

特殊同期電動機の諸特性

猪上憲治, 柳茂忠

The Characteristic Of A Special Synchronous Motor

By Kenji INOUE and Shigetada SAKAKI

In this paper, we describe an experimental study of the characteristics of a special synchronous motor which is operated by the thyristor inverter source.

The starting winding and damper winding of this motor are the cylindrical solid iron which fix on the surface of the magnetic poles. Starting torque and damping torque is produced by the interaction of the revolving magnetic field and eddy-current in the cylindrical solid iron.

We confirm experimentally that the characteristics of this motor is greater than the characteristics of synchronous motor with squirrel cage for starting and damping duty, when they are operated by the thyristor inverter source.

(1) 緒言

著者等は、突極回転界磁形同期電動機の始動特性の改善および制動効果の増大をはかる研究において、かご形始動・制動巻線のかわりに、磁極頭部の表面に厚さ3 [mm] の円筒状鉄塊を取り付けた試作同期電動機(特殊同期電動機)を製作し実験した結果、良好な特性を得たことをすでに報告¹⁾した。

このたび、特殊同期電動機をサイリスタインバータ電源で駆動し実験した結果、本機を正弦波交流電源で駆動した場合の諸特性と殆んど差異がないことが明らかになったので報告する。

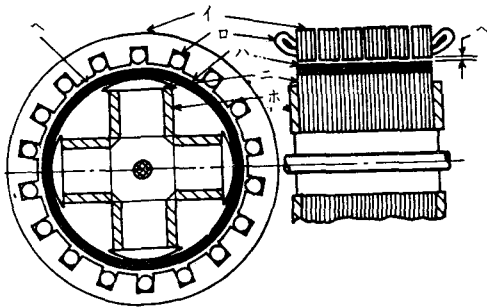
現在、精密な速度制御が必要である同期電動機の駆動電源装置として、サイリスタインバータが使用し始められた。一般の突極形同期電動機をサイリスタインバータ電源で駆動した場合、矩形波電圧および突極構造などの原因によって電流・磁束がひずみ、高調波成

分が増大して諸特性が低下する。しかし、著者が試作した特殊同期電動機をサイリスタインバータ電源で駆動した結果、諸特性の低下は殆んどない。

(2) 特殊同期電動機およびサイリスタインバータの概要

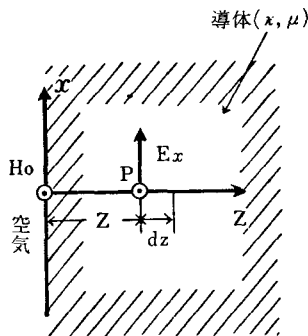
試作した特殊同期電動機の構造は第1図のようであり、突極磁極の表面に始動・制動巻線として厚さ3 [mm] の円筒状鉄塊を取り付けている。即ち、試作電動機の意図するところは、一般の同期電動機と異なり、始動トルクを円筒状鉄塊で発生させ、始動電流の減少および始動電流に対する始動トルクの割合の増加をはかるにある。なお、試作機の円筒状鉄塊の厚さおよび始動電流は、次の一般的な電磁理論式に基づく。

第2図において、電界の強さを x 成分の \vec{E}_x のみ、磁界の強さを y 成分の \vec{H}_y のみとすれば、マックスウェルの電磁界方程式により



- (イ) 固定子鉄心
- (ロ) 電機子巻線
- (ハ) ソリッド形始動巻線及び制動巻線（円筒状鉄塊）
- (ニ) 磁極鉄心
- (ホ) 界磁巻線
- (ヘ) 空隙

第1図 試作機の構造



第2図 電磁界の浸透説明図

$$\left. \begin{aligned} i_x = \kappa \dot{E}_x = -\frac{d\dot{H}_y}{dZ} \quad [\text{A/m}^2] \\ -j\omega\mu\dot{H}_y = \frac{d\dot{E}_x}{dZ} \quad [\text{V/m}^2] \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

となる。(1)式より \dot{E}_x を消去すれば

$$\frac{d^2\dot{H}_y}{dZ^2} - j\omega\mu\kappa\dot{H}_y = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

