

# 交流電気車の SCR 式無電弧連続制御の研究

## Arcless Tap Changing and Notchless Control by SCR for A.C. Locomotives and Cars

坪 井 孝\*  
Takashi Tsuboi

### 内 容 梗 概

SCR を用いて、交流電気車の無電弧タップ切換と、電圧の連続的制御を行なう方式は軽量高性能化の点ですぐれた方式である。

本稿では、まず無電弧タップ切換方式の概要を述べ、次にブリッジ形回路の動作解析を行ない、変圧器定数とタップ電流との関係を明らかにした。さらに回路構成上ならびに制御上留意すべき点を指摘し、試作装置による実験結果を示した。

### 1. 緒 言

交流電気車の電圧制御法として、可飽和リアクトルを用いた低圧側無電弧タップ切換方式が提案され<sup>(1)~(3)</sup>、わが国でも実用化されている<sup>(4)~(5)</sup>。

本方式は無電弧タップ切換という保守上の有利性はもちろんであるが、電圧の連続的制御が可能であることが、電圧変動率が小さい低圧切換方式の特長と相まって、高度の粘着性能が要求される機関車用として好適である<sup>(6)</sup>。さらに変圧器の構造簡単、軽量、タップ切換器の絶縁容易など、低圧側制御本来の特長を備えている。

ところで、SCR の大電流化、高電圧化への進歩は著しく<sup>(7)</sup>、車両用として十分実用に供しうようになってきた。可飽和リアクトルの代わりに SCR を用いれば、装置が小形軽量化されるとともに、電圧降下が格段と小さくできる利点がある。

本文では、交流電気車を対象とした SCR 式無電弧タップ切換方式の概要、動作解析、実験結果を述べる。

### 2. SCR を用いた無電弧タップ切換の原理

#### 2.1 基 本 形

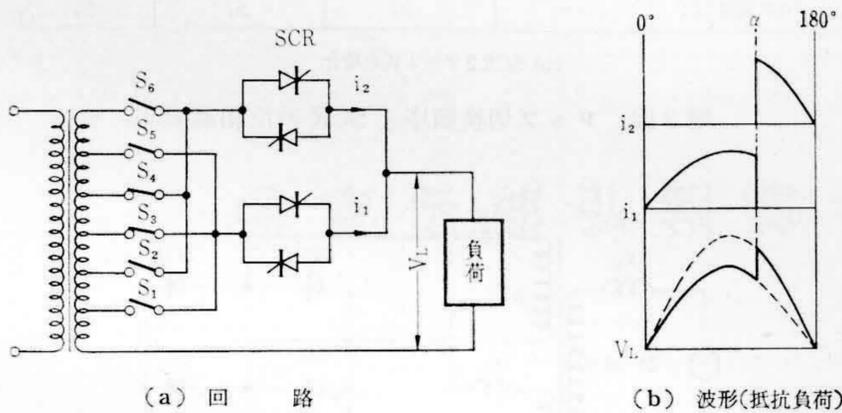
第1図に基本回路を示す。変圧器の2次側に設けた複数個のタップを、奇偶の2グループごとに負荷側を共通にして、逆並列にした2組の SCR に接続する。SCR の負荷側は共通にして負荷に接続される。

たとえば第1図(a)のごとく  $S_3$ 、 $S_4$  が閉じた状態で、 $S_3$  側 SCR を常時導通状態、 $S_4$  側を常時非導通とすれば、負荷には第3タップの電圧が印加される。逆に  $S_3$  側を非導通、 $S_4$  側を導通状態とすれば、負荷には第4タップの電圧が印加される。そして非導通側のタップには負荷電流が流れないので、無電流、無電弧タップ切換ができる。

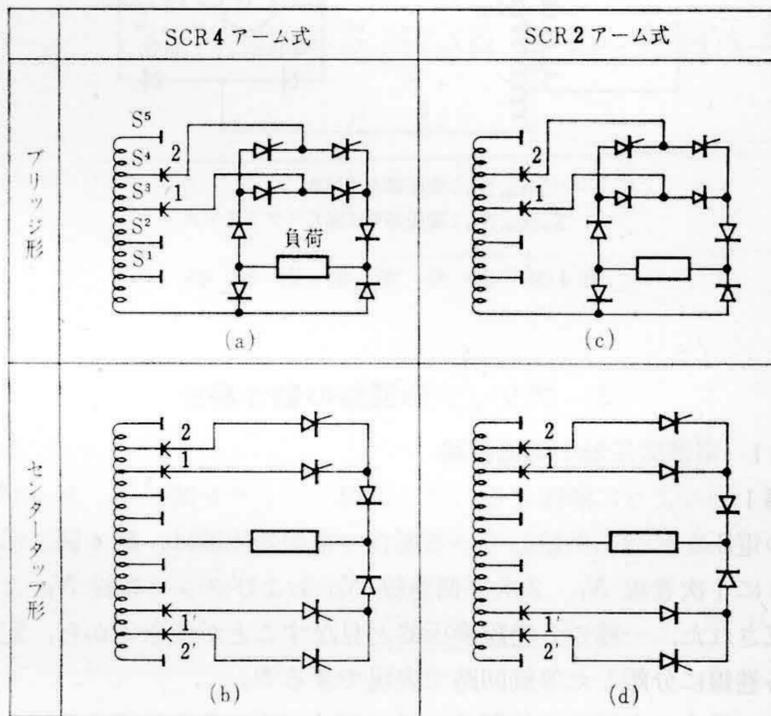
$S_3$  側 SCR が先に通流しているとき、任意の位相  $\alpha$  で  $S_4$  側 SCR を点弧すると、負荷電流は電位のより高い  $S_4$  側に移り、負荷には第1図(b)のような波形の第3、第4タップ中間の電圧が加えられる。制御角  $\alpha$  を調整すれば、負荷電圧を第3、第4タップの間で任意に調整できる。

以上の説明から明らかのように、動作中どちらか一方の SCR が導通状態となっているから、タップ位置とは無関係に、SCR に印加される電圧は順逆ともたかだかタップ間電圧である。

第1図の回路では交流出力が(整流器を追加すれば直流出力も)得られるが、一方の SCR が通電中に相手側の逆位相 SCR がミスファイアすれば、タップ間短絡を生ずるので、SCR の制御には細心の注意を要する。



第1図 SCR による無電弧タップ切換の原理説明図



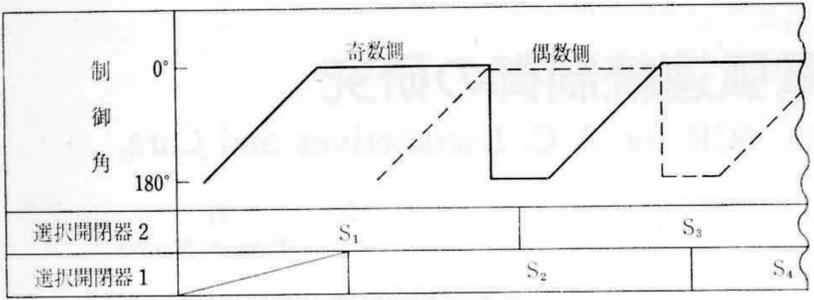
第2図 直流出力形無電弧タップ切換回路方式

#### 2.2 直 流 出 力 形

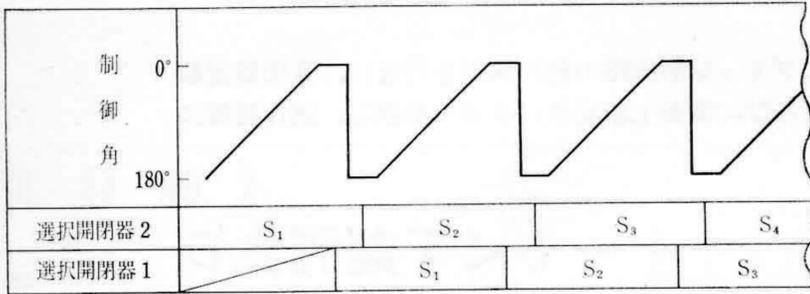
第2図に直流出力のみが得られる回路の数例を示す。これらはいずれも二つのタップにまたがる同極性の SCR または SR を、負荷側で突き合わせ、主整流器を通じて負荷に直流を供給するようにしたものである。

