UDC 621. 313. 333. 025. 1. 045. 59
621. 3. 013. 2+621. 3. 014. 1+621. 3. 016. 1

論 文

48-B 2

リラクタンス増加くま取り極電動機の 拘束時における磁束、電流およびトルクの分布

日立製作所 大 岡 宏

1. ま え が き

くま取り極形单相誘導電動機においては、磁極のくま取り部の反対側の端部極面に段を設け、その部分の空けきを他部分の空けきよりも広くした構造がよく用いられている。この構造の電動機はリラクタンス増加くま取り極電動機と名づけられている。第1図にその構造を示す。広空けき部を設けることにより、くま取りコイルだけの場合よりも拘束時のトルクが増大するという利点がある。筆者はさきにこの電動機の解析を行ない発表したが、⁽¹⁾ 次に観点を改めて広空けき部が空けき磁束および回転子の電流に与える影響を実験によって明らかにし、それらがトルク発生現象とどのような関係にあるかを究明したいと考えた。交流電動機のトルク測定については、片木氏が回転子の一つの導体に働くトルクの空間分布を求めると複雑な特性を解

析する場合に便利ことが多いと提案している。⁽²⁾ 筆者はこの手法を参考として実験を行ない、広空けき部の有無が拘束時の磁束、電流およびトルクの空間分布に与える影響を測定した。その結果、広空けき部およびくま取りコイルが存在すれば、空けき磁束の大きさと位相が場所によって変化し、それに応じて回転子導体電流が変化して拘束トルクを発生している有様が明らかになった。ここに概要を報告する。

2. 実験の方法

〈2.1〉 実験計画 リラクタンス増加くま取り極電動機の特徴である広空けき構造は、リラクタンス始動单相誘導電動機として紹介されている。⁽³⁾ 第2図にその構造を示す。広空けき部を有する以外には单相誘導電動機に必要な始動装置がなにもないので、このままでは始動が不可能のように思われる。しかし、所定の電圧を印加すれば回転子は広空けき部から狭空けき部に向って、矢印の方向に回転する。始動トルクは弱く効率が低いので実用されていないが、单相誘導電動機の始動に関する一つの原理を示すものとして知られ

第1図 リラクタンス増加くま取り極電動機

Fig. 1. Reluctance augmented shaded pole motor.

第2図 リラクタンス始動单相誘導電動機

Fig. 2. Reluctance start single phase induction motor.

Distribution of Flux, Current and Torque on Locked Condition of Reluctance Augmented Shaded Pole Motor. By H. ÔOKA (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd)
大岡 宏：正員，日立製作所日立研究所

ている。実験にあたっては、まず、この電動機をとり上げて、広空げき部の有無によって生じる磁束、電流そしてトルクの変化を比較することにした。次に同じ電動機にくま取りコイルを施して生じる変化を測定することにした。また、回転子の導体の有無による変化を調べるために所定の回転子のほかに、それから導体をはずしたあきスロット鉄心の回転子を用意した。

〈2・2〉 空げき磁束の測定 空げき磁束は回転子表面にさぐりコイルを取り付けて測定した。さぐりコイルの形状は長方形で、その長さは回転子の導体長に等しく、幅は回転子のスロットピッチに等しくした。そしてコイル辺が歯の表面の中央に位置するように取り付けた。さぐりコイルを通過する磁束の変化に伴って発生する起電力を積分して磁束を求めた。

またそれを位相計に導いて印加電圧との間の位相角を測定した。測定にあたっては、第3図に示すように固定子の一つの磁極の極弧を、7.5度間隔で12等分し1から13まで番号を付けた。そして、ある番号の位置にさぐりコイルの中心がくるように回転子の位置を決めて固定して測定し、順次さぐりコイルの位置を移して同様の測定を行なった。このようにして拘束時における回転子表面の空げき磁束の大きさと位相に関する空間的な分布曲線を求めた。

〈2・3〉 回転子導体電流の測定 回転子の導体に流れている電流を測定する方法として、電圧降下法を用いた。⁽²⁾⁽⁴⁾ これは1個の導体の両端にリード線を固着しておき、電流が流れた場合に導体の両端に発生する電圧を測定して、その値から導体中の電流を測定しようという方法である。この供試回転子を用いて別の装置により正弦波電流に対する電圧降下の関係を測定し、まえもって校正表を作った。そして実際の測定の場合にはこの表に基づいて、測定電圧を電流値に換算した。磁束測定の場合と同様に、この場合も第3図に示した各位置にリード線付きの被測定導体を固定させ

