

# 無段変速装置を用いたセルビウス方式の図式解法

神崎 勇 二\*

(昭和39年6月23日受理)

## 1. 緒 言

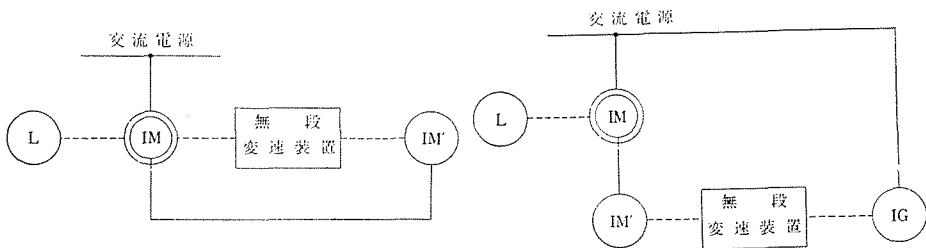
筆者は先に無段変速装置を用いた誘導電動機の二次励磁速度制御方式について提案した<sup>1)</sup>。また、その中の一方式であるクレーマ方式(第1図)についてその特性を作図だけによって求める解析法を提案した<sup>2)</sup>。

本文は、他の一方式であるセルビウス方式(第2図)についての図式解法ならびに解析の結果を示し、クレーマ方式との特性上の相違点を明らかにしたものである。

セルビウス方式の図式解法においては、クレーマ方式と同じ等価回路を用いるほかに、補助誘導電動機ならびにこれによって駆動される誘導発電機の速度が一定であるという仮定を用いたので解析結果はクレーマ方式に比べて少し誤差の大きいものとなる。

## 2. 等 価 回 路

無段変速装置を用いたクレーマ方式およびセルビウス方式の接続図を第1図、第2図に示す。



第1図 無段変速装置を用いたクレーマ方式

第2図 無段変速装置を用いたセルビウス方式

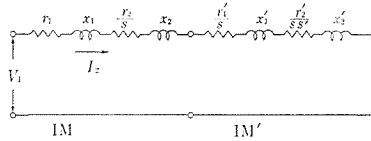
これらの図において、IMは主誘導電動機、IM'は補助誘導電動機であり、IG(セルビウス方式のみ使用)は誘導発電機である。主誘導電動機は速度制御は無段変速装置の変速比 $\alpha$ を変えることによって行なわれる。

クレーマ方式では主誘導電動機の二次電力が補助誘導電動機を通して機械力として負荷Lに伝達されるが、セルビウス方式においては、主誘導電動機の二次電力は補助誘導

\* 電気工学教室，助教授

電動機，誘導発電機を通して電源へ返還される。

さて，セルピウス方式の主誘導電動機と補助誘導電動機について，これらの励磁アド



第3図 セルピウス方式の等価回路

ミタンスを省略した等価回路を描けば第3図に示すようになる。図において  $V_1$  は電源電圧， $I_2$  は主誘導電動機二次電流， $r_1, r_2, x_1, x_2$  は主誘導電動機の一次および二次の抵抗，漏れリアクタンス ( $x_2$  は静止時の値) を示す。また  $r_1', r_2', x_1', x_2'$  は補助誘導電動機の一次および二次の抵抗，静止時の漏れリアクタンスを示す。これ

らはすべて主誘導電動機の一次側に換算したものである。

$s, s'$  は主誘導電動機，補助誘導電動機のすべりで次の式で表わされる。

$$s = \left( \frac{120f}{P_{IM}} - N_M \right) / \frac{120f}{P_{IM}}, \quad (1)$$

$$s' = \left( \frac{120sf}{P'_{IM}} - N_{M'} \right) / \frac{120sf}{P'_{IM}}. \quad (2)$$

ここで， $f$  は電源周波数 (c/s)， $P_{IM}, P'_{IM}$  は主誘導電動機，補助誘導電動機の極数， $N_M, N_{M'}$  は主誘導電動機，補助誘導電動機の回転数 (rpm) である。

