

# 誘導電動機の説明のためのコンピューター教材

岐阜職業能力開発短期大学校 小林 俊郎

Computer Educational Material for Explanation of Induction Motor

Shunro KOBAYASHI

## 要約

コンピューターと市販の誘導電動機模型を組み合わせて、誘導電動機の原理を説明する教材を開発した。

RC 並列回路(図1)に於いて各素子に加わる電圧、及び、各々に流れる電流の位相差を測定後、コンピューターに入力すると各素子の電圧のベクトルがその画面に描かれる。更に、コンデンサーの電気容量がある値の時に、その回路に流れる電流を測定し、コンピューターに入力すると、抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差図がコンピューターによって表示される。

次に、コンデンサーの電気容量を変えて実験し、抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差と、電気容量との関係を求めた。これを利用することにより、コンデンサーの任意の電気容量下で、抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差がシミュレートされる。

続いてコンデンサーの電気容量を変化させ、その時の回転子の回転速度を測定して、電気容量と始動トルクとの関係を求める。

シミュレートすることを除き、前述した全ての事を RL 並列回路(図1)でも同様に行う。

この「物理実験」を通して、学生は電磁気の主要原理から誘導電動機のトルクまで有機的に学べる。

## 1. 緒言

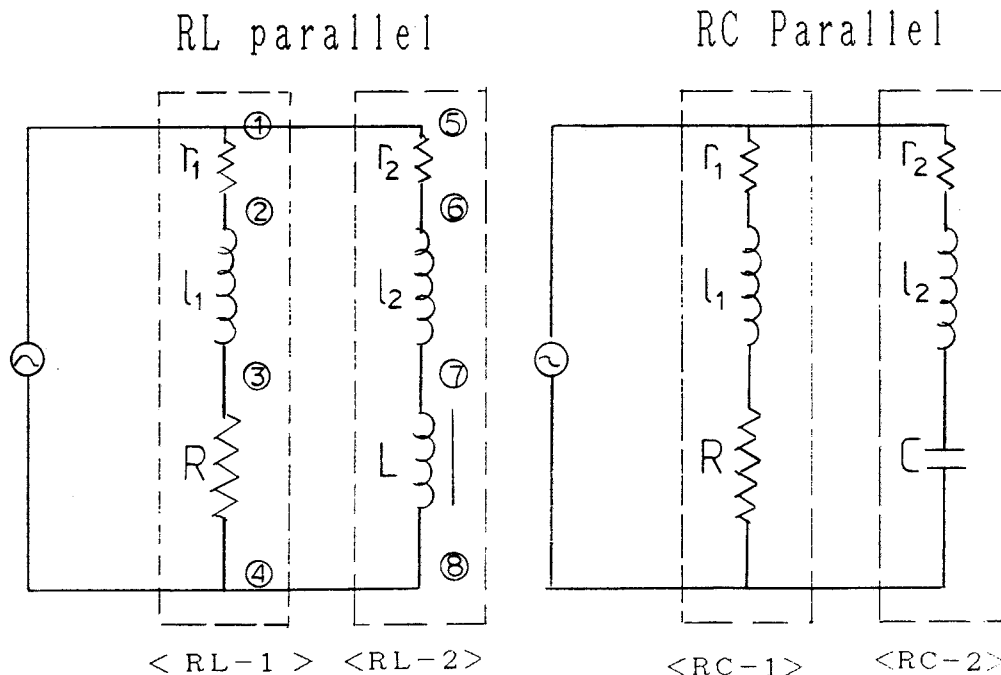


図1 Circuit of RL Parallel and RC Parallel

当短大では、物理実験のテーマの中に時代のトピックスを入れるために、超電導体の試作<sup>1)</sup>、液晶表示装置の製作<sup>2),3)</sup>を行ってきた。我々の日常生活にまでコンピューターが浸透してきている現在、学生には専攻を問わず全員に在学中に、あらゆる分野で少しでもコンピューターに触れさせる事が、必要だと思われる。

