

二重かご形コンデンサ電動機の特性

坪井 和 男*, 坂 柳 智 司**

Characteristics of a Condenser Motor with Double-cage Rotor

Kazuo TSUBOI* & Satoshi SAKAYANAGI**

(Received March 8, 1982)

A three-phase induction motor with a double-cage rotor is designed when frequent starting, high starting torque, or low starting current is required. Because of the small capacity of a single-phase power source, it is also important to reduce the starting current of a single-phase induction motor.

This paper discusses the effect of the double-cage rotor on the starting characteristics of a condenser motor.

We have constructed five condenser motors with the double-cage rotor, then calculated theoretically and measured experimentally, the effect of the double-cage rotor on the starting characteristics.

As a result, we have found that the double-cage rotor effectively reduces the starting current of the condenser motor on condition that the starting torque is the same value as that of a conventional-cage rotor condenser motor of the same rating. The maximum torque of this motor, however, falls down by about the same ratio as that of the starting current reduction.

1. 緒 言

単相誘導電動機（以下、単相 IM と略記する）は各種工業用のみならず家庭電気製品用として数多く用いられており、最近では 0.75kw 以上の容量を持つコンデンサ電動機（以下、CRM と略記する）も多数製作されている。CRM においては良好な運転特性を持たせるため適正なコンデンサ容量を定める必要があり、⁽¹⁾ 一般に電源容量の制約も受けるので同一出力に対する始動トルクの増大および始動電流の減少は設計上留意すべき重要な問題となっている。

本論文においては、CRM の始動特性改善に対する一

手段として回転子スロットを二重かご形にした二重かご形 CRM を試作し、種々の検討を加えるとともにその実用性について論じようとするものである。すなわち、まず基礎微分方程式から出発し、テンソル法を用いて二重かご形 CRM に対する理論解析を展開し、定数決定法を明確にする。次に、理論に従って試作機の諸特性を算定し、これが実測値と良好な一致を示すことを明らかにする。更に、種々の計算結果から用途によっては二重かご形 CRM が有用であることを指摘し、その場合の設計の基礎的資料を提供しようとするものである。

2. 理論解析

<2.1> 過渡インピーダンステンソル

以下においては文献(2)と同様な仮定をおいて二重かご

*電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

**アイチーエマソン電機 (Aichi Emerson Electric Co., Ltd.)

形 CRM の理論解析を行なうが, 理論式を簡単化するため, 最初の段階においては固定子鉄損を考慮せずに展開する。

さて, 二重かご形 CRM に対する巻線配置図は図 1 のようになる。

図 1 において, d_s および q_s : 主および補助巻線, d_i および q_i : 平衡うず電流回路, a_1 および b_1 : 平衡二相回転子上層巻線, a_2 および b_2 : 平衡二相回転子下層巻線, θ : d_s 巻線と a_1 または a_2 巻線との間のなす角, Z_c : 補助巻線の外部にそう入するコンデンサインピーダンスである。

まず, 図 1 で表わされた各巻線に対する基礎微分方程式を立て, 解析を容易とするため文献(3)と同様に対称軸上にテンソル変換する。いま, d_s 巻線と q_s 巻線との実効巻数比を $\beta(=1/\alpha)$ とし, 固定子巻線に対しては二相巻線対称軸⁽⁴⁾, 回転子上層および下層巻線に対しては普通の二相對称軸⁽³⁾を用いて対称軸上に変換すれば, 対称軸上の過渡インピーダンステンソルは