いま誘導発電機の極数を  $P_{IG}$  とし，そのすべりが0であるとすれば，補助誘導電動機と誘導発電機が無段変速装置 (変速比  $a$ ) で結ばれているので  $N_{M'} = 120fa/P_{IG}$  という関係があり， $s$  と  $s'$ ， $s$  と  $ss'$  の関係は次のようになる。

$$s' = 1 - \frac{aP_{IM}'}{sP_{IG}}, \quad (3)$$

$$ss' = s - \frac{aP_{IM}'}{P_{IG}}. \quad (4)$$

第3図の等価回路において，抵抗，漏れリアクタンスが一定ですべり  $s, s'$  が変われば電流  $I_2$  の軌跡が円となることは周知のとおりである。

主誘導電動機の入力を  $P_I$  とすれば

$$\begin{aligned} P_I &= 3I_2^2 \left( r_1 + \frac{r_2 + r_1'}{s} + \frac{r_2'}{ss'} \right) \\ &= 3I_2^2 (r_1 + r_2 + r_1' + r_2') + 3 \frac{1-s'}{s'} I_2^2 r_2' \\ &\quad + 3 \frac{1-s}{s} I_2^2 \left( r_2 + r_1' + \frac{r_2'}{s'} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

で表わされ，最後の式の第1項は二つの誘導電動機の抵抗損を示し，第2項は補助誘導電動機出力  $P_{L'}$  を，第3項は主誘導電動機出力  $P_L$  を示すことになる。

主誘導電動機のトルク（同期ワット）を $T$ ，補助誘導電動機のトルク（同期ワット）を $T'$ とすれば

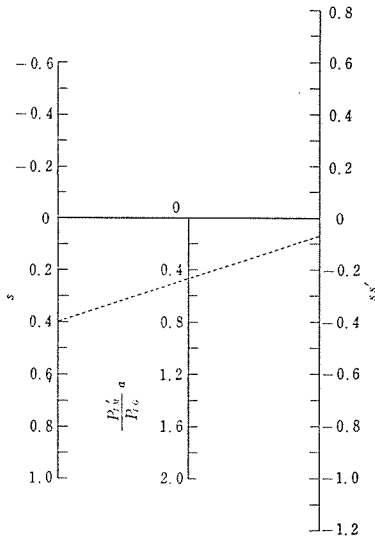
$$T = 3I_2^2 (r_2 + r_1' + r_2'/s')/s, \quad (6)$$

$$T' = 3I_2^2 r_2'/s' \quad (7)$$

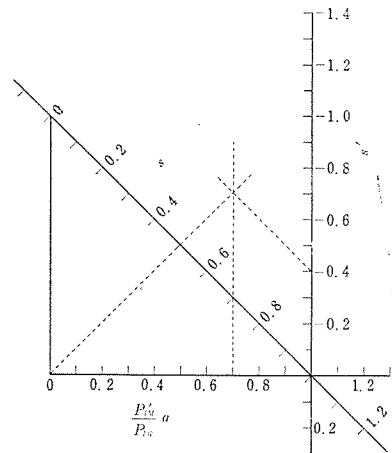
で表わされる。

したがって電流 $I_2$ について円の軌跡を描き，これにすべり $s$ の目盛りを記入し， $I_2$ の有効分を $r_1 : r_2 : r_1' : r_2' : (1-s')r_2'/s' : (r_2 + r_1' + r_2'/s')(1-s)/s$ の比に分けるような線を描けば円線図が完成することになる。

### 3. $ss'$ および $s'$ の計算図表



第4図  $ss'$  の計算図表



第5図  $s'$  の計算図表

$ss'$  および  $s'$  を求める計算図表を第4図，第5図に示す。これらの図表の作り方は簡単であるので省略し，その使用法を述べよう。

$ss'$  を求めるには第4図において，たとえば  $P_{IM}'a/P_{IG}=0.47$ ， $s=0.4$  とすれば， $s$  尺の0.4から  $P_{IM}'a/P_{IG}$  尺の0.47を通る直線を引き  $ss'$  尺との交点の値  $-0.07$  が求める  $ss'$  ということになる。

また  $s'$  を求めるには，第5図において，たとえば  $P_{IM}'a/P_{IG}=0.7$ ， $s=0.5$  とすれば， $s'$  尺に並行な補助線を引き，次いで  $P_{IM}'a/P_{IG}=0$  から  $s=0.5$  を通る直線を引いて先に描いた補助線との交点を求める。この交点から  $s$  尺に並行な直線を引いて  $s'$  尺との交点を読めば，この交点の読み  $-0.4$  が求める  $s'$  の値である。

### 4. 円線図

はじめに電流 $I_2$ の円にすべり $s$ を目盛る方法について述べる。電流 $I_2$ は





第7図において  $I_2$  に関し  $s$  がすでに目盛りされているものとして  $s = 1$  の点を  $S$  とする。 $S$  点から  $x$  軸に垂線を下ろし  $x$  軸との交点を  $W$  とする。

