かご形回転子の異常診断のためのギャップ磁束解析

正 員 森 田 郁 朗 (徳島大)

Air-Gap Flux Analysis for Cage Rotor Diagnosis

Ikuro Morita, Member (The University of Tokushima)

The fault diagnosis of an induction motor by analyzing the abnormal frequency components of the current or power waveform has been already proposed by the authors, and its characteristics with faulty cage rotor such as broken bars have been presented also. As the results, it becomes clear that the amplitude of abnormal component of the stator currents and so on, increases with the number of broken bars, while it decreases with the number of broken end-rings, in the case of consecutive fault positions within 90 degree in electrical angle. So, in this paper the more direct diagnosis methods by detecting the air-gap flux are investigated to avoid the above inconsistency.

In this paper we discuss in detail the relation between the various fault conditions and the MMF distributions of a three-phase induction motor with faulty cage rotor such as broken bars and end-rings, and analyze quantitatively the search coil output and its harmonic component to detect those faults adequately from the air-gap flux density. The measured results obtained by the artificially faulted machine demonstrate the availability of those analytical results and this diagnosis method.

キーワード：かご形回転子，ギャップ磁束，異常診断，起磁力調波，誘導電動機

1. ま え が き

著者らは、さきに誘導電動機の不平衡に帰着する異常状態を電流や電力波形に含まれる特徴周波数成分から診断する方法を提案し、その特徴周波数成分の定量化などを述べた⁽¹⁾⁽²⁾。また、かご形三相誘導電動機のバー切れなどの異常時の特性についても検討した⁽³⁾。その結果、固定子電流および電力波形などに含まれる異常の特徴周波数成分は、電気角で90度程度までの連続したバー異常時には異常箇所の増加と共に増加するが、エンドリング異常時には逆に減少することを明らかにした。これは故障診断の観点からは不都合な結果である。そこで、本論文では、この不都合を避けるため、より直接的な方法としてギャップ磁束を検出するかご形回転子の異常診断法について検討した。この方法は、かご形回転子異常時のギャップ磁束には、電流や電力波形に含まれる空間基本調波以外の空間調波成分も含まれるので、これらの異常な空間調波成分に着目する方法である。

従来より、変圧器や誘導電動機に対して漏れ磁束法による異常検出が検討されてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、ギャップ磁束を検出し診断する方法も同期発電機の回転子巻線の層間短絡に関して実施されている^{(6)~(8)}。同様に、かご形誘導電動機のバー切れなどの異常検出に関しても過去から実施、検討されている⁽⁹⁾。しかし、同論文では、バー導体数を無限大とした近似解、スロットパーミアンス、飽和および偏心などによる空間調波を含むギャップ磁束からバー切れを検出する探りコイルの幅の考察および実験結果を述べているのみである。本論文で明らかになるバー切れなどの各種異常状態と起磁力調波成分の関係および解析結果の探りコイル出力と実測結果と比較検討などはなされていない。

本論文の目的は、三相誘導電動機のかご形回転子にバー切れやエンドリング切れなどの異常が生じた場合のギャップ磁束分布を求め、これより固定子に配置した異常診断用探りコイルに誘導される電圧波形とその調波成分の大きさを解析的に明らかにすることである。その結果、本診断結果に関する評価や予測が行え

るようになる。

本論文では、まず、(i)文献(3)の解析結果の回転子ループ電流を用いて異常時の固定子および回転子の起磁力分布を求める。次に、(ii)種々の異常状態と起磁力調波成分の関係を数値例により検討する。(iii)この結果より、異常検出に適したギャップ磁束検出用の探りコイルの仕様を考察し、その出力を求める。最後に、(iv)人為的に故障を模擬した供試機を用いた実測結果と比較し、本解析結果ならびに本診断法の有効性を確認する。

2. かご形回転子異常時の起磁力解析

〈2・1〉 解析の基礎 図1は本論文に関する解析の流れを示したものである。同図の異常時の特性解析部はさきに発表した文献(3)の部分であり、同図の起磁力分布の解析部以下の部分が本論文で述べる内容である。本論文では、同図に示すように異常時の解析結果に基づいて検討を進めるので、その適用範囲および一般性は文献(3)と同じで、多極巻線が直直接続された固定子巻線をもつ任意バー数の三相かご形誘導電動機である。また、バー切れやエンドリング切れなどの異常状態の条件は図1の異常時の特性解析部で指定するので、任意の異常箇所が取扱えるものである。

