マグネット内蔵誘導電動機の力率、効率特性

学生員 柴田由之 (豊田工業大)

正 員 土田縫夫 (豊田工業大)

正 員 今井孝二 (豊田工業大)

Power Factor and Efficiency Characteristics of the Induction Motor with Free Rotating Magnets

Yoshiyuki Shibata, Student Member, Nuo Tsuchida, Member, Koji Imai, Member (Toyota Technological Institute)

We have developed a unique induction motor that has free rotating magnets inside its rotor. In the experimental results of a prototype motor, we have obtained superior performance over existing motors in terms of the power factor, efficiency and output torque. The experimental details are as follows. The power factor of the test motor is significantly improved as compared with that of conventional induction motor. The power factor can be controlled to be unity, leading or lagging by changing the line frequency and/or source voltage. It is quite a unique feature, because the power factor of usual induction motor is always lagging. The improvement of the power factor becomes effective not only against the decrease of the current loss but against the decrease of voltage drop in line and the increase of installation capacity. The efficiency of the motor, over a wide output power range, is remarkably higher than that of the same size conventional induction motor. Actually, in ordinary induction motor, the efficiency is reduced as the power and/or the source voltage is decreased. However, the proposed motor is driven in the high efficiency by lower source voltage at lower range of power. The efficiency is improved by reducing the secondary current and the magnetizing current.

キーワード：誘導電動機、マグネット、高トルク、高効率、進み力率

1. まえがき

誘導電動機は構造が簡単で堅固であり、直流機、同期機に比べて価格も安く、機械的整流子やスリップリングがないため取り扱いが容易であることなど多くの特徴を有し、産業用電動機として最も多く用いられている。しかしながら、効率、力率が悪いという欠点がある。近年、電力需要は急激に増加しており、その電力消費のなかでも電動機負荷の占める割合は非常に大きく誘導機の効率を向上させることは重要な課題である。

誘導電動機では励磁のための電流を固定子側から取るので、遅れ無効電力を供給せねばならず励磁損が大きく、力率が低いことにより固定子銅損が大きく効率が低い要因となっている。効率は、力率を改善し銅損を減らすことによっても向上できる。この力率を改善することは、損失の低減だけではなく設備余力の増加、電圧降下の軽減という効果ももたらす。

誘導機の効率、力率を改善する方法は古くから研究されている⁽¹⁾。力率を改善するために進相コンデンサを利用する方法はよく行われているが、コンデンサのための重量増加、スペースが必要なことが不利であり、モータ負荷の小さい時に進み電流が流れることによる受電電圧の異常上昇を起こすという問題点がある。

また、巻線型誘導機においては二次励磁を調整することにより力率を改善できることが知られている。しかしこの場合、使用できる誘導機が巻線型であるためスリップリング、ブラシの摩耗の問題がある。また二次励磁を行うための周波数変換装置が必要となりシステムが高価となるという問題がある。

我々はロータ内部に自由に回転できるマグネットを持つ誘導機を考案し実験を行い、回転マグネットを内蔵することにより従来の誘導機に比べて停動トルクを増加できることがわかった^{(2)~(4)}。このモータは、マグネットを持つ電動機は同期電動機であるという定説と異なるユニークなモータである。今回、力率、効率について測定し、力率1また進み力率で運転可能であり、効率も大きく改善できることがわかったので報告する。力率の改善は磁化電流の減少によりもたらされ、効率の改善は二次電流と磁化電流の減少によりもたらされたことがわかった。

2. 回転マグネットを内蔵する誘導機の構造と動作

マグネット付きの誘導機の構造を図1に示す。回転磁界を作る従来と同様のステータ、中空のかご型ロータ、マグネットを貼り付けた鉄心で構成されている。この電動機はロータ内部に自由に回転できるマグネットを持ち、マグネットはロータとは独立に回転する。

よく似た構造のモータとしてかご型巻線付き永久磁石同期電動機⁽⁵⁾がある。しかしながら、かご型巻線付き永久磁石同期電動機はマグネットとかご型巻線が一体構造となっており、かご型巻線は始動時に誘導トルクを利用するためのもので基本的には同期速度で回転する。しかし回転マグネットを内蔵する誘導機ではマグネットとロータの回転速度は異っている。マグネットを配置した鉄心は同期機と同様に回転磁界と同期して回転し、出力軸とつながったロータは誘導機と同様回転磁界に対して遅れてすべりをもって回転する。つまりロータの回転よりもマグネットの回転の方が速い。

