

# 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

岩永 英樹

2013 年 1 月

早稲田大学審査学位論文（博士）

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

岩永 英樹

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

2013年1月

# 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

## 目次

<b>第1章 序論</b>	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本論文の概要	2
<b>第2章 電動機の概要と故障モード</b>	5
2.1 電動機の概要	5
2.2 電動機の故障モード	9
2.3 非破壊絶縁劣化診断試験	16
2.4 現状のオンライン絶縁劣化診断技術・システム	16
2.5 第2章のまとめ	27
<b>第3章 低圧電動機の絶縁劣化診断の現状</b>	28
3.1 低圧電動機の絶縁劣化診断技術の課題	28
3.2 低圧電動機の絶縁劣化過程	28
3.3 絶縁劣化傾向に関わるフィールド調査事例	33
3.4 低圧電動機の絶縁特性試験	37
3.5 絶縁特性試験の有用性	38
3.6 低圧電動機の点検と保守	40
3.7 第3章のまとめ	42
<b>第4章 零相電流分析による絶縁劣化兆候検出</b>	43
4.1 絶縁劣化時の零相電流の変化	43
4.2 零相電流高調波成分の数値解析	46
4.3 解析モデル	49
4.4 解析結果	51
4.5 第4章のまとめ	56

第5章 絶縁劣化模擬試験	58
5.1 絶縁劣化の模擬と試験回路	58
5.2 差分波形の生成と特徴抽出	59
5.3 絶縁劣化模擬試験結果	73
5.4 第5章のまとめ	87
第6章 オンライン絶縁診断システムの開発	88
6.1 オンライン絶縁診断システムの概略	88
6.2 差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD)	90
6.3 零相電流分析によるオンライン絶縁診断手法の有効性	95
6.4 絶縁劣化判定基準	97
6.5 絶縁余寿命推定要領の検討	98
6.6 第6章のまとめ	103
第7章 結論	105
第8章 今後の展開	108
謝 辞	109
参考文献	110
研究業績	114

## 第1章 序 論

### 1. 1 研究の背景

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。特に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、低圧電動機についても絶縁劣化診断技術に関わる研究、実機診断が行われているが、絶縁破壊に至る運転年数推定、所謂、余寿命推定につながる設備診断手法の構築に至っていない。

すなわち低圧電動機の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り、また、低圧電動機は高圧電動機に比べて圧倒的に対象台数が多く、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、絶縁抵抗測定と絶縁抵抗値の傾向管理を中心に行われ、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。

電動機はひとつのプラントに多台数が設置、運転されており、絶縁劣化診断などの設備診断に要する時間、費用対効果は無視できないため状態監視保全への移行は容易ではない。特に低圧電動機については、多数の絶縁劣化診断技術に関わる研究、実機診断が行われているが、寿命予測、ライフマネージメントにつながる設備保全活動が定着する程の診断手法の構築に至っておらず、運転台数が多く、高圧電動機以上に費用対効果の課題を有する。したがって、低圧電動機の設備保全は、絶縁特性試験結果の傾向管理と運転年数を中心とした時間計画保全または、絶縁破壊事象発生後の事後保全に留まっているのが現状である。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。

本論文では、低圧電動機を含めた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レアショート（layer short, 層間短絡）、地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効性について研究した。

## 1. 2 本論文の概要

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、主に電氣的な手法で、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。化学的試験、機械的試験は巻線絶縁の劣化現象との相関性、診断アルゴリズムが明確になっているものが数少ないため、普及に至っていない。

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電動機構造により異なり、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。絶縁劣化が進展すると、地絡、相間短絡、レアショートの絶縁破壊事象に至る。

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負荷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、波形変化を確認することができなかった。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。3次成分は $2.1 \times 10^{-5} \text{ V}^2/\text{Hz}$ から $0.4 \text{ V}^2/\text{Hz}$ へ、5次成分は $7.0 \times 10^{-5} \text{ V}^2/\text{Hz}$ から $0.04 \text{ V}^2/\text{Hz}$ へ変化・増大している。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。試作したプロトシステムは、第5章にて零相電流波形の波形分析手法として有効であることが検証された零相電流差分波形の高速フーリエ変換による波形分析手法を用いた。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  $\Delta \text{PSD}$ ）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ったが、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。差分波形の卓越周波数の検出・監視、特に3次成分、5次成分の変化兆候の監視が絶縁劣化兆候検出に有効であることが確認された。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。オンライン状態での差分波形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。

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。低圧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（事後保全→状態監視保全）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。サンプル機にて採集されたデータにて絶縁余寿命年推定を行ない，絶縁抵抗値の計測値と推定値を比較すると，推定値の計測値に対する誤差率は1%～11%で高い精度が確認された。オンラインモニタリングの段階での多数の診断対象機の絶縁劣化レベルのスクリーニング，保守の優先度評価には十分な精度を有するが，絶縁余寿命年の絶対値推定の精度を高めるために実証データの積み重ねと差分波形 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，零相電流差分波形の高調波が絶縁劣化の前駆現象検出に有効であるか，否かを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。

## 第2章 電動機の概要と故障モード

### 2. 1 電動機の概要

#### (1) 基本構造と主要部品

電動機の主要部品は、固定子、回転子、軸受、および電動機として作動するために必要な端子箱、冷却ファンなどの補助機構である。これらを機能上から見ると、電流を流すことによって回転磁界を作る固定子コイルと、コイルを保持し、かつ磁束の通路を形成する鉄心がもっとも重要な部分である。更に固定子鉄心を支持するフレーム、回転トルクを発生させ、回転トルクを伝達する回転子鉄心、回転子バー、軸がある。この軸を支えて回転を容易にする軸受と軸受を支持するブラケットより構成されている。その他の補助機構として、外部から電力を取り入れるリード線の引き出し部の端子箱、外気を吸引する外扇ファン、機内空気を循環させる内機ファンがある。図 2.1 に電動機の基本構造を示す。

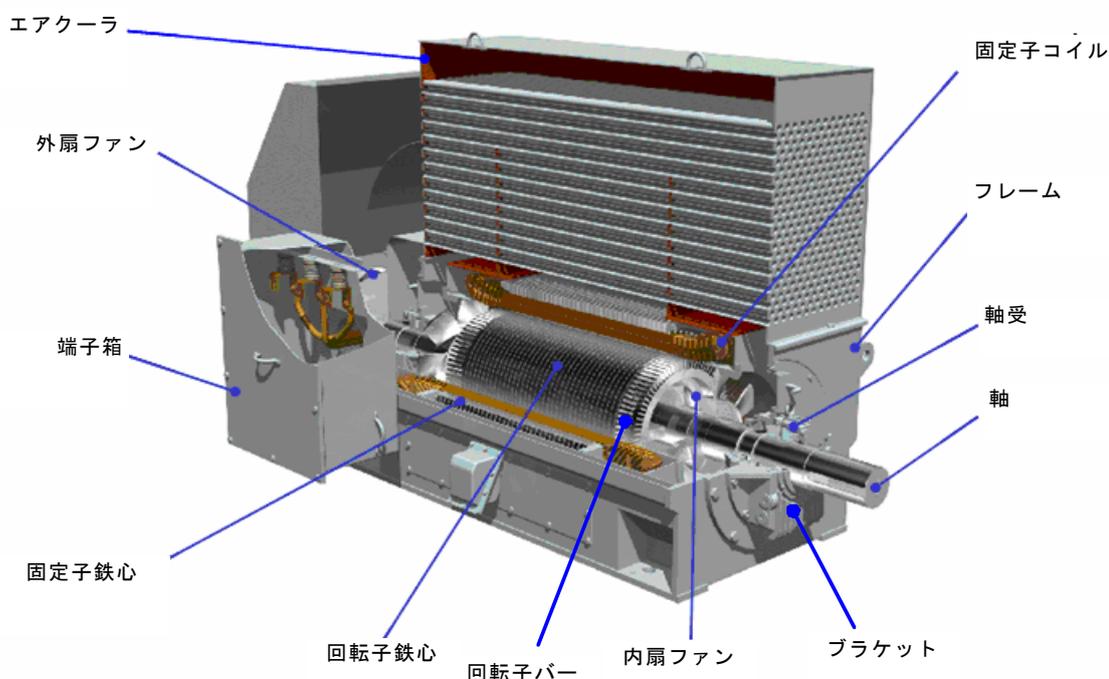


図 2.1 電動機の基本構造 (全閉外扇形)