〈2・2〉 解析モデル 解析で仮定する事項は文献(3)とほぼ同じで以下のとおりである。

- (1) 磁気飽和および鉄損は無視する。
- (2) 電圧方程式の解析では起磁力の空間高調波の影響は無視する。
- (3) バー切れおよびエンドリング切れは各異常箇所のバー抵抗およびエンドリング抵抗の変化としてモデル化する。
- (4) 固定子および回転子のインダクタンスは平衡

しているものとする。

(5) スロットパーミアンス調波は簡単化のため無視する。

(6) 回転子鉄心内部へは電流が流れないものとする。

仮定(2)に関して、かご形回転子異常時には結果として起磁力に特殊な空間調波成分を含むことになる。しかし、電圧方程式の解析では、これらの空間調波成分を無視した基本波成分のみを解析する。この理由は、異常診断としては異常箇所数が少ない場合がより重要であり、この範囲においては基本波成分に比較して異常時の特殊な調波成分が小さいからである。仮定(4)も仮定(2)と同じ理由による。また、仮定(6)に関して、バーおよびエンドリング切れが連続した場合、実際には電流が鉄心内部へ流れるが、これらを考慮すると解析が極めて複雑化する。なお、異常箇所の抵抗値を変えることにより鉄心内部を流れる電流を間接的に考慮することは可能である。

以上より、本論文では図2に示すかご形誘導電動機モデルについて検討する。(a)図は各巻線間の位相図などを表し、極対数を P 、回転子スロット数を n とすると、 $\alpha=2\pi/P$ 、 $\beta=2\pi/n$ 、 θ は固定子 $a1$ 相巻線と回転子1番目ループ回路との回転角度(電気角)で回転角速度を ω_m とすると、 $\theta=\omega_m t$ である。また、 R_s : 固定子各相巻線抵抗、 L_s : 固定子各相自己イン

図1 解析の流れ
Fig.1. Flow of analysis.

(a) 固定子および回転子の位相図

(b) かご形回転子回路

図2 異常かご形回転子をもつ誘導電動機
Fig.2. An induction motor with faulty cage rotor.

図 3 回転子ループ電流のフェーザ図
Fig. 3. Phasor diagrams of the rotor loop currents.

ダクタンス, M_s : 固定子各相間の相互インダクタンス, M : 固定子各相～回転子各ループ間の相互インダクタンス (最大値) とする。(b) 図は回転子のバー抵抗, エンドリング抵抗, および回転子ループ電流などを表している。ここで, $k=1, 2, 3, \dots, n$ として, i_{rk} : 回転子 k 番目のループ電流, i_{re} : 片側エンドリング部のループ電流, R_{bk} : k 番目のバー抵抗, R_{ek} : 片側の k 番目のエンドリング抵抗, l_b, l_e : バーおよびエンドリングの漏れインダクタンス, M_r : 回転子各ループ間の相互インダクタンスである。

〈2・3〉 かご形回転子のループ電流 本論文では, 回転子の起磁力解析のために回転子側の諸定数および回転子ループ電流などは回転子側の量を用いる。

図 3 は文献 (3) の解析結果の一例で, (a) 正常時および (b) バー異常時の回転子ループ電流のフェーザ図である。同図より, 回転子バーの数を n とすると, 異常状態の回転子ループ電流 $i_{rk}(t)$ ($k=1, 2, 3, \dots, n$) は, s を滑り, ω_1 を電源角周波数, t を時間とすると,

$$i_{rk}(t) = I_{rk} \cos(s\omega_1 t - \varphi_{rk}) \quad (1)$$

と表せることがわかる。ここで, I_{rk} および φ_{rk} は k 番目のループ電流の振幅および位相を表す。一方, 正常時には, (a) 図より, 各回転子ループ電流は平衡し次式となる。

$$\left. \begin{aligned} I_{rk} &= I_r \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \\ \varphi_{rk} &= \frac{2\pi P}{n}(k-1) + \varphi_{r0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

