配電盤用指示電気計器の空気制動装置

Air-damping Devices for Switchboard Instruments

木 内 勝 造* 猿 渡 房 吉**
Katsuzō Kiuchi Fusakichi Saruwatari

原清之助** 井 沢 尊 生**
Seinosuke Shinohara Takaki Izawa

内 容 梗 概

空気制動装置は配電盤用交流計器の制動装置として最もすぐれたものであり、広く使用されているが、指針の静止に要する時間を規定内におさめるためには計器可動部の慣性能率と制動定数との間にいかなる関係が必要かを論じ、従来から知られている制動定数の計算式を修正して提唱した。

1. 緒 言

配電盤用指示電気計器で測定する電気量は、他の用途に使用する 計器で測定する電気量と比較すると、その変化が激しいので計器の 追従速度については特別な考慮を払わねば正しい電気量を指示する ことができない。しかし実際問題として電気量の変化に対して指示 の遅れを生じないようにすれば指針は振動を起し、指示の読取りが できなくなり、また反対に振動を生じないように可動部の制動をき かせすぎると指示に遅れを生じて正しい指示を示さなくなる。

本論文においては指針が一定時間内に停止するためには計器可動部の慣性能率と制動定数との間にいかなる関係が必要かを論じ、さらに種々の制動装置のうち配電盤用指示電気計器に特に有効な空気制動装置に関して検討を加えることにする。

2. 制 動 理 論

2.1 計器指針の運動

一般に計器可動部の運動の方程式は

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + N\frac{d\theta}{dt} + \tau\theta = T....(1)$$

で表わされる。ここで

I: 可動部の慣性能率(g-cm)

N: 制動装置の制動定数(dyne-cm/radian/s)

τ: 制御用スプリングの制御回転力(dyne-cm/radian)

T: 駆動回転力(dyne-cm)

 θ : 指針の回転角度(radian)

t: 時間(s)

とする。また指針が最終的に静止したときの振れ角を θ_m とすれば 駆動回転力Tは $T=\tau\theta_m$ であるから(1)式は

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + N\frac{d\theta}{dt} + \tau\theta = \tau\theta_m \dots (2)$$

また配電盤用指示電気計器は特殊なものを除けば大体において不 足制動にしてあるので

$$N^2 - 4 I \tau < 0$$

として(2)式を解けば

$$\theta = \theta_m \left\{ 1 - e^{-\delta t} \left(\frac{\delta}{\omega} \sin \omega t + \cos \omega t \right) \right\} \dots (3)$$

ここで δ , ω は

$$\delta = \frac{N}{2I}$$
, $\omega = \sqrt{\frac{\tau}{I} - \left(\frac{N}{2I}\right)^2}$ (4)

である。(3)式は計器に突然ある電気量を加えたとき、その指針の運動を示し、第1図はこれを図示したものである。ここで振動の周期を T_a とすると

で、半週期ごとの振幅の最大値、最小値間の時間は $T_d/2$ で

また電気量を加えた瞬間から半周期ごとに数え、n回目の最大値 (または最小値)における θ_m からの偏位の絶体値を A_n , (n+1)回目の最小値 (または最大値)における値を A_{n+1} とすると

$$A_n = \theta_m e^{-\frac{n\delta\pi}{\omega}}, \quad A_{n+1} = \theta_m e^{-\frac{(n+1)\delta\pi}{\omega}} \quad \dots (7)$$