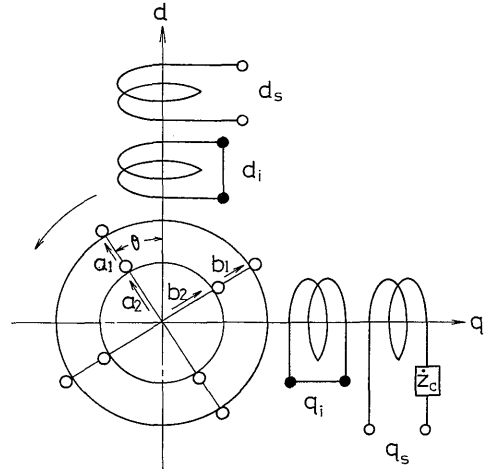


図 1 単相二重かご形 CRM の巻線配置図

	$1f$	$1b$	$2f_1$	$2b_1$	$2f_2$	$2b_2$
$1f$	$\frac{R_S + L_S p}{+\beta^2 Z_c(p)/2}$	$\frac{R_D}{-\beta^2 Z_c(p)/2}$	$M_{sr1} p e^{j\theta}$		$M_{sr2} p e^{j\theta}$	
$1b$	$\frac{R_D}{-\beta^2 Z_c(p)/2}$	$\frac{R_S + L_S p}{+\beta^2 Z_c(p)/2}$		$M_{sr1} p e^{-j\theta}$		$M_{sr2} p e^{-j\theta}$
$2f_1$	$M_{sr1} p e^{-j\theta}$		$R_{r1} + L_{r1} p$		$M_{r12} p$	
$2b_1$		$M_{sr1} p e^{j\theta}$		$R_{r1} + L_{r1} p$		$M_{r12} p$
$2f_2$	$M_{sr2} p e^{-j\theta}$		$M_{r12} p$		$R_{r2} + L_{r2} p$	
$2b_2$		$M_{sr2} p e^{j\theta}$		$M_{r12} p$		$R_{r2} + L_{r2} p$

...(1)

となる。但し, R および L : 各巻線の抵抗および自己インダクタンス, M : 巻線軸が一致したときの相互インダクタンス, $Z_c(p)$: コンデンサの過渡インピーダンス, p : 時間に関する微分オペレータとし, 添字はそれぞれの巻線に対応させるものとすれば

$$\left. \begin{aligned} R_S &= (R_{ds} + \beta^2 R_{qs})/2 \\ R_D &= (R_{ds} - \beta^2 R_{qs})/2 \\ L_S &= L_{ds} = \beta^2 L_{qs} \\ M_{sr1} &= M_{dsr1} = \beta M_{qsr1} \\ M_{sr2} &= M_{dsr2} = \beta M_{qsr2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

を意味している。もちろん, (1)式中の $1f$ および $1b$ 軸は固定子巻線に, $2f_1$ および $2b_1$ 軸は回転子上層巻線

に, $2f_2$ および $2b_2$ 軸は回転子下層巻線に対する正相および逆相軸を意味している。

〈2・2〉 定常状態における電圧方程式と等価回路

いま, 固定子巻線への供給電圧を $V_m \sin(\omega t + \phi)$ なる瞬時値で表わし, これを巻線対称軸上へテンソル変換すれば, 瞬時値対称分表示の電圧は

$$[v_s] = \begin{cases} 1f & \frac{1}{2} V_{1f} e^{j(\omega t + \phi - \gamma)} + \frac{1}{2} V_{1bm} e^{-j(\omega t + \phi + \gamma)} \\ 1b & \frac{1}{2} V_{1bm} e^{j(\omega t + \phi + \gamma)} + \frac{1}{2} V_{1f} e^{-j(\omega t + \phi - \gamma)} \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

となる⁽²⁾。但し,

層および下層巻線で生じる正相トルク, 第3項および第4項はそれぞれ回転子上層および下層巻線で生じる逆相トルクを示している。

以上のようにテンソル法を用いて単相二重かご形 CRM の特性算定のための理論式を導出した結果, この種の電動機の理論解析が可能となった。

3. 定数決定法

〈3・1〉 概 説

(2)式, (4)式および図2の等価回路より明らかなように二重かご形 CRM の特性算定に必要な定数は R_{ds} , R_{qs} , $\beta (=1/\alpha)$, $\dot{Z}_c$, x_l , r_i , x_m , r_{r1} , r_{r2} および x_{2l} である。従って普通の CRM⁽²⁾ と比較した場合, 2個だけ未知数が増えるので定数の決定は若干複雑となる。