拘束状態にしておいて電流を測定した。同時に磁束と電流との間の位相角を測定した。

3. 広空げき部の有無に関する実験

実験に使用したリラクタンス始動単相誘導電動機の仕様を第1表に示す。固定子鉄心の構造は第3図に示したとおりである。この構造から広空げき部の段を除いた均一空げきの固定子を作成し比較測定した。くま取りコイル用のスロットはないほうがよいのであるが、製作上のつごうで残しておいた。

〈3・1〉 回転子に導体がない場合の空げき磁束

はじめに導体がない回転子を用い、さぐりコイルを付けて空げき磁束を測定した。第4図に回転子表面で測定した拘束時の空げき磁束密度の分布を示す。実線は広空げき部のある場合、破線は広空げき部のない場合を示している。以下の図においてすべて同じ記号を使用するものとする。位置10、11において曲線に谷を生じているのは、第3図からわかるようにくま取りコイル用のスロットが存在しているため、これは両曲線に共通している。もし、このスロットがなかったならば、破線の波形は左右対称の台形波となるであろう。広空げき部のある場合はリラクタンスの相違の影響が位置2、3、4に明りように表われて磁束密度が減少している。そして位置5より右方においては、磁束密度が破線の場合より増加している。

第1表 リラクタンス始動電動機の仕様

Table 1. Specification of reluctance start motor.

項 目	仕 様	項 目	仕 様
電 圧	100 V	狭空げき長	0.3 mm
周 波 数	50 Hz	広空げき長	0.8 mm
極 数	4	広空げき部極弧長	26 度
回 転 子	かご形	固定子磁極全極弧長	85.6 度
回転子導体	銅バー 5φ	斜めスロット	なし
端 絡 環	銅板 0.8 mm

第3図 1極間隔にわたる位置の数

Fig. 3. Number of position over one pole pitch.

第4図 空げき磁束密度分布 (その1)

Fig. 4. Distribution of air gap flux density.

第 5 図 回転子導体の電流分布 (その 1)

Fig. 5. Distribution of rotor bar currents.

〈3・2〉 回転子導体電流 第 5 図は、固定子の各位置に対応する回転子の 1 個の導体を流れる電流の値 (実効値) を示したものである。この場合 1 磁極のポールピッチの両端すなわち位置 1 と 13 における導体を流れる電流は大きく、中央に向うにつれて小さくなって、図示のように U 字形状をして分布している。

広空げき部の有無について比較すると、位置 1 と 13 において、実線のほうが小さくなっている理由は、広空げき部を設けたことにより入力電流が増加し、一次インピーダンスによる電圧降下が大きくなり、磁極の発生磁束量が減ったためである。このことは、次式によって説明することができる。

$$V = nd\Phi/dt + I_1 Z_1 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V : 端子電圧、 I_1 : 一次電流、 Z_1 :

一次巻線のインピーダンス、 n : 一次巻回数、

Φ : 磁束

実測した結果では広空げき部がない場合の一次電流は 0.895A、広空げき部を設けた場合は 1.07A となっている。

位置 3, 4, 5 においては、実線のほうが破線をうわまわっている。この理由は第 4 図に明らかなように、リラクタンスの相違のため磁束密度の分布波形の山が全体として右のほうへずれた結果、コイルの鎖交磁束

第 2 表 一次電流

Table 2. Primary current.

	一 次 電 流 (A)	
	回転子に導体なし	回転子に導体あり
広空げき部なし	0.895	4.07
広空げき部あり	1.07	4.36

量が増加したためと考えられる。またもう一つの理由として広空げき部においては、リラクタンスの相違に原因して回転子導体に関する歯頭漏れ (ジグザグ漏れ) リアクタンスが狭空げき部よりも小さくなり電流に差を生じることが考えられる。破線の場合、位置 10 における電流がそれと対称の位置 4 の電流よりも大きく曲線に突起を作っているのは、その位置がくま取りスロットの入口になっているので、上の理由より歯頭漏れリアクタンスが小さくなったためと推測される。

〈3・3〉 回転子に導体がある場合の空げき磁束

測定結果を第 6 図に示す。固定子の一次巻線によって生じた磁束に回転子導体電流によって生じた磁束が加わって、空げきの磁束密度分布は変形し中央部が陥没している。広空げき部の影響は位置 2~4 において明らかで、それが無い場合よりも磁束密度が小さくなっている。第 7 図は印加電圧に対する空げき磁束の位相角の位置による分布を示したものである。回転子に導体がない場合、位相角は 88 度とほぼ一定であるが、⁽³⁾⁽⁵⁾ 導体を設ければ位置 2 と 12 において導体な

第 6 図 空げき磁束密度分布 (その 2)

Fig. 6. Distribution of air gap flux density.