このマグネットを内蔵する構造では、トルク密度、効率を向上させることができる。なぜなら固定子歯、マグネットを磁束が通るために磁束がロータ内部まで入り込み、導体棒の深さ程度のロータ表面近くの磁束の向きはラジアル方向に整えられるからである。つまり磁束はマグネットによりロータ内部まで引き込まれるためにロータ部の磁束は径方向に向けられ、ロータの二次導体の運動方向とは直角に近い角度で交わる。直角に近い角度で交わるために、磁束と運動速度とのベクトル積、磁束と二次電流とのベクトル積が共に大きくなるのでトルク密度、効率が向上する。

3. 実験結果及び考察

市販の3相4極、200V、60Hz、400Wのかご型誘導機を改造した供試機にて実験を行った。ステータは在来型のものを利用しているため、マグネット付きと在来型の一次抵抗は同じである。ロータは内部の積層けい素鋼板をくり貫き円筒状に改造した。よって比較を行った在来型の導体棒と同じ構造、材質であり二次抵抗値もほぼ同じである。マグネットはネオジウム-鉄-ほう素磁石を使用した。今回各実験に使用した試作機の緒元は表1のようであり、これを供試機Bと呼ぶ。以前に報告した供試機⁽²⁾は供試機Bよりもロータ内径が0.1mm小さい。これを供試機Aと呼ぶ。また、ロータ内径が約0.1mm大きいものを供試機Cと呼ぶ。

(3.1) 一次電流特性 供試機Bと在来型を駆動周波数60Hzにて運転したときの電流特性を図2に示す。無負荷時、在来型は線電流-端子電圧がほぼ比例しているのに対して、マグネット付きでは同期機のV曲線に似た特性となっており端子電圧約120Vにて電流が非常に小さくなっている。これはマグネットにより磁束が供給されているために、磁化電流が0となるからである。以前に報告した供試機Aでは端子電圧140Vで電流値が極小であった。電流値が極小となるときの端子電圧の差異は、供試機Aの方が今回実験に用いた供試機Bよりもロータ、マグネット間のエアギャップが狭く、マグネットにより供給される磁束が大きいからである。

各負荷時のマグネット付きと在来型の一次電流の値を比較すると、マグネット付きの方が電流が小さくなっており少ない電流で在来型と同じトルクを出力できることがわかる。

図1 マグネット付きの誘導機の構造

Fig.1. Structure of an induction motor with free rotating magnets inside the rotor.

表1 試作機の諸元

Table 1. Main data of the test machine.

ステータ	外径	128mm
	内径	75mm
ロータ	外径	74.4mm
	内径	51.6mm
鉄心	外径	46.4mm
	内径	20mm
マグネット	厚み	2.5mm
	残留磁束密度	1.29T
	保磁力	923kA/m

図2 一次電流特性 (60Hz)

Fig.2. Line current characteristics.

(3.2) 力率特性 供試機Bと在来型について駆動周波数60Hzから90Hzの間の無負荷での端子電圧-力率角特性を図3に示す。駆動周波数または、端子電圧を変化させることによって進み力率、力率1にできることがわかる。例えば、端子電圧が150Vのときに駆動周波数60Hzでは遅れ力率であるが、90Hzでは進み力率となる。

無負荷で力率が1となるときの駆動周波数と端子電圧の関係を図4に示す。各供試機はロータ内径寸法が約0.1mm

図3 駆動周波数をパラメータとした力率角特性
(無負荷のとき)

Fig.3. Power factor characteristics with differing frequency.

図4 駆動周波数と端子電圧の関係
(無負荷、力率1のとき)

Fig.4. Frequency-terminal voltage characteristics.