〈2・4〉 回転子および固定子起磁力分布 図 4 に示すように, 回転子ループ電流 $i_{rk}(t)$ による起磁力 $f_{rk}(x, t)$ は, ν : 空間高調波次数, x : 回転子の位置 (機械角) とすると次式で与えられる。

図 4 回転子の展開図と各ループ電流による起磁力分布
Fig. 4. An unrolled rotor and MMF distributions of each loop current.

$$f_{rk}(x, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2i_{rk}(t)}{\nu\pi} \sin\left(\frac{\nu\pi}{n}\right) \times \cos[\nu\{x - 2\pi/n(k-1)\}] \quad (3)$$

ここで, (1) 式の異常状態における回転子ループ電流 $i_{rk}(t)$ を (3) 式に代入し, $k=1, 2, 3, \dots, n$ のすべてのループについて合成すると,

$$\begin{aligned} F_r(x, t) &= \sum_{k=1}^n f_{rk}(x, t) \\ &= \sum_{\nu=\pm 1}^{\pm\infty} \sum_{k=1}^n \frac{I_{rk}}{\nu\pi} \sin\left(\frac{\nu\pi}{n}\right) \cos\left[\nu x - s\omega_1 t - \frac{2\nu\pi}{n}(k-1) + \varphi_{rk}\right] \quad (4) \end{aligned}$$

となる。更に,

$$\begin{aligned} A_{\nu} &= \sum_{k=1}^n I_{rk} \left[\sin\left\{\frac{2\nu\pi}{n}(k-1)\right\} \sin \varphi_{rk} \right. \\ &\quad \left. + \cos\left\{\frac{2\nu\pi}{n}(k-1)\right\} \cos \varphi_{rk} \right] \\ B_{\nu} &= \sum_{k=1}^n I_{rk} \left[\sin\left\{\frac{2\nu\pi}{n}(k-1)\right\} \cos \varphi_{rk} \right. \\ &\quad \left. - \cos\left\{\frac{2\nu\pi}{n}(k-1)\right\} \sin \varphi_{rk} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

とおくと, (4) 式は次式となる。

$$F_r(x, t) = \sum_{\nu=\pm 1}^{\pm\infty} F_{\nu} \cos(\nu x - s\omega_1 t - \varphi_{\nu}) \quad (6)$$

ただし,

$$\begin{aligned} F_{\nu} &= \frac{1}{\nu\pi} \sin\left(\frac{\nu\pi}{n}\right) \sqrt{A_{\nu}^2 + B_{\nu}^2}, \\ \varphi_{\nu} &= \tan^{-1}(B_{\nu}/A_{\nu}) \end{aligned}$$

である。

また, 回転子の位置角 x から固定子の位置角 y への変換は,

$$Py = Px + \omega_m t = Px + (1-s)\omega_1 t \quad (7)$$

の関係式が成り立ち, (6) 式は,

$$F_r(y, t) = \sum_{\nu=\pm 1}^{\pm \infty} F_{r\nu} \cos \left[\nu y - \left\{ s + \frac{\nu}{P}(1-s) \right\} \right. \\ \left. \times \omega_1 t - \varphi_{r\nu} \right] \dots\dots\dots (8)$$

となる。

なお、正常時には、回転子ループ電流は平衡し(2)式が成立することから、(4)式は次式となる。

$$F_r(x, t) = I_r \sin \left(\frac{P\pi}{n} \right) / \left(\frac{P\pi}{n} \right) \\ \times \left[\frac{1}{P} \cos(Px - s\omega_1 t + \varphi_{r0}) \right. \\ + \frac{1}{n-P} \cos\{(n-P)x + s\omega_1 t - \varphi_{r0}\} \\ - \frac{1}{n+P} \cos\{(n+P)x - s\omega_1 t + \varphi_{r0}\} \\ \left. + \dots \right] \dots\dots\dots (9)$$

