

同期電動機の極間の導体棒の有無による特性の比較

加藤 邦 弘*, 坪 井 和 男*

Comparison of Characteristics of Synchronous Motors, the One having Conductor Bars between Poles and the Other without such Bars.

Kunihiro Kato* and Kazuo Tsuboi*

(Received July 31, 1971)

There is little magnetic flux between poles of salient pole synchronous motors with damper windings, so that conductor bars are usually omitted there.

But, it is shown in this study that the insertion of conductor bars between poles is recommendable to provide the path to asynchronous starting current.

Synchronous motors with conductor bars between poles are not yet in general use, and the discussion of the characteristics at asynchronous starting and under synchronous operation are not found in the literature.

Therefore, small synchronous machines (3.7kW) with similar ratings and designs were constructed, the one having conductor bars between poles and the other without such bars, then experiments and calculation were carried out to compare their characteristics.

Asynchronous starting characteristics was previously published by the authors.

Therefore, in this paper, asynchronous pull-in characteristics and static stabilities are shown.

It is confirmed from these results that the characteristics are improved by insertion of conductor bars between poles, and this fact should be given proper consideration in practice.

1. は し が き

同期電動機の特性を論ずるとき、非同期始動特性、同期引込み特性および安定度などは極めて重要な問題であり、負荷の要求などを考慮してどの点を重視し、いかなる形式の電動機を採用するかということは現在においてもなお大いに論議されているところである。

たとえば始動方式についていえば、いわゆる突極磁極頭にかご形誘導電動機の二次巻線と同様な始動巻線（制動巻線）を有するかご形始動方式、別の電動機で始動す

る方式、さらに最近多く用いられるようになったソリッドポール方式等々である。これらのうち、その経済性および特性上の点からかご形始動方式が多く採用されているが、その始動巻線の形状についてもまた大いに論議されているところである。

これら制動巻線付突極同期電動機においては従来よりその極間には磁束がほとんど通らないので極間に導体棒をそう入することは省略されてきた。

本研究は非同期始動電流の通路として極間に導体棒をそう入した方がよいことに着目したものである。この種の電動機は実用化されておらず、その特性についても論

*電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

じた文献はない。

このため、同定格かつ同一設計の小形機 (3.7kW) で従来どうり極間に導体棒を有しないものおよび極間に導体棒を有するものとを試作し、実験および計算により両者の特性を比較検討したものである。

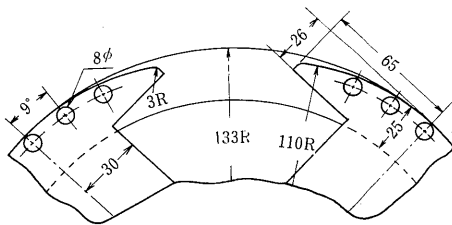
このうち、両者の非同期始動特性の比較は筆者らの発表した文献^{1)~4)}をもとに理論的に、さらに実験的に明らかにし既に発表した⁵⁾。

本論文は文献 5) と密接に関連しており、同期引込み特性および定態安定度の比較について実験を主体として論ずることとする。

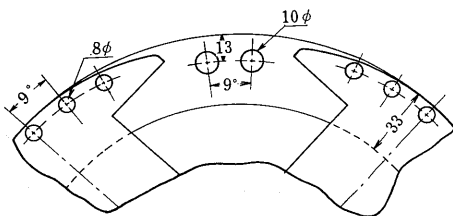
2. 試作機の構造の比較

試作した両機の設計要目は文献 5) で詳細に述べたが界磁部分の構造のみ簡単に示せば第 1 図および第 2 図のごとくである。

この極間に導体棒を有しないものと有するものとの構造上の差異は導体棒の有無および短絡環のみであり、その他は全て同一である。



第 1 図 極間に導体棒を有しない試作機の界磁部分の構造



第 2 図 極間に導体棒を有する試作機の界磁部分の構造

3. 同期引込み特性の比較

<3.1>同期引入れトルク

同期引入れトルクとは始動してほぼ同期速度に近づいたときに励磁を与え、負荷および電動機自体の慣性に打ち勝って同期にはいることができる最大負荷トルクをいい、実際に同期引込みが可能かどうかは負荷と電動機自体の慣性モーメント、直流励磁を与えるすべりおよびその瞬間の電機子回転磁極と磁極中心軸との相差角に関連