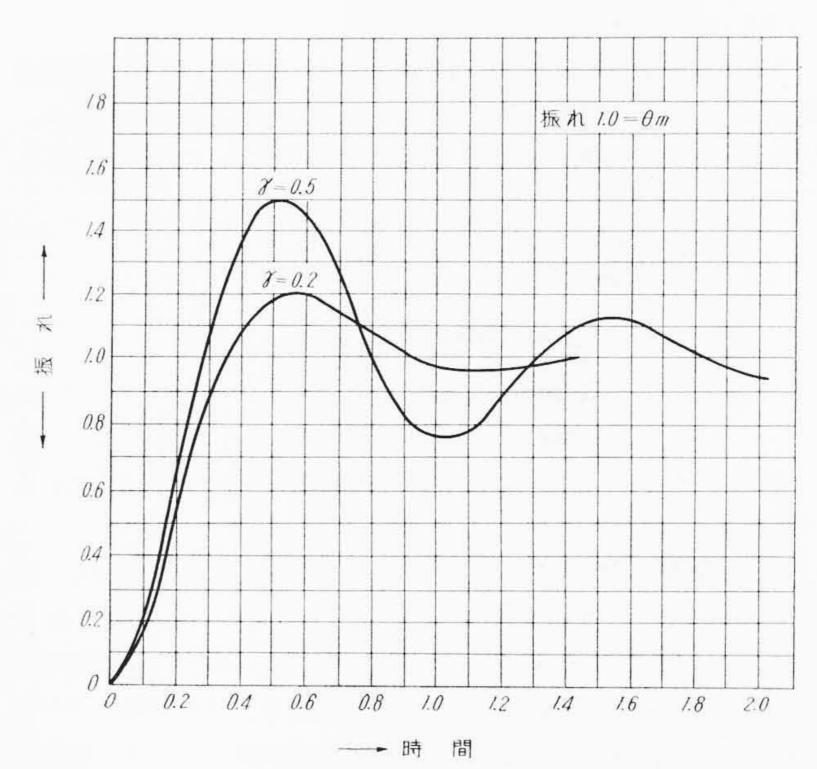
で表わされる。したがって A_{n+1} と A_n との比を減幅率とし、これを γ_n で表わすと

$$\gamma_n = \frac{A_{n+1}}{A} = e^{-\frac{\delta \pi}{\omega}}$$

すなわち一般に減幅率γは周期ごとに変化せず

$$\gamma = e\left(-\frac{\delta\pi}{\omega}\right) = e - \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4 I\tau}}{N^2} - 1} \qquad (8)$$

以上のことから計器にある量の電気量を加えたとき、その指針は周期 T_d をもって減幅率の γ 減衰振動を行いつつ所定の目盛位置に接近して停止することがわかる。



第 1 図 制 動 曲 線

^{*} 日立製作所那珂工場 工博

^{**} 日立製作所那珂工場

2.2 指針の静止時間と制動効果

計器の制動効果が大きすぎると指針が所定の位置に達するまでの時間が長く、前項に述べたように配電盤用指示電気計器のように変化の激しい電気量を測定する場合には不適当であり、また制動効果が小さすぎるとこの追従が早くなるが第1図および(7)式によってわかるように指針は長時間にわたり振動を続け、読取りができない。そこで指針の静止時間を求めてみる。

いま電気量を加えてからn回目に規定内の振幅に納まったものと仮定するとそれまでの時間 T_s は

$$T_s = \frac{T_d}{2} \times n = \frac{n\pi}{\omega}$$
....(9)
また、このときの振幅は(7)式より

$$A_n = \theta_m e^{-\frac{n\delta\pi}{\omega}}$$

であるから、これに(9)式を代入すると

$$A_n = \theta_m e^{-\delta T_s}$$

$$T_s = \frac{1}{\delta} \log \frac{\theta_m}{A_n} = \frac{2I}{N} \log \frac{\theta_m}{A_n} \dots (10)$$

実際の場合にはちょうど A_n が規格限界点に達することはきわめてまれで、 T_s の前後において規定値以内に静止したとみなされる場合が多い。したがって厳密な意味においては指針の静止時間を上記 T_s で表わすことはできない。北川氏の説 $^{(1)}$ によれば、これは+10%、-20%の誤差を生ずるものと論じている。しかしこの程度の誤差を認めると仮定すれば指針の静止時間は(10)式で求めることができる。

配電盤用指示電気計器には直流計器や電力計のように原理的に平等目盛になるべきものと、交流計器のように自乗目盛になるべきものとがある。そこでこれらの計器について最終目盛の±1.5%に指示がおちつく時間を3秒以内として考えてみると

