

48相サイリスタ整流装置の電流分担

Current Sharing of 48-phase Thyristor Converter

宮 下 紀 一*
Norikazu Miyashita

前 田 武 男*
Takeo Maeda

要 旨

48相サイリスタ整流装置は、化学用大容量直流電源装置として多くの特長を有するものであるが、並列接続される8台の整流器の電流分担特性にはじゅうぶん注意する必要がある。

本論文では特に問題となる装置停止時の電流分担特性の解析を行ない、負荷回路に並列にバイパス・ダイオードを設ければ、サイリスタのゲート点弧信号を停止することにより、各整流器電流の分担を悪くすることなく、1サイクル以内で確実に電流をしゃ断できることを示している。なお、この停止方式は交流電源に事故が発生し、電圧の低下や波形のひずみが生じた場合にも有効である。

1. 緒 言

化学用の大容量直流電源装置としては、従来よりシリコン・ダイオードを用いた可飽和リアクトル制御の整流装置が用いられている。これは多数の整流器を並列に接続することにより、大容量化を実現したものである。容量に若干の余裕をもたせることにより、1台の整流器が停止しても残りの整流器で安定な運転を継続することが可能である。電流高調波の交流電源に与える影響あるいは通信線への誘導障害などの問題に対しても、多数の整流器のおのおのに一定の位相差を持たせて、いわゆる多相整流装置とすることによって大幅にその影響を低減することができる。

このような整流装置に、ダイオードに代わってサイリスタを採用すると、上記の特長はそのまま生かされ、さらに

- (1) 応答速度が大で、電解槽の陽極効果などによる電圧変動に対しても、それに速応した定電流制御が可能である。
- (2) 交流電源のしゃ断器を開閉することなしに、点弧パルスの操作により装置の起動停止を行なうことができる。
- (3) 位相制御により、いわゆるソフト・スタートが可能である。

など、制御特性や運転効率の向上に大きな効果が期待できる。しかしながら、一方では装置停止時、あるいは交流電源異常時などに操作方式によっては各整流器の電流分担が不平衡になり、過電流によってサイリスタを破壊するおそれがある。したがって、このような場合の現象をじゅうぶん解析し、適当な操作方式を選定しなければならない。

ここでは数十～数百 MW の容量をもつ電解用、48相サイリスタ整流装置を対象とし、上記の問題点を考慮して、交流電源の正常、異常を問わず、装置を迅速に、かつ、確実に停止し、サイリスタを保護する方式について検討した結果を述べる。

2. 48相サイリスタ変換装置の概要と問題点

2.1 概 要

本整流装置は図1に示すように、3相ブリッジ結線のサイリスタ整流器8台を並列に接続したものである。各整流器に接続される交流電源の位相は電気角で7.5度ずつずらしてある。また各整流器はサイリスタの点弧位相制御により、出力電流一定となるように制御される。

直流リアクトル Z_2 は位相の異なる整流器間の相互干渉を除き、直流電流を各整流器に均等に分担させるために設けられたものである。

本整流装置の負荷は電解槽であるが、等価的には、同図に示すよ

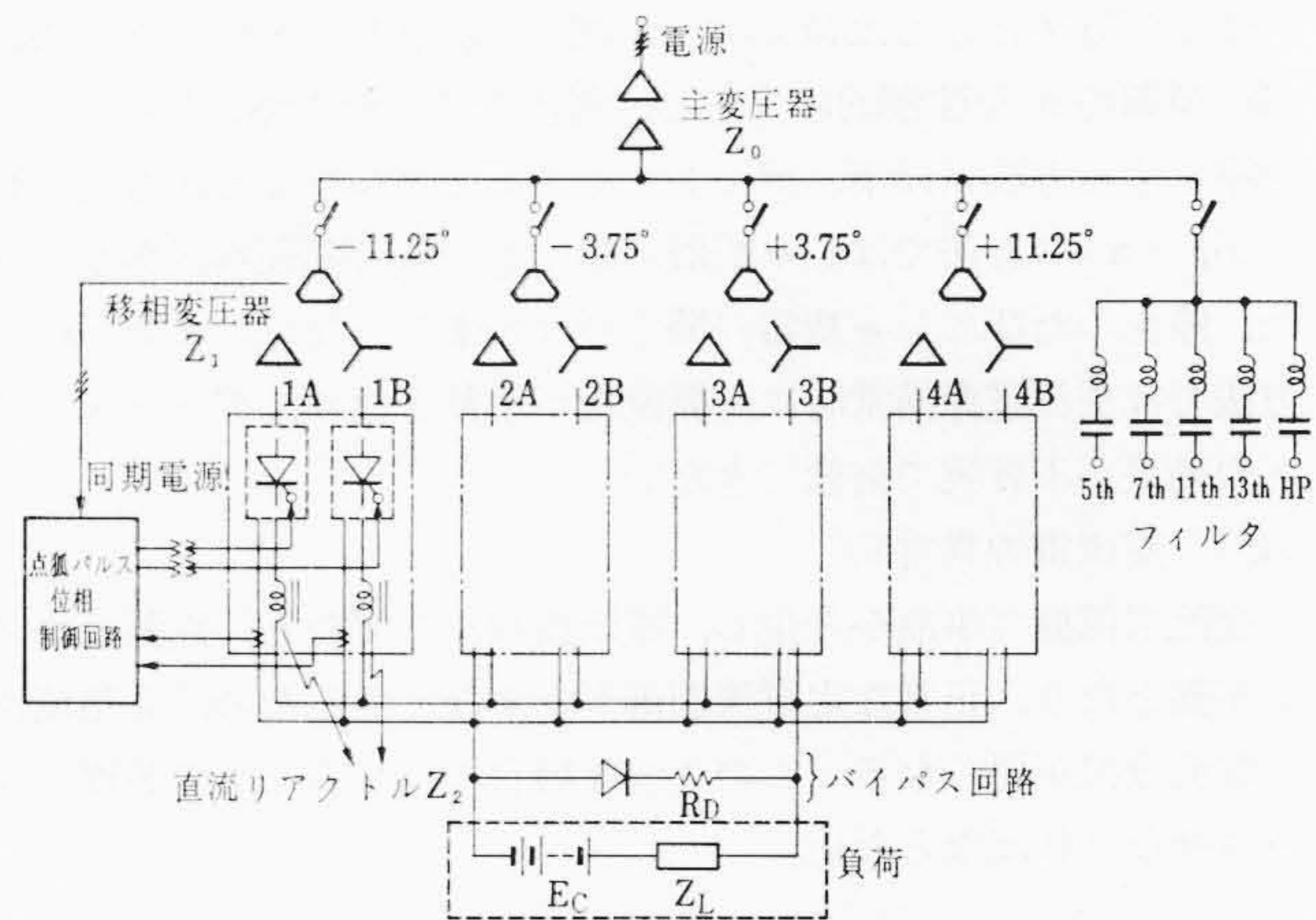


図1 48相サイリスタ整流装置主回路結線図

うに、電解槽の逆電圧 E_c と配線のインピーダンス $Z_L = R_L + j\omega L_L$ で表わされる。 Z_L は一般に Z_2 の10倍程度の大きさを持ち、その時定数 (L_L/R_L) は100～200 ms 程度である。バイパス回路は後に説明するように、装置の停止時の特性を改善するために設置されるものである。