を得る。この解は、 $\dot{H}_y = A\epsilon^{-mz}$ とおき、 $m^2 - j\omega\mu\kappa = 0$ を解いて $m = \sqrt{j\omega\mu\kappa}$ を得る。 $\sqrt{j} = \frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}}$ を用いて $m = \left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}} + j\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}} = \alpha + j\beta$ となる。 m は伝播定数、 α は減衰定数、 β は位相定数である。そして、 $\delta = \left(\frac{1}{\omega\mu\kappa}\right)^{\frac{1}{2}}$ を電磁界の浸透度という。即ち、試作機の円筒状鉄塊の厚さ3 [mm] は、この浸透度と回転子の慣性モーメントとを考慮して決定したものである。

また、未定係数Aは、初期条件 $Z=0$ における $\dot{H}_y = \dot{H}_0$ であることから $A = \dot{H}_0$ とすれば

$$\dot{H}_y = \dot{H}_0 \epsilon^{-\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z} \times \epsilon^{-j\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z} \quad [\text{A/m}]$$

となる。故に電流密度 i_x は(1)式により

$$\begin{aligned} i_x = \kappa \dot{E}_x = -\frac{d\dot{H}_y}{dZ} &= (j\omega\mu\kappa)^{\frac{1}{2}} \dot{H}_0 \epsilon^{-\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z} \\ &= (\omega\mu\kappa)^{\frac{1}{2}} \dot{H}_0 \epsilon^{-\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z} \\ &\quad \times \epsilon^{-j\left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z + j\frac{\pi}{4}} \quad [\text{A/m}^2] \\ &= (\omega\mu\kappa)^{\frac{1}{2}} \dot{H}_0 \sinh \left\{ \left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z \right\} \sin \left\{ \omega t \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1}{2}\omega\mu\kappa\right)^{\frac{1}{2}}Z + \frac{\pi}{4} \right\} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

となる。即ち、概念的に導電率 κ の小さい鉄塊を用いることによって試作機の始動電流を小におよび力率を大にすることができ、始動電流に対する始動トルクの割合を大きくすることができる。

試作同期電動機の定格は、3相、60 [Hz]、4極、入力電圧200 [V] で、力率100 [%] において入力電流7.5 [A]、出力2.2 [kW] である。なお、諸特性の比較を行なうためのかご形始動巻線付同期電動機の定格は、3相、4極、入力電圧100 [V] で、力率100 [%] において入力電流3.7 [A]、出力450 [W] である。

サイリスタインバータは、3相180°通電方式で、定格は可変電圧0~500 [V]、可変周波数0~150 [Hz]、電流80 [A] (80 [A] はサイリスタの定格で実質的にはインダクタンスコイルの10 [A] が出力電流の定格である)、出力5 [kW] である。

(3) 実験結果及び検討

3相サイリスタインバータの出力電圧波形は矩形波であり180°通電方式の電圧波形をフーリエ展開すれば

$$e = \frac{2\sqrt{3}E}{\pi} \left[\sin\theta + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{6n-1} \sin(6n-1)\theta + \frac{1}{6n+1} \sin(6n+1)\theta \right\} \right]$$

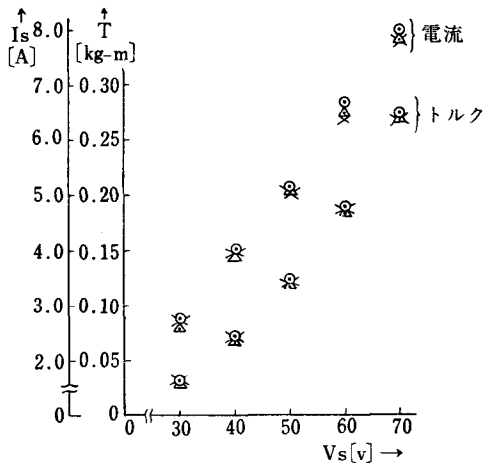
となる。いま $n=1$ で考えると、第5調波は逆相電圧、第7調波は正相電圧で、基本波との振幅比はそれぞれ1/5、1/7である。一般に同期電動機の同期トルクおよび非同期トルクは、基本波、第5調波、第7調波の電圧をそれぞれ別個に電動機に供給した場合のトルクの合成として求めることができる。文献²⁾によると、突極形同期電動機の内同期トルクは基本波電圧によるトルクで定まり、第5調波電圧および第7調波電圧によるトルクは無視できるほど小さいとされている。ま

た、同期運転状態の場合は、第5調波逆相電圧による非同期性トルクが基本波電圧によるトルクの15〔%〕程度になるので無視できないとされている。以上の事項を観点とし検討を行なう。