第 7 図 空げき磁束と印加電圧との間の位相角 (その 1)

Fig. 7. Phase angle between air gap flux and supply voltage.

第 8 図 空げき磁束と回転子導体電流との位相角 (その 1)

Fig. 8. Phase angle between air gap flux and rotor bar currents.

しの場合よりも約 30 度位相の進みを示す。以下中央に向かうにつれてしだいに遅れを増して最大値に達し、図のように円弧を描いて変化している。

これらの変化はすべて回転子電流に起因している。

第 8 図は空げき磁束と回転子導体電流との間の位相角の分布を示したものである。これは第 5 章のトルク計算に使用する。図において位相角の 0 度は空げき磁束と同位相であることを意味し、横軸より上は電流の磁束に対する遅れを、下は進みを示している。

4. くま取りコイルを付けた場合の実験

同じ電動機の磁極の広空げき部の反対側にくま取りコイルを設置し、前章と同様の実験を行なった。くま取りコイルは厚さ 2mm、幅 9mm、長さ 74mm の銅板を鉄心にひと巻きしたものである。

4.1 回転子に導体がない場合の空げき磁束

はじめに導体がない鉄心を用いて測定した。空げき磁束密度を第 9 図に示す。くま取りコイルの影響は位置 10~12 に表われて、磁束密度が激減している。ただし中央部の磁束はくま取りコイルのない場合にくら

第 9 図 空げき磁束密度分布 (その 3)

Fig. 9. Distribution of air gap flux density.

第 10 図 回転子導体の電流分布 (その 2)

Fig. 10. Current distribution of rotor bars.

べて増加している。前章におけると同様に、広空げき部のある場合はない場合よりも中央部で磁束密度が増大している。

〈4.2〉 回転子導体電流 回転子導体 1 個あたりの電流の分布を第 10 図に示した。第 5 図の電流分布曲線とくらべて位置 1 と 13 における電流値が減少しているのは、くま取りコイルを設けたことによって入力電流が増加し、一次インピーダンスによる電圧降下が増えて、発生磁束量が減ったためである。次に位置 10 における電流が急増し、位置 11 と 12 の間で急に小さくなって、曲線に鋭い突起ができてることが目だつ。この現象はくま取りコイルの反作用として説明することができる。

第 11 図はくま取りコイルと回転子導体との関係位置と、それによって生じる磁束と電流との方向を示したものである。同図において界磁束を細い実線、くま取りコイル電流によって生じた磁束を 2 重線、回転子導体電流によって生じた磁束を点線の矢印で示している。いま、界磁束が図示の方向に増加しつつあると考えたとき、くま取りコイルと回転子導体によるコイルとは、その変化を妨げようとして電圧を誘起しそれぞれ図示の方向に電流を流す。その結果、生じた磁束は両者とも方向が同じであり、それぞれ、界磁束

第 11 図 くま取りコイルの位置と磁束と電流の関係

Fig. 11. Position of shading coil and relation between flux and current.

の変化に逆らうように作用している。その場合、回転子電流に対してくま取りコイルの電流はスロットの内と外とで方向が逆になっているので、その影響を受けて曲線に屈曲を生じるにいたったものである。

〈4・3〉 回転子に導体がある場合の空げき磁束

次にくま取りコイルがあり、回転子に導体がある場合の拘束時の空げき磁束密度の分布を第 12 図に示した。回転子導体電流の作用により、くま取り部の磁束がかなり大きくなっていることがわかる。また印加電圧に対する空げき磁束の位相角の分布を第 13 図に示した。くま取りコイルを設けた場合、回転子導体の影響とあいまって空げき磁束の位相角は複雑に変化している。第 14 図は空げき磁束と回転子導体電流との間の位相角を示したものである。

5. トルクの計算

以上のように測定して求めた磁束と電流を用いて、

第 12 図 空げき磁束密度分布(その 4)

Fig. 12. Distribution of air gap flux density.

