

# 抵抗加算法による直流大電流測定

## Measurement of Large Direct Current by the Resistance Summation Method

小 斯 波 脩\* 杉 本 光 昭\*\* 池 田 正 一 郎\*\*  
Osamu Koshiba Mitsuki Sugimoto Shōichirō Ikeda

### 要 旨

電解化学工場のような低圧大電流負荷において、数十 kA 以上の直流大電流を高精度(±0.5%)で計測する抵抗加算法を開発した。これは 10 kA 程度の同一定格の多数の並列分流器から、精密に抵抗値をそろえたアナログ抵抗加算器を介して各分流器の電圧降下の平均値を計測する新方式である。分流器を用いる電流総合法であるから、指示に影響する要因が少なく、安定で信頼性が高い。従来の DCCT, ホール CT などに比べ、補助電源および磁路構成に基づく誤差がなく、本計測システムはあらかじめ精密な目盛校正が可能であり、現地据付後の目盛チェックも容易である。

### 1. 緒 言

アルミ電解, ソーダ電解などの化学用直流電源は, 近年シリコン整流器の発展によりきわめて大容量化し, 電流 100 kA 以上に及ぶことも少なくない。のみならず, 電解槽の効率算定, プロセスの監視など生産管理上の要求と運転の合理化, 電力の経済的運用などのため, 高精度で電流の指示および記録, 積算電流または積算電力の計測などが要望されている。このような大電流系の精密計測は多年の懸案問題であり, 従来次のような種々の方法が知られている。

(i) 分流器: 20kA ぐらいまで, 確度 0.2~0.5%

10 kA 以上の分流器では温度上昇, 温度分布および母線接続に伴う電流分布などの影響で確度 0.01% まで校正することは困難とされ<sup>(1)</sup>, 通常の検定精度は 0.05~0.1% である。

(ii) 直流変流器 (DCCT): 50 kA ぐらいまで, 確度 0.5~1.0%

鉄心の材質および磁路構成による誤差があり, かなりの大容量補助交流電源を要し, その電圧安定化が確度向上の要件である<sup>(2)~(4)</sup>。

(iii) ホール CT: 150 kA ぐらいまで, 確度 0.2~0.5%

ホール素子の直線性誤差, 経年変化および温度による誤差, 鉄心磁路による誤差などがあり, 定電流電源が必要である<sup>(5)~(8)</sup>。

(iv) 電流総合法として, (イ) DCCT の出力合成, (ロ) 分流器または母線タップと磁気増幅器の組合せでその出力合成などがある。最近, 補償変流器または電流比較器と呼ばれる磁気装置が注目されている。これは零位法のためきわめて高精度が得られ, 分流器その他の校正用に適している<sup>(9)~(12)</sup>。

分流器では計測器に回路電圧が加わり, 消費電力がやや大きい欠点はあるが, 補助電源を要せず構造堅ろうで安定であり, 母線接続に伴う電流分布および機械的ひずみなどに適切な考慮を払って使用すれば, 最も信頼性が高く正確である。

本文に述べる抵抗加算法は, 校正容易な 5~10 kA 定格の多数の並列分流器から, 精密に抵抗値をそろえた線形抵抗のアナログ加算器により各分流器の電圧降下の平均値を計測する方法である。使用分流器は, 公称値に対する許容差が 0.5~1.0% 程度であっても, その値が 0.1% まで目盛校正されていれば加算抵抗で補正可能で, 加算精度を ±0.3% 以下にすることが容易であり, 出力電圧を自動平衡計またはデジタル電圧計で計測することにより総合確度 ±0.5% を得ることができる。

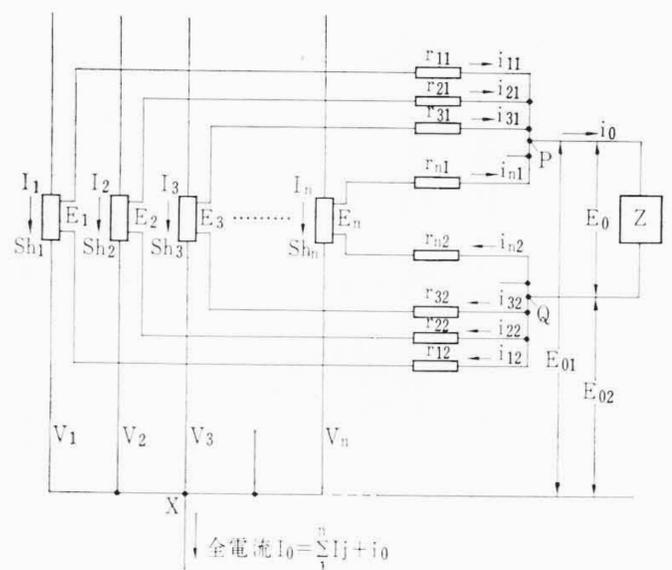


図 1 並列分流器抵抗加算回路

### 2. 抵抗加算による測定法

#### 2.1 並列分流器抵抗加算の基本式

図 1 に示すように, 同一定格の  $n$  個の並列分流器  $Sh_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) に電流  $I_j$  が流れ, 電圧降下  $E_j$  を生じているとし, 共通接続点 X から各分流器端子までの接続母線の電圧降下を  $V_j$  とする。いま各分流器の ⊕ 側電圧端子から, リード線を介して加算抵抗  $r_{j1}$  を経て共通に P 点, ⊖ 側電圧端子から同様に  $r_{j2}$  を経て Q 点を形成し, P Q 間に内部抵抗  $Z$  の電圧計測器を接続する。

キルヒホッフの法則により, 加算抵抗を流れる電流を図示のように仮定すれば次式が成立する。

$$E_{01} + i_{j1} \cdot r_{j1} = E_j + V_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$E_{02} - i_{j2} \cdot r_{j2} = V_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$E_0 = E_{01} - E_{02} = Z \cdot i_0 \quad (3)$$

$$i_0 = \sum_{j=1}^n i_{j1} = \sum_{j=1}^n i_{j2} \quad (4)$$

したがって, (1), (2) 両式より  $E_{01}, E_{02}$  を求め, (3) 式に代入して  $V_j$  を消去すれば

$$E_0 = \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{n} - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n i_{j1} \cdot r_{j1} + \sum_{j=1}^n i_{j2} \cdot r_{j2} \right) \quad (5)$$

