

単相低周波用誘導子形回転機を用いた 無ブラシ無整流子電動機の構成

数 野 寛
清 弘 智 昭

(昭和52年8月31日受理)

Construction Method of Brushless and Commutatorless Motor Using Single-Phase Low-Frequency Inductor Type Machine

by Hirohi KAZUNO and Noriaki KIYOHIO

Abstract

Previously, we had tried to improve the inductor type high-frequency generator to apply to the commercial frequency range, paying attention to the fact that it is a brushless machine. It has many remarkable features in the structure compared with the ordinary rotating machine. The magnetic field acts along the axial direction. The armature coils are wound in the form of solenoid on the iron cores that are arranged in parallel along the axial direction with proper distance along the periphery of the stator. The shape of magnetic pole piece is choiced so that it can maintain easily the sufficient contrast of the sparseness and denseness of magnetic flux.

In this paper, we will explain a method of construction of a brushless and commutatorless motor which uses the low-frequency single-phase inductor machine with the series diode system thyristor bridge inverter. In this case, it is a remarkable feature to be able to eliminate the distributor which is using in the usual commutatorless motor. Instead of the distributor, the e.m.f. induced in the pilot winding, which is wound separately on the armature core, is used to detect the position of the rotor. Therefore, the position detector becomes very simply, but its function is exact under the various loads. Moreover, we will refer to a determining method of revolving direction and a counterplan to prevent rotor from falling into dead point.

1. ま え が き

回転機の無ブラシ化はメインテナンスフリーの立場から重要な問題の一つである。無ブラシ同期機の代表的なものとして、高周波発電機があげられる。これは二つに大別することができる。一つは Claw-Pole 形もしくは Lundell 形と称されるもので、多極数の突極形高周波発電機である。これを変形し極数を減じ、商用周波域で動作するよう低周波化を行い、これにサ

イリスタを適用し電動機としたものが一般に言われている無ブラシ無整流子電動機である。他の一つは誘導子形の高周波発電機であるが、この低周波化はほとんど顧みられなかった。筆者らはこれを変形し、極数を減じ、回転に伴う磁束疎密の変化を顕著にするよう磁極片や電機子の形状を工夫し、商用周波域で動作するように改めたものを既に発表した¹⁾。今回はこれにサイリスタを併用し、無ブラシ無整流子電動機を構成した所、良好な運転特性が得られたのでその方法、特

徴および構成上の問題点等について述べる。

2. 単相低周波用誘導子形回転機

Claw-Pole 形同期機は原理的には普通の突極同期機と大差ないが、界磁は静止コイルから供給され、一応 NS の双向性磁束形なるゆえ誘導子形のような单向性に比すれば磁束利用率において優れているとは言うものの、構造が複雑で特に磁路が長くなるため、比較的大きな起磁力を必要とするにもかかわらず、構造的に豊富な界磁コイルを巻くための空間確保に難があり、外形も増大し、極間の漏れ磁束も多いうらみがある。

従来一般の回転機は作用磁束が半径方向であり、電機子巻線は鉄心溝内に収められている。これに対し筆者らの提案する誘導子形回転機は軸方向に磁束を作用させる構造である。4 極単相機についての主要部の構造図を図-1 に示す。回転する円筒鉄心の端部に凸磁極と凹磁極を備え、円筒鉄心上に同心的に空隙を隔てて静止ソレノイド状コイルを配置し、ここから全極を並列に集中的に励磁する。電機子巻線は固定子枠周辺に沿って適当な間隔で軸方向に配置された鉄心入りソレ

ノイド状コイルである。電機子巻線をソレノイド状とすることにより、導体は鉄心外の低磁束密度下に置かれるので、作用電磁力も小さく保持を容易にするばかりか、放熱・絶縁および工作の点で有利である。また、界磁については、豊富な界磁起磁力を供給するに必要な界磁巻線の空間確保が比較的容易な構造である。

