

交流電気動力計の理論と計測

帝国工業電機KK* 岩 岸 巖

1. 緒 言

交流電気動力計の用途は、すでに航空機工業、自動車工業、農業用発動機の製造、その他の高速度工業で実験研究用として用いられている。

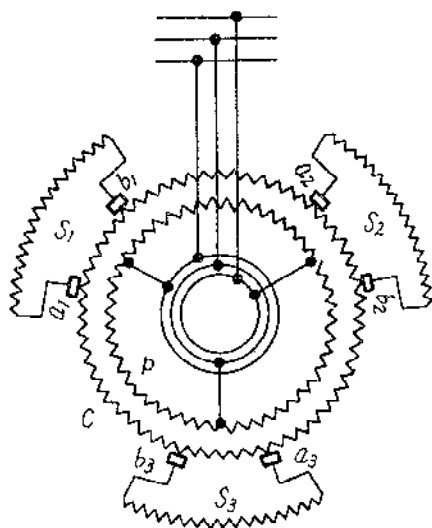
本論は、筆者の過去設計製作した経験から、先ず交流電気動力計の主体である Schräge 型電動機の電気的特性と、動力計の原理を述べ、その構造を記し、次に機械的損失と誤差につき解析し、最後に計測の実例をあげてこれを検討し、結言においてその特徴を概説する。

2. 理 論

2.1 整流子機の原理

交流電気動力計の主体となるものは、シュレーゲ型三相分巻整流子電動機であるが、第1図はその内部の巻線を示したもので、回転子一次巻線 P は、滑動環を通じて線路より電力の供給線に連絡せられる。

固定子二次巻線 S は、その両端に接続せられた刷子の開角を加減して、回転子の調整巻線 C より取る二次励磁電圧を調整して、速度の制御を行う。



P : 回転子一次巻線, C : 調整巻線
 S_1, S_2, S_3 : 固定子二次巻線
 a_1, b_1, c_1 : 同一保持器に取付けられた刷子
 a_2, b_2, c_2 : " "

第1図 三相分巻整流子機の接続図

a_1, a_2, a_3 の刷子は、前部刷子進退器に取り付け、 b_1, b_2, b_3 の刷子は、後部刷子進退器に取り付け、この二つの進退器は、互に反対の方向に回るようになっている。

しかして、 ab 間の電氣的角度を $(-\frac{\pi}{2}) \rightarrow (0) \rightarrow (+\frac{\pi}{2})$ に変えることができる。 ab 間に現われる電圧は、筆者の研究では、次記の式で示される。

$$Ea = (e_{t1} \times \frac{p}{a} k_{wc} (K/P)) (2 \sin \frac{r}{2} / \pi) \dots \dots \dots (1)$$

ただし e_{t1} は回転了一次巻線の1巻回当りの電圧、 P は極数、 p は極の対数、 a は調整巻線の並列回路の半数、 K は整流子片の数、 r は ab 間角の半数、 k_{wc} は調整巻線の巻線係数である。

ここに $2 \sin \frac{r}{2} / \pi$ の最大値は $\frac{2}{\pi}$ であるから、 ab が最大に開いた時に刷子間に現われる電圧は

$$Ea_m = (e_{t1} \frac{p}{a} k_{wc}) (K/P) (\frac{2}{\pi}) \dots \dots \dots (2)$$

となる。この式で相隣れる整流子片間電圧は

$$e_{ic} = (e_{t1} \frac{p}{a} k_{wc}) \dots \dots \dots (3)$$

今 E_{am} を発生するために巻かれている ab 間の有効最大整流子巻回数を N_{emc} とし、固定子每相巻回数を N_{es} 、固定子巻線係数を k_{w2} 、固定子電圧を E_2 とすれば

$$u = E_{am} / E_2 = (N_{emc} / N_{es}) (k_{wc} / k_{w2}) \dots \dots \dots (4)$$

次に同期速度を n_0 とすれば、無負荷速度は

$$n = n_0 (1 \pm u) \dots \dots \dots (5)$$

ここに ab の刷子開角が、最小のときには u は-の値をとり最低速度となり、最大のときには、 u は+の値をとり最高速度となり、さらに、この開角が零の時には、 u の値も零となるから同期速度となる。