$\overline{SW}$  を五つに分け  $\overline{SQ} : \overline{QT} : \overline{TU} : \overline{UV} : \overline{VW} = r_2' a P_{IM}' / (P_{IG} - a P_{IM}') : r_2' : r_1' : r_2 : r_1$  となるよう  $Q, T, U, V$  点を決定する。ただし  $r_2' a P_{IM}' / (P_{IG} - P_{IM}')$  は  $s = 1$  とおいたときの  $(1 - s') r_2' / s' + (1 - s) (r_2 + r_1' + r_2' / s') / s$  の値である。

$Q, T, U, V$  の四つの点と原点  $O$  を直線で結び、円周上のある一点  $P$  (すべり  $s$ ) から  $x$  軸に垂線を下ろし  $\overline{OQ}, \overline{OT}, \overline{OU}, \overline{OV}, \overline{OW}$  との交点をそれぞれ  $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  とすれば、 $\overline{P_5 P_6} : \overline{P_4 P_5} : \overline{P_3 P_4} : \overline{P_2 P_3} : \overline{PP_2} = r_1 : r_2 : r_1' : r_2' : \{(1 - s') r_2' / s' + (1 - s) (r_2 + r_1' + r_2' / s') / s\}$  となっている。

したがって  $\overline{PP_2}$  を二つに分け  $\overline{P_1 P_2} : \overline{PP_1} = (1 - s') r_2' / s' : (1 - s) (r_2 + r_1' + r_2' / s') / s$  となるような点  $P_1$  を  $s$  を変えながら求めてゆけば  $(1 - s') r_2' / s'$  を示す線が描かれることになる。 $\overline{P_2 P_3}$  が  $r_2'$  に相当する長さになっているので、これを  $(1 - s') / s'$  倍にしたものが  $\overline{P_1 P_2}$  ということになる。

そこで現在  $s$  で目盛りをしてある  $I_2$  の円に、第5図の  $s'$  の計算図表を使用して  $s'$  の目盛りを併記する。 $s'$  の目盛りを併記するのが終わったところで  $Q$  点から  $\overline{OT}$  に並行に線を引き、 $y$  軸との交点を  $H$  とする。 $\overline{QH}$  を10等分するような均等目盛りを施し、 $H$  点を0、 $Q$  点を1とするように数字を記入して  $s'$  尺を作る。

$P$  点の  $s'$  と同じ値の点を  $s'$  尺上に求め、原点  $O$  からこの点を通る直線を引き、この直線が  $\overline{PP_2}$  と交わる点を  $P_1$  とすれば  $P_1$  点が求める  $(1 - s') r_2' / s'$  線上の一点である。

以下同じ手順で  $P$  点を円周に沿って移動してゆけば、 $P_1$  点の軌跡として  $(1 - s') r_2' / s'$  線が描かれる。

円線図から  $P$  点における諸量は、 $\overline{OP} = I_2$ ,  $\overline{PP_6} = \text{IM 入力 } P_I$ ,  $\overline{P_5 P_6} = \text{IM 一次抵抗損}$ ,  $\overline{P_4 P_5} = \text{IM 二次抵抗損}$ ,  $\overline{P_1 P_4} = \text{IM 二次出力} = \text{IM' 入力 } P_I'$ ,  $\overline{P_3 P_4} = \text{IM' 一次抵抗損}$ ,  $\overline{P_2 P_3} = \text{IM' 二次抵抗損}$ ,  $\overline{PP_1} = \text{IM 出力 } P_L$ ,  $\overline{P_1 P_2} = \text{IM' 出力 } P_L'$ ,  $\overline{PP_5} = \text{IM トルク } T$ ,  $\overline{P_1 P_3} = \text{IM' トルク } T'$  として求められる。