フィルタは高調波電流の吸収と、整流器の消費する無効電力の供給を目的とするものであり、第5, 7, 11, 13調波用のバンド・パス・フィルタと第17次以上の高調波電流吸収用のハイパス・フィルタで構成される。フィルタ設置点の電圧波形はほぼ完全な正弦波であると考えられる。

2.2 整流器の電流分担

このような整流装置において、各整流器の分担電流が不平衡になると、過電流によってサイリスタを破壊する場合があるから、平常時、事故時を含めて、じゅうぶんな検討をしておく必要がある。ここでは、分担不良発生の可能性のある、起動、停止時および交流電源事故時について考えてみた。

(a) 起 動 時

急激に大容量負荷をとると、電源側に与える影響も大きいから、本装置では以下に簡単に説明するような、いわゆるソフト・スタートを行なう。まず、制御角 α を約90度にした状態でゲート・サプレッス信号を解除し、サイリスタに点弧パルスを印加する。つづいて数百 ms の時定数で α を小さくしてゆく。 α がある値になると、直流電流は設定値に達し、定電流制御回路が動作して定常運転にはいる。この場合には、各整流器の電流分担不平衡が発生するおそれはない。

* 日立製作所日立研究所

表1 実験回路の定数

整流器入力電圧 (E_{ac})	100 V
整流器の定格出力電流	5 A×8 セット
移相変圧器のインピーダンス (Z_1) (1相あたり)	$0.2 + j1.0 \Omega$
負荷回路のインピーダンス (Z_L)	$1.26 + j81.8 \Omega$
負荷回路の逆電圧 (E_C)	40 V

(b) 停止時

本整流装置の停止は点弧パルスを停止 (ゲート・サプレス) することにより行なわれるが次節以下に述べるように単にゲート・サプレスを行なうだけでは電流分担が不良となり良好な停止特性は得られない。図1に示したようなバイパス・ダイオードを併用すれば、停止特性は大幅に改善され1サイクル以内に確実に電流をしゃ断することができる。

停止の方法としてはほかに (a) 交流電源をしゃ断する方法、(b) 制御角 α を強制的に大とし、電流を減じたのち、点弧パルスを停止する方法 (以下、ゲート・シフトと呼ぶ) などが考えられるが、(a) の方法ではしゃ断器が開くまでに時間遅れがあり、また、停止のたびにしゃ断器の開くのは好ましくない。また (b) の方法では交流電源異常時に点弧位相が不整となり、ゲート・シフトの効果が不確実で信頼できない。

(c) 交流電源異常時

交流電源側で事故が発生し、電圧波形がひずむと、点弧パルスが不整となり、正常な定電流制御ができなくなるため、各整流器の電流分担が悪くなる。このような場合にはすみやかに装置を停止させなければならない。

3. ゲート・サプレス時の電流分担

ここでは、ゲート・サプレスを行なった場合の各整流器の電流分担特性を解析した結果について述べる。実験および計算に用いた回路定数は表1のとおりで、数十 MW～数百 MW の整流装置を模擬しているが主トランスおよびフィルタは使用されていない。ここでは、

(1) 各要素のインピーダンスは電流の値にかかわらず一定である。

(2) 電解槽の逆電圧は電流の値にかかわらず一定である。

としている。

さらに計算による解析においては次の仮定を設ける。

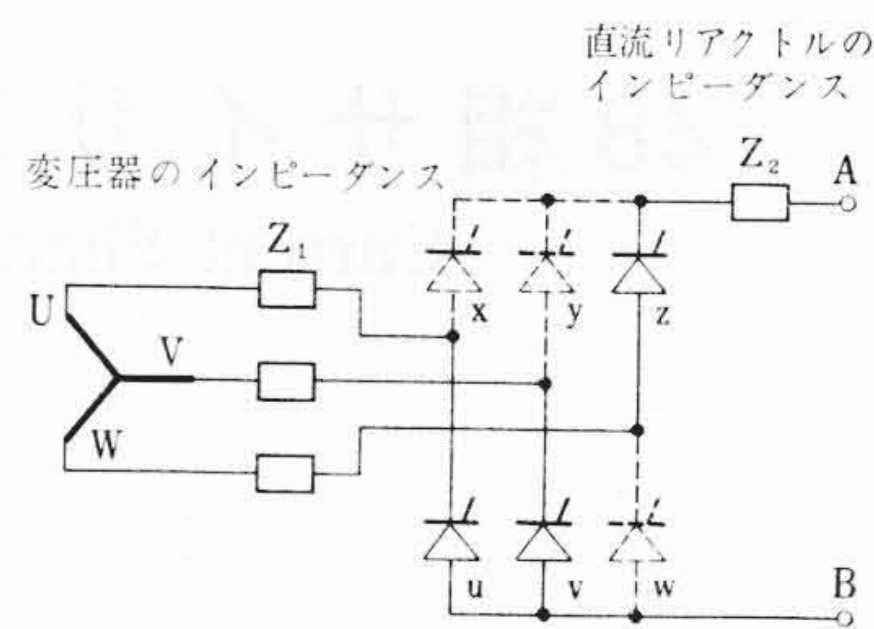
(1) サイリスタの順電圧降下は本装置の定格直流電圧の1%以下であるので無視する。

