

一枚円板三相積算電力計の相互干渉について

Mutual Interference between One-Disc Three-phase Watthourmeters

中 村 奎 一* 浜 崎 亀 次 郎*

Keiichi Nakamura Kamejirō Hamazaki

内 容 梗 概

一枚円板三相積算電力計に特有な漂流トルクを追求し、各磁束の配置がどのように干渉誤差に影響するかを調べた。また、これに対する日立製作所独特の補償法を紹介するとともに、これを用いて開発した YD-2 形積算電力計について構造、特性などについて述べている。

1. 緒 言

従来、誘導形交流三相三線式積算電力計は 1 本の共通軸に 2 枚の回転円板を取り付け、そのおのにおに単相積算電力計の駆動素子を配置し、それぞれの素子に与えられた電力に比例した回転力を得て電力量の計量を行なっていた。

一方、形状の小形化と回転子重量の軽減を図って円板を 1 枚とし、これに単相駆動素子を 2 個配置した、いわゆる一枚円板三相積算電力計がある。この種の計器は主として共通円板上の渦(うず)電流を介して素子間に漂流トルクを生じさせているが、このままでは正しい電力量の積算を行なうことはできない。

本文ではこの漂流トルクを検討し、これに対する日立製作所独特の補償法を説明するとともに本補償を用いて開発した YD-2 形積算電力計について報告する。

2. 回転円板に生ずるトルク

2.1 円板上の渦電流

まず、誘導円板に作用する交番磁束によって発生する円板上の渦電流を考える。

第 1 図は無限に広い導体板に垂直に、二つの大きさ等しく、位相の 180 度異なった交番磁束 $+\phi_A$ 、 $-\phi_A$ が作用しているときに、板上に生ずる渦電流路を示したものである。渦電流路は図のように 2 磁束の中性線に関して対称的な偏心した円群になる。なおこれらの円の中心は A、A' (各磁束の中心) を結ぶ直線上にある。

今、図において任意の円 C_1 (半径 r 、中心 O) をとってみると、この内部の円群は誘導円板 C_1 上に $+\phi_A$ のみが作用した場合に発生する円板上の渦電流路群に等しくなる。したがって C_1 内部、すなわち誘導円板上の任意の点の電流ベクトルを見いだすには、このように映像磁束を考えてこれら二つの磁束による電流のベクトル和として求めることができる。

今 $2S$: 二磁束間の距離

r : 任意の電流路円 C_1 の半径

e : C_1 の中心 O より A 点までの距離

とすれば、これらの関係は次のように表わすことができる⁽¹⁾。

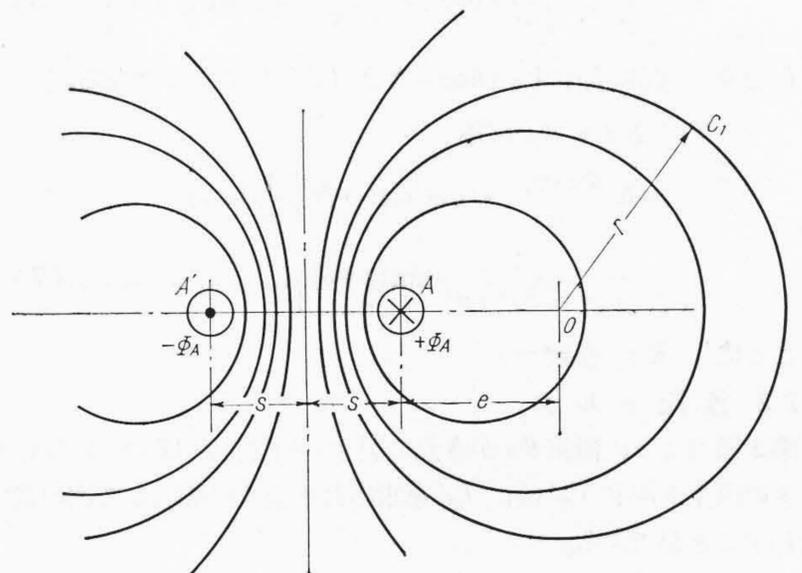
$$S = \frac{r^2 - e^2}{2e} \dots\dots\dots (1)$$

$$e = \sqrt{S^2 + r^2} - S \dots\dots\dots (2)$$

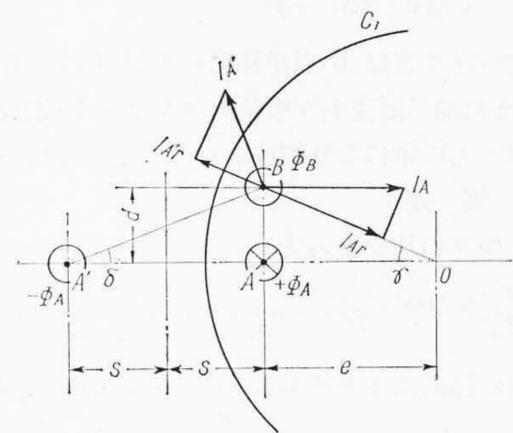
2.2 回転トルク

第 2 図に示すように円板 C_1 内の A 点を中心第一の磁束 $+\phi_A$ があり、その付近に $\angle OAB = \pi/2$ 、 $AB = d$ なる B 点を中心第二の磁束 ϕ_B があるとする。ただし、これら 2 磁束の直径は d に比べて十分小さい円内に一様に分布しているとする。

ここで、 $+\phi_A$ の作る円板上の渦電流が ϕ_B と作用して発生するト



第 1 図 無限に広い導体板上に 2 磁束 $+\phi_A$ 、 $-\phi_A$ が鎖交したときの渦電流分布



第 2 図 回 転 ト ル ク

ルクを計算する。(1)式より $+\phi_A$ の円板 C_1 に対する映像磁束 $-\phi_A$ を考えて、無限平面におけるトルクを算出すればよい。

$+\phi_A$ による B 点の電流密度 I_A は、回路のインピーダンスが抵抗分のみから成るとすれば次のように表わされる。

$$I_A = \frac{2\pi f \phi_A}{\frac{\rho}{t} \cdot 2\pi d} = \frac{ft}{\rho d} \cdot \phi_A \dots\dots\dots (3)$$