#### (2) 電圧区分と絶縁方式

電気設備に関する技術基準を定める省令において表 2.1 のごとく電圧区分されている。通常、交流電動機においては定格電圧が 600V 以下のものを低圧電動機と称し、600V を超えるものを高圧電動機と称している。

表 2.1 電圧区分

区分	交流	直流
低圧	600V 以下のもの	750V 以下のもの
高圧	600V を超え 7000V 以下のもの	750V を超え 7000V 以下のもの
特別高圧	7000V を超えるもの	7000V を超えるもの

電動機固定子コイルの絶縁方式は、乱巻絶縁方式と型巻絶縁方式に大別され、その特徴は次の通りである。一般的には低圧電動機は乱巻絶縁方式を高圧電動機は型巻絶縁方式を適用し使い分けられている。

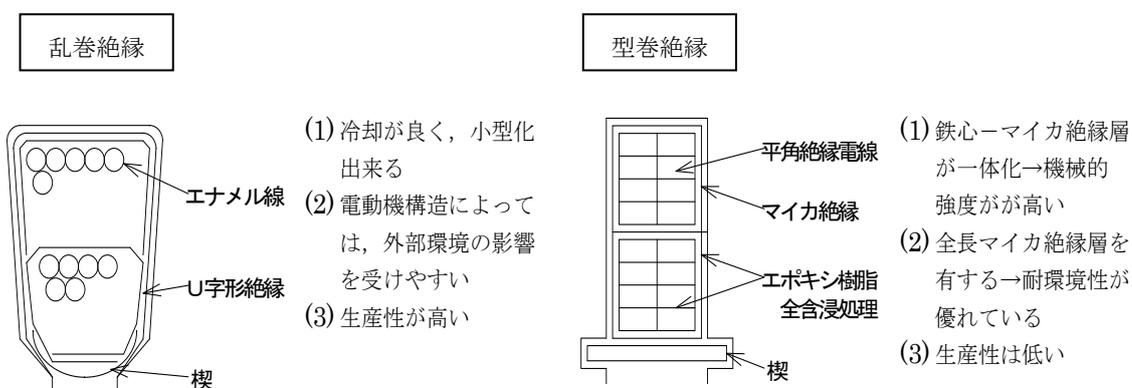


図 2.2 電動機の固定子コイル絶縁方式

### (3) 保護形式とその特徴

電動機は、全閉形と開放形の 2 種類の保護構造に大別され、その特徴は次の通りである。

#### ①全閉形

工具・電線など最小幅、または最小厚みが 1mm より大きいものが機内の回転部分、または導電部分に触れないようにした構造、かつ如何なる方向からの水滴によって有害を受けない構造と国内外規格に規定されている。全閉形には外部ファンで外気をエアクーラの冷却管内、または電動機フレーム表面に強制的に流して機内加熱空気と熱交換し、固定子コイルを冷却する全閉外扇形と冷却水を通すエアクーラにて機内加熱空気と熱交換し、固定子コイルを冷却する全閉内冷形がある。冷却水系統などの付帯設備を要しない全閉外扇形が広く用いられている。

固定子コイルは外部環境から構造的に遮蔽されるため、外部環境条件の影響は殆ど受けない。

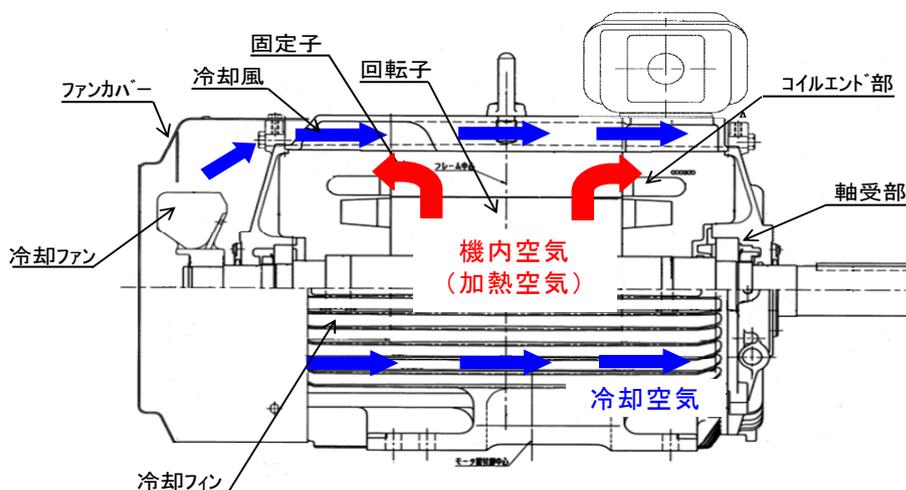


図 2.3 全閉外扇形構造 (フィンフレームタイプ)