## 5. 特性算定

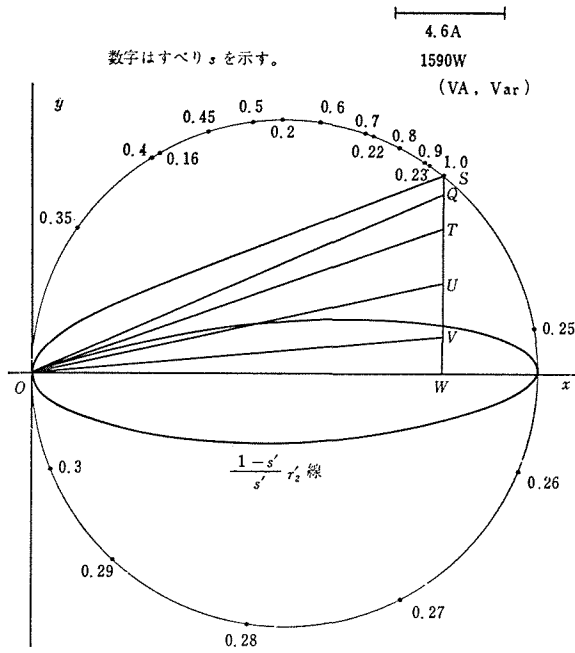
以上、円線図の描き方、特性の求め方について述べた。ここで実験の結果と円線図による特性算定の結果を比較してみることにする。

実験に使用した機械は、主誘導電動機と補助誘導電動機が全く同一定格のもので、巻線形、2.2kW、60 c/s、4 極、200V、9.5A、二次最大電圧72V、巻数比(固定子巻数/回転子巻数) 2.75であり、200Vにおける無負荷入力、無負荷電流がそれぞれ 235W、3.6A である。

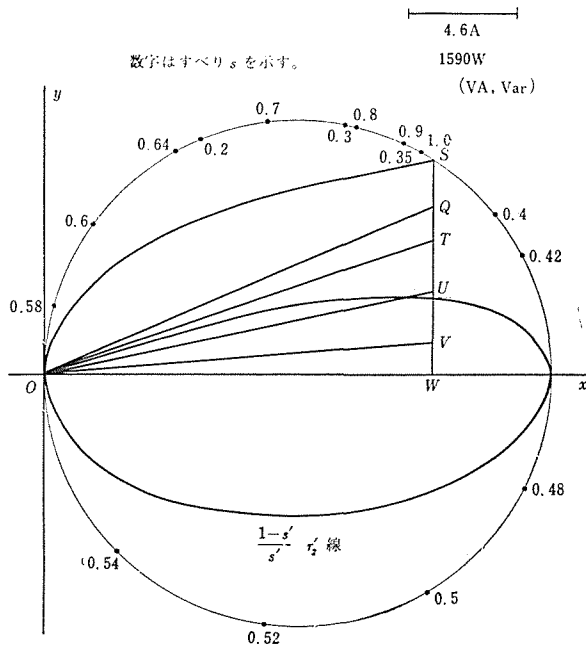
また誘導発電機として使用した誘導電動機は、巻線形、1.49kW、60 c/s、6 極、220V、6.45A のものである。

実験は主誘導電動機の回転子と補助誘導電動機の回転子を接続し、補助誘導電動機の固定子巻線を短絡して行なった。

特性算定に使用した諸定数は次のとおりで、抵抗、漏れリアクタンスはすべて主誘導



第8図 完成した円線図 ( $a=0.47$ )



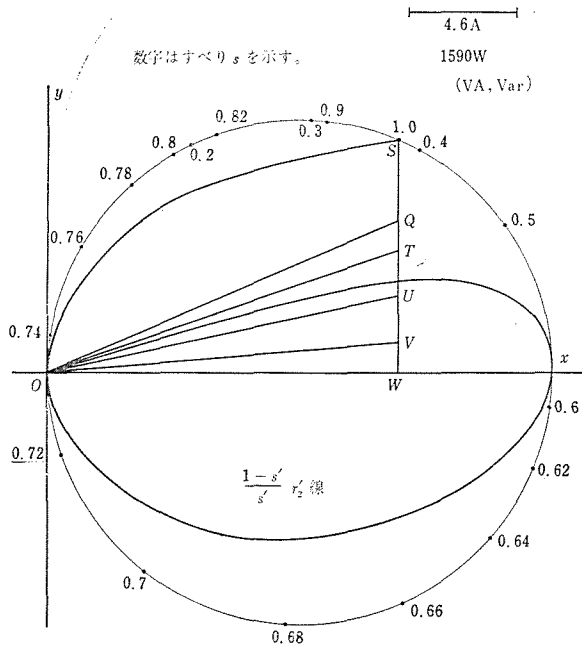
第9図 完成した円線図 ( $a=0.85$ )