ここに f : 周波数

ρ : 導体板の固有抵抗

t : 導体板の厚さ

ただし ϕ_A は磁束の実効値を表わすものとする。

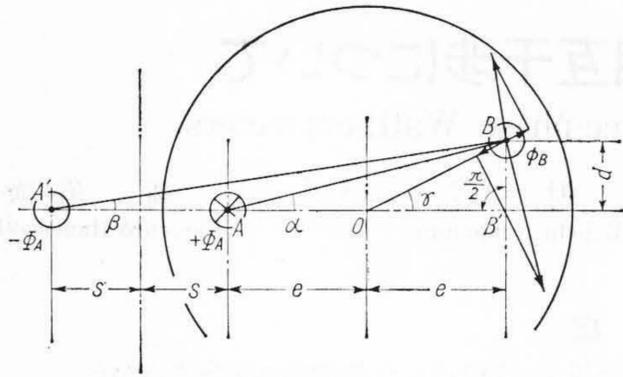
I_A の円板の中心に向かう成分 I_{Ar} は

$$I_{Ar} = I_A \cos \gamma = \frac{ft}{\rho d} \phi_A \cos \gamma \dots\dots\dots (4)$$

同様に $-\phi_A$ による B 点の中心方向の電流密度 $I_{A'r}$ は

$$I_{A'r} = \frac{ft}{\rho \sqrt{(2S)^2 + d^2}} \phi_A \sin(\gamma + \delta) \dots\dots\dots (5)$$

* 日立製作所那珂工場



第3図 漂流トルク

B点のこれらの合成された電流密度 I_r は

$$I_r = \frac{ft}{\rho} \phi_A \left\{ \frac{1}{d} \cos \gamma - \frac{1}{\sqrt{(2S)^2 + d^2}} \sin(\gamma + \delta) \right\} \dots (6)$$

I_r と ϕ_B の間に発生する回転トルク T_d' は次のようになる。

$$\begin{aligned} T_d' &= K I_r \times \phi_B \times \overline{OB} \\ &= K \frac{\phi_A \cdot \phi_B}{\rho} \cdot \sqrt{e^2 + d^2} \cdot ft \left\{ \frac{1}{d} \cos \gamma \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{(2S)^2 + d^2}} \sin(\gamma + \delta) \right\} \dots (7) \end{aligned}$$

ここに K : 常数

2.3 漂流トルク

第3図のように磁束 ϕ_B がA点に関する軸対称点B'のそばにきたときの漂流トルク T_m' は、 T_d' を求めたと全く同様にして次の式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} T_m' &= K \frac{\phi_A \cdot \phi_B}{\rho} \cdot \sqrt{e^2 + d^2} \cdot ft \left\{ \frac{1}{\sqrt{(2e)^2 + d^2}} \sin(\gamma - \alpha) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{(2e+2S)^2 + d^2}} \sin(\gamma + \beta) \right\} \dots (8) \end{aligned}$$

ここで留意すべきことはB点移動してB'点にくる、すなわち $d=0$ となるかまたは二磁束が円板軸を含んで一直線上にあると、上式の γ, α, β はともに零になり漂流トルクが発生しないのである。

2.4 漂流誤差

今、求めたトルクの比をとって

$$\epsilon_m' = \frac{T_m'}{T_d'} \times 100 (\%) \dots (9)$$

を定義し、これを漂流誤差と呼ぶことにする。(7), (8)式より

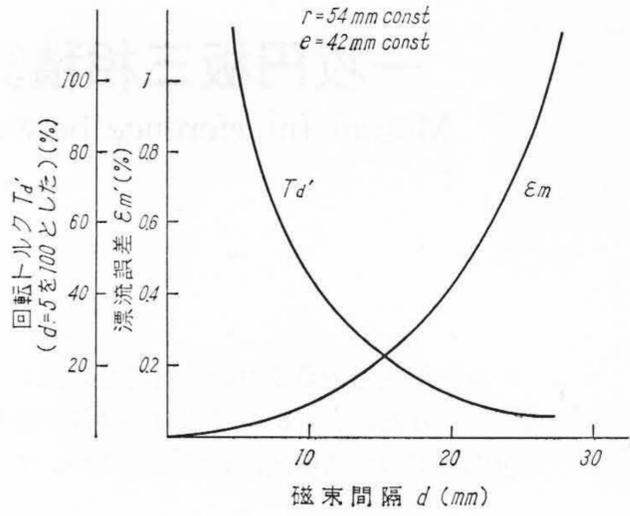
$$\begin{aligned} \epsilon_m' &= \frac{\frac{1}{\sqrt{(2e)^2 + d^2}} \sin(\gamma - \alpha) - \frac{1}{\sqrt{(2e+2S)^2 + d^2}} \sin(\gamma + \beta)}{\frac{1}{d} \cos \gamma - \frac{1}{\sqrt{(2S)^2 + d^2}} \sin(\gamma + \delta)} \\ &= \frac{1}{\frac{4e^2 + d^2}{d^2} - \frac{r^2}{(r^2 - e^2)^2 + e^2 d^2}} \times 100 (\%) \dots (10) \end{aligned}$$