そこで今回は、物理実験のテーマの改善の一環として、コンピューターを用いて誘導電動機の原理を説明する教材を開発した。

物理の授業の中で、電磁気学の初歩に触れる。その後フレミングの左手の法則、レンツの法則を総合的に認識させるために、市販の「誘導電動機原理説明器」を用いて、実験をさせている。この装置は、(单相)コンデンサー・モーターである。回転原理から理論上、2つの界磁コイルの電流の位相が90°ずれていると予想できる。ベクトル合成法を用いて作図から抵抗とコイル、あるいは抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差を求めさせた。

今回の教材開発にあたり学生にコンピューターに触れさせ機会を作るために、コンピューターを利用して、画面上に作図させ、その結果に基づいて、界磁コイルの電流の位相差図も、表示させることを考えた。

次に抵抗とコイルの並列回路(RL並列)で、コイルの自己インダクタンスを変えて実験し抵抗とコイルに流れる電流の位相差と、コイルの自己インダクタンスとの関係を求めた。同様に抵抗とコンデンサーの並列回路(RC並列)でコンデンサーの電気容量を変えて実験し抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差と、コンデンサーの電気容量との関係を求めた。続いて、その関係を利用して、RC並列に於いて電流の位相差をシミュレーションさせた。

更に、異なった電気容量のコンデンサー下で、無負荷の回転子の各々の回転速度を求め、回転子の回転速度と電気容量(RC並列回路)との関係について研究した。同様に、異なった自己インダクタンスのコイル下で、無負荷の回転子の各々の回転速度を求め、回転子の回転速度と自己インダクタンス(RL並列回路)との関係について研究した。

これらの結果に基づいてコンピューターのプログラムを作成し、学生実験を行ったので報告する。

## 2. 実験

### 2.1. 装置

図1は、誘導電動機原理説明器(ID-3、島津理化器械)の2種類の接続方法であり、左側を「RL並列」、

右側を「RC並列」と呼ぶ。図中の $\ell_1$ と $\ell_2$ がモーターの界磁コイルであり、自己インダクタンスは、各々8.4及び10.1 mHである。 $r_1$ 、 $r_2$ は、電流を測定するための微小抵抗(0.75  $\Omega$ )、Rは界磁コイル $\ell_1$ と $\ell_2$ に流れる電流の位相差を調節するためのバランス抵抗(6.36  $\Omega$ )である。LとCは、外付けのコイル及びコンデンサーである。Cとして31、44、99  $\mu\text{F}$ (25 V、バイポール型、SME)の物を、Lとしてチョーク型コイル(20 mHと30 mH、菅野電機研)を必要な数だけ直列につないで40、57、75 mHとした物を用いた。電源電圧は、AC15 V前後である。

AC電源装置(SPH-5 HF、島津理化器械)、二現象オシロスコープ(SDS-150、同)及びマルチメーター(TR6845、アドバンテスト)を用いた。コンピューターは、ノート型(PC-9801NS/T、NEC)を用いた。更に回転計(3403、日置電機)及びLCRメーター(4261 A、ヒューレット・パッカード)を用いた。

## 3. 結果

### 3.1. 測定

#### 3.1.1. RC並列

RC並列回路(図1)で、コンデンサーの電気容量を99  $\mu\text{F}$ とし、14.0 Vの電圧でモーターを回転させた状態で、各素子( $r_1$ 、 $r_1-\ell_1$ 、 $r_1-\ell_1-R$ 、……)の電圧及び、電流と電圧の位相差を測定する。但し $r_1-\ell_1$ 、 $r_1-\ell_1-R$ は、図1の①-③、①-④間の電圧あるいは、位相差を表すものとする。二現象オシロスコープを用いて、電流測定用の微小抵抗 $r_1$ あるいは $r_2$ に加わる電圧と各素子の電圧との位相差を求めた。 $r_1$ あるいは $r_2$ の電圧は電流に比例するから、このようにして求めた位相差は、各素子の電流と電圧の位相差に等しい。同様に抵抗(R)とコンデンサー(C)に流れる電流の位相差( $r_1 \leftrightarrow r_2$ )を、オシロスコープを用いて $r_1$ 、 $r_2$ の電圧波形を比較することにより間接的に求めた<sup>4)</sup>。