上記のうち, R_{ds} および R_{qs} はブリッジ法にて測定し, 基準巻線温度に換算すればよく, β は文献(7)に従って求めればよい。また, $\dot{Z}_c$ は実際にコンデンサに流れる電流値とほぼ等しい電流を流して測定すればよい。残りの6個の未知数については正確さを記すため以下の方法で行った。

〈3・2〉 定格周波数および1/2 定格周波数拘束試験

二重かご形 CRM の補助巻線のコンデンサを取り去り, 抵抗分相形として拘束試験を行った。まず, 図2の等価回路において, 励磁回路を無視した定格周波数拘束時の a-N 端子から見た正相近似等価回路は図3のようになる。

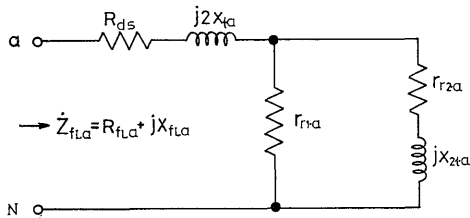


図3 端子 a-N から見た定格周波数拘束時の近似等価回路

但し, 図中の定数の添字 a は近似値であることを示しており, $\dot{Z}_{fLa}$ は a-N 端子から二次側を見たインピー

ダンスを示している。この $\dot{Z}_{fLa}$ は $\dot{I}_{ds}$ および $\dot{I}_{qs}$ を測定し, これらから対称分電流を求め, 図2の等価回路を参照して求めることができる。

同様に, 1/2 定格周波数拘束時においてはリアクタンス分のみ1/2倍になるものとして図3と同じ形の等価回路が求まり, この場合も a-N 端子から見たインピーダンス $\dot{Z}_{fLa}' = R_{fLa}' + jX_{fLa}'$ が求まる。

従って, $\dot{Z}_{fLa}$ と $\dot{Z}_{fLa}'$ のそれぞれの実部および虚部に関する連立した式を解くことにより, r_{r1} , r_{r2} , x_l および x_{2l} の近似値 $r_{r1 \cdot a}$, $r_{r2 \cdot a}$, $x_{l \cdot a}$ および $x_{2l \cdot a}$ を求めることができる。

〈3・3〉 無負荷試験

二重かご形 CRM に定格電圧を加えて無負荷試験を行なう。拘束試験時と同様な考え方で図2の a-N 端子より見た等価回路は滑り $s=0$ として図4で表わされる。

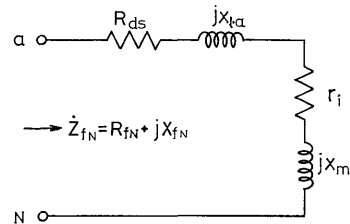


図4 端子 a-N から見た無負荷時の等価回路

従って, r_i および x_m を(10)式によって精度良く求め得る。

$$\left. \begin{aligned} r_i &= R_{fN} - R_{ds} \\ x_m &= X_{fN} - x_{l \cdot a} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

〈3・4〉 拘束試験時における近似定数の補正

いま, 図3において無視した励磁回路を考慮すれば定格周波数拘束時の a-N 端子から見た等価回路は図5のように表わされる。

(10)式より求めた r_i および x_m より励磁電流を求め得るので, a'-N' 端子から二次側を見たインピーダンス $\dot{Z}_{fL}$ を求め得る。

同様に 1/2 定格周波数拘束時に対して端子 a'-N' から

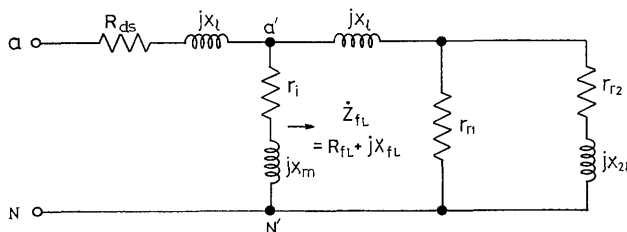


図5 端子 a-N から見た定格周波数拘束時の等価回路

二次側を見たインピーダンス $\dot{Z}_{fL}' = R_{fL}' + jX_{fL}'$ も求める。従って、二次側の諸定数は(11)式から求めることになる。