上式を用いて計算する。円板直径 r を一定に保って e, d を変化したときの T_d' および ϵ_m' を求めると第4図のようになる。

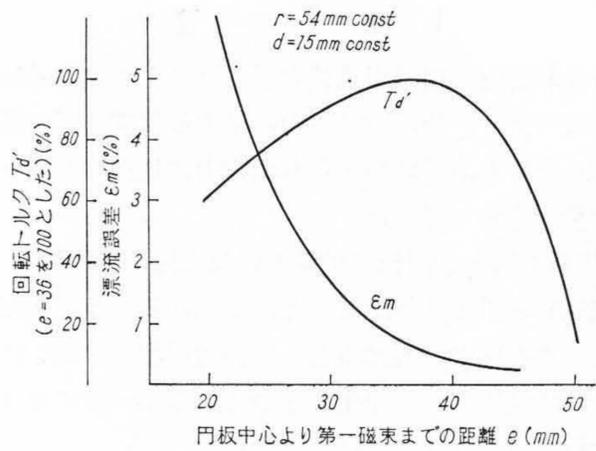
- (1) 第4図(a)より、 d を小さくすると ϵ_m' が小さくなる。同時に T_d' は増す。
- (2) 第4図(b)より、 e は大きいほどよい。すなわち e/r は1に近いほどよいが、あまり大きくとると T_d' が激減する。

3. 積算電力計の漂流誤差

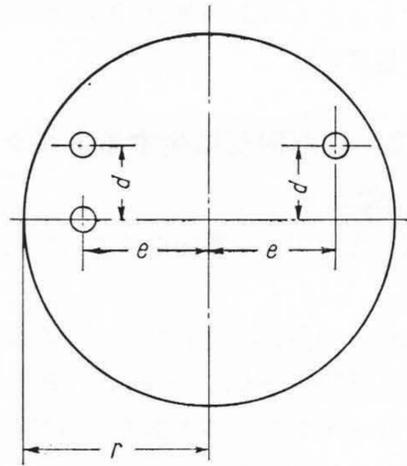
一例として、実際の積算電力計は第5図のように第I素子側に $\phi_p, \phi_c, -\phi_c$, 第II素子側に $\phi_p', \phi_c', -\phi_c'$ が分布している。ここで ϕ_p, ϕ_p' は電圧磁束, $\phi_c, -\phi_c, \phi_c', -\phi_c'$ は電流磁束である。今、図のように両素子の各磁束を円板回転軸0に関して対称に配置すれば ϕ_p と ϕ_p' の間にはトルクを発生しない。また $+\phi_c \sim +\phi_c'$,



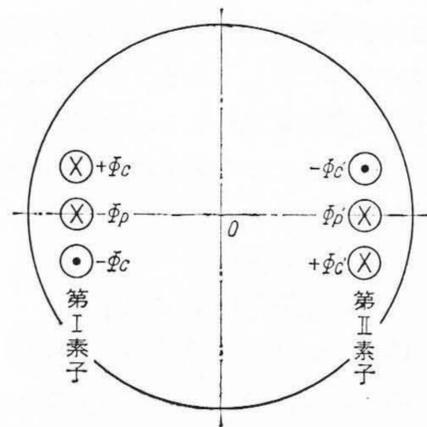
(a)



(b)

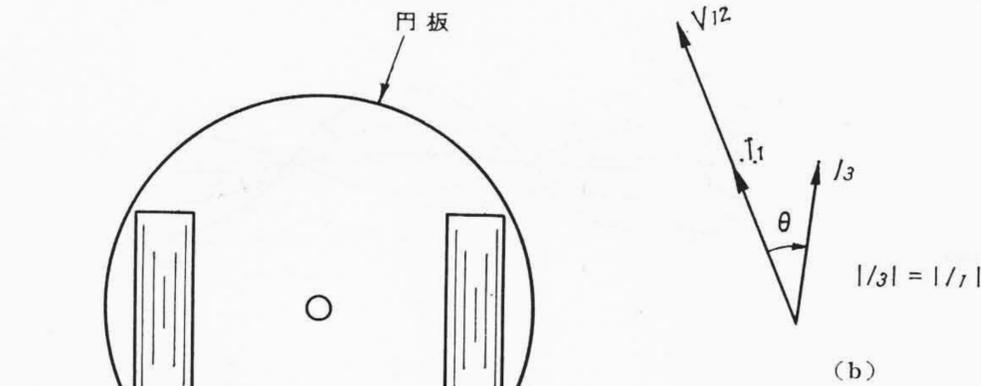


第4図 回転トルクと漂流誤差 (計算値)

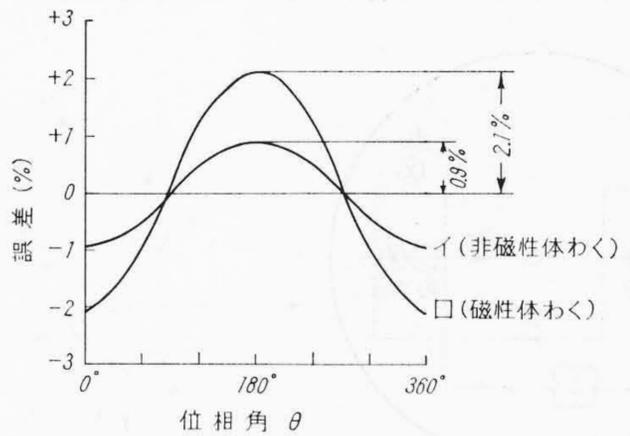
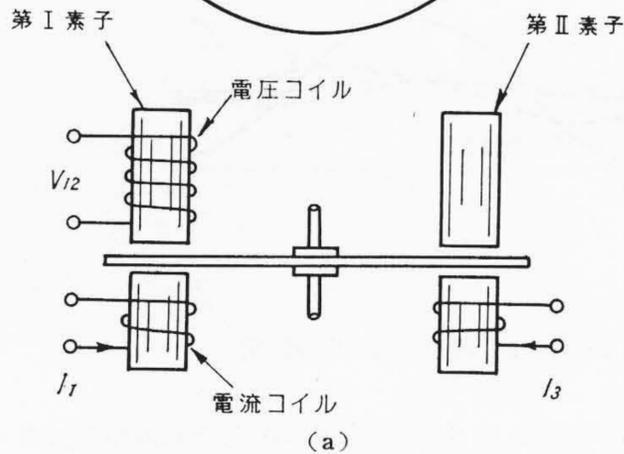
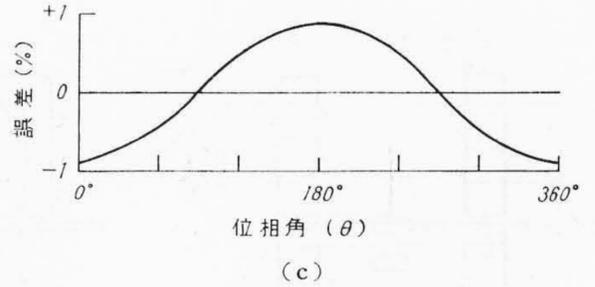