更にコンデンサーの電気容量を44  $\mu\text{F}$ と31  $\mu\text{F}$ に変えて、抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差と、電気容量との関係を求めた(図2)。測定点は、傾き-0.26、Y切片109の直線によく乗っている。

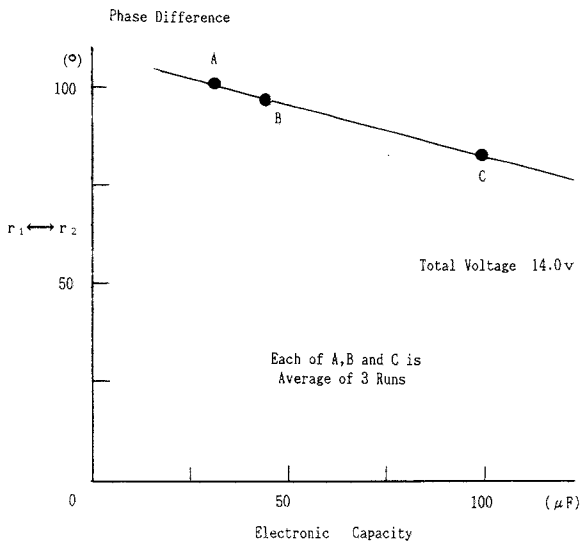


図2 Relation between Phase Difference and Electric Capacity of RC Parallel Circuit

3.1.2. RL 並列

3.1.1と同様にRL並列回路(図1)で、コイルの自己インダクタンスを40 mH、電源電圧を18.0 Vとして、各素子の電圧を測定した。次にこの条件下でオシロスコープを用いて抵抗( $r_1$ あるいは $r_2$ )に加わる電圧と各部分の電圧との位相の差を求めた。又、抵抗(R)とコイル(L)の電流の位相差( $r_1 \leftrightarrow r_2$ )をオシロスコープで求めた<sup>4)</sup>。

更に、コイルの自己インダクタンスを57 mHと75 mHに変えて、抵抗とコイルに流れる電流の位相差と自己インダクタンスとの関係を求めた(図3)。抵抗と

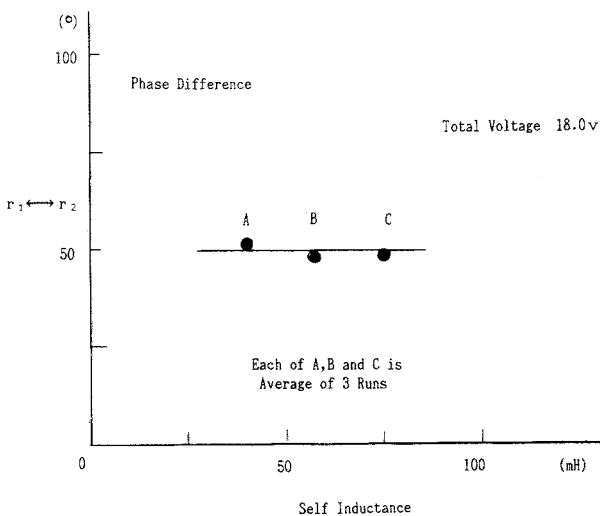


図3 Relation between Phase Difference and Self Inductance of RL Parallel Circuit

コイルに流れる電流の位相差は、自己インダクタンスが40 mH から75 mH の範囲では、ほぼ一定だった。

3.2. プログラムの作成

3.2.1. ベクトル合成

RL並列回路に於いて各素子の電圧と、その素子の電圧と、微小抵抗 $r_1$ あるいは $r_2$ に加わる電圧との位相の差をコンピューターに打ち込めば、 $r_1$ 、 $r_1 - l_1$ 、……、と順次それらの電圧のベクトルが描かれるように、BASICでプログラムを作成した。