ずつ違い、C、B、Aの順でマグネットによりロータに供給される磁束が大きくなっている。実験の結果、駆動周波数と端子電圧が比例していることが確認できる。また、供試機C、B、Aの順でグラフの傾きが緩やかになり、マグネットによる磁束を大きくするほど高い端子電圧で力率1での運転が可能であることがわかる。

また、マグネットによる磁束の大きさ、端子電圧、駆動周波数による力率の変化は次のように説明できる。

一般的に誘導起電力は次式で表される。

$$E = 4kfN\Phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E : 誘導起電力、 k : 波形率、 f : 駆動周波数、 N : 一次巻線数、 Φ : 磁束

以上のように、誘導機では誘導起電力とモータ端子電圧がつり合うように運転されている。マグネットを内蔵する誘導機では、磁化電流による磁束とマグネットによる磁束によって主磁束が作られているため、次式のように書き表

すことができる。

$$E = 4kfN(\Phi_{PM} + \Phi_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Φ_{PM} : マグネットによる磁束、 Φ_0 : 磁化電流による磁束

すなわち駆動周波数 f 、一次巻線数 N 、マグネットによる磁束の大きさ Φ_{PM} が大きいとき、または誘導起電力 E に相当する圧端子電圧が小さいときには、磁化電流により発生する磁束 Φ_0 は小さくてもよい。つまり磁化電流が小さくなり、無効電流が小さくなるために力率が改善される。さらに f 、 N 、 Φ_{PM} が大きいとき、または E が小さいときは磁化電流により発生する磁束がマグネットによる磁束を打ち消すような磁束となり、磁化電流は進み位相となる。

駆動周波数60Hzでの出力に対する力率特性を図5に示す。(a)が在来型、(b)がマグネット付きの供試機Bについての結果である。以後の実験結果でマグネット付きとは供試機Bのことを指す。それぞれの図の横軸が出力、縦軸が力率、実線は端子電圧をパラメータとした出力-力率特性、点線は回転速度を一定としたときの力率の変化を表している。在来型は常に遅れ力率でしか運転できていないのに対して、マグネット付きは、端子電圧100Vでは出力によらず進み力率、120Vでは力率ほぼ1、140Vでも出力の大きいところでは力率ほぼ1で運転できることがわかる。また、在来型は回転速度が一定のときは端子電圧によらず力率がほぼ一定であるのに対して、マグネット付きは端子電圧を変えることによって回転速度が一定であっても力率を制御することが可能であることがわかる。

マグネットを有する誘導機と在来型の誘導機のベクトル図を図6に示す。(a)は在来型の一般的な誘導機のベクトル図、(b)はマグネット付き誘導機で主磁束がマグネットのみで供給され磁化電流が0のとき、(c)はマグネットによる磁束がさらに大きいときのベクトル図である。在来型の誘導機では、一次負荷電流と励磁電流の合成が一次電流となり、一次電流は端子電圧よりも遅れ位相となる。しかし、マグネットを有する誘導機では、磁化電流により発生する磁束とマグネットによる磁束の合成が主磁束とな

(a) 在来型 (b) マグネット付き
図5 力率特性(60Hz)

Fig.5. Power-power factor characteristics.

(a) 在来型

 (b) マグネット付きで
磁化電流0のとき

 (c) マグネット付きでマグネット
による磁束が大きいとき

図6 ベクトル図

Fig. 6. Bector diagram.

っている。よって (b) のように主磁束がマグネットによる磁束のみで供給されているような場合には、磁化電流は不要で、一次電流は負荷電流と同一となり高力率で運転できる。さらにマグネットが強力で (c) のように、必要な主磁束よりもマグネットにより供給される磁束の方が大きく過励磁となる場合には、マグネットによる磁束を打ち消すような在来型とは逆位相の磁化電流が流れ、進み力率となる。

ここで図6中の記号は次の通りである。

マグネットによる磁束: Φ_{PM} 力率角: ϕ
 一次電圧: $\dot{V}_1$ 一次電流: $\dot{I}_1$ 磁化電流: $\dot{I}_{M1}$
 鉄損電流: $\dot{I}_{MW}$ 励磁電流: $\dot{I}_0$

一次負荷電流: $\dot{I}_1'$ 毎極の磁束: $\dot{\Phi}_m$

二次誘導起電力の一次換算値: $\dot{E}_2$

回転中の二次電圧の一次換算値: $s \dot{E}_2$

二次電流の一次換算値: $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1'$

一次誘導起電力: $\dot{E}_1 = -\dot{E}_1' = \dot{E}_2$

一次抵抗: r_1 一次漏れリアクタンス: x_1

二次抵抗の一次換算値: r_2

二次漏れリアクタンスの一次換算値: x_2

回転中の二次漏れリアクタンスの一次換算値: $s x_2$

力率1、進み力率の誘導機の意義は大きい。なぜなら力率を1とすることにより損失、電圧降下が低減し、また設備余力が増加するといった利点がある。また、需要家の使用する負荷は遅れ力率の誘導性負荷が多いため、このモータのような進み力率の負荷と併用することにより全体の力率を改善することが可能となる。