以上より、回転子が正常な場合、主要な調波成分は極対数の P 次調波成分であり、これは固定子側で観測すると角周波数 ω_1 のところに現れる。しかし、異常時には $\nu = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ の空間調波成分が発生し、固定子側では $\{s + (1-s)\nu/P\}\omega_1$ なる角周波数成分として現れることがわかる。また、以下に述べる固定子起磁力の $(\omega_1 - 2\omega_m)$ 成分は、(8)式の回転子起磁力において $\nu = -P$ 次の成分、すなわち極対数の次数で逆方向に回転している調波成分に対応していることがわかる。

一方、固定子側の起磁力分布は以下ようになる。文献(3)の解析結果より、かご形回転子異常時の固定子電流には、 ω_1 成分と $(\omega_1 - 2\omega_m)$ 成分が含まれ、 a 相について示せばそれぞれ次式で与えられる。

$$i_{sa1}(t) = I_{s1} \cos(\omega_1 t - \varphi_{s1}) \dots\dots\dots (10)$$

$$i_{sa2}(t) = I_{s2} \cos\{(\omega_1 - 2\omega_m)t - \varphi_{s2}\} \dots\dots (11)$$

ただし、 I_{s1} 、 φ_{s1} ： ω_1 成分の振幅および位相、 I_{s2} 、 φ_{s2} ： $(\omega_1 - 2\omega_m)$ 成分の振幅および位相であり正常時には $I_{s2} = 0$

また、三相固定子巻線は平衡しているので、 $k_{w\nu}$ を ν 次の巻線係数（これは、電気角に対する次数であり、機械角に対しては νP 次となる）、 q を毎極毎相のスロット数、 N_1 を 1 スロットあたりの導体数とすると、その起磁力分布は次式で与えられる。

$$F_s(y, t) = \frac{3qN_1I_{s1}}{\pi} k_{w1} \cos(Py - \omega_1 t + \varphi_{s1}) \\ + \frac{3qN_1I_{s2}}{\pi} k_{w1} \cos\{Py + (\omega_1 - 2\omega_m)t - \varphi_{s2}\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、仮定より本解析においては、(8)式の回転子

起磁力に対応する項のない、 $5P$ 、 $7P$ などの固定子側の空間高調波成分は無視する。

以上より、回転子および固定子を合成した起磁力分布 $F(y, t)$ は次式となる。

$$F(y, t) = F_r(y, t) + F_s(y, t) \\ = \sum_{\nu=\pm 1}^{\pm \infty} F_{\nu} \cos(\nu y - \omega_{\nu} t - \varphi_{\nu}) \dots (13)$$

ただし、 $\omega_{\nu} = \{s + (1-s)\nu/P\}\omega_1$

3. 異常状態の調波成分

ここでは、代表的な異常状態に対する起磁力調波成分の解析結果を具体的な数値例から検討する。数値例として使用する供試機の定格、諸定数を表 1 に示す。なお、以下のパー切れおよびエンドリング切れは文献(3)と同様、異常箇所抵抗値がそれぞれ正常時の抵抗値の 10^3 倍に変化したものとして解析している。

〈3・1〉 起磁力調波成分 図 5 に連続したパー切れ時の異常箇所数に対する起磁力調波成分の関係を示す。同図において、破線は空間基本調波の合成起磁力成分 ($\nu = \pm P$) を、実線は回転子起磁力調波成分を示す。同図より、5 箇所程度（電気角で約 90 度）までの異常箇所数の増加では、正方向に回転する $+\nu$ 調波および逆方向に回転する $-\nu$ 調波の両成分とも増加することがわかる。また、破線の合成起磁力成分は、固定子電流と回転子電流による起磁力がお互いに打消し合い、励磁電流に相当する値まで減少していることもわかる。

同様に、図 6 は連続したエンドリング切れの異常箇所数と起磁力調波成分の関係を求めたものである。同図より、5 箇所程度までは異常箇所数と共に $+\nu$ 調波成分は増加するが、 $-\nu$ 調波成分は逆に減少することがわかる。従って、 $+\nu$ 調波成分に着目すれば、5 箇所程度までは異常箇所数にほぼ比例した信号となり、異常診断に利用できることがわかる。

表 1 供試機の定格、諸定数

Table 1. Ratings and constants of the tested machine.