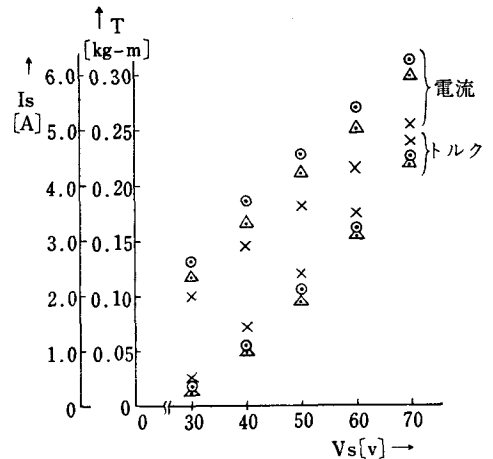
1) 始動特性

第3、第4図は特殊同期電動機（以下ソリッド形と称する）の始動特性で、第5、第6図はかご形始動巻線付同期電動機（以下かご形と称する）の始動特性である。図中の◎印、▲印、×印は、回転子の始動位置をそれぞれ30°づつ異ならして始動した時の特性を示す。ソリッド形、かご形両機とも矩形波電圧を加えた場合、正弦波電圧を加えた場合より始動電流および始

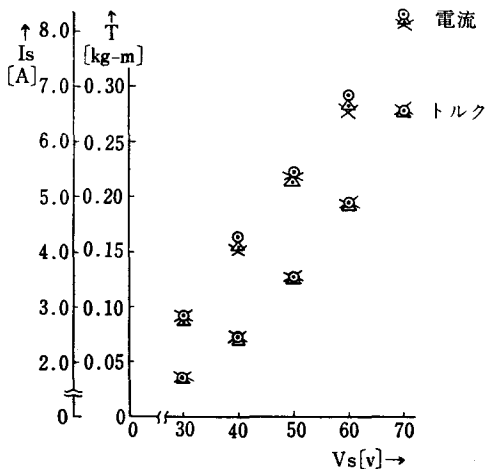
動トルクが減少する。この現象は、矩形波電圧が高調波電圧成分を含むためと考えている。しかし、ソリッド形の始動トルクは殆んど等しいと見做せうるほどのわずかな減少である。このことは、鉄塊内の電流・磁束分布などに基因するものではないかと考えている。また、かご形機は、磁極が分割されているので回転子の始動位置によって瞬時の磁束分布および電流分布が異なり、したがって回転子位置の相異によって始動電流および始動トルクに異なりが生じる。ソリッド形機の始動電流および始動トルクは、始動時の磁束分布および電流分布が大部分鉄塊内に存在するので、回転子の位置に関係なくほとんど一定である。