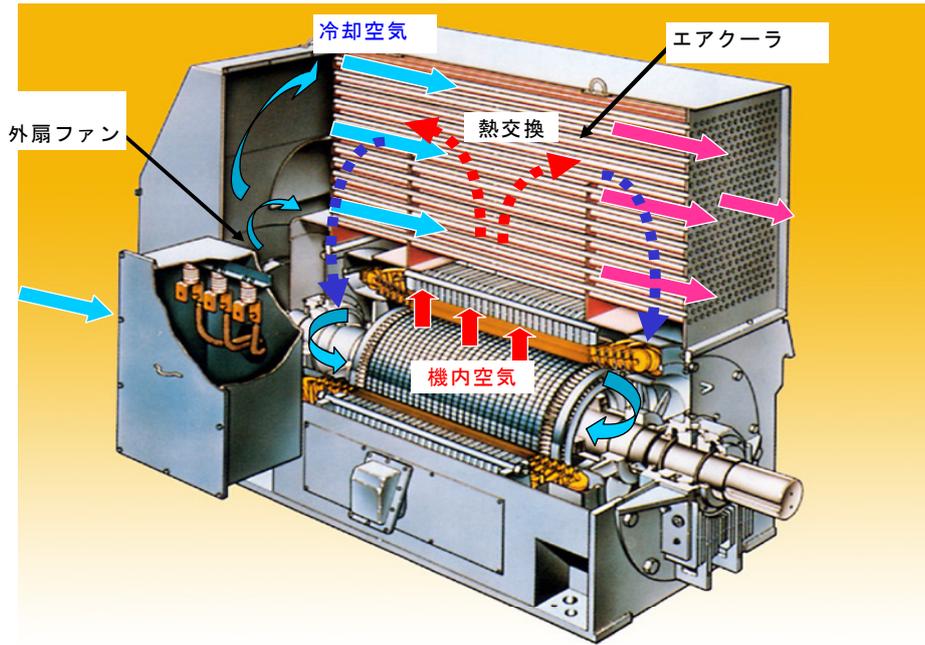


図 2.4 全閉外扇形構造（トップハットフレームタイプ）

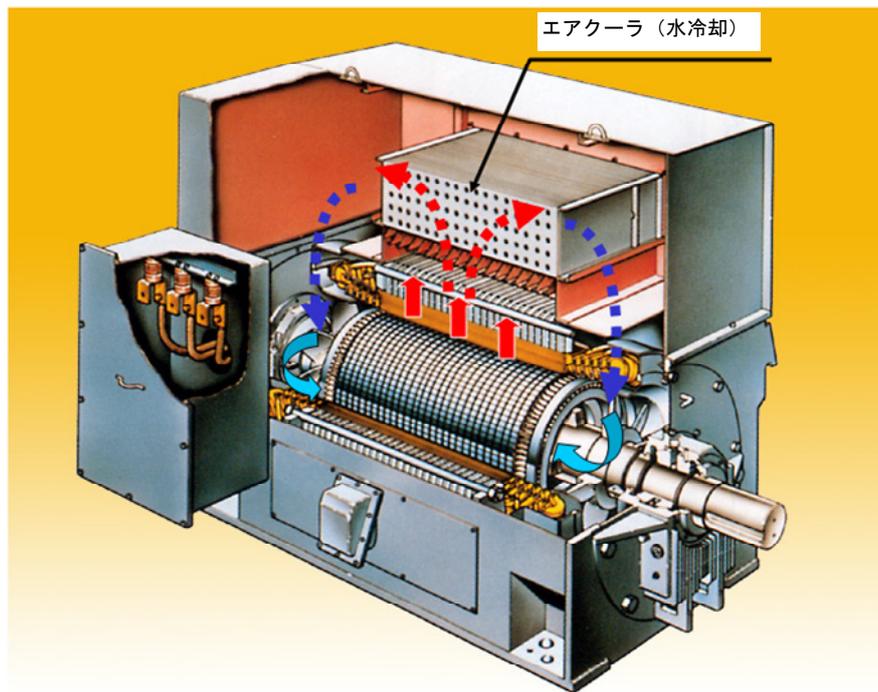


図 2.5 全閉内冷形構造（トップハットフレームタイプ）

②開放形

指などが機内の回転部分，または導電部分に触れないように 12mm 径を超える同形異物が侵入しないような構造で，かつ鉛直から 15° 以内の方向に落下する水滴によって有害な影響を受けない構

造と国内外規格に規定されている。

外気を直接電動機本体内部に吸入し、固定子コイル、軸受等の各部を冷却するので全閉形に比べ軽量、安価である。絶縁の耐水性、耐薬品性の向上で数千 kW の出力機まで使用されているが、外気に含まれる塵埃が固定子コイル端部および冷却用ダクトに付着・堆積しやすく、外部環境条件（湿気、汚損等）によっては絶縁劣化が加速される。

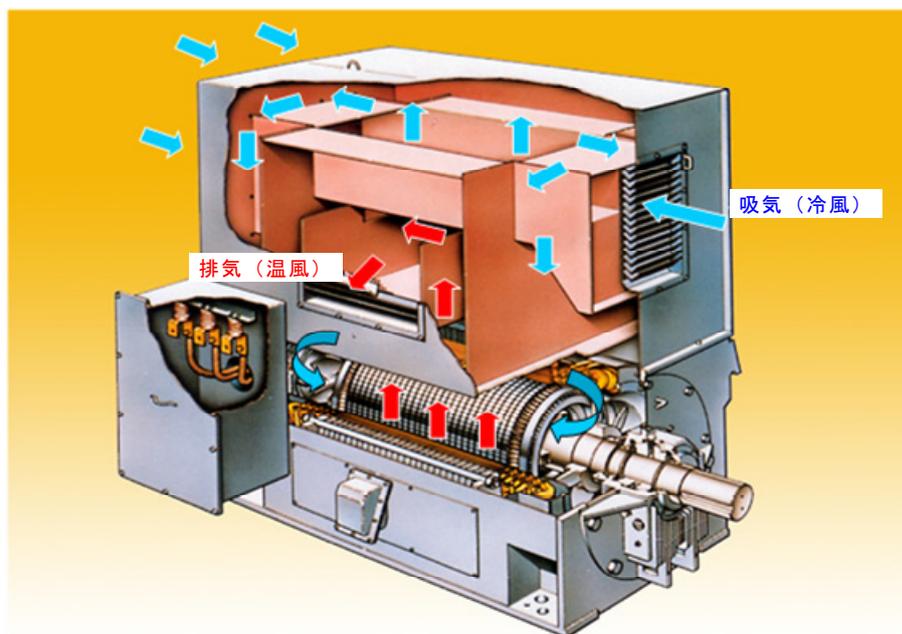


図 2.6 開放形構造（トップハットフレームタイプ）

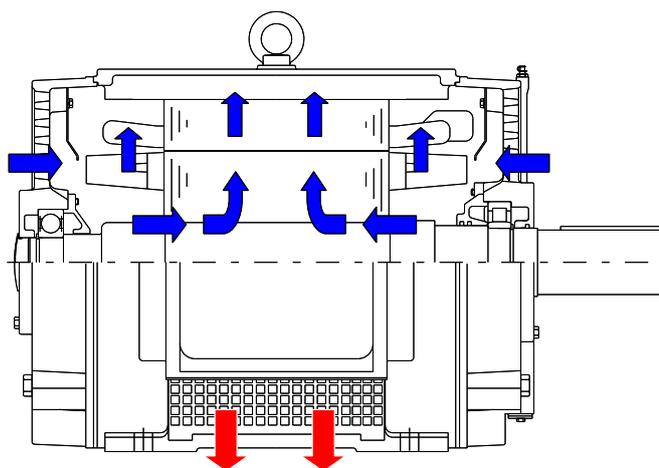


図 2.7 開放形構造（フィンフレームタイプ）

## 2. 2 電動機の故障モード

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を図 2.8，図 2.9，図 2.10，図 2.11 に示す。調査結果より電動機の事故発生は，一般に以下の傾向にある。

(1) 運転年数 10 年未満では，振動，軸受が原因となる事故の割合が多く，使用年数 11 年以上では絶縁劣化による事故の割合が高くなる。

原因分類が「絶縁劣化」，「環境」は絶縁破壊事象であり，絶縁破壊が事故発生の 75%以上を占める。運転年数 21 年以降の事故頻度が減少しているのは，大半の電動機が修理，または予防保全がなされているためである。

(2) 巻線に発生した事故は 85%（定常運転時：84%，始動時：86%）で事故の大半が巻線に発生している。

(3) 始動時間と定常運転時間とでは，起動時間が極めて短いことを考え合わせると，始動時の事故発生の割合は非常に高いといえる。また，高始動頻度運用の電動機が増える中，更に割合が高まる傾向にある。