誘導子形回転機は本来单向性磁界を利用するため、磁束利用率の悪いのが固有の欠陥である。そこで回転に伴って生ずる磁束疎密のコントラストをできるだけ高く維持することが肝要である。凸磁極のパーミアンスを大きく、凹磁極のそれを小さくする必要がある。凸磁極のパーミアンス増大には限度があるので、凹磁極のパーミアンス減少に特に留意し、凹磁極の鉄部は欠除し、併せて回転子の質量ならびに慣性率の軽減をも考慮した。空隙に沿って磁束分布が正弦波状になるよう磁極片形状を決定し、凸磁極片および電機子鉄心は成層とした。また、電機子巻線の結線は電機子起磁力による波形ひずみを極力減ずるよう考慮した。かくして回転子は単なる鉄塊のみで構成されることとなる。非磁性体外枠としてアルミニウムを使用した。

3. 無ブラシ無整流子電動機の構成

単相低周波用誘導子形回転機は発電機として使用の場合、単相、50 Hz、4 極、1500 rpm、100 V、20 A として設計したものであり、必要に応じて複巻界磁をも併用できるようになっている。

一般の無整流子電動機においては、重要な構成要素の一つとして、回転子の位置検出装置が必要であり、普通は分配器と称するものを使用するのが一般的である。これには光電式のもの、磁気半導体を用いたもの、同調周波数変化を利用したもの等各種の方式があり、可動部は回転軸を利用して取付けられている。ところが、前述の誘導子形回転機を用いる場合には、電機子鉄心上に電機子巻線と同心的に、わずかのソレノイド状巻線を絶縁して設けることにより、誘起起電力の検出を容易に行うことができるので、これをパイロット巻線として利用するならば、誘起起電力の電圧位相より回転子位置を容易に知ることができ、複雑な回転子位置検出装置は全く不要となる。これが本無ブラシ無整流子電動機の大いなる特徴と見ることができる。

また、単相機なるがゆえに本機構成に当たっては特に考慮すべき点がいくつかある。その一つは、回転方向の決定には外部より何らかの規制を要することであり、もう一つは、回転子がいわゆるデッドポイントに

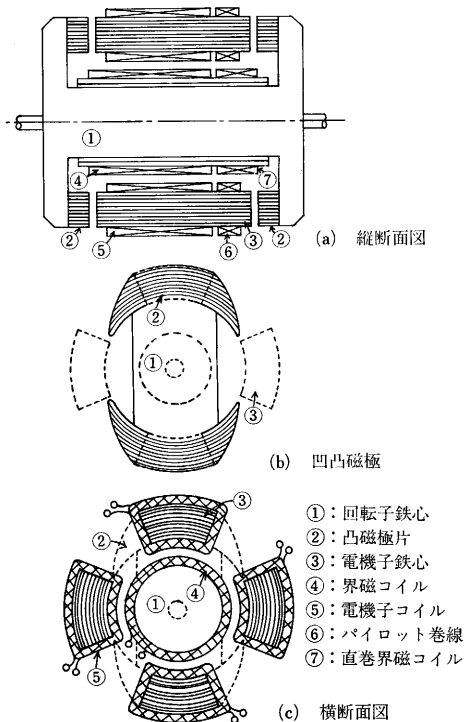


図-1 4 極単相誘導子形回転機の構造図
Fig. 1 Structural diagram of the 4-pole single-phase inductor type machine.