第 13 図 空げき磁束と印加電圧との間の位相角(その 2)

Fig. 13. Phase angle between air gap flux and supply voltage.

回転子の 1 個の導体に働くトルクの値を算出することができる。一般に磁束密度と電流とが与えられたときのトルク T は次の式で計算できる。⁽⁶⁾

$$T = (1/9.8) 10^{-3} \gamma l B I \cos \theta \text{ (g} \cdot \text{cm)} \dots (2)$$

第 14 図 空げき磁束と回転子導体電流との間の位相角(その 2)

Fig. 14. Phase angle between air gap flux and rotor bar current.

(a)

(b)

第 15 図 回転子導体に生じるトルク

Fig. 15. Distribution of torques produced in rotor bar.

第3表 トルクの計算値と実測値との比較

Table 3. Comparison between calculated and measured value of torques.

供試機の名 称	単相誘導電動機(始動機構なし)	リラクタン ス始動単相 誘導電動機	純くま取り 極電動機	リラクタン ス増加くま 取り極電動機
くま取り部	なし	なし	あり	あり
広空げき部	なし	あり	なし	あり
1極の正トルク計算値 (g·cm)	933	1,005	1,092	1,170
1極の負トルク計算値 (g·cm)	910	705	496	360
1極の正トルク-負トルク (g·cm)	23	300	596	810
全計算トルク (g·cm)	92	1,200	2,380	3,240
実測トルク (g·cm)	0	1,160	2,300	3,200

ここに、 r : 回転子の導体群で作られる円筒の半径(cm), l : 導体の長さ(cm), B : 磁束密度(G)実効値, I : 電流(A)実効値, θ : B と I との位相角

各位置について、導体1個あたりのトルクを計算した結果を第15図に示した。(a)図の実線は、リラクタンス始動電動機の拘束トルクの分布を示し、破線は広空げき部がない場合のトルク分布を示す。トルクは位置7を境として正トルクと負トルクに分れるが、破線の場合は正負が打ち消し合って全体としてはトルクを発生しない。しかし、広空げき部を設けた場合はバランスがくずれて正トルクは負トルクより大きくなり広空げき部から狭空げき部の方向に向かって回転をはじめる。(b)図はくま取りコイルがある場合の拘束時のトルク分布図であって、実線は広空げき部のある場合破線は広空げき部がない場合のトルク分布を示している。くま取りコイルを巻くことによって、位置10~12付近に生じていた負トルクは、一転して正トルクとなり拘束時のトルクが大はばに増加している様子がわかる。広空げき部の効果は、位置3~5にわたる実線と破線との相違に表われており、拘束トルクの増加に役だっている。なお、計算によって求めた拘束トルクと実際に測定して求めた電動機全体の拘束トルクとを比較して第3表に示した。

測定にあたってはプロニーブレーキ法を用い、1機種について十数回実験をくり返してその平均値をとり、位置によるばらつきについて注意した。さらに、ヒステリシスブレーキ式動力計法によって、トルク速度曲線を描かせ、両者を併用して測定値を求めた。計算値と実測値とはほぼ一致しており、この実験法とその測定結果が妥当であることを示している。

6. 広空げき部の寸法と特性との関係

以上の実験によって、拘束時における広空げき部の作用が明白になったが、次に広空げき部の寸法を変化させた場合、それが特性に及ぼす影響を生じるかを実験例について調べてみよう。

実験に使用した電動機は、電圧100V、周波数50Hz、極数4、出力35Wの仕様を有し、くま取りコイルは1極について1個巻かれている。この電動機の広空げき部の寸法(空げき長と極弧)を変化させていくつかの供試機を作成した。各供試機の特性を比較する場合の便宜上、次の二つの係数を用いた。

空げき長係数

$$\alpha = l_a / l_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

スパン係数

$$k_{sp} = \theta_a / 180^\circ \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 l_a : 広空げき部空げき長, l_g : 基準空げき長(=狭空げき長), θ_a : 広空げき部に相当する極弧(電気角)

k_{sp} を一定とし、 α を変化させた場合のトルク特性を第16図に示した。また α を一定として k_{sp} を変化させた場合のトルク特性を第17図に示した。両図において T_s は始動トルク、 T_v はすべりが0.6付近における谷部のトルク、 T_m は最大トルク、 $T_{0.1}$ はすべりが0.1の高速時のトルクである。そして第16図における $\alpha=1$ 、第17図における $k_{sp}=0$ が広空げき部がない場合に該当している。

第16図 空げき長係数 α とトルクとの関係Fig. 16. Torques for various value of air gap length factor α .

