

# 試作自己縦続形誘導電動機の特性

大口 國臣\*, 大内 範弘\*\*

(昭和54年 9月 7日受理)

## Characteristics of Experimental Self-Cascaded Induction Motors.

KUNIOMI OGUCHI and NORIHIRO OUCHI

**Abstract:** – The details and experimental results of the experimental self-cascaded induction motors are described which have single winding on the stator and rotor. The principle of operation is described. The effects of the space harmonics of the air-gap flux on the motor characteristics are discussed in brief.

The two prototype motors were constructed which had 36-slot stator core and 54-slot rotor core available readily. The number of poles was choiced as the combination of 12/6-pole. The rotor had nine closed-windings.

The experimental motor I had the unsatisfactory performance, but the motor II satisfactory. The motor II had the improved rotor winding factor for 12-pole e.m.f.s by the decrease of coil pitch and the increase of the number of dummy coils. The motor II had the torque-speed characteristics similar to conventional external cascaded induction motors.

The practical application examples of self-cascaded motors are presented; brushless variable speed drives connected with a static power converter and variable speed constant frequency generators for wind power conversion.

### 1. ま え が き

巻線形誘導電動機の静止二次励磁方式（セルビウス方式やクレーマ方式など）は、その二次側に静止電力変換装置を適用して、二次電圧を制御することにより速度制御を行うものである。この方式は、二次電力を有効に処理するので高効率であること、二次電力のみを処理すればよいので変換装置容量が小さくて済み経済的であるなどの特長を有する。このため、数百 kW 以上のポンプ・ブロー駆動用電動機などに数多く実用されている。

しかし、回転子から二次電力を取り出すために、スリップリングとブラシが不可欠である。このため、直流機の整流子とブラシほどではないが、保守の手間を要し、また特殊ふん囲気中での使用などに制約がある。したがって、このスリップリングとブラシが除去できれば、無保守かつ経済的な可変速電動機として、静止二次励磁方式の適用分野はさらに拡大することが期待できる。

ブラシレス方式としては、外部縦続方式や内部縦続方式が以前から知られていた。これに対して、近年 Broadway 氏らは、回転子に適当な個数の短絡巻線ないしは突極を有する、構造が簡単な縦続方式（以下、自己縦続方式<sup>1),2)</sup>と称する）を提案している。この方式は簡単な構造で、外部縦続方式と同様なトルク-速度特性が得られる利点があり、今後その発展が期待できる。

しかし、この自己縦続形電動機（SC-IM）の最適設計法、等価回路定数の決定法及び静止二次励磁方式の適用可能性など未解明の問題が多い。そこで、これらの問題解明の第一段階として、既製の鉄心を用いて自己縦続形機を試作し、その特性検討を行った。

本論文では、1号機と2号機の試作経過と実験的検討結果を述べるとともに、今後開発が期待される応用例を示す。

\* 茨城大学工学部電気工学科（日立市中成沢町）

\*\* 倅飯村電工社（日立市若葉町）

2. 誘導機の縦続接続法

図1に示すように、誘導機の縦続接続法には三通りの方法がある。同図(a)の外部縦続接続では、2台の巻線形

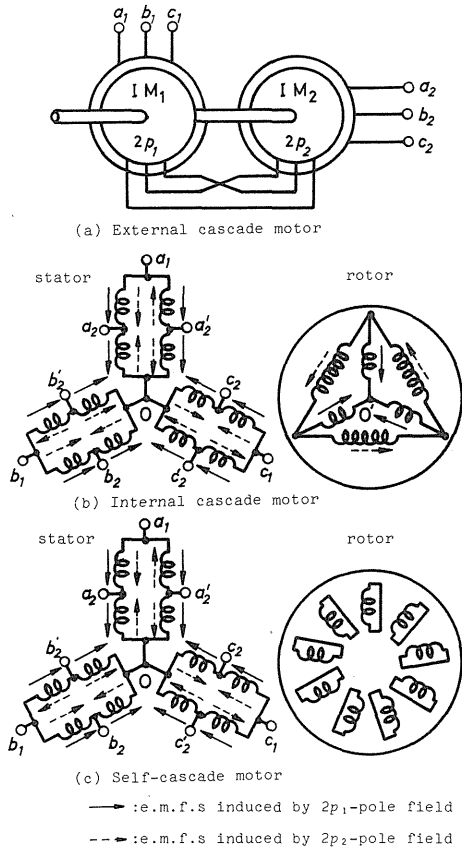


Fig. 1 Cascade motors.