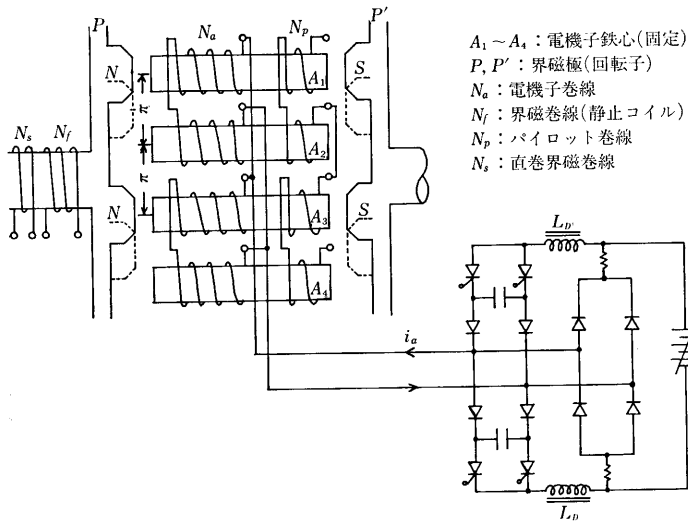


図-2 4極単相誘導子形回転機の原理図

Fig. 2 Illustrative diagram of the 4-pole single-phase inductor type machine.

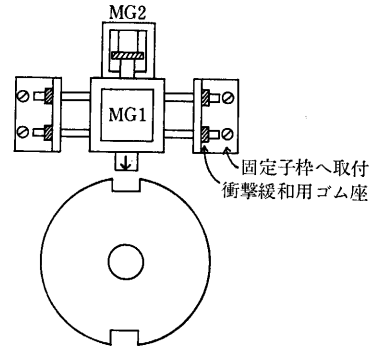


図-3 拘束停止装置

Fig. 3 Stop and lock mechanism.

位置する場合ここからの始動をどうするかである。これらの問題をまず解決してかかる必要がある。図-2に4極単相誘導子形回転機の原理図を示す。始動トルクを最大ならしめるためには、凸磁極の中心軸が電機子中心軸より電気角 90° ずれた破線のような位置から始動することが望ましい(本機は見掛け上は突極機であるが、原理的には非突極機であり¹⁾、負荷角 90° においてトルクは最大である。電気角 90° の点で始動トルクが最大になることは実験的にも確かめられる)。始動時人為的に回転子をこの点へ位置づけることは困難であるので、逆に停止時必ずこの位置で停止するよう拘束停止装置を設けた。その概要は次のとおりである。図-3に示すように、回転軸に小形円板を取り付け、その直径上の周辺対向位置に2個の切欠け溝を設け、ここへ固定子に取付けられた電磁石のプランジャーを落下させる。あるいは円板の代わりに、適当なプーリーを使用する場合はその周辺へ切欠け溝を設けてもよい。停止時プランジャーにかかる衝撃をできるだけ緩和するためには、停止寸前の極く低回転時にプランジャーを落下させる必要があり、筆者らはこの速度を約1 rpsに設定し、なおかつ電磁石の固定子取付けには衝撃緩和を考慮した。また、高速回転時停電のためプランジャーが落下すると危険であるから、この場合プランジャー落下を防止する保護リレーを設けた。かくして始動時における回転子位置が固定しているならば、正転、逆転の選択は単相ブリッジインバータの T_A, T_B' サイリスタ対へ最初にゲートパルスを入れるか、 $T_B,$

T_A' 対へ入れるかによって仕分けることができる。

図-4に制御回路のブロック構成図を示す。図は正論理で表示したものである。大まかには5つの部分からなり、

- ①は回転子位置検出部
- ②はゲートパルス発生部
- ③は始動、停止、正逆転指令部
- ④は拘束停止装置制御部
- ⑤はインバータ電源制御部

である。各部の動作ならびに相互間の関連動作を詳しく詳細に述べる。

まず、始動、停止について説明を加える。始動に先立って③の部分の正逆転設定スイッチ K_1, K_2 を望む回転方向へ設定し、⑤の部分の界磁直流電源を投入する。次に③の部分の制御電源スイッチを投入すると、フリップフロップ FF_1 はリセットされ $Q=0$ なるゆえ、これから先はすべて現状維持の状態におかれる。始動押釦を押すと、 FF_1 はセットされ $Q=1$ となり、まず⑤のサイリスタインバータへ電圧が印加される。別途この $Q=1$ なる信号を多少遅延させシュミット回路を経て信号を安定化し、後続部の動作の確実性を高かった。この信号は二つの働きを有し、一つは④の部分の FF_2 をリセットするので $\bar{Q}=1$ となり、拘束停止用の電磁石が励磁されプランジャーが拘束溝から引き上げられる。この時 FF_2 のS端子への入力シュミット回路からの信号が位相反転してAND回路に導かれるから0であり、 $\bar{Q}=1$ の動作を何ら妨げるもの