すなわち, 出力端子 P Q 間の電位差  $E_0$  は, 分流器電圧降下の平均値から加算抵抗の電圧降下の平均値を差し引いた値になる。

次に, 枝路電流を含まない式を求め。 (1), (2) 両式より  $\sum i_{j1}, \sum i_{j2}$  を算出し, これらから  $E_{01}, E_{02}$  を求め, (3), (4) 両式の関係を用いて

\* 日立製作所日立研究所

\*\* 日立製作所国分工場

表1 モデル実験回路定数

(a) 分流器		(b) 加算抵抗				備 考
記号	抵抗値(Ω)	記号	抵抗値(Ω)	記号	抵抗値(Ω)	
Sh <sub>1</sub>	1.0026 <sub>3</sub>	r <sub>11</sub>	1406.40	r <sub>12</sub>	1406.42	加算抵抗の偏差 全数 1406Ω ±0.04% 同一分流器に接 続する対の偏差 ±0.004% >
Sh <sub>2</sub>	1.0009 <sub>5</sub>	r <sub>21</sub>	1406.16	r <sub>22</sub>	1406.07	
Sh <sub>3</sub>	1.0017 <sub>4</sub>	r <sub>31</sub>	1406.37	r <sub>32</sub>	1406.35	
Sh <sub>4</sub>	0.9938 <sub>9</sub>	r <sub>41</sub>	1405.83	r <sub>42</sub>	1405.92	
Sh <sub>5</sub>	1.0013 <sub>6</sub>	r <sub>51</sub>	1406.01	r <sub>52</sub>	1406.05	
Sh <sub>6</sub>	1.0022 <sub>1</sub>	r <sub>61</sub>	1406.54	r <sub>62</sub>	1406.50	

(c) 母線電圧降下模擬抵抗*					* 抵抗値は 公称値
記号	抵抗値(Ω)	記号	抵抗値(Ω)	記号	
r <sub>B11</sub>	1.0	r <sub>B12</sub>	1.5	r <sub>B13</sub>	5
r <sub>B21</sub>	0	r <sub>B22</sub>	3	r <sub>B23</sub>	5
r <sub>B31</sub>	1	r <sub>B32</sub>	2	r <sub>B33</sub>	5
r <sub>B41</sub>	2	r <sub>B42</sub>	1	r <sub>B43</sub>	5
r <sub>B51</sub>	2.5	r <sub>B52</sub>	0.5	r <sub>B53</sub>	5
r <sub>B61</sub>	0.5	r <sub>B62</sub>	2.5	r <sub>B63</sub>	5

表2 通電分流器数の影響

通電分流器数	6	5	4	3	2	備 考
E <sub>1</sub> (mV)	101.160	101.134	101.228	103.021	103.561	Z=∞, V <sub>1</sub> ~ V <sub>6</sub> =0
E <sub>2</sub> (mV)	101.686	101.704	101.749	103.545	104.074	
E <sub>3</sub> (mV)	101.761	101.860	101.920	103.710	0.028	
E <sub>4</sub> (mV)	101.465	101.543	101.598	0.038	0.025	
E <sub>5</sub> (mV)	101.583	101.658	0.050	0.040	0.027	
E <sub>6</sub> (mV)	101.406	0.063	0.052	0.038	0.028	
$\bar{E}_j$ (mV)	101.510	84.660	67.766	51.732	34.624	$\bar{E}_j: E_1 \sim E_6$ の 算術平均
E <sub>0</sub> 測 (mV)	101.521	84.678	67.756	51.717	34.623	
I <sub>0</sub> 測 (mA)	609.18	508.024	406.54	309.92	207.51	
E <sub>0</sub> 計 (mV)	101.510	84.663	67.767	51.729	34.622	
$\frac{E_{0\text{測}} - E_{0\text{計}}}{E_{0\text{計}}} \times 100$ (%)	+0.011	+0.018	-0.016	-0.023	+0.003	
$\frac{E_{0\text{測}} - \bar{E}_j}{\bar{E}_j} \times 100$ (%)	+0.011	+0.021	-0.015	-0.029	-0.003	
$I_0^* = \sum \frac{E_j}{r_{shj}}$ (mA)	608.782	507.907	406.678	309.839	207.370	
I <sub>0</sub> * 計 = E <sub>0</sub> 測 × 6 (mA)	609.126	508.068	406.536	310.302	207.738	
$\frac{I_0^* - I_{0\text{測}}}{I_{0\text{測}}} \times 100$ (%)	-0.065	-0.023	+0.034	-0.026	-0.068	
$\frac{I_{0\text{計}} - I_{0\text{測}}}{I_{0\text{測}}} \times 100$ (%)	-0.0089	-0.0085	-0.001	+0.123	+0.11	

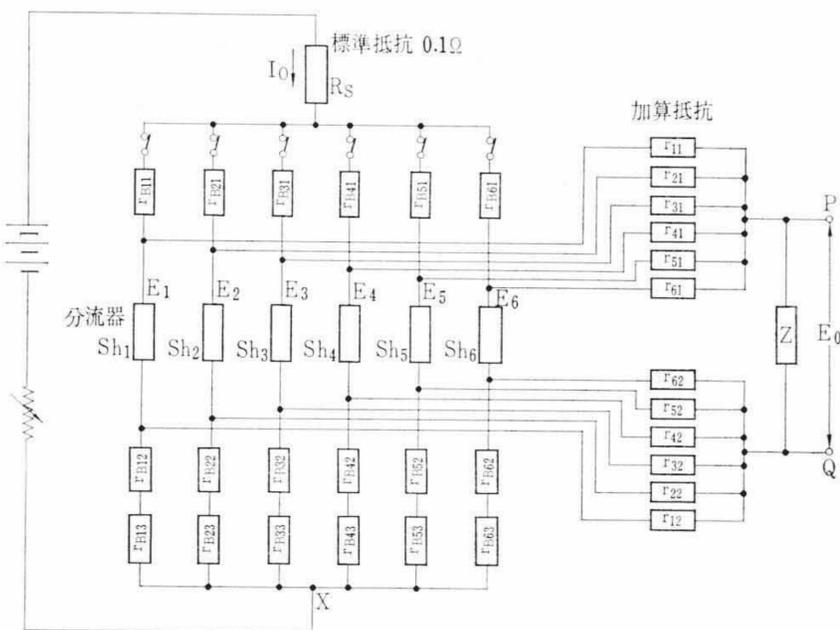


図2 モデル実験回路

$$E_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{r_{j1}} + \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n V_j - \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} \cdot \sum_{j=1}^n V_j \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} + \frac{1}{Z} \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \right)} \quad (6)$$