第5図 積算電力計の円板上の磁束分布

$-\phi_c \sim -\phi_c'$ 間のトルクも同様である。次に $+\phi_c \sim -\phi_c'$ 間および $-\phi_c \sim +\phi_c'$ 間のトルクは、それぞれ大きさ等しく方向が反対になっているので相互に打ち消される。すなわち、2素子を軸対称に配置することにより2電圧磁束間、2電流磁束間の有害なる干渉トルクを除去することができる。結局、残された干渉トルクは $\phi_p \sim +\phi_c'$ 間および $\phi_p' \sim -\phi_c$ 間のもの、ならびに $\phi_p' \sim +\phi_c, \phi_p \sim -\phi_c'$ 間のトルクである。 $\phi_p \sim +\phi_c'$ 間および $\phi_p' \sim -\phi_c'$ 間のトルクは大きさ等しく方向も等しい。したがってこの干渉トルクを論ずるには



第6図 漂流誤差の測定



第7図 磁気干渉に関する測定

$\phi_p \sim \phi_c'$ 間のトルクのみを考えればよい。これに対する駆動トルクは $\phi_p \sim \phi_c$ 間のものである。これらの比を漂流誤差とすれば、これは(9), (10)式で求めた ϵ_m' に全く等しい。

ここで、積算電力計の漂流誤差を次により定義する。

$$\epsilon_m = \frac{T_m}{T_d} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (11)$$

ここに T_m : 積算電力計の漂流トルク

T_d : 積算電力計の駆動トルク

ただし、両トルクとも各磁束の任意の位相角における最大値を示す。

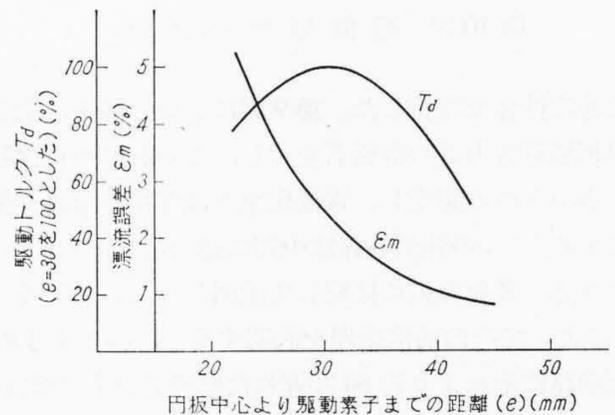
積算電力計の漂流誤差 ϵ_m は漂流トルクと駆動トルクとの比であり、したがって ϵ_m を実験的に求めるには次のようにすればよい。すなわち、第6図で第I素子に電圧 V_{12} 、電流 I_1 を与え、これらを同相にして円板を駆動させる。一方、第IIの素子にはたとえば $|I_3| = |I_1|$ なる電流を流し、これを I_1 に関して移相する。ここで発生するトルクを考えてみると、 $V_{12} \sim I_1$ 間の正常な駆動トルク、 $V_{12} \sim I_3$ 間、 $I_1 \sim I_3$ 間にそれぞれ発生する干渉トルクである。 I_3 を移相すれば第6図(c)にみられるように誤差は正弦曲線を描く。この曲線の振幅は明らかに駆動トルクに対する漂流トルクの%で表わされた比であり、 ϵ_m にほかならない。

実際の積算電力計では漂流誤差は円板の渦電流によるものが大部分を占める構造にすることができるので、そのほかの磁気的干渉トルクを無視して考えると

$$\epsilon_m \doteq \epsilon_m' \dots\dots\dots (12)$$

とすることができる。そこで、円板軸に関して2素子を対称に配置すれば前述のように $I_1 \sim I_3$ 間のトルクはなくなり、結局、この誤差は $V_{12} \sim I_3$ 間のトルクに起因する干渉誤差となる。したがって、前節の結論と同様に積算電力計の漂流誤差を小さくするには、2素子を軸対称に配置し、素子間隔を大きくとり、なお d すなわち電流磁束のピーク間の距離の小さい素子を用いることなどが有効である。

磁気干渉に関する測定例を第7図に示す。二つの駆動素子を同一円板に配置するためには、単一支持わくを使用しなければならないが、曲線(イ)は非磁性体のわくを使用した場合を示し、(ロ)は磁性体で支持した場合を示す。円板は直径 108φ のものを使用し、駆動



第8図 駆動トルクと漂流誤差 (実測値)