$$\left. \begin{aligned} r_{r1} &= \frac{4}{3} \left(\frac{R_{fL}' - R_{fL}}{X_{fL} - 2X_{fL}'} \right)^2 (R_{fL} - R_{fL}') \\ &\quad + \frac{1}{3} (4R_{fL} - 3R_{ds} - R_{fL}') \\ r_{r2} &= \frac{1}{3} \left\{ \frac{r_{r1}^2}{R_{fL} - (R_{ds} + r_{r1})} - \frac{4r_{r1}^2}{R_{fL}' - (R_{ds} + r_{r1})} - 3r_{r1} \right\} \\ x_{2l} &= \left(\frac{X_{fL} - 2X_{fL}'}{R_{fL}' - R_{fL}} \right) (r_{r1} + r_{r2}) \\ x_l &= \frac{1}{2} \left\{ X_{fL} - \frac{r_{r1}^2 x_{2l}}{(r_{r2} + r_{r2})^2 + x_{2l}^2} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

以上のように、第2章で展開した理論に対応する全ての定数を精度良く求める方法が明確となった。

4. 試作機と諸特性

<4.1> 試作機の設計仕様⁽⁸⁾

二重かご形 CRM の試作機は5台であり、いずれも4極、100V、750W、60Hz である。その設計仕様を表1に、回転子スロット形状の一例を図6に示す。

定格時の運転特性を損じないように、基準にした普通かご形 CRM の回転子スロット総断面積と二重かご形 CRM の下層スロット総断面積

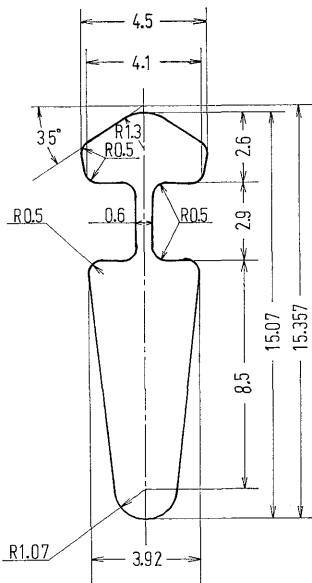


図6 TYPE-D の回転子スロット形状

表1 試作機の設計仕様

機種 仕様	普通 かご形	二重かご形				
		TYP E-A	TYP E-B	TYP E-C	TYP E-D	TYP E-E
固定子スロット数	36	36				
回転子スロット数	44	30				
上層スロット断面積 (mm ²)	19.06	7.71	10.4	9.0	7.71	
スリット部断面積 (mm ²)		3.85	2.30	1.78	1.96	2.02
下層スロット断面積 (mm ²)		27.7				
スリット幅(mm)		1.1	0.8	0.6		

積とが等しくなるように設計してある。以下、試作機を表1のタイプで表す。

<4.2> 始動特性⁽⁸⁾

図7は代表例として TYPE-D に対する滑りートルク特性を示したものである。機械損も直記してあるので理論的軸トルクは両曲線間の幅に相当する。また、前章の

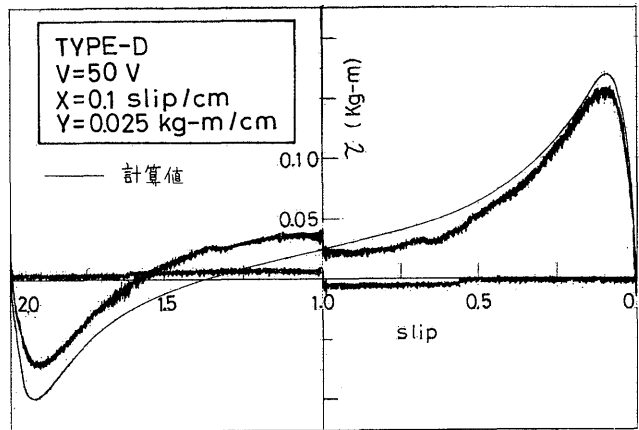


図7 滑りートルク特性 (TYPE-D)