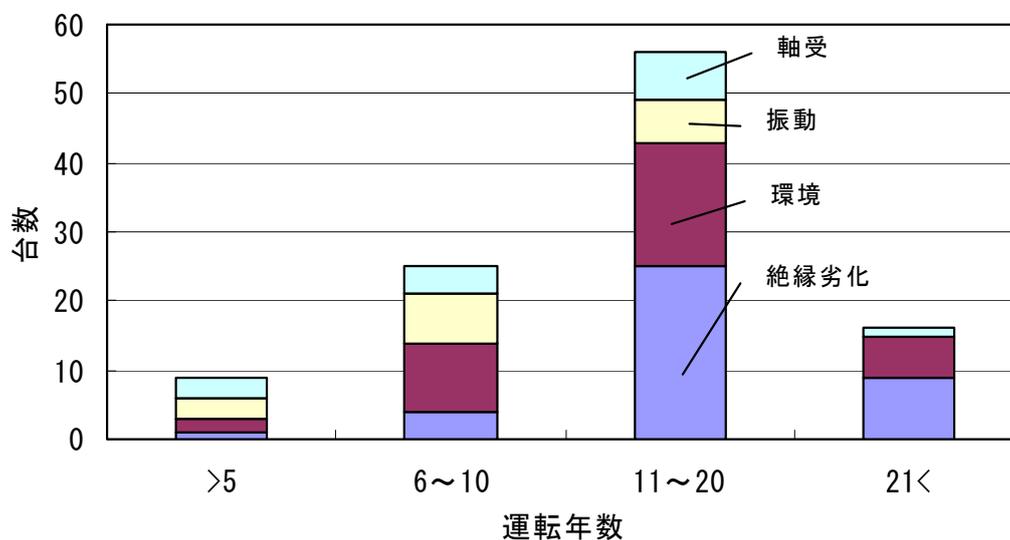


図 2.8 運転年数と事故原因の関係

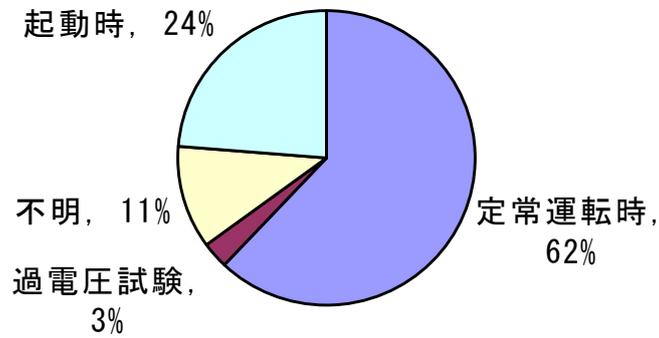


図 2.9 事故発生時の状態

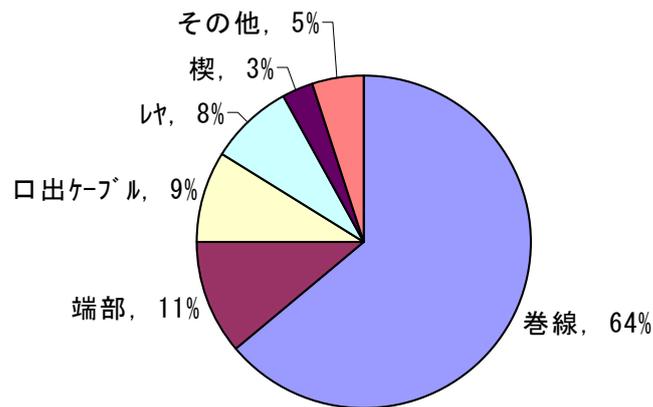


図 2.10 定常運転時の事故発生部位

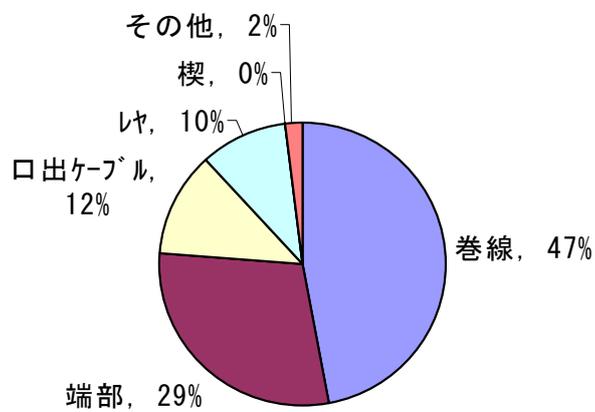


図 2.11 始動時の事故発生部位

電動機の故障は、熱劣化、電圧劣化、機械的劣化、環境劣化の複合原因による絶縁破壊と振動、軸受故障などの機械的故障が大半を占め、国内外での電動機の事故事例調査結果より、異常兆候が検出できる主な故障モードとして表 2.1 の故障モードが挙げられる。図 2.12 に電動機の主な故障、劣化部位と図 2.13～図 2.20 に故障事例を示す。

表 2.2 電動機の主な故障モード

故障部位	故障モード
固定子	絶縁破壊, トラッキング
	ウェッジ (楔) 緩み
回転子	回転子バー切れ
軸受	軸受異常

固定子の絶縁破壊事象、ウェッジ (楔) 緩み事象は、固定子コイル絶縁の経年劣化に起因する。回転子バー切れは主に電動機の始動停止の繰り返しに起因する。軸受異常は軸受自体の経年損耗、グリース劣化、組立不良、保守不良など様々である。

電動機において生じる故障の大半を占める固定子コイルの絶縁破壊事象は電動機の機能喪失に繋がり、また絶縁破壊事象の大半が経年劣化事象であるため、固定子コイル絶縁劣化特性、寿命特性が電動機の寿命を支配している。従って、電動機の保守およびライフアセスメントにおいて絶縁劣化診断、絶縁余寿命診断は不可欠である。