誘導機の回転子巻線を互いに逆相順に接続する。したがって、IM<sub>1</sub>の回転子磁界(2p<sub>1</sub>極)は、回転子に対して、回転子回転方向と同一方向に回転するのに対して、IM<sub>2</sub>の回転子磁界(2p<sub>2</sub>極)は、それとは逆向きに回転することになる。この方法は、ブラシなしセルビウス方式<sup>3)</sup>に実用されている。しかし、構造的に軸方向に長くなる、二つのギャップを通して励磁電流を供給するので効率が悪くなるなどの欠点がある。

図1(b)の内部縦続方式では、回転子に極数の異なる2組の三相巻線を施すもので、一体化構造にすることがで

きるが、回転子スロット利用率が悪いなどの欠点が生じ<sup>8),9)</sup>る。

これに対して、図1(c)の自己縦続法では、回転子に(p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)個の短絡巻線のみを施すものである。固定子側から2p<sub>1</sub>極の励磁を与えると、次節で示すように、ギャップ中には2p<sub>1</sub>極の磁束成分のほかに、回転子の動きにより、2p<sub>1</sub>極成分とは逆向きに回転する2p<sub>2</sub>極成分が得られる。すなわち、外部縦続の場合と同様な磁束成分が得られることになる。

2.1 自己縦続法の原理

回転子の磁気的異方性を利用するものであるから、(p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)個の短絡巻線を施す代りに、(p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)個の突極性を回転子に持たせても同様な効果が得られる<sup>2)</sup>。ここでは説明の便宜上、図2に示すように回転子に(p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)個の突極がある場合を考える。

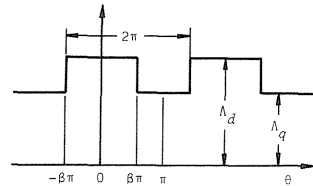


Fig. 2 Permeance variation when (p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)-salient rotor is assumed.

固定子三相巻線(2p<sub>1</sub>極)の合成起磁力の基本波は次式で与えられる。

$$F = (3/2) F_m \cos(p_1 \theta_m - \omega_1 t) \tag{1}$$

$$F_m = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \frac{k_w N_1}{2p_1} I_1 \tag{2}$$

ただし、N<sub>1</sub>:固定子1相の直列巻数、k<sub>w</sub>:巻線係数、I<sub>1</sub>:固定子相電流の実効値、F<sub>m</sub>:1相の基本波起磁力の振幅の最大値、ω<sub>1</sub>:固定子基本波電流の角周波数(=2πf<sub>1</sub>)、θ<sub>m</sub>:機械角。

回転子の(p<sub>1</sub>+p<sub>2</sub>)個の突極性のために、単位面積当たりのエアギャップパーミアンスが図2に示すように変化するものとし、フーリエ級数展開を行うと

$$A = A_0 + A_1 \cos \theta + A_2 \cos 2\theta \tag{3}$$

となる。ただし、第3調波以上の成分は無視するものとする。

ここで、

$$\begin{aligned} A_0 &= A_d \{ a + (1-a) \beta \} \\ A_1 &= (2/\pi) A_d (1-a) \sin \beta \pi \\ A_2 &= (2/\pi) A_d (1-a) \sin 2 \beta \pi \\ a &= A_q / A_d \end{aligned}$$