(2) 各整流器の直流電流は平滑である。

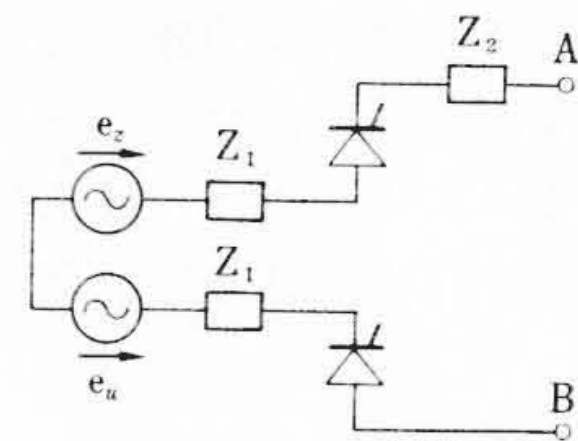
3.1 ゲート・サプレス時の電流分担

(a) 分担電流の計算

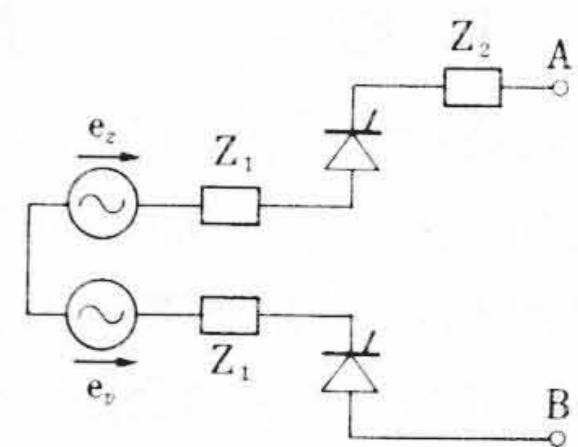
位相の順に整流器に番号をつけると4A, ……1A, 4B, ……1Bの順で1～8番となる。いま、7番目すなわち2Bの整流器のv相に点弧パルスが印加された直後にゲート・サプレスしたものとす。解析は最初にゲート・サプレスされる8番目の整流器に、点弧パルスが印加されるはずであった時点から始めれば良い。表1の定数で定常時の制御角 $\alpha = 15^\circ$ とすると、重なり角 μ は約12度である。したがって、上記の時点では1～6番目の整流器は転流を完了しており、v, zの2アームが通流している。7番目の整流器はまだ転流期間中であり、u, v, zの3アームが通流しているが、残りの転流期間は4.5度にすぎず、この間の整流器出力電流の変化はわずかであるから、この整流器も転流を完了して、v, zの2アームが通流しているものとしてよい。8番目は転流開始前である



(a) 3相ブリッジ



(b) 転流完了した整流器の等価回路



(c) 転流開始前の整流器の等価回路

図2 ゲート・サプレス後の整流器の等価回路

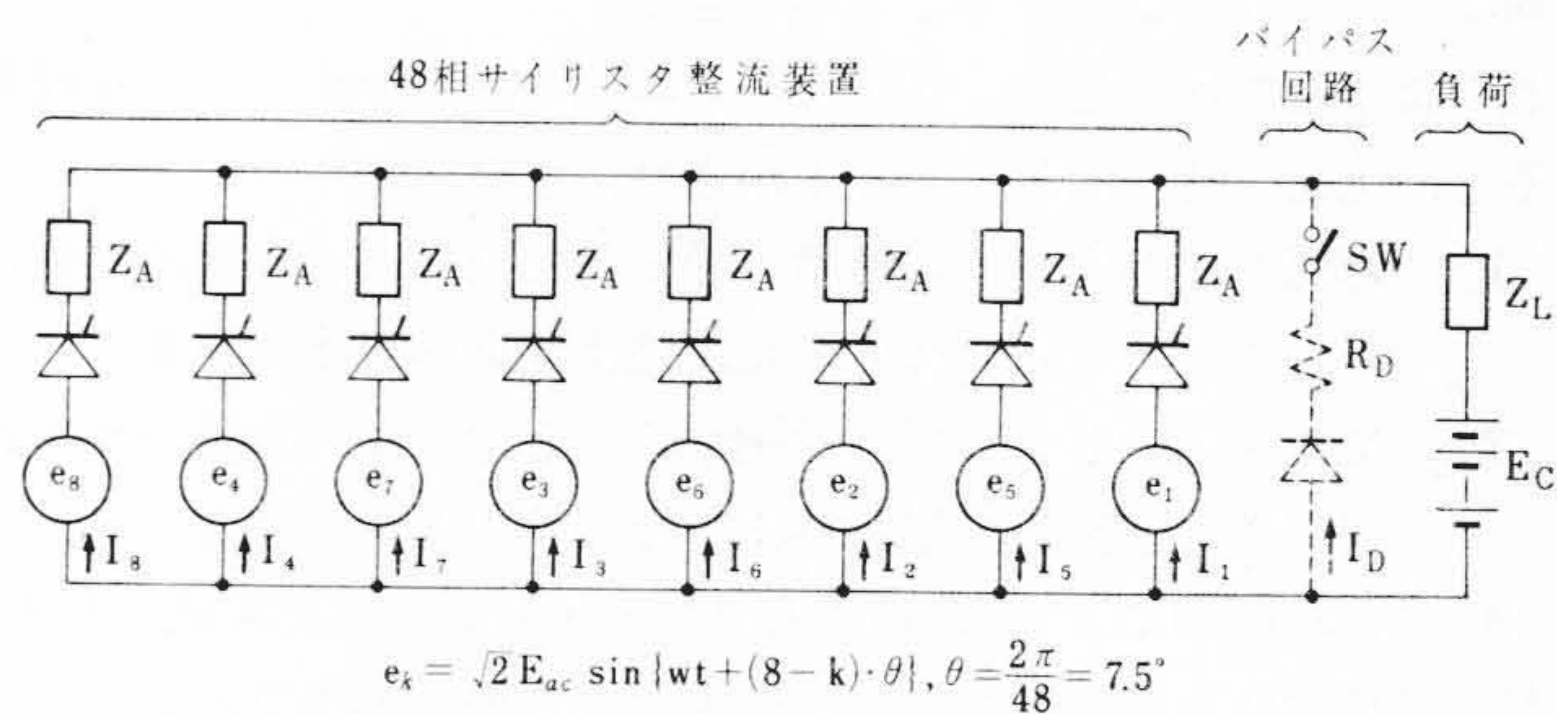


図3 ゲート・サプレス時の48相整流装置の等価回路

から、u, zの2アームが通流している。これらを等価回路でかくと図2のようになる。通流アームの電流は負荷のリアクトルにたくわえられたエネルギーが放出されてしまうまで流れつづける。この場合、各整流器には位相の異なる交流電圧が印加されているため、電流分担は複雑になる。その計算式を以下に示そう。

1～8番目の整流器の交流電源の位相は7.5度ずつずれているから、 n 番目の整流器の $w-v$ 相間電圧($e_w - e_v$) $_n$ は1番目の整流器の電圧の位相を基準にとれば、

$$(e_w - e_v)_n = \sqrt{2} E_{at} \sin \{ \omega t + (8-n) \cdot \theta \} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\theta = 2\pi/48 = 7.5^\circ$

E_{ac} : 交流電源の線間電圧の実効値

で表わさる、また、 $w-u$ 相間の電圧($e_w - e_u$) $_n$ は

$$(e_w - e_u)_n = \sqrt{2} E_{at} \sin \{ \omega t + (8-n) \cdot \theta + 60^\circ \} \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2)式を比較すると8番目の整流器の $w-u$ 相間の電圧は1番目の整流器の $w-v$ 相間の電圧よりも7.5度だけ進み位相にあることがわかる。

したがって、最初にゲート・サプレスされる8番目の整流器を1番とし、1～7番を2～8番として、番号をつけかえると k 番目の整流器がゲート・サプレス後に含む交流電圧 e_k は1番目の電