よって(5)式は、速度範囲決定上設計に応用せられる。もし $u=1$ の値に設計すると、最高速度は同期速度の2倍となり、最低速度は零とすることができる。たとえば、2極機で 50 c/s にて $u=1$ では、

$$n_0 = 3000 (1 \pm 1) = 6000 \sim 0 \text{ rpm}$$

となり、零から 6000 rpm までの速度調整ができる。

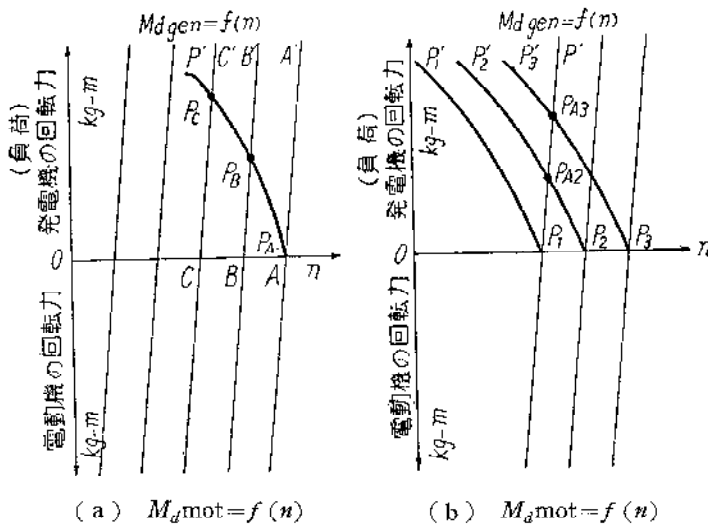
およそ三相誘導電動機で、その一次側を線路に接続しておいて、回転子を同期速度以上の速度で外部から駆動すると、誘導発電機として線路へ電力を返送する。

* 大阪市西淀川区御幣島西2の26

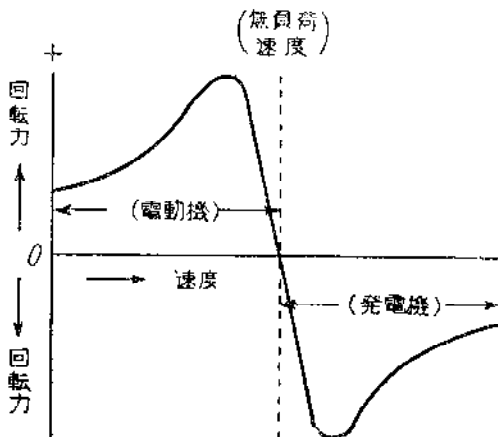
しかしこの場合に、励磁電流のみは線路からとっている。これと同様に、三相分巻整流子機の一次側を線路に接続しておいて、無負荷速度より高い速度で、外部から回転してやると、整流子発電機として線路へ電力を返送する。

この理論は、発電機として使用する場合に応用せられる。すなわち動力計を発電機として負荷するには、刷子を低速位置へ移動して行けば、駆動する原動機である被試験機の回転数より以下の刷子位置で発電機として回転する。

第2図はこの原理を示したもので、(a)図から見ると被試験機は速度特性を $P_A P'_1$ とすれば、最初の起動位置では、両機は A で無負荷運転を行うから、刷子を BB' 、 CC' のような低速位置へ移動すると、 $P_A P'_1$ との交点は $P_B P'_2$ に移り、これらの点に対応した負荷がかかる。あるいは (b) 図に示すように、刷子の方は固定したままで、被試験機は速度を $P_2 P'_2$ 、 $P_3 P'_3$ と上げて、 $P_{A2} P_{A3}$ などの点に対応する負荷をかけることができる。



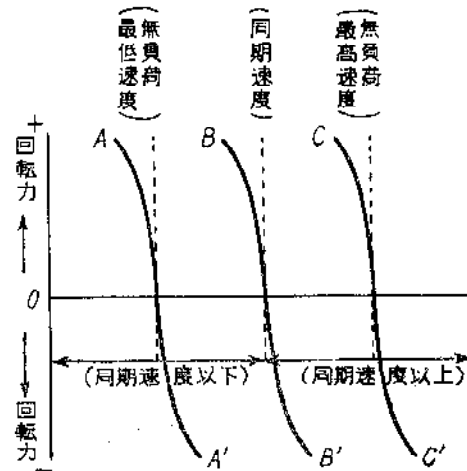
第2図 交流電気動力計の速度回転力と負荷



第3図 整流子機においてある刷子位置における速度回転力曲線

第3図はある刷子位置に対する三相分巻整流子機の速と回転力の関係を示したものである。

刷子間の角度を変更すれば、各位置に対して、第3図のような特性が得られる。



第4図 整流子機において同期最高、最低速度における速度回転力曲線

第4図は同期、最高、最低速度における速度回転力曲線を示したもので、それぞれ BB' 、 AA' 、 CC' で表わした。 AA' と CC' 間では、任意に速度回転力を加減することができる。

