コンデンサ分相形单相誘導電動機の磁界解析

正 員 榎 園 正 人 (大分大)

正 員 戸 高 孝 (大分大)

准 員 青 木 雅 昭 (大分大)

1. ま え が き

石油ショックを契機として、電気機器の省エネルギー化の研究が急務で重要な課題となった。特に、单相誘導電動機は家庭用として多く使用され、その電力消費量は多く、とりわけこの種の電動機の低損失、高効率化は重要な課題となっている。

電動機の低損失、高効率化を図るためには、材料特性を考慮した設計が必要となる。すなわち、電動機の鉄心重量あたりの鉄損値は、素材である電気鉄板の常規鉄損値よりもかなり大きい値を示す。この鉄損が増加する原因として、鉄心内部の局所的な磁束の乱れ、回転磁束の発生、鋼板に生じる応力、ひずみなどが挙げられる。とりわけ前者の磁氣的挙動に関する問題は重要で、鉄損を低減させるためには材料が機器に組み込まれた状態で解析を行い、損失の発生分布を知ることが必要である⁽¹⁾。

そこで本論文では、小形单相誘導電動機のなかでも最も数多く利用されているコンデンサ分相形单相誘導電動機の磁界解析を有限要素法によって行い、完全回転磁界を有する二相誘導電動機の解析結果と比較することにより、磁束分布および鉄損の発生分布状況を検討し、合せて低損失、高効率化のための考察を行った。

2. コンデンサ分相形单相誘導電動機の磁界解析

図1に単相かご形誘導電動機(定格: 100 V, 60 Hz, 0.1 kW, 4極)に対する解析モデル(1/2断面)を示す。

Magnetic Field Analysis of Permanent-Split Capacitor Motor.
By Masato Enokizono, Member, Takashi Todaka, Member & Masaaki Aoki, Associate (Faculty of Engineering, Oita University).

榎園正人: 正員, 大分大学工学部
戸高 孝: 正員, 大分大学工学部
青木雅昭: 准員, 大分大学工学部

本論文では表1に示すような仕様で、2種類の電動機、すなわちコンデンサ分相形单相誘導電動機とコンデンサを除いた二相誘導電動機を想定した。両機とも4極構成で、コンデンサ分相形には14 μ Fのコンデンサが接続されている。なお、鉄心材料はS30相当の無方向性ケイ素鋼板が使用されている。

鉄心の厚みは50 mm以上で、軸方向の漏れ磁束を問題にしなければ二次元解析が可能で、ベクトルポテンシャルを用いて定式化を行うことにすれば、基礎方程式は次式で表される⁽²⁾⁽³⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \sigma \left[\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial z} - s\omega \left(y \frac{\partial A}{\partial x} - x \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] - J_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図1 单相誘導電動機の解析モデル
(1/2断面図)

Fig. 1. Model used in analysis for single-phase induction motor (Half cross-section).

表1 解析モデルの仕様

Table 1. Specification of model used in analysis.

	巻 数 (T)		銅線の直径 (mm)	抵 抗 値 (Ω)
	5/6 ピッチ	3/6 ピッチ		
主 巻 線	77	44	0.65	6.21
補助巻線	77	44	0.65	6.21

ただし, A, J_0 : ベクトルポテンシャルおよび電流密度の z 方向成分, ϕ : 電位, ν : 磁気抵抗率, σ : 導電率, s : 滑り, ω : 電源角速度

ここで, 固定子および回転子の積層鉄心部には渦電流は発生せず, 二次導体内のみに渦電流が発生すると仮定しても, 本論文の検討範囲内では問題はないと考えられる。この二次導体内において, 一極対分で二次導体回路が閉じているとすれば, 電荷保存則から次式が得られる⁽²⁾⁽³⁾。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{1}{S_t} \iint_{S_t} \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} - s \omega \left(y \frac{\partial A}{\partial x} - x \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right\} dS \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし, S_t : 導体の断面積

従来の解析では $\partial \phi / \partial z = 0$ として, 一極分 (本モデルでいえば 1/4 断面) で取扱われていたが, これでは二次導体中の電流を正しく評価できない。つまり, かご形誘導電動機の回転子二次導体は端絡環で結ばれているので, 二次導体を一つの電流回路として扱う必要がある。また図 1 に示すように, 回転子中に穴が存在する場合には (1) 式中に速度項が含まれているため, 二次導体に鎖交する磁束は各極で異なり, $\partial \phi / \partial z$ を無視できる幾何学的中心線⁽⁴⁾が存在しないことになる。このことは, 後述する磁束分布が各磁極間で対称な分布となっていないことから明らかである。