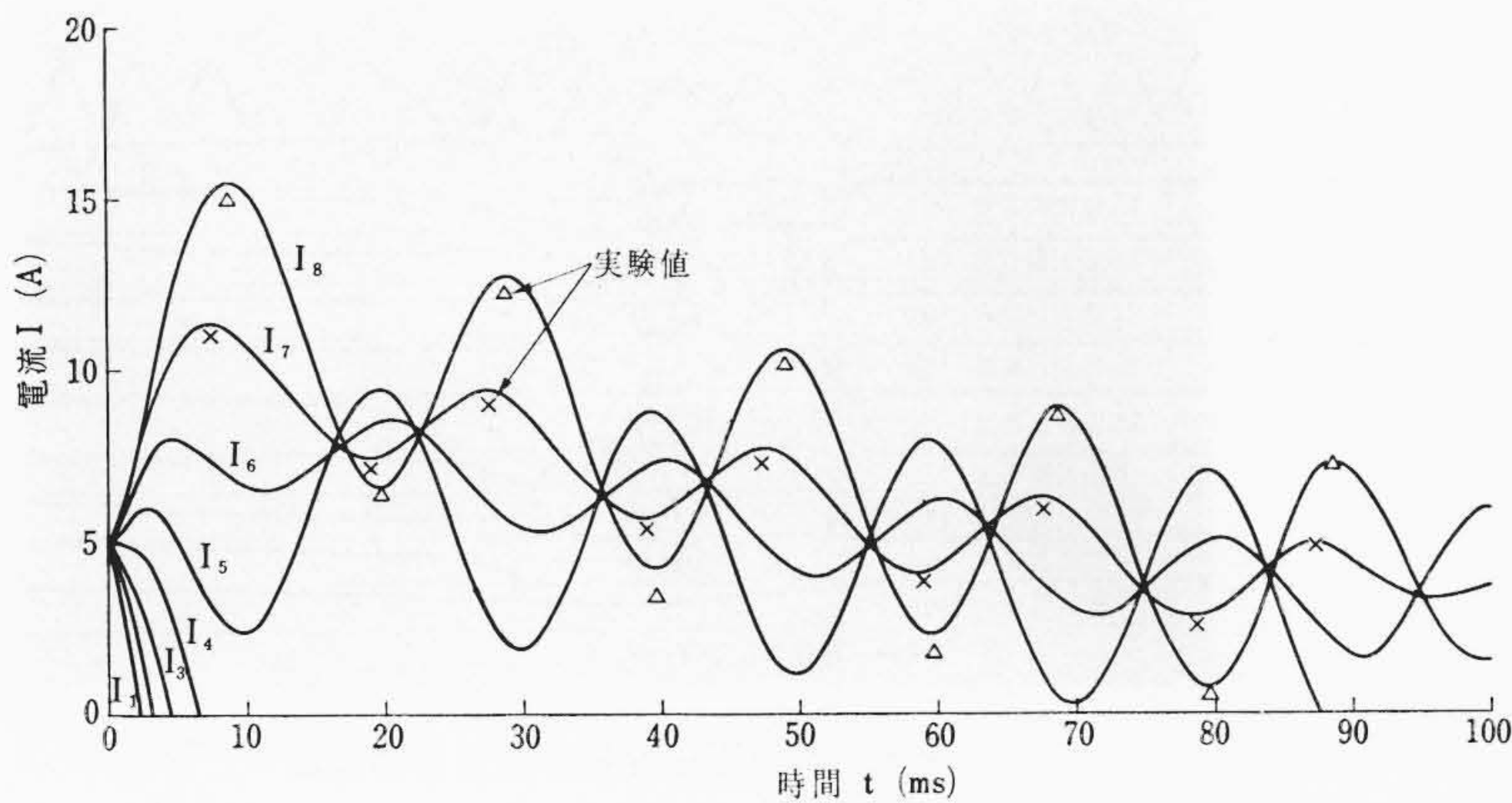


図4 ゲート・サプレスの後の電流分担計算値

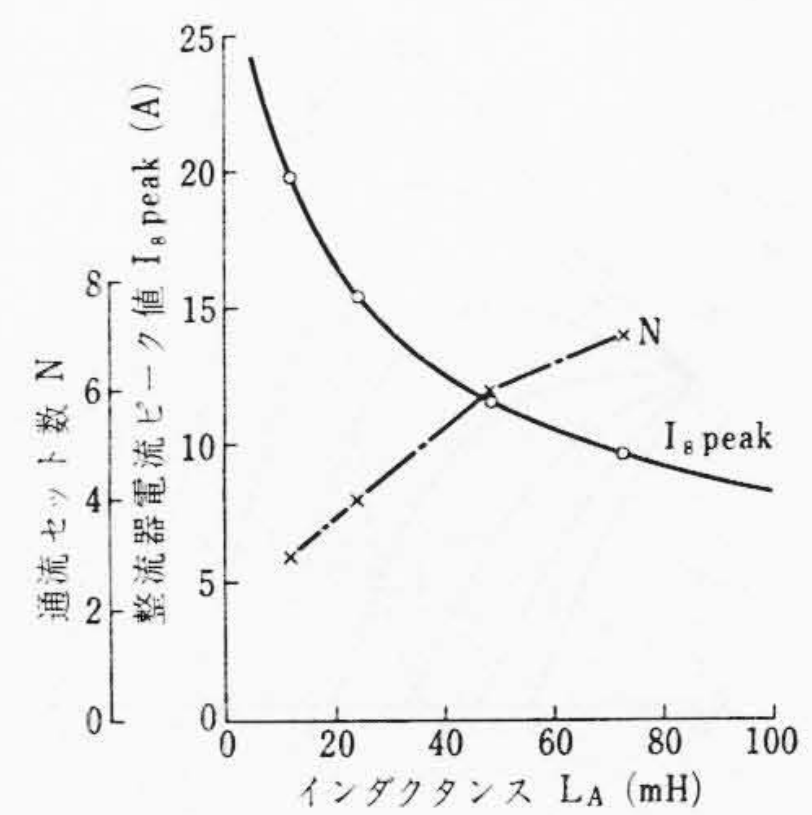


図5 整流器回路のインダクタンスと通流セット数

圧の位相を基準にとって次式のように表わされる。

$$e_k = \sqrt{2} E_{ac} \sin \{ \omega t + (8-k) \cdot \theta \}, \theta = \frac{2\pi}{48} = 7.5^\circ \dots (3)$$

したがって、図2の等価回路はさらに一般化されて図3のようにおきかえることができる。

図において

$$Z_A = 2Z_1 + Z_2$$

Z_1 : 変圧器の1相あたりのインピーダンス

Z_2 : 直流リアクトルのインピーダンス

Z_L : 負荷回路のインピーダンス

E_c : 電解槽の逆電圧

である。

以上、2Bの整流器の v 相に点弧パルスが印加された直後に、ゲート・サプレスされた場合について考えたが、各整流器は7.5度ずつ位相のずれた完全に対称な回路であるから最初にゲート・サプレスされる整流器を1番として番号を付ければ図3の等価回路はゲート・サプレスの時点がどこであっても成立することが明らかである。

ゲート・サプレス後、 k 番目の整流器の電流を I_k とすれば、図3より次のような連立方程式が成立することがわかる。

$$L_A \frac{dI_k}{dt} + R_A I_k + L_L \frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^8 I_k \right) + R_L \sum_{k=1}^8 I_k = e_k - E_c \dots (4)$$