回転子機械角速度を  $\omega_{rm}$  とすると,

$$\theta = (p_1 + p_2) (\theta_m - \omega_{rm} t)$$

となる。

(1)式と(3)式から, ギャップ磁束密度  $B$  の分布が求まる。

$$\begin{aligned} B &= (3/2) A_0 F_m \cos (p_1 \theta_m - \omega_1 t) \\ &+ (3/4) A_1 F_m \{ \cos \{ -p_2 \theta_m \\ &- (\omega_1 - \overline{p_1 + p_2} \omega_{rm}) t \} + \cos \{ (2p_1 + p_2) \theta_m \\ &- (\omega_1 + \overline{p_1 + p_2} \omega_{rm}) t \} \} \\ &+ (3/4) A_2 F_m \{ \cos \{ -(2p_1 + p_2) \theta_m \\ &- (\omega_1 - 2\overline{p_1 + p_2} \omega_{rm}) t \} + \cos \{ (3p_1 + 2p_2) \theta_m \\ &- (\omega_1 + 2\overline{p_1 + p_2} \omega_{rm}) t \} \} \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち, 固定子側から  $2p_1$  極で励磁すると, 機械角速度  $\omega_1/p_1$  で回転する  $2p_1$  極磁束成分 (第1項) のほかに, 電気角速度

$$\omega_3 = \omega_1 - (p_1 + p_2) \omega_{rm} \quad (5)$$

で回転する  $2p_2$  極成分 (第2項前半) が得られることがわかる。

いま, 電気角速度  $\omega_1$  で回転する  $2p_1$  極磁束成分に対する回転子のすべりを  $s_1$ ,  $\omega_2 = s_1 \omega_1$  で回転する  $2p_2$  極成分に対するすべりを  $s_2$  とすると,

$$s_1 = \frac{\omega_1/p_1 - \omega_{rm}}{\omega_1/p_1} \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{s_1 \omega_1/p_2 - \omega_{rm}}{s_1 \omega_1/p_2} \quad (7)$$

これらから,

$$s_1 s_2 = s_1 - \frac{p_2}{p_1} (1 - s_1) \quad (8)$$

を得る。したがって,

$$1 - s_1 s_2 = \frac{p_1 + p_2}{p_1} (1 - s_1)$$

となるから, 回転速度  $\omega_{rm}$  は次のように表わせる。

$$\omega_{rm} = \frac{\omega_1}{p_1} (1 - s_1) = \frac{\omega_1}{p_1 + p_2} (1 - s_1 s_2) \quad (9)$$

すなわち, 自己縦統形誘導機は同期角速度  $\omega_1/(p_1+p_2)$ , すべり  $s_1 s_2$  で動作する。

この場合,  $2p_2$  極磁束成分によって固定子に誘導される電圧の角周波数は(5)式で与えられ, (9)式を代入すると,

$$\omega_3 = s_1 s_2 \omega_1 = \left\{ s_1 - \frac{p_2}{p_1} (1 - s_1) \right\} \omega_1 \quad (10)$$

のように表わされる。

## 2.2 高調波成分の影響

回転子側に基づく高調波成分のほかに, 固定子起磁力及びスロット開口に基づく空間高調波が存在する。しかし, 後者の影響は一般に小さいので, ここではこの電動機の動作原理からより本質的な前者のみを考えることにする。ギャップ磁束の空間高調波成分として, (4)式の第2項の後半の成分及び第3項の成分が発生する。

第2項の後半の磁束成分は,

$$\omega_1 + (p_1 + p_2) \omega_{rm} = (2 - s_1 s_2) \omega_1$$

の電気角速度で回転し,  $s_1 s_2 = 2$  で空間的静止磁界となる。この速度は通常の運転範囲 ( $1 \leq s_1 s_2 \leq 0$ ) を外れているので, この成分がトルク-速度特性に与える影響は比較的小さいと考えられる。

第3項の前半と後半の成分は, それぞれ

$$\omega_1 - 2(p_1 + p_2) \omega_{rm} = (2s_1 s_2 - 1) \omega_1$$

$$\omega_1 + 2(p_1 + p_2) \omega_{rm} = (3 - s_1 s_2) \omega_1$$

となり, 前者は通常の運転範囲内である  $s_1 s_2 = 1/2$  で静止磁界となる。

## 3. 試作機の巻線仕様<sup>10)</sup>

### 3.1 極数の選定

普通は, 電動機の定格速度と定格周波数が与えられ, それに基づいて  $2(p_1 + p_2)$  をまず決定し, 次に固定子巻線方式などを考慮して,  $p_1$  と  $p_2$  を決定する。その後, 鉄心のスロット数などを決める手順をとる。