更にRC並列回路に於いても、RL並列回路と同様に $r_1$ 、 $r_1 - l_1$ 、……、と順次ベクトルが描かれるようにプログラムを作成した。RC-2(図1)での最終画面を図4に示す<sup>4)</sup>。

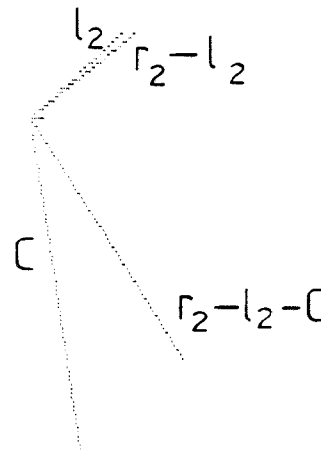


図4 Display of RC-2

3.2.2. 電流の位相差図

RL並列回路に於いて、抵抗(R)とコイル(C)各々に、実際に流れる電流の値をマルチメーターで測定する。次に各素子の電圧と、その素子の電圧と微小抵抗 $r_1$ あるいは $r_2$ に加わる電圧との位相の差をコンピューターに打ち込めば、それら素子の電圧のベクトルが描かれ、続いて先に測定した、抵抗とコイル各々に実際に流れる電流値を入力すると、抵抗(R)とコイル(L)に流れる電流の位相差( $r_1 \leftrightarrow r_2$ )の図が、自動的に描かれるようにBASICでプログラムを作成した。これによってコンピューター画面に表示された、抵抗とコイルに流れる電流の位相差を図5に示す。

同様にRC並列回路に於いても、抵抗(R)とコンデンサー(C)各々に実際に流れた電流をコンピューター

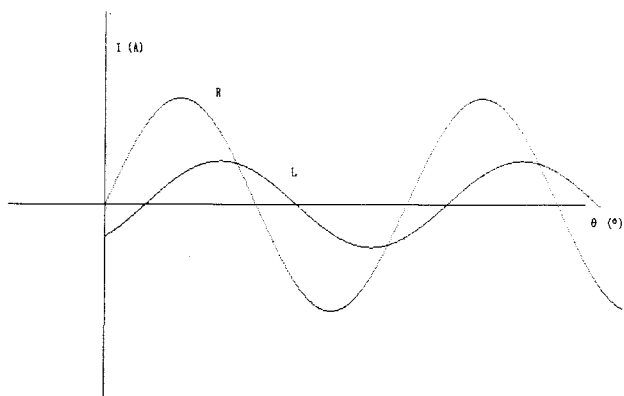


図5 Phase Difference of Current between R and L of RL Parallel Circuit, Considering Real Current

に打ち込めば、抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相差の図が自動的に描かれるようになった。それによってコンピューターに表示された抵抗とコンデンサーに流れる位相差を図6に示す。

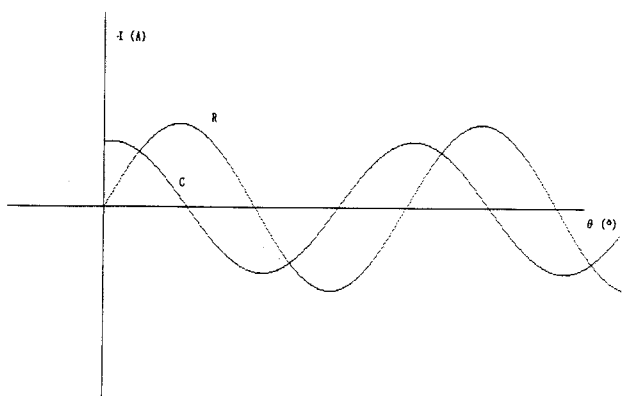


図6 Phase Difference of Current between R and C of RC Parallel Circuit, Considering Real Current

### 3.2.3. シミュレーション

RC並列回路で、抵抗(R)とコンデンサー(C)に流れる電流の位相差と、電気容量との関係(図2)を用いて、任意の電気容量をコンピューターに打ち込めば、その条件下で、各々抵抗とコンデンサーに流れる電流の位相の差が図示されるように、プログラムを作成した。例として電気容量を $33\mu\text{F}$ とした時、画面に表示された電流の位相差を図7に示す<sup>4)</sup>。

