

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

電動機の零相電流分析による
絶縁劣化兆候検出手法の研究

申 請 者
岩永 英樹

情報生産システム工学専攻
設備診断技術研究

2013年 1月

事業用電力分野や一般工業分野などで使われている電動機ではプラントの円滑稼動のために、数年毎に絶縁試験を行い、電動機の運転年限を支配する固定子コイル絶縁の劣化診断（劣化兆候検出）が行われる場合が多い。しかし、低圧電動機における絶縁劣化の形態や進行度は、運転環境、使用条件、保守状況、電動機構造などの各種要因が複合化するため多種多様である。また対象台数が多く、絶縁劣化診断に要する費用、時間の費用対効果も無視できないため、計画的な設備保全に有効な絶縁劣化診断手法の構築は容易ではない。低圧電動機の劣化診断は、現在、低圧電動機停止による絶縁抵抗測定と絶縁抵抗値の傾向管理を中心に行われている。低圧電動機の保全は、依然として事後保全、または、時間計画保全に留まっている。低圧電動機の停止は、プラントの運用上多額の費用を要し、上記診断さえ実施されるのが困難な状況である。

本論文は、低圧電動機を停止しないで実施する運転時劣化兆候診断手法の構築について検討したものである。絶縁劣化兆候の代表的な事象であるレアショート（layer short, 層間短絡）および地絡発生時の磁気不平衡、不平衡電流に着目している。これらは、零相電流に検出され不平衡電流の解析による絶縁劣化兆候検出手法が提案されている。さらにこの手法を用いたオンライン絶縁診断システムの有用性について検討している。以下に、各章ごとにその内容を述べる。

第1章「序論」では、研究の背景について述べ、低圧電動機を停止しない、運転時劣化兆候診断手法の重要性に関して概説している。

第2章「電動機の概要と故障モード」では、国内の製鉄、非鉄金属、化学、製紙工業プラントで使用されている電動機を対象に行われた事故履歴調査の結果、電動機の故障モード、低圧電動機にて実施されている劣化兆候診断試験について述べている。

第3章「低圧電動機の絶縁劣化診断の現状」では、低圧電動機の絶縁劣化兆候診断技術の課題と低圧電動機の絶縁劣化・絶縁破壊の過程について述べている。低圧電動機の絶縁劣化兆候診断技術は、絶縁劣化兆候進展による構成材料の化学的変質、剥離、亀裂、摩耗、汚損物の付着等の絶縁性能低下を的確に検知することにある。現状の劣化兆候診断技術では、劣化状態と絶縁特性の関連が理論的に確立されていない。低圧電動機の絶縁劣化は外部環境に起因した汚損・吸湿と電氣的ストレスの複合作用が主要因で、これに熱的、機械的ストレスが付加され絶縁劣化兆候（対地絶縁劣化、素線絶縁劣化）が進展することが述べられている。

第4章「零相電流分析による絶縁劣化兆候検出」では、シミュレーションによる零相電流分析の絶縁劣化兆候検出手法について述べている。絶縁劣化兆候の代表的な事象であるレアショートおよび地絡発生による磁気不平衡、不平衡電流に着目している。運転時のレアショート、地絡を模擬した数値解析を行い、絶縁劣化兆候事象発生時には零相電流に高調波成分が発生、また

は高調波成分が増大する事象が生じることを確認している。劣化兆候事象の進展度を模擬するレアショート時の素線間抵抗減少および地絡時のアース間抵抗減少により 3 次成分（電源周波数×3）、5 次成分の高調波が発生・増大することが示され、これら 3 次、5 次成分の監視が絶縁劣化兆候事象検知に有効であることが分かった。

第 5 章「絶縁劣化模擬試験」では、実機を用いた絶縁劣化兆候模擬試験結果について述べている。固定子コイルエンドより配線を取り出し、対アース間および素線間に抵抗を挿入し、絶縁劣化兆候状態を模擬した試験回路にて運転中の零相電流の変化を検討した。零相電流の波形自体には正常状態と劣化兆候模擬状態の差異を確認することができなかった。そこで、正常状態の零相電流波形を基本波形として、基本波形と劣化兆候模擬状態の波形との差分波形を生成し、差分波形の高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）、短時間スペクトル（STFT：Short Time Fourier Transform）、連続ウェーブレット変換（CWT：Continuous Wavelet Transform）における零相電流の高調波成分の周波数変化ならびに周波数成分強度変化を定量的に検出している。地絡抵抗を 800kΩ から 1kΩ へ変化させた場合を見てみると、数値解析にて得られた地絡状態の特徴周波数である 3 次成分、5 次成分を検出している。地絡抵抗の変化にともなう特徴周波数の変化量についても周波数成分強度（パワースペクトル密度 PSD：Power Spectral Density）の変化は、3 次成分が $2.1 \times 10^{-5} \text{V}^2/\text{Hz}$ から $4.0 \times 10^{-1} \text{V}^2/\text{Hz}$ 、5 次成分が $7.0 \times 10^{-5} \text{V}^2/\text{Hz}$ から $4.0 \times 10^{-2} \text{V}^2/\text{Hz}$ となり、地絡検出・監視が可能であることが確認された。STFT と CWT は、時間・周波数変化に対する評価方法で、データサンプリング時間内の特徴量変化は無かった。差分波形の絶縁劣化兆候進展に伴う波形変化の検出には、汎用性およびデータ処理速度から FFT による特徴周波数（3 次成分、5 次成分）の検出、監視が絶縁劣化兆候検出において十分かつ有効であることを明確にしている。