タップ切換法は第3図に示すとおりであり、SCR 4アーム式の場合は、2組の SCR を交互に切換え、上側に位置する SCR の位相制御により電圧調整を行なうが、SCR 2アーム式は相手側が電圧制御能力のない SR であるから、各ステップごとに常に SCR が SR より上側に位置するように、いわゆるシャクトリ虫状のタップ切換を行なう。SCR 素子数ならびに点弧装置が少ない点で、SCR 2アーム式のほうが経済的な方式といえる。

\* 日立製作所日立研究所

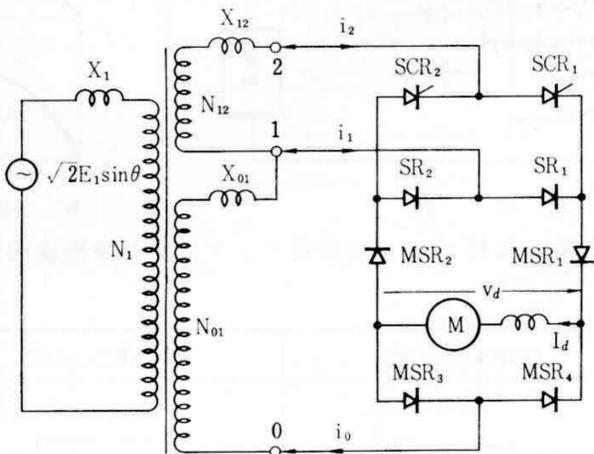


(a) SCR 4アーム式の場合



(b) SCR 2アーム式の場合

第3図 タップ切換順序とSCRの位相制御法



$N_1, N_{01}, N_{12}$ : 変圧器巻線回数  
 $X_1, X_{01}, X_{12}$ : 変圧器等価漏れリアクタンス

第4図 動作解析用回路

### 3. ブリッジ形回路の動作解析

#### 3.1 電源変圧器の等価回路

第1図のように隣接する二つの選択スイッチを閉じて、タップ中間の電圧を負荷に供給している場合の電源変圧器は、第4図に示すように1次巻線  $N_1$ 、2次下側巻線  $N_{01}$  およびタップ巻線  $N_{12}$  より構成された、一種の3巻線変圧器と見なすことができるから、定数を各巻線に分離した等価回路で表現できる<sup>(8)</sup>。

この場合、各巻線の等価インピーダンスは、その巻線の抵抗および自己漏れインダクタンスと、巻線間の相互インダクタンスを巻数比で換算した値との和である。

架線のインピーダンスは、そのまま1次等価インピーダンスに加算される。

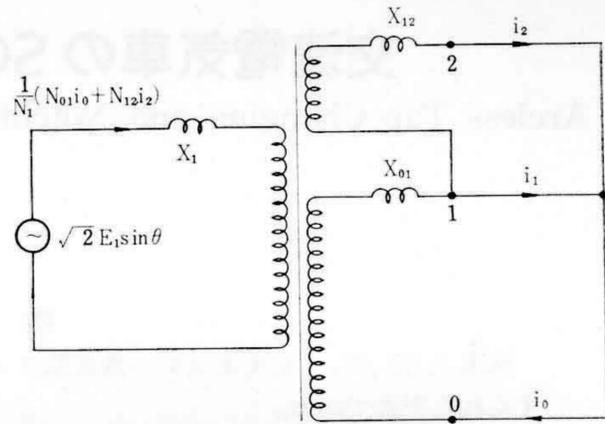
#### 3.2 動作解析用回路

第4図は動作解析の対象とした回路(ブリッジ形SCR 2アーム式)であり、各部の記号、電圧、電流を図示のように定める。変圧器のインピーダンスはリアクタンス分のみとし、抵抗分はこれを無視する。また直流電流  $I_d$  は完全に平滑化されているものとする。

なおSCR 4アーム式も、タップ中間の電圧を負荷に供給しているときは、下タップに接続されるSCRは常時導通状態にしてあるので、回路動作上は第4図と同様である。

#### 3.3 転流モード<sup>(9)</sup>

負の半サイクル後半に端子0から電動機Mを通して端子2の方向



第5図 転流時の等価回路

に流れていた電流 ( $i_0 = i_2 = -I_d$ ) は、交流電圧が正に変わった瞬間から、 $-I_d \rightarrow I_d$  へと反転する。この転流期間においては、電動機電流はMSR<sub>4</sub>、MSR<sub>3</sub>を通じて整流器回路内を循環し、第5図のように変圧器2次側端子0-1-2が短絡状態となる。

この等価回路において次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_{01}}{N_1} \left\{ \sqrt{2} E_1 \sin \theta - X_1 \left( \frac{N_{01}}{N_1} \frac{di_0}{d\theta} + \frac{N_{12}}{N_1} \frac{di_2}{d\theta} \right) \right\} \\ - X_{01} \frac{di_0}{d\theta} = 0 \\ \frac{N_{12}}{N_1} \left\{ \sqrt{2} E_1 \sin \theta - X_1 \left( \frac{N_{01}}{N_1} \frac{di_0}{d\theta} + \frac{N_{12}}{N_1} \frac{di_2}{d\theta} \right) \right\} \\ - X_{12} \frac{di_2}{d\theta} = 0 \\ i_0 = i_1 + i_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_{01}}{N_1} E_1 = E_{01}, \quad \frac{N_{12}}{N_1} E_1 = E_{12} \\ \left( \frac{N_{01}}{N_1} \right)^2 X_1 = X_{01}', \quad \left( \frac{N_{12}}{N_1} \right)^2 X_1 = X_{12}' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

とおき、初期条件 ( $\theta=0$  で  $i_0 = i_2 = -I_d$ ) を入れて(1)式を解けば

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= \frac{\sqrt{2} X_{12} E_{01}}{X_{01} X_{12} + X_{01} X_{12}' + X_{01}' X_{12}} (1 - \cos \theta) - I_d \\ i_1 &= \frac{\sqrt{2} (X_{12} E_{01} - X_{01} E_{12})}{X_{01} X_{12} + X_{01} X_{12}' + X_{01}' X_{12}} (1 - \cos \theta) \\ i_2 &= \frac{\sqrt{2} X_{01} E_{12}}{X_{01} X_{12} + X_{01} X_{12}' + X_{01}' X_{12}} (1 - \cos \theta) - I_d \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

を得る。

SCRを常時導通状態に保っているとき、 $i_0, i_1, i_2$ のうち、どれが最初に  $I_d$  または  $-I_d$  に達するかによって、転流現象を分類すれば、第6図のように四つの転流モードに分類できる。これら四つのモードの境界条件は、(3)式より  $i_0, i_1, i_2$  が  $I_d$  または  $-I_d$  に達する角度  $\theta_0 (i_0 = I_d), \theta_1 (i_1 = I_d), \theta_1' (i_1 = -I_d), \theta_2 (i_2 = I_d)$  を計算し、これらの大小関係より