定格電圧：200 V	定格電流：2 A
定格出力：400 W	回転速度：1,690 rpm
定格周波数：60 Hz	極対数 $P = 2$
固定子スロット数：36 ($q = 3$)	回転子スロット数 $n = 44$
固定子導体数（毎極毎相） $N_1 = 174$	
固定子巻線係数 $k_{w1} = 0.960$	
R_s ：5.92 Ω	
R_s ：89.2 $\mu\Omega$	R_r ：1.75 $\mu\Omega$
L_s ：0.1911 H	M_s ：-0.0882 H
M ：75.2 μH	M_r ：0.0160 μH
l_s ：0.322 μH	l_r ：0.00632 μH

(a)

(b)

図 5 連続バー異常時の起磁力調波
Fig. 5. MMF harmonics in the consecutive bar faults.

(a)

(b)

図 7 バー 2 箇所異常時の起磁力調波
Fig. 7. MMF harmonics with interval between two bar faults.

(a)

(b)

図 6 連続エンドリング異常時の起磁力調波
Fig. 6. MMF harmonics in the consecutive end-ring faults.

図 7 は 2 箇所のバー切れ位置の間隔に対する起磁力調波成分の変化を求めた結果である。同図より、位置間隔に対する空間的なモード数を M とすると、 $+ν$ 調波成分は $M=|ν-P|$ 、 $-ν$ 調波成分は $M=ν+P$ なる変化を示すことがわかる。また、図 7 から明らかに、電気角度で 360 度 (間隔 22 スロット) の異常状態では、零となる調波が多くなり $ν=±4$ 次 ($2P$) を検出する必要がある点は注意すべきことである。

図 8 は 2 箇所のエンドリング切れ位置の間隔に対する起磁力調波成分の変化の結果であり、この場合は図 7 のバー切れのような明確な変化を示していない。この理由は、エンドリング切れ時は異常箇所から遠くなると徐々に異常の影響が弱くなること、また、バー切れ時は異常箇所の近傍のみに異常の影響が強く現れることによるものと考えられる。また、バーの場合と同様、電気角で 360 度間隔の異常は $±4$ 次成分のみ現れるが、その値は非常に小さくなり検出が困難となることに注意すべきである。

以上より、文献 (3) の固定子電流や電力の調波成分は起磁力の空間基本調波、すなわち $ν=±P(=2)$ 次の場合のみを求めていることに相当している。従って、起磁力調波成分すなわちギャップ磁束からは、電

(a)

(b)

図 8 エンドリング 2 箇所異常時の起磁力調波
Fig. 8. MMF harmonics with interval between two end-ring faults.

流や電力波形に含まれる調波以外の調波成分を検出でき、これを異常診断に利用できることがわかる。

〈3・2〉ギャップ磁束検出用探りコイル ここで、〈3・1〉節の起磁力調波成分解析の結果から異常検出に適した探りコイルの形について検討する。

異常信号の検出感度を上げるためには、基本調波成分である $\nu = +P$ 次調波を除いた異常箇所付近での起磁力分布のひずみ成分のみを検出すべきである。また、 $\nu = -P$ 次の調波成分もさきの起磁力調波成分の解析結果から明かなように、電流や電力波形に含まれている成分であり、かつギャップ磁束では固定子電流成分より小さい信号となる。従って、 $\nu = -P$ 次調波成分も探りコイルにて検出する必要はない。

以上の点を考慮し、 $\nu = \pm P$ 次を除くようにするには、図 9(a)に示すように異常箇所を含むコイルと含まないコイルの 2 個用意し、差動または和動接続とする方法が考えられる。この場合、同図に示すように多極機では 2 個のコイルの間隔の選択は自由に選択できるが、2 極間では 1 極ピッチ間隔で和動接続とする。また、多極機では、(b)図のようにコイル幅を 2 極ピッチに選べば、探りコイルとしては 1 個でよい。

次に、図 9 のコイル配置の状態での出力電圧について検討する。(13)式で与えられる起磁力分布 $F(y, t)$

(a) 2 極機および多極機の場合

(b) 多極機の場合

図 9 探りコイルの形状と配置

Fig. 9. Dimensions and arrangements of the search coils.