この速度と回転力の積は、出力に比例するから、広範囲にわたる刷子開角中の各刷子位置において、その速度と回転力に応ずる出力、入力を知ることができる。

2.2 交流電気動力計の原理

試験すべき機器を動力計の回転子軸に直結して、電動機式動力計として運転すれば、回転子と固定子の電流相互間の電磁作用により固定子に回転力を生じる。

この回転力は動力計の回転子から被試験機に伝導せられた回転力に等しい。よつてこの回転力を秤により測定し、これと同時に回転数を測定すれば、動力計から機器に伝導せられた動力を知ることができる。

すなわち、固定子回転力により秤に作用する重量 (kg) を W_a とし、回転子軸中心より着力点までの距離 (m) を l とし、毎分回転数 (rpm) を n とすれば

$$IP = W_a l n / 726 \quad (6)$$

上式の l は設計の際適当に選ぶと簡単になる。

たとえば、 $l = 0.363$ (m) とすると

$$IP = (W_a n \times 0.363) / 726 = W_a n / 2000$$

$$IP = W_a n / \textcircled{R} \quad (7)$$

上式で $\textcircled{R} = 2000$ となるが

⑩を動力計定数と定義する。

ここで回転力は

$$M_d = W_d t = 726 \text{ HP/n} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

上式で求めた値は電動機として使用した場合で、被試験機の入力である。

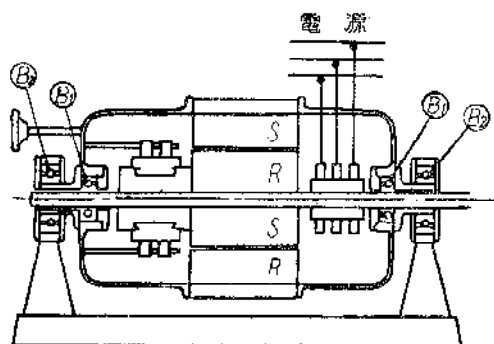
また発電機として使用する場合には、この値は被試験機の出力となる。

3. 構造

既述の原理により整流子機の固定子を可動式にしてこれに測定用の秤を取付け、電動機または発電機として、固定子におよぼす回転力、馬力を測定するようにしたものが、交流電気動力計である。