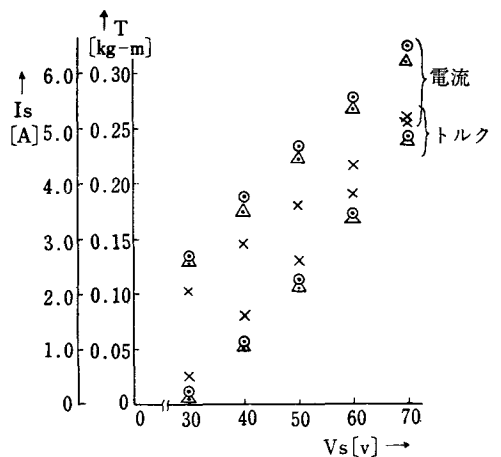
第3図 ソリッド形同期電動機に矩形波電圧を供給した場合の始動特性



第5図 かご形同期電動機に矩形波電圧を供給した場合の始動特性



第4図 ソリッド形同期電動機に正弦波電圧を供給した場合の始動特性



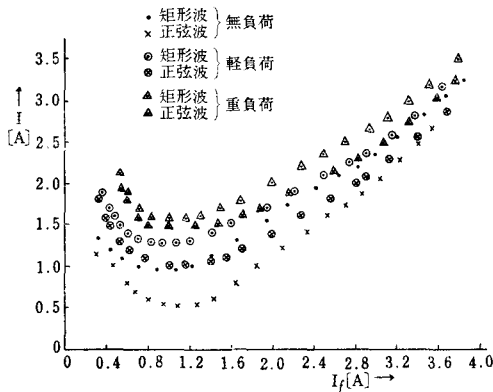
第6図 かご形同期電動機に正弦波電圧を供給した場合の始動特性

II) V特性および負荷特性

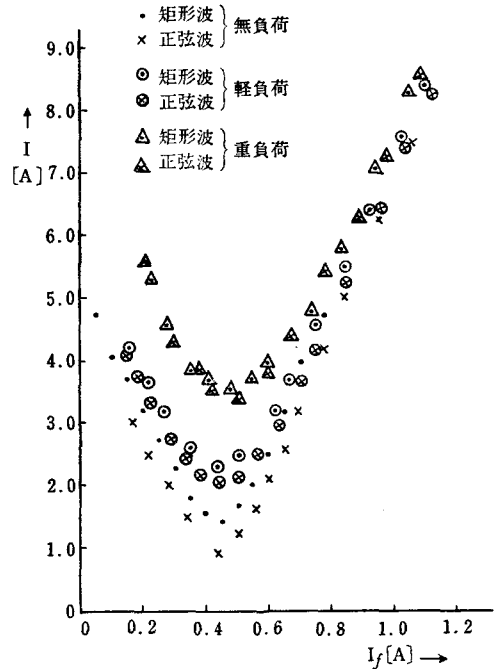
ソリッド形機、かご形機の両機ともV特性試験および負荷試験の定格電圧は、サイリスタインバータの電流容量の関係で $V=100$ [V]とした。

第7図および第8図において、出力一定で力率一定の場合、矩形波電圧を供給した場合のV特性の電流値は正弦波電圧のときよりは大きい。このことは、矩形波電圧は第5調波逆相電圧を含むため、正弦波電圧を供給した場合より、出力一定のときは電流が必然的に大きくなるのである。また、同一力率で、負荷を増大することによって矩形波電圧を供給したときの電流値と、正弦波電圧を供給したときの電流値との差は、減少している。これは、第9、10、11図で明らかなように、負荷を増せば電流波形のひずみが是正され高調波成分の基本波に対する割合が減少することによるものである。なお、ソリッド形機とかご形機において、矩形波電圧と正弦波電圧を供給したときのそれぞれの電流値の差の定格電流に対する割合は、ソリッド形機の方が小さい。

第12図、第13図による負荷特性の軽負荷時の出力、効率において、ソリッド形機、かご形機の両機とも正弦波電圧を供給した場合より矩形波電圧を供給した場合のほうがかなり低下している。これは、矩形波電圧が第5調波逆相電圧を含むことに基因している。また、両機とも負荷が増大するにつれて矩形波電圧の出力、効率は、正弦波電圧のそれに近づいている。これは、第9、10、11図にみられるように、負荷が増大するにつれて電流の高調波成分の基本波に対する割合が減少することによると考えられる。また、矩形波電圧を供給したときのかご形機の出力、効率は、正弦波電圧を供給した場合に比べて定格出力附近で30 [W]



第7図 かご形同期電動機のV特性



第8図 ソリッド形同期電動機のV特性



第9図 無負荷時の入力電流波形(ソリッド形同期電動機)



