

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 3 日現在

機関番号：13903
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560297
 研究課題名（和文） 多次元確率密度関数を用いた誘導電動機の故障診断手法開発
 研究課題名（英文） Development of Fault Diagnostic Method for Induction Motors
 Based on Multi-Dimensional Probability Density Functions
 研究代表者
 水野 幸男（MIZUNO YUKIO）
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：50190658

研究成果の概要（和文）：誘導電動機の電氣的故障のうち発生頻度の高い固定子巻線短絡を、確率的に診断する手法を開発した。固定子巻線電流の振幅と位相が、巻線状態を反映した特徴量となることを明らかにし、健全電動機の特徴量分布と診断対象電動機の特徴量とから、誘導電動機の固定子巻線短絡の確率を求める方法を提案した。さらに、無負荷状態および負荷接続状態において、提案手法の有効性を確認した。提案手法は、電動機製造工場における出荷試験や電動機設置後の定期検査などに適用できる。

研究成果の概要（英文）：Probabilistic diagnosis method was developed to detect turn-to-turn short-circuit fault of stator winding, which is one of the most probable faults in induction motors. It was confirmed that magnitude and phase were features characterizing current following into a winding, depending on winding conditions. Fault probability, defined as internal area of the ellipsoid, was derived theoretically based on feature distributions of healthy motors and features of a target motor to be diagnosed. Examination using motors with some kinds of turn-to-turn short-circuit faults proved that the method proposed is effective under both no-load and loaded conditions. Possible applications of the method are outgoing inspections by motor manufacturers and periodical/non-periodical inspection at site.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：故障診断、誘導電動機、巻線短絡、電流、特徴量、確率密度関数、振幅、位相

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業用電動機は幅広い分野における基幹動力源として、プラントや工場の製造ラインで使われている。製造ラインで使用される電動機の故障は、多大な経済的損失をもたらす。

(2) 一方、民生用電動機の故障は、時として人的な被害をもたらす。例えば、エレベータ

用電動機の絶縁故障（短絡故障）による閉じ込め事故が報道されている。

(3) 現場では高経年の電動機が依然として多数使用されているにもかかわらず、近年のコスト削減の見地から、十分な保守管理がなされていない。

(4) 電動機の電氣的故障では、固定子巻線故障が 40%近くを占め、その 80%程度が電気絶縁に関する巻線間短絡故障との報告がある。巻線間短絡を放置すると、さらに絶縁劣化が進行して相间短絡や地絡など重大な事故に至る可能性があるため、比較的軽微な巻線間短絡の段階における故障検出技術を確立し、短絡進行状況を把握することは極めて重要となる。

(5) 以上述べた状況から、電動機の巻線間短絡故障検出ならびに信頼性確保に対する社会的要請はますます高まっており、オンラインで簡単に実施できる低コストで信頼性の高い故障診断手法の開発が強く望まれている。

2. 研究の目的

(1) 測定物理量の決定

オンラインで容易に測定でき、しかも巻線の短絡故障状態を反映する物理量を定める。

(2) 特徴量の抽出

(1)で決めた物理量を特徴づける量（特徴量）を抽出する。

(3) 確率的診断手法の考案

複数の特徴量の分布（確率密度関数）に基づき、しかも直感的に理解しやすい診断手法を考案し、故障確率を表す理論式を導出する。

(4) 故障診断システムの構築

(3)で導出した理論式と特徴量とから故障確率を計算するシステムを構築する。さらに、正常・故障を判定するために適切な閾値を導入する。

(5) 提案手法の有効性評価

無負荷時および負荷接続時において、提案手法の有効性を評価する。また、現場適用性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 対象電動機