第5図はこの構造の大様を示したもので、第6図はこの外形を示したものである。

自動計測装置：

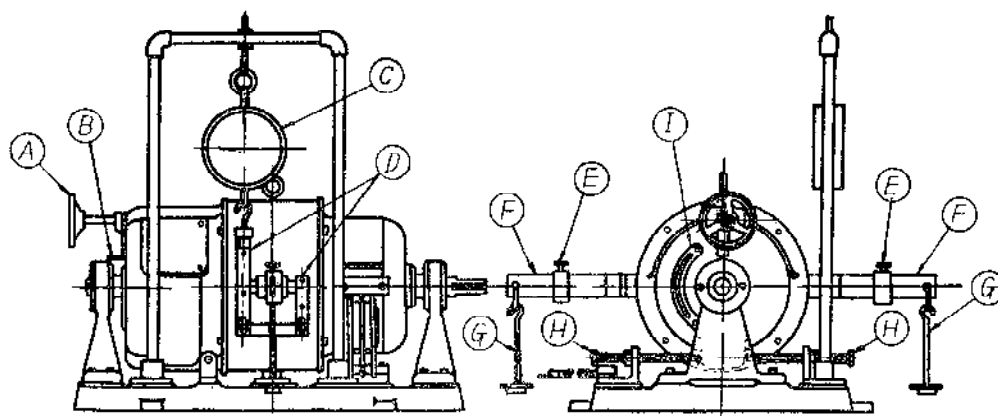


R：回転子， S：固定子

B₁：回転軸と固定子エンドカバー間に挿入せられたボールベアリング

B₂：固定子エンドカバーと軸受台S間に挿入せられたボールベアリング

第5図 電気動力計の構造略図



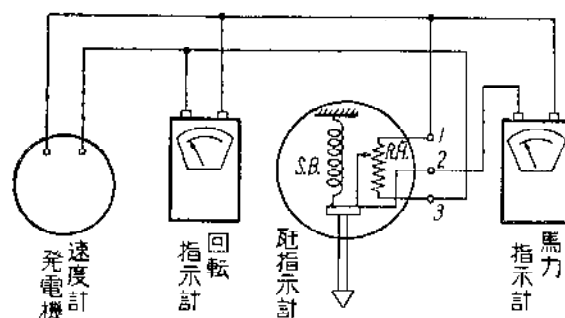
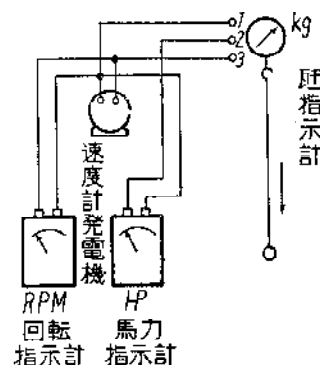
A：速度調整用把手， B：中心指示用指針， C：パネ秤， D：連動装置，
E：固定子平衡用錘， F：槓桿， G：定錘受け， H：固定子用固定捻子，
I：速度目盛板

第6図 電気動力計の外形図

電気動力計により計測せられる馬力数は、瓶指示計の重量と回転数の積に比例して決定せられる原理に基づき、この双方の計量を電流の値に替えて、馬力指示計をつけて出力、入力を直接見ることができる。

第7図はこの接続図であつて、回転数は軸に取りつけた速度計用発電機により電流として伝え、重量は瓶指示計に作用する牽引力により上下運動をRHの摺動抵抗を加減するために取りつけた接触子片を動かすことにより電流を加減し、この双方の電流による作用で馬力指示計を動作せしめて、馬力を見ることを示している。

本装置は、記録式とすることもできる。



第7図 自動馬力計概説図

4. 回転力と誤差

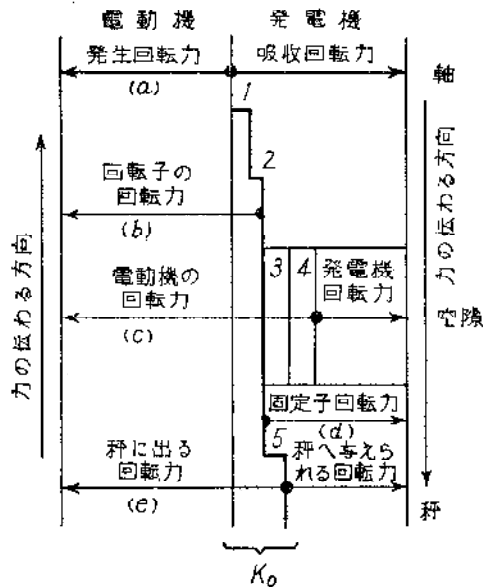
動力計で機械的損失として誤差を生ずる原因と考えられるものは

- 1) 回転子または固定子を外側で支えている軸受の摩擦（外部）
- 2) 回転子空気摩擦（外部）
- 3) 固定子軸受摩擦（内部）（回転子と固定子間）
- 4) 空気摩擦（内部）（空隙）（回転子と固定子間）

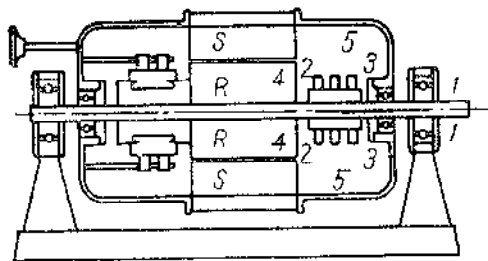
5) 固定子空気摩擦

上記の5種類を動力計の機械的損失と定義する。

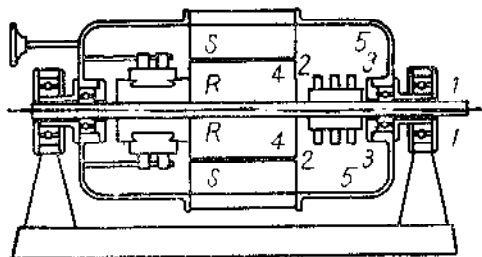
第8図はこの損失を回転力で示し、また修正値を示した解析的図表であつて、第9図は分布状態を表わした。第9図(a)のように回転子軸を外部で支える場合と、第9図(b)のように固定子のカバーを支える場合とがあるが、後者は新型であつて、1の誤差は秤に出ない。