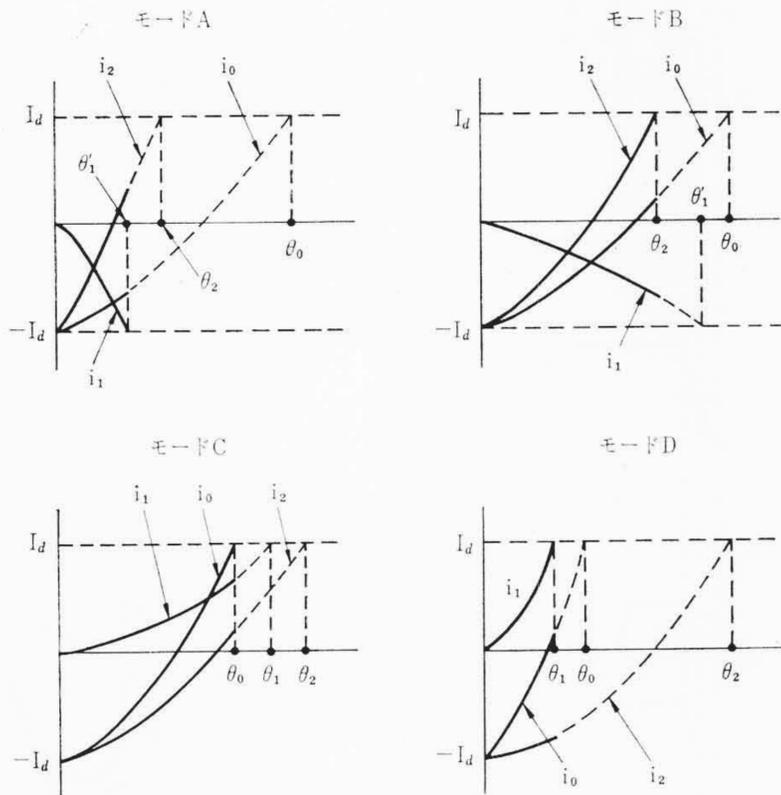
$$\delta = \frac{X_{12} E_{01}}{X_{01} E_{12}} \dots\dots\dots (4)$$

の値に対して次のように求まる。

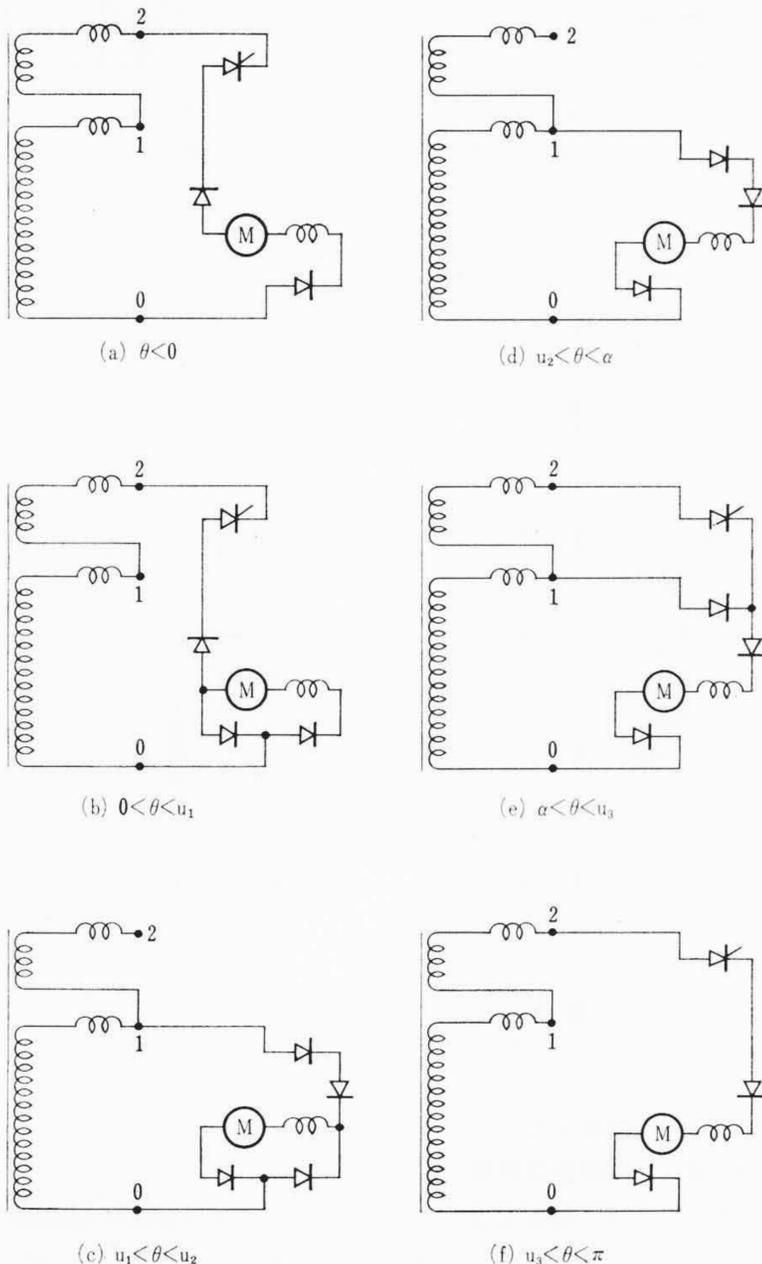
$$\left. \begin{aligned} \text{モード A: } & \delta < 0.5 \\ \text{モード B: } & 0.5 < \delta < 1 \\ \text{モード C: } & 1 < \delta < 2 \\ \text{モード D: } & 2 < \delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$\delta$  は変圧器2次下側巻線とタップ巻線との、電圧/リアクタンスの比であり、 $\delta=1$  は各巻線のリアクタンスがそれぞれの電圧に比例していることを意味する。

さて、このようにして  $i_0, i_1, i_2$  のうちいずれかが  $I_d$  または  $-I_d$



第6図 転流時の変圧器2次端子電流の変化状態



第7図  $\delta=1$  の場合の整流器導通順序 (a→b→……→f)

に達すると、2次側全短絡状態が終わり、ついで端子0-1または0-2のみの短絡状態を経て、回路は整流状態に復帰する。

3.4  $\delta=1$  の場合の解析

$\delta=1$ 、すなわち変圧器2次下側巻線とタップ巻線の等価漏れリアクタンス  $X_{01}$ ,  $X_{12}$  が、それぞれの無負荷電圧実効値  $E_{01}$ ,  $E_{12}$  に比例している場合の、正半サイクルにおける整流器導通順序は第7図の

ようになる。

すなわち負半サイクル後半の通流状態(a)から、(b), (c)なる転流期間(この間直流回路の循環電流は  $MSR_4-MSR_3$  側のみを通るとした。 $MSR_2-SR_2-SR_1-MSR_1$  側は  $MSR_4-MSR_3$  側より整流素子直列数が多いのが普通であるから、実際にもこのようになる)を経て、(d)では下タップから電力が負荷へ供給される。 $\theta=\alpha$  で上側タップのSCRが点弧されると、(e)なる下タップから上タップへの転流状態を経て、(f)のように上側タップから電力が供給されるようになり、正半サイクルを終了する。

(i)  $0 < \theta < u_1$  (第7図(b))

$i_0, i_2$  が  $-I_d$  から 0 に達するまでの期間で、 $i_0, i_1$  は

$$\left. \begin{aligned} i_0 = i_2 &= \frac{\sqrt{2}(E_{01} + E_{12})}{X_{01} + X_{12} + X_{02}'} (1 - \cos \theta) - I_d \\ X_{02}' &= \left( \frac{N_{01} + N_{12}}{N_1} \right)^2 X_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$X_{01}, X_{12}, E_{01}, E_{12}$  は(2)式