によるギャップ磁束密度 $B(y, t)$ は、ギャップを平滑であるとする、

$$B(y, t) = \frac{\mu_0}{\delta_c} F(y, t) \quad (14)$$

ここで、 μ_0 : 空気の透磁率、 δ_c : 等価ギャップの長さ

となる。ギャップ半径を R_c 、有効長さを L_c とすると、コイル幅の角度 z_1 、巻数 m_1 、コイル中心位置角 y_1 なるコイルに誘導される電圧 $e_1(y_1, t)$ は(13)、(14)式より次式となる。

$$\begin{aligned} e_1(y_1, t) &= -m_1 \frac{d}{dt} \int_{y_1-z_1/2}^{y_1+z_1/2} B(y, t) L_c R_c dy \\ &= \frac{2\mu_0 m_1 L_c R_c}{\delta_c} \sum_{\nu=\pm 1}^{\infty} \frac{\sin(\nu z_1/2)}{\nu} \\ &\quad \times \omega_\nu F_\nu \sin(\nu y_1 - \omega_\nu t - \phi_\nu) \end{aligned} \quad (15)$$

図 9(a)の場合は、両コイルの間隔の角度を z_2 、両コイルの中心位置角を y_0 、コイル 1 およびコイル 2 の中心位置角をそれぞれ y_1 および y_2 とすると、

$$y_1 = y_0 - z_2/2, y_2 = y_0 + z_2/2 \quad (16)$$

で、和動接続の場合の出力 $e_0(y_0, t)$ は(15)式より、

$$\begin{aligned} e_0(y_0, t) &= e_1(y_1, t) + e_2(y_2, t) \\ &= \frac{4\mu_0 m_1 L_c R_c}{\delta_c} \sum_{\nu=\pm 1}^{\infty} \frac{\sin(\nu z_1/2)}{\nu} \\ &\quad \times \cos(\nu z_2/2) \omega_\nu F_\nu \\ &\quad \times \sin(\nu y_0 - \omega_\nu t - \phi_\nu) \end{aligned} \quad (17)$$

となる。なお、両コイルを差動接続した場合は上式の $\cos(\nu z_2/2)$ を $-\sin(\nu z_2/2)$ に置換えればよい。

以上の結果、(17)式で z_1 を任意に選び（製作上は、固定子スロットピッチの整数倍とする）、 z_2 を1極ピッチ角度として両コイルを和動接続した探りコイル（以下、探りコイル A とする）、または(15)式で z_1 を2極ピッチ角度に選んだ単一の探りコイル（以下、探りコイル B とする）に関して、 $\nu = \pm P$ 次調波成分を除去した後の探りコイルの出力電圧波形とその調波成分が求められる。なお、両コイルの ν 次調波に対する特性は以下になる。(17)式において $z_2 = \pi/P$ として、

$$\begin{aligned} & \sin(\nu z_1/2) \cos(\nu \pi/2P) \\ &= \begin{cases} \sin(\nu z_1/2) & ; \nu \neq \pm P, \pm 3P, \dots \\ 0 & ; \nu = \pm P, \pm 3P, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

同様に、(15)式において $z_1 = 2\pi/P$ として、

$$\begin{aligned} & \sin(\nu \pi/P) \\ &= \begin{cases} \sin(\nu \pi/P) & ; \nu \neq \pm P, \pm 2P, \dots \\ 0 & ; \nu = \pm P, \pm 2P, \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

(18), (19)式より、探りコイル A と探りコイル B の特性を比較すると、コイル A はコイル B より出力は小さいが、異常の調波成分である $\pm 2P$ 次などを検出でき、検出できる調波の次数からは A のほうが望ましいことがわかる。

4. 実験結果⁽¹⁰⁾

ここでは、表1の供試機に対して人為的にバー切れおよびエンドリング切れなどを模擬し実験した結果について述べる。ただし、供試機のかご形回転子は閉スロットで、1スロットスキュー構造である。なお、〈3・2〉節の結果より、供試機は4極機なので使用する探りコイルは図9(a), (b)に対応した探りコイルを用意した。

両コイルの寸法などを表2に示す。なお、コイル A の z_1 は固定子1スロットピッチ幅である。また、これらのコイルは図9と同様に、各々の固定子スロットの開部に接着剤にて固定した。

図10はかご形回転子が正常な場合の探りコイルの出力電圧波形とそのスペクトルの実測結果である。スペクトルには $\nu = +2, +3$ 次の調波成分が少し現れているが、これは機械的および磁気的な不平衡と鉄心の飽和特性によるものである。

表2 探りコイルなどの仕様
Table 2. Specifications of the search coils and etc.