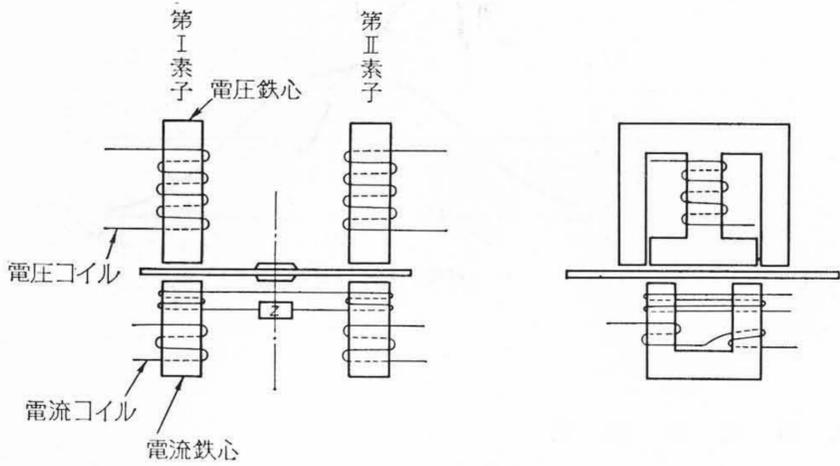
素子は分離形单相積算電力計 (Y-7A 形) を素子間隔 84 mm にして測定した結果である。干渉誤差は(ロ)が(イ)の2倍以上になっているが、このことから各駆動素子を相互に磁気的に隔離することが特に望まれるわけである。なお、鉄などの磁性体で両素子を結合することは、いたずらに漏えい磁束を助長するばかりでなく、I ~ II 素子電気回路の相互誘導作用を増大し、また漏えい磁束はそれ自身円板に作用してトルク発生の原因ともなり、二次磁束を発生し、これらが相まって磁気的干渉による誤差を生ずる。

第8図は素子間隔が漂流誤差にどのように影響するかを実測したものである。円板は前と同様に 108φ であり、駆動素子も Y-7A 形積算電力計のものを使用した。第5図(b)と同様な結果になっていることを確認したが、素子間隔をあまり大きくすると有効磁束が円板周辺に近づき、漂流誤差の減少より駆動トルクの減少が顕著になってくる。

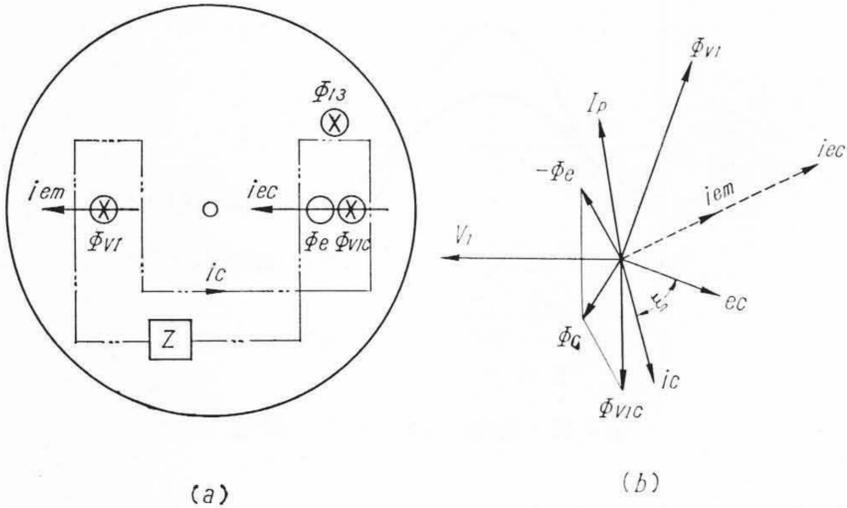
4. YD-2 形積算電力計の漂流誤差補償法

YD-2 形積算電力計は次節で説明するように Y-7A 形積算電力計を駆動素子とする計器であり、その漂流誤差補償法について以下説明する。

この計器は漂流誤差を極力小さくするために二つの電磁石を円板軸に関して対称に配置し、また素子間の電磁結合を少なくするため



第9図 YD-2形積算電力計の補償巻線の説明



(a) (b) 第10図 補償原理の説明

に両素子を非磁性体で支持した。第9図において第I, 第II素子はそれぞれ単相積算電力計の電磁石を示し, おのおのの電流鉄心の上部には電圧磁束とのみ鎖交し, 電流磁束とは作用しない補償巻線が取り付けられている。二つの補償巻線は中間に適当なインピーダンス(インダクタンス分) Zを直列に接続して閉回路をなしている。

第10図によってその補償原理を説明すると, 第I素子の電圧 V_1 により電圧回路にそれより約80度遅れた励磁電流 I_p が流れ, I_p によりそれより約25度遅れた電圧有効磁束 Φ_{v1} が発生し, 円板に鎖交している。一方, Φ_{v1} は第II素子の電流磁束 Φ_{I3} による円板上の渦電流 i_{ec} のうち, 一部の遠く Φ_{v1} 下まで及んできた電流 i_{em} と作用して, ここに漂流トルク T_m'' を作る。

$$T_m'' = k \Phi_{v1} i_{em} \cos \varphi \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに k : 常数
 φ : Φ_{v1}, i_{em} 間の位相角

一方, Φ_{v1} は補償巻線にそれより90度位相の遅れた誘導電圧 e_c を誘起し, この回路に電圧 e_c より回路のインピーダンス角 ξ だけ遅れた補償電流 i_c を流す。 i_c は第II素子巻線にまで流れ, そこに電圧磁束に相当する補償磁束 Φ_{v1c} を発生する。次に Φ_{v1c} は Φ_{v1} の帰路漏えい磁束 Φ_l とのベクトル和である新たな補償磁束 Φ_c を生ずる。いかえると新たに第II素子に補償巻線を通して電圧補償磁束 Φ_c が生じたことになる。この Φ_c と i_{ec} の間に生ずる補償トルク T_c は