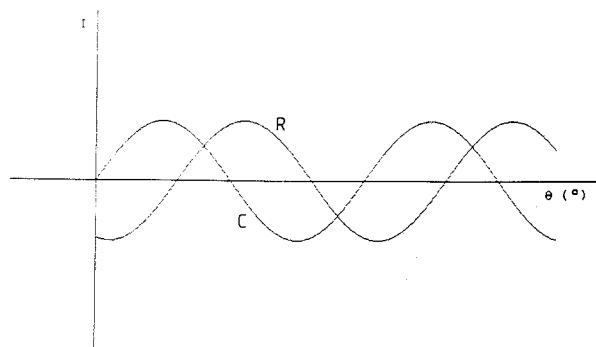


図7 Simulation of Phase Difference of Current between R and C of RC Parallel Circuit [C= $33\mu\text{F}$ ]

### 3.3. 抵抗とコイル(あるいは、コンデンサー)に流れる電流の位相差と回転子の回転速度

#### 3.3.1. RL並列回路

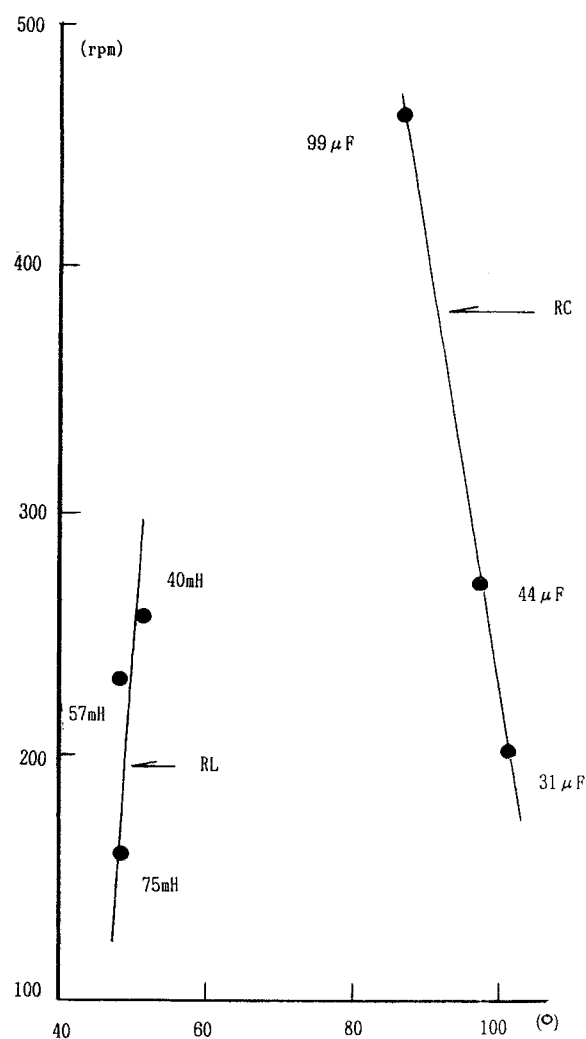


図8 Relation between Phase Difference and Rotation Velocity in RL and RC Parallel Circuit

RL 並列回路の電源電圧を18.0 V、コイルの自己インダクタンスを40 mH、57 mH、75 mHとして、それぞれにおける無負荷の回転子の回転速度を測定した。各々の自己インダクタンスにおける回転子の回転速度と、抵抗とコイルに流れる電流の位相差の関係を図8に示した。自己インダクタンスが40 mH から75 mHの範囲では、グラフは、ほぼ直線になった。

次に、無負荷の回転子の始動トルクを調べた。文献<sup>5)</sup>によれば、始動トルク  $T_s$  は、

$$T_s = 2A \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot R_2 \cdot \sin(r_1 \leftrightarrow r_2)$$