しかし, 今の場合, 使用可能な鉄心が限定されていて, そのスロット数は固定子側36, 回転子側54である。前述のように, 回転子には  $(p_1 + p_2)$  個の短絡巻線を施すので, 一つの短絡巻線当りのスロット数を整数にするには,

$$2(p_1 + p_2) = 54, 36, 18, 12, 6$$

のいずれかに選定すればよい。実験の便宜も配慮して,

$$2(p_1 + p_2) = 18 \text{ とすると,}$$

$$2(p_1 + p_2) = 16 + 2, 14 + 4, 12 + 6, 10 + 8$$

の組合せが考えられる。

このうち, 極数差が2の組合せは, 不平衡磁気吸引力<sup>1)</sup>による振動・騒音の点から不都合である。また, 定常運転時の回転子電流の周波数をなるべく低くして, 回転子鉄損の減少を図り, 表皮効果による回転子銅損の増大を抑制するためには,  $p_2/p_1$  をなるべく1に近づけること

が望ましい<sup>6)</sup>。この結果、 $p_1=6, p_2=3$ の組合せが適当であることになる。

さらに固定子スロット数は、36であるから整数溝巻を採用するとすると、

$$2p_1=12, 6, 4, 2$$

が可能である。

結局、今の場合、主として固定子及び回転子のスロット数に基づく制約から、

$$p_1+p_2=9, p_1=6, p_2=3$$

のように、極対数を選定せざるを得ないことになる。

### 3.2 回転子巻線

前節で述べたことにより、回転子には  $p_1+p_2=9$  個の短絡巻線を設ける。したがって、一つの短絡巻線当りのスロット数は6となる。1号機では、図3に示すようにコイルピッチを6、遊びコイル数を1とした。

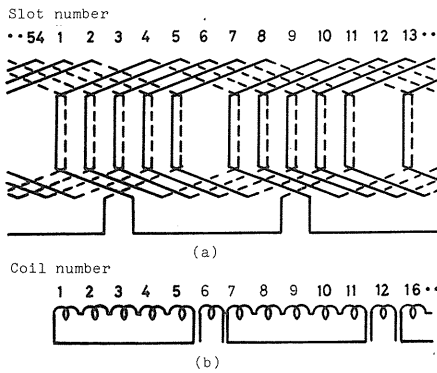


Fig. 3 Rotor winding of the experimental motor I.

いま、短節巻係数、分布巻係数及び巻線係数を、それぞれ添字の  $p, d$  及び  $w$  で表わすと、6極に対しては、

$$k_{p(6)}=0.866, k_{d(6)}=0.883, k_{w(6)}=0.764$$

となる。同様にして、12極に対しては、

$$k_{p(12)}=0.866, k_{d(12)}=0.576, k_{w(12)}=0.498$$

となる。

$k_{w(6)}, k_{w(12)}$ とも普通の場合に比べて小さいが、ことに  $k_{w(12)}$ が小さくなっている。このため、試作2号機では図4に示すようにコイルピッチを6から5に短縮するとともに、短絡巻線1個当りの遊びコイルを1個から2個に増大した。この結果、2号機の巻線係数は

$$k_{w(6)}=0.709, k_{w(12)}=0.709$$

となり、6極に対する巻線係数はいくらか減少するが、

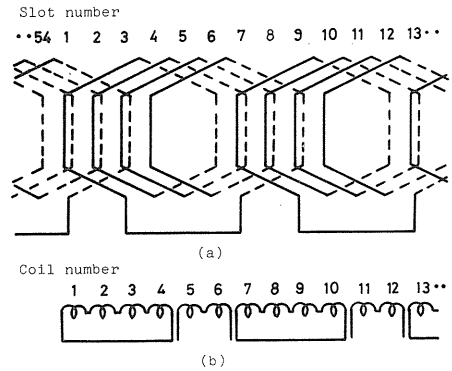


Fig. 4 Rotor winding of the experimental motor II.