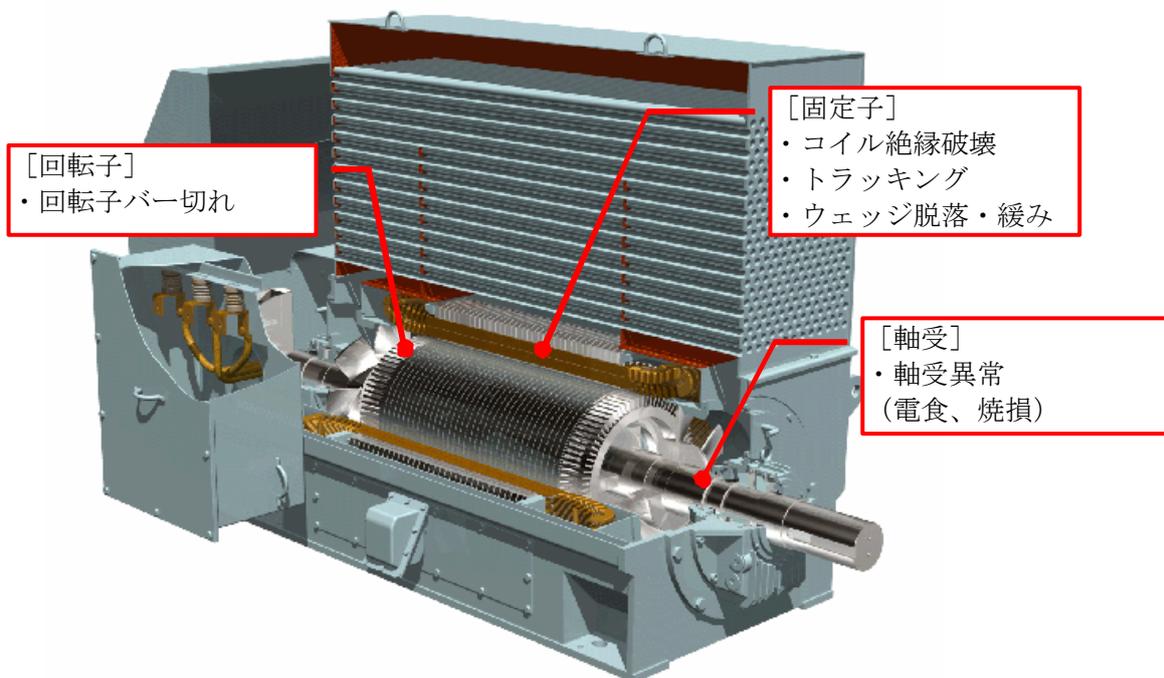


図 2.12 電動機の主な故障・劣化部位

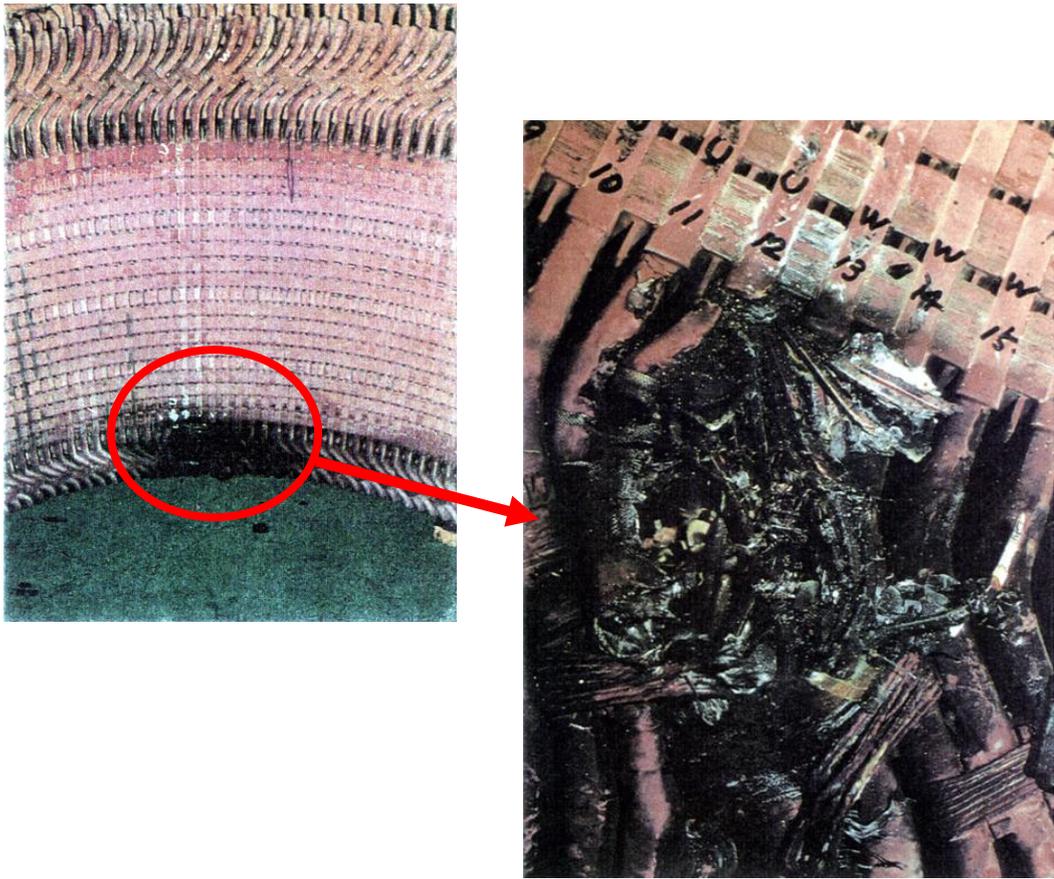


図 2.13 固定子コイル絶縁破壊（相間短絡→地絡）

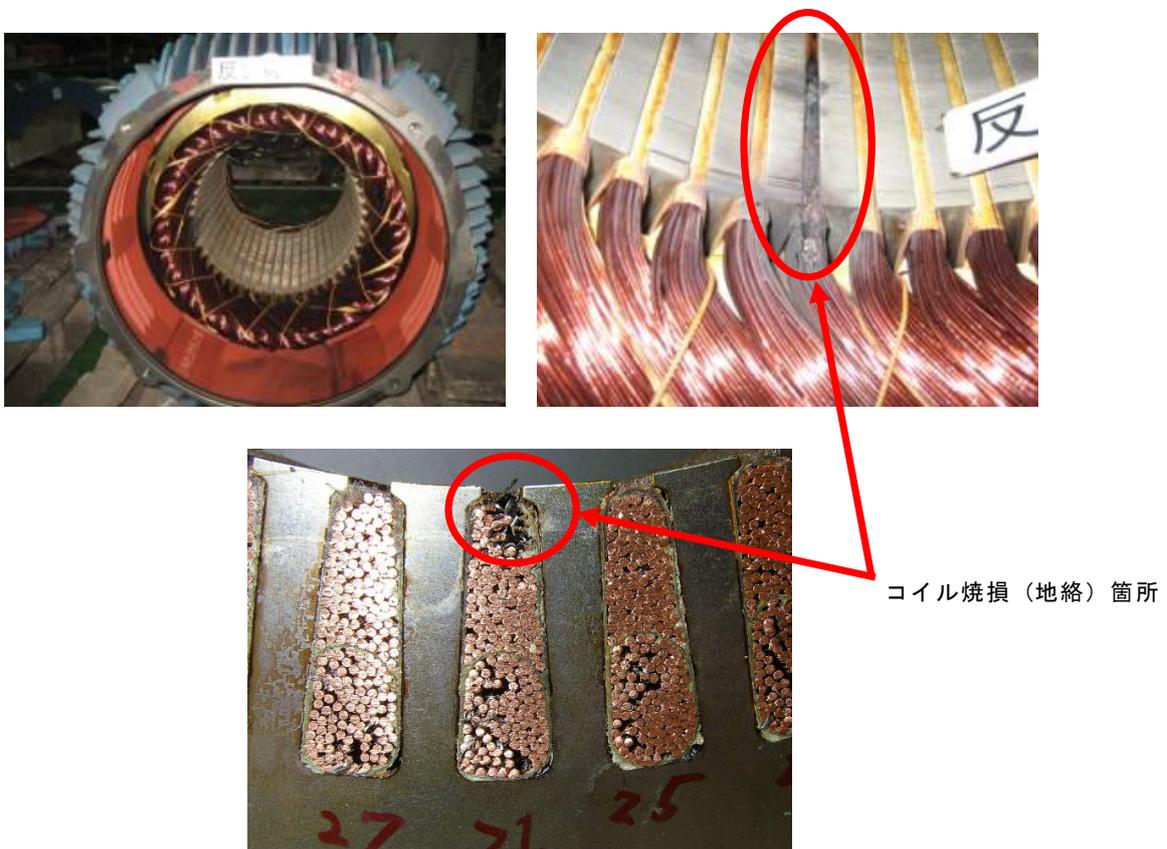


図 2.14 固定子コイル絶縁破壊（リアショート→地絡）