定格 2.2kW、200V、8.6A、1705rpm の 4 極三相誘導電動機を使用する。W 相の固定子巻線に 1~6 ターンの巻線間短絡を人為的に導入する。

(2) 実験手順

図 1 に示す負荷接続時の回路において、各相巻線に流れる電流波形および線間電圧波形を測定し、波形の解析を行う。無負荷時においても同様の実験を行う。

(3) 特徴量抽出

巻線状態を反映する物理量を決定した上

で、その物理量を特徴づける量を抽出する。

(4) 故障確率を表す式の導出

正常電動機の特徴量の分布と診断電動機の特徴量とに基づいて故障確率を求める式を、理論的に導出する。

(5) 故障診断システムの構築

診断対象となる電動機の特徴量を入力することにより故障確率を求め、閾値に基づいて正常・故障を判定するシステムを構築する。

(6) 提案手法の有効性検討

種々の巻線短絡故障を導入した電動機や正常電動機に対する提案システムの有効性を、無負荷状態および負荷接続状態で評価する。

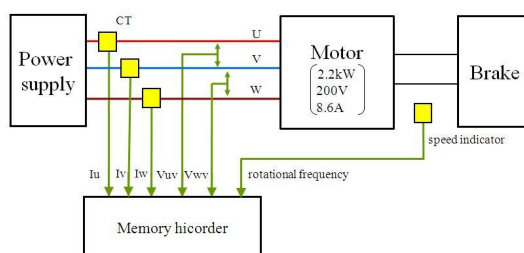


図 1 実験回路

4. 研究成果

(1) 測定物理量

電流波形および電圧波形の解析を行った結果、電流波形が巻線状態を反映する物理量となることが判明した。

無負荷時の電流波形の例として、W 相電流 I_w の波形を図 2 に示す。横軸はサンプリング番号で表された位相であり、1 周期で 8,350 点となる。巻線間短絡があると正常時に比べ、また、短絡時には短絡ターン数が増えるにつれて、電流の振幅が大きくなり位相が進むことがわかる。

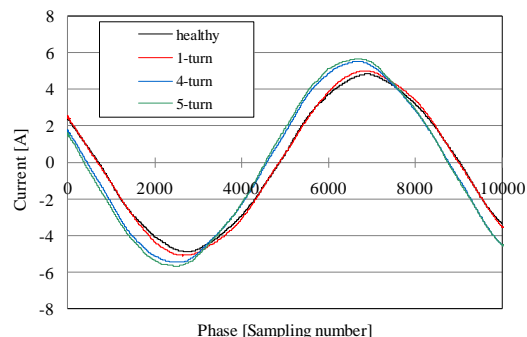


図 2 W 相電流波形の例（無負荷時）

(2) 特徴量

振幅および位相の分布の例を、無負荷時の

W相電流 I_w について図3に示す。また、負荷接続状態で回転数を変化させた場合の I_w の振幅および位相の分布を図4に示す。図4の凡例において、HおよびTはそれぞれ正常電動機および短絡導入電動機を表す。Tの前の数字は短絡ターン数、HおよびTの後の数字は回転数を意味する。

故障相 W の電流 I_w の振幅と位相の分布位置は、短絡ターン数の増大とともに図の右下、すなわち振幅が大きく位相が進む方向へ移動する傾向があるが、この現象は巻線短絡に伴うインダクタンス減少により説明できる。

正常相電流 I_u, I_v の特徴量分布は、図には示していないが、故障相電流 I_w と同様に巻線状態毎にまとまって分布する。しかしながら、短絡ターン数の増加に伴う特徴量の分布位置の変化は複雑である。

負荷接続時の特徴量分布は、無負荷状態と比較すると、 I_w において短絡ターン数の増加とともに振幅が増大し位相が進むという同じ傾向が認められる。一方、ひとつの巻線状態における特徴量分布領域が、多少広がっている。負荷接続時には回転数に数 rpm の変動があることが原因と考えられる。

