

## 1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 11 月 19 日木曜日 午後 1 時～午後 5 時半

天気 晴

気圧・気温・湿度 省略

## 2 実験の目的

現代の可動部で重要な役割を果たす電動機の中でも、最も頻繁に使われている誘導機の動作原理を理解し、その可変速制御法や特性・力率改善の方法を確認する。

## 3 実験の原理

### 3.1 回転機の種類

回転機は入出力する電力によって直流機と交流機に分かれ、交流機はさらに回転運動と磁界の周期に同期するか否かで分類される。非同期機はブラシを持つか否かで整流子機と誘導機に分けられる。

回転機による運動エネルギーと電気エネルギーの変換は可逆であり、運動→電気エネルギー変換器が発電機、電気→運動エネルギー変換器が電動機である。

当実験では電動機の中でも誘導機に着目して実験を行う。

### 3.2 3 相交流と回転磁界

3 相交流とは、3 本の巻線を通れる単相交流電流を時間的に  $\frac{2}{3}\pi$  ずつずらして流すもので、数学的には図 1 のように sin 関数を  $\frac{2}{3}\pi$  ずつ位相差を持たせて配置した図形になる。通常の単相交流と比べて送電における時間的な電力変動を伴わず、効率よく電力を伝えることができるので、高電圧送電や大電力を扱う電動機などに用いられる。

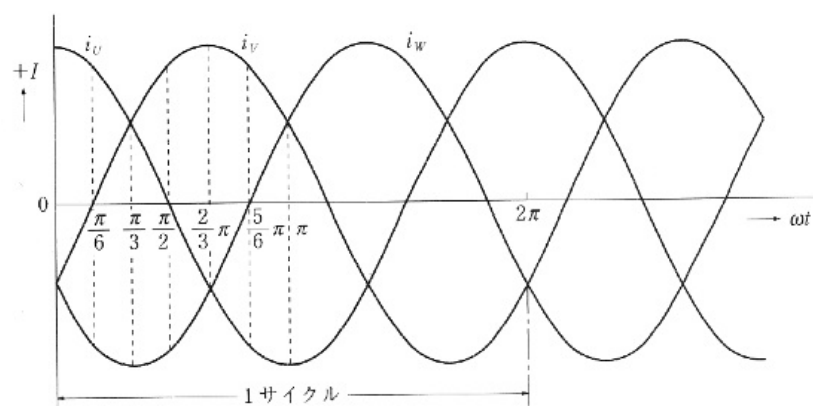


図 1 3 相交流電流

ここで図2のように空間的に120°ずつずらして配置した巻線コイルを考える。それぞれの巻線をU相・V相・W相とし、図1に示した3相交流電流 $i_u \cdot i_v \cdot i_w$ を流すとする。ただし電流を流す方向は図中のコイルの巻線方向に沿うことにする。

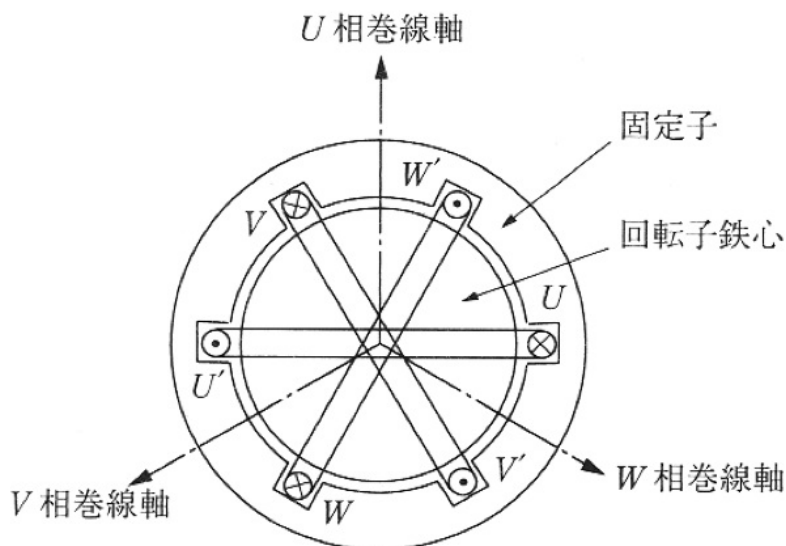


図2 固定子3相結線

もしU相に電流が流れて $i_u$ が正だった場合、右ねじの法則よりU相巻線軸方向に磁界が生じる。同様にV相・W相も正の電流が流ればそれぞれの巻線軸方向に磁界が生じる。電流値が負の時は磁界の向きが逆向きになる。生じる磁界の大きさはコイルに流れる電流の大きさに比例するので、電流の絶対値が大きい相ほど磁界も強くなる。これらの3つの磁界が合成された磁界がコイルの内部で生じることになる。よってU相・V相・W相別々に生じた磁界のベクトルを足しあわせれば合成磁界が求められる。

これらの法則をもとに3相交流電流を流したときの時間ごとの磁界の変化を調べると、3相交流電流に同期して回転することが分かる。その回転周期は3相交流の周期と一致している。これを一般に回転磁界と呼ぶ。

なお合成磁界の回転方向は3相交流電流をどの相に流すかによって決まる。3相のうち2相に流す電流を入れ替えれば回転磁界の向きを逆にすることができる。

### 3.3 誘導電動機の構造と回転原理

当実験で用いるかご形誘導電動機は固定子と回転子から成る。回転子の構造を図3に示す。回転子は軸・鉄心・導体の3つから構成され、導体は複数の導体棒を短絡環で挟み込んだ構造をしている。導体はその名のとおり自由の電流を流すことができる。

固定子は固定子枠・鉄心・巻線から成り、外部から電流を流すことで回転磁界を生じる。

ここで誘導電動機の回転原理を調べるため、図4のようにN極からS極へ向かう磁界が生じた誘導機を考える。導体棒に時間的に変化する回転磁界、すなわち界磁が鎖交すると、ファラデーの電磁誘導の法則により誘導起電力が生じ、導体に電流が流れる。界磁が反時計回りに回転していると仮定すると、微小角度だけ界磁が回転したときはレンツの法則により導体では図中で上向きの磁界を作って磁界の変化を妨げようとする。