電動機の一次側に換算した値である。

$$V_1 = 200/\sqrt{3} \text{ V}, \quad f = 60 \text{ c/s}, \quad P_{IM} = P_{IM}' = 4, \quad P_{IG} = 6, \quad r_1 = r_2' = 0.45 \Omega$$

$$r_2 = r_1' = 0.71 \Omega, \quad x_1 + x_2 = x_1' + x_2' = 2.69 \Omega.$$

無段変速装置の変速比  $a = 0.47, 0.85, 1.1$  の三つの場合の円線図をそれぞれ第8図、



第10図 完成した円線図 ( $a=1.1$ )

第9図, 第10図に示す。

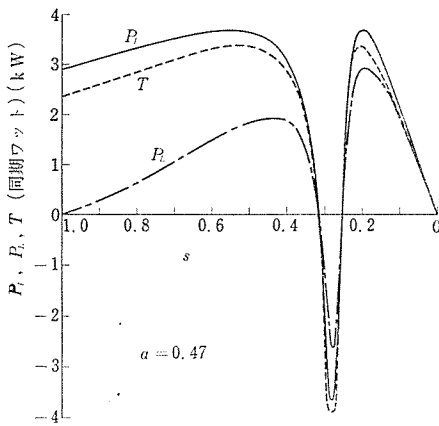
クレーマ方式においては  $S$  点 ( $s = 1$ ) は変速比  $a$  に関係なく移動しなかったが, セルピウス方式では  $a$  の変化によって  $S$  点が移動することが知られる。 $a$  が大きくなるにつれて主誘導電動機の起動電流 ( $OS$  の長さで示される) が小さくなり, 起動時の入力および起動トルクが増すことが知られる。また同じすべり  $s$  でも,  $a$  が大きくなれば主誘導電動機の出力は減少し補助誘導電動機の出力は増大するようになっている。

主誘導電動機の最大トルクは  $a$  に関係なく一定であるが,  $a$  の増大とともに主誘導電動機の最大出力は小さくなり, 補助誘導電動機の最大トルク, 最大出力は大きくなっていく。

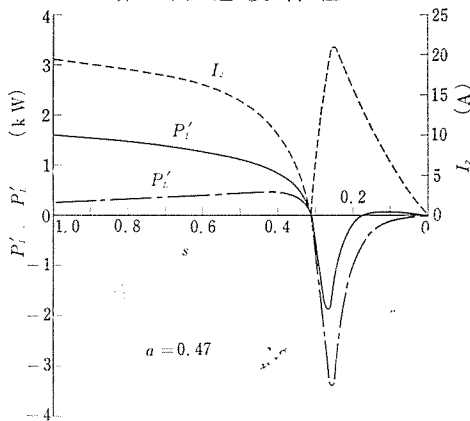
一例として  $a = 0.47$  の第8図の円線図から読み取った  $P_I, P_L, T$  を第11図に示し,  $I_2, P_I', P_L'$  を第12図に示す。これらの特性曲線はその形状がクレーマ方式のそれとほとんど同じになっている。

第13図は負荷特性について実験の結果と円線図による算定結果を  $a = 0.47$  の場合につき比較したものである。





第11図 速度特性



第12図 速度特性

第13図の算定結果の中で、 $P_M$ 、 $P_M'$ 、 $I_1$  はそれぞれ  $P_I$ 、 $P_I'$ 、 $I_2$  を次の方法で補正したものである。すなわち  $P_M$ 、 $I_1$  は主誘導電動機の励磁アドミタンス  $\dot{Y}_0 = g_0 - jb_0$  と補助誘導電動機の励磁アドミタンス  $s\dot{Y}_0' = sg_0' - jb_0'$  が主誘導電動機の一次側端子の位置に並列に接続されているとして(11)式と(12)式で、また  $P_M'$  は  $s\dot{Y}_0'$  だけが補助誘導電動機の一次側端子(主誘導電動機の二次側端子)の位置に接続されているとして近似的に(13)式で補正を行なった。

$$P_M = P_I + 3V_1^2 (g_0 + sg_0'), \quad (11)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{V}_1 (\dot{Y}_0 + s\dot{Y}_0'), \quad (12)$$

$$P_M' = P_I' + 3V_1^2 sg_0'. \quad (13)$$

次に  $I_1'$  であるが、これは補助誘導電動機の一次電流(主誘導電動機の二次電流)で、 $I_2$  に補助誘導電動機の励磁電流を加え、さらに主誘導電動機の二次側に換算したものであり次の式で表わされる。

$$\dot{I}_1' = (\dot{I}_2 + \dot{V}_1 s \dot{Y}_0) \times (\text{IM 巻数比}). \quad (14)$$