となる。端子0-1-2間は短絡状態であるから、直流電圧および各整流器の電圧はいずれも0である。

この期間の終わる角度  $u_1$  は(6)式より次のようになる。

$$u_1 = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{X_{01} + X_{12} + X_{02}'}{\sqrt{2}(E_{01} + E_{12})} I_d \right) \dots\dots\dots (7)$$

(ii)  $u_1 < \theta < u_2$  (第7図(c))

$i_0, i_1$  が 0 から  $I_d$  に達するまでの期間で、端子0-1間が短絡状態となっている。直流電圧は依然として0であり、 $SCR_1, SCR_2$  にはそれぞれ順および逆方向にタップ間電圧が印加される。 $i_0, i_1$  は

$$i_0 = i_1 = \frac{\sqrt{2} E_{01}}{X_{01} + X_{01}'} (\cos u_1 - \cos \theta) \dots\dots\dots (8)$$

となり、この期間の終了する角度  $u_2$  は

$$u_2 = \cos^{-1} \left( \cos u_1 - \frac{X_{01} + X_{01}'}{\sqrt{2} E_{01}} I_d \right) \dots\dots\dots (9)$$

(iii)  $u_2 < \theta < \alpha$  (第7図(d))

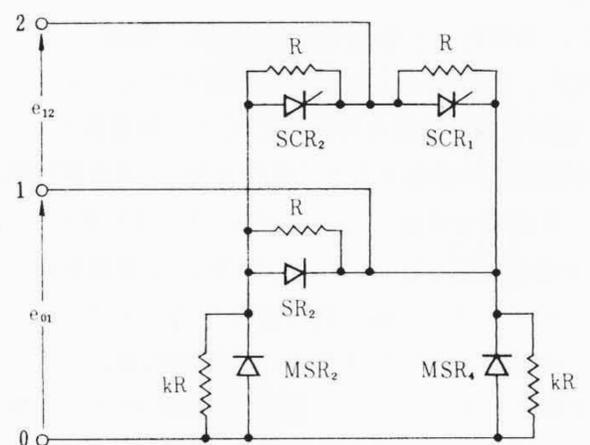
下側巻線が負荷に電力を供給する期間で、

$$\left. \begin{aligned} i_0 = i_1 &= I_d \\ v_a &= e_{01} (= \sqrt{2} E_{01} \sin \theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

である。

この期間の整流器の電圧分担に関しては、第8図のようにSCRおよびSRの並列抵抗を  $R$ 、 $MSR$ の並列抵抗を  $kR$  とすれば(サージ電圧などの高周波電圧の分担には別にR-C分圧回路を設ける必要があるが、ここでは基本周波に対する分圧のみを取り扱う)、オフ状態にある  $SCR_1$  には順方向にタップ間電圧  $e_{12}$  がかかり、 $MSR_4$  には下側タップの電圧  $e_{01}$  が逆方向にかかる。

一方  $SCR_2, SR_2, MSR_2$  については、 $k < e_{01}/e_{12}$  ならば、 $SCR_2$  のアノード側の電位が端子1よりも低くなり、 $SCR_2$  にはタップ



第8図  $u_2 < \theta < \alpha$  における整流器の電圧分担

間電圧  $e_{12}$  以上の逆電圧が印加されるが、 $k > e_{01}/e_{12}$  ならば、 $SCR_2$  の逆電圧は  $e_{12}$ 、 $MSR_2$  の逆電圧は  $e_{01}$  となり  $SR_2$  には電圧がかからない。

このように SCR の順または逆方向電圧をタップ間電圧以下に押えるには、MSR と SCR の分圧抵抗の比  $k$  を

$$k > \left( \frac{E_{12}}{E_{01}} \right)_{\max} \dots\dots\dots (11)$$

とすべきである。

(iv)  $\alpha < \theta < u_3$  (第7図(e))

タップ間の転流期間であり、 $i_1$  が  $I_d$  から 0、 $i_2$  が 0 から  $I_d$  まで変化する。この間端子 1-2 が短絡状態となり

$$i_2 = I_d - i_1 = \frac{\sqrt{2} E_{12}}{X_{12} + X_{12}'} (\cos \alpha - \cos \theta) \dots\dots\dots (12)$$

となり、この期間の終了する角度  $u_3$  は

$$u_3 = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{X_{12} + X_{12}'}{\sqrt{2} E_{12}} I_d \right) \dots\dots\dots (13)$$

となる。

またこの間 1 次電流がタップ巻線の起磁力分だけ増加し、これにより 1 次側漏れリアクタンスによる電圧降下が生ずる。このため端子 0-1 間の電圧が若干降下し

$$v_d = v_{01} = \frac{X_{12}}{X_{12} + X_{12}'} E_{01} \sin \theta \dots\dots\dots (14)$$

となる。 $SCR_2$  の逆電圧は(14)式の  $v_{01}$  が  $R/2$  ( $SCR_2$  と  $SR_2$  とが並列) と  $kR(SCR_2)$  とで分圧された値であり、(11)式が満足されているならばタップ間電圧より小さい。

(v)  $u_3 < \theta < 180^\circ$  (第7図(f))

上側タップから電力が供給される期間であり、直流電圧は  $\sqrt{2}(E_{01} + E_{12}) \sin \theta$  となる。また電圧分担は  $SR_1$  にタップ間電圧が逆方向にかかるほかは(iii)の場合と同様である。

以上の  $\delta=1$  の場合の動作を概略述べたが、これより各部波形を描くと第9図のようである。直流電圧平均値  $V_d$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{u_2}^{\alpha} \sqrt{2} E_{01} \sin \theta d\theta + \int_{\alpha}^{u_3} \frac{X_{12}}{X_{12} + X_{12}'} \right. \\ &\quad \times \sqrt{2} E_{01} \sin \theta d\theta + \int_{u_3}^{\pi} \sqrt{2} (E_{01} + E_{12}) \sin \theta d\theta \left. \right\} \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_{01} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_{12} \frac{1 + \cos \alpha}{2} - \frac{2}{\pi} \\ &\quad \times \left\{ (X_{01} + X_{01}') + \frac{(X_{12} + X_{12}')}{2} + \sqrt{X_{01}' X_{12}'} \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

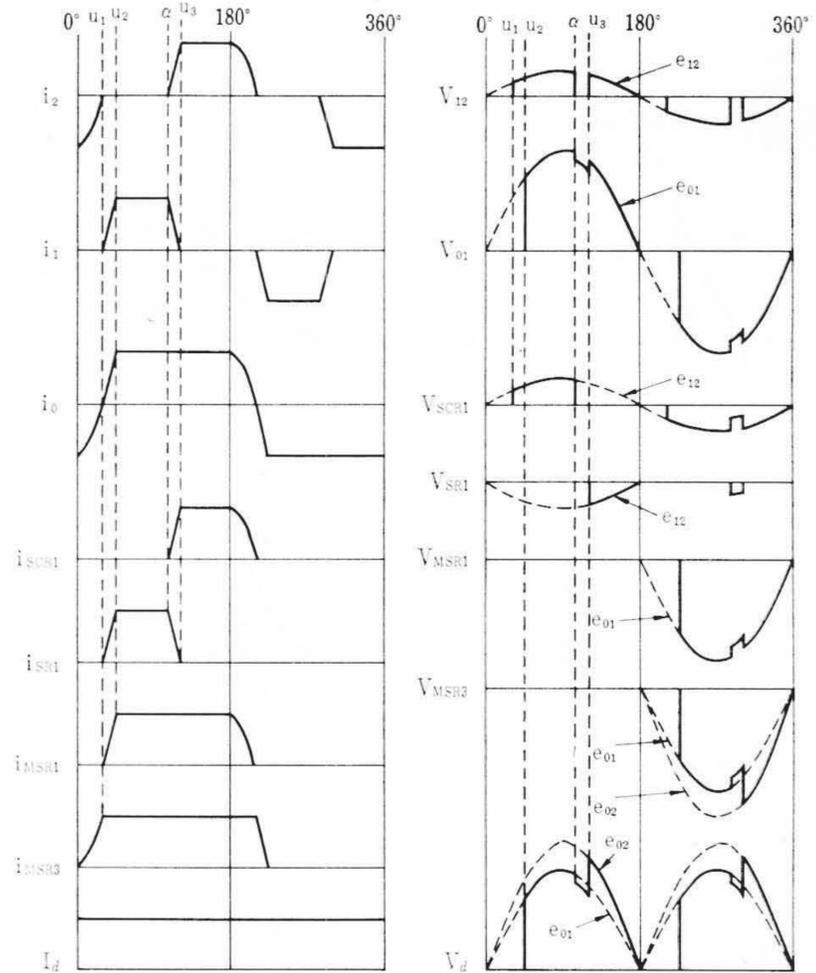
(15)式の第1項、第2項は無負荷電圧であり、第3項は転流リアクタンス降下である。

