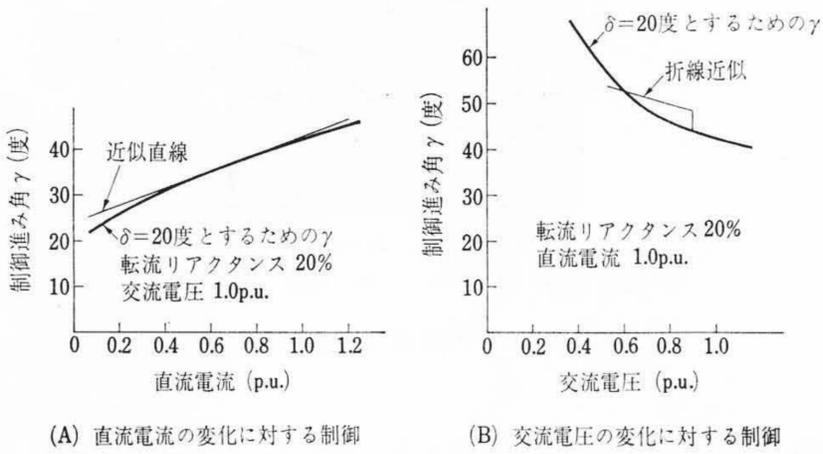


図12 インバータ制御方式

(1) 定電流制御回路

図11のSW1をオフにすると定電流制御が行なわれる。直流電流の測定値は主トランス2次側のCTの出力電圧を整流することにより得ている。この方式をとると、アーム短絡などの故障に対しても電流を制限する効果がある。

(2) 定電力制御回路

図11のSW1をオンにすると定電力制御となる。直流電流の設定値として、電力設定値を定格直流電圧で除した値を与えておき、直流電圧の変動に対しては電力の測定値と設定値の偏差をもって直流電流の設定値を補正する方式をとっている。この方式はあとで述べるように起動、停止をスムーズに行なううえで効果がある。

(3) 定余裕角制御

よく知られているように、逆変換器の余裕角と制御角の関係式は

$$\cos \delta - \cos \gamma = \sqrt{2} X I_d / E_a \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 δ : 余裕角 I_d : 直流電流
 γ : 制御進み角 E_a : 交流電圧
 X : 転流リアクタンス

直流電流および交流電圧の変化に対して余裕角を一定に保つための制御角を上式より求めると、図12(a), (b)のようになる。本装置では同図中に示すような直線近似および簡単な折線近似により制御を行なっている。

(4) 起 動

特定の相のバルブ(たとえば U_p, U_N 相)をバイパスペアとして起動を行なう。直流電流の設定値を指数関数的に徐々に増加させてゆき、0.2秒程度の時間をかけて100%の電流を流す。また、制御角は上記の過程で90度近辺から徐々に定常運転時の値に変化させていく。

順変換器側で定電力制御を行なう場合には、応答が遅く、上記の0.2秒程度の時間には応答できないから、起動時の0.2秒間は図11のSW1をオフとして定電流制御による起動を行ない、しかるのちSW1をオンとして0.5~1秒の時間をかけて電力の偏差を補正する。

(5) 停 止

起動の場合と同様に定電力制御を定電流制御に切り換え、直流電流を0.2秒程度の時間をかけて定格の10%の値に減少させたのち、ゲート信号を停止させる。

緊急停止を行なう場合には、このような制御ループを用いずに、両端子の制御角 α を強制的に100度程度とし(以下、ゲート・シフトと略記する)インバータ運転により、直流リアクトルにたくわえられたエネルギーを急速に電源に帰還し、1~2サイクル以内に電流をしゃ断する。