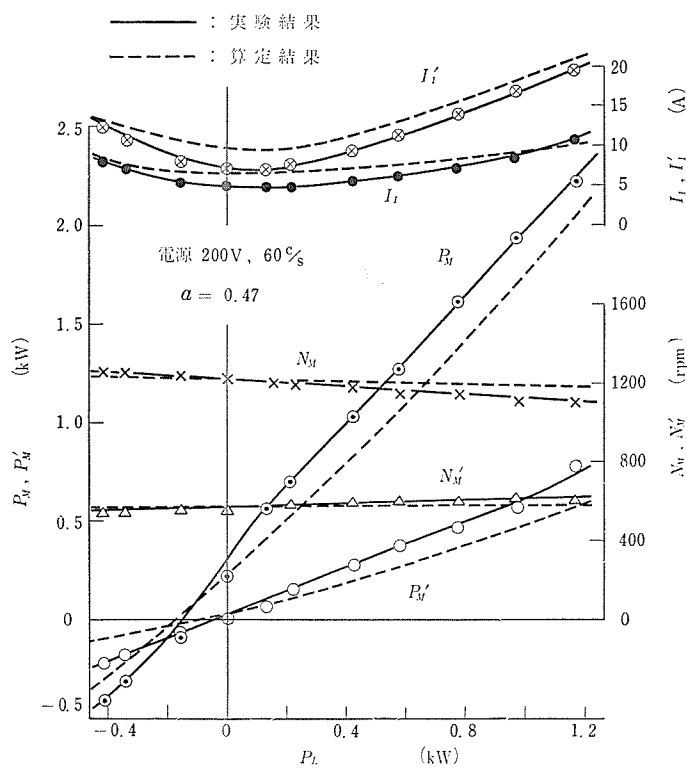
特性算定の結果は、補助誘導電動機が一定であるという仮定を用いて算定を行なっても、励磁回路の補正をすることにより実用される範囲では実験結果とほぼ一致しているといえることができる。

なお、もし誘導発電機の代わりに同期発電機を使用するとすれば、補助誘導電動機が一定であるということは仮定ではなく事実ということになる。

回転数  $N_M$ 、 $N_M'$ 、入力  $P_M$ 、 $P_M'$  に比べ、電流  $I_1$ 、 $I_1'$  の算定結果は実験結果から少しずれている。これはクレーマ方式の場合と同様に、 $I_1$ 、 $I_1'$  が直接大きな励磁電流の無効分の影響を受けるためである。

## 6. 結 言

以上、無段変速装置を用いたセルピウス方式の図式解析法について述べた。



第13図 負荷特性

解析法の大筋はクレーマ方式の解析法と同じである。ただ、補助誘導電動機のすべり  $s'$  が  $s = 1$  において  $s' = 1 - aP_{IM}'/P_{IG}$  となるために、主誘導電動機が静止しているとき補助誘導電動機はすでにある出力 ( $a$  の関数となっている) を生ずるようになっており、円線図の  $(1-s')r_2'/s'$  線の出発点 ( $S$  点) が変速比  $a$  によって変わる点がクレーマ方式と相違するところである。

終りに卒業研究として本研究に協力下さった広田真一郎、井原功の両君に深く感謝する次第である。

## 文 献

- 1) 神崎：電気学会雑誌 82, 1769 (昭37).
- 2) 神崎：電気学会雑誌 84, 647 (昭39).

## Summary

### Graphical Analysis of Scherbius System using Stepless Speed Change Device

Yuji KOZAKI

(Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

In the Scherbius system, an auxiliary induction motor is connected to the rotor of a main induction motor, and the rotor power of the main induction motor is transformed into mechanical power by the auxiliary induction motor and transmitted to the a-c generator through a stepless speed change device.

This paper describes graphical analysis of the Scherbius system using the stepless speed change device.

When the exciting admittances of the main induction motor and the auxiliary induction motor are neglected, the current locus of the main induction motor becomes a circle. Thus, characteristics of this Scherbius system can be computed by the graphical method which is analogous to Heyland's method.

At the end of the computation, in consideration of the exciting admittances computed results are corrected, and then the computed results are nearly coincided with the experimental results.