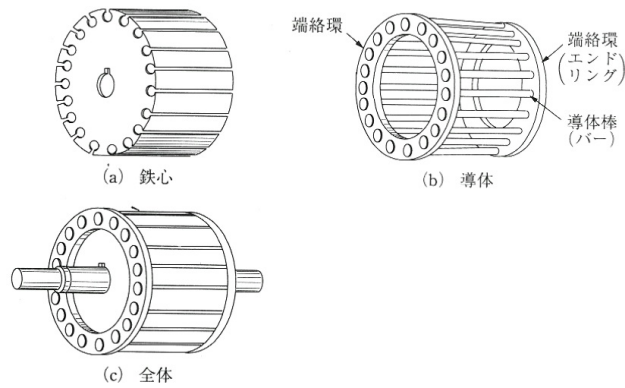


図3 かご型誘導電動機の回転子

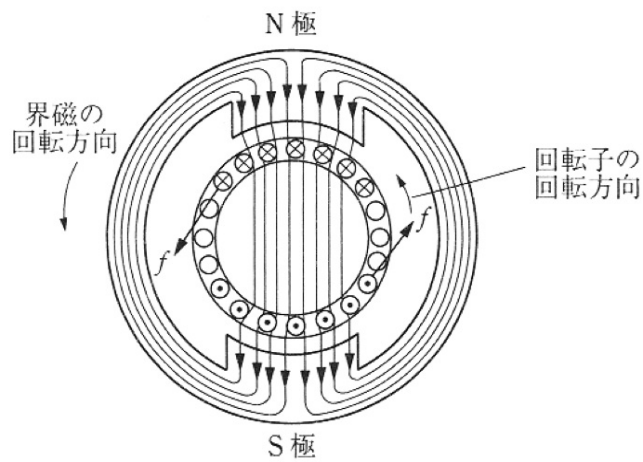


図4 誘導電動機の動作原理

よって誘導電流は図の導体棒に記した方向に流れることになる。

すると、フレミング左手の法則により  $F=IBl$  則が成り立ち、図中の力  $f$  が生じる。これが回転力となり、回転子が界磁と同じ方向に回転を始める。

誘導電動機の回転子は回転するトルクを常に得て回転するため、回転磁界に対して遅い速度で回転する。このとき回転磁界・回転子間の相対速度と回転磁界の速度の比をすべりと呼び、次式で定義される。ただし  $n_s$ : 回転磁界の回転速度、 $n$ : 回転子の回転速度とする。

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

$s$  が大きいほど回転子は回転磁界に対して遅れて回転していることになる。

同期機は回転磁界と回転子の回転速度を同じにして運転するため  $s=0$  である点が誘導機と全く異なる。

### 3.4 かご形誘導電動機の運転

かご形誘導電動機の始動法には全電圧始動法、スターデルタ始動法、始動補償器法などがあるが、当実験では最も一般的な全電圧始動法を用いる。停止している電動機に定格電圧を直に加える方法で、直入始動とも呼ばれる。

### 3.5 進相コンデンサによる力率改善

コンデンサによる回路の力率改善とは、誘導電動機の1次側にコンデンサを並列に接続し、誘導電動機の遅れ無効電力をコンデンサの進み無効電力で打ち消す方法である。この目的のために挿入するコンデンサを進相コンデンサとも呼ぶ。

図5にベクトル図を示す。ただし  $I_1$  : 線路電流、 $I_2$  : 電動機電流、 $I_3$  : コンデンサ電流、 $V$  : 供給電圧、 $\phi$  : コンデンサ挿入前の力率、 $\phi'$  : コンデンサ挿入後の力率である。もし進相コンデンサがなければ回路には  $I_2$  の電流が流れ、無効電流は  $I_2 \sin \phi$  で図中の赤色のベクトルになる。結局これに供給電圧をかけたものが無効電力となり、エネルギーロスとなってしまう。

そこで供給電圧よりも位相が  $\frac{\pi}{2}$  進んだ電流を流すコンデンサを挿入すると、コンデンサには  $I_3$  が流れる。すると線路電流  $I_1$  は  $I_2$  ベクトルと  $I_3$  ベクトルを足しあわせたものになるので、無効電流が  $I_1 \sin \phi'$  となり図中の青色ベクトルになる。これは明らかに進相コンデンサ挿入前よりもベクトルの大きさが縮んでおり、力率が改善され無効電力も小さくなっていることが分かる。 $I_3$  ベクトルの大きさを調整すれば力率  $\phi'$  を0に近づけることができ、この時が最もエネルギー損失が少ない時と言える。

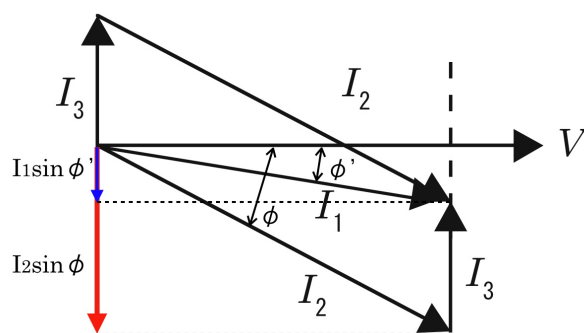


図5 コンデンサを用いた場合のベクトル図

## 4 使用器具及び装置

- 3 相かご型誘導電動機 (IM) : 定格電圧 200V、定格電流 8.7A、極数 4
- 3 相誘導電圧調整器発振器 (IR)
- 3 相電力計 (W)
- 交流電圧計 (V)
- 交流電流計 (I)

- 他励式直流発電機 (G)
- 直流電圧計 ( $V_g$ )
- 直流電流計 ( $I_g$ )
- 負荷抵抗 ( $R_L$ )
- 可変抵抗 ( $R_F$ )
- 進相コンデンサ (C)
- 操作盤
- スイッチ
- 配線コード
- 筆記用具・実験レジュメ・実験ノート