12極に対する巻線係数は大幅に改善される。

### 3.3 固定子巻線

極数が異なる2組の三相巻線を施す2重巻線方式と1組の三相巻線によって同等の機能が行える単一巻線方式が考えられる。スロット利用率や巻線構造の簡単さなどから後者の方が有利である。単一巻線方式にも種々ある。1相当り3並列回路を構成するようにし、 $a_1, b_1, c_1$ から励磁すると  $2p_1$  極、 $a_2, b_2, c_2$  側から励磁すると  $2p_2$  極を形成できる3並列回路巻は、出力端子数が少なく、変換装置接続上も好都合である。しかし、3並列回路巻を適用するためには、少なくとも  $p_1$  対  $p_2$  が3対1、又は3対2の整数倍でなければならない<sup>1)</sup>。

試作機の場合、前述のようにスロット数の制約から  $p_1$  対  $p_2$  は6対3に選定したから、3並列回路巻の適用は不可能である。そこで、試作機では図1と図5に示すように、出力端子数が6である2対1極数変換巻線を採用した。すなわち、端子  $a_1, b_1, c_1$ から励磁すると12極、 $a_2-a_2', b_2-b_2', c_2-c_2'$ 側から励磁すると6極を形成する(以下、この接続を、(12+6)極接続と称する)。この巻線の接続変更により、(6+12)極接続、すなわち端子  $a_1, b_1, c_1$ から励磁すると6極、 $a_2-a_2', b_2-b_2', c_2-c_2'$ 側から励磁すると12極を形成することができる。

6極に対して、4/6短節巻を採用した。したがって、12極に対しては4/3過節巻となる。固定子巻線の巻線係数は、

$$k_{w(6)}=0.837, k_{w(12)}=0.750$$

である。

回転子と固定子の巻線仕様を表1にまとめて示す。

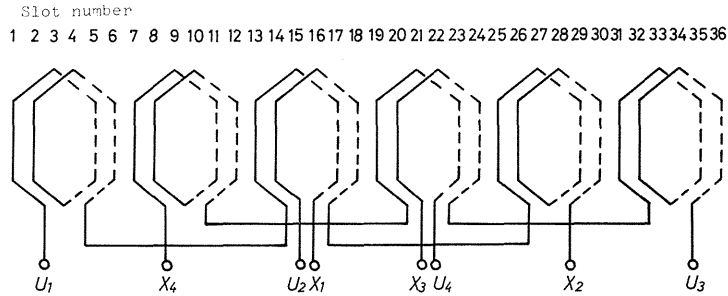


Fig. 5 Stator winding ( $a_1$ -phase).

Table 1 Details of the experimental motors.

No.		Stator		Rotor	
		No.1, No.2	No.1	No.2	No.1
1	Type of winding	3-phase double-layer		9-closed winding, double-layer	
2	Number of poles	6/12			
3	External diameter of core	220		154.08 mm	
4	Internal diameter of core	155		60 mm	
5	Stack length of core	100		100 mm	
6	Number of slots	36		54	
7	Coil pitch	4/6		6/9	5/9
8	Number of dummy coils	0		1	2
9	Winding factor for 12 poles	0.750		0.498	0.709
10	Winding factor for 6 poles	0.837		0.764	0.709

\* No. 8 means the number per coil group.

1号機と2号機の固定子は同一のものである。

#### 4. 試作機の特 性

クレーン用 2.2 kW, 6 極, 50 Hz, 200 V, 11.5 A 巻線形誘導電動機の鉄心(その寸法を表 1 に示す)に前述のような巻線を施した。後述のように, 1 号機では所期の特 性が得られなかったので, その回転子鉄心に表 1 のように巻き直したものを 2 号機とした。

ブラシレス構造になるため, 元の巻線形誘導電動機のスリップリング・ブラシまわりのスペース(フレームの軸方向長さのうちの約 20% を占める)が不要になる。

##### 4.1 試作 1 号機の特 性

1 号機のトルク - 速度特 性の実測結果を図 6 に示す。(12+6) 極及び(6+12) 極接続の場合について, 固定子側の  $a_1, b_1, c_1$  端子に三相電圧(50 Hz, 線間電圧 60 V)を引加し,  $a_2 - a_2', b_2 - b_2', c_2 - c_2'$  端子間をそ