を得る。共通接続点Xから負荷に通ずる全電流 I<sub>0</sub> は、各分流器の電流と出力端子から計測器に流れる電流の和であるから

$$I_0 = \sum_{j=1}^n I_j + i_0 = \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{R_{shj}} + \frac{E_0}{Z} \quad (7)$$

ここに R<sub>shj</sub> は、j 番目の分流器の抵抗である。通常第2項は第1項に比べきわめて小さく無視し得る。

(6)式において、各分流器の⊕側および⊖側電圧端子に接続される一対の加算抵抗値が等しく、r<sub>j1</sub>=r<sub>j2</sub> ならば分子の第2項、接続母線の電圧降下の影響は零になり、次式のように変形できる。

$$E_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{E_j}{r_{j1}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}}}} \doteq \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{n} \cdot \frac{1}{K} \quad (8)$$

すなわち、出力電圧 E<sub>0</sub> は各分流器の電圧降下の平均値に比例する。ここに K は加算抵抗と計測器の抵抗 Z による補正係数である。

したがって、負荷に通ずる全電流 I<sub>0</sub> は、分流器の公称定格値を G (kA/mV) とすれば

$$I_0 = G \cdot E_0 \cdot n \cdot K \quad (9)$$

として求められる。すなわち、E<sub>0</sub> の読みから負荷電流 I<sub>0</sub> を直読することができる。

### 2.2 モデル実験による検討

大電流分流器のモデルとして、表1に示す値の 0.5φ マンガニウム無誘導巻線抵抗 6 個を用いた。加算抵抗は 1,406Ω ± 0.05% の 6 組 (ただし同一分流器に接続する対の抵抗偏差は ±0.004% 以下) を選び、図2の回路により実験した。測定には直流電位差計を用い、抵抗加算器出力端子電圧 E<sub>0</sub>、各分流器電圧降下 E<sub>j</sub>、標準抵抗 (0.1Ω) の電圧降下により全電流 I<sub>0</sub>、および各分流器の接続母線模擬抵抗の電圧降下 V<sub>j</sub> などを測定した。

#### (i) 通電分流器数の影響

接続母線模擬抵抗 r<sub>B</sub> を用いない場合で、計測器内部抵抗 Z 無限大 (検流計回路の平衡時の等価抵抗、約 20 MΩ) にて通電分流器数による影響を調べた。加算抵抗は接続したまま、分流器 sh<sub>6</sub> から順次数を減じて測定した結果を表2に示す。表中、“E<sub>0</sub> 計”なる値は(6)式による計算値である。また“I<sub>0</sub>\*”は、各分流器の電圧降下をその抵抗 (表1の値) で除して求めた電流の総和であり、“I<sub>0</sub> 計”は(9)式に基づく計算値である。E<sub>0</sub> 測定値は、E<sub>0</sub> 計および各分流器の電圧降下の平均値  $\bar{E}_j$  とよく一致し、各分流器の電流に不平衡があっても全電流を正確に測定できることを示している。

#### (ii) 計測器内部抵抗の影響

接続母線模擬抵抗 r<sub>B</sub> を用いないで、通電分流器数 n=6 の場合 Z を 1 MΩ ~ 1 kΩ まで変えて測定した結果、(6)式による E<sub>0</sub> 計算値と E<sub>0</sub> 測定値はよく一致するが、 $\bar{E}_j$  と E<sub>0</sub> 測定値はほぼ(8)式どおり Z の値が小さくなれば一致しなくなる。Z=100 kΩ 以下では補正係数 K が必要となる。

#### (iii) 母線電圧降下の影響

実際の大電流回路では、各分流器の接続母線の電圧降下が無視できないので、図2のように模擬抵抗 r<sub>B</sub> を接続して実験した。各分流器の電流はほぼ等しくなるように選んだ。Z 無限大の場合の結果を表3に示す。接続母線の電圧降下が分流器電圧降下の約 3~8 倍あっても、加算抵抗の対の抵抗偏差がきわめて小さければ(6)式の分子第2項の影響は消去されて出力端子には表われない。

表3 母線電圧降下の影響

条 件	(A)				(B)	備 考
	6	5	4	3	6	
通電分路器数	6	5	4	3	6	
$E_1$ (mV)	102.888	103.945	102.946	105.108	103.205	$Z=\infty$ 条件 (A) $V_1 \sim V_6$ : 小 $r_{B11} \sim r_{B61}$ & $r_{B12} \sim r_{B62}$ 使用
$E_2$ (mV)	103.624	104.705	103.706	105.898	102.992	
$E_3$ (mV)	99.588	100.615	99.655	102.120	100.923	
$E_4$ (mV)	102.078	103.137	102.128	0.116	101.600	
$E_5$ (mV)	101.049	102.117	0.140	0.117	101.579	
$E_6$ (mV)	100.918	0.160	0.141	0.117	100.931	
$\bar{E}_j$ (mV)	101.691	85.779	68.119	52.246	101.871	(B) $V_1 \sim V_6$ : 大 $r_{B13} \sim r_{B63}$ 追加接続
$E_{0測}$ (mV)	101.689	85.760	68.061	52.196	101.858	
$I_{0測}$ (mA)	610.38	514.62	408.65	312.93	611.18	
$V_1$ (mV)	156.13	157.89	156.355	159.63	672.90	
$V_2$ (mV)	305.90	309.01	306.05	312.50	824.06	
$V_3$ (mV)	192.61	194.50	192.66	196.89	707.29	
$V_4$ (mV)	108.80	110.026	108.955	0.660	627.75	
$V_5$ (mV)	50.24	50.80	0.111	0.106	566.05	
$V_6$ (mV)	255.98	0.652	0.584	0.497	773.88	
$E_{01}$ (mV)	280.06	222.80	195.35	163.80	797.20	
$E_{02}$ (mV)	178.26	137.05	127.36	111.79	695.35	
$(E_{01}-E_{02})$ (mV)	101.80	85.75	67.99	52.01	101.85	
$E_0$ 計 (mV)	101.683	85.755	68.074	52.185	101.862	
$\frac{E_{0測}-E_0計}{E_0計} \times 100$ (%)	+0.006	+0.006	-0.019	+0.021	-0.004	
$\frac{E_{0測}-\bar{E}_j}{\bar{E}_j} \times 100$ (%)	-0.002	-0.022	-0.085	-0.095	-0.013	
$I_0^* = \sum \frac{E_j}{r_{shj}}$ (%)	609.869	514.625	408.797	312.919	610.948	
$I_0$ 計 = $E_0$ 測 $\times 6$ (mA)	610.134	514.560	408.366	313.170	611.148	
$\frac{I_0^*-I_0測}{I_0測} \times 100$ (%)	-0.084	+0.000	+0.036	-0.003	-0.038	
$\frac{I_0計-I_0測}{I_0測} \times 100$ (%)	-0.040	-0.012	-0.070	+0.24	-0.005	