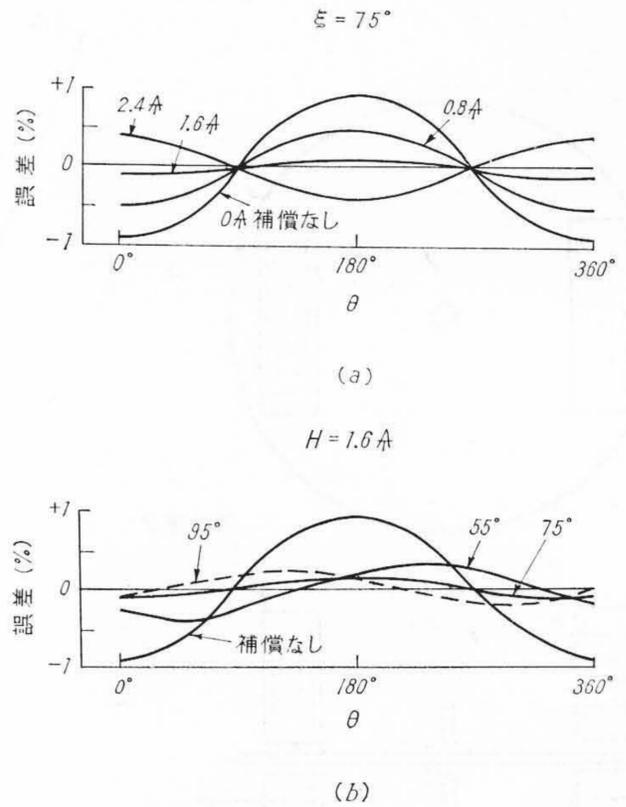
$$T_c = k' \Phi_c i_{ec} \cos \varphi' \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで k' : 常数
 φ' : Φ_c, i_{ec} 間の位相角

そこで ξ および補償アンペアターンを適当に選んで

$$T_m'' + T_c = 0 \quad \dots \dots \dots (15)$$

とすることができれば漂流トルクは除去される。なお, ここでは便宜上 Φ_{I3} の作る渦電流が Φ_{v1} と作用して作られる干渉トルクについて説明したが, Φ_{v1} の作る渦電流が Φ_{I3} に作用して作る干渉トルクも同じ大きさであり, これは Φ_c の作る渦電流が Φ_{I3} と作用して打消すことも容易に説明できる。なお実際には Φ_{I3} のほかに $-\Phi_{I3}$ が存



第11図 漂流誤差の測定

在し, また第I素子に電流, 第II素子に電圧がそれぞれ印加されてはいるが, これらが存在する場合にも同様に干渉トルクが補償されることは重畳の理によって明らかである。

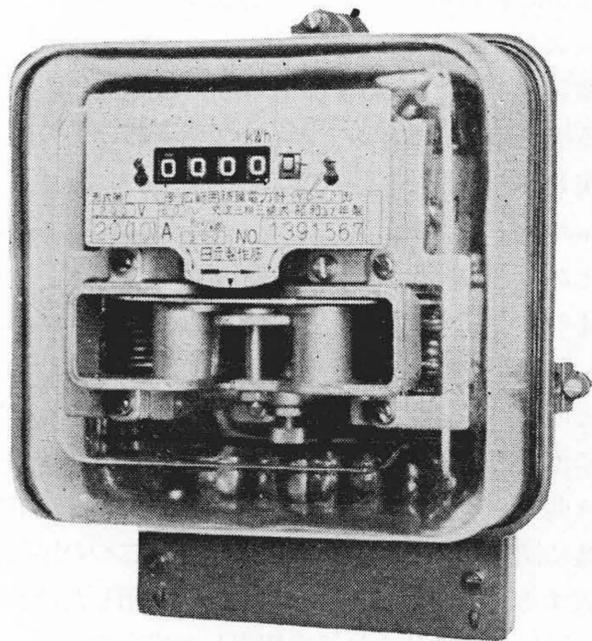
第11図は補償回路の電流と誤差曲線の関係を示したものである。図(a)は $\xi = 75$ 度一定として補償アンペアターン H (補償電流 \times 補償巻線の巻数-この場合, 5ターン)を変化したものを示し, (b)は ξ を変化したものを示し, いずれも第7図の測定法によるものである。 $H = 1.6A$, $\xi = 75$ 度付近が最良である。

5. YD-2形三相広範囲積算電力計

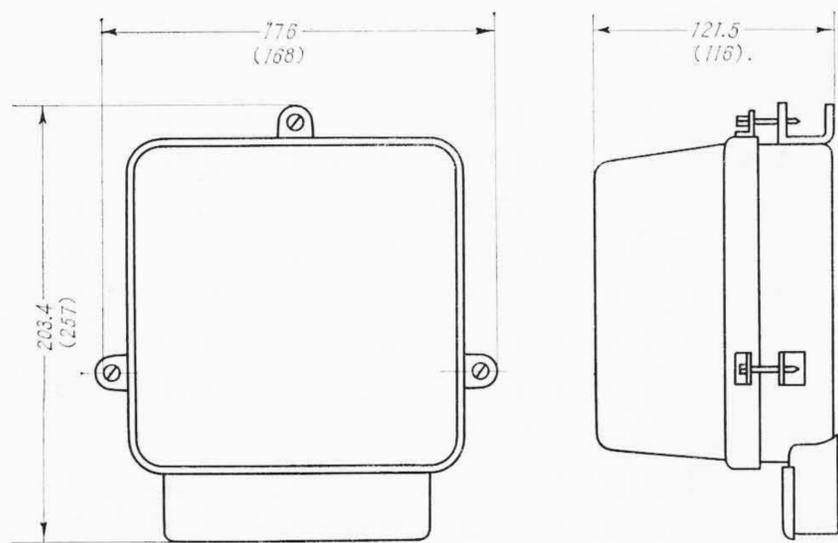
前述した漂流誤差補償装置を施すことにより漂流の少ない YD-2 形三相広範囲積算電力計の完成をみたが, 以下この計器の構造, 特性の特色について述べる。

5.1 構造

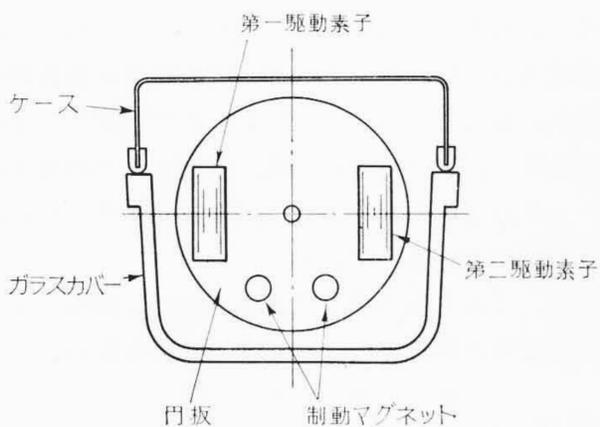
第12図はこの計器の外観であり, 第13図は外形寸法図を示す。主要寸法のうち()を付けた数値は従来品 Y-33 形三相積算電力計のものであるが, 幅, 奥行は大差ないが高さが約80%に縮減され, 設置面積の節約に有効である。第14図は各素子の配列を示しているが, 干渉誤差の少ないように軸対称に駆動素子を配置し, また円板振動を極小にするため2個の制動磁石を前面に取り付けてある。