しており、この相差角が最適の状態に励磁を与えることを適位相投入という⁶⁾。

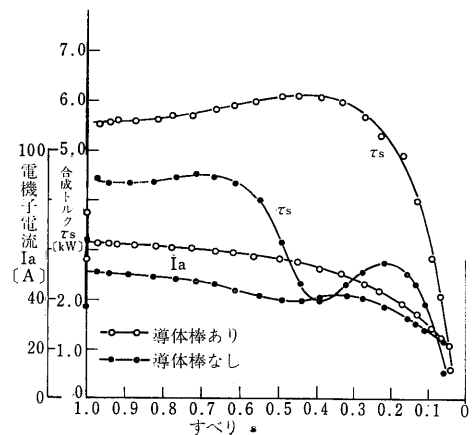
この同期引入れトルクの実測は、負荷として直流電氣動力計を使用し、供給電圧を一定に保ち、適位相投入により同期引込みが可能な負荷を数回の試行により見出し、これを種々の励磁電流について行うものとする。

ただし、適位相投入も数回の試行により見出すものとする。

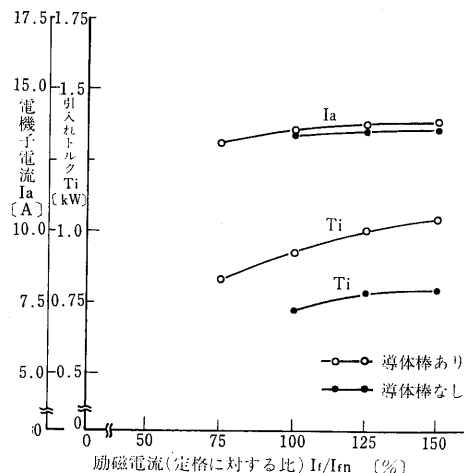
<3.2>界磁開放時の引込み特性の比較

既に発表した⁵⁾ように界磁開放始動時においては特に非同期始動特性が著しく改善される。このことは当然ながら同期引込み特性が改善できることを示唆している。

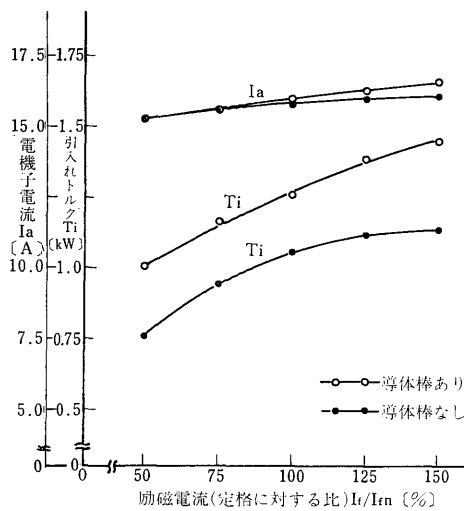
(第 3 図参照 200V 換算値)



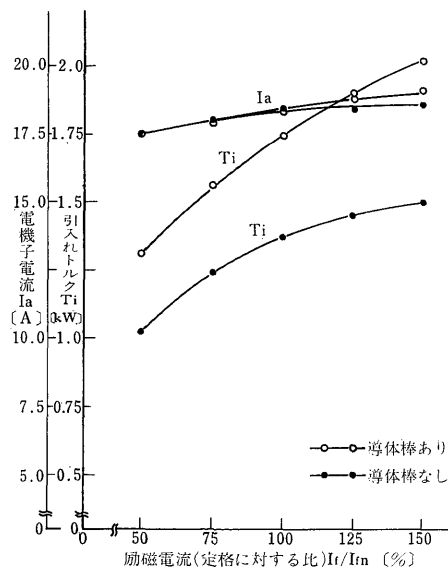
第 3 図 界磁開放始動時の電機子電流および合成トルク実測値の比較



第 4 図 界磁開放始動時の同期引込み特性の比較 (電圧=120V)



第5図 界磁開放始動時の同期引込み特性の比較 (電圧=140V)



第6図 界磁開放始動時の同期引込み特性の比較 (電圧=160V)

ここでは界磁を開放して始動した場合の特性について述べるが定格電圧 (200V) においては電機子電流が多く実測不可能であり、定格電圧より低い電圧において実測した結果を第4図～第6図に示す。図において同期引入れトルクの値は同期電動機自体の機械損に相当するものを含んでおり、単位は文献5)と同様“同期キロワット”である。また図の電機子電流はこの最大負荷時に流入する線電流の平均値であり、励磁電流は定格電流に対

する比で示してある。

なお、同期電動機および直流電気動力計との合成したはずみ車効果は減速法で約 $2.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ であった。