以上により、並列分路器の抵抗加算による測定が非常に高精度で行ない得ることが確認された。

2.3 計測精度に関する考察

抵抗加算方式では、同一定格の  $n$  個の分路器すべてが公称定格に対する許容差が  $\pm 0.1\%$  であることは必要条件ではなく、その値が  $0.1\%$  まで校正され、使用中の経年変化その他による誤差が  $0.1\%$  以下に保証されているならば、 $0.5 \sim 1.0$  級の分路器を用いてよい。ただし、 $n$  個の分路器の誤差の算術平均は  $\pm 0.1\%$  以下であることが望ましい。

加算抵抗の値は、分路器の校正値に応じてたとえば  $100.8 \text{ mV} \pm 0.1\%$ ,  $99.4 \text{ mV} \pm 0.1\%$  の分路器に対しそれぞれ  $1008 \Omega$ ,  $994 \Omega$  で  $\pm 0.5 \Omega$  の範囲に選び、(6)式の分子の第1項、 $E_j/r_{j1}$  なる比の値が一定になるよう補正抵抗を調整する。また同時に加算用抵抗の全数の偏差が  $1,000 \Omega \pm 0.5 \sim 1.0\%$  であっても、同一の分路器に接続される一対の抵抗値は、リード線の抵抗も含めて  $\pm 0.01\%$  にそろえて使用する。加算抵抗器としては  $1 \text{ k}\Omega$  程度の精密巻線抵抗を、また補正抵抗としては数  $\Omega$  ぐらいの可変抵抗を選んで使用する。

(6)式の分子の第1項は、加算抵抗の全数の中心値を  $r$  として

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{r_{j1}} = \frac{n}{r(1 \pm 0.5 \sim 1.0\%)} \cdot \left[ \frac{100}{r} (1 \pm \sqrt{n} \cdot 0.15\%) \right]$$

これに対し、分子の第2項、接続母線の電圧降下の影響は

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{V_j}{r_{j1}} - \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{V_j}{r_{j2}} \\ &= \frac{n}{r(1 \pm 0.5 \sim 1.0\%)} \cdot \left[ \frac{V_{\max}}{r} (\pm \sqrt{2n} \cdot 0.01\%) \right] \end{aligned}$$

したがって、電圧降下の最大値  $V_{\max} = 1 \text{ V}$ 、すなわち分路器電圧降下の10倍と仮定しても  $\pm 0.14\%$  の誤差として影響する程度であ

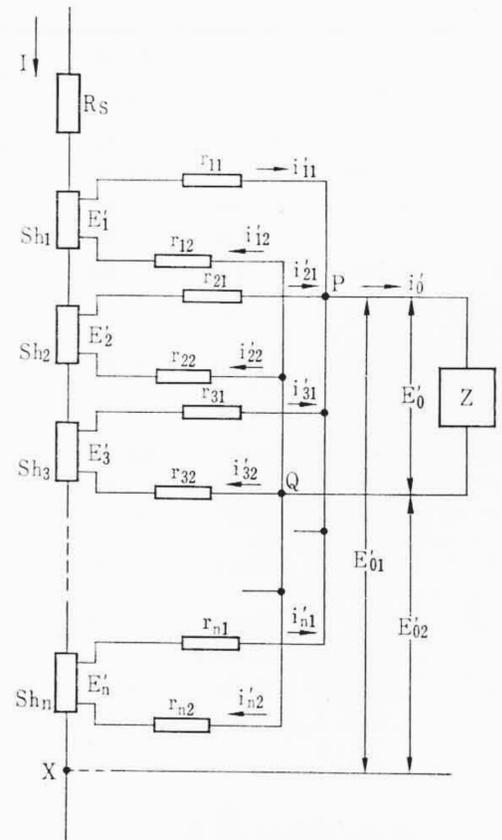


図3 直列分路器抵抗加算回路

る。(6)式の分母における  $r_{j1}$ ,  $r_{j2}$  の対の偏差は、前述のように  $\pm 0.01\%$  にそろえてあるから  $E_0$  の演算誤差としては、 $\pm 0.21\%$  程度に過ぎないと考えられる。

また、(8)式の近似

$$\frac{\sum_{j=1}^n \frac{E_j}{r_{j1}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}}} \approx \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{n} \dots \dots \dots (10)$$

については、 $n=10$  と想定して計算すると、各分路器の電流不平衡が  $\pm 10\%$  の場合で  $0.014\%$ 、半数が電流零として  $0.038\%$  程度の誤差に過ぎない。

$E_0$  の計測には、電子式自動平衡計器または高感度積分形  $A-D$  変換によるデジタル電圧計を使用すれば、計器誤差  $\pm 0.2\%$  程度であるから総合計測精度として  $\pm 0.5\%$  を得ることができる。