一方タップ電流  $i_1, i_2$  は制御角  $\alpha$  に対して第9図に示すような波形となり、その平均値が  $\alpha$  に対してほぼ直線的に増減する。そして  $\alpha=180^\circ$  では下タップが全負荷電流を負担し、 $\alpha=u_1$  では上タップが全負荷電流を負担する。

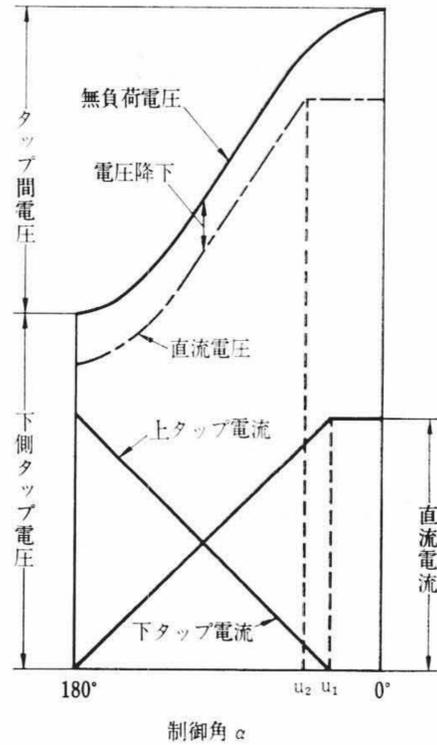
第10図は制御角  $\alpha$  と整流器無負荷電圧、転流リアクタンス降下、直流端子電圧、およびタップ電流の関係を示したものである。

SCR を制御する移相器の特性としては、無電弧タップ切換上  $0 \sim 180$  度の移相範囲が必要であり(重なり角  $u_1$  は負荷状態によって変化するから  $0$  度まで考慮する必要がある)、また  $0^\circ < \theta < u_1$  では変圧器 2 次側は短絡状態となっており、SCR には順電圧が印加されないことから、ゲートパルス幅を最大重なり角以上しておく必要がある。さらに移相器入力対直流電圧の直線性の良いことも望ましい。

なお第9図に示すように、主整流器 MSR のアーム電流が、SCR 側 ( $MSR_1, MSR_2$ ) と反 SCR 側 ( $MSR_3, MSR_4$ ) とで異なっており、重なり角  $u_2$  が  $60$  度のときで  $87$  対  $113\%$  のアンバランスが生ずる



第9図  $\delta=1$  の場合の各部波形 (電圧、電流記号は第4図に対応)



第10図 制御角  $\alpha$  と無負荷電圧、直流電圧タップ電流との関係

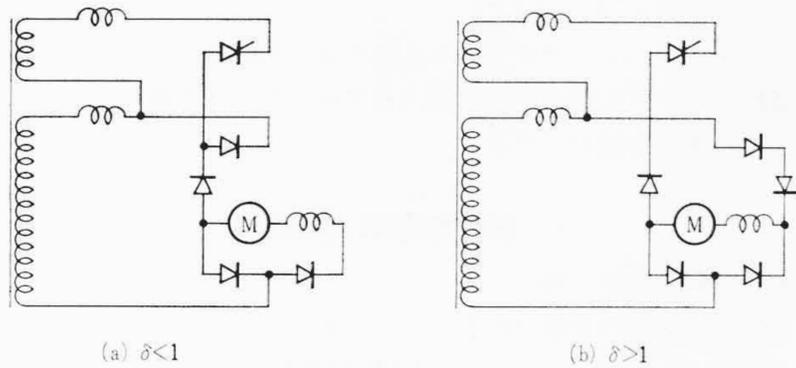
ので、設計上留意する必要がある。

### 3.5 $\delta \neq 1$ の場合の波形

$\delta \neq 1$ 、すなわち変圧器 2 次以下側巻線とタップ巻線の等価漏れリアクタンスの比  $X_{01}/X_{12}$  が、電圧比  $E_{01}/E_{12}$  に等しくない場合には、さきに考察したように、転流期間中、下側タップの電流  $i_1$  が 0 とならない。

負半サイクルから正半サイクルにはいった直後の、第7図(b)に相当する整流器通流状態は、第11図に示すように、 $\delta < 1$  ならば  $SR_2$  が通流し、 $\delta > 1$  ならば  $SR_1$  が下側タップ電流  $i_1$  を流す。以下、各転流モードごとに異なった導通順序をたどる。これらについて詳細に述べることは省略し、一部の波形を示すだけにとどめる。

第12図は  $1 < \delta < 2$  (モードC) における主要部の波形であり、



第11図  $\delta=1$  の場合の転流時の整流器導通状態

$\alpha=0^\circ$  としても下側タップに図示のような三角波状の電流が残る。この電流の波高値  $I_{1m}$  は、(3)式を用いて  $i_0=I_d$  となるときの ( $\theta=\theta_0$ , モードCであるから) の  $i_1$  の値として求まり、次のようになる。

$$I_{1m} = 2I_d \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \dots\dots\dots (16)$$

他の場合も同様にしてタップ電流波形を求めることができ、これらを整理して示したのが第13図である。図示のように漏れリアクタンスが極端にかたよっている場合 ( $\delta < 0.5$ ,  $\delta > 2$ ) には、 $\alpha=0^\circ$  としたとき下側タップに残る電流の波高値は直流電流  $I_d$  に達する。

SCR 2アーム式の回路において、タップ上げ動作のとき、転流期間中に下タップのスイッチを開くと、上述の電流を遮断することになるので、無電弧タップ切換上、変圧器はできるだけ