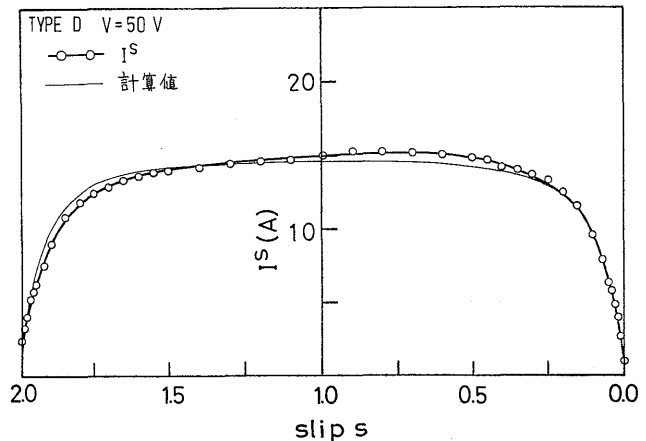


図8 滑りー線電流特性 (TYPE-D)

定数決定法で求めた定数を用いて特性算定した結果も示してある。遠心力スイッチを取り付けてあったため、 $s=0.5\sim 1.5$ 付近で機械損が若干増えている。

実測値と特性算定値との間に若干の差異が認められるが、これは主として漂遊トルクが原因であると考えられる。

図8は滑り一電流特性を示したものであり、実測値と特性算定値とが滑りの広い範囲で良好な一致を示している。

図9は基準とした普通かご形 CRM の始動トルク τ_{st} 、始動電流 I_{st} および最大トルク τ_{max} を100%とした場合の各試作機の特性の実測による比較を示したものである。

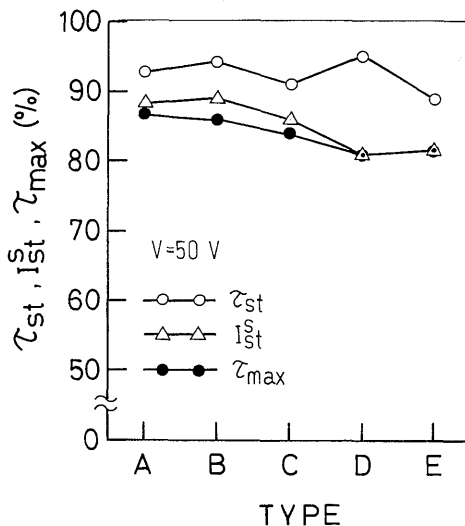


図9 始動特性の比較

図9から、普通かご形 CRM と比較した場合、試作機の特性は大略次のようであった。

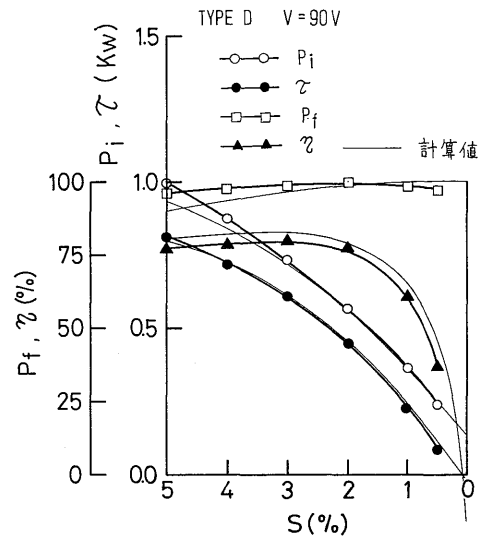
- (1) 始動電流の大幅な減少
- (2) 始動トルクの若干の低下
- (3) 最大トルクの大幅な低下

このように普通かご形 CRM と比較した場合、試作機の始動特性を改善するには至らなかったが、TYPE-D の設計においては約5%の始動トルクの低下で、始動電流を約20%も減少させ得ることが明らかとなった。