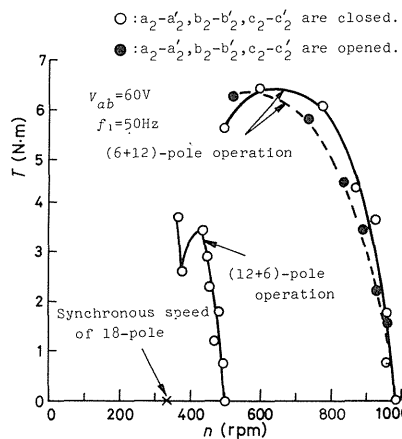


Fig. 6 Torque vs. speed characteristics of the experimental motor I.

れぞれ短絡して実験を行った。いずれの極数の組合せにおいても, 縦続時の同期速度(供試機の場合 333 rpm)を飛び越えて,  $2p_1$  極相当の同期速度(500 又は 1000 rpm)付近で回転する。ただし, 333 rpm 付近でトルクが落ち込む傾向は, いずれの接続の場合にも認められる。

図6中の黒丸は、固定子端子  $a_2 - a_2'$ ,  $b_2 - b_2'$ ,  $c_2 - c_2'$  間を開放時の特性を示すものである。供試機では、これらの端子間の短絡効果が小さいこと、(6+12)極接続に比較して、(12+6)極接続時のトルクが小さいことなどから、回転子巻線の12極に対する巻線係数が小さいことが所期の特性が得られない原因であると推定される。

4.2 試作2号機の特性

2号機のトルク-速度特性を図7に示す。実験条件は

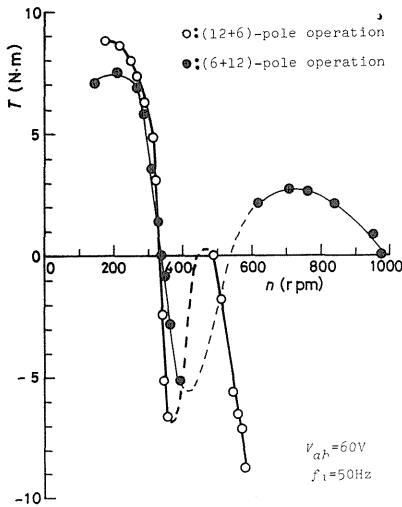


Fig. 7 Torque vs. speed characteristics of the experimental motor II.

図6のときと同一である。(12+6)極及び(6+12)極のいずれの組合せの場合においても、縦続時の同期速度においてトルクは零になり、さらに速度上昇すると誘導発電機として動作し、 $2p_1$ 極に対する同期速度付近では再び電動機動作をするという、縦続接続誘導電動機に特有なトルク-速度曲線が得られることがわかる。

(12+6)極運転と(6+12)極運転を比較すると、電動機運転時の最大トルクは、後者の場合が前者の  $7.5 / 9 = 0.8333$  になっている。これは、6極と12極に対する固定子巻線係数が異なるのに、同一電圧で比較したためと考えられる。

2.2節での考察が示すように、空間高調波によるトルク成分が生じるはずであるが、今回の実験では異常なトルクのくぼみは観測されなかった。また、異常な振動・

騒音も全く生じなかった。

図8及び図9に、それぞれ(12+6)極運転、(6+12)極運転のときの一次電流  $I_1$ 、一次入力  $P_1$ 、一次力率  $\cos \varphi_1$  及び効率  $\eta$  を示す。実験条件は図7の場合と同一である。

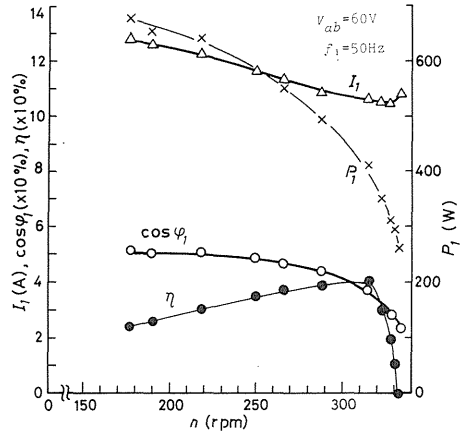


Fig. 8 Speed characteristics of the experimental motor II, (12+6)-pole operation.