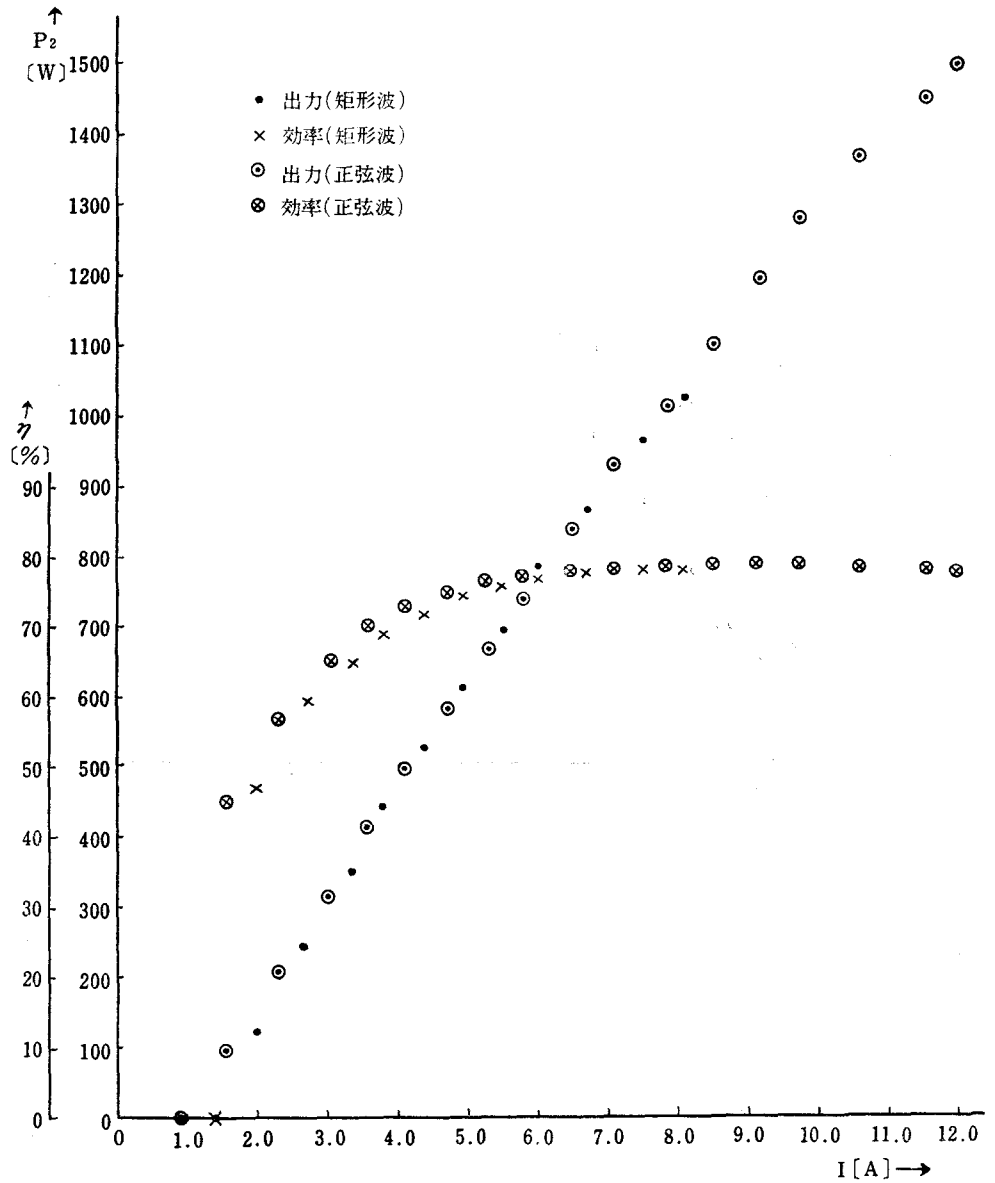
第10図 軽負荷時の入力電流波形(ソリッド形同期電動機)



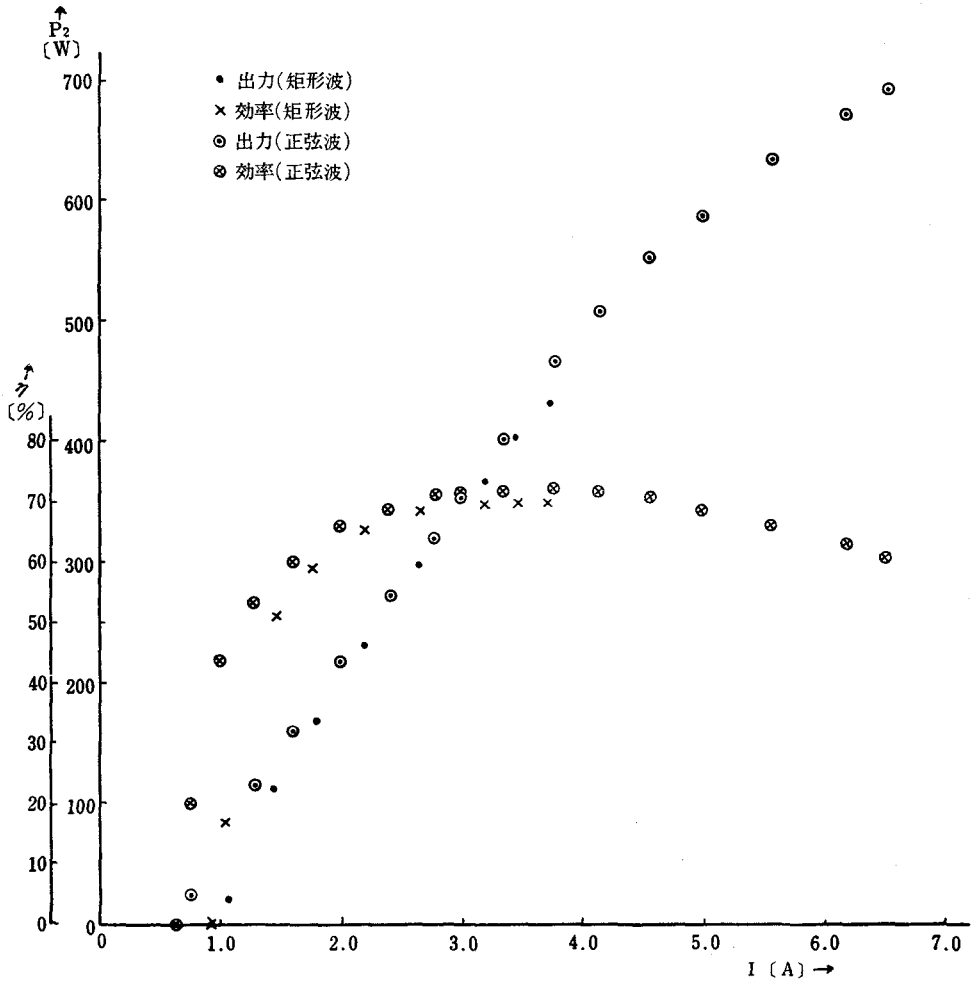
第11図 重負荷時の入力電流波形(ソリッド形同期電動機)