$$\delta = 1 \dots\dots\dots (17)$$

なる理想的条件を満足するようにつくるべきである。

下側タップにもSCRを用いた4アーム式においては切換前にあらかじめSCRで下側タップの残留電流を絞った後、タップ切換が行なえるから問題はない。

あるいは、第14図のように下側タップの回路に補助的に可飽和リアクトルをそう入し、切換前にリアクトルを非飽和状態とし、残留電流を抑制してもよい。

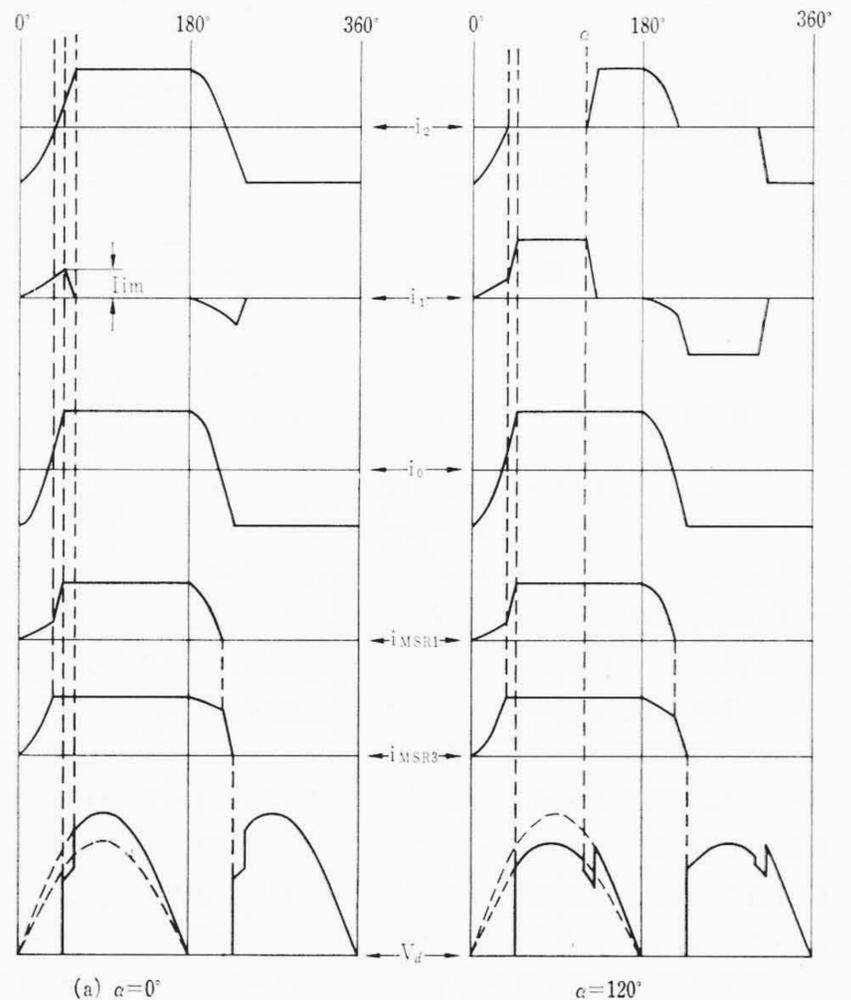
3.6 下側タップの転流時開極電圧

上側タップのSCRの制御角  $\alpha=0^\circ$  として、下側タップを開いたとき、転流期間中にスイッチ極間に現われる電圧は、上述の下側タップの残留電流を遮断する際の開極電圧であり、またSCR 4アーム式において下側タップのSCRで残留電流を抑制した場合、SCRのAK間に加わる電圧でもあり、さらに可飽和リアクトルを用いる場合には、リアクトルで吸収させるべき電圧である。

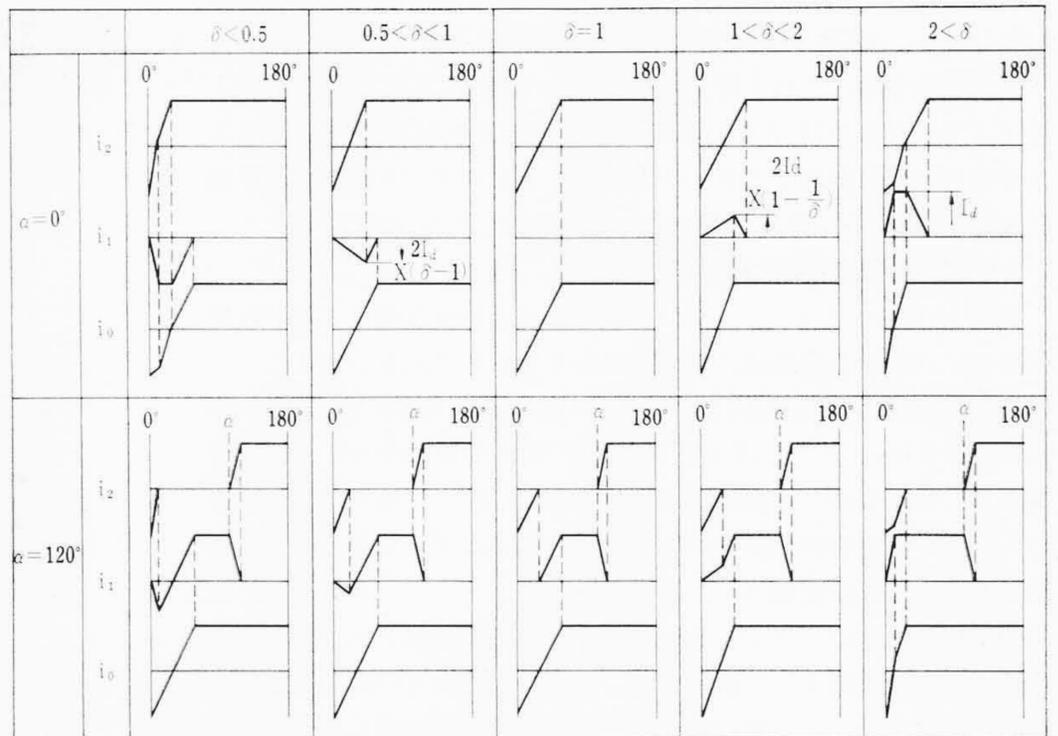
この開極電圧  $\Delta e$  は、第15図の等価回路より次のようになる。すなわち等価回路において

$$\left. \begin{aligned} & \frac{N_{01} + N_{12}}{N_1} \left( \sqrt{2} E_1 \sin \theta \right) \\ & - X_1 \frac{N_{01} + N_{12}}{N_1} \frac{di}{d\theta} \\ & - (X_{01} + X_{12}) \frac{di}{d\theta} = 0 \\ \Delta e &= \frac{N_{01}}{N_1} \left( \sqrt{2} E_1 \sin \theta \right) \\ & - X_1 \frac{N_{01} + N_{12}}{N_1} \frac{di}{d\theta} \\ & - X_{01} \frac{di}{d\theta} \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

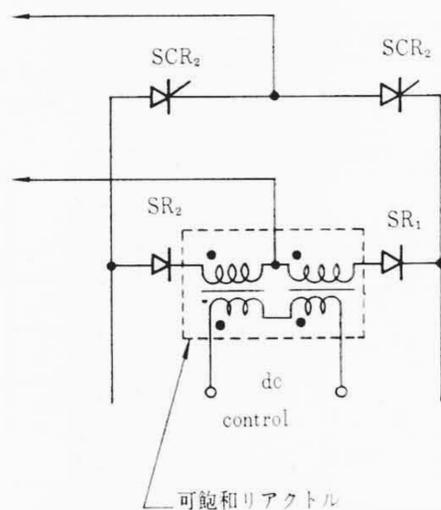
が成立するが、(2)式ならびに(6)式で定義された  $E_{01}$ ,  $E_{12}$ ,  $X_{01}$ ,  $X_{12}$ ,  $X_{02}'$  を用いて、(18)式より  $\Delta e$  を求めると