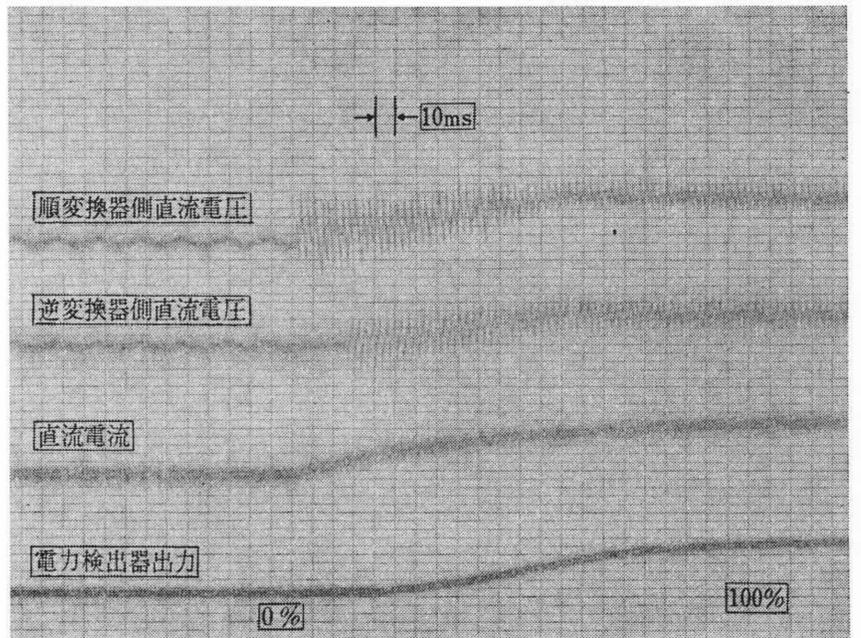


図13 起動時のオシログラム

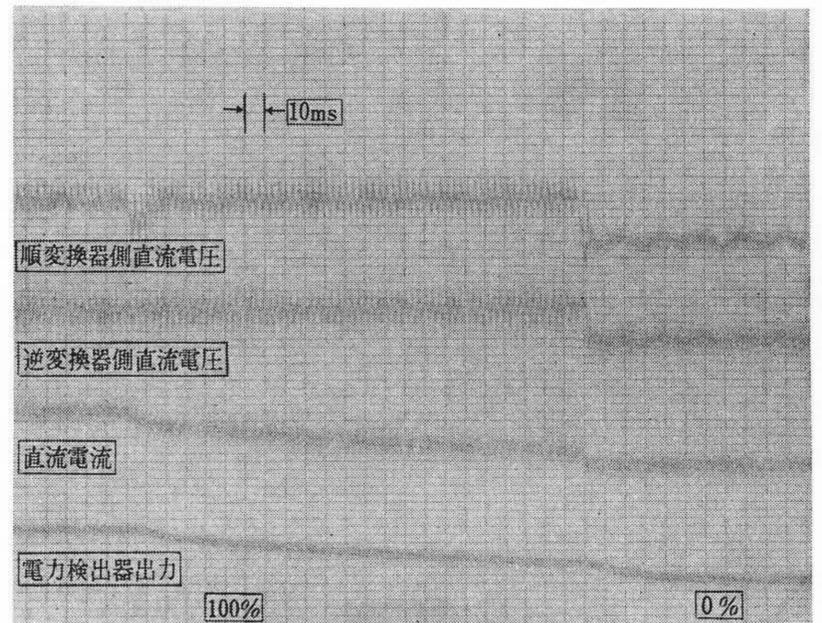


図14 停止時のオシログラム

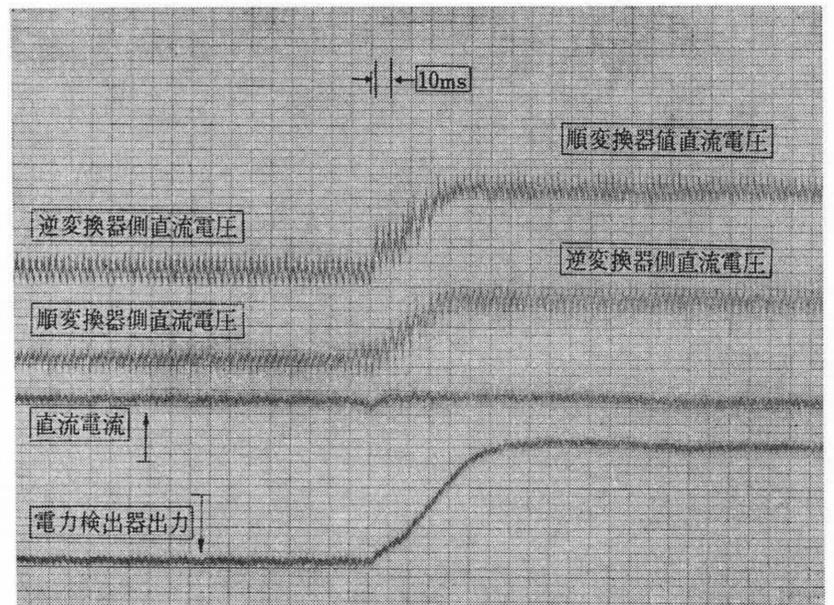


図15 潮流反転時のオシログラム

(6) 潮 流 反 転

図11に示すように両端子の設定値に差をもたせることにより、定電力、定電流いずれの制御を行なっている場合でもスムーズな潮流反転が行なわれる。

(7) オシログラム

定電力制御を行なっている場合の起動、停止、潮流反転のオシログラムを図13, 14および図15に示す。

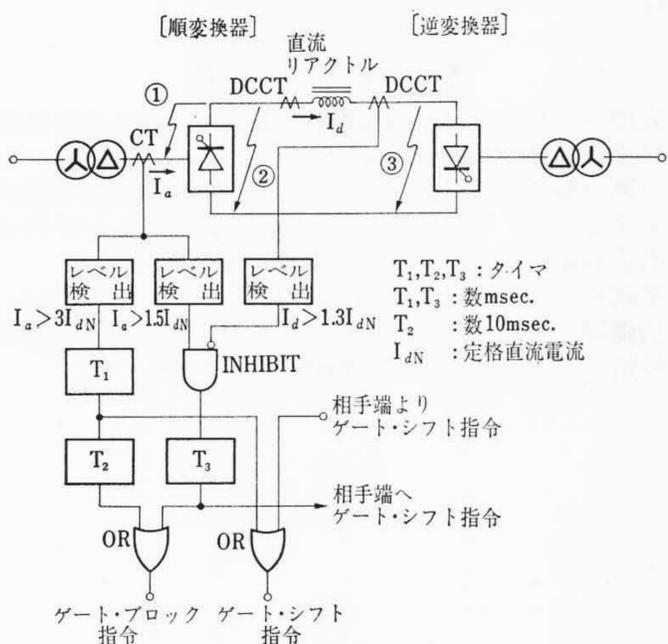


図 16 過電流保護回路シーケンス

なお、逆変換器はいずれも定余裕角制御を行なっている。また、設定値はすべて 100% (定格値) としている。

4.2 保護回路とその特性

サイリスタ・バルブの過電流保護としては、故障種類に応じて、次のような処理が行なわれる。

なお、故障種類の判別は図 16 に示すシーケンスによって行なわれている。

(1) アーム短絡, 直流出力端短絡