および2 [%]程度低い。しかし、ソリッド形機は定格出力附近で等しくなっている。

このソリッド形機の現象は、一般的に円筒状鉄塊を始動・制動巻線として使用した場合、負荷時において、高調波成分の作用により鉄塊内のうず電流損が増大し、出力、効率が低下するとされている概念を否定するものである。また、ソリッド形機の矩形波電圧時の脱出トルクにおける電流値は8.1[A]であり、定格電流7.5[A]を越えている。しかし、かご形機は3.7[A]で定格電流と同一である。



第12図 ソリッド形同期電動機の負荷特性



第13図 かが形同期電動機の負荷特性

(4) 結 言

一般的に、かが形始動・制動巻線付突極回転界磁形同期電動機をサイリスタインバータ電源（矩形波出力電圧）で駆動した場合の諸特性は、正弦波電圧電源で駆動した場合に比べて低下することが通説となっている。

このたび、かが形始動・制動巻線とは異なる円筒状鉄塊を始動・制動巻線としたいわゆるソリッド形始動・制動巻線付突極回転界磁形同期電動機（試作特殊同期電動機）をサイリスタインバータ電源で駆動した実験の結果、下記の事項が明らかとなった。

1. 回転子の始動位置に関係なく始動トルクおよび

始動電流は一定で、かつ始動効率が低い。（一般のかが形同期電動機は、磁極が分割されているので回転子の始動位置の異なりによって、それぞれ瞬時的な始動トルクおよび始動電流が異ってくる。）

2. V特性の電流値は、負荷が増大するにつれて正弦波電圧電源で駆動した場合の電流値に近づき、その差は僅少になる。特に進み力率においてこの傾向が著しい。（かが形同期電動機は、進み力率においても差は著しい。）
3. 力率 $\cos \theta = 1.0$ での負荷特性において、出力、効率は負荷が増大するにつれて正弦波電圧電源で駆動した場合の出力、効率に近づき、その差

は僅少となり定格附近では等しくなる。(かご形同期電動機は、定格附近においても差がある。)

現在、電磁界浸透度に基づき、および円筒状鉄塊の材質(透磁率 μ 、導電率 ϵ)の選定を考慮した上で、鉄塊の厚さの最適性を一段と明確にするためおよび十分な理論的解析を行なうために試作機を7機製作中である。今後、これらの試作機によって一層の実験的、理論的究明を行なう。最後に研究室の卒研究生に対し感

謝の意を表します。

(5) 参考文献

- (1) 1) 広島工大研究紀要 Vol. 7, No. 2 「特殊同期電動機の諸特性」猪上、榊
- (2) 2) 電気学会雑誌 Vol. 90, No. 11 「同期電動機の高調波トルク算定」矢野隆、菊池節夫
- (3) 「交流電機新理論」鹿井恵志、昭晃堂