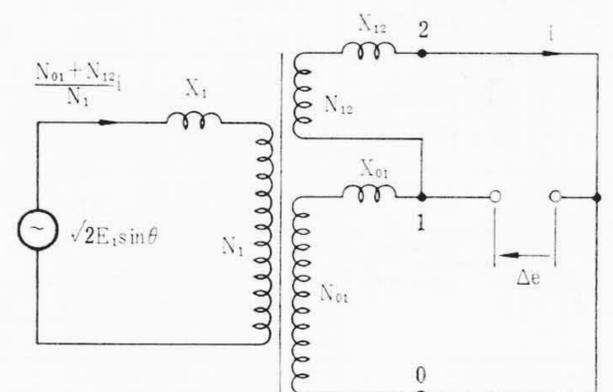
第12図  $1 < \delta < 2$  の場合の各部波形



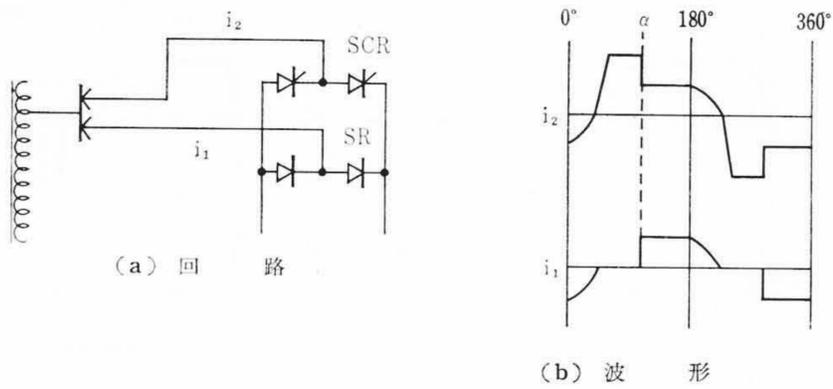
第13図  $\delta$  の値とタップ電流波形 (概略図)



第14図 下側タップ残留電流抑制のため可飽和リアクトルをそう入した回路



第15図 下側タップを開いた場合の転流時等価回路



第16図 SCR と SR が同一タップに接続された場合

$$I_e = \frac{\sqrt{2}(X_{12}E_{01} - X_{01}E_{12})}{X_{01} + X_{12} + X_{01}'} \sin \theta \dots\dots\dots (19)$$

を得る。 $\delta=1$  すなわち  $X_{12}E_{01} = X_{01}E_{12}$  ならば  $I_e=0$  となり、また  $\delta \neq 1$  の場合は第13図の残留電流に対応して、転流期間中のみ電源電圧と同相 ( $\delta > 1$ ) または逆相 ( $\delta < 1$ ) の電圧が現われる。

3.7 SCR と SR が同一タップに接続された場合

タップ切換過程において、第16図(a)のように SCR と SR が同一タップに接続されるが、この場合は同図(b)のように、SCR が点弧されてから後は、SCR と SR の順方向電圧電流特性によって定まる割合で、負荷電流が分流する。 $\alpha=0^\circ$  としても SR 側電流は0とならないが、このような状態で SR 側スイッチを開いても、遮断電圧は SCR の順方向電圧降下分 (1~2V程度) であり、アークはほとんど生じない。

ただし SCR 通過電流が保持電流に達していない場合には、ゲート電流が流れていない瞬間に SR 側スイッチを開くと、SCR が導通しないから、SCR が過電圧となると同時に、SR 側スイッチがアークを発生する。これを防止するには、必ず SCR に保持電流以上流すようにするか(たとえば SR の順電圧降下を SCR のそれより大とするとか、可飽和リアクトルなどのインピーダンス要素を SR 側に入れる)、ゲート電流を半サイクル以上流しておけばよい。

3.8 SCR 故障時の現象とその保護

SCR にブレイクオーバ、ブレイクダウンまたは点弧ミスなどの故障が生じた場合の現象は、第1表に示すとおりである。

SCR に印加される電圧は通常タップ間電圧以下であるが、第1表に示すように、たとえばタップ渡り時 SCR が単独でタップに接続されている場合に、点弧回路の故障によりゲート信号が消失したり、あるいは点弧角が0度からある程度以上はずれても、SCR に変圧器2次全電圧が印加され、過電圧となる。

過電圧となれば、ブレイクオーバ電圧が最小の素子にかかり、その素子に電流が集中して焼損する。これを防止するには、過電圧を検出して全素子をいっせいに点弧する過電圧保護装置を設けるか、

第1表 SCR 故障時の現象

回路	故障の種類	故障SCR	健全アーム	備考
2アーム式 上下タップ	全素子点弧ミス			
	1素子B.O	過電流		$\alpha$ による
	1素子B.D	過電流	過電圧	タップ間短絡
	同上	同上	同上	同上
2アーム式 同一タップ	全素子点弧ミス			
	1素子B.O	過電圧		$\alpha$ による
	1素子B.D	過電流		$\alpha$ による
	同上	同上	同上	同上
4アーム式 上下タップ	下側全素子点弧ミス			
	上側1素子B.O	過電圧		$\alpha$ による
	上側1素子B.D	過電流		
	上側全素子点弧ミス	過電流	過電流	上側 $\alpha$ による
	下側1素子B.D	過電流	過電流	タップ間短絡
SCR 単独	全素子点弧ミス	過電流		
	1素子B.D			

B.O: ブレイクオーバ(SCR→SR) B.D: ブレイクダウン(SCR→Short)

従属点弧方式を用いればよい。

また素子のブレイクダウンによるタップ間短絡に対しては、高速遮断ヒューズを設け、故障素子をすみやかに切り離してやれば、異常なく運転を続行できる。

4. 試作装置による実験

4.1 SCR 本体

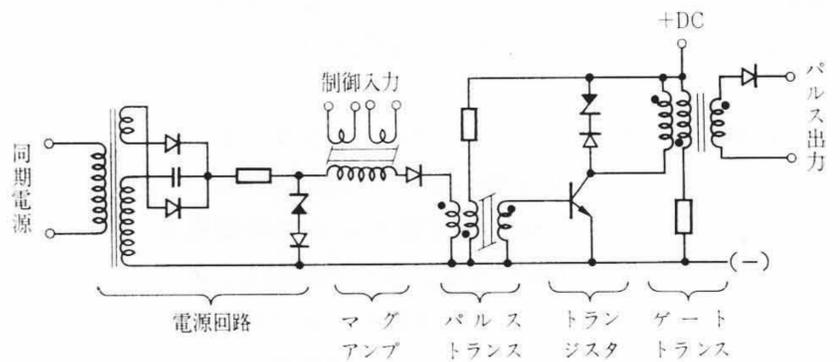
試作した装置の仕様は次のとおりである。

- 方式 2アーム SCR 制御方式
- 電流 2,040A 連続
- 電圧 96V<sub>eff</sub> 50c/s
- 素子 500V 250A 1S×12P×2A