順変換器側でアーム短絡 (図 16 の ①) あるいは直流リアクトルを通さない位置での直流短絡 (図 16 の ②) が発生すると、サイリスタ・バルブに非常に過酷な熱的負担を与えるので、できるだけ迅速に電流をしゃ断しなければならない。本装置では、主トランス 2 次側の電流が定格電流の 1.5 倍以上になる条件で 1 サイクル以内にゲート・ブロック (ゲート信号を阻止する) を行なう。

この場合、故障前に直流リアクトルを流れていた電流が、そのまま持続するのを防ぐために相手端でゲート・シフト (前節参照) を行なう。

(2) 直流短絡

直流リアクトルを通した位置での短絡 (図 16 の ③) には

- (a) 絶縁破壊あるいは転流失敗継続によるもの
- (b) 瞬時転流失敗によるもの

が考えられる。

最もひん度が高いのは (b) である。これは、逆変換器がなんらかの原因で転流失敗し、直流電流が一時的に増加するが、順変換器の定電流制御により、1 サイクル以内に平常値に戻り、転流失敗も回復するもので、この場合には、保護回路はいっさい動作してはならない。

次に、(a) の故障に対しては二つのケースを考える必要がある。すなわち、(i) 定電流制御回路が正常に動作している場合、(ii) 定電流制御回路が故障の場合である。