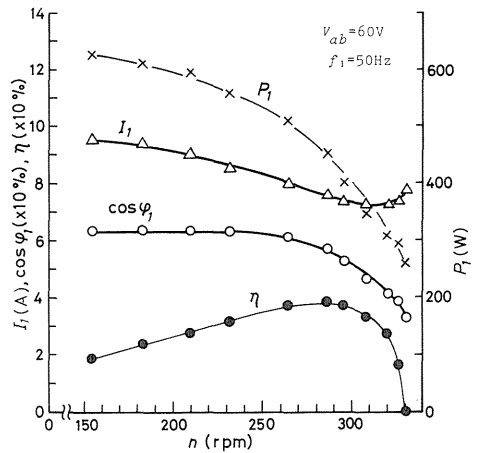


Fig. 9 Speed characteristics of the experimental motor II, (6+12)-pole operation.

(6+12)極運転に比べて、(12+6)極運転の方が無負荷電流が大きく、このため後者の最大力率のほうが約13%低い。しかし、一次無負荷入力ほぼ同じである。(12+6)極運転のほうが無負荷電流は大きいいため、一次銅損も大きくなる。しかし、縦続時の同期速度において、 $2p_1$ 極回転磁界に対するすべり  $s_1$  は、(6+12)

極運転時のほうが大きい。供試機の場合、(6+12)極運転のとき、 $s_1 = p_2 / (p_1 + p_2) = 2/3$ 、(12+6)極運転のとき、 $s_1 = 1/3$ となる。このため、(6+12)極運転のほうが、回転子鉄損が増大する。結果として、両者の場合の無負荷入力力はほぼ同一になっている。効率も約40%と、両者の場合ではほぼ同じである。

同一鉄心を使用した6極クレーン用電動機としての特性値は、力率70.5%、効率78.2%である。これらの値に比較して、供試機の力率・効率ともに相当低い。しかし、供試機は18極の電動機として動作するものであるから、これを6極機の特性と比較するのは適当でない。マシンサイズが同一の18極機と特性比較をする必要がある。供試機のような小形機で、18極という多極機のデータが入手できなかったので、比較検討は今後の課題である。

さらに試作機は、既製の鉄心を利用したものであるから、自己縦続形機として、最適設計にはなっていないことも考慮に入れておくべきである。例えば、2号機の回転子コイルのうち1/3を遊びコイルにしている。

### 5. 応用例

これまで通常の巻線形誘導機が用いられている方式に、自己縦続形機を適用することができる。それらのうち、実用性の大きい応用例及び筆者らが新に提案する方式をまとめて図10に示す。

同図(a)は、自己縦続形機(SC-IM)とブラシレス無整流子電動機(CLM)を結合することにより完全ブラシレス化した静止クレーマ方式である<sup>11),12)</sup>。(b)はブラシレス静止セルビウス方式<sup>13),14)</sup>、(c)はチョップによるブラシレス二次抵抗制御方式である。いずれも動作原理は、従来方式とほぼ同じである。(d)は低周波三相交流励磁方式の無整流子電動機である。静止時においても、電機子電圧が存在するので、インバータ(Inv.)転流電圧が確保でき、さらに電気式位置検出器が適用できるなどの利点が見られる。(e)は、多極化が容易である自己縦続形機の特長を生かした、風力発電用変速度定周波発電方式である。風車の回転速度( $f_r$ )変動に応じて、励磁周波数( $f_3$ )を調整することにより、定周波出力を得るものである。