第 17 図 スパン係数 k_{sp} とトルクとの関係
Fig. 17. Torques for various value of span factor k_{sp} .

図からわかるように、広空げき部を設ければ始動トルク、谷部のトルク、最大トルクが増加している。これらの値は α と k_{sp} の値に比例して増大しており、特に谷部のトルク T_v の増加が著しい。広空げき部は始動トルクのみでなく加速過程のトルク特性の改善に著効があることがわかる。

ただし、高速時のトルク $T_{0.1}$ は α と k_{sp} の増加に伴って減少している。また、本文では省略したが広空げき部の寸法に比例して電流と入力が増加しているので、広空げき部の寸法をむやみに大きくすることは得策ではなく適当な範囲が存在している。

広空げき部の寸法を決定する場合には、上述の 4 種類のトルクおよび電流、入力それに雑音の点なども考慮して、要求仕様に応じて最適値を選ぶことが必要である。また、この実験例ではくま取りコイルの割合を一定にして実験したが、その点と広空げき部との関連性もまた興味深い重要な課題である。紙面のついででまとめて後報したいと思う。

7. む す び

リラクタンス始動単相誘導電動機とリラクタンス増加くま取り極電動機の広空げき部が、空げき磁束分布、回転子電流分布および拘束トルクに与える影響について研究した。その方法として磁極の各位置に対応する空げき磁束、回転子導体電流およびその位相角を測定し、導体 1 個あたりのトルクを算出した。そして広空げき部のない場合、くま取りコイルのない場合との比較を行なった。また、広空げき部の寸法とトルク

との関係を実験によって求めた。一連の研究の結果、次のことが明らかになった。

(1) 広空げき部を設けると、空げき磁束密度の分布波形はひずみ、全体が狭空げき部の方向に片寄ってくる。すなわち、磁束の位置による粗密の相違が回転子の導体電流の位置による不平衡を生じ、その結果回転子周辺にトルクを発生する。(2) くま取りコイルは、その巻かれている位置の磁束を遅らせかつ変化させる。それに伴い回転子の導体電流も変化してトルクを発生する。その効果は広空げき部よりも顕著である。(3) 磁束と電流の測定値から計算して求めた回転子導体個々に発生するトルクの総計は実測の始動トルクとほぼ合致している。(4) 広空げき部の効果は始動トルクだけにとどまらず、加速過程全般にわたってトルク-速度特性が改善される。

以上の研究により、この種の電動機の拘束時におけるトルクの発生の機構がわかり、また、広空げき部の寸法とトルクとの関係についても概略が明らかになって、設計、製作上の有効な資料を得ることができた。

本論文においては、拘束時のトルク特性を主体として、広空げき部の作用の定性的な説明を行なったが、実際の設計にあたってはその寸法をどのように決めるかという点に関心の持たれるところである。第 6 章に述べた結果はそのための有効な資料であるが、前述したようにくま取りコイルとの関連性を考慮して広範囲に検討する必要がある、その点に関しては稿をあらためて詳述したいと考えている。

終わりに、この研究に対し貴重なご討論をいただいた九州大学教授 野中作太郎博士に深く感謝申し上げます。また、各種のご援助を賜った日立製作所多賀工場、島田副工場長、上村部長、藤井部長、日立研究所小林所長、高林部長に厚くお礼申し上げます。また、トルクの空間分布を測定する手法に関して、資料を参照させていただいた片木剣三郎博士に感謝申し上げます。さらに研究全般にわたりご協力いただいた日立研究所大西和夫氏、石川博章氏、および実験を担当された虻川俊美氏に衷心より感謝申し上げます。

(昭和 46 年 10 月 6 日受付、同 47 年 4 月 4 日再受付)

文 献

- (1) 大岡：電学誌 91, 2117 (昭 46-11)
- (2) 片木：昭 30 電気三学会連大 No. 278
- (3) C. G. Veinott: Fractional Horse Power Electric Motor 306 (1948) McGraw-Hill
- (4) S. B. Jovanovski: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-88, 1611 (1969)
- (5) C. G. Veinott: Theory and design of small induction motor 109 (1959) McGraw-Hill
- (6) 磯野：誘導電動機解説 85 (昭 14) 丸善書店