更に本解析では, 中田らによる「電圧を与えられた有限要素法」⁽⁵⁾ を用いて, 電圧は既知であるが, 主・補助巻線の電流, すなわち (1) 式中の J_0 は未知量として扱う。

コンデンサ分相形単相誘導電動機は, 二種類の電源回路で構成されているので, キルヒホッフの第二法則より次の二式が得られる。

主巻線回路:

$$\frac{d}{dt} \int_l A dl + R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} = V_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

補助巻線回路:

$$\frac{d}{dt} \int_l A dl + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + \frac{1}{c} \int I_a dt = V_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, R, L, I : 各巻線の抵抗, z 軸方向の漏れ磁束に基づく漏れインダクタンスおよび電流, m, a : 主巻線と補助巻線, V_0 : 端子電圧, c : コンデンサ容量, l : 巻線に沿った積分路

以上の (1)~(4) 式を連立して解析を行う。ただし, 時間微分項の処理は後退差分近似法を用い, 鉄心の非線形性にはニュートン・ラプソン法を用いた⁽⁶⁾。

図 2 分割図

Fig. 2. Finite element meshes.

また, 解析では R_m, R_a は実測値を用い, L_m, L_a は簡単のため無視することにした。また本機はスキューを施していたため, スロットリプルは無視して取扱った。なお, 三角形要素分割数は 1,122 個で, その分割図を図 2 に示す。

3. 二相誘導電動機との磁気特性の比較検討

前章の解析方法によって, コンデンサ分相形単相誘導電動機と二相誘導電動機を並置して, 回転磁界の相違に基づく影響を比較検討する。なお, 両機とも定格電圧 100 V, 60 Hz で解析された。

〈3・1〉 励磁電流の検討 端子電圧を与えて解析を行うことにより, 解として各節点のベクトルポテンシャル値に加えて電流値が得られる⁽⁵⁾。そこで, まず本解析手法の妥当性を検討するために, 解析モデルと同じ仕様のコンデンサ分相形単相誘導電動機の主・補助巻線に流れる電流値を滑りの変化と共に実測し, 解析結果と比較した。図 3 はその結果を示したものである。なお, このときの付設コンデンサ容量は 14 μ F である。同図より, 実験値と解析値は比較的良い一致を示している。

更に, 図 4 および図 5 に滑り $s=1$ および $s=0.03$ における各電流波形の解析結果を示した。図 5 におい

図 3 電流について実測値と解析値の比較

Fig. 3. Relationship between measured values and computational result of exciting current.

(a) コンデンサ分相形单相誘導電動機

(b) 二相誘導電動機

図 4 滑りが1のときの電流波形 (始動時)

Fig. 4. Current waveforms (slip=1).

て、二相誘導電動機の場合、主・補助巻線とも同じ巻数のため電流値が同じで位相差が 90° になるはずで、結果もそれを示している。これに対して、コンデンサ分相形誘導電動機の場合には、挿入されたコンデンサ容量によって位相も大きさも異なる。本解析結果では位相差が約 100° で、滑り 1 において不完全な回転磁界を形成することになる。

次に図 5 より、二相誘導電動機の場合は負荷時においても各巻線電流の大きさは同じで、各巻線電流間の位相差は 90° の一定に保たれるが、コンデンサ分相形单相誘導電動機は位相差が 140° にまで変化し、大きさも異なっている。これらの結果は、実測においても同様のことが確認された。

〈3・2〉 回転磁束分布 図 6 に滑り 1 の始動時における両機の磁束分布を示し、図 7 に滑り 0.03 の負荷時のそれを示す。更に両機の詳細な比較は、磁束密度ベクトルの軌跡を描いた、いわゆる回転磁束分布によって行う。図 8 は滑り 1 における回転磁束分布であり、回転磁束中の二つの軸は、時間的にみて (3)、(4) 式の印加電圧 $V_0 = V_m \sin \omega t$ が零になる瞬間か

(a) コンデンサ分相形单相誘導電動機

(b) 二相誘導電動機

図 5 滑りが 0.03 のときの電流波形 (負荷時)

Fig. 5. Current waveforms (slip=0.03).

(a) コンデンサ分相形单相誘導電動機

(b) 二相誘導電動機

図 6 滑りが 1 のときの磁束分布 (始動時)

Fig. 6. Flux distributions (slip=1).