第8図 回転力として見た損失



(a) 旧型 $K_0=1+2+5$



(b) 新型 $K_0=2+5$

第9図 機械的損失の分布

第8図で見ると、動力計を電動機または発電機として使用した双方の軸回転と秤回転力の間にある各回転力の作用と誤差を生ずる点が明らかになる。

先ず電動機として運転したる場合を見ると、 a は軸に出る回転力を示し、これに1,2が加わると、回転子の回

転力は、 b 上のものとなり、固定子の回転力 d と相反接する。なお b 上の回転力に5の損失が加わると秤に出る e 上の回転力になる。

一方3, 4が d 上の回転力に加わると、 c 上の回転力は、空隙における電動機の固有の回転力に相当するものなる。

実際の測定では、 $1+2+5$ は秤に出るが、 $3+4$ は秤に現われない。

しかし $3+4$ は電動機として回転するときには、入力中に含まれ、発電機として回転するときには、出力中に含まれない。

以上の理由から

① 軸における機械的回転力の測定では、 a と e の回転力を考え、 $K_0=1+2+5$ を修正する。

② 効率の算定では、後述の N_s, N_d は電力計により読み、この場合にも修正は a 上の軸回転力と e 上の秤回転力との間で行い、すなわち $K_0=1+2+5$ を考えればよい。

これを力学的に見ると、発電機として使用する場合には、軸における吸収回転力は、秤に現われる回転力に $K_0=1+2+5$ の修正値を加えたものとなり、電動機として使用する場合には、軸で発生する回転力は秤に現われる回転力より、これらの修正値を差引いたものとなる。

ここで $K_0=1+2+5$ を回転力計測の修正値と定義しておく。

5. 回転力と効率の計測

上述の原理により、回転力と効率を計測する公式を作ることができる。

5.1 回転力

- ① 発電機になつたとき $M_d(\text{軸}) = M_b'(\text{秤}) + K_0$
 - ② 電動機になつたとき $M_d(\text{軸}) = M_b'(\text{秤}) - K_0$
-(9)

上記の K_0 は動力計を電動機として無負荷で回転したときに、秤に現われる回転力に等しい。

5.2 被試験機の効率

動力計により測定せられる被試験機が、電動機なるか、発電機なるかにより、下記の公式が成立する。

- ① 電動機なるとき $\eta\% = 102.7 (M_d' + K_0) n / N_s$
 - ② 発電機なるとき $\eta\% = 97.3 N_d / (M_d' - K_0) n$
-(10)

ただし $102.7 = (2\pi \times 9.81 / 60 \times 10^3) \times 100$, $97.3 = 1 / 102.7$, N_s : 入力 (W), N_d : 出力 (W)

上記のように K_0 は理論的には電動機として使用するときと、発電機として使用するときにより、別々に修正すべきであるが、実際の動力計の取り扱いにおいてはあ

らはじめ無負荷で、電動機として回転し K_o を測り、あるいはこの場合に回転方向と反対側において、 K_o の値だけ第6図の E に示す平衡錘を加減して、 K_o の指示を零とおき測定を進めることは簡単である。故に実験の間では、誤差の原理に多く頭を使う必要はなくなる。

6. 実験

第1表は 7.5 HP, 220 V, 四極, 60 c/s, 0~3000 rpm の三相分巻型電気動力計に制動機をかけて電動機として運転し、各種の回転における IP , W_d' , W_{do}' , K_o , IP_o を計算した一例である。