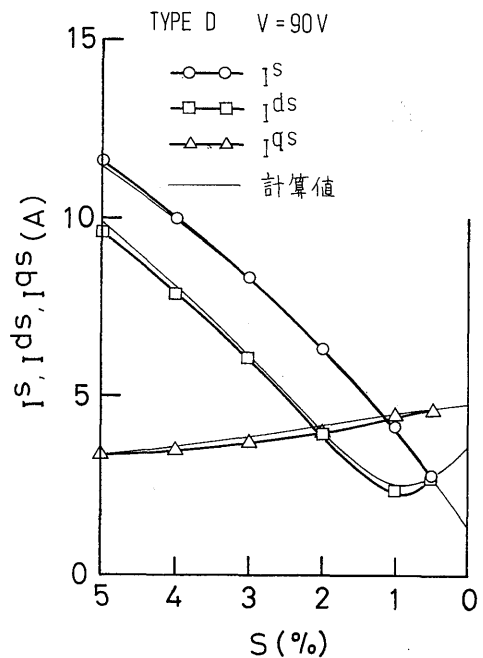
〈4.3〉 運転特性

図10は TYPE-D に対する運転特性を示したものである。

図中において計算値も示してあるが、各諸量とも実測値と比較した場合、良好な一致が見られる。但し、試験



(a)



(b)

図10 運転特性 (TYPE-D)

装置の都合上、電圧を90Vとしてあるので、以下の検討においては定格出力 $P_o=607.5W$ ($0.9^2 \times 750W$) であるとして検討する。

図11は定格出力時における諸特性の比較を示したものである。

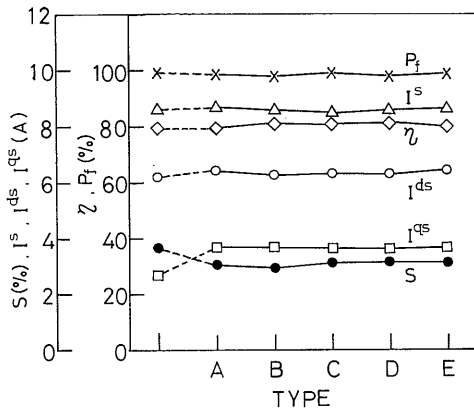


図11 定格出力時の特性比較

前述のように、運転時の特性をほぼ同一にするように回転子を設計したため、普通かご形 CRM とほぼ同等の特性が得られているが、特徴は次のようである。

- (1) 定格出力時の滑りの減少
- (2) 補助巻線電流の大幅な増加

滑りの減少は二重かご形にしたため、等価回転子断面積が増え、等価二次抵抗の減少によるものと考えられ、効率 η は改善される傾向にある。補助巻線電流の増加は二次側の定数が異なるため平衡運転条件が変化したためと考えられる。

5. 特性改善に対する考察⁽⁹⁾

ここでは試作機 TYPE-D の設計仕様を基準にし、二重かご形 CRM の回転子上層巻線抵抗および下層漏れリアクタンス（スリット幅に依存する）の特性に及ぼす影響を検討し、特性の改善の可能性を明らかにする。

いま、 K_r および K_X を

$$\left. \begin{aligned} K_r &= \frac{\text{仮定計算の回転子上層巻線抵抗}}{\text{TYPE-Dの回転子上層巻線抵抗}} \\ K_X &= \frac{\text{仮定計算の回転子下層巻線漏れリアクタンス}}{\text{TYPE-Dの回転子下層巻線漏れリアクタンス}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

のように定義する。この K_r を大きくすることは回転子上層スロット断面積を小さくすることを意味し、 K_X を大きくすることはスリット幅を狭めることを意味する。

図12～図16 は K_r および K_X を変化させた場合、それらが諸特性に及ぼす影響を示したものであり、図16を除いて TYPE-D の特性を 100 % としてある。

これらの検討で以下の事柄が明らかになった。

(1) τ_{st} は K_X を大きくすることにより増加させ得るが、 K_X が一定であれば K_r の値を適切な値に選ぶことによって最大値を得ることができる。