第 6 章「オンライン絶縁劣化診断システムの開発」では、零相電流分析手法を用いたオンライン絶縁診断のプロトシステムを試作し、絶縁劣化兆候模擬試験結果とフィールド試験結果をもとにオンライン絶縁診断手法の内容と有効性について述べている。基準とする零相電流差分波形の PSD 値と診断対象波形 PSD 値の比（ ΔPSD ）を計算する。基準波形（正常状態）の 3 次および 5 次成分 ΔPSD を求め、正常状態から絶縁劣化兆候模擬状態への変化について評価した。地絡模擬状態で地絡抵抗が減少し、絶縁劣化兆候レベルが上昇すると ΔPSD は増大する。地絡抵抗の変化に伴う 3 次成分、5 次成分には ΔPSD 変化が確認された。これは数値解析結果と一致する。レアショート模擬状態の ΔPSD にはレアショート抵抗の変化による顕著な増減は確認されなかった。レアショートが発生・進行する場合は 3 次成分、5 次成分の発生、変動に特徴があることを見出している。

従来の絶縁特性試験法はプラントを停止させ、電動機を解列させる必要が

あり，運転されている状態（オンライン状態）で絶縁劣化兆候の計測・監視ができなかった。この零相電流分析による診断手法はオンライン状態で絶縁劣化兆候指標である ΔPSD の計測・監視と絶縁劣化兆候進行度の定量評価を可能とする。絶縁劣化兆候時における3次，5次成分の ΔPSD と絶縁抵抗値の相関係数は0.87～0.89であり，高い相関性を有する。 ΔPSD 監視による絶縁劣化兆候診断は，従来のオフライン状態での絶縁抵抗値による診断と同等の信頼性を有することを明らかにしている。

第7章「結論」は，本論文の結論であり，第2章から第6章までに得られた結果をまとめている。電動機の絶縁劣化兆候事象発生時の零相電流に関する数値解析と実機を用いた模擬試験を行い，零相電流波形分析による絶縁劣化兆候検出の有効性について理論的かつ実験的に確認できた。正常状態と絶縁劣化兆候状態における零相電流波形に差異が生じ，正常波形と診断対象波形の差分波形をFFTすることで，3次成分，5次成分が絶縁劣化兆候進行の特徴周波数であることが示された。「電気設備に関わる技術基準を定める省令」に規定されている $1.5 \times E$ （ E ：定格電圧）レベルの破壊電圧値を安全運転下限とし，絶縁抵抗値と破壊電圧値の平均値直線，99%信頼下限曲線との交点をそれぞれ絶縁抵抗値の警報値（ $0.80M\Omega$ ），故障値（ $0.15M\Omega$ ）とすると，3次成分の ΔPSD はそれぞれ 5.8×10 および 6.1×10^2 ，5次成分はそれぞれ4.2および 4.6×10 と設定できる。従来の絶縁特性試験法はオンライン状態での絶縁劣化兆候を計測・監視できなかったが，本論文で提案した手法は，劣化兆候進行度を ΔPSD の変化量による定量評価でき，実用化が十分に可能な零相電流波形分析によるオンライン絶縁劣化兆候診断システムを実現することができている。このオンライン絶縁劣化兆候診断システムの実現により，低圧電動機の絶縁劣化兆候診断技術の現状の課題の解決が可能となり，低圧電動機の設備保全の高度化と保全コスト低減を実現できるものである。

第8章「今後の展開」では，本研究の成果をもとにした今後の展開について総括している。零相電流波形分析による絶縁劣化兆候検出手法は，理論的には高圧電動機への適用も可能である。高圧電動機における部分放電のオンライン診断装置では識別，診断困難であるレアショート事象にも，零相電流波形分析手法による診断の適用が期待できる。

以上本論文は，低圧電動機の稼働時劣化兆候診断を実現し，事業用電力分野や一般工業分野における信頼性向上も実現している。また発電所など社会基盤の安定に寄与し，設備診断工学の高度化に貢献し価値が高い論文と評価できる。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2012年11月28日

主査	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	犬島	浩
	早稲田大学	教授	工学博士（九州大学）	松本	將
	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	吉江	修