先ず W_d' を一定に保ちつつ刷子の移動により、各種の回転に対する上述の値を見た。

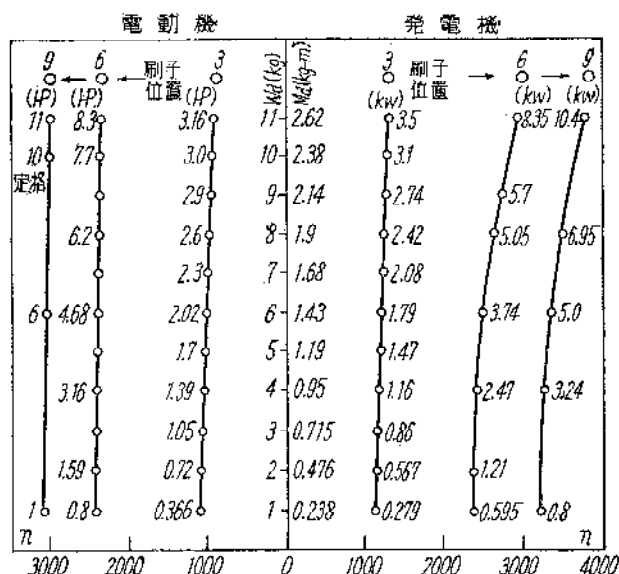
W_{do}' は K_o を生ずる W_d' , IP_o は K_o に消費せられる馬力である。

本機は、定数 $\textcircled{6} = 3000$, $l = 0.2388$ (m) であるが、 $M_d' = W_d' l = 7.5 \times 0.2388$, $M_d = M_d' - K_o = 1.7711$, 秤出力 $IP' = 7.5$ 馬力, 軸出力 $IP = (7.5 - 0.1) \times \frac{3000}{3000} = 7.4$ 馬力。

今この動力計を被試験機たる三相交流電動機(入力 7.32 kW)で駆動すると、(10) 式によりこの駆動電動機の効率は $\eta\% = 102.7 \times (1.795 + 0.0239) \times 3000 / 7320 = 76.5$ となる。

第10図は新しく設計した三相、四極、10 HP, 220 V, 60 c/s, 0~3000 rpm 動力計の速度回転力、出力、入力を示した。

本機は $\textcircled{6} = 3000$, $l = 0.2388$ (m) として図表の中央に示す縦軸には指示計に出る重量 W_d' と回転力 Ma' を示し、徐々に変化し、なお刷子位置を変えて試験した



第10図 10HP 交通電気動力計速度回転力曲線

が、 $\textcircled{6}$ はその刷子位置を表わし、低刷子位置では小さい容量、高刷子位置では大きな容量の測定に適することを示し、 $\textcircled{9}$ の位置の曲線の上端は、最大測定限度であつて、 $\textcircled{3}$ の曲線の下端は最小測定限度になつたことを示している。

すなわち、電動機として 11~0.336 (HP), 発電機として 10.4~0.238 (kW) の範囲の測定ができる。

第2表は農発用として特に製作した動力計の試験成績である。

左方の目盛は刷子位置を示し、 W_d' を一定に保ち、腕と重錘、バネ秤、ブローブレーキによる三つの場合における馬力の実測値を対比したものである。

第1表 回転力と回転方向を異にする 7.5 HP 電気動力計の試験

CCW (整流子側から見て)						
rpm	IP'	W_d'	W_{do}'	$W_{do}'/W_d'\%$	K_o	IP_o
170	0.425	7.5	0.05	0.67	0.0119	0.0028
1050	2.62	7.5	0.07	0.93	0.0167	0.0248
1650	4.13	7.5	0.08	1.07	0.0191	0.044
2050	5.13	7.5	0.09	1.2	0.0215	0.0615
$\times 3000$	$\times 7.5$	$\times 7.5$	$\times 0.10$	$\times 1.33$	$\times 0.0239$	$\times 0.10$
3100	7.75	7.5	0.10	1.33	0.0239	0.1032
CW						
200	0.5	7.5	0.025	0.34	0.00592	0.0016
1050	2.62	7.5	0.03	0.4	0.00715	0.0105
1550	3.98	7.5	0.04	0.53	0.00955	0.0207
2040	5.1	7.5	0.05	0.67	0.01192	0.034
2950	7.38	7.5	0.05	0.67	0.01192	0.079
3000	7.5	7.5	0.05	0.67	0.01192	0.05