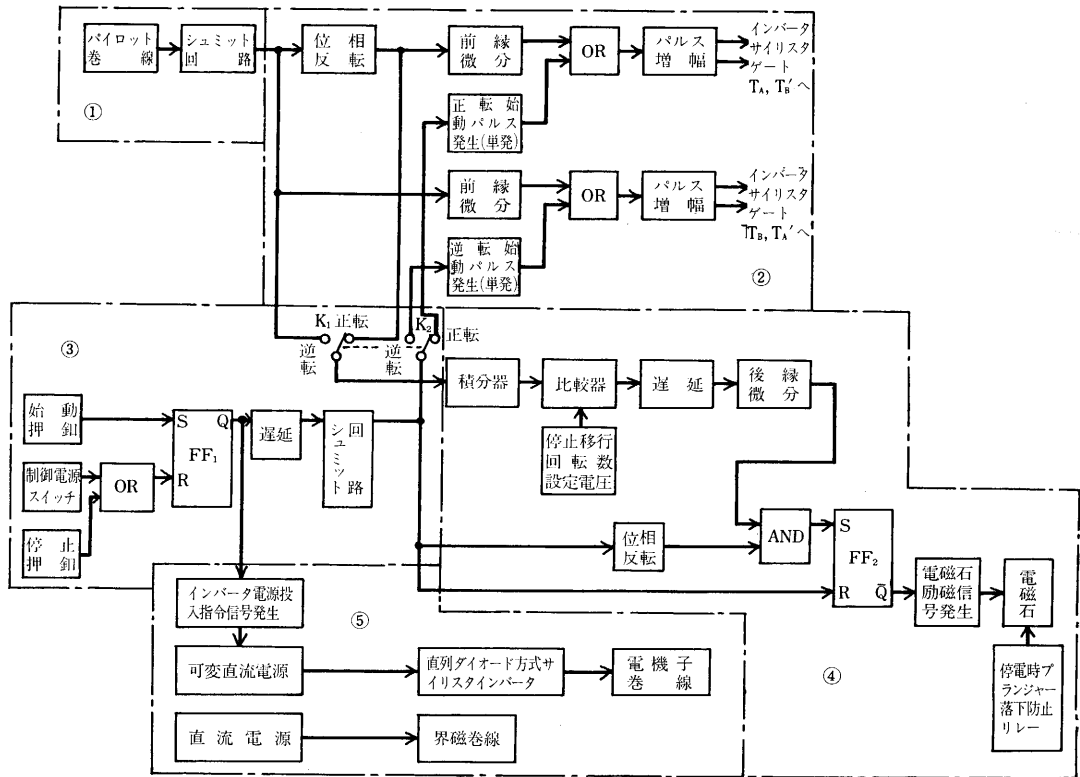


図-4 制御回路のブロック構成図
Fig. 4 Block diagram of the control circuit.

ではない。もう一つの働きとしてこの信号は正逆転スイッチの接点を経て、いずれかの始動用単発パルス発生回路の入力となり、発生パルスは増幅されて、インバータの相当するサイリスタ対のゲートへ供給され、電機子電流が流れ望む方向へ回転を始める。始動して磁極の中心軸が移動し、電機子巻線軸と重なる位置で誘起起電力は零となり、ここを境に極性を反転する。この零交差点を検出するため、①の部分で、パイロット巻線よりの出力をシュミットし、その前縁微分出力を増幅して一対のサイリスタゲートへ供給し、一方シュミットした出力を位相反転し、同じくその前縁微分出力を増幅して他の一対のサイリスタゲートへ供給する。サイリスタインバータからは誘起起電力と同期した交流出力電圧が得られ、回転子は次第に加速して定常に達する。この間低回転時は、④の部分の積分器、比較器、……等が動作し、AND 回路の一つの入力として1がはいることがあるが、もう一つの入力は1が位相反転されてはいつてくるので、AND の出力は0、したがって FF_2 はリセットのまま保持されるので、この場合は拘束停止装置が働くことはない。