3. 抵抗加算方式の目盛さだめ法

抵抗加算器と電圧計からなる計測回路は、実際に使用する分路器と組み合わせて、単位分路器の定格電流程度の電源により、あらかじめ工場で見盛さだめが可能である。これは並列接続分路器を直列接続して通電するもので、DCCT とかホール CT による方法のように磁氣的結合ではなく、直接電氣的に結合した回路なので、工場と現地との等価性が良いと考えられる。

3.1 直列分路器抵抗加算の基本式

図3に示すように、直列に接続された  $n$  個の分路器  $sh_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) に、標準分路器  $R_s$  を通して電流  $I$  を流す。各部の電圧および電流を図示のように考えると、次式が成立する。

$$E_{01}' = \sum_j^n E_j - i_{j1}' \cdot r_{j1} \quad (j=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (11)$$

$$E_{02}' = \sum_{j+1}^n E_j + i_{j2}' \cdot r_{j2} \quad (j=1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (12)$$

$$E_0' = E_{01}' - E_{02}' = Z \cdot i_0' \dots \dots \dots (13)$$

$$i_0' = \sum_{j=1}^n i_{j1} = \sum_{j=1}^n i_{j2} \dots \dots \dots (14)$$

したがって、(11), (12) 両式より  $E_{01}'$ ,  $E_{02}'$  を求め、(13), (14) 両式の関係を用いて

表4 直列抵抗加算結果

Z (実 測)		∞	1 MΩ	100 kΩ	備 考
		(約20MΩ)	(1 MΩ)	(99.8 kΩ)	
E'1 (mV)		101.983	101.785	101.692	分流器, 加算抵抗 の値は表1に同じ (ただし Sh4 除外)
E'2 (mV)		101.598	101.342	101.297	
E'3 (mV)		101.623	101.354	101.316	
E'5 (mV)		101.651	101.350	101.347	
E'6 (mV)		101.959	101.630	101.653	
E'j' (mV)		101.763	101.492	101.461	
E'0 測 (mV)		101.765	101.430	100.907	
I (mA)		101.915	101.63	101.61	
E'01 (mV)		305.90	304.80	304.62	
E'02 (mV)		204.20	203.53	203.85	
(E'01-E'02) (mV)		101.66	101.27	100.77	
E'0 計 (mV)		101.754	101.414	100.892	
$\frac{E'0 \text{ 測} - E'0 \text{ 計}}{E'0 \text{ 計}} \times 100$ (%)		+0.011	+0.015	+0.014	
$\frac{E'0 \text{ 測} - \bar{E}'j'}{\bar{E}'j'} \times 100$ (%)		+0.001	-0.062	-0.55	

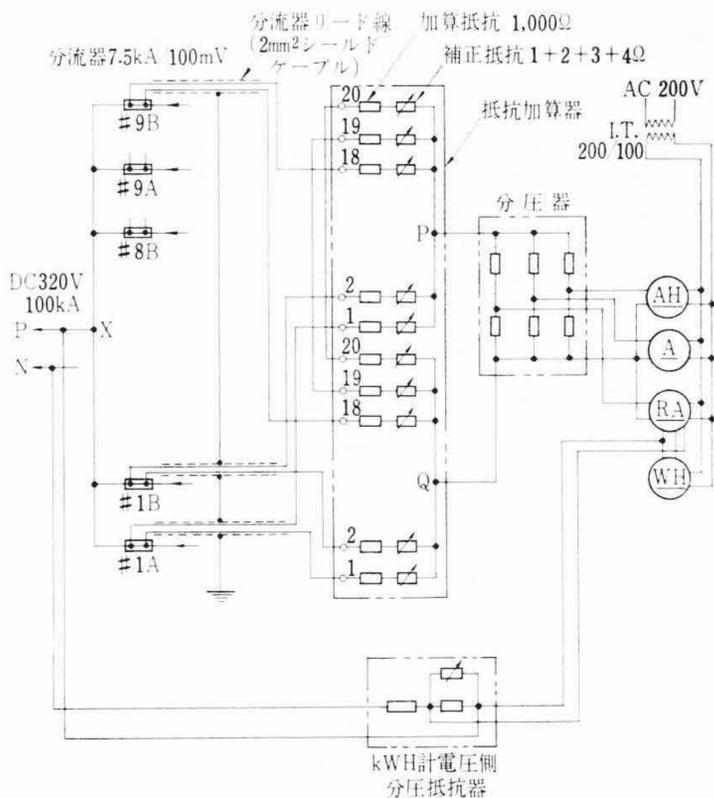


図4 320V, 100kA 計測回路 (実施例)

に 50 mV を得るようにし, 指示および記録電流計のフルスケールは 120 kA とした。

4.2 リード線誘導ノイズ

分流器リード線をダクト配線 (約20~65 m) した状態で, 分流器端子に接続する先端を切り離して短絡した場合, 計器用分圧回路を接続しない状態の加算器出力端子に, 最大 200 mV<sub>p-p</sub> ぐらいで数百 kc/s の減衰振動電圧が 20ms に 12 回表われる。さらに短絡した先端を分流器の ⊕ 側端子に接続して直流主回路電圧を受ける場合には, ノイズの大きさは約 800 mV<sub>p-p</sub> になる。リード線のシールドを接地すると, これは 300 mV<sub>p-p</sub> ぐらいに減少する。ノイズの直流分はいずれの場合も加算器出力端子で約 1.5 μV であり, 誤差としては無視することができる。リード線を分流器に正規に接続した状態では, 加算器出力電圧に重畳してこのノイズ電圧が表われるが, 比較的抵抗の分圧回路と計測器を接続した状態ではノイズの交流分は数分の 1 に減じ, 計器の作動にはなんら影響しない。なお P Q 端子に 1~2 μF コンデンサを接続するとノイズはほとんど消失する。

このような誘導ノイズの原因は整流器の転流に基づくものと考えられる。

4.3 母線電圧降下の影響

分流器 No. 2B の ⊕ 側端子に連なる加算器入力端子と, 各分流器の ⊕ 側端子に連なる同類の端子間の電位差は, No. 9B 分流器との間に生ずる最大値で直流分約 0.37 V である。ただしその電圧波形は接続母線の抵抗分とリアクタンス分によるものがあり, 数 V ぐらいの振幅で, 20 ms に 12 回反転する交流成分を有している。