以上の結果を踏まえ、電流の振幅および位相は、巻線の状態を反映する特徴量とみなすことができる。

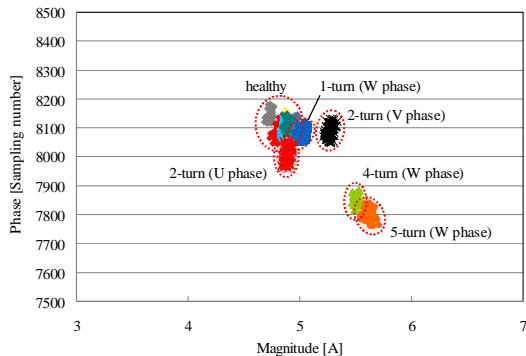


図3 W相電流の特徴量分布（無負荷時）

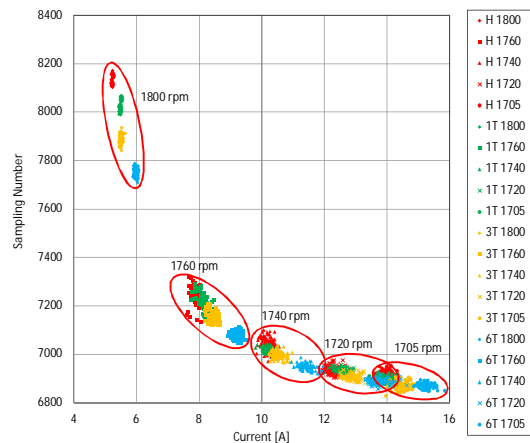


図4 W相電流の特徴量分布（負荷接続時）

(3) 故障確率を表す式

2つの特徴量 x_1 および x_2 が正規分布に従う場合の同時確率密度関数は、次式となる。

$$p(x) = \frac{1}{2\pi|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\bar{x})^T \Sigma^{-1}(x-\bar{x})\right\} \quad [1]$$

ここで、 \bar{x} は x の平均値、 Σ は共分散行列、 $|\Sigma|$ はその行列式である。特徴量 x_1 および x_2 が互いに独立である場合には、任意の特徴量 x が楕円体

$$\left(\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - \bar{x}_2}{\sigma_2}\right)^2 = l^2 \quad [2]$$

の内側に存在する確率は、次式で与えられる。

$$P = \iint p(x) dx_1 dx_2 = 1 - \exp\left(-\frac{1}{2}l^2\right) \quad [3]$$

確率 P の意味を 図5 を用いて説明する。正常電動機の固定子巻線電流の振幅と位相を特徴量とし、これらをそれぞれ x_1 および x_2 とする。 \bar{x}_1, \bar{x}_2 は振幅および位相の平均値、 σ_1, σ_2 はそれらの標準偏差を表す。正常電動機の電流の振幅および位相の同時確率密度は、図5の曲線となる。

ここで診断対象とする電動機から得られた振幅と位相がそれぞれ x_{d1} および x_{d2} であると仮定し、図中に点Aで示す。点Aを通る楕円体は、[3]式の x_1, x_2 をそれぞれ x_{d1}, x_{d2} として次式で求められる。

$$\left(\frac{x_{d1} - \bar{x}_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{x_{d2} - \bar{x}_2}{\sigma_2}\right)^2 = l_d^2 \quad [4]$$

従って、[3]式で与えられる確率 P は、診断対象の電動機の特徴量である点Aを通る楕円 ([4]式) が [2]式で与えられる正常電動機の特徴量分布領域の楕円と重なる割合を示す。これを故障確率と定義する。診断対象電動機の特徴量が正常電動機の特徴量分布領域から離れた点にある場合には、その特徴量の点を通る楕円が正常電動機の特徴量分布領域を全て覆うことになるため、故障確率は100%となる。逆に、診断対象電動機の特徴