(a) コンデンサ分相形单相誘導電動機

(b) 二相誘導電動機

図 7 滑りが 0.03 のときの磁束分布 (負荷時)

Fig. 7. Flux distributions (slip=0.03).

ら 90° の位相差を表している。なお、二相誘導電動機の場合は主巻線電圧が零となるときを基準とした。両機を比較すると、コンデンサ分相形单相誘導電動機

(a) コンデンサ分相形単相誘導電動機 (b) 二相誘導電動機

図 8 滑りが1のときの回転磁束分布 (始動時)
Fig. 8. Rotational-flux distributions (slip=1).

(a) コンデンサ分相形単相誘導電動機 (b) 二相誘導電動機

図 9 滑りが0.03のときの回転磁束分布 (負荷時)

Fig. 9. Rotational-flux distributions (slip=0.03).

は、二相誘導電動機に比べて回転磁束の形状がへん平な分布となっている。これは見掛け上、巻線回路に流れる電流の位相差を 90° に近くなるようにコンデンサ容量を選定しても、平等な磁束分布が得られないことを意味する。

次に、滑り 0.03 の負荷時における両機の回転磁束分布を図9に示した。この結果からも両機の相違は明らかで、始動時と同様にへん平な回転磁束分布となっている。

〈3・3〉 最大磁束密度分布 前節の回転磁束の長軸にあたる最大磁束密度分布は後述する損失分布にかかわっており、機器設計上のみならず、鉄心構造を検討するうえで重要となる。

図10および図11に、両機について始動時 (滑り: $s=1$) および負荷時 (滑り: $s=0.03$) の最大磁束密度分布を示す。

図10の始動時を見ると、二相誘導電動機は固定子歯部全域においてほぼ均一な磁束分布 (ただし、ボルト締付穴付近の磁束分布はその影響を受ける) で、磁束レベルも平均的に高くなっている。コンデンサ分相形単相誘導電動機の場合、中心の固定子歯部 (中央ボルト締付穴下) から左右3番目のそれは著しく磁束レベルが低下しており、他の歯部の半分以下である。同様の傾向は負荷時でも見られ、図11(a)から、今度は中央部から右側4、5番目の歯部の磁束レベルが高くなっている。しかも、一極対において左右対称な分布を形成していない。このことから、従来の1極分の解析では不十分であることがわかる。

(a) コンデンサ分相形単相誘導電動機 (b) 二相誘導電動機

図 10 滑りが1のときの最大磁束密度分布 (始動時)

Fig. 10. Distribution of maximum density (slip=1).

(a) コンデンサ分相形単相誘導電動機 (b) 二相誘導電動機

図 11 滑りが0.03のときの最大磁束密度分布 (負荷時)

Fig. 11. Distribution of maximum flux density (slip=0.03).

以上のように、二相誘導電動機の場合は始動時および負荷時とも均一な分布となるのに対して、コンデンサ分相形単相誘導電動機の場合、各歯部において磁束密度の最大値が異なることは、振動、騒音、更に効率低下の要因の一つであると推測できる。

〈3・5〉 鉄損分布 大形鉄心の場合の鉄心各部の局所的な鉄損の測定は、静止モデルにおいてサーミスタ、熱電対を用いた熱的方法が可能であるが⁽⁷⁾⁽⁸⁾、本機のように小形の場合には歯部は狭く、巻線数も相対的に多く実測することは困難である。

そこで、鉄心に用いられている材料に相当する無方向性材料について、エプスタイン試験片を用いて別途回転磁界鉄損を測定し、その結果を最小二乗法を用いて処理し、以下に示すような最大磁束密度 $B_{\max}$ (回転磁束の長軸成分) と最小磁束密度 $B_{\min}$ (回転磁束の短軸成分) に対する実験式を作成した。ただし、波形ひずみの著しく生ずる高磁束密度領域については言及せず、波形ひずみの影響の小さい範囲内において適用することにした。幸い本論文で使用した電動機は、その範囲内にある。