(2) I_{st}^s , τ_{max} はほぼ同様な傾向を有し、 K_X および

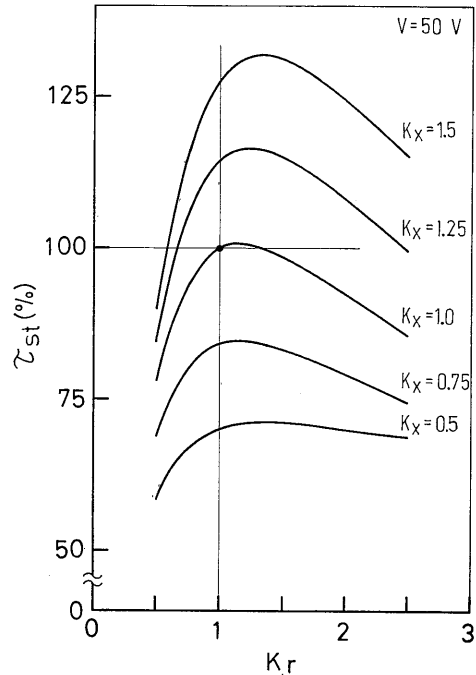


図12 τ_{st} と K_r および K_X との関係

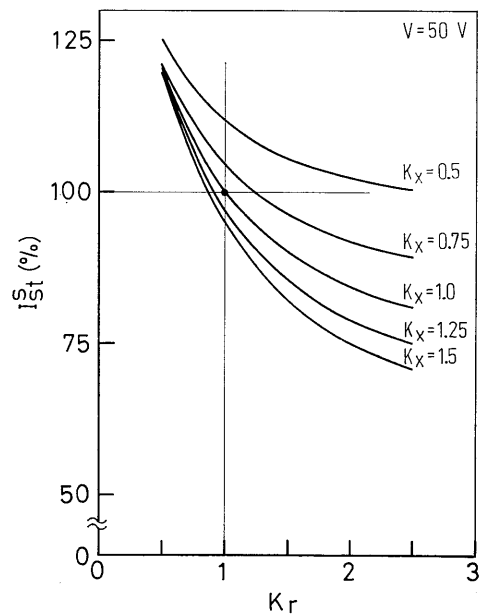
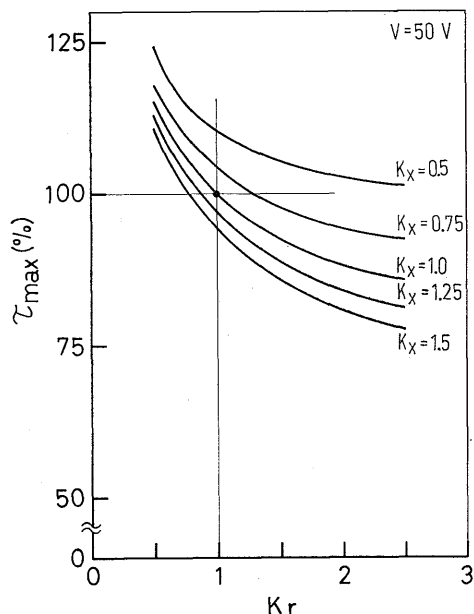
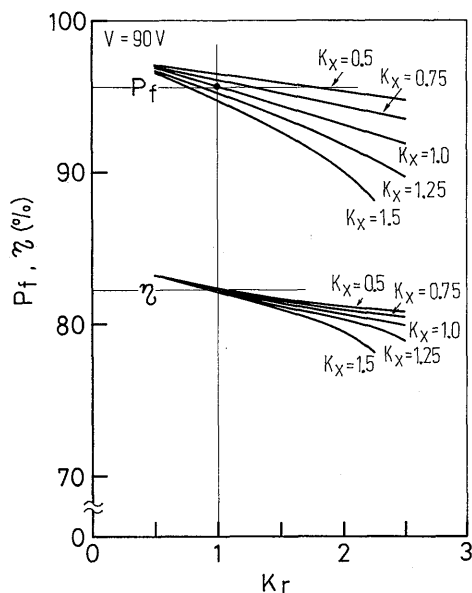
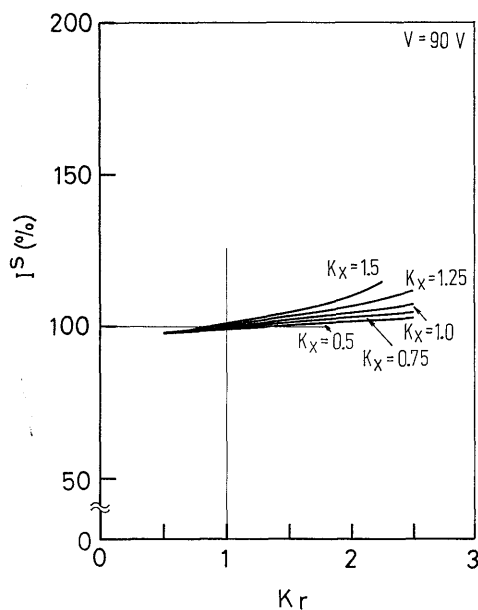