## 5 実験結果

**実験 1：起動・運転・停止・逆転の実験** 図 6 のように回路を組んだ。誘導機の定格電圧は 200V、定格電流は 8.7A である。

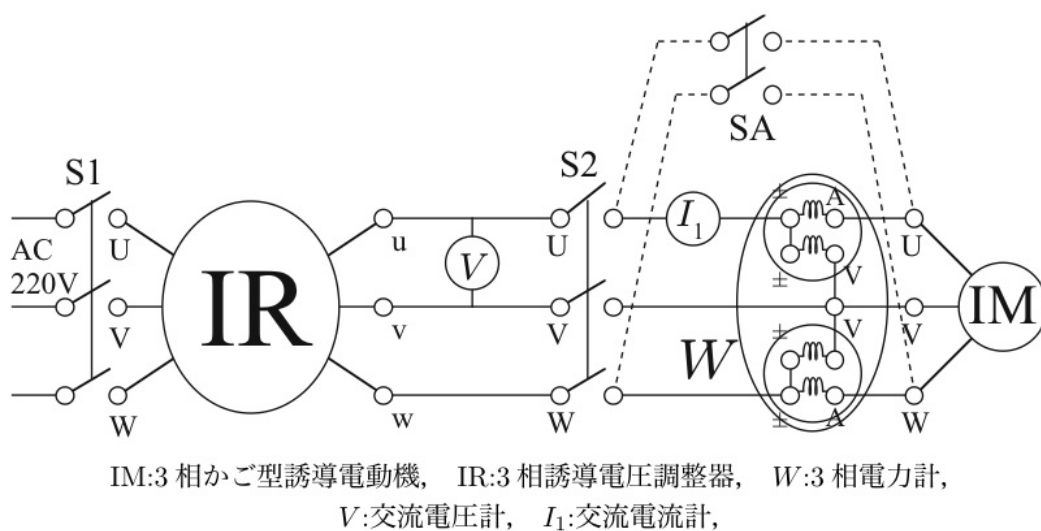


図 6 実験 1：回路図

起動前の準備として、計器へ大きな起動電流が流れるのを防ぐため、電力計を短絡レンジに、SA を ON にした。電動機を無負荷とし、S1・S2 は OFF、IR はハンドルで min に設定した。

続いて S1 を ON にし、IR のハンドルで 160V に設定した。S2 を入れ誘導電動機が回転を始めたことを確認した。そして IR を 200V に設定し、SA を OFF に、電力計を倍率  $K=20$  レンジにし、電流計と電力計の針が触れていることを確認した。この時の回転方向は発電機本体に表示された正方向表示と同じ向きであった。

SA を ON に、電力計を短絡レンジに戻した後、S2・S1 を OFF にして電動機を停止させた。

続いて IR 出力の u・v 相の配線を入れ替え、同様の起動方法で電動機を回転させたところ、先ほどと

は逆方向に回転を始めた。回転方向の確認後同様の手順で電動機を停止させ、配線を元に戻した。

**実験 2：基本的特性試験（無負荷試験）** 実験 1 と同じ回路のままで無負荷試験を行った。まず、実験 1 と同じ手順で電動機を起動させ、SA を OFF、電力計を短絡レンジにして計器を読める状態にした。次に IR のハンドルを回して厳密に  $V=200V$  とし、この時の  $I_1$ 、 $W$ 、 $N$  を測定したところ、 $I_1=3.4A$ 、 $W=118W$ 、 $N=1798rpm$  であった。そして、IR のハンドルを  $220V$  とした後、 $10V$  ずつ  $70V$  まで電圧を下げてその度に  $I_1$ 、 $W$ 、 $N$  を測定した。結果を表 1 に示す。ただし  $W$ 、 $\cos \phi$  は以下の式で求めた。

$$W = W_m \times K \quad (2)$$

$$\cos \phi = \frac{W}{\sqrt{3}VI_1} \quad (3)$$

表 1 実験 2：無負荷試験結果

供給電圧 $V[V]$	無負荷電流 $I_1[A]$	電力計読み $W_m$	倍率 $K$	無負荷損失 $W[W]$	力率 $\cos \phi[\%]$	回転数 $N[rpm]$
220	4.0	6.9	20	138	9.0539	1799
210	3.7	6.8	20	136	10.1055	1800
200	3.4	6.5	20	130	11.0376	1800
190	3.1	5.5	20	110	10.7824	1800
180	2.9	5.0	20	100	11.0603	1800
170	2.7	4.5	20	90	11.3206	1799
160	2.6	4.1	20	82	11.3805	1798
150	2.4	3.6	20	72	11.5470	1798
140	2.17	3.0	20	60	11.4026	1798
130	2.01	2.9	20	58	12.8153	1798
120	1.87	2.4	20	48	12.3497	1798
110	1.69	2.1	20	42	13.0440	1798
100	1.53	2.0	20	40	15.0941	1798
90	1.49	1.9	20	38	16.3604	1798
80	1.20	1.7	20	34	20.4478	1798
70	1.05	1.2	20	24	18.8523	1798

これを図にまとめたものが図 7 である。

**実験 3：実負荷試験** 起動前の準備として、実験 2 の誘導電動機に負荷として他励式直流発電機をクラッチで接続して取り付けた。配線は図 8 の通りである。ただし誘導電動機 1 次側の配線は実験 2 と変わらない。発電機の回転方向は本体に表示された矢印の向きになるよう設置した。S1・S2 を OFF、SA を ON、電力計を短絡レンジにセットした。S3 は OFF、 $R_F$  は MAX、 $R_L$  のダイヤルは OFF とした。S1 を ON にし IR を  $160V$  に設定、S2 を ON にして電動機を起動してから、SA を OFF、電力計を短絡レンジにして計器を読める状態にした。そのまま S3 を ON にして  $R_F$  を調整して  $V_G \approx 100V$  に設定した。