である。但し

$$R_2 = x_m^2 r_2 / \{r_2^2 + (x_2 + x_m)^2\}$$

A : 主巻線と補助巻線の有効巻数比

$I_1$  : 図1の〈RL-1〉あるいは〈RC-1〉の電流

$I_2$  : 〈RL-2〉あるいは〈RC-2〉の電流

$x_m$  : 励磁リアクタンス

$r_2$  : 主巻線換算2次1相の抵抗

$x_2$  : 主巻線換算2次1相の漏れリアクタンス

ここでA、 $R_2$ を定数とみなせば

$$T_s = K \cdot T_s'$$

$$T_s' = I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(r_1 \leftrightarrow r_2)$$

とおける。この式を用いて、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $(r_1 \leftrightarrow r_2)$ の値から、 $T_s'$ を計算することができる。その結果を表1に示す。

表1 Rotation Velocity and  $T_s'$  in RL Circuit

Self Inductance (mH)	L (Ω)	$I_1^*$ (A)	$I_2^*$ (A)	$r_1 \leftrightarrow r_2^*$ (°)	$T_s'^*$	$N^*$ (rpm)
40	1.52	1.11	0.45	51	0.39	258
57	1.14	1.11	0.36	48	0.30	233
75	1.72	1.10	0.25	48	0.20	160

\* Average of 3 Runs

$$T_s' = I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(r_1 \leftrightarrow r_2)$$

Total Voltage 18.0 V

更にその  $T_s'$  と回転速度との関係を図9に示した。自己インダクタンスが小さくなればなる程、 $T_s'$  が大きくなり、したがって始動トルク ( $T_s$ ) が大きくなることが、わかった。

### 3.3.2. RC 並列回路

RC 並列回路に電圧14.0 V を加え、コンデンサーの電気容量を31  $\mu$ F、44  $\mu$ F、99  $\mu$ F として、それぞれに於ける無負荷の回転子の回転速度を測定した。それらの回転速度と抵抗 (R) とコンデンサー (C) に流れ