第2表 8 HP 交流電気動力計試験成績

目盛	方向	CCW							CW						
	電流 A	rpm	腕		バネ秤		プロニー ブレーキ		rpm	腕		バネ秤		プロニー ブレーキ	
			kg	HP	kg	HP	kg	HP		kg	HP	kg	HP	kg	HP
2	10	160	4	0.427	8	0.427	2.66	0.427	200	4	0.533	8	0.533	2.66	0.533
3		640	"	1.7	"	1.7	"	1.7	660	"	1.75	"	1.75	"	1.75
4		1,160	"	2.96	"	2.76	"	2.76	1,180	"	3.15	"	3.15	"	3.15
5	14.5	1,600	"	4.26	"	4.26	"	4.26	1,620	"	4.32	"	4.32	"	4.32
6		2,400	"	6.4	"	6.4	"	6.4	2,300	"	6.14	"	6.14	"	6.14
7	17	2,500	"	6.66	"	6.66	"	6.66	2,500	"	6.66	"	6.66	"	6.66
8		2,700	"	7.2	"	7.2	"	7.2	2,700	"	7.2	"	7.2	"	7.2
9		3,000	"	8	"	8	"	8	3,000	"	8	"	8	"	8
10	2.5	3,000	"	8	"	8	"	8	3,000	"	8	"	8	"	8

HP = $Wn/\text{⑤}$, 定数 ⑤ = 1,500 (腕), 3,000 (バネ秤), 1,000 (プロニーブレーキ), 方向: 整流子側から見て

7. 検 討

第1表を見ると、更正値は回転数と回転方向により変っている。前者は回転により機械的損失が増すことを意味し、後者は CW と CCW により連動装置の影響を受けていることになる。故に回転数と方向により K_0 の更正が必要である。この更正は第5項の終りで示したように、測定に際しあらかじめ先に行うことがよい。

10 HP 程度のものであれば、圧指示計の目盛が低い位置では正確に読み得ないため、 K_0 の測定は信頼性が少ないことになるが、理論を掲げたため一応の実験例としては参考に供することを御承知願いたい。

第8図で示したものは単に傾向を示したもので、実測値の寸法でないことをお断りしておく。

第10図は同じ動力計を電動機とし、または発電機として使用するときの、速度回転力、測定し得る範囲の実測である。この傾向は各容量のものを通じて一般に適用ができる。

第2表はプロニーブレーキと対比して、常に一致した data が出ることの一例で、従来製作したもの各々につき実験したが、いずれも本例のように正しく一致する。

整流子機で炭素刷子の接触による摩擦は、機械的損失になるが、動力計では3の回転子と固定子間の摩擦と同じ性質のものであつて、秤に現われない損失になる。第9図ではこの摩擦をあげることは省略したことを附言する。

8. 結 言

動力計の機械的損失としては第8図で解析したように5種類になるが、秤の更正値としては、旧型で $1+2+5$ 、新型で $2+5$ となり、問題になるものは回転子と固定子

の外部における空気摩擦であつて、これは動力計を無負荷で電動機として運転したとき秤に出る値 K_0 である。

軸において実際知りたい機械的力は、この更正値と秤に現われる値を知るのみで計測ができるが、 K_0 はあらかじめ常に修正しておくことにより、簡単に計測ができる。

故に交流電気動力計は、使用上駆動または発生する勢力は電気であるが、動力計自体の電流の量や効率を計らなくても被試験機の機械的実力を簡単に知る長所がある。

自動計測装置は、この機械的力を、また電気的にかえて測定するので、この方の誤差の更正をやらぬと不正確なものになる。故に精密を期待する場合は、かえつて正確な圧計と回転計による方が確かである。

なお交流電気動力計の使用上の特徴は、直流動力計のように、負荷抵抗器、界磁調整器などの附属品を要せず、現存の三相交流電源につなぎ、電動機または発電機として使用できる長所があるから、エンジンの試験用としては直流式に優っている。

実験に際し御高配を賜つた京都農事試験場土田技師、福井農事試験場垂井技師、名古屋市立工業研究所長荒木博士、青井技師、大阪府工業奨励館塔本技師、姫路工業大学機械工学教室内燃機関担当米田、上川岡教授に対し厚く感謝の意を表する。

参考文献

Werner Nürnberg: Die Prüfung der Elektrischer Maschinen, 47 1940.

岩岸 巖: 交流電気動力計の回転力と回転数, 昭 30.
帝国工業電機株式会社: 交流電気動力計, 1920.