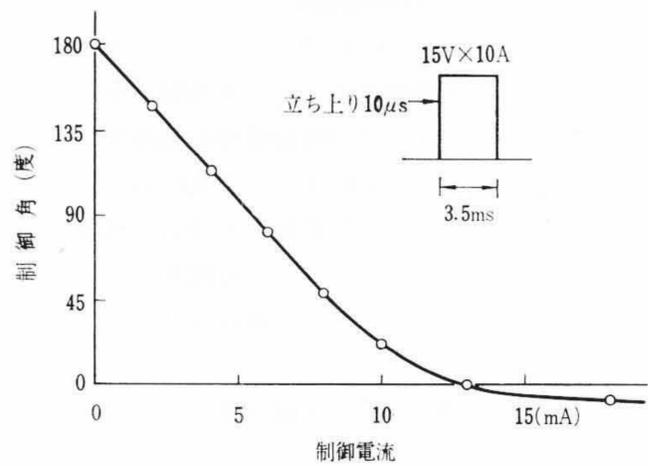
4.2 パルス移相器<sup>(10)</sup>

第17図は試作したパルス移相器の原理図である。おもな特長は

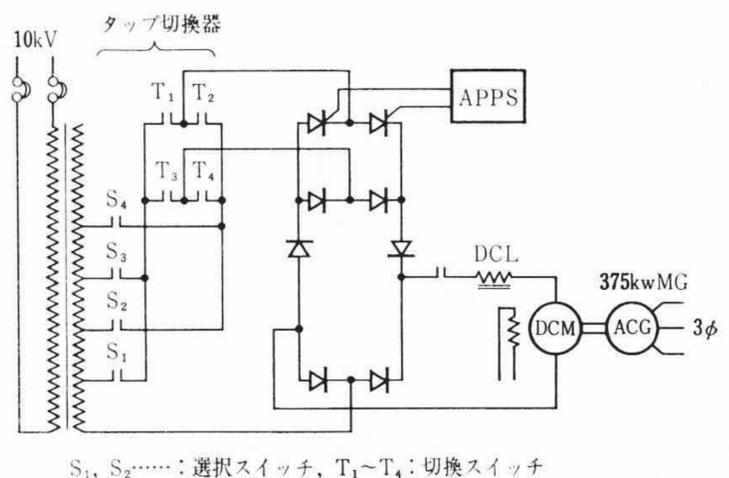
- (1) 移相範囲を拡大するため、電源回路に負半波で充電されるコンデンサをそそうした。
- (2) 電源電圧をツェナーダイオードでクリップして安定化した。
- (3) パルスは飽和トランスで形成した。
- (4) ゲートトランスにはリセット巻線を設け、磁束を有効に利用しているから、大出力 (15V×10A×3.5ms) にもかかわ



第17図 パルス移相器原理図

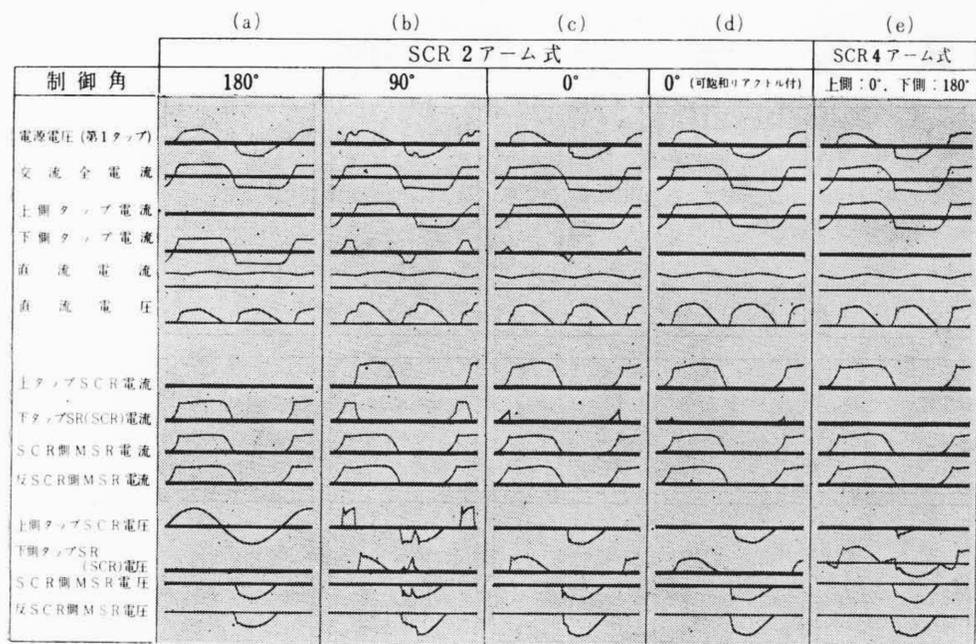


第18図 移相特性



S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>……: 選択スイッチ, T<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>: 切換スイッチ

第19図 組合せ試験回路概略結線図



〔試験条件〕 タップ間電圧: 100V, タップ: 第2-第3タップ 直流電流: 800A

第20図 動作波形オシログラムの一例

らず小形化されている。

移相特性を第18図に示す。電圧変動±20%, 温度-15~55°Cに対して, 位相角変動は±3度以下である。

4.3 組合せ試験

第19図のような試験回路を構成し, 組合せ試験を行なった。動作波形の一例を第20図に示す。制御角 $\alpha=0^\circ$ としたとき(同図(c)), 下側タップに電源電圧と同極性の三角波状電流が残っている。すなわち転流モードC ( $1 < \delta < 2$ ) である。

第14図のように可飽和リアクトルをそう入すると, 第20図(d)のように下側タップの残留電流は, リアクトルの励磁電流で抑制できる。また下側タップもSCRにすれば, (e)のようになる。

このほか, 並列SCRの電流分担試験, 連続運転, 誘導試験, タップ切換器との連動試験, 事故想定試験など各試験を行なった結果,

SCR, 制御装置および保護装置は所期のとおりまったく正常に動作することが確かめられた。

5. 結 言

SCRを用いた交流電気車の無電弧タップ切換方式の概要を述べ, ブリッジ形回路の動作解析を行ない, 回路構成上ならびに制御上留意すべき点を検討した。

本文では詳述しなかったが, SCRの並列運転, スイッチングパワー, 過電圧過電流保護, ゲート制御法などについては, それぞれ徹底的に検討を行なっており, 過酷な条件下で使用される車両用として, 十分使用に耐えうる技術的見通しが得られている。

SCRの大電流化, 高耐圧化の傾向はますます急であり, 直並列技術の進歩, 大量生産によるコストダウンと相まって, タップ切換なしの全位相制御方式など, 全面的にSCRを電気車主回路を取り入れる日も近いものと思われる。

終わりに, ご指導いただいている日本国有鉄道をはじめ, 日立製作所日立工場, 水戸工場, 日立研究所の各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) H. Hackstein: Electr. Bahnen, Heft 2 (31. Jahrg. 1960) S. 25
- (2) 坪井: 昭36電気学会東京支部大会 No.306 (昭36-11)
- (3) T. B. Burnett, G. W. Graham: Proc. I. E. E., 109 A, P. 379 (Oct. 1962)
- (4) 北岡, 白庄司, 鶴田: 三菱電機技報 38, 746 (昭39-5)
- (5) 武井, 川上, 佐々木: 日立評論 46, 1804 (昭39-11)
- (6) 坪井: 昭38電気学会連合大会 No.1066 (昭38-4)
- (7) 毛利, 浅野, 曾根田: 日立評論 46, 525 (昭39-3)
- (8) 電気学会編: 大学講座, 変圧器
- (9) 坪井: 昭39電気学会東京支部大会 No.295
- (10) 石塚, 坪井: 昭39電気学会東京支部大会 No.297

Vol. 47 日 立 評 論 No. 3

目 次

- ・自然汚損ガイシの塩分付着量と人工汚損試験との関連
- ・多周波信号方式による産業用遠隔制御
- ・研究用原子炉(JRR-4)の計測制御装置
- ・京都大学原子炉研究所納日立パワーマネプレータ
- ・インド国鉄納250V 24,000kW交流電気機関車
- ・東海道新幹線軌道試験車第2号機測定装置
- ・電車でドアへの接着剤の応用
- ・水中モートルの絶縁特性
- ・クロスバ交換機検査の機械化
- ・H-581, H-197およびH-582磁気テープ装置
- ・水銀ランブの放電開始機構
- ・90度偏光カラーブラウン管について
- ・圧延機用合成樹脂軸受“ハイロード”の特性
- ・S形アース棒の諸特性
- ・導波管布設のモデル実験
- PCM(パルス符号変調)特集
  - ・PCM通信方式
  - ・分配伝送形PCM通信方式
  - ・ミリ波によるPCM信号の無線伝送
  - ・PCM用ダイオードトランジスタについて
  - ・PCM通信装置の部品
  - ・PCM通信装置の構造
  - ・試作192通信回路PCM通信装置

発行所 日立評論社  
取次店 株式会社オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地  
振替口座東京71824番  
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地  
振替口座東京20018番