(i) の場合は、直流電流が一時的に増加しても、1 サイクル以内に故障前の値に戻るから、高速度の保護動作は必要としない。直流低電圧リレーにより検出し、限時をおいて、ゲート・シフトにより停止する。この場合の直流電流のピーク値は直流リアクトルの値によっても異なるが、一般に定格値の 1.5~2 倍である。

(ii) の場合は電流を制限する機能がなく、放置すれば、直流電流は I_{dN}/ϵ まで上昇するから、迅速な処置を必要とする。ただし、 I_{dN} は定格直流電流、 ϵ は転流リアクタンス (p.u. 値) である。

この場合の検出レベルは、(i) の場合と区別するために定格直

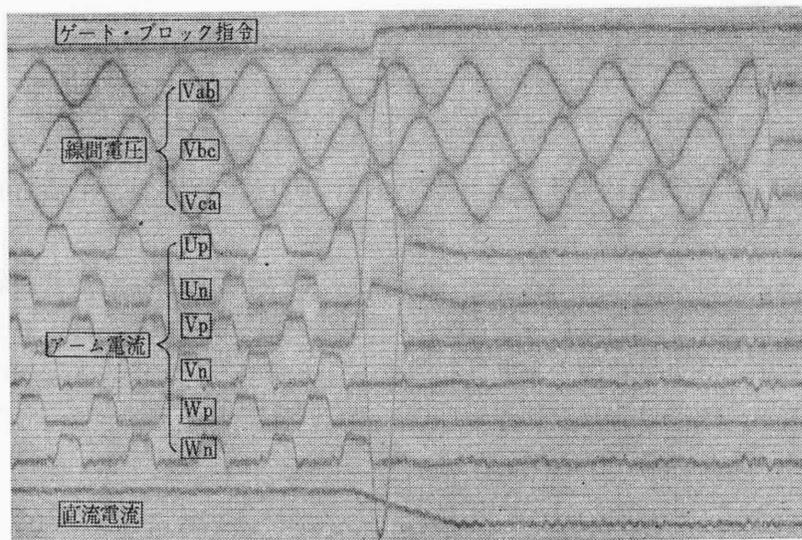


図 17 アーム短絡時のオシログラム

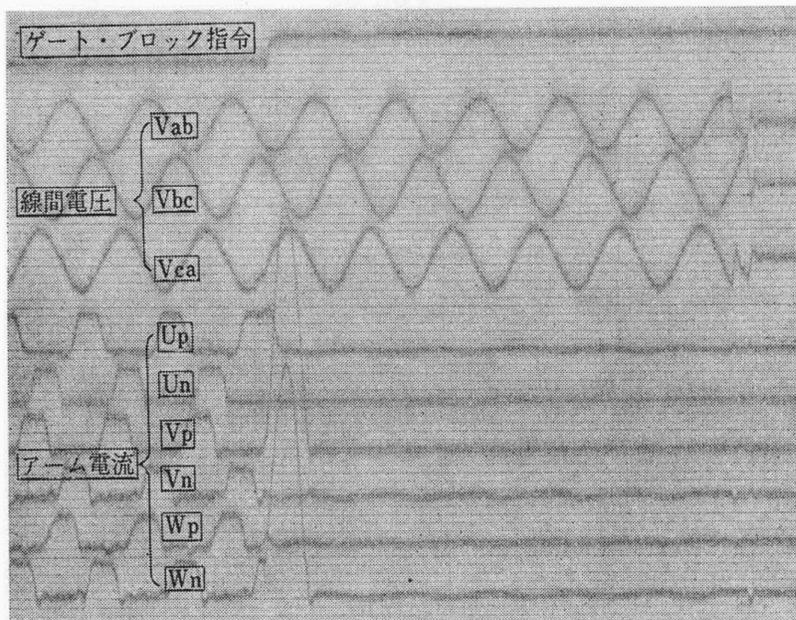
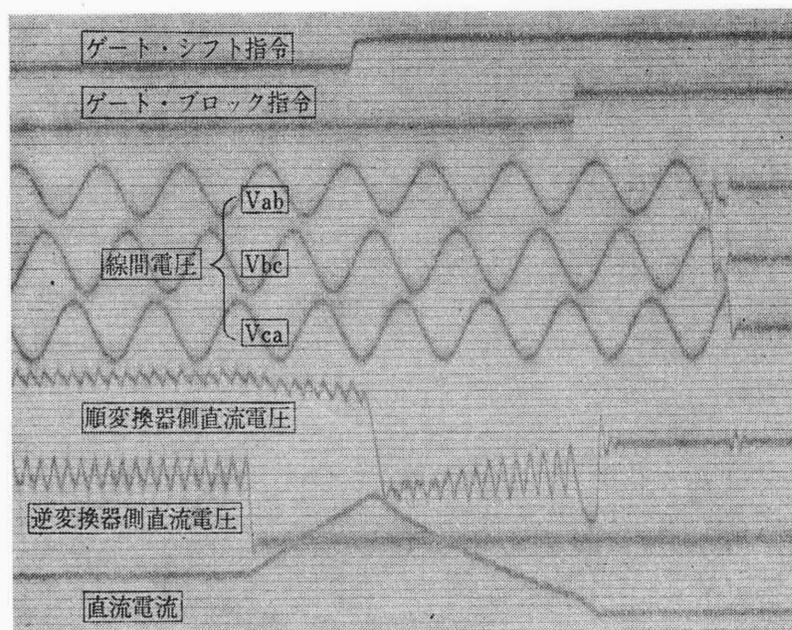