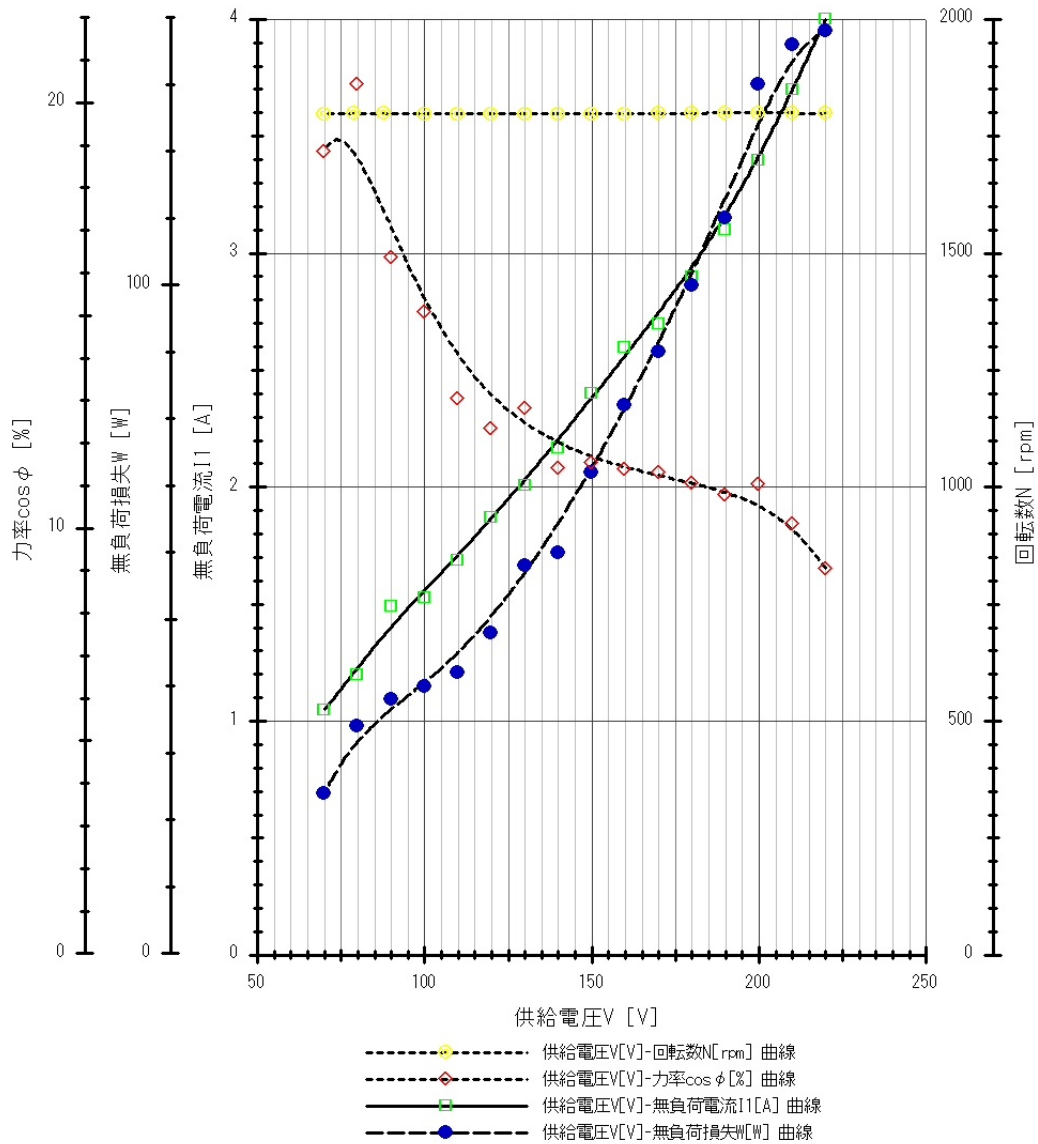


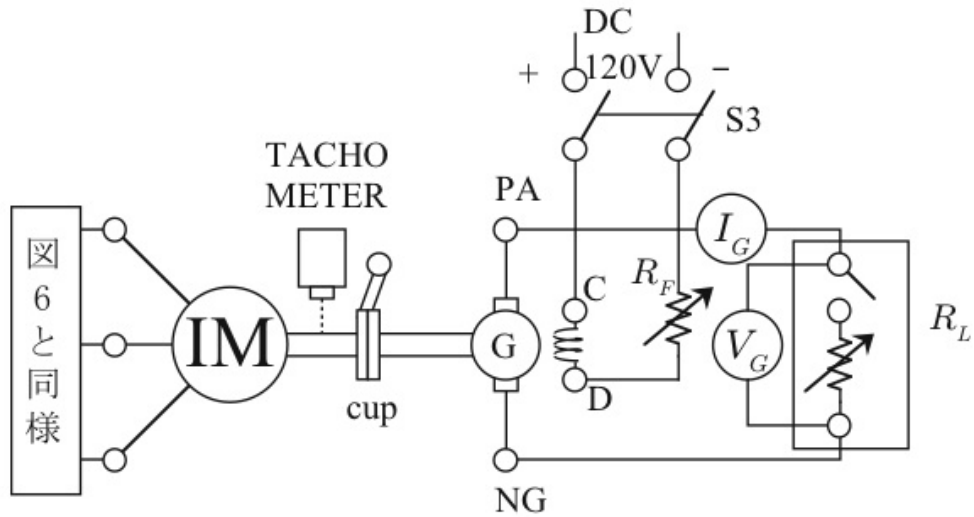
図7 実験2：無負荷特性曲線

$R_L$  のダイヤルを OFF・1・2…と順次変化させていくたびに IR のハンドルを回して  $V=200V$  に厳密に設定し、 $R_F$  を変化させることで  $V_G \approx 100V$  とし、その時の  $I$ 、 $W$ 、 $N$  を測定した。この手順を  $I=8.7A$  を越えるまで行った。結果を表2に示す。ただし  $R_L$ ：負荷、 $V$ ：供給電圧、 $I_1$ ：負荷電流、 $W_m$ ：電流計読み、 $K$ ：倍率、 $P_i$ ：入力電力、 $N$ ：回転数、 $V_G$ ：直流電圧、 $I_G$ ：直流電流、 $S$ ：すべり、 $P_o$ ：出力電力、 $\eta$ ：効率、 $\cos \phi$ ：力率、 $T$ ：トルクとする。表中の  $S$  から右側の値は以下の計算式で求めた。

$$P_i = W_m \times K \quad (4)$$

$$S = 100 \times (N_s - N)/N_s, N_s = 1800 \quad (5)$$

$$P_o = (1 - s) \times \{P_i - (W_0 - 3I_0^2 r) - 3I_1^2 r\} \quad (6)$$



$V_G$ :直流電圧計,  $I_G$ :直流電流計,  $R_L$ :負荷抵抗

図 8 実験 3 : 回路図

ただし  $W_0$ 、 $I_0$  は無負荷試験における定格電圧時の値 130V と 3.4A、 $r$  は固定子巻線 1 相分抵抗値  $0.625\Omega$  を用いた。

$$\eta = 100 \times P_o / P_i \quad (7)$$

$$T = 0.975 \times P_o / N \quad (8)$$

これらを図にまとめて描いた特性グラフを図 9 に示す。

**実験 4 : コンデンサによる力率改善** はじめに実験 3 の回路に図 10 のように進相コンデンサを並列に接続し、電流計を追加した回路を準備した。コンデンサの S4 を全て OFF として容量を 0 にした。 $R_F$  は MAX、 $R_L$  のダイヤルは OFF とした。