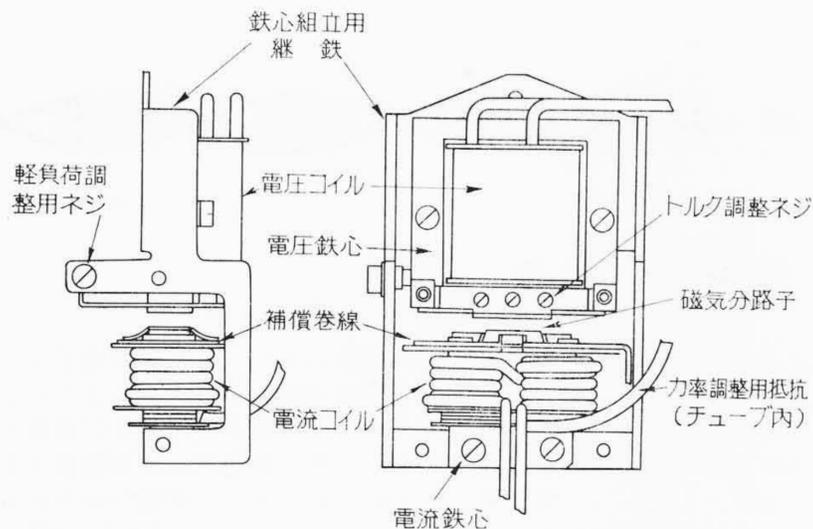
第12図 YD-2形積算電力計の外観



第13図 YD-2形積算電力計の外形寸法図



第14図 YD-2形積算電力計の素子配置説明図



第15図 YD-2形積算電力計の駆動素子

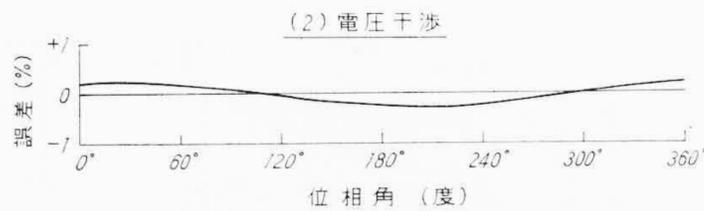
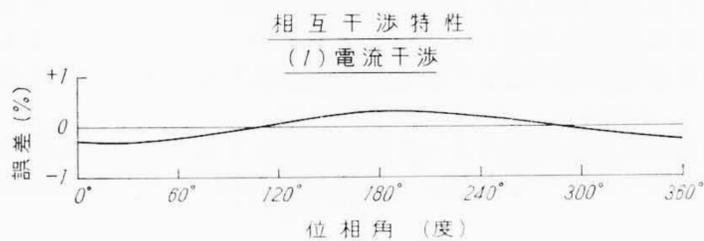
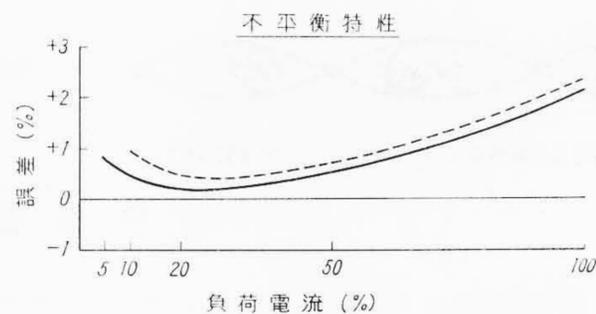
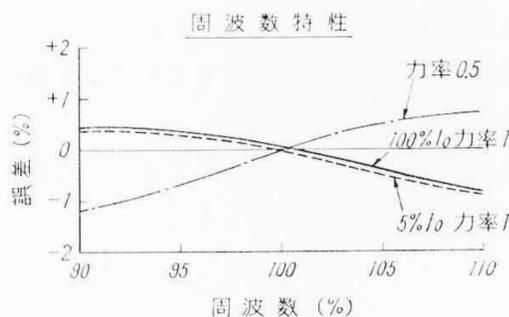
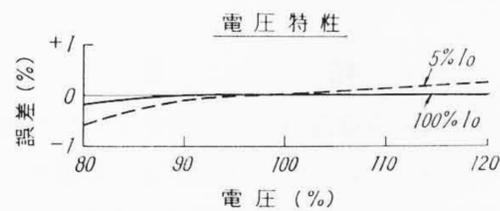
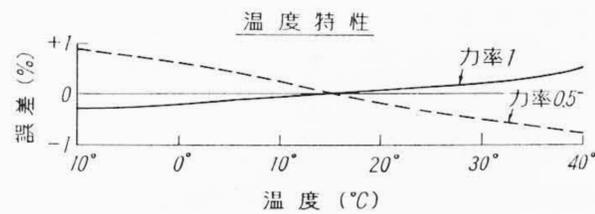
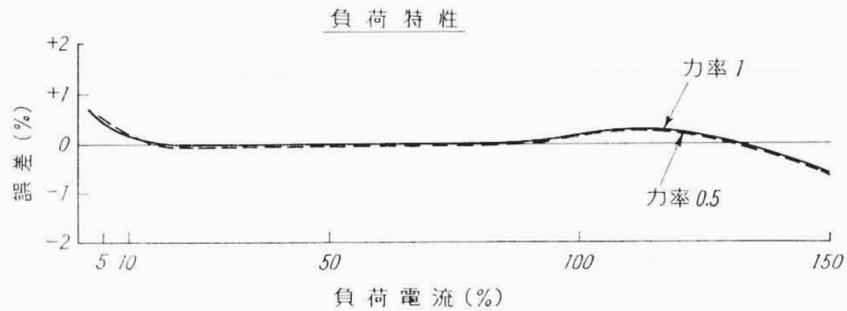
回転子重量は35gで従来品の70%に軽量化され、機械的良度の向上と寿命の延長が図られている。