次に停止する場合は、③の部分の停止押印を押すと、そこからの信号で FF_1 がリセットされ $Q=0$ となり、

まず電機子への電源が断たれ、回転子は次第に減速する。①のシュミット回路の出力を180°間にわたって積分すると、その出力は回転数の低下と共に増大する。この出力が停止へ移行の回転数設定電圧を超えると比較器より出力を生じ、それを適当に遅延させ、後縁微分出力を AND 回路へ導くと、今度は AND への他入力は1なるゆえ、AND 出力は1となり、 FF_2 はセットされ $Q=0$ となり、電磁石の励磁が断たれ、ブラシはスプリングの力によってまずディスク円板の周辺上に落ち、半回転以下で切欠け溝内に落下し、回転子を定位置に停止せしめる。

4. 回転子位置と誘起起電力位相

インバータは直流回路の平滑用リアクトルが十分なる大きさを備え定電流形であるとする。この場合流れる電流は180°通電形方形波電流となる。いま図-5において回転子の凸磁極中心が電機子中心より電気角 θ の位置にある場合、 A_1 、 A_2 電機子鉄心磁路のパーミアンスをそれぞれ

$$p_1(\theta) = P_0 + P_1 \cos \theta \quad (1)$$

$$p_2(\theta) = P_0 - P_1 \cos \theta \quad (2)$$

とすれば、電機子巻線端子1-2間の逆起電力は次の

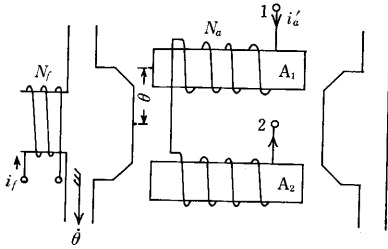


図-5 電機子誘起起電力の原理説明図

Fig. 5 Illustrative diagram about the e.m.f. in the armature winding.

ようになる。

$$\begin{aligned}
 e_a &= N_a \frac{d}{dt} \{ (N_f i_f + N_a i_a') (P_0 - P_1 \cos \theta) \} \\
 &\quad - N_a \frac{d}{dt} \{ (N_f i_f - N_a i_a') (P_0 + P_1 \cos \theta) \} \\
 &= 2P_1 N_a N_f i_f \dot{\theta} \cdot \sin \theta + 2P_0 N_a^2 \frac{di_a'}{dt} \\
 &\quad - 2P_1 N_a N_f \cos \theta \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (3)
 \end{aligned}$$

いま、 $i_f = I_f$ 一定に保たれるものとすれば、

$$e_a = 2P_1 N_a N_f I_f \dot{\theta} \cdot \sin \theta + 2P_0 N_a^2 \frac{di_a'}{dt} \quad (4)$$

$$e_{a1} \equiv 2P_1 N_a N_f I_f \dot{\theta} \cdot \sin \theta \quad (5)$$

$$e_{a2} \equiv 2P_0 N_a^2 \frac{di_a'}{dt} \quad (6)$$

となり、第1項 e_{a1} は正弦波の速度起電力である。第2項 e_{a2} は電機子電流に基因する電圧、すなわち、電機子反作用によってもたらされる電圧である。いま、 i_a' が e_{a1} と同相な180°通電形方形波電流であるとすれば、各波形は図-6(a)のようになる。もし i_a' がサイリスタブリッジにおける重なり現象のため、波形の立上り、立下り部が多少緩和されたとすれば(b)図のようになる。すなわち、電機子巻線の端子電圧 e_a の波形の零交差点は、180°通電形方形波電流を用いる限り、電流のいかんにかかわらず速度起電力 e_{a1} の零交差点と一致する(電流波形が正弦波の場合においてはこうはならず、電流が大きくなるにつれ、端子電圧波と速度起電力の零交差点間のずれは増す)。