＜3.3＞同期引込み特性の比較に対する検討

第4図～第6図における同期引込み特性の比較において、いずれの電圧についても電機子電流はほぼ同値であるが、導体棒をそう入することにより引入れトルクが著しく増大することがわかる。このことはトルクの増加分に相当する負荷をさらに増しても同期引込みを行い得ることを示しており、導体棒をそう入するメリットは同期引込み時においても極めて大きいといえる。

なお、第4図で $I_f/I_{fn}=75\%$ で導体棒を有しないものの実測値が示していないが、これは電圧が120Vで電動機自体および負測の機械損に相当するものに対してこの励磁において導体棒を有しないものは同期引込みが不可能であることを示す。

両者の引入れトルクをその比で比較したのが等1表である。

第1表 引入れトルクの比(導体棒あり/導体棒なし)

電圧 I_f/I_{fn}	120V	140V	160V
50 %	—	133 %	128 %
75	—	123	126
100	127 %	119	127
125	127	124	131
150	131	127	135

等1表より同期引込み時においては導体棒をそう入することにより従来の機械に比較し120～135%の引入れトルクを得ることができ、少なくとも20%程度負荷を増加しても同期引込みが可能であることを示す。

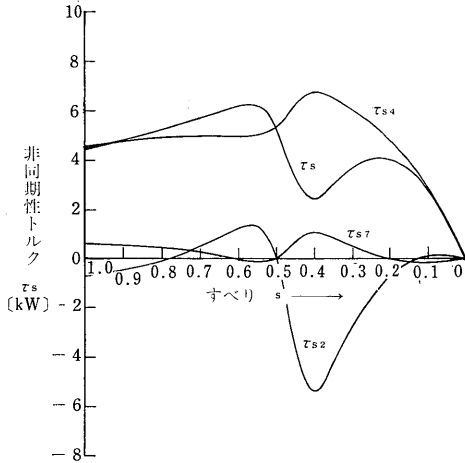
次に引入れトルクの増加の要因を非同期始動トルクの各成分を計算することにより検討する。

非同期始動トルクの各成分は文献1)より界磁開放始動時においては7成分あり、このうち時間に関係しない非振動性トルクは τ_{s2} 、 τ_{s4} および τ_{s7} の3成分である。

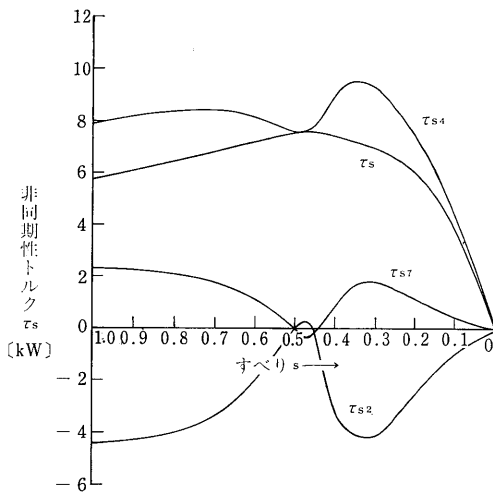
τ_{s2} は突極性のために生ずる反動トルク、 τ_{s4} は電機子正相電流と制動巻線正相電流との間に生ずる相互トルク、 τ_{s7} は電機子逆相電流と制動巻線逆相電流との間に生ずる相互トルクであり、これらの合成値 τ_s が実測値に相当するものである。

これらを文献4)にしたがい、文献5)の定数を用い

て電子計算機(FACOM 270-30)で計算した結果を第7図および第8図に示す。計算値は定格電圧に対して行ったものであり詳細は上記文献4)および5)を参照されたい。



第7図 界磁開放始動時のトルクの各成分と合成トルク計算値(導体棒なし)



第8図 界磁開放始動時のトルクの各成分と合成トルク計算値(導体棒あり)

両機とも同期引入れトルクに大きく貢献するのは τ_{s4} であることに変わりないが、導体棒をそう入ることによりこれが極めて大きな値となることがわかる。このことはそう入した導体棒が非同期始動電流を流しやすくなるために大きく働いていることを示している。

また、 τ_{s2} および τ_{s7} は同期引入れトルクには影響が少なくかつ同期引込み時には両者がお互いに打ち消す

方向に働くのでその和はさらに小さくなる。

同期引込みを行うすべりは通常0.1以下であり、すべりが0.05における引入れトルクを公称引入れトルクと称し、これを計算値より比較するためすべり0.05のトルクの各成分および電機子電流を比較したのが第2表である。

第2表 すべり0.05におけるトルクおよび電機子電流の比較(計算値)