(1) 平等目盛計器

この場合指針の振れ角と入力が比例しているから

$$\frac{\theta_{m}}{A_{n}} = \frac{1}{0.015} = 66.6$$

$$\therefore T_{s} = \frac{2I}{N} \log 66.6 = 8.4 \frac{I}{N}$$

$$T_{s} \leq 3 \text{ (sec) } \ge 3 \geq 5 \geq 5$$

$$N \geq 2.8 I$$

すなわち平等目盛の計器では少なくともN=3 I にとるべきである。

(2) 自乗目盛計器

この場合規定電気量の $\pm 1.5\%$ 増減値における回転力は、規定電気量の回転力の $(1\pm 0.015)^2$ 倍であるから近似的に 1 ± 0.03 倍である。したがって指針の静止とみなされるときの振幅 A_n は 0.03 θ_m となり

$$\frac{\theta_m}{A_n} = \frac{1}{0.03} = 33.3$$

$$\therefore T_s = \frac{2I}{N} \log 33.3 = 7.04 \frac{I}{N}$$

$$T_s \leq 3 \text{ (sec) } \geq 3 \leq 2.35 I$$

すなわち自乗目盛の計器においては少なくともN=2.5Iにとるべきと考える。

制動定数Nは(10)式により大きいほうが指針静止時間が短く,好結果をまねくことは明らかであるが,あまり大きくし N^2 < $< 4 I \tau$ を満足しなければもちろん(10)式も成立しなくなるので,その範囲は制御用スプリングの回転力によって制限される。また制動効果を必要以上にきかすことは構造的に可動部の重量を重くしたり,制動装置の空げきを極端に小にしたりなどして計器に悪結果をまねき,あ

まり得策であるとはいえない。

3. 空気制動装置

空気制動方式の制動効果は制動ボビンまたは制動用コイルによる 電磁制動方式のように計算によって的確に求めることが一般に困難 で,実験式に頼る以外にない。筆者はこの実験式について検討を加 えてみた。

3.1 ピストン形空気制動装置

一般にピストン形空気制動装置の制動定数計算式としては Drysdale⁽²⁾ が次の式を与えている。

$$N = \left(\frac{0.435}{\zeta} + 0.0415\right) A a^2 \dots (11)$$

ここに ζ: 制動翼と制動室の空げき(mm)

A: 制動翼の面積(cm²)

a: 可動部中心から制動翼中心までの距離(cm)

しかし筆者が上式により設計したものは実際のものと $40\sim70\%$ 相違しており適用できなかった。そこで S_{24} 形可動鉄片形計器について上記(11)式の係数を修正して実際によく合致する計算式を求めるため実験を行った。以下その過程について述べる。この制動装置は第2図のとおりで、ピストン形制動室の内径は 2.6 cm、可動部中心から制動翼中心までの距離は 2.6 cm である。制動室と制動翼との空げきを 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm とした 4 種の計器により、空げきと制動定数との関係を実験的に次のようにして求めた。

すなわち JIS に規定された全目盛長の 2/3 を振らせた場合の制動曲線周期 (T_d) および計器の制御スプリングの回転力 (τ) を実測した。その結果は第1表のとおりである。これらの測定値から制動定数Nを求めるためさきに求めた数式を変形した。そのためまず対数減幅率を λ とし