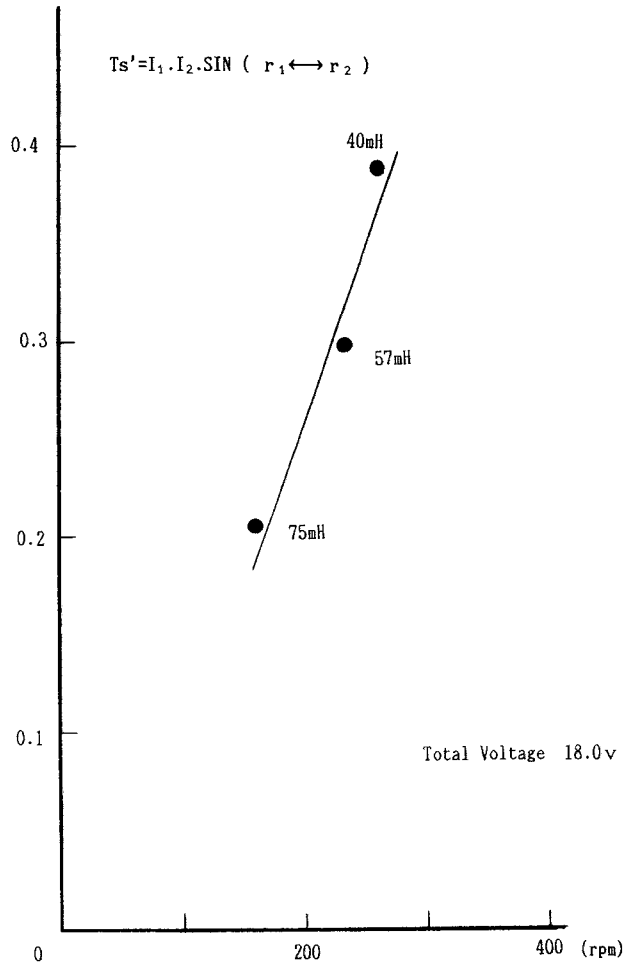


図9 Relation between Rotation Velocity and  $T_s'$  in RL Circuit

る電流の位相差の関係を図6に示した。電気容量が31  $\mu$ F から99  $\mu$ F の範囲では、グラフは直線になった。

次に3.3.1と同様にして、各々の電気容量に於ける  $T_s'$  を計算した結果を表2に示した。更に、その  $T_s'$

表2 Rotation Velocity and  $T_s'$  in RC Circuit

Electric Capacity ( $\mu$ F)	$I_1^*$ (A)	$I_2^*$ (A)	$r_1 \leftrightarrow r_2^*$ (°)	$T_s'^*$	$N^*$ (rpm)
31	0.86	0.18	101	0.15	203
44	0.86	0.27	97	0.23	272
99	0.86	0.68	83	0.58	463

\* Average of 3 Runs

$$T_s' = I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(r_1 \leftrightarrow r_2)$$

Total Voltage 14.0 V

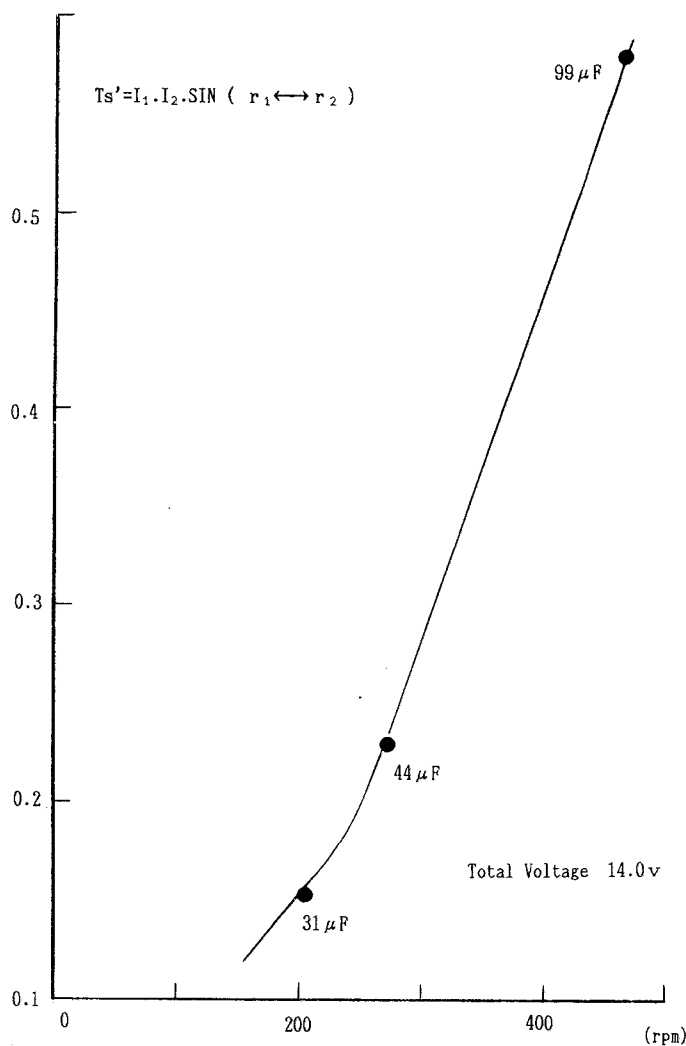


図10 Relation between Rotation Velocity and Ts' in RC Circuit

と回転速度との関係を図10に示した。電気容量が大きくなる程 Ts'が大きくなり、したがって始動トルク (Ts) が大きくなることが、わかった。

#### 4. 物理実験の展開

学生は、まず、RL 並列回路に於いて、各素子の電圧をマルチメーターを用いて測定する。次に抵抗  $r_1$  あるいは  $r_2$  に加わる電圧と各素子の電圧との位相の差をオシロスコープで測定する。これらの値をコンピューターに打ち込むと、各素子に加わる電圧のベクトルが順次描かれる。このようにしてベクトル合成法で算出した、 $r_1$  と  $r_2$  に流れる各電流の位相差 ( $r_1 \leftrightarrow r_2$ ) と、先にオシロスコープで求めた位相差 ( $r_1 \leftrightarrow r_2$ ) を比較する。ベクトル合成法を使えば、RL 並列に於いて位相差が、 $90^\circ$  よりはるかに小さくなるということを説明できることがわかる。