ギャップ長 g_c 0.364 mm		有効長 L_c 47.1 mm	
ギャップ半径 R_c 39.5 mm			
探りコイル A		探りコイル B	
コイル幅 $z_1 R_c$	5.0 mm	コイル幅 $z_1 R_c$	124.0 mm
コイル間隔 $z_2 R_c$	62.0 mm		
巻数 m_1	5	巻数 m_1	5

(a) 探りコイル A

(b) 探りコイル B

図10 正常時のコイル出力波形とそのスペクトル

Fig. 10. Waveform and its spectrum of the coils in the normal state.

〈4・1〉 バー切れの場合 文献(3)と同様に、人為的に連続したバー切れを1~3箇所作製し実験を行った。探りコイル A の出力とそのスペクトルを図11および図12に示す。同図より異常箇所の増加と共に、+調波成分および-調波成分ともに増加していることがわかる。

また、図11の出力波形においては実測値と理論値はほぼ一致していることがわかる。しかし、図12のスペクトルの比較では、周波数分布の形態はほぼ一致

(a) バー切れ 1箇所

(a) バー切れ 1箇所

(a) バー切れ 1箇所

(b) バー切れ 3箇所

(b) バー切れ 3箇所

(b) バー切れ 3箇所

図 11 コイル A の出力波形 (バー切れ)

図 12 コイル A の出力スペクトル (バー切れ)

図 13 コイル B の出力スペクトル (バー切れ)

Fig. 11. Output waveforms of the coil A (bar faults).

Fig. 12. Spectrums of the coil A output (bar faults).

Fig. 13. Spectrums of the coil B output (bar faults).

しているが、実測結果の振幅は理論値の $2/3$ 程度である。これは、実測のスペクトルは周波数的な広がりをもつこと、また実際は、異常な回転子起磁力調波成分も固定子側にはね返ることなどを無視しているためと考えられる。更に表 2 から明らかなように、コイル A のコイル幅がギャップの長さに対して十分広くないことに起因する誤差も考えられる。探りコイル B を使用した同様の結果を図 13 に示す。同図の結果においては、 $\nu = -1$ 、 -3 次以外はほぼ理論値と一致していることがわかる。

〈4・2〉 エンドリング切れの場合 1箇所および3箇所の連続したエンドリング切れ時の各コイル出力とそのスペクトルの実測結果と理論値の比較を図 14～図 16 に示す。同図より解析結果同様、異常箇所

の増加と共に、+調波成分は増加するが、-調波成分は逆に減少していることがわかる。この場合、図 15 のコイル A の結果はほぼ〈4・1〉節のバー切れ時と同じであるが、コイル B に関しては図 16 から、実測結果では ± 1 次の調波成分が理論値より小さくなっていることがわかる。

この理由は、 $\nu = \pm 1$ 次のような低次調波成分ほど、その周波数に対する回路インピーダンスの値が小さいので回転子と固定子間のはね返りが大きく、お互いに打消し合うためと考えられる。

また、図 2 のかご形回転子の構造から連続した k 箇所のバーおよびエンドリング切れは連続した $(k+1)$ 箇所のエンドリング切れに相当することも実験結果から確かめている。

(a) エンドリング切れ1箇所

(a) エンドリング切れ1箇所

(a) エンドリング切れ1箇所

(b) エンドリング切れ3箇所

(b) エンドリング切れ3箇所

(b) エンドリング切れ3箇所

図 14 コイル A の出力波形
(エンドリング切れ)

Fig.14. Output waveforms of the coil A (end-ring faults).

図 15 コイル A の出力スペクトル
(エンドリング切れ)

Fig.15. Spectrums of the coil A output (end-ring faults).

図 16 コイル B の出力スペクトル
(エンドリング切れ)

Fig.16. Spectrums of the coil B output (end-ring faults).