比較事項	試作機	導体棒なし	導体棒あり
τ_{s2}		0.101 kW	-0.491 kW
τ_{s4}		1.546	2.368
τ_{s7}		-0.112	0.199
$\tau_s (= \tau_{s2} + \tau_{s4} + \tau_{s7})$		1.535	2.076
I_s		19.80	19.89
τ_s の比 (導体棒あり / 導体棒なし)		135.2%	
I_s の比 (導体棒あり / 導体棒なし)		100.5%	

第2表よりすべりが0.05における電機子電流はほとんど等しいが公称引入れトルクは導体棒を有するものが有しないものにに対し135%にもなり、実測値と同様引込み特性が著しく改善できることを示している。

4. 定態安定度の比較

<4.1>安定度

安定度には定態安定度と過渡安定度とがあり、前者を論ずるとき脱出トルクの大きさを比較するがこれはJEC114によれば“定格周波数、定格電圧および常規の励磁において同期運転ができる最大トルクをいう”と定められている⁷⁾。

周知のごとく突極同期電動機における電機子電流と負荷角との関係は(1)式、電機子抵抗を無視した負荷角と每相トルクとの関係は(2)式のごとくである⁶⁾。

$$\tan \delta = \frac{IR_a \sin \varphi_t - IX_q \cos \varphi_t}{V - IR_a \cos \varphi_t - IX_q \sin \varphi_t} \quad (1)$$

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\delta \quad (2)$$

ここで V : 端子相電圧, E : 毎相の界磁誘導電圧

δ : 負荷角, R_a : 毎相の電機子抵抗

I : 電機子電流, φ_t : 力率角

X_d : 毎相の直軸同期リアクタンス

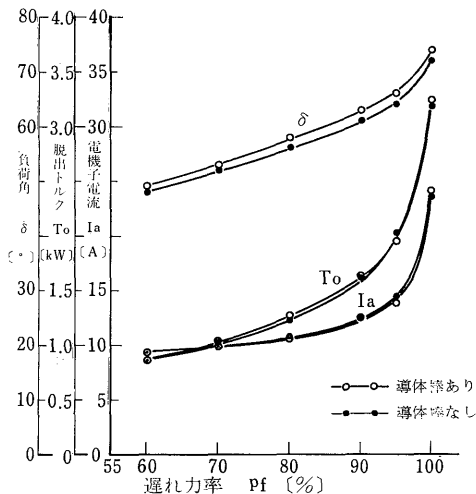
X_q : 毎相の横軸同期リアクタンス

(1)式より同一設計である極間に導体棒を有するものと有しないものとを一定電圧、一定力率にて運転させれば両機は同一負荷角で運転し、(2)式より同一トルクで運転

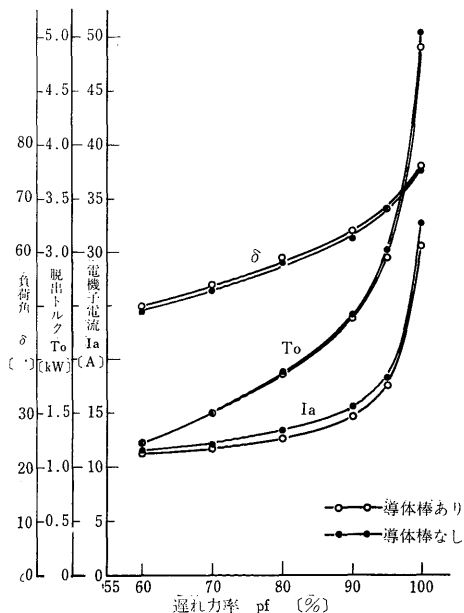
することがわかる。

しかしながら、定態安定度の比較のため脱出トルクを求める安定運転の限界状態においては厳密な意味での一定負荷は存在しないのでこのわずかな負荷変動とか電源電圧の変動により多少の動揺はさけられない。

このわずかな動揺に対して両機がいかに安定運転を継続しうるかを一定電圧のもとに脱出トルクを求めて比較するのであるが、ここでは比較的大容量機に用いられている一定力率運転とし、これを種々の力率について行うものとする。



第9図 定態安定度の比較（電圧=100V）



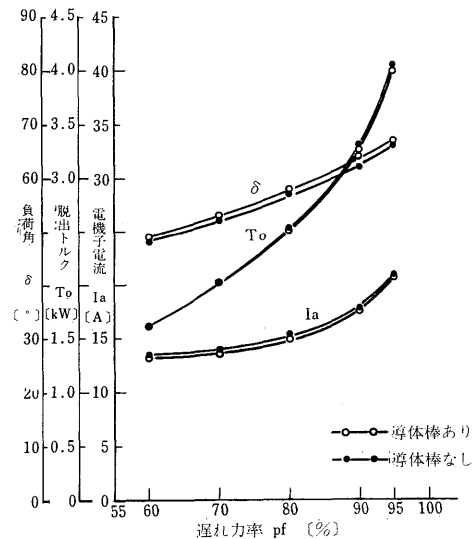
第10図 定態安定度の比較（電圧=120V）

＜4.2＞一定力率のもとでの定態安定度の比較

前述のように一定力率のもとに数回の試行により求められた両機の脱出トルク，そのときの負荷角および電機子電流をそれぞれ各電圧について第9図，第10図および第11図に示す。同期引込み試験と同様定格電圧以下で行った。