図 18 直流リアクトルを通さない位置における直流短絡時のオシログラム



(定電流制御回路故障時)

図 19 直流リアクトルを通した位置における直流短絡時のオシログラム

流電流の 3 倍程度の値とするのが適当である。また、このような故障に対してはゲート・ブロックしても電流をしゃ断することができないから、ゲート・シフトを行ない、一定時間後にブロックする方法をとっている。

(3) オシログラム

図 17~19 は上記各種故障発生時のオシログラムを示したもの

である。

故障前の直流電流はすべて定格値である。

5. 結 言

以上、研究用として設置した10 kV, 100A サイリスタ変換装置の概要について述べた。

なお、本装置の制御方式については、電力中央研究所との共同研究の成果を基礎にしたものであり、梅津博士、上之蘭氏、町田博士をはじめ、共同研究の各委員に感謝の意を表す。また、本装置の製作にあられた日立製作所日立工場、国分工場、大みか工場の関

係者に厚く御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 岩田ほか3名： 直流送電用10 kV サイリスタ変換装置 日立評論 50, 690 (昭43-8)
- (2) 十河ほか3名： 10 kV サイリスタ変換装置の運転信頼度に関する研究 電気試験所研究報告 第697号 (昭44-1)
- (3) 直流送電用高圧サイリスタ変換装置の開発 電試ニュース No.227 (昭43-12)
- (4) 基礎研究用サイリスタ変換装置の仕様に関する調査研究 技術研究所研究報告 No.69011 (昭44-8)

Vol. 52 日立評論 No. 7

目 次

■論 文

- 水中モートル用絶縁線の寿命評価
- 超高圧同期はずれ分離継電装置
- 最近のレオナード用制御装置
- 重電機における溶接の役割
- 特殊鋼用ビレット誘導加熱装置
- 移行式水シールドプラズマジェット切断装置の特性
- 神奈川県総合無線設備
- 調湿形冷蔵庫の諸特性
- 自然対流式冷水ショーケースの性能

- プラスチック絶縁電線における絶縁層内の化学的トリ劣化

■高級特殊鋼特集

- 高速度工具鋼の諸性質に及ぼすオースフォーミングの影響
- 超強力鋼の性質に及ぼす原料鉄の影響
- 高硬度工具鋼の引張性質
- Co基超耐熱合金L605の諸性質
- 高密度焼結Ni鋼およびNi-Mo鋼の機械的性質

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号
郵便番号 100
取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京20018番

第 32 卷 日 立 第 6 号

目 次

- “西方発展”に残る自然
- 新聞制作の自動化
- 光る字をかく半導体
- 500万県民を災害から守る—神奈川県防災無線網—
- 米作基地 “越後”

- オペレータのメッカ日立建機研修所
- くらしの中に美を創る
- ハイライト/地下鉄の安全を守る
- P R コーナー
- ホームサイエンス

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号
郵便番号 100
取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京20018番