ここで、 L_A, L_L および R_A, R_L はインピーダンス Z_A および Z_L のインダクタンス分および抵抗分であり、次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= R_A + j\omega L_A \\ Z_L &= R_L + j\omega L_L \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

ただし、図3のサイリスタはゲート・サプレスされているから、(4)式には「 I_k はいったんゼロになると再び通流することはない。」という拘束条件がある。

したがって、たとえばmilne法により、電流がゼロになった整流回路を順に除きながら方程式を解いてゆくことにより、すべての整流器の分担電流を求めることができる。

初期条件は

$$I_k = [\text{定格負荷電流}]/8$$

とすれば良い。

(b) 計算結果

HITAC 5020 F を用いて計算した結果の一例を図4に示す。同図中に実測値もあわせて記入したが両者はほぼ一致している。図

からわかるように位相の最も進んでいる整流器から順に交流電圧が逆電圧として働き、電流が減少する。約10ms以内に4台の整流器の電流がゼロになっており、以後は残りの整流器が不平衡の電流を分担して通流している。この不平衡は、通流している整流器の合成電圧として生じる負荷回路両端の電圧と各整流器に印加される交流電圧の位相差によって生ずるものである。また、通流する整流器の数は後に示すように条件によって異なる。

このように単にゲート・サプレスしただけでは装置を直ちに停止することはできず、整流器の電流分担も著しく不平衡となる。この不平衡を軽減することを目的として、直流リアクトル Z_2 を大きくした場合の計算結果は図5に示すとおりである。同図からわかるように直流リアクトルを大きくすれば電流分担特性をある程度改善することができるが、非常に大きなリアクトルを必要とし、経済的でない。また、リアクトルを大きくしても電流は交流分を含んでいるため、谷の部分で電流がいったんゼロとなっても逆電圧時間がサイリスタのターンオフ時間ぎりぎりの値である場合には多数並列のサイリスタのうち大半が回復するが、残りの少数のサイリスタだけが次の順電圧時間に再び通流して過電流で破壊される場合もありうる。

したがって、直流リアクトルを大きくすることは根本的な解決策とはなり得ない。

3.2 バイパス・ダイオードによる停止時電流分担の改善

ゲート・サプレス後に脈動電流が流れ続けるのを防ぐためには、負荷回路のリアクトルに流れ続ける電流を分流させるバイパス回路を設けると効果がある。バイパス回路としては、3相ブリッジのサイリスタのうち特定の二つのアームを点弧するいわゆるバイパス・ペアを用いる方法も考えられるが、ここでは制御の簡単化、動作の確実性を考慮して、負荷端子に一括してバイパス・ダイオードを用いることとした(図1参照)。