〈3.3〉 効率特性 在来型とマグネット付きの効率特性を測定した。効率 η は次式により求めた。

$$\eta = \frac{2\pi/60 n T}{\sqrt{3} V I \cos \phi} \quad (3)$$

ここに、 n : 回転数 [rpm]、 T : トルク [N・m]

V : 端子電圧 [V]、 I : 線電流 [A]、

$\cos \phi$: 力率

駆動周波数60Hz、端子電圧120V、140V、160V、200Vでの出力に対するマグネット付きと在来型誘導機の効率の変化を図7に示す。試験機の定格は400Wである。これを見ると、出力の全体にわたりマグネット付きの方が効率が大きく改善されていることがわかる。在来型では出力が下がるに従い効率が低下している。また、端子電圧が下がることによっても効率の低下が著しい。しかしマグネット付きでは、全体的に在来型よりも効率が改善できており、端子電圧200Vのときは出力が低下しても効率の低下は少ない。また低出力域では、端子電圧を下げることによって逆に効率が向上することがある。200W付近の低出力域では、在来型の効率は60%ほどであるが、マグネット付きでは端子電圧を下げるにより約90%の効率となる。つまり、端子電圧の調整により広い出力範囲で高効率運転が可能であり、注目すべき特性である。

図8に負荷トルクをパラメータとした端子電圧に対する回転数を示す。駆動周波数は60Hzであり、負荷の大きさはそれぞれ50%、100%、150%負荷トルクを示した。在来型では端子電圧が下がるに従い回転数が著しく減少してい

るのに対して、マグネット付きでは回転数の減少が小さい。またマグネット付きと在来型の、同一負荷、同一端子電圧時を比較するとマグネット付きの方が回転速度が大きい。つまり、マグネット付きでは在来型よりもすべりが小さく発生する二次電流が小さいことを示しているが、在来型と同じ負荷トルクを出力していることがわかる。これは、マグネット付きでは発生する力を効率よく使用しているためである。つまり、誘導機ではロータに発生する力は、磁束と二次電流のベクトル積で求められるが、発生する力のうちトルクとして使用できるのはロータの周方向成分だけである。マグネット付き誘導機は、マグネットにより磁束の向きを径方向に向けることにより周方向成分を大きくして、発生する力を効率良くトルクとして利用していると考えられる。

効率が向上した理由を考察するために、一次電流ベクトル軌跡を調べた結果を図9に示す。これは実験により求めた力率角と一次電流値から作図した。駆動周波数は60Hzである。縦軸は有効電流、横軸は無効電流である。本来、

図7 効率特性 (60Hz)

Fig.7. Efficiency characteristics.

図8 端子電圧-回転数特性 (60Hz)

Fig.8. Characteristics of rotating speed.

(a) 在来型

(b) マグネット付き

図9 一次電流ベクトル軌跡 (60Hz)

Fig.9. Locus of the line current.

力率角は端子電圧と一次電流の位相差であるが、簡単のため漏れリアクタンスと抵抗による電圧降下を無視して、内部誘起電圧と一次電流の位相差として作図した。原点から各点を結ぶベクトルが一次電流ベクトルとなる。(a)は在来型、(b)はマグネット付きの端子電圧の変化に対する一次電流の変化を50%から200%負荷トルクまでを25%きざみで表している。この結果から、次のことがわかる。マグネット付きでは端子電圧が高いときには一次電流ベクトルが第一象限にあるが、端子電圧が下がるに従って磁化電流が減少し、50%から125%負荷トルクのときは一次電流ベクトルが第二象限にくる。端子電圧が低いときのマグネット付きの磁化電流の位相は在来型の磁化電流の位相とは逆になり、このとき進み力率となっている。次に、縦軸成分に注目する。この縦軸成分はほぼ二次電流の一次換算値に相当しているものであるが、マグネット付きの方が在来型よりも少なくなっていることがわかる。たとえば、端子電圧200V、100%負荷トルクのときのそれぞれの縦軸成