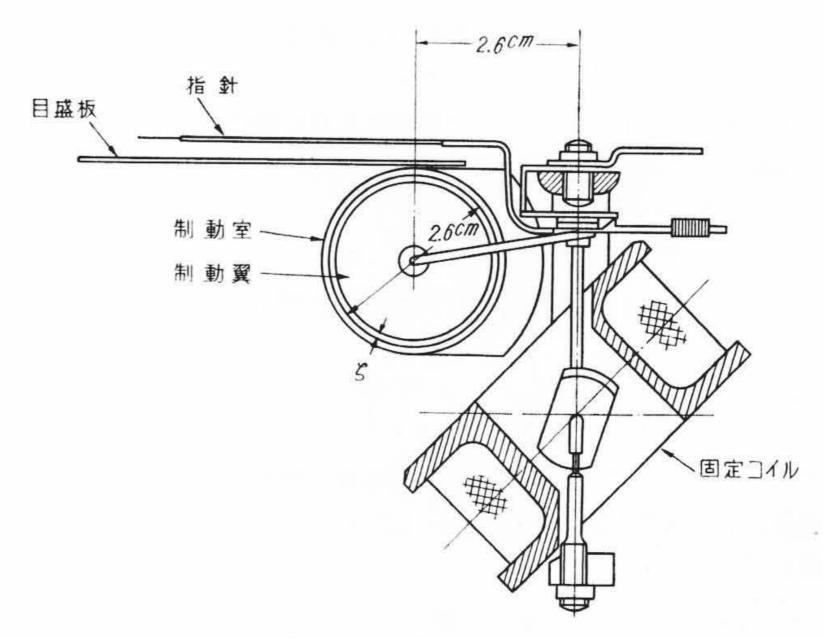
また指針の固有周期を T_{ao} とすれば T_{ao} は(5)式においてN=0 とした場合の値になるから

$$T_d o = 2 \pi \sqrt{\frac{I}{\tau}}$$
(13)

したがって指針の周期(T_d)と固有周期(T_d o)の比をとると

$$rac{T_d}{T_d o} = rac{1}{\sqrt{1-rac{N^2}{4\,I au}}}$$

これに(12)式を代入すると



第2図 S24 形ピストン制動装置寸法図

第1表 S₂₄ 形計器のピストン形制動における制動曲線および駆動回転力測定結果

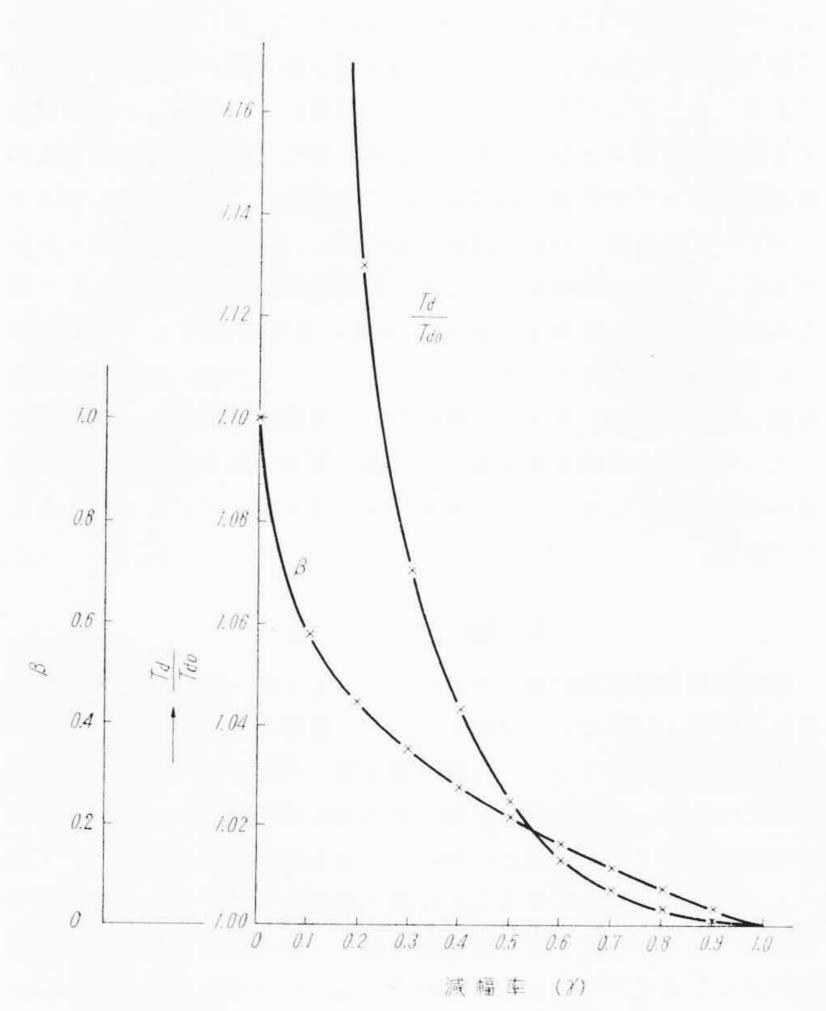
空げき(mm)	0.4	0.6	0.8	1.0
制動	1.3.8	2.2 s 3.5 0.4	3.6 s 2.5	18.5 8 11.2 5.6s
回転力	0.62g-cm/100°	0.62g-cm/100°	$0.62 extbf{g} ext{-} ext{cm}/100^\circ$	$0.62 \mathrm{g}\text{-cm}/100^{\circ}$