次に S2 を OFF、SA を ON、電力計を短絡レンジに設定したことを確認し、S1 を ON にして IR のハンドルを 160V に設定した。S2 を ON にして電動機を回転させ SA を OFF、電力計を測定レンジに入れて計器を読めるようにセットした。

そして、S3 を ON にして  $R_F$  を調節することで  $V_G \approx 120V$  にした。

IR を操作しながら供給電圧を 200V に保ったままコンデンサの容量を  $0\mu F$  から  $10\mu F$  刻みで  $140\mu F$  まで増やした。このとき電動機電流  $I_2$  が常に定格電流の半分である 4.35A になるよう  $R_L$  を直接しながら  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $W$  を測定した。結果を表 3 に示す。ただし C : コンデンサ容量、V : 供給電圧、 $I_1$  : 線路電流、 $I_2$  : 電動機電流、 $I_3$  : コンデンサ電流、 $W_m$  : 電流計読み、K : 倍率、 $P_i$  : 電力、 $\cos \phi$  : 力率である。

これらを図にまとめて描いた特性グラフを図 11 に示す。

図 11 で  $I_1$  が最小の時に位相が厳密に 100% になっていないため、実験書の指示通りのコンデンサ容量と力率のグラフは作成できなかった。



表 2 実験 3 : 実負荷試験結果

$R_L$	V[V]	$I_1$ [A]	W <sub>m</sub>	K	Pi[W]	N[rpm]	$V_G$ [V]	$I_G$ [A]	S	Po[W]	$\eta$ [%]	$\cos \phi$ [%]	T[kgm]
OFF	200	3.45	11.0	20	220	1797	100	0	0.001667	89.2	40.55	18.408	0.048
1	200	3.45	19.1	20	382	1794	100	1.9	0.003333	251	65.58	31.963	0.136
2	200	3.65	27.3	20	546	1788	100	3.4	0.006667	410	75.08	43.183	0.224
3	200	3.90	35.7	20	714	1782	100	4.9	0.01000	571	80.03	52.850	0.313
4	200	4.20	44.2	20	884	1777	100	6.4	0.01278	733	82.93	60.759	0.402
5	200	4.45	54.0	20	1080	1771	100	7.8	0.01611	919	85.14	70.060	0.506
6	200	5.00	64.3	20	1286	1766	100	9.3	0.01889	1109	86.27	74.247	0.613
7	200	5.40	72.9	20	1458	1760	100	10.7	0.02222	1266	86.85	77.942	0.701
8	200	5.95	82.0	20	1640	1754	100	12.2	0.02556	1428	87.06	79.568	0.794
9	200	6.55	94.5	20	1890	1748	100	13.7	0.02889	1652	87.41	83.297	0.922
10	200	7.22	105.2	20	2104	1738	100	15.2	0.03444	1833	87.10	84.124	1.028
11	200	7.85	117.9	20	2358	1723	100	16.7	0.04278	2043	86.63	86.713	1.156
12	200	8.65	64.0	40	2560	1718	100	18.2	0.04556	2206	86.18	85.434	1.252
13	200	9.45	70.8	40	2832	1711	100	19.8	0.04944	2430	85.80	86.511	1.385

表 3 実験 4 : コンデンサによる力率改善

$C[\mu F]$	V[V]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	W <sub>m</sub>	K	Pi[W]	$\cos \phi$ [%]
0	200	4.39	4.35	0	50.7	20	1014	66.678
10	200	4	4.35	0.2	50.9	20	1018	73.468
20	200	3.72	4.35	0.9	51.7	20	1034	80.239
30	200	3.38	4.35	1.4	50.9	20	1018	86.944
40	200	3.15	4.35	1.88	50.9	20	1018	93.292
50	200	2.95	4.35	2.3	50.8	20	1016	99.422
60	200	2.8	4.35	2.8	50.8	20	1016	104.748
70	200	2.75	4.35	3.3	50.8	20	1016	106.652
80	200	2.78	4.35	3.78	50.9	20	1018	105.709
90	200	2.9	4.35	4.3	50.8	20	1016	101.136
100	200	3.05	4.35	4.73	50.3	20	1006	95.215
110	200	3.28	4.35	5.18	50.2	20	1004	88.363
120	200	3.55	4.35	5.69	50.3	20	1006	81.805
130	200	3.81	4.35	6.09	50.5	20	1010	76.525
140	200	4.18	4.35	6.6	50.2	20	1004	69.337