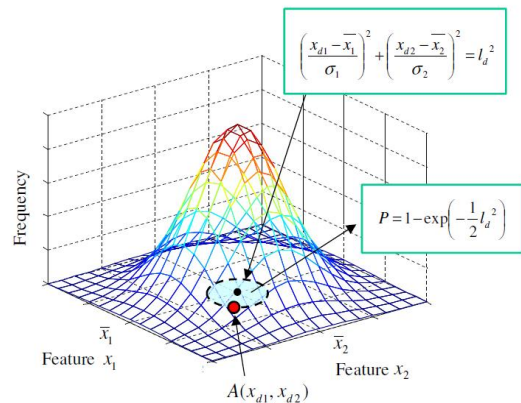


図5 故障確率の概念図

量が正常電動機の特徴量の平均値に近い場合には、故障確率は 0%に近くなる。すなわち、故障確率が低ければ巻線に短絡故障が発生している可能性は低く、故障確率が 100%に近くなるとほど故障発生の可能性が高いことになる。

(4) 故障診断手順

診断手順は、図 6 に示すように前処理プロセスと診断プロセスに分けられる。

前処理プロセスでは、健全電動機の固定子巻線電流を数 10 回測定することにより、電流の振幅および位相が分布する領域を求める。データを統計処理して振幅および位相の平均値と標準偏差を求める。電源電圧には若干の変動があり電流はその影響を受けるため、10 点移動平均フィルタを用いてこの影響を極力排除する。

診断プロセスでは故障確率を計算し、短絡故障の有無を判定する。まず、診断対象電動機の固定子巻線電流の特徴量として振幅と位相を入力する。この情報と、前処理プロセスで既に求められている健全電動機の電流の振幅および位相の平均値と標準偏差を用い、[4]式から故障確率 P を計算する。事前に実施する予備実験の結果に基づいて故障判定のための故障確率の閾値 P_c を予め設定しておき、 P が P_c を超える場合には巻線に短絡故障が生じていると診断する。

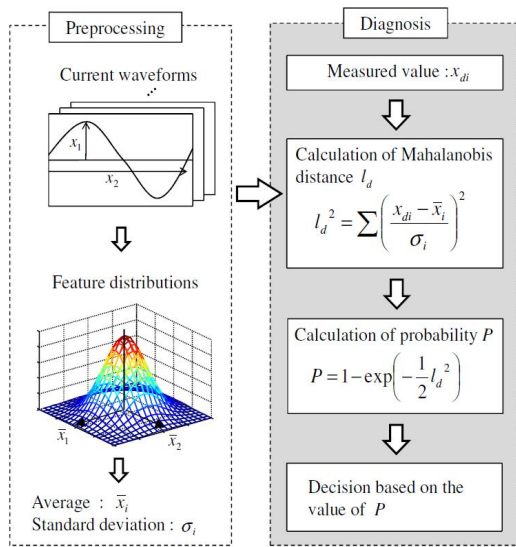


図 6 診断手順

(5) 提案手法の有効性

診断対象とする 1~6 ターンの巻線間短絡導入電動機から得られた特徴量を用い、[3]式により計算した故障確率を、各相電流 I_u 、 I_v 、 I_w に対して表 1 に示す。

巻線が正常である場合には、回転数にかかわらずいずれの相電流の特徴量に基づいた

故障確率も 60%台以下の値となる。無負荷時においては 1 ターンでも短絡すると故障確率は 100%となり、閾値を例えば 90%とすると正常電動機との判別が明確にできる。一方、負荷接続時においては、1 ターン短絡時には正常時と同程度の故障確率となることもあるが、短絡ターン数が 3 ターンの場合には故障確率が 80~90%程度と正常時に比べて高い値になる。6 ターン短絡になると、故障確率はいずれの相電流の特徴量に基づいて計算しても 100%となり、閾値を適切に設定することにより正常状態との判別が確実にできることがわかる。

故障相電流 I_w のみならず正常相電流 I_u および I_v の特徴量に基づいて計算された故障確率を使用しても、ほとんどの場合において故障診断が可能である。このことは、診断システムのコスト削減の観点から大きな利点となる。