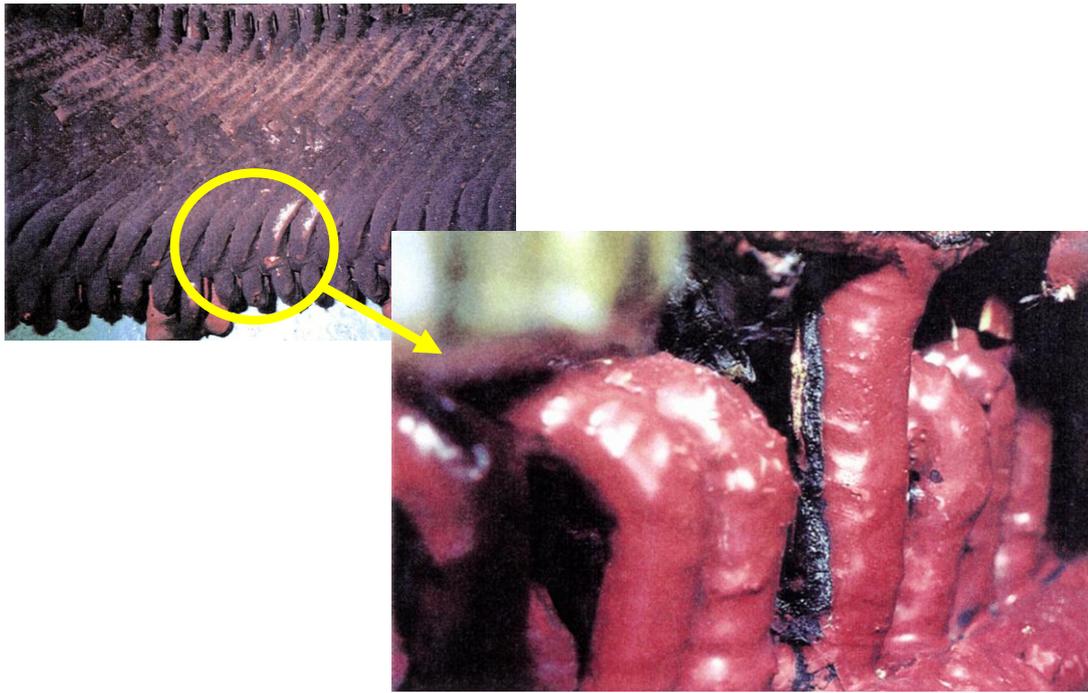


図 2.15 固定子コイルトラッキング

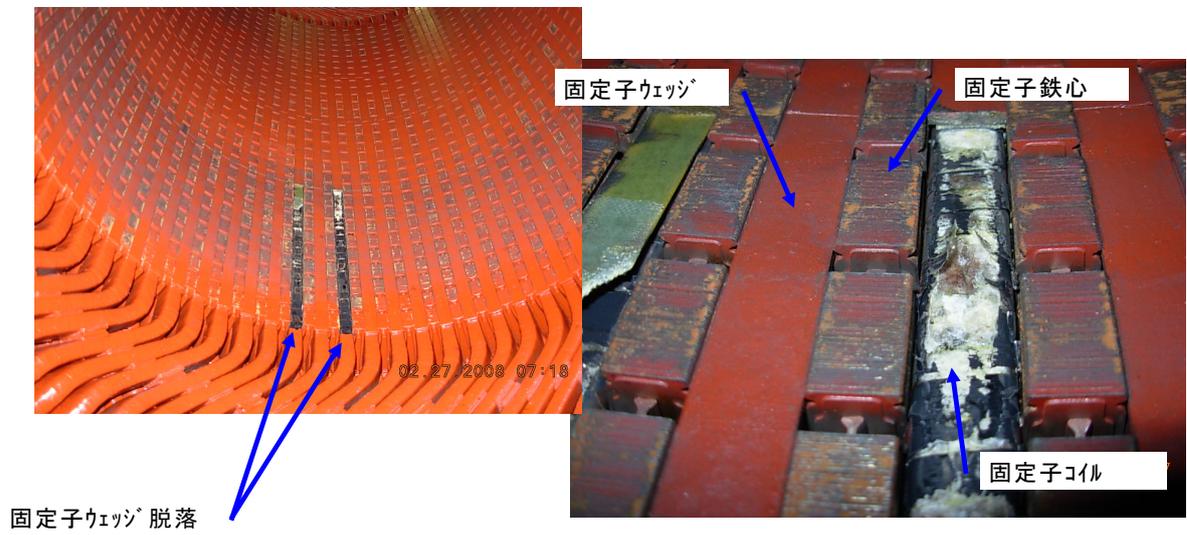


図 2.16 固定子ウェッジ脱落

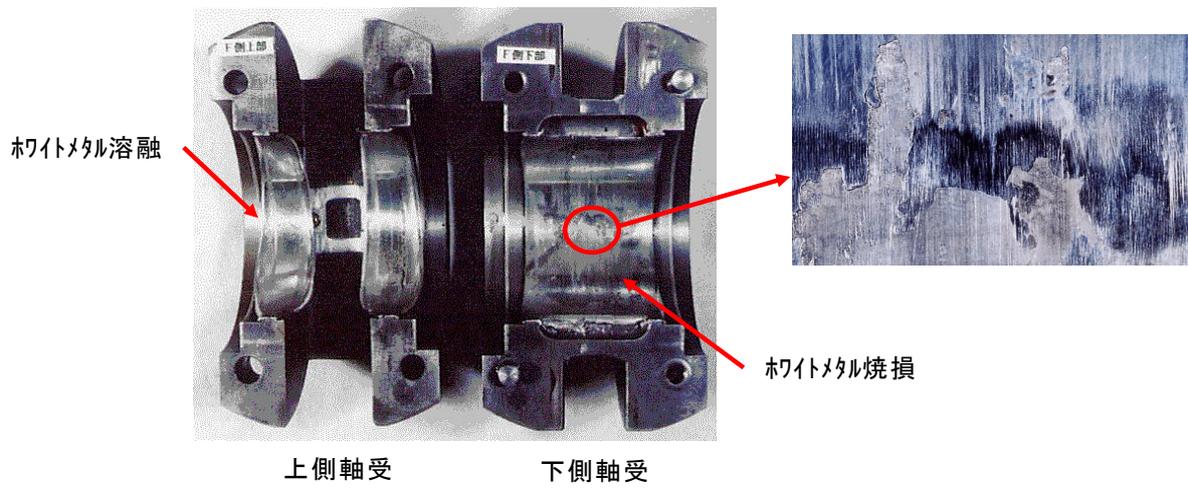
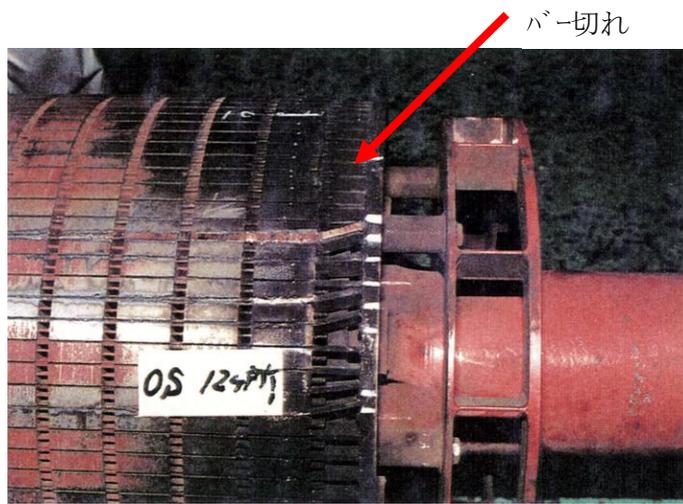


図 2.18 すべり軸受損傷 (ホワイトメタル溶損)