No. 2B 分流器に接続する一対の加算抵抗の入力端子を短絡し ⊕ 側端子のみを接続しておき, これと j 番目の分流器に接続する一対の加算抵抗の入力端子を短絡して同じく ⊕ 側端子のみを接続し, 加算器出力端子 P, Q で電位差計により母線電圧降下の不同による影響を測定した結果, ほとんど零電圧であった。すなわち加算抵抗の対の偏差が十分小さいので打ち消し合って, (6) 式の分子の第 2 項は零と見なし得ることを示している。

4.4 直流全電流測定

記録電流計の振れを見計らって電解槽の安定な負荷状態において測定した。図 4 に示す正規接続状態で, 加算器出力端子 P, Q の電圧および入力側端子で各分流器の電圧降下を順次電位差計で測定し, 同時に指示および記録電流計の読みをとった。このような測定を 3

$$E'_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{E'_j}{r_{j1}} + \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{E'_{j+1}}{r_{j1}} - \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{E'_{j+1}}{r_{j2}} \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} + \frac{1}{Z} \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j1}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_{j2}} \right)} \quad (15)$$

を得る。分子の第 2 項は加算抵抗の対の値が等しく, r<sub>j1</sub>=r<sub>j2</sub> ならば零になり, 並列分流器抵抗加算の (8) 式と同様になる。したがって, 単位分流器の定格電流で, 並列加算と等価な校正が可能である。計測器の内部抵抗 Z による補正係数も同じ値となる。

3.2 モデル実験による検討

表 1 に示したモデル分流器および加算抵抗の組合せを用い, 直列接続として実験した。測定結果を表 4 に示す。ただし分流器は表 1 の sh<sub>4</sub> を除く 5 個である。出力端子電圧 E'0 の測定値は計算値とよく一致し, 各分流器の電圧降下の平均値とも一致している。

4. 現 地 実 験

アルミ電解工場における実施例について述べる。現地では分流器から抵抗加算器までかなりの距離があり, しかも直接回路電圧を受けるため電磁的および静電的誘導ノイズがどのように影響するか, また母線電圧降下および測定電流の脈動がどの程度の誤差となって表われるか, などが問題となる。

4,000 kW, 320V, 2重3相ブリッジシリコン整流装置×9セットの 100 mV/7.5 kA 分流器 18 個を抵抗加算法により総合計測した。計測回路を図 4 に, 分流器および加算回路定数を表 5 に示す。

4.1 抵抗加算器の調整

分流器の校正値に応じて 2.3 に述べた考え方で, E<sub>j</sub>/r<sub>j1</sub> なる比の値が一定となるよう補正抵抗により調整した。分流器の校正値は 99.7~100.1 mV/7.5 kA であり, 0.5% 級であるが 0.1% まで校正されているので, リード線抵抗を含め加算抵抗と直列補正抵抗の和を表 5 に示すように選定した。合成抵抗の対の偏差は ±0.01% 以内と考えられる。

抵抗加算器の出力端子には計器感度に応じ分圧抵抗を接続する。図 4 の例では, 2 組の加算抵抗を短絡し 7.5 kA×18=135 kA のとき, 100 mV×18÷20=90 mV の平均電圧とし, 加算器合成抵抗 1,005Ω÷20×2=100.5Ω, 分圧回路合成抵抗 (計測器の平衡時内部抵抗を含め) 167.5Ω, 電圧比 0.625, すなわち 90 mV×0.625=56.25 mV の出力電圧に設計し, 135 kA/56.25 mV=2.4 kA/mV の計測倍率とした。すなわち直流負荷電流 120 kA のとき, 加算器出力端子

表5 分流器および加算回路定数

No.	分流器 校正値 $E_j$ (mV)	リード線 抵抗* (往復) $2r_l(\Omega)$	加算器抵抗**		補正抵抗*** $r(\Omega)$	合成抵抗 <sup>注1</sup>		備考	
			分流器⊕側 $r_{j1}(\Omega)$	分流器⊖側 $r_{j2}(\Omega)$		$r_R=r_l+r_j+r$			
						( $\Omega$ )	偏差 (%)		
1 A	100.1	1.254	1,000.58	1,000.57	5	1,006	+0.0207	* リード線 (2.0 mm <sup>2</sup> , 7/0.6 φ 2心シールドケーブル, 9.54Ω/km) 抵抗は配線状態でブリッジ測定 (32°C) ** 加算器抵抗は精密ブリッジ測定 (26~28.5°C) 1,000.98Ω±0.045% 対の偏差 ±0.004% 温度係数 約 9×10 <sup>-5</sup> /°C *** 補正抵抗 (1+2+3+4Ω, ±0.5%)	
1 B	100.1	1.173	1,000.77	1,000.78	5	1,006	+0.0356		
2 A	100.0	1.104	1,000.79	1,000.79	4	1,005	+0.0342		
2 B	100.0	1.100	1,001.33	1,001.30	3	1,005	-0.0110		
3 A	100.0	1.059	1,000.93	1,000.97	4	1,005	+0.0500		
3 B	99.8	0.946	1,000.70	1,000.71	2	1,003	+0.0183		
4 A	100.0	0.852	1,001.42	1,001.42	3	1,005	-0.0154		
4 B	99.7	0.826	1,000.73	1,000.73	1	1,002	+0.0143		
5 A	99.9	0.790	1,000.90	1,000.88	3	1,004	+0.0295		
5 B	99.7	0.796	1,001.17	1,001.19	0	1,002	-0.0412		
6 A	100.0	0.766	1,000.80	1,000.80	4	1,005	+0.0183		
6 B	100.0	0.699	1,000.64	1,000.64	4	1,005	-0.0010		
7 A	99.7	0.681	1,000.87	1,000.86	1	1,002	-0.0211		
7 B	100.0	0.598	1,000.68	1,001.68	4	1,005	-0.0021		
8 A	99.7	0.493	1,001.03	1,001.04	1	1,002	+0.0287		
8 B	100.0	0.450	1,000.70	1,000.70	4	1,005	-0.0075		
9 A	99.7	0.457	1,000.53	1,000.53	1	1,002	-0.0241		
9 B	99.7	0.368	1,000.54	1,000.55	1	1,002	-0.0266		
		短絡	1,001.31	1,001.34	5	1,006	+0.034		
		短絡	1,001.22	1,001.26	5	1,006	+0.026		