ここでは、バイパス・ダイオードを用いた場合の各整流器電流を解析した結果について述べる。

(a) 分担電流の計算

バイパス・ダイオードを用いた場合の等価回路は図3のS.Wを閉じ、点線部分を追加した回路となる。

(4)式の場合と同様に k 番目の整流器の電流を I_k とし、バイパス・ダイオードを流れる電流を I_D とすれば、次の関係が成立する。

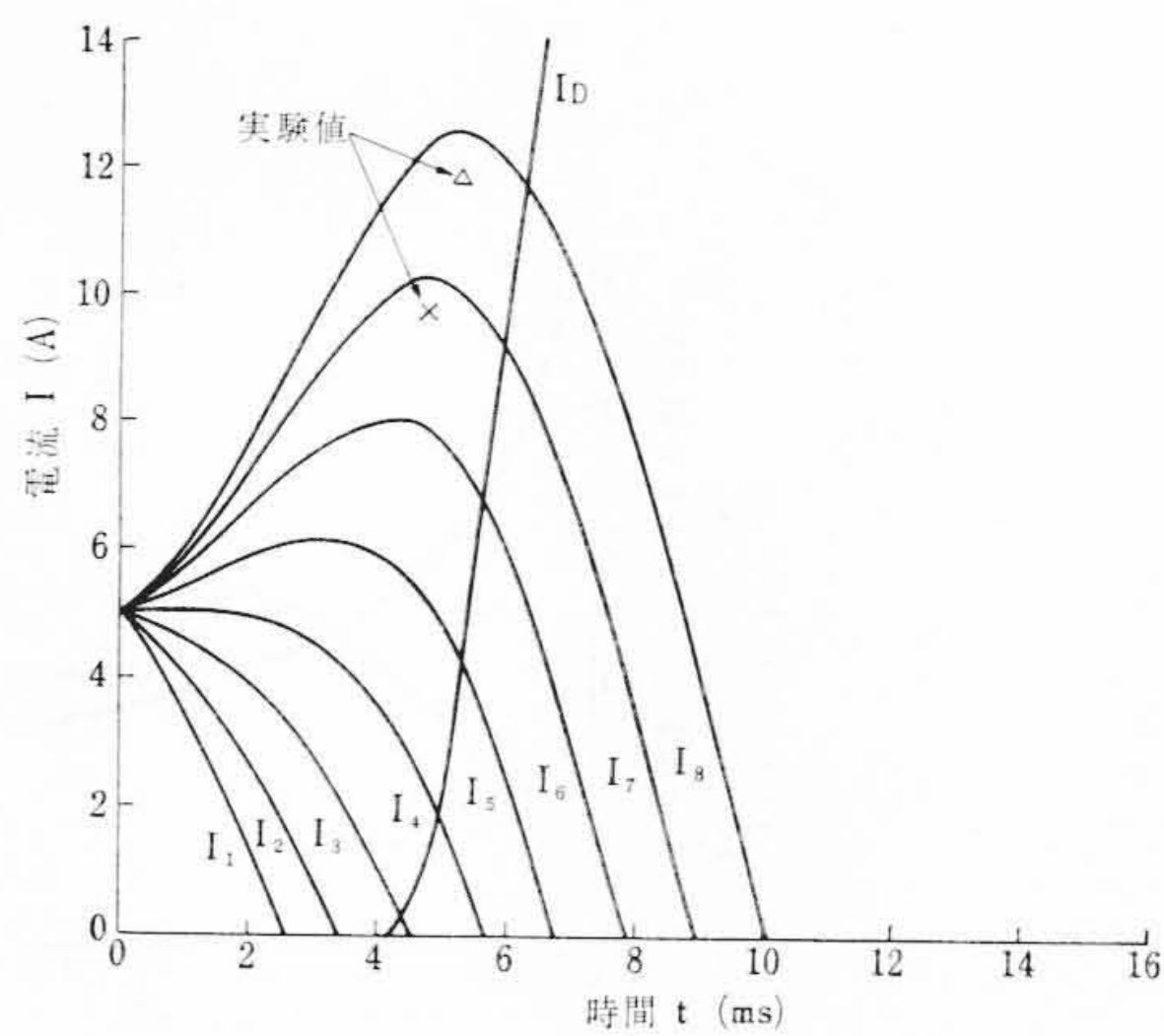


図6 バイパス・ダイオードの分流効果

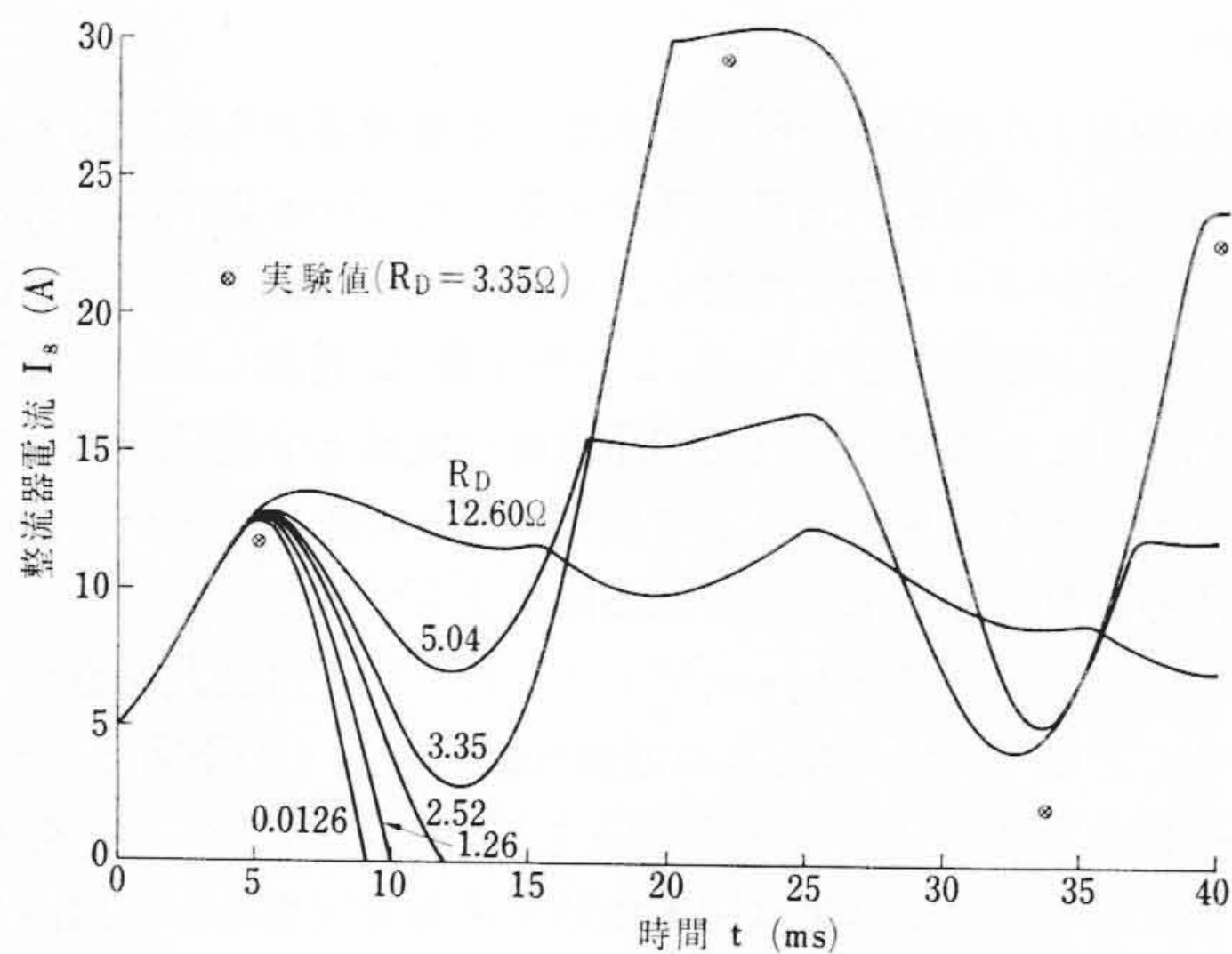


図7 バイパス回路の抵抗と効果関係

$$\left. \begin{aligned} L_A \frac{dI_k}{dt} + R_A I_k + L_L \frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^8 I_k + I_D \right) + R_L \left(\sum_{k=1}^8 I_k + I_D \right) &= e_k - E_C \\ R_D I_D &= -e_L \\ e_L &= L_L \frac{d}{dt} \left(\sum_{k=1}^8 I_k + I_D \right) + R_L \left(\sum_{k=1}^8 I_k + I_D \right) + E_C \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 e_L : 負荷端子の電圧

R_D : バイパス・ダイオードに直列にはいる抵抗

ただし、上式は $e_L < 0$ の場合のみ成立する。 $e_L \geq 0$ の場合にはバイパス・ダイオードに電流が流れないから上式において $I_D = 0$ とおけば良い。また上式には(4)式の場合と同様に「 I_k はいったんゼロになると再び通流することはない」という条件がある。

(b) 計算結果

バイパス回路のインピーダンスが小さいほどバイパス効果は大きい、実際には配線の抵抗などがあって、インピーダンスをゼロにすることはできない。

図6はバイパス回路のインピーダンスを純抵抗とし、負荷回路の抵抗分と同等の値とした場合の各整流器電流および、バイパス・ダイオードを流れる電流の計算値を示すものである。ほかの回路定数は図5の場合と同じである。図6には実験値をあわせて記入したが両者はほぼ一致している。

図7はバイパス回路の抵抗 R_D と最後に電流がゼロになる8番目の整流器電流 I_8 の関係を示したものである。同図からわかるように抵抗が大きくなるにしたがって、バイパス効果は減るが、負荷回路の抵抗分 1.26Ω と等しい程度の抵抗であればじゅうぶん