5. む す び

本論文では、文献(3)の解析結果であるかご形回転子のループ電流から、異常時の回転子および固定子の起磁力分布を解析すると共に、その結果のギャップ磁束密度からかご形回転子の異常検出に適する探りコイルの出力などを明らかにした。本論文で得られた結果を以下に示す。

(1) 電気角で約 90 度以内の連続したバー切れ時には、起磁力分布の正方向に回転する + 調波成分も逆方向に回転する - 調波成分も、異常箇所の増加と共に増加する。従って、+ 調波または - 調波のいずれの成

分からもバー切れを検出することが可能である。

(2) 電気角で約 90 度以内の連続したエンドリング切れ時には、起磁力分布の - 調波成分は異常箇所の増加と共に減少し、+ 調波成分は増加する。従って、+ 調波成分よりエンドリング切れの検出が可能である。

(3) 2 箇所の異常の場合、その異常箇所の間隔に対する調波成分の変化は + ν 次調波が間隔の空間的モード数を M として $M=|\nu-P|$ 、- ν 次調波成分が $M=\nu+P$ をもつように変化する。これより異常検出が困難となる間隔は、2 極ピッチ幅の探りコイルを使用し電気角が 360 度の場合のみである。

(4) ギャップ磁束分布の $\nu = +P$ 次および $-P$ 次の調波成分は、それぞれ固定子励磁電流に含まれる周波数成分 ω_1 および $(\omega_1 - 2\omega_m)$ 成分と同じ変化となる。従って、かご形回転子の異常検出に適する探りコイルの形状は $\nu = \pm P$ 次調波成分を除去する仕様がよい。更に、固定子 1~数スロットピッチ幅をもつ 2 個の探りコイルを 1 極ピッチの間隔で和動接続 (2 極機および多極機の場合) したもののほうが、2 極ピッチ幅の 1 個の探りコイル (多極機の場合のみ) の場合より、検出できる調波の次数が多く望ましい。

(5) スロットパーミアンス高調波などを無視した簡単な磁束密度の解析を用いたが、得られた理論値は実測結果とほぼ一致し、解析結果の有効性を確認した。

以上、本論文の結果より、ギャップ磁束検出によるかご形回転子の異常診断法の解析的な定量化が可能になり、診断結果の予測と評価が行えるようになった。なお、実際問題として、本論文で取扱った探りコイルを電動機的设计・製造段階から備え付けることは特別の場合を除いてあまり一般的な方法とはいえない。実用上は、漏れ磁束を検出するなどの簡便な診断方法が望ましい。本論文の結果をこの方向に発展させることについては今後の検討課題とする。

(平成 2 年 7 月 9 日受付, 同 3 年 2 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 森田・沖津:「誘導電動機の故障診断のための特徴周波数解析」, 電学論 D, 109, 205 (平成-3)
- (2) 森田:「パラメータ不平衡時の誘導電動機の波形解析」, 同上 D, 109, 733 (平成-10)
- (3) 森田:「かご形回転子異常時の三相誘導電動機の特性解析」, 同上 D, 110, 798 (平 2-7)
- (4) 佐田:「設備診断技術の現状と将来」, 電学誌, 99, 185, (昭 54)
- (5) J. Penman: "Condition monitoring of electrical drives", *IEE Proc. Pt. B*, 133, 142 (1986)
- (6) 田里:「高性能タービン発電機的设计, 運転および監視装置」, 東芝レビュー, 35, 995 (昭 55)
- (7) 天笠:「発電機の異常監視システム」, 三菱電機技報, 60, 379 (昭 61)
- (8) J. W. Wood: "Rotor winding short detection", *IEE Proc. Pt. B*, 133, 181 (1986)
- (9) D. Rogge: "Erkennung und Überwachung von Elektrischen Läuferunsymmetrien in Käfigläufern", *ETZ Archiv*, 3, 39 (1981)
- (10) 沖津・森田:「磁束検出法によるかご形回転子の異常診断」, 昭 59 電気学会大会, 749

森 田 郁 朗 (正員)

昭和 22 年 1 月 1 日生。46 年徳島大学大学院修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。47 年徳島大学工学部助手, 52 年同講師。主として, 電気機器の故障診断に関する研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会, 日本 ME 学会会員。