図13 I_{st}^s と K_r および K_X との関係

図14 τ_{max} と K_r および K_X との関係図16 定格出力時の pf および η と K_r および K_X との関係図15 定格出力時の I_s と K_r および K_X との関係

K_r の増大とともに減少する。(図9においても I_{st}^s と τ_{max} はほぼ同様な傾向を示している。)

(3) 定格出力時の I_s は K_r および K_X の増大とともに増加する。

(4) η および pf は K_r および K_X の増大とともに低下する。

従って、 τ_{st} を除いて K_r と K_X の特性に及ぼす影響は大小の差はあるがほぼ同様な傾向を有していることが明らかとなり、 η と pf とを低下させず、しかも τ_{max} の大幅な低下を招くこともなく、 τ_{st} を増加させ、 I_{st}^s を減ずることは極めて難しいと結論づけられた。しかしながら、 τ_{st} の低下割合に比べて I_{st}^s の減少割合が著しく大であるため、特に r_{r1} の値に配慮すれば用途によって有用となり得る。

以上のように、二重かご形 CRM の設計に対する基礎的資料が得られた。

6. 結 言

本論文は始動特性改善の手段として二重かご形コンデンサ電動機を試作し、その解析理論を展開するとともに種々の検討を行ない、その特性を明確にしたものである。

その結果、単相電動機であるため正相分のみでなく逆相分も存在するため、三相 IM のように始動特性を大幅に改善することは不可能であることが明確になった。し

かしながら、始動トルクの低下割合に較べて始動電流を大幅に減少させ得ることも明確になり、例えば電圧を若干高い値にするとか固定子巻線の設計に配慮すれば、同一始動トルクの条件下で始動電流を大幅に減少させ得るので用途によっては有用であることが明らかとなった。

終わりに、本研究に対し種々のご討論、ご配慮を賜った中部工業大学教授・加藤邦弘先生、アイチ・エマソン電機設計部長・上堀良弘氏、同設計課・宇佐美和彦氏および矢野洋氏に深甚なる感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 坪井：「コンデンサ電動機の回転磁界の形と平衡運転条件」，中部工業大学紀要，**12**—A，37（昭51—12）
- (2) 坪井：「固定子鉄損を考慮した分相形単相誘導電動機の解析」，電学論B，**94**，6，287（昭49—6）
- (3) 加藤，坪井：「分相形単相誘導電動機の解析の一方法」，電学論B，**93**，2，60（昭48—2）
- (4) 尾本，天池：「非対称固定子巻線誘導電動機の解析と巻線対称軸に就いて」，電工論 **2**，46（昭25—1）
- (5) 加藤，矢野他：「等価回路による二重かご形多相誘導電動機の特 性算定の一方法」，電学誌，**73**，9，38（昭28—9）
- (6) 坪井，宇佐美，坂柳：「単相二重かご形コンデンサ電動機の解析」，昭54電気関係学会東海支部連大，155（昭54—10）
- (7) C.G.Veinott：“Fractional- and Subfractional-Horsepower Electric Motor” Book (3rd. Edn.)，398（1970）
- (8) 坪井，宇佐美，坂柳：「単相二重かご形コンデンサ電動機の試作と始動特性の実験的検討」，昭55電気関係学会東海支部連大，169（昭55—10）
- (9) 坪井，宇佐美，坂柳：「単相二重かご形コンデンサ電動機の回転子上層抵抗及びスリット幅の特性に及ぼす影響」昭55電気関係学会東海支部連大，170（昭55—10）