第 2 表 γ , β および $\frac{\mathrm{Td}}{\mathrm{Tdo}}$ 関係表

減幅率	対数減幅率 $\lambda = \log_e \frac{1}{r}$	$\beta = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}}$	$\frac{T_d}{T_{d0}} = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}}$
1.0	0	0	1.00
0.9	0.1053	0.0335	1.0006
0.8	0.223	0.071	1.0025
0.7	0.356	0.113	1.0064
0.6	0.510	0.163	1.0132
0.5	0.693	0.216	1.0243
0.4	0.915	0.279	1.0424
0.3	1.203	0.358	1.070
0.2	1.610	0.454	1.131
0.1	2.303	0.580	1.268
0.0	∞	1.000	∞

第3表 S_{24} 形計器のピストン形制動における慣性モーメント、制動定数

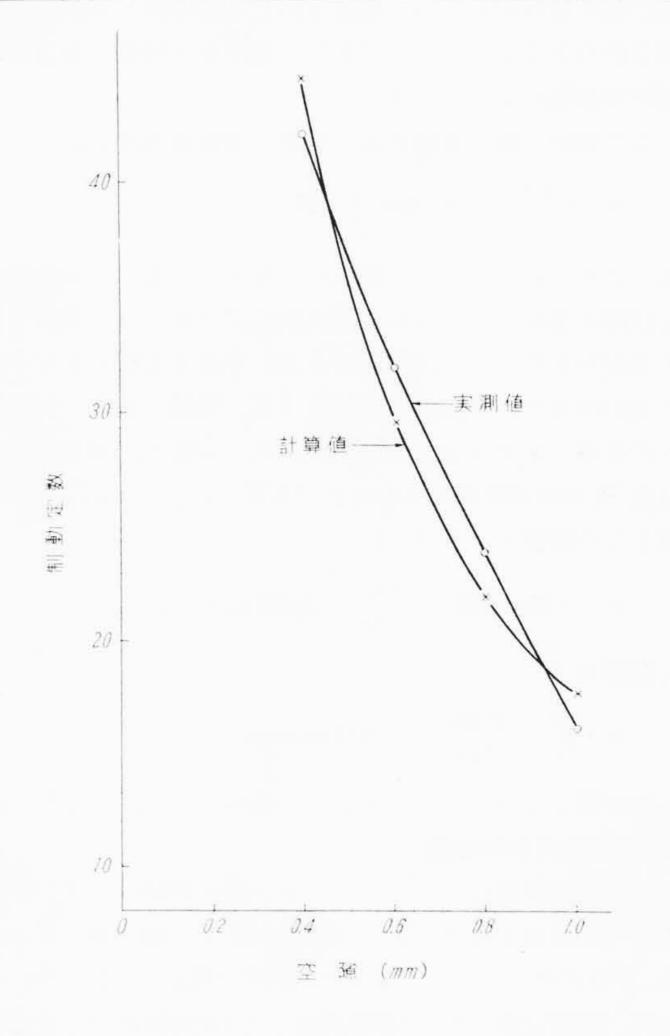
空 げ き (mm)	0.4	0.6	0.8	1.0
減 幅 率	(7)	0.25	0.35	0.47	0.63
回 転 力/rad (dyne-cm/rad)	(τ)	348	348	348	348
制動時の周期 Td	(s)	1.04	0.98	0.96	0.974
周期の比 α=	1.092	1.055	1.029	1.015	
自由周期 $Tdo = \frac{Td}{\alpha}$	(s)	0.95	0.93	0.933	0.96
慣性モーメント (g-cm ²) I= ^τ	$T^2d\phi = 4\pi^2$	7.95	7.6	7.66	8.1
制動定数	実 測	42.2	31.9	23.8	15.9
dyne-cm/rad/s	計 算	44.5	29.5	21.8	17.5