駆動素子としてはY-7A形単相広範囲積算電力計の電磁石を採用しているが、2素子間の磁氣的干渉を少なくするためにアルミ合金ダイカスト製支持わくに取り付けてある。第15図にみられるように、駆動トルク平衡装置は電圧鉄心に磁気分路板を取り付け、これに装置した鉄ネジによりトルク平衡を微細に行なえる構造である。軽負荷調整および力率調整装置はY-7A形と全く同様である。

電流電磁石には、上部に前述の漂流誤差補償コイルが電気回路と十分に絶縁されて取り付けられ、かつ過負荷特性補償用磁気分路子の下に堅く固定され、計器中央に設置したリアクタと直列に接続されて漂流誤差補償装置を形成している。

計量装置はY-7形、Y-7A形積算電力計と同様に宝石軸受式を採用し、摩擦トルクの低減と計器の寿命延長に役だっている。

そのほか、制動磁石は日立金属工業株式会社製アルニコ磁石(YCM-1磁石鋼)2個を使用して小形強力なものとし、それぞれに温度補償装置を設けており、またネジによる制動力の微調整方式を



第16図 YD-2形積算電力計の主要特性

採用した。

5.2 特性

この計器はJIS C-1211広範囲積算電力計規格を十分に満足するものであるが、第16図におもな特性を示した。負荷特性は定格値の5%から150%の過負荷まで保証するものであり、さらに温度特性は第一種、第二種特性とも補償されているので、広範囲にわたる外気温の変化にも少ない誤差で動作するものである。

漂流誤差は前述の補償法により大幅に改善され、無補償の場合の電流干渉誤差(第6図参照)、電圧干渉誤差がそれぞれ1%程度あ

第 1 表 YD-2 形積算電力計の特性定数
200V 20(10)A 50~

		YD-2	Y-33
計器良度	計器定数	300	300
	全負荷速度	0.577	0.577
	全負荷トルク	16.5	14.5
	回転部重量	35	50
機械的良度		0.25	0.14
電圧回路	励磁電流	23.0	18.9
	電力損失	0.9	0.95
電流回路	電力損失	0.48	0.95

たものが、それぞれ 0.3% 程度になっている。

そのほか始動電流、電圧、周波数、不平衡などはいずれも JIS を十分満足するとともに、従来品と比べて一段と改良されている。

第 1 表はこの計器の特性定数を示すものである。

6. 結 言

YD-2 形一枚円板三相積算電力計は駆動素子として Y-7A 形单相積算電力計のものを採用し、過負荷 150% まで保証する計器として開発されたが、この形式の計器に発生する漂流誤差について解析を行なった。その結果、漂流を少なくするためには、

- (1) 素子間の磁氣的干渉を少なくするために非磁性体支持わくを採用する。
- (2) 二つの素子を回転円板軸に対して正しく対称に配置する。
- (3) 二つの駆動素子間隔を大きくとる。

(4) 電流磁束の二つのピーク位置の間隔を小さくすることを究明した。

しかし、積算電力計は特性、構造上種々の制約があるので、漂流をできるだけ少なくなる構造にし、さらに新しく補償を施すことにより干渉誤差を極小とする方法をとった。すなわち、おのおのの電流鉄心上に電圧磁束のみと作用する補償巻線を取り付け、これと直列に抵抗とインダクタンスよりなるインピーダンスを接続して閉回路を形成して新たな補償磁束を発生せしめる独自の方式を考案したが、この結果、無補償の場合に約 1% 近くあった漂流誤差を約 0.3% 程度に縮減させることができた。

またこの計器は従来品に比べ回転子を 1 枚としたために形状の小形化が達せられ、負荷特性、温度特性の一段の改良、微調整方式の採用がなされている。

最近、電力量の厳正なる取り引きのために特性の優秀性とともに経年劣化の少ない長寿命計器の開発が望まれているが、この計器には Y-7 形積算電力計に採用したと同様に宝石軸受計量装置の採用、外部よりの熱的、磁氣的じょう乱にきわめて安定した小形強力な YCM 磁石の採用、回転子重量の低減、駆動トルクの増大のほか、下部軸受ボールにはさびの発生しない耐摩耗性にすぐれた特殊合金ボールの採用などが実施されている。

終わりに臨み、この計器の開発にあたり終始ご指導いただいた日立製作所日立研究所の関係各位に厚く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- (1) R. M. Morton: A. I. E. E (April 1936)



特 許 の 紹 介



特許第 286662 号 (特公昭 35-11976)

木 村 博 一

電 子 顕 微 鏡 の 電 子 レ ン ズ 系

一般に 1 個の円筒状永久磁石またはこれに代えて多数の棒状永久磁石を円筒状に配置したものをもって、対物レンズおよび投射レンズを並列に励磁する電子顕微鏡などの電子レンズ系においては各レンズの焦点距離は一定して、終像倍率を変化することは困難である。

この発明は永久磁石によって励磁される対物レンズおよび投射レンズの中間の継鉄中に中間レンズ間げきおよびその励磁線輪を設

け、この中間レンズにおける励磁の調整により、この種の電子レンズ系の終像倍率を広範囲にわたって変化することができるようにしたものである。さらにこの発明においては対物レンズおよび投射レンズはともに永久磁石で励磁するので、特に励磁のための電源を必要とせず、したがって電源電圧の変動にもとづく不安定のおそれもなく、高い安定度を保つことができる。(永 田)

