

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

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

本研究では、電動機の設備保全の高度化、保全コスト低減を実現できる劣化診断手法の構築に向けて、絶縁劣化事象の代表的な事象である地絡、レアショート（layer short、層間短絡）発生時の磁気不平衡、不平衡電流に着目し、零相電流として検出される不平衡電流の分析による絶縁劣化兆候検出手法と零相電流分析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研究した。以下に、各章ごとにその内容を述べる。

第1章では、本研究の背景について述べている。突発故障で復旧に長期間ならびに多額の費用を要する高圧電動機については積極的な絶縁劣化診断技術に関わる研究、絶縁劣化診断や延命化対策などの設備保全活動が行われて来ている。一方、低圧電動機の設備保全は絶縁抵抗測定と絶縁抵抗値の傾向管理を中心に行われ、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。低圧電動機を含めた電動機の設備保全の高度化、状態監視保全を可能とするオンライン絶縁診断手法の開発・実用化が望まれている。

第2章では、国内の製鉄、非鉄金属、化学、製紙工業プラントにて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診断試験について述べている。電動機の主たる故障モードは、巻線絶縁の経年劣化に起因して生じる絶縁破壊であり、電動機の保守現場では絶縁劣化診断試験を実施し、巻線絶縁の特性を診断し、絶縁劣化レベルの判定、残存絶縁耐力や絶縁破壊に至る運転年数を推定している。絶縁劣化診断試験は、主に電気的な手法で、巻線に直流あるいは交流電圧を印加したときの漏れ電流や部分放電に関する諸特性から絶縁物の特性を判断するものである。直流電圧によるものは絶縁抵抗の測定を主目的としている。また、交流電圧によるものは部分放電に基づく特性値の変化を測定することを目的にしている。

第3章では、低圧電動機の絶縁劣化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診断技術は、絶縁劣化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が、現状の劣化診断技術では、劣化状態と絶縁特性の関連が理論的に確立されておらず、また、高電圧を印加できないこともあり、劣化現象を調査する手段も限られ、調査項目も少ない状態である。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（対地絶縁劣化、素線絶縁劣化）が進展する。

第4章では、零相電流分析による絶縁劣化兆候検出手法について述べている。絶縁劣化事象の代表的な事象であるレアショート、地絡発生による磁気不平衡、不平衡電流に着目し、運転時のレアショート、地絡時を模擬した数値解析を行い、絶縁劣化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が確認された。劣化事象の進展度を模擬する地絡時のアース間抵抗，レアショート時の素線間抵抗が小さくなると3次成分（電源周波数×3），5次成分の高調波成分が特徴的に発生・増大する。

第5章では，実機を用いた絶縁劣化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，絶縁劣化状態を模擬した試験回路にて運転中の零相電流の変化について確認した。零相電流の生波形自体では正常状態と劣化模擬状態の差異を確認することができなかつた。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，短時間スペクトル，連続ウェーブレット変換を行い，波形変化の特徴を抽出した。高速フーリエ変換は，地絡抵抗（絶縁劣化レベル）の変化にて生じる零相電流の高調波成分の周波数変化ならびに信号強度変化を定量的に検出している。地絡抵抗を800k から1k 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次成分を検出しており，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信号強度（パワースペクトル密度）の変化にて定量検出・監視が可能であることが確認された。短時間スペクトル，連続ウェーブレット変換は，時間による周波数変化，信号強度変化は可視的に判別し易いが，絶縁劣化事象の進展速度（年単位）を踏まえるとデータサンプリング時間内の特徴量変化の検出・監視は絶縁劣化兆候検出における有効性は低いと評価される。差分波形の絶縁劣化進展に伴う波形変化の検出特性，汎用性，データ処理速度を考慮すると高速フーリエ変換による特徴周波数（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最適であり，有効であると評価される。

第6章では，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，絶縁劣化模擬試験モデルでのデータ収集試験結果とフィールドデータによるデータ収集試験結果をもとに零相電流分析手法を用いた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。零相電流差分波形の高速フーリエ変換にて得られる卓越周波数成分のパワースペクトル密度（PSD）の絶縁劣化模擬状態のPSD値の基本波形（正常状態）の1次成分PSD値に対する比率（差分波形PSD比率 PSD）を求め，正常状態から絶縁劣化模擬状態への変化について評価した。地絡模擬状態では地絡抵抗が小さくなり，絶縁劣化レベルが高くなると差分波形PSD比率は増大する。特に3次成分，5次成分は特徴的であり，数値解析結果と整合する地絡抵抗の変化に伴う周波数変化，信号強度変化が確認された。レアショート模擬状態の差分波形PSD比率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つたが，各特徴周波数の差分波形PSD比率レベルの差異が確認され，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，変動が特徴である。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）で絶縁劣化パラメータの計測・監視ができなかったが，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パラメータである差分波形PSD比率の計測・監視と絶縁劣化進行度の定量評価を可能とする。絶縁劣化時の差分波形の特徴周波数（1次成分，3次成分，5次成分）の差分波形PSD比率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。差分波形PSD比率監視による絶縁劣化診断は，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。また，差分波形PSD値および差分波形PSD比率（PSD）の監視と絶縁劣化判定基準にて，オンライン状態での絶縁劣化兆候の検出と異常判定が可能となる。

第7章は，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纏めている。電動機の絶縁劣化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事象が発生した異常状態における零相電流波形に差異が生じ，正常状態と異常状態の差分波形の高速フーリエ変換を行うことで特徴周波数の変化兆候を定量的に検出できた。差分波形の3次成分，5次成分が絶縁劣化進行の特徴周波数であり，この特徴周波数の変化は絶縁抵抗値，絶縁残存絶縁破壊電圧値と高い相関性が確認された。従来の絶縁特性試験法はオンライン状態での絶縁劣化パラメータ計測・監視ができなかったが，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パラメータである零相電流の差分波形PSD比率の計測・監視を可能とした。劣化進行度を差分波形PSD比率の変化量にて定量評価でき，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診断システムを実現することができた。このオンライン絶縁劣化診断システムの実現にて低圧電動機の絶縁劣化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の実現を十分に期待できるものとなる。

第8章は，本研究の成果をもとにした今後の展開について述べている。本稿では，差分波形PSD値比率と絶縁余寿命（破壊電圧値）の相間データベースを構築できていないため，[絶縁抵抗値と差分波形PSD値比率]，[絶縁抵抗値と絶縁余寿命（破壊電圧値，破壊電圧値）]，[運転経過年数と絶縁余寿命（破壊電圧値）]の相関性より絶縁余寿命年を間接的に推定する方法を検討した。絶縁余寿命年の絶対値推定の精度を高めるために差分波形PSD比率と絶縁破壊電圧値の直接の相間データベースの構築を進める。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も適用可能であり，高圧電動機への適用について検討する余地はある。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の診断については零相電流波形分析手法による診断の適用が期待できる。