さらに、各相電流の特徴量に基づいて求めた故障確率 3 つの積を取った結果を、表 1 に併せて示す。巻線正常状態における故障確率の積は 10%台の値であり、短絡ターン数の増加とともに概ね値が上昇し、6 ターン短絡時には 100%となる。このように故障確率の積を取ることにより、各相電流単独で得られる故障確率に比べて、短絡の有無および短絡状態の判定がより正確にできることがわかる。軽微な短絡から重度の短絡への移行過程を把握できる可能性が示唆される。

以上のことから、提案手法は電動機製造工場における出荷試験、現場設置後の保守管理に有効と考えられる。

表 1 故障確率およびその積

回転数 (rpm)	短絡ターン数	各相電流に基づく故障確率 (%)			積
		I_u	I_v	I_w	
1800 (無負荷)	0	54	61	53	18
	1	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
	6	100	100	100	100
1760	0	51	55	52	17
	1	77	50	88	37
	3	98	95	100	92
	6	100	100	100	100
1740	0	64	46	47	18
	1	68	32	53	14
	3	97	79	95	72
	6	100	100	100	100
1720	0	55	49	51	16
	1	78	68	66	40
	3	100	88	100	88
	6	100	100	100	100
1705 (定格)	0	50	46	42	10
	1	56	43	82	21
	3	82	96	100	78
	6	100	100	100	100

(6) 今後の課題

提案手法は、定格の異なる電動機や巻線短絡以外の故障にも適用可能と考えられる。今後、種々の電動機を対象にして試験を行い、提案手法の有効性を検証するとともに、例えばベアリング損傷などの機械的な故障への適用性を検討することが、今後の課題として挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① K. Ki shi no, Y. Mi zuno, H. Nakamura, " Insulation Diagnosis of Motor Winding Based on Feature Distributions", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Di electric Phenomena, 査読有、Vol.2, 2011, pp.587-590.
- ② H. Fukui, Y. Mizuno, H. Nakamura, " Probabilistic diagnosis of short circuit fault in stator winding of motor based on feature distribution", Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation、査読有、2010.
- ③ H. Fukui, Y. Mizuno, H. Nakamura, " Probabilistic diagnosis of short circuit fault in stator winding of motor", Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Di agnosis, 査読有、Vol.2, 2010, pp.1118-1121.

[学会発表] (計6件)

- ①岸野光佑、坂東広幸、水野幸男、中村久栄、「誘導電動機の特徴量分布特性と巻線短絡故障検出手法の検討」、平成24年電気学会全国大会、2012年3月21日、広島工業大学.
- ②岸野光佑、坂東広幸、水野幸男、中村久栄、「巻線正常時と短絡時における誘導電動機の特徴量分布特性」、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、2011年9月27日、三重大学.
- ③福井裕幸、原田幹治、岸野光佑、水野幸男、中村久栄、「負荷接続時における誘導電動機の巻線短絡検出」、平成23年電気学会全国大会、2011年3月17日、大阪大学.
- ④福井裕幸、水野幸男、中村久栄、「正常巻線の特徴量分布を用いた電動機固定子巻線の短絡診断」、平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会、2010年9月3日、九州大学.
- ⑤福井裕幸、山崎光弘、水野幸男、中村久栄、「特徴量分布に基づく誘導電動機の巻線

短絡診断法の提案」、平成22年電気学会全国大会、2010年3月17日、明治大学.

- ⑥福井裕幸、山崎光弘、水野幸男、中村久栄、「固定子巻線電流に基づく誘導電動機の短絡故障診断」、平成21年度電気関係学会東海支部連合大会、2009年9月11日、愛知工業大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

水野 幸男 (MI ZUNO YUKI O)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50190658

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

中村 久栄 (NAKAMURA HI SAHI DE)

株式会社トーエネック・技術開発室・研究
開発グループ・研究副主査