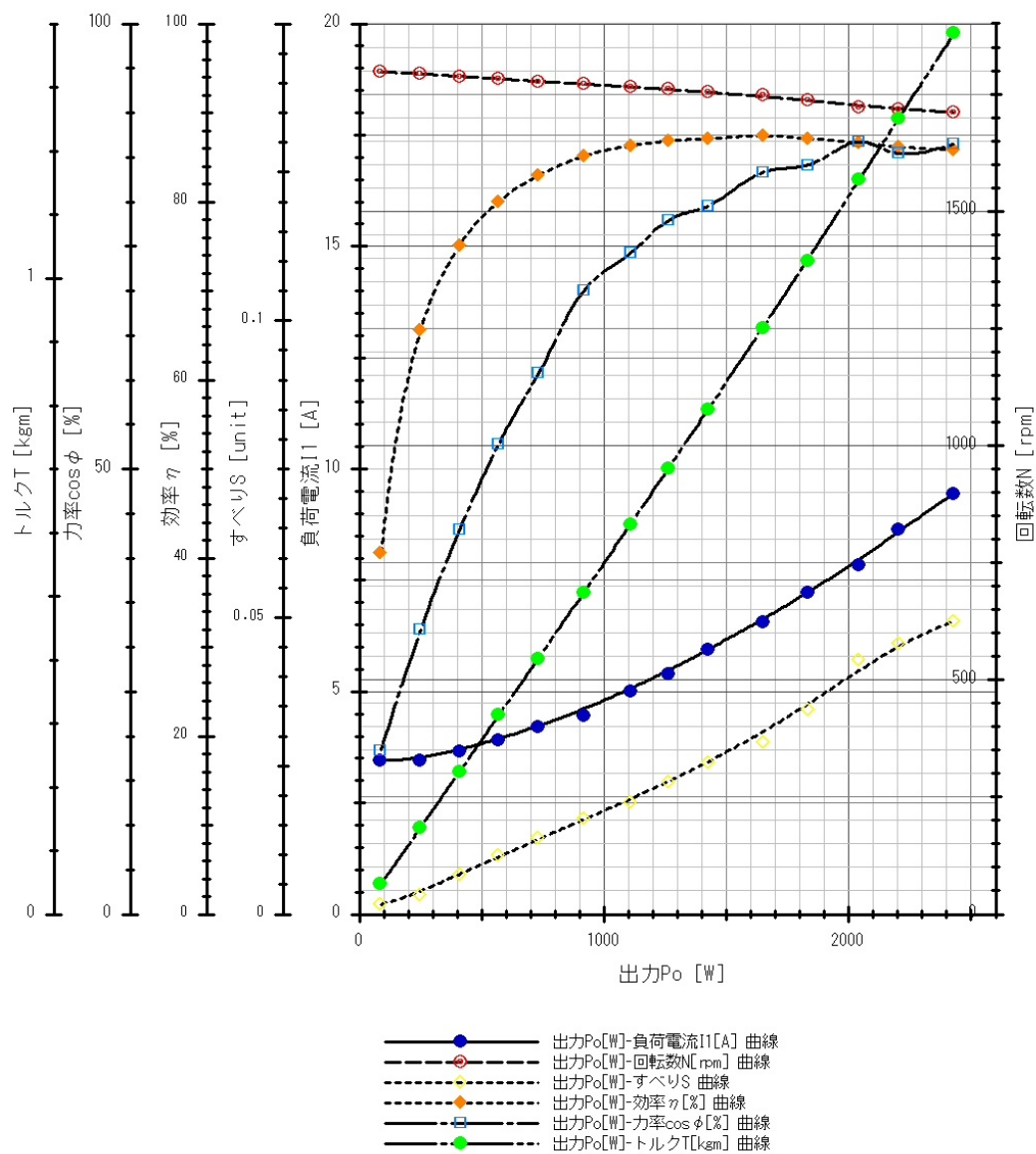
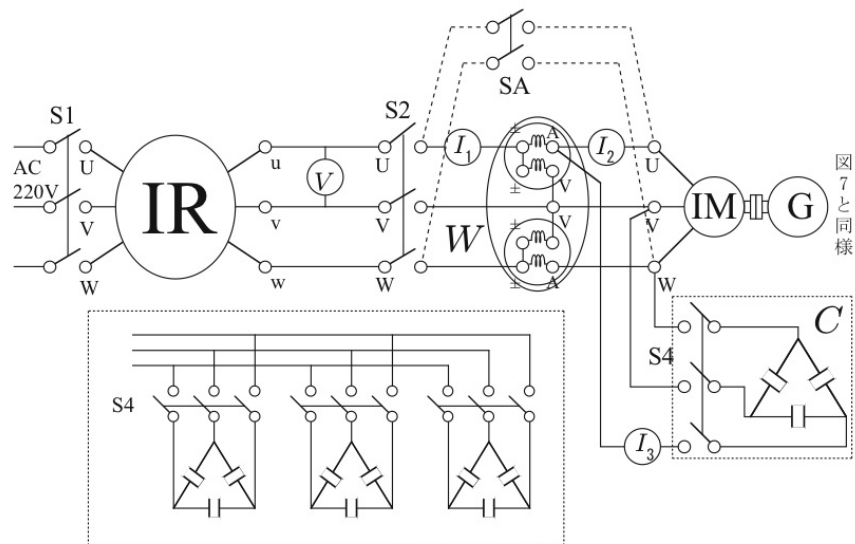


図9 実験3：実負荷特性曲線

## 6 検討

1. 実験2について、無負荷で供給電圧を増加させると無負荷電流はそれに比例して増加した。これは変圧器で二次回路が開かれている場合と等価で、一次側に電圧を加えると励磁電流が流れるプロセスと同じであると考えられる。すなわち、入力側から見た誘導電動機のインピーダンス  $\omega L$  は電源周波数が変化しないので一定となり、直流回路におけるオームの法則が成立したと考えることができる。

また無負荷損失は70Vから120V付近までは緩やかに増加し、120V以降からはほぼ線形に増加する事



$I_1$ : 交流電流計,  $I_2$ : 交流電流計,  $I_3$ : 交流電流計,  $C$ : 進相用コンデンサ

図 10 実験 4: 回路図

がわかった。力率は供給電圧が小さいほうが大きい値が得られることがわかった。すなわち力率が小さいときは有効電力が大きくなるので電力損失が大きくなると考えられる。

回転数は供給電圧が変わっても一定であった。これは負荷がないため回転子の滑りが一定値となり、回転磁界の周期  $N_s=1800[\text{rpm}]$  に一致した、つまり回転子がほぼ同期速度で回転したためと考えられる。

- 実験 3 について、供給電圧一定のもとで実負荷を大きくするに従って負荷電流は大きくなった。同時に入力電力も増加し、多くのエネルギーが界磁に与えられていることが分かる。

回転数は負荷が大きくなるごとに徐々に低下し、その結果滑りが大きくなって回転磁界に対する回転子の速度の遅れの割合が大きくなっていることが分かる。

出力電力も負荷が大きくなるにつれて大きくなっているが、必ず入力電力の値よりも若干小さな値になっている。これは一分の入力エネルギーが熱などの運動エネルギー以外に変換されたためと考えられる。このエネルギー変換効率は負荷が小さいときは小さな値をとるが、グラフより  $R_L=9$  の時に最大ピークを持つ上に凸な曲線を描く。

力率は負荷が大きくなるに従って低出力領域では急激に、高出力領域では緩やかに増加することが分かった。

トルクは出力電力に比例することが分かった。グラフは線形であり、出力電力が大きいほど大きなトルクを出すことができることが分かる。

- 実験 4 について、供給電圧を一定にしたままで容量を大きくすると、線路電流のグラフは  $C=70[\mu F]$  の時に最小となるような下に凸の放物線を描いた。一方力率は  $C=70[\mu F]$  で最大値を取る放物線になった。さらに電動機電流は一定でコンデンサ電流は線形に増加していることが分かった。

これを図 5 を用いて考えると、容量を大きくすることで供給電圧よりも  $\frac{\pi}{2}$  より進んだコンデンサ電流は次第に増加していく。よって  $I_3$  ベクトルは伸びる。電動機に流れる電流は実験 3 の結果より負荷が一定なため一定になるから、 $I_2$  ベクトルは変化しない。線路電流  $I_1$  ベクトルはこれら 2 つのベクトル