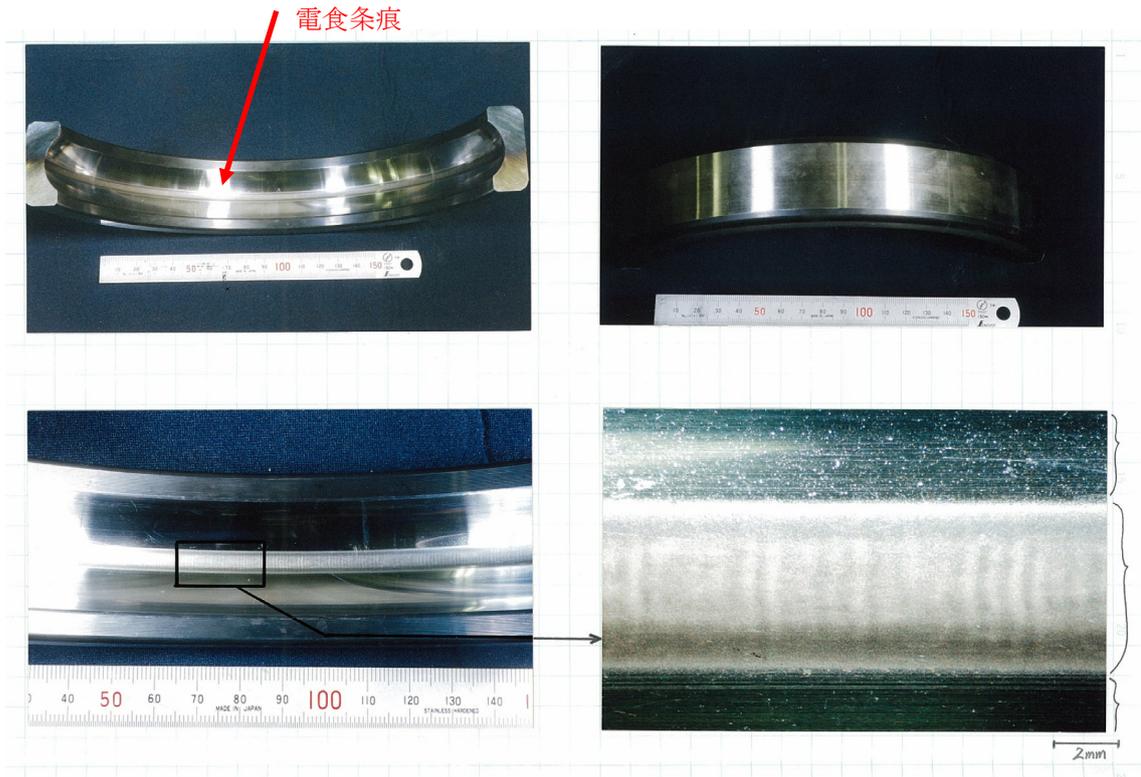


図 2.19 ころがり軸受 [外輪] 損傷 (電食)

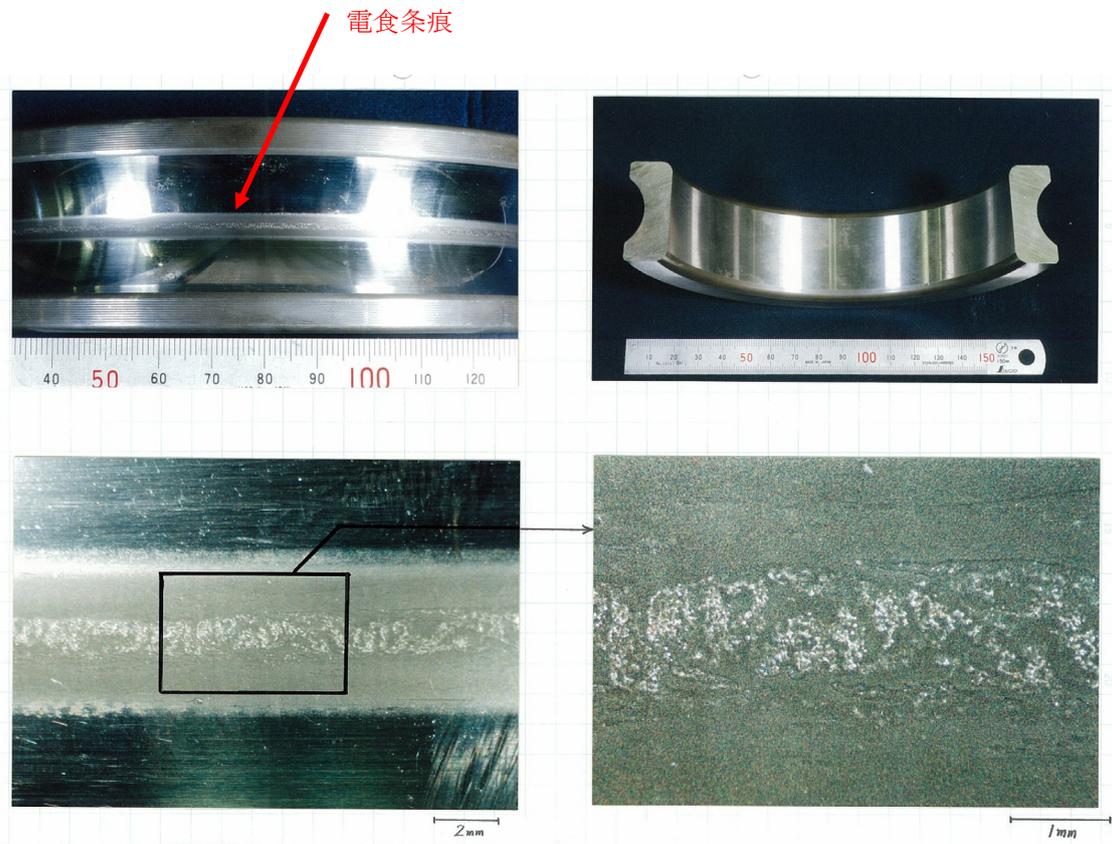


図 2.20 ころがり軸受 [内輪] 損傷 (電食)

## 2. 3 非破壊絶縁劣化診断試験

一般に電動機を対象に実施される非破壊絶縁劣化診断試験を図 2.15 に示す。絶縁劣化診断試験は巻線絶縁の特性を診断し、残存絶縁耐力や余寿命を推定する。

非破壊絶縁劣化診断試験は、主に電氣的な手法で、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性状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としている。化学的試験、機械的試験は巻線絶縁の劣化現象との相関性、診断アルゴリズムが明確になっているものが数少ないため、普及に至っていない。