ここで注意を要するのは負荷角の0°の決定である。負荷角を正確に求めるために，一定力率における各電圧の出力—負荷角特性を測定し，これらの交わる点を負荷角0°とした。この負荷角0°と無負荷状態における負荷角との差の角度は出力—負荷角特性の機械損に相当する負荷角にほとんど等しいことが実験において確認された。

これらの図において脱出トルクの値は軸において利用できるトルクと電動機の機械損に相当するトルクの和を示していることに注意されたい。



第11図 定態安定度の比較（電圧=140V）

＜4.3＞定態安定度の比較に対する検討

両機の定態安定度を比較した第9図，第10図および第11図において，わずかではあるが脱出限界時の動揺で導体棒を有するものがどちらかといえば電機子電流は少なく，負荷角が大きいが，この程度の差異ならば全体からみて一定電圧，一定率のもとでは両機の脱出トルク，このときの電機子電流および負荷角もほとんど変化がみうけられないといえる。

したがって，両機の定態安定度はほとんど差異がなく，極間に導体棒をそう入した効果は定態安定度に対しては現われないと結論づけられる。

5. あとがき

本研究は従来どうり極間に導体棒を有しないものおよび極間に導体棒を有するものとの一連の特性比較であり、現在までに明らかとなったことは次のごとくである。

- i) 両機とも非同期始動電流は大きな差異はなく、非同期始動トルクが界磁巻線の状態に関係なく、いづれの場合も導体棒を有するものが大きく、非同期始動特性を改善できる。
- ii) 特に界磁開放にて始動する場合、著しく始動特性が改善でき、極めて円滑なる始動が可能である。
- iii) 極間に導体棒を有するものの非同期始動特性も既に発表した理論¹⁾およびそれに関する文献^{2)~4)}で実用上じゅうぶんな程度で計算でき両者とも実測値と大差ない。
- iv) 界磁を開放した状態で同期引込みを行う場合、導体棒を有するものは有しないものに対し120~135%程度の負荷を負って同期引込みが可能であり、少くとも120%の負荷ならば、後者が引込み可能な励磁の大きさである限り、これを負って同期引込みができる。
- v) 定態安定度については、電圧および力率が同一ならば両機ともほとんど差異は認められない。

以上のうち i) ~ iii) については既に発表した⁵⁾事柄であり、本論文で扱ったものは iv) および v) である。今後引き続き種々の界磁の状態での同期引込み特性、過渡安定度および振動トルクの問題さらに発電機としての

特性比較を明らかとし中形機の試作へと研究を進める予定である。

これらが産業界でも大いに論議されている同期機の特性改善の一助となれば筆者らの幸いとするところである。

本研究は本学の特別研究費の継続的援助を受けているもので特別なる配慮に対し深く感謝の意を表するものである。また、これとならび側面より援助された工学院大学教授・故尾本義一博士、本学・溝口毅、加藤他一助教授、横尾秋三講師および杉本寿治技師補に誌上を借りて厚くお礼申し上げると同時に、この研究に昭和45年度卒研学生・大島哲夫君(東海染工・KK)、大橋孝司君(KK・日立製作所)、鈴木久行君(松下精工・KK)、久保裕一君(大和ハウス工業・KK)、富田松夫君(KK・明電舎)、馬淵与市君(東京芝浦電気・KK)が大きく貢献していることを附記する。

文 献

- 1) 加藤：電学誌73, 1380 (昭28—12)
- 2) 矢野：電学誌83, 525 (昭38—4)
- 3) 加藤, 坪井：中部工大紀要5, 27 (昭44—12)
- 4) 加藤, 坪井：電学誌91, 681 (昭46—4)
- 5) 加藤, 坪井：電学誌91, 691 (昭46—4)
- 6) 電気学会：同期機(電気機器各論Ⅲ) 124 (昭45—8)
- 7) 電気学会規格調査会：J E C114同期機標準規格
- 8) 尾本, 天池：電気機械(同期機編) 233 (昭27—7)