合成抵抗の偏差範囲 ±0.05%

注1 加算抵抗の調整

分流器校正値 $E_j=100.1$ (mV)	合成抵抗比 $r_R=1,006$ (Ω)	} 比 $E_j/r_R=0.09950$ (mA)
100.0	1,005	
99.9	1,004	
99.8	1,003	
99.7	1,002	

表6 直流全電流測定結果

測定 No.	加算出力, 分流器 (mV)			指示電流計 (kA)			記録電流計 (kA)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
加算出力	41,233	41,489	41,072	98.9	99.6	98.7	99.1	99.9	98.7
分流器									
1 A	73,605	73,530	72,510	100.2	100.2	98.9	100.3	100.3	99.0
1 B	78,864	78,995	77,910	99.9	100.3	98.8	100.0	100.2	98.7
2 A	73,746	73,927	72,745	99.9	100.4	98.7	100.3	100.1	98.8
2 B	78,882	78,631	77,709	100.2	99.7	98.6	100.5	99.8	98.8
3 A	73,956	73,658	72,762	99.9	99.8	98.7	100.1	99.5	98.8
3 B	79,626	79,220	78,320	100.1	99.6	98.6	100.2	100.0	98.7
4 A	74,180	73,668	73,036	100.3	99.6	98.5	100.4	99.6	98.5
4 B	79,272	78,830	77,611	100.1	99.7	98.3	100.2	100.0	98.5
5 A	68,675	68,295	67,235	100.2	99.6	98.2	100.4	99.7	98.3
5 B	72,701	72,530	71,642	99.7	99.3	98.5	99.6	99.5	98.5
6 A	71,133	71,170	70,141	99.5	99.4	98.5	100.0	99.5	98.5
6 B	76,655	76,300	75,547	99.5	99.4	98.6	100.0	99.5	98.6
7 A	67,267	67,098	66,260	99.5	99.3	98.4	100.0	99.4	98.3
7 B	72,945	72,970	72,155	99.5	99.5	98.7	99.7	100.0	98.6
8 A	71,242	71,029	70,283	99.7	99.6	98.7	100.0	99.5	98.7
8 B	75,710	75,455	74,713	99.8	99.7	98.8	100.1	100.4	98.8
9 A	69,599	69,395	69,740	99.8	99.4	99.5	100.0	99.3	99.7
9 B	74,861	74,076	74,740	100.1	98.9	99.5	100.0	99.1	99.7
加算出力	41,562	41,475	41,628	—	—	—	—	—	—
平均値	分流器 $\bar{E}_j=73.644$ mV 指示電流計, 99.39 kA 記録電流計, 99.51 kA 加算出力 $E_0=41,410$ (6回測定の平均)								
備考	$73.644 \times \frac{18}{20} \times 0.625 = 41.424$ mV に対し 41.410 mV は -0.034%, 41.410 × 2.4 = 99.384 kA に対し, 99.39 kA は +0.006%, 99.51 kA は +0.126%								

回繰り返した。その結果は表6に示すとおりである。

測定中の負荷変動は電流計の振れの変化からほぼ±1.2%と考えられる。各分流器の電圧降下の平均値73.644 mVに加算抵抗および分圧器による電圧比を乗じて得られる出力電圧41.424 mVに対し、出力電圧の6回測定の平均値41.410 mVは-0.034%の誤差に過ぎない。指示電流計および記録電流計による計測誤差は平均値ではいずれも0.2%以内におさまっている。なお各分流器の電流不平衡は

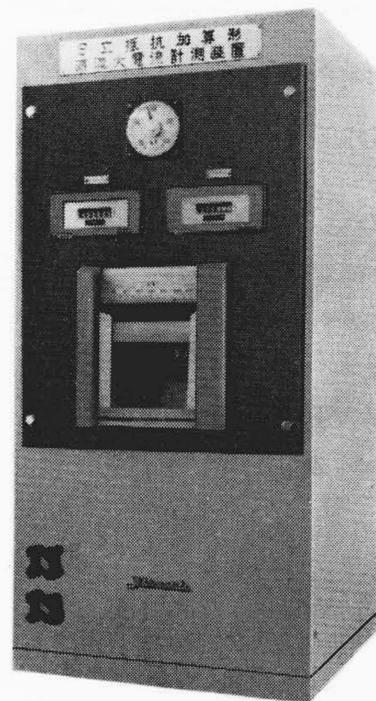


図5 計器盤(実施例)

約±9%程度と推定される。

図4の実施例では、指示電流計は低域カットの80~120 kA 拡大目盛とし、平常の電流監視に便ならしめた。積算電流計には6けた数字表示、電子式積算計を用い、積算電力計に対しては記録電流計の内蔵ポテンショメータによるサーボ掛算方式で直流電力を求め、同じく電子式積算計で6けた数字表示を得る新方式を採用している。図5は計器盤の外観写真である。

### 5. 結 言

以上並列分流器の抵抗加算法による直流大電流の測定法および現地実験により確認した結果について述べた。これを要約すれば

- (1) 同一定格の多数の並列分流器から、精密に抵抗値をそろえて選定した抵抗加算回路を介して、電子式自動平衡計またはディ

デジタル電圧計により各分流器の電流を総合計測することができる。

この場合、各分流器の校正値に応じて加算抵抗により補正することが可能で、0.5~1.0級の分流器でも±0.1%まで校正されていれば加算精度を±0.2%程度におさめることができる。

(2) 分流器から加算抵抗器に至るリード線に生ずる誘導ノイズの影響は、直流分はきわめて小さく無視でき、交流分もシールドリード線の使用により軽減でき、実用上計器の作動に悪影響はない。

分流器から共通接続点までの母線電圧降下の不同による影響も加算抵抗回路の適当な選定により誤差は無視し得る程度となる。

(3) 抵抗加算器と電圧計測器からなる本計測システムは、実際に使用する分流器の直列接続と組み合わせて、単位分流器の定格電流程度の電源によりあらかじめ工場において目盛さだめすることができる。また安定な基準電源を用い、分流器の電圧降下に代わる電圧を与えれば現地においても容易に目盛をチェックすることができる。