これらのうち、(a)、(d)及び(e)については、筆者らの一人が新に提案したものであり、詳細は別の機会に報告する。

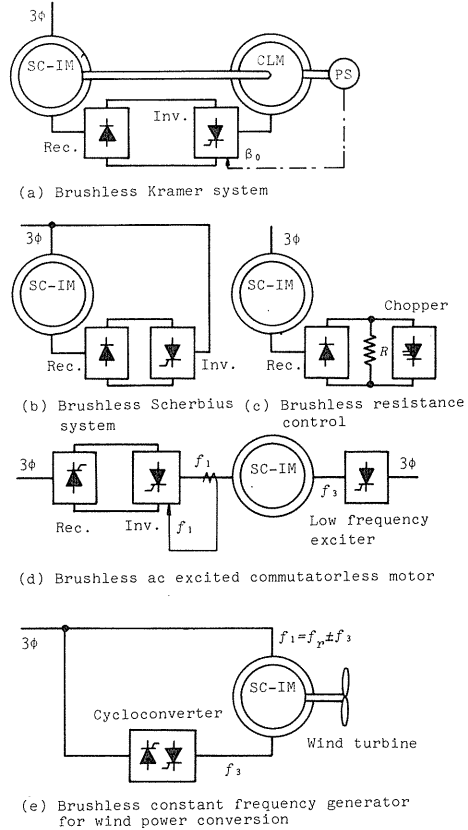


Fig. 10 Application of self-cascade induction machines.

### 6. むすび

以上、回転子に( $p_1 + p_2$ )個の短絡巻線を持つ自己縦続形誘導電動機において、回転子巻線配置を適切にすることにより、2台の巻線形誘導電動機の外部縦続接続方式と同様なトルク特性が単一機によって得られることを示した。さらに今後実用化が期待できる可変速運転方式を示した。

同一極数の通常の巻線形誘導電動機に対して、自己縦続形機のマシンサイズ、効率及び力率がどの程度のものになるかを明確にすることが実用化に際して重要な課題であると考えられる。

最後に、試作機の製作にあたり多大な御協力をいただいた飯飯村電工社・橋本治郎専務取締役様に厚く御礼申し上げる次第である。なお、実験に際しては本学昭和53年度卒業生鈴木秀一君(現、東京電力)の御協力を得た

ことを記し、謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) A.R.W. Broadway & L. Burbridge: "Self-cascaded machine: a low speed motor or high-frequency brushless alternator", *Proc. Instn Elect. Engrs* **117**, 1277 (1970)
- 2) A.R.W. Broadway: "Cageless induction machine", *ibid.*, **118**, 1593 (1971)
- 3) 電気学会編: 「誘導機・交流整流子機」, 99 (昭36)
- 4) 野中・大口: 「ブラシなし静止セルビウス方式の特性」電学論B, **92**, 241 (昭47-4)
- 5) 野田・廣・堀: 「誘導電動機のブラシレスセルビウス制御」日立評論 **55**, 640 (1973)
- 6) J. Noda, Y. Hiro & T. Hori: "Brushless Scherbius Control of Induction Motors" *IEEE Conf. Record of IAS*, 111 (1974)
- 7) 野中・大口: 「自制式可逆コンバータを用いたブラシなし静止セルビウス方式」電学論B, **97**, 127 (昭52-3)
- 8) L.J. Hunt: "A new type of induction motor", *J. IEE* **39**, 648 (1907)
- 9) 電気学会編: 「誘導機・交流整流子機」, 105 (昭36)
- 10) 大口・大内: 「試作自己縦続形誘導電動機の特性」昭54電気関係学会東北支部連大No1B19
- 11) 大口・木村: 「直流チョップ制御静止クレーマ方式」昭53電気関係学会東北支部連大No2F5
- 12) 大口・鈴木: 「誘導電動機のブラシなしクレーマ方式」昭54電気学会東京支部大No202
- 13) N. Radhakrishnan, V.V. Sastry & P.V. Rao: "A Brushless Slip-Energy Recovery Scheme", *IEEE Trans. Industr. Electronics Control Instrum.* **IECI-22**, 458 (1975)
- 14) A. Kusko & C.B. Somuah: "Speed Control of a Single-Frame Cascade Induction Motor with Slip-Power Pump Back", *IEEE Trans. Industr. Applic.* **IA-14**, 97 (1978)