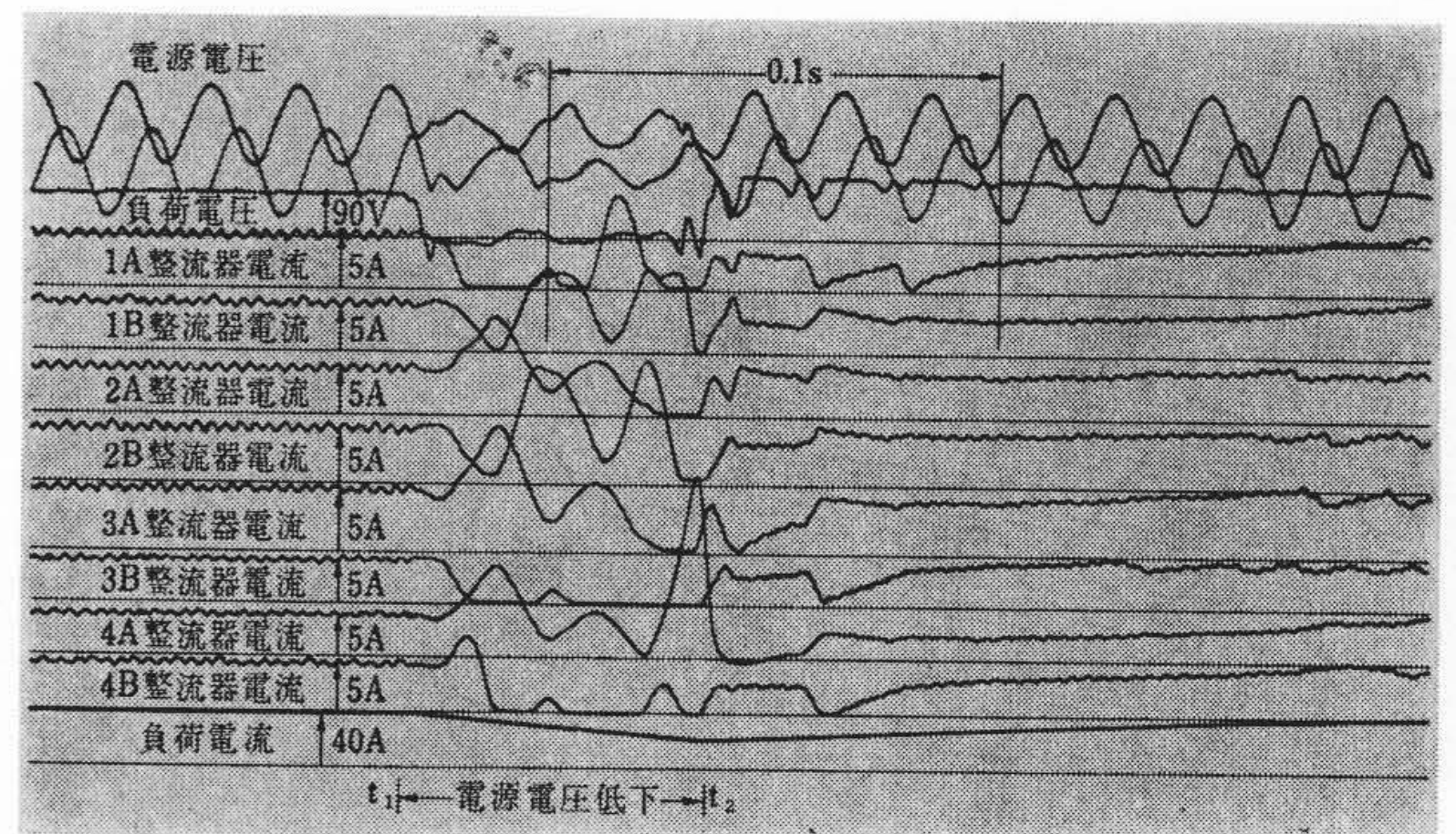


図8 電源電圧変動時の整流器電流

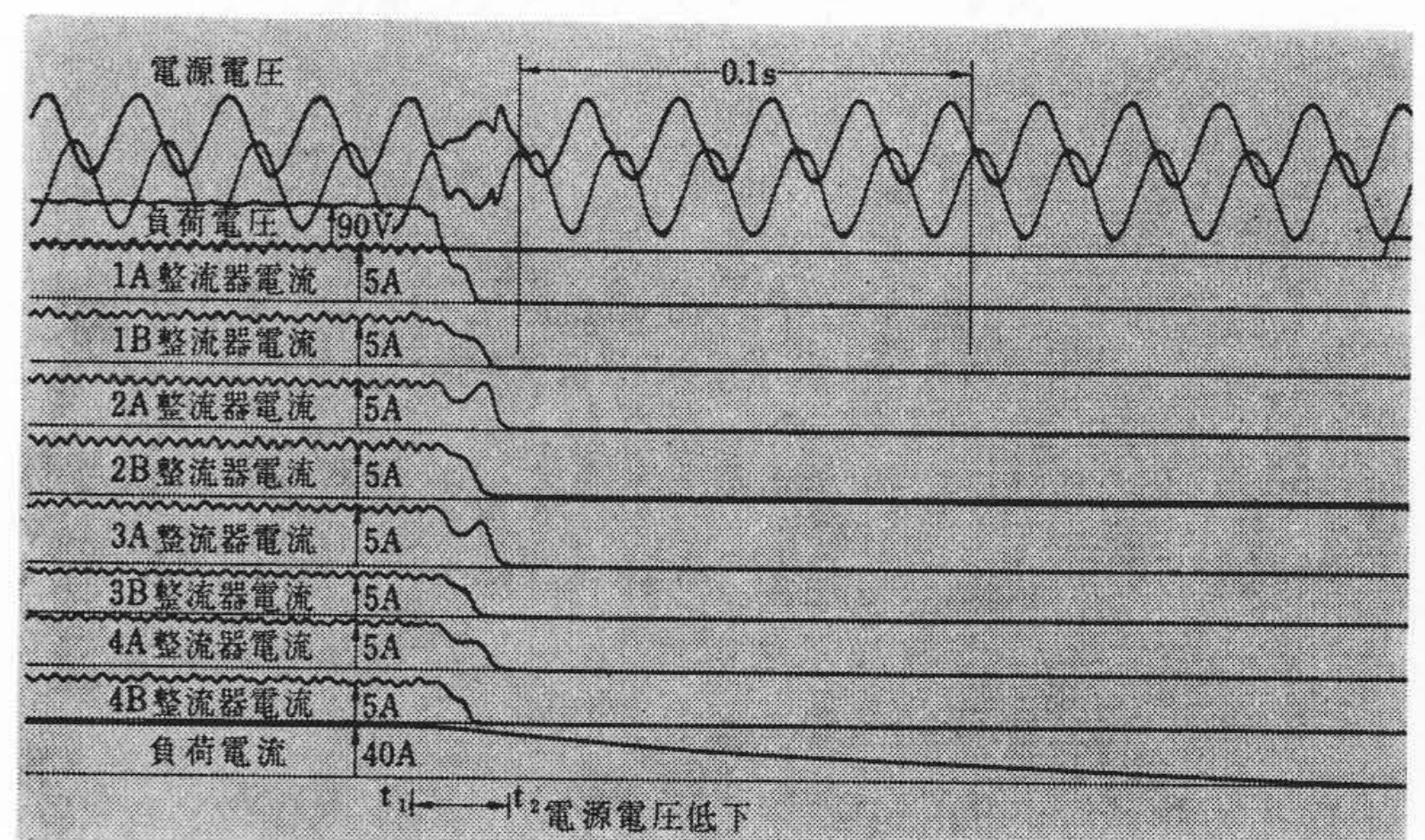


図9 電源電圧変動時の整流器電流

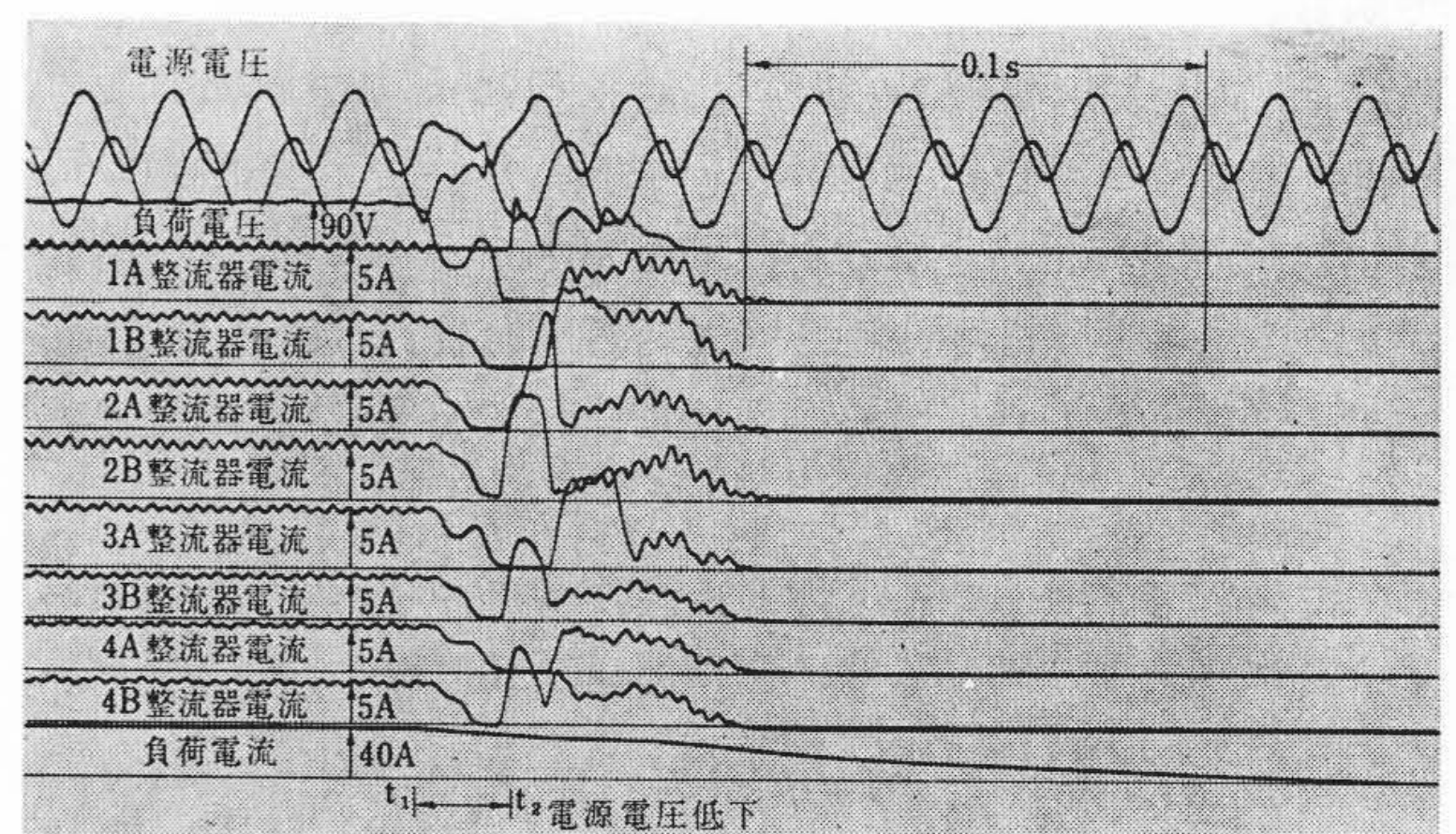


図10 電源電圧変動時の整流器電流

なバイパス効果を有することがわかる。

4. 交流電源事故時の整流器保護

前節では交流電源が正常な状態を考え、バイパス・ダイオードを設ければ、ゲート・サブレスにより電流を高速度にしゃ断できることを示した。ここでは交流電源に事故が発生し、交流電圧が約60%に低下した場合の現象をとり、このような状態でもゲート・サブレスを行なえば高速度に電流をしゃ断できることを実験結果によって示すことにする。

図8は、なんら保護動作を行わず、バイパス・ダイオードも接続しない条件で定電流制御を継続した場合のオシログラムである。 t_1 点で交流電圧を60%に低下させ、 t_2 点で正常電圧に復帰させた。図からわかるように、受電電圧が変動し、波形がひずむ場合には、点弧パルスが不整となり、各整流器電流は著しく不平衡となるので整流器保護のため装置を迅速に停止させる必要がある。

図9はバイパス・ダイオードを接続し、電源電圧低下を検出してゲート・サプレスを行なった場合のオシログラムである。このような条件でも、高速度に電流をしゃ断できることがわかる。

参考のために、ゲート・シフトを行なった場合のオシログラムを示すと図10のようになる。これは電源電圧低下を検出し、制御角 α を強制的に150度にした場合で、バイパス・ダイオードは接続されている。

電源電圧低下時は点弧位相不整のため、ゲート・シフトの効果は現われず、各整流器間で著しい分担電流の不均衡が現われている。電源電圧が正常に復帰してから、はじめてゲート・シフトの効果が現われ、各整流器の電流がほぼ平衡した状態で電流をしぼることができる。このように、電源じょう乱時を考慮すると、停止方式としてのゲート・シフトは適当でない。