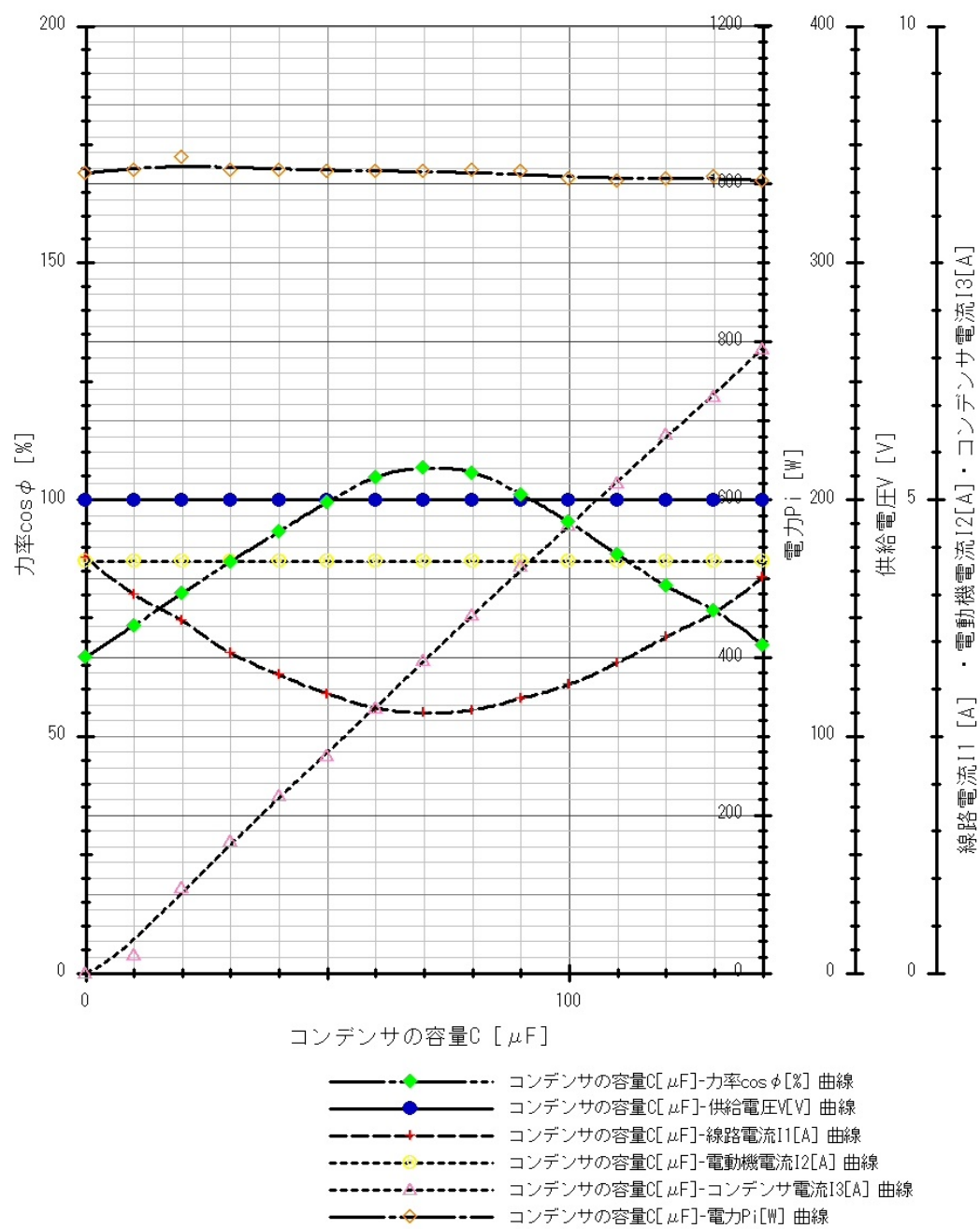


図 11 実験 4：コンデンサによる力率改善

を合成して得られるので、 $I_3$  ベクトルが伸びるにつれて  $I_1$  が小さくなり、位相  $\phi'=0$  となった時が  $I_1$  の最小値となる。さらに  $I_3$  ベクトルが伸びると位相が逆に進みすぎて  $I_1$  が再び増加し始める。

消費電力は電動機に掛かる電圧と電流の積であり、両者とも一定であるので電力はほぼ一定の値をとっている。

力率の実験値が 1 以上になって理論と一致しなかった理由については次の理由が考えられる。1 点目に測定者の過失による計器の読み違いである。2 点目に計測器の 0 点合わせが出来ていないことによる系統誤差である。そして 3 点目に計測した物理量が統計的にばらついてできた偶然誤差である。

いずれの場合でも、力率は式 3 の通り電流・電圧・電力から間接測定しているため、これら 3 つの計測に欠陥があった可能性がある。仮に力率曲線のピークをとる  $C=70\mu F$  で力率が最大値 1 になったとすると、実験値 1.066 との誤差は 0.066 である。これは理論値から 6.6% ずれていることになる。

この誤差の原因を誤差伝搬の法則を使って考えると、相対誤差は式 3 の両辺の対数をとって (式 9) 微分し (式 10)、絶対値記号を付けて三角方程式を適用することにより式 11 が得られる。

$$\ln \cos \phi = \ln W - \ln V - \ln I + \text{const} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \cos \phi}{\cos \phi} = \frac{\Delta W}{W} - \frac{\Delta V}{V} - \frac{\Delta I}{I} \quad (10)$$

$$\left| \frac{\Delta \cos \phi}{\cos \phi} \right| = \left| \frac{\Delta W}{W} - \frac{\Delta V}{V} - \frac{\Delta I}{I} \right| \leq \left| \frac{\Delta W}{W} \right| + \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \quad (11)$$

式 11 より、力率の相対誤差は電流・電圧・電力の相対誤差の和で表されることが分かる。よって、理論値からの 6.6% のずれは電流・電圧・電力それぞれの計測値の精度に依存すると考えられる。この考察から、力率を正確に測定するためには全ての物理量を精度良く図る必要があることが分かった。

## 7 課題

### 1. 同期電動機と誘導電動機の違いについて考察する。

誘導電動機は理論の章で述べたように、3 相の固定子巻線に 3 相交流電流を流すことで回転磁界を生じさせる。これは同期電動機も同じ原理である。この回転磁界から電磁力を受けて回転する回転子の回転速度が両者の間で根本的に異なる。