第3図 減幅率 (γ) , $\frac{Td}{Tdo}$ および β の関係

また(12)(13)式より

$$N = \frac{\tau}{\pi} \cdot T_d o \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\lambda^2}}}$$



第4図 ピストン制動における空げきと制動定数 の関係

したがって
$$\frac{1}{\sqrt{1+\frac{\pi^2}{\lambda^2}}}$$
 = β とおけば $N = \frac{\beta}{\pi} \cdot \tau \cdot T_do$ (15)

以上の関係から γ に対する β および T_a/T_{ao} の関係を求めると第 2表のようになり、第3図はこの関係曲線である。第1表から減幅

第4表 LR41 形扇形制動における空げきと制動 定数との関係

空 げ き(mm)		0.5	3.2 s 3.2 s 5	
		2.6s		
回転が	T	0.384 g-cm/80°	0.384 g-cm/80°	
減 幅 辛	ζ γ	0.5	0.59(第4振まで求めその) 平均値	
回転力/rad - dyne-cm/rad		$0.348 \times 981 \times \frac{57.3}{80} = 270$	270	
制動時の周期 <i>Td</i> (s)		$\frac{1.6}{1.75} = 0.915$	$\frac{3.2}{4.25} = 0.75$	
周期の比	$\frac{Td}{Tdo}$	1.025	1.015	
自由周期 Ta		0.893	0.738	
制動定数	実測	16.6	10	
dyne-cm/ rad/s	計算	15.6	8.7	

率 γ を求め、その γ から第3図によって β および T_a/T_{a0} を求める と第1表の T_a , τ を使用し、(15)式によって制動定数(N)が求め られる。第1表の結果からこのようにして得られた各試料の制動定 数は第3表の実測結果によって示し、空げきと制動定数との関係は 第4図の実測値によって示す。

これより制動定数の実験式として次の式を提唱する。

$$N = \left(\frac{0.675}{\zeta} + 0.0644\right) Aa^2 \dots (16)$$

上式により計算したものと実験により求めたものとの比較を第3 表および第4図に示す。なお制動試験にはピボットの摩擦を考慮に いれる必要があり、これは周知のとおり連続する振れがピボットの 摩擦のみの作用では等差級数で減衰する。実験に使用した計器のピ ボットの摩擦トルクおよび摩擦角を求めてみると, 摩擦は実測の結 果指針長70 mmの先端で0.5 mmであるから、これは振れ角度で 0.41 度となり摩擦トルク Frは