鉄損:

$$\left. \begin{aligned} W &= k B_{\max}^{1.95} + \left(\frac{1.319}{B_{\max}} + 1.196 \right) \\ &\quad \times B_{\min}^{1.63} \quad (W/kG) \\ B_{\min} &\leq 1.4 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

$$k=2.62(0 \leq B_{\max} < 0.75)$$

$$k=2.30(0.75 \leq B_{\max} < 1.25)$$

$$k=2.71(1.25 \leq B_{\max} < 1.75)$$

上述の実験式から回転磁界下の鉄損は、最大磁束密度 $B_{\max}$ と $B_{\min}/B_{\max}$ (軸比と称する) に関連づけられる。従って、一般に同じ磁束密度に対して、軸比の大きい回転磁束下の鉄損は、交番磁束下の鉄損に比較して大きく、軸比分布を得ることは機器の高効率化の手掛りを得るうえで重要である。

そこで、図 12、図 13 に軸比分布を示す。軸比が 1 の場合は円磁束を、軸比が 0 の場合は交番磁束であることを意味する。

図のように、誘導機では始動時に歯先端部では環流磁束から回転磁束を生じ、定格負荷時には磁束は回転子側に侵入しやすく、ほぼ交番磁束となっている。そして、固定子歯背部に軸比の大きい回転磁束が発生している。このことは実験的に確かめられている⁽⁸⁾。

両機の軸比分布を比較すると、二相誘導電動機では始動時、負荷時にかかわらず固定子各歯部間で均一な分布であるが、コンデンサ分相形の場合は不均一な分布となっている。特に、負荷時の二相誘導電動機の分布は最大で 0.3 に対し、コンデンサ分相形には 0.4 の値を有する箇所があり、損失の増加を招いていることがわかる。

以上の軸比および最大磁束密度分布から鉄損分布を推定すると、図 14、図 15 となる。両機の磁束レベルが異なるため、鉄損値の直接比較はできないが、分布定状況に着目すると二相誘導電動機の場合には、固定

図 12 滑りが 1 のときの軸比分布 (始動時)

Fig. 12. Distribution of axial ratio in rotational-flux (slip=1).

図 13 滑りが 0.03 のときの軸比分布 (負荷時)

Fig. 13. Distribution of axial ratio in rotational-flux (slip=0.03).

子歯部間の鉄損の値の差は小さくほぼ同じレベルであるのに対し、コンデンサ分相形の場合には、歯部間の鉄損差が大きい不均一な分布となっている。このことは、前述した最大磁束密度および軸比分布の固定子歯部間のそれらの不均一性に寄因するものである。

表 2 は定格電圧 100 V における電流、全鉄損 (機械損、漂遊負荷損は無視している)、効率を両機間で示している。同表より、二相誘導電動機は鉄心の磁束レベルが高くなって全鉄損は増大するが、出力も増大するため効率は非常に高いものとなる。これらの点は従来から知られていることであるが、コンデンサ分相形単相誘導電動機の場合、不十分な回転磁束が著しい効率の低下を招くことは設計上重要な知見となるであろう。従って、これらの結果から鉄心構造、巻線方式な

図 14 滑りが 1 のときの鉄損分布 (始動時)

Fig. 14. Distribution of iron loss (slip=1).

図 15 滑りが 0.03 のときの鉄損分布 (負荷時)

Fig. 15. Distribution of iron loss (slip=0.03).

表 2 性能表

Table 2. Computational result of efficiency.

		励磁電流		鉄 損	銅 損	効 率
		I_m (A)	I_d (A)	W_i (W)	W_c (W)	η (%)
二相誘導電動機	始動時 1	6.68	6.68	4.71	580	—
	負荷時 0.03	2.54	2.54	9.57	91.3	75.9
単相誘導電動機 ($C=14 \mu F$)	始動時 1	6.74	0.53	1.90	284	—
	負荷時 0.03	2.78	0.64	4.72	50.5	55.9
単相誘導電動機 ($C=14 \mu F$)	始動時 1	6.94	0.53	2.11	251	—
	負荷時 0.03	2.43	0.84	4.87	39.7	58.1
単相誘導電動機** ($C=14 \mu F$)	始動時 1	—	—	—	—	—
	負荷時 0.03	2.43	0.84	4.79	40.0	60.9

*:**: 主 巻 線 77T (5/6 ピッチ) & 49T (3/6 ピッチ)
補助巻線 120T (5/6 ピッチ) & 54T (3/6 ピッチ)

** : ボルト締付穴なし

どのについての検討が望まれる。一例として、固定子ボルト締付穴をなくすことによって、効率の向上が得られることを合せて示した。

4. 速度特性ならびに容量特性の検討

前章では、コンデンサ分相形単相誘導電動機と二相誘導電動機を並置して、効率低下の問題点を明らかにしてきた。そこで本章では、コンデンサ分相形単相誘導電動機と、付設するコンデンサ容量の影響について検討する。