(4) 従来のDCCTあるいはホールCTによる測定では、比較的大容量でかつ安定な補助電源を必要とし、かつ高精度を維持することが困難であるが、本法は分流器の高精度、高信頼性に基づく電流総合法であるから一度整定すれば、指示に影響する要因が少ないので、安定で高精度が得られる。

最後に、本研究に際し多大のご好意を賜った昭和電工株式会社電気部ならびに喜多方工場の関係各位に深謝するとともに、平素ご指導いただいている日立製作所日立研究所田口所長、木村部長ならびに国分工場落部長はじめ実験に協力された関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 西野：電学誌，61，634，241-242（昭16-5）
- (2) R. Zahorka：AEG Mitt. 49，10/11，606-609（Okt/Nov.，1959）
- (3) N.G. Hingorani：DIRECT CURRENT，9，2，53 & 56~60，（May，1964）
- (4) W. Krämer：IEEE，Commu. & Elec.，No. 73，382-390（July，1964）
- (5) F. Kuhrt u. K. Maaz：ETZ-A，77，14，487-490（Juli，1956）
- (6) K. Maaz u. R. Schmid：ETZ-A，78，20，734-736（Okt.，1957）
- (7) 成田，佐々木，小沢：電学誌，81，879，2047-2052（昭36-12）
- (8) 秋山：昭39電気学会東京支部大会，194（昭39-10）
- (9) L. Abraham u. K. Heumann：ETZ-A，80，18，629-632（Sept.，1959）
- (10) N. L. Kusters，W. J. Moore & P. N. Miljanic：IEEE，Commu. & Elec.，No. 70，22-27（Jan.，1964）
- (11) N. L. Kusters：IEEE，Trans. IM-13，No. 4，197-209（Dec.，1964）
- (12) R. Zahorka：ETZ-A，85，23，748~752（Nov. 1964）



新 案 の 紹 介



登録新案第766380号

岡 田 浩

変 圧 器 保 護 差 動 継 電 装 置

この実用新案は、変圧器の内部事故に対する保護継電装置としての差動継電装置の改良に関するものであり、簡単な構成で確実に動作し、特に励磁突入電流で誤動作することなく高感度の変圧器保護差動継電装置を提供するものである。

変圧器の電源側の電流  $I_1$  と負荷側の電流  $I_2$  とを検出し、 $I_1$ 、 $I_2$  をそれぞれ抑制力とし、 $I_1$  と  $I_2$  との差を動作力として変圧器内部における故障にのみ応動し、故障電流が変圧器を貫通するにすぎない外部故障には応動しないようにした差動継電装置はよく知られている。しかしこの装置においては、励磁突入電流により誤動作する場合があります、はなはだしいときは投入不能になる。このため高調波抑制装置、不平衡半波ロック装置または限時継電器による感度低下装置を併用しているが、小容量の変圧器では装置も複雑であり不経済である。この実用新案はこのような場合、特に好都合である。図1は実用新案の接続の一具体例図を、図2はその説明のための特性図

である。変圧器1の電源側、負荷側の電流  $I_1$ 、 $I_2$  はそれぞれ変流器により  $i_1$ 、 $i_2$  として検出される。差動継電器2の抑制コイル2Cにはそれぞれの電流が流れ、動作コイル2Aには差電流が流れる。

この実用新案ではこの2Aの回路に瞬時要素付過電流継電器3を接続し、これを2の常用接点2bで短絡しておく。一方3の瞬時接点3a1、限時接点3a2を並列に接続してシャ断器の引外しコイルTCを付勢する。図2は励磁突入電流  $i$  に対する継電器3の動作を説明するものである。図から明らかなように励磁突入電流で2が動作して2bが開き3が付勢されても3a1、3a2の閉成される電流レベルを適当に設定しておくことにより、突入電流では動作しないが差電流が  $I_0$  以上ならば3a1が瞬時に閉成してTCが付勢され、 $I_0'$  程度以上であれば3a2の設定に応じた限時時間の後にTCが付勢され、なんら特殊な回路を必要とせず確実な保護動作を行なうことができる。（福島）

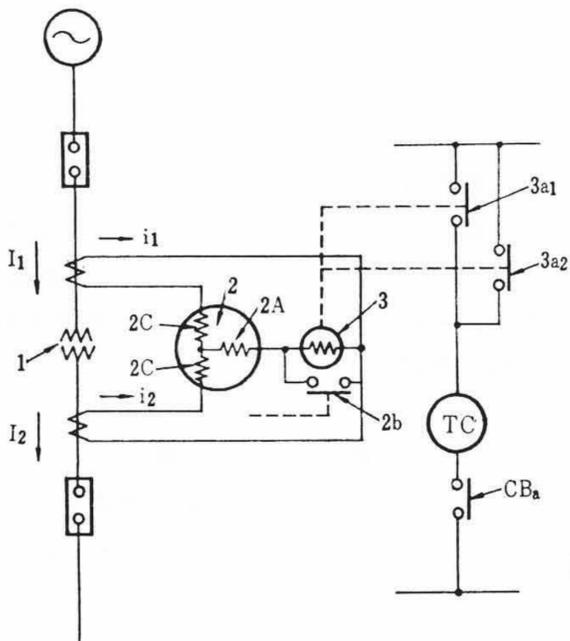


図 1

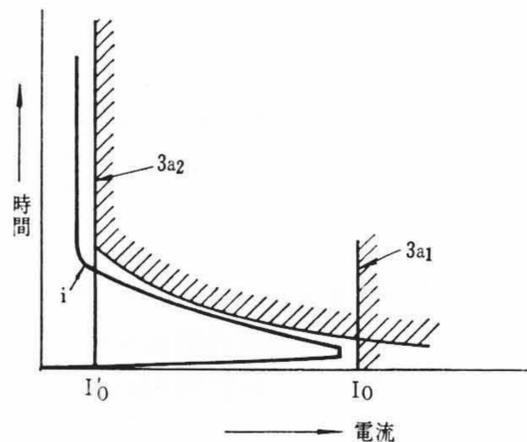


図 2