同様に RC 並列回路に於いても、測定した各部分の電圧及び、その位相の差をコンピューターに打ち込み、描かれた電圧のベクトルを見る(図4)。ベクトル合成法を使えば、電流の位相差 ( $r_1 \leftrightarrow r_2$ ) が  $90^\circ$  に近いことが、説明できることがわかる。

次に RL 並列回路で、コイルの自己インダクタンスが任意の時に流れる電流  $I_1$ 、 $I_2$  を測定し、コンピューターに入力する。コンピューターに描かれた電流の位相差図(図5)をオシロスコープ上のそれと比較する。両者の図が似ていることがわかる。

同様に RC 並列回路でコンデンサーの電気容量が任意の時に流れる電流  $I_1$ 、 $I_2$  を測定しコンピューターに入力する。コンピューターに描かれた電流の位相差図(図6)をオシロスコープ上のそれと比較する。

RC 並列回路では、更にコンデンサーの任意の電気容量をコンピューターに打ち込めば、その条件下での抵抗とコンデンサーに流れる各々の電流の位相差 ( $r_1 \leftrightarrow r_2$ ) をシミュレートできる(図7)。これにより学生は、電気容量と電流の位相差の関係を目で見るができる。

続いて、RL 並列回路(図1)に於いてコイルの自己インダクタンスを少しずつ変化させ、それぞれに於ける回転速度及び電流  $I_1$ 、 $I_2$  を測定し、Ts'(Ts'は始動トルク Ts に比例する)を求める(図9)。自己インダクタンスが小さくなる程、始動トルク (Ts) が大きくなることが、わかる。

同様に、RC 並列回路(図1)に於いてコンデンサーの電気容量を少しずつ変化させ、各々における回転速度及び電流  $I_1$ 、 $I_2$  を測定し、Ts'を求める(図10)。電気容量が大きくなる程、始動トルク (Ts) が大きくなることが、わかる。

この物理実験を通して学生は、フレミングの左手の法則、レンツの法則などの電磁気学の主法則から、誘導電動機のトルクまで、有機的に学ぶことができる。

今回「物理」の講義の中で、前述した学生実験をした。前年度に比べて今回は、更に回転子の回転速度まで測定したので、学生は実験に一層興味を持って取り組んでいた。

#### 5. おわりに

- 2つの界磁コイルの電流の位相差が、コンピューターに描かれたベクトルによって説明される。
- RL 並列回路(あるいは RC 並列回路)で、コイルの自己インダクタンス (あるいはコンデンサーの電気容量)が任意の時に流れる電流を測定し、コンピューター

ターに入力すると、より実際の図に近い抵抗とコイル（あるいは、コンデンサー）に流れる電流の位相差図がコンピューターによって表示される。

- RC 並列回路では、コンデンサーの任意の電気容量下で、界磁コイルの電流の位相差がシミュレートされる。
- RL 並列回路（あるいは RC 並列回路）に於いてコイルの自己インダクタンス（あるいはコンデンサーの電気容量）を変化させ、その時の無負荷の回転子の回転速度を測定して、自己インダクタンス（あるいは電気容量）と始動トルクとの関係を求める。

### 付記

この論文は、前報<sup>4)</sup>の概要を紹介するとともに、それを更に発展させたものである。

### 謝辞

最後に、前本校電子技術科の竹下伸彦教官には、終始貴重な助言を、又、前情報技術科の宮田利通教官には、コンピューターについて示唆を頂いたことに感謝します。

### 引用文献

- 1) 小林俊郎：職業能力開発報文誌、2（1989）83
- 2) 小林俊郎：38回春応用物理学会予稿集、(1991)368
- 3) 小林俊郎：物理教育、39-4（1991）259
- 4) 小林俊郎：物理教育、41-2（1993）142
- 5) 電気工学ハンドブック（電気学会）(1988) 654