〈4・1〉 速度特性 前述したように、本解析手法によれば電流波形が位相と共に求められるので、力率が計算できる。また、前章の全鉄損および銅損から効率を求めた。ただし、ここでの効率は機械損その他を無視しているので、通常より高い値を示す。なお、付設コンデンサ容量は $14\ \mu\text{F}$ である。

以上の結果を図 16 に示す。これより、回転速度の増加と共に鉄損は増大し、銅損は減少していくことがわかる。しかし、出力は増加していくため効率は高くなり、滑りが 0.1 付近で最大となっている。

〈4・2〉 容量特性 コンデンサ分相形単相誘導電動機は、通常一定のコンデンサを常に接続しておくため、コンデンサ容量は始動時および定格運転時における最適値の中間が選ばれるようである。そこで、本節では更に拡大して、過容量および不足容量における電流、鉄損、銅損、力率および効率の変化を検討した。

図 17 においては、電動機は静止状態であるため、コンデンサ容量の増力と共に、すべての値は直線的に増加していく。これに対して、図 18 の負荷時には、コンデンサ容量の変化による効率の変化はほとんど見られないが電流、鉄損、銅損および力率は著しく変化する。このように効率が変化しないのは、コンデンサ容量の増加と共に鉄損および銅損がともに増大することによる。また、コンデンサ容量が増すと電流

図 17 滑りが 1 のときの容量特性 (始動時)

Fig. 17. Capacity characteristic curve (slip = 0.1).

図 18 滑りが 0.03 のときの容量特性 (負荷時)

Fig. 18. Capacity characteristic curve (slip = 0.03).

が増加していくが、本機の場合の力率は $C=25\ \mu\text{F}$ で最大となった。本機に付設されていたコンデンサ容量 ($C=14\ \mu\text{F}$) は、図から明かなように電流が最小値をとる付近で選ばれたようである。

5. む す び

コンデンサ分相形単相誘導電動機の磁界解析に有限要素法を適用し、二相誘導電動機と対置してコンデンサ分相形の不完全回転磁界に基づく影響を明らかにした。本解析で得られた知見の要約を以下に示す。

(1) 二相誘導電動機は完全回転磁界を形成するため、最大磁束密度および鉄損分布はほぼ一様に分布するのに対し、コンデンサ分相形単相誘導電動機は不完全回転磁界のため、それらは不均一となり、局所的に低い箇所や高い箇所が存在する。

(2) 局所的な磁束の集中や軸比の増大が、鉄損の増加と共に効率の低下を招いている。

以上の結果から、コンデンサ分相形単相誘導電動機の高効率化のためには、完全な回転磁界を得るべく、固定子鉄心の構造および巻線方式の改善が望まれる。

最後に、本研究につき種々御討論いただいた省エネ

図 16 速度特性

Fig. 16. Speed characteristic curve.

ルギー機器用磁性材料調査専門委員会のメンバー，特に和田委員，岡部委員および解析手法について御助言賜わった岡山大学 中田高義教授，高橋則雄助教授に深く感謝いたします。今後は，固定子鉄心構造および巻線方式についての検討を行う予定である。

(昭和 62 年 3 月 12 日受付, 同 62 年 11 月 16 日受付)

文 献

- (1) 省エネルギー用磁性材料調査専門委員会：電気学会技報（昭和 62 年度発刊予定）
- (2) 榎園・青木：「有限要素法による単相誘導電動機の磁気特性の解析」，電気学会回転機・静止器合同研究，RM-85-32，SA-85-41（昭 60-11）
- (3) 榎園：「有限要素法による三相かご形誘導電動機の磁界解析」，電学論 B（投稿中）
- (4) 中田・高橋・河瀬：「うず電流解析における電界 ($\text{grad } \phi$) の物理的意味の考察」，電気学会情報処理研究，IP-80-49（昭 55）
- (5) T. Nakata & N. Takahashi: "Direct Finite Element Analysis of Flux and Current Distributions under Specified Conditions", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-18, 325 (1982)
- (6) 中田・高橋：電気工学の有限要素法（昭 57）森北出版
- (7) 成田・今村：「電気鉄板の熱電的部分鉄損測定法」，電学論 A, 94, 167（昭 49-4）
- (8) 榎園・桑原・岡田・矢野：「三相モデル誘導機による回転磁束分布および鉄損分布の実験的検討」，同上 B, 103, 844（昭 58-12）