速度起電力 e_{a1} の零交差点は磁極中心軸と電機子中心軸とが一致した点であり、電動機動作においてはこの点で電機子電流の極性を反転する必要がある。よってこの時点を検出しインバータを転流せしめればよい。パイロット巻線の誘起起電力は e_a と同相ゆえ、高感度のコンパレータを用いることにより、確実に速

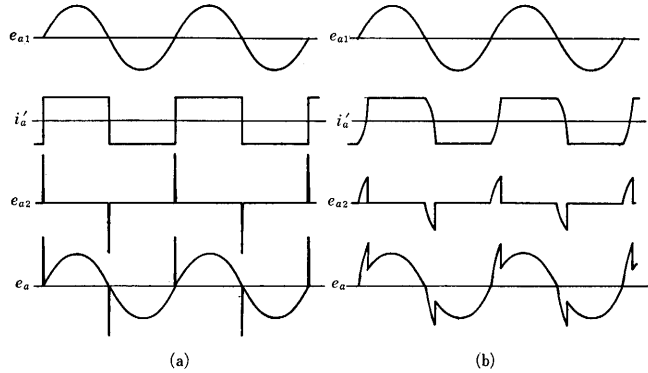


図-6 電圧、電流波の位相関係

Fig. 6 Phase relationships among voltage waves and current wave

度起電力の零交差点を検出することができ、また、パイロット巻線は電機子巻線と完全に絶縁して独立に設け易い構造となっており、制御回路構成上至って好都合である。このパイロット巻線の起電力を利用して回転子位置検出を行うのが、本機の顕著な特徴であり、他の無整流子電動機に見られるような複雑な分配器は全く不要である。

5. 実験結果

操作順序にしたがって、正逆転とも始動、停止を円滑に行うことができ、各種負荷に対し各部は満足な動作を示した。約1 rpsの低回転時に拘束停止装置が動作するので、負荷可変の場合においても、停止時の衝撃はほとんどなく、拘束停止用電磁石の固定子枠への取付けに、衝撃吸収用の硬質ゴムワッシャーを用いたことも効果的であった。要は回転子がわずかに動き始めた時のパイロット巻線のごく微小な誘起起電力の極性変化を初段のシュミット回路が感度よく検出してくれるため、このような動作が可能となったわけであり、この部分には演算増幅器を使用した。また、パイロット巻線からシュミット回路までの入力リード線にはシールド線を用い、誘導ノイズによる誤動作を防止した。

6. むすび

単相低周波用誘導子形回転機に直列ダイオード方式サイリスタブリッジを併用し、無ブラシ無整流子電動機を構成したが、前述のごとく満足な運転を行うことができた。この回転機の構造の特殊性からして、容易に電機子巻線にパイロット巻線を設けることができ、この誘起起電力位相より回転子位置を知ることができ、この電圧でインバータのゲートパルスを制御す

ることにより，基本波力率 1 の電動機動作を行うことができた。かくして，従来一般の無ブラシ無整流子電動機に用いられる複雑な分配器を廃することができたことは，この分野において画期的なこととみることができる。

Claw-Pole 形電動機に対抗する電動機として低周波用誘導子形回転機を提案したわけであるが，Claw-Pole 形と同様単に鉄塊のみが回転する別のタイプの電動機を可能にしたわけである。本機の運転特性については

また機会を改めて述べる。

最後に本研究に御協力いただいた甲府明電舎の数野氏，堀氏，本学の溝田教務員，卒業生の杉山，八木，久保田，浅井の諸氏に感謝する。

参考文献

- 1) 数野：電気学会雑誌，Vol. 93—B, No.8, p. 313～322, Aug., 1973.