5. 結 言

化学用の大電流電源装置である48相サイリスタ整流装置の各整流器要素の電流分担特性について検討を行なった。電流分担特性は特に装置停止時に問題となるが、しゃ断器の開閉を行わずに起動、停止を行なうことを考え、ゲート・サプレス時の電流分担特性を解析した。その結果、負荷回路に並列にバイパス・ダイオードを用いれば、交流電源正常時、異常時ともに1サイクル以内で確実に電流をしゃ断できることを明らかにした。

終わりに臨み、研究を進めるにあたり適切な助言をいただいた日立工場近藤主任技師、小斯波主任技師、大みか工場杉本主任技師はじめ関係各位に深甚の謝意を表する。

第 32 卷

日

立

第 4 号

目

次

- ・特集 / 明日への教育
- ・座談会 CAI と新しい人間像
- ・解説 未来教育としての CAI
- ・ルポ 現場に見る新しい教育
- ・グラフ 日立

- ・解説 高熱作業現場で活躍！日立無線ブルドーザ
無人窓ロとミニコン
- ・ルポ 日立リビングセンター
- ・PR 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

Vol. 52

日 立

評 論

No. 5

目

次

■ 論 文

- ・電力系統各種故障時の計算法とその応用
- ・発電電動機およびポンプ水車軸の振動解析
- ・交流エレベータ用二重かご形誘導電動機
- ・広幅プラネタリー圧延設備
- ・液体金属冷却高速増殖炉用機械式ナトリウムポンプ
- ・沸騰軽水形原子力発電所シミュレータ
- ・高純酸素ガス圧送用高圧遠心圧縮機
- ・電解成形研削法

- ・300t/h ニューマチックアンローダ
- ・クラスタ形燃料要素のバーンアウト熱流束
- ・新形無せきバルブトレイの蒸留特性
- ・日立キャンド水中モートル
- ・限流形ヒューズフリー遮断器の開発
- ・高感度ビジコンの特性
- ・温水ボイラ据付工事の簡略化
- ・変圧器直結ケーブル系統の電撃電位上昇の計算

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