分は在来型が約1.65A、マグネット付きが約1.29Aとなっている。つまり、同じ負荷トルクであっても二次電流が減少していることがわかる。端子電圧が低いときには在来型では縦軸成分が急激に増加しているのに対して、マグネット付きではあまり増加していない。

マグネット付きの効率の改善は、線電流が減少し銅損が減ったこと、すべりが小さくなり回転速度が上昇したことによると考えられる。線電流の減少は二次電流と磁化電流の減少によるものである。在来型では二次電流、磁化電流が大きく、一次電流が大きくなるものとなり銅損が大きく効率が悪くなっていたが、マグネット付きではこれが改善できている。

二次電流の減少は次の理由による。在来型とマグネット付き誘導機では鎖交磁束不変の定理より発生磁束数は変わらない。しかし、マグネット付き誘導機では磁束が径方向に整えられているために、二次電流およびトルク発生に有効に働く磁束が増加している。磁束を有効に使っているために二次電流を誘導する磁束が大きく、在来型と同じすべりのときでも発生する二次電流はマグネット付きの方が大きい。また、磁束を有効に使っており発生する力を有効に回転力に利用できるために、二次電流が同じであっても大きなトルクを得ることができる。つまり同一負荷トルクでは在来型よりもすべりが小さく、二次電流が少なくなる。

磁化電流の減少は次の理由による。在来型の誘導機では磁束を発生するために大きな磁化電流が必要である。しかし回転マグネットを有する誘導機では、主磁束が磁化電流による磁束とマグネットによる磁束により作られており、マグネットにより磁束の一部が供給されているために、在来型よりも磁化電流が軽減できる。今回の供試機Bの場合駆動周波数60Hzで定格トルクのときには端子電圧約138Vで磁化電流が0となり、磁束はマグネットのみで供給されている。端子電圧が低いときに在来型とマグネット付きとの効率の違いが大きいのは、端子電圧が低いほど主磁束が小さくなり相対的にマグネットによる磁束が大きくなるために、より磁化電流を軽減できるからである。

4. むすび

ロータ内部に回転マグネットを内蔵する誘導機の力率、効率特性を測定し以下の結果が得られた。

- ・力率が改善でき、高力率、進み力率運転が可能であることがわかった。マグネットによる磁束の大きさ、駆動周波数、端子電圧を変えることにより高力率、進み力率運転が可能である。

- ・在来型と比較して効率が大幅に改善できた。定格出力での効率を向上できただけでなく、低出力時であっても端子電圧を変えることにより高効率運転が可能である。マグネットにより、磁化電流と二次電流が減少するために効率が向上することがわかった。

マグネットを内蔵する誘導機は、力率、効率が悪いという誘導機の欠点を克服しており、最適な制御を行うことに

より制御用モータとしても有望である。

(平成8年9月24日受付、平成9年2月17日再受付)

文 献

- (1)E. R. Laithwaite, S. B. Kuznetsov: "Natural Commutation of Current-source Thyristor Inverters by Cage-rotor Induction Machines" Proc. IEEE IAS Ann. Meet., pp897-902(1980)
- (2)柴田・土田・今井：電気学会論文誌D115巻11号
- (3)柴田・土田・今井：電気学会回転機研資、RM-95-111(平7)
- (4)Y. Shibata, N. Tsuchida, K. Imai: "Induction Motor with free Rotating Magnets in the Rotor" Proc. of the 4th Int. Workshop on Advanced Motion Control, Mie, Japan, pp559-564, 1996
- (5)大川光吉 「永久磁石回転機」総合電子出版社

柴田 由之(学生員)昭和62年名古屋工業大学卒業。同年豊田工機(株)入社。平成7年豊田工業大学工学研究科博士課程前期課程修了。現在、国内留学により豊田工業大学大学院博士後期課程在学中。平成6年論文発表賞受賞。

土田 縫夫(正員)昭和47年名古屋大学大学院博士課程満了。同大学助手、豊田工業大学助教授を経て、平成4年同大学教授。工学博士。アクチュエータ、センサ、液体誘電体物性およびその応用研究に従事。46年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会、日本ロボット学会、静電気学会、マイクロマシン研究会会員。

今井 孝二(正員)昭和27東京工業大学電気工学第一専攻(電力)卒業。同年(株)東芝入社。パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。平成2年4月豊田工業大学教授。工学博士。平成6年電気学会業績賞受賞。IEEE Fellow.