同期電動機では、回転子は永久磁石でできている。つまり回転子には元から磁界が生じている。この回転子を外部の電動機の補助を受けて事前に回転させた上で、回転子と回転磁界の回転速度を一致させると、回転子と回転磁界の間のお互いの N・S 極が引き合っ、一定のトルクを発生しながら同期速度で回転を続ける。もし無負荷であれば、運転中に回転子と回転磁界の位相差は生じないが、負荷をかけた時にはその瞬間に回転子の回転速度が落ちて回転磁界よりも遅れる。しかし N・S 極間の引き合う力が回転方向へのトルクとなって、回転角は最初からずれるものの、元の同じ同期速度で回転を続ける。このようにして、同期電動機は常に回転子と回転磁界の間の回転速度を同期させながら運転することができる。

一方誘導電動機は、起動時に外部からの力を借りることなく、自身の作る回転磁界で回転子を回転させることができる。誘導機の回転の原理は理論の章で述べた通りで、回転子と回転磁界の相対速度の差がトルクを生み出すため電動機として用いられる。もし無負荷であれば摩擦・風損に打ち勝つだけの必要最低限のトルクを発生すればいいので、ほとんど同期速度に等しい速度で運転される。負荷をかけると

回転子の速度が減少し、回転磁界に対して遅れ始めるので相対速度が大きくなり、その分回転子から見た単位時間あたりの磁界変化が大きくなる。よってファラデーの電磁誘導の法則より誘導起電力が大きくなって励磁電流も増加し、負荷のトルクと釣り合う大きさのトルクを発生するようになる。この回転子と回転磁界の速度のずれの割合を滑りとして定義している。そもそも同期誘導機では回転子と回転磁界を同期して運転するので、滑りは定義されていないのが大きな違いである。

2. 実際に誘導電動機が用いられている例に電車がある。50 年ほど前の電車は架線のほとんどが直流送電だったこと、古くから速度制御の技術が積み重ねられており優れた実績があったことから、主に直流電動機が採用されていた。しかし、直流電動機は整流子・ブラシと呼ばれる電気子巻線と外部回路を結ぶ可動部があるため、機械的に磨耗しやすく定期的なメンテナンスが必要であった。にもかかわらず直流電動機の構造は複雑で、製造や管理に手間がかかるのが問題であった。

そこで近年のパワーエレクトロニクスの発展に伴って登場したのが誘導電動機である。誘導電動機は理論の章でも述べたように、構造が簡単でかつ堅牢である。整流子のような可動部がないので部品の交換も少ない回数で抑えられ、省メンテナンス性に優れている。また、部品数が減ったので小型化・軽量化が可能となり、電車全体の重量を軽くすることができ、省エネルギー効果がある。電源には一般的に 3 相交流が必要であるが、各種半導体の進歩により直流-交流変換を任意に行えるようになったので、直流電動機よりもきめ細やかな制御ができるようになっている。最新の電車ではインバータ制御が主流である。

誘導電動機のトルクを制御するためには一次電圧を変化させる方法、インバータを用いて電源周波数を制御し、回転子と回転磁界の位相差を変化させる方法などがあるが、電車では可変電圧可変周波数制御 (VVVF 制御) が採用されている。これはトルクが  $V/f$  の 2 乗に比例し、回転子と回転磁界の位相差に比例することを用いた制御方法である。直流を高速でスイッチングしてパルス幅を変えるパルス幅変調方式で擬似交流信号を生み出し、任意の回転速度に保てるようになっている。トルクの制御には回転子と回転磁界の速度差、すなわちすべり周波数を制御するすべり周波数制御や、誘導機 1 次側の電流を位相のずれからトルク成分と励磁成分にベクトルを分解して演算するベクトル制御があり、最近では後者の方式を採用するケースが増えている。

3. 誘導電動機の極数について考察する。極数とは界磁に作られる N・S 極の数のことである。今極数を  $2p$  とすると、界磁には向かい合う N-S 極の組が  $p$  組存在することになる。この中で回転子は 1 回転する間に界磁の N 極・S 極間の変化を  $p$  回感じることになる。界磁が 1 回変化するごとに  $1[\text{Hz}]$  の誘導起電力を発生するから、回転子が 1 回転するごとに  $p[\text{Hz}]$  の誘導起電力を発生する。よって電源周波数  $f$  と回転速度  $N_s$  の間には次の関係が成り立つ。

$$N_s = \frac{f}{p} [s^{-1}] = \frac{60f}{p} [rpm] \quad (12)$$

当実験では電源周波数  $f=60[\text{Hz}]$ 、同期速度  $N_s=1800[\text{rpm}]$  であったから、

$$p = \frac{60 \times 60}{1800} = 2 \quad (13)$$

となり、実験で用いた誘導電動機の極数は 4 と分かった。

## 8 結論

1. 誘導機・同期機は 3 相交流を固定子巻線に流すことで回転磁界を得る交流機の一つで、前者は回転子に生じた誘導電流と磁界によって回転トルクを生じて回転するが、後者は回転しあう回転子と回転磁界の間の磁氣的引力によってトルクを生じて同期速度で回転する。
2. 無負荷試験では供給電圧に比例して電流・損失ともに増加したが、力率は減少した。負荷がつながれていないため回転数は一定であった。
3. 実負荷試験では出力を上げるにつれて負荷電流が大きくなったがその変化は緩やかなカーブになった。負荷を増していくとトルクが大きくなるため滑りが大きくなり、効率・力率共に増加した。
4. 進相コンデンサを電動機に対して並列に挿入することで、遅れ電流の位相を調整することができたが、力率の値が理論と合わなかったため、実験書のとおり力率曲線グラフを作成することができなかった。

## 9 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 6 人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

## 10 参考文献

- 実験テキスト「A3 誘導電動機の変速制御の基礎実験」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「電気機器学基礎論」多田 隈 進・常広 譲・石川 芳博著 電気学会 初版第 3 刷
- 「電気機器各論 2」電気学会通信教育会編 電気学会 初版
- 「よくわかる最新モータ技術の基本とメカニズム」井出 萬盛著 秀和システム 第 1 版第 6 刷
- 「制御方式入門 改訂第三版」QDAT 第三編集局編 QDAT 改訂第 3 版第 2 刷
- 「計測工学」鈴木 亮輔ほか著 昭晃堂 初版第 10 刷
- 「 $\text{\LaTeX}$  2 $\epsilon$  美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上