$$F_r = 0.62 \times 981 \times \frac{0.41}{100} = 2.488$$
 dyne-cm

ゆえに摩擦角 θrは

$$\theta_r = \frac{F_r}{\tau} = \frac{2.488}{348} = 0.0071 \text{ radian}$$

すなわち非常に小さいものであるから省略しても誤りはない。

3.2 扇形空気制動装置

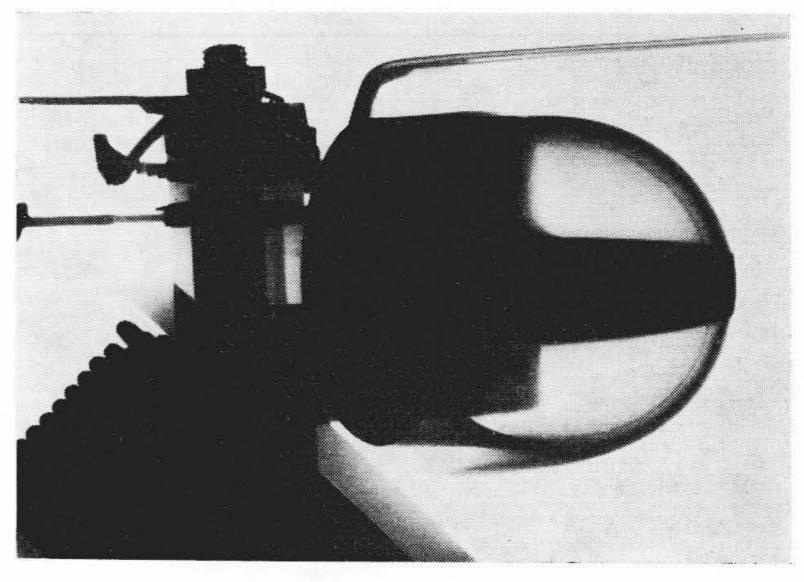
扇形空気制動装置についてもピストン形と同様にして、実験およ び計算から諸定数を導きだした。結果を示すと第4表に示すとおり である。この場合はスイッチボックス用のLR41形計器について実験 を行った。制動定数 (N) の計算式として Drysdale の与えている下 記の計算式はほぼ実験値と一致している。

$$N = \left(\frac{0.248}{\zeta} + 0.169\right) ba^2 \dots (17)$$

ζ: 制動翼と制動室の空げき(mm)

b: 翼の幅(cm)

a: 翼の半径(cm)



第5図 S₂₄ 形交流計器の空気制動装置のX線写真

4. 空気制動方式を計器へ適用する場の問合題点

空気制動方式の特長としては

- (a) 制動室の寸法の割に比較的大きい制動効果が得られること
- (b) 電磁制動においては過大電流によって制動用永久磁石が減 磁されることを考慮しなければならないが、その心配がまったく ないこと
- (c) 構造が簡易,堅ろうでありかつ値段的にも安価であること などがあげられる。一方欠点としてはピストン形においては制動翼 と制動室との間げきをピストンの両端においては見ることができて も、中央においては見ることができないので、果して実際の製品が 一様な空げきに組み立てられているかどうかを確かめることが困難 であり、またダンパアームが長いので変形によって引っかかりを生 ずる懸念があることなどである。前者に対しては第5図のようにX 線透視によって中央部における空げきを検査し、後者に対してはダ ンパアームの材質,形状を適正なものにし、さらに組立後エージン グを行って寸法の経時変化を防ぎ,配電盤用計器の特殊性として電 力系統の異常時に印加される30倍程度の過電流に対しても損傷が ないよう適当な空げきをもたせることなど, 設計的, 工作的に解決 を図ってある。以上のような理由から, 異常現象に耐え, 長年月に わたって所期の目的を達することが強く要求される配電盤用交流計 器の制動装置としては,空気制動方式が最も適しているということ ができる。

5. 結

配電盤用指示電気計器は本論に述べたように, ほかの用途に使用 される計器とは異なった見地から設計, 製作されるべきであるとの 意見を筆者は持っている。今回は最も広く利用されている空気制動 装置について, 指針の静止に要する時間を考慮に入れた場合, 可動 部の慣性能率と制動定数との間にいかなる関係があるかについて述 べた。慣性能率を小にすることは静止時間を短くするために必要で あるが, あまり小にすることは配電盤用計器に要求される機械的強 度の点からみて不可である。この点に関しては本論文の主旨からは ずれるので別の機会に論ずることにしたい。また従来採用されてい た空気制動の制動定数の計算式を実験的に修正し(16)式を提唱し た。これらの提案が計器の設計の一助になれば幸いである。

- (1) 北川: 指針静止時間 電気評論 35 巻 9, 10号 (昭 22)
- (2) Drysdale: Eectrical Measuring Instruments (1924)