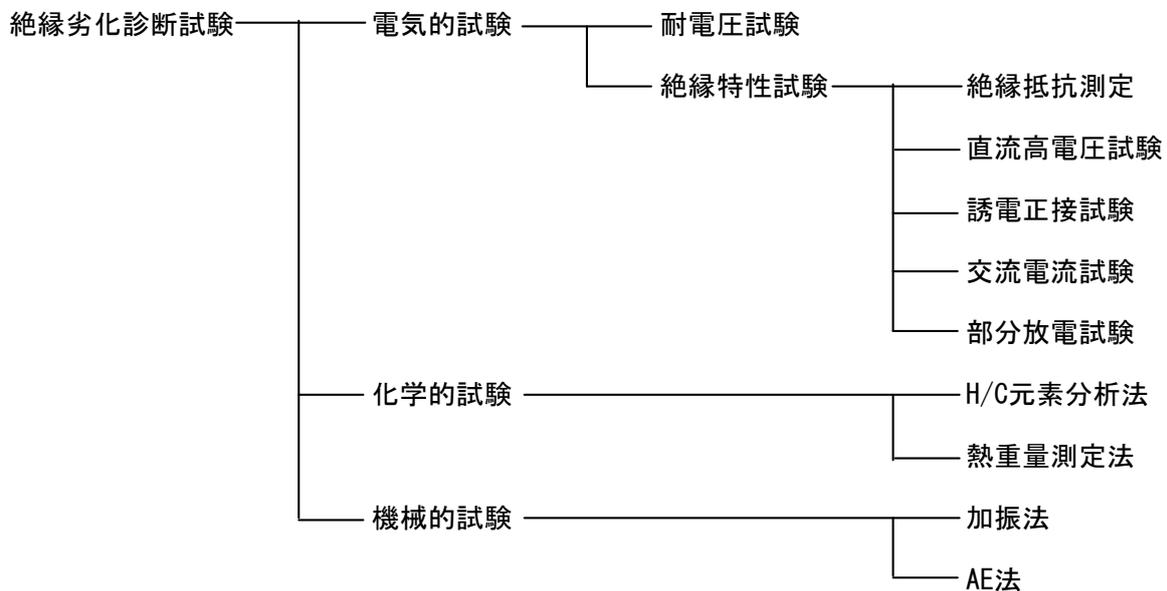


図 2.21 電動機の絶縁劣化診断試験

## 2. 4 現状のオンライン絶縁劣化診断技術・システム

### 2. 4. 1 課通電中に発生する絶縁劣化信号と検出方法

オンライン絶縁劣化診断を実現するためにはオンライン状態（課通電中）で絶縁劣化の形態に応じて生じる現象を劣化信号として検出する必要がある。表 2.3 に絶縁劣化事象とその際の劣化信号と検出法を示す。回転電気機械の絶縁に適用されている検出方法として以下の検出方法が代表される。

- ①部分放電電荷法      ②放射電磁界法      ③電位変化検出法
- ④超音波法          ⑤巻線振動検出法      ⑥微粒子検出法      ⑦側色法

電動機のオンライン診断手法として適用され、実用化されているのは①部分放電電荷法と②放射電磁波法である。

表 2.3 課通電中に発生する絶縁劣化信号とその検出方法

劣化・欠陥	劣化信号	検出方法
ボイド 異物 電極突起 亀裂・剥離 不純物粒子 摩耗 トリー	<u>部分放電</u> ・放電パルス  ・超音波 ・振動 ・放射電磁波 ・光 ・絶縁物分解・変質（ガス発生） ・電力ロス ・部分絶縁破壊	部分放電電荷法 （1）結合コンデンサ法 （2）接地線電流検出法 （3）スロットセンサ法 放射電磁界法  超音波法 振動加速度法 放射電磁波法 発光検出法 分解ガス分析法 誘導正接法（tan δ 法） 電位変化法
磨耗 表面汚損（ダスト付着・吸湿）	<u>アーク放電</u> ・沿面放電	部分放電電荷法，発光検出法 分解ガス分析法
吸湿 汚損 水トリー 変質	<u>漏れ電流</u> ・抵抗分電流 ・電流波形の歪み  <u>変位電流</u> ・容量分電流  <u>吸湿</u> ・水分含有量	交流電流検出法 （1）抵抗成分電流検出法 （2）零相電流検出法 （3）電流波形法 直流重量漏れ電流法 低周波重量漏れ電流法 接地線電流法  接地線電流法，静電容量検出法  水分検出法
金具締付不良 混入異物 熱劣化	<u>局部過熱</u> ・絶縁物分解・変質  ・変質	過熱検出法，微粒子検出法 臭気検出法，分解ガス分析法  側色法
亀裂・剥離	<u>振動</u> ・固有振動数	振動検出法
その他の異常	<u>ガス漏れ</u> ・ガス圧低下 ・漏れガス  <u>油漏れ</u> ・油量  <u>温度上昇</u> ・温度変化	圧力検出法 漏れガス検出法  漏れ油検出法  温度測定法

以下に課通電中に発生する絶縁劣化信号の検出方法の概要を示し、表 2.3 に絶縁劣化事象とその際の劣化信号と検出法を示す。

(1) 部分放電電荷法

診断対象機器に部分放電が発生したときの放電レベルを計測する。部分放電の発生頻度，発生移送

を測定し、劣化、異常を検出する。結合コンデンサ法、接地線電流検出法、スロットセンサ法等がある。

発電機、電動機の絶縁診断として適用され、結合コンデンサ法が広く適用されている。高電圧端子部への装置取り付けを必要としない接地線電流検出法、スロットセンサ法が安全性では有利であるが、信号強度、検出精度の点では結合コンデンサ法が有利である。

## (2) 放射電磁界法

部分放電により発生する電磁界（電磁波）をアンテナで検出する。種々のアンテナ、ノイズ除去法、部分放電発生位置推定法が考案されている。

電動機に適用する際は、運転中の外乱ノイズを検出しやすく、SN比改善が課題であるが、高周波帯域（GHz帯域）の信号検出にて外乱ノイズ対策を解決している事例がある。

## (3) 超音波法

機器内部で発生した部分放電、または電界の作用で金属異物などが起立浮上して繰り返したンク壁に衝突してできる微小音響を超音波センサ、AEセンサで検出する。

電動機の雑音レベルではコイル絶縁内部の放電を検出することは困難である。変圧器、ガス遮断器などの静止機への適用事例はある。

## (4) 振動加速度法

部分放電のエネルギーによって生じる機器側壁の振動を加速度センサで検出する。

放電による振動が極微小であり、電動機の雑音レベルではコイル絶縁内部の放電を検出することは困難である。ガス遮断器への適用事例はある。

## (5) 発光検出法

部分放電発光を光電変換管で増幅して検出する。光透過性の媒体内での適用に限られる。コイル絶縁内部の放電には光検出方式は適用できない。

## (6) 誘電正接法、静電容量検出法

供試体にかかる電圧と充電電流の大きさと位相差から静電容量と  $\tan \delta$  を求める。 $\tan \delta$  は絶縁劣化による誘電損失の増加を検出し、静電容量は絶縁の吸湿や変質を検出する。

コイル絶縁の吸湿、汚損検出のためのオフライン診断に適用されている。コイル絶縁内部の劣化による  $\tan \delta$  の変化は少ないことからオンライン診断への適用はない。

#### (7) 交流電流検出法

交流電流検出法には、交流課電中抵抗分電流検出法、零相電流検出法、電流波形法の3種がある。交流課電中抵抗分電流検出法は交流課電中の絶縁抵抗の変化を検出する。零相電流検出法は相による絶縁体の劣化程度の不平衡にて生じる零相電流を検出する。電流波形法は絶縁体の電圧－電流特性の非線形性を検出する。

交流電流検出法はケーブルの絶縁劣化診断における水トリ－劣化検出への適用事例がある。零相電流検出法は電動機への適用事例は見受けられないが、適用・実用は期待される。

#### (8) 接地線電流法

CVケーブルの水トリ－劣化の発生・進展にともなう  $\tan \delta$ 、静電容量の増大を接地線電流（充電電流）の増大傾向として捉え、水トリ－劣化を診断する。電動機の絶縁内部劣化では水トリ－劣化は診断対象外であり、適用はない。

#### (9) 直流成分法

絶縁体に流れる交流電流中の直流成分を検出する。

CVケーブルにおいて水トリ－劣化の進展にともなう直流成分の増大傾向を検出する適用事例はあるが、電動機の絶縁内部劣化では水トリ－劣化は診断対象外であり、適用はない。

#### (10) 直流重畳漏れ電流法

課電中の電線路に直流電流を重畳し、ケーブルから漏れてくる直流漏れ電流を検出する。CVケーブルへの適用事例はあるが、電動機への適用事例はない。

#### (11) 低周波重畳漏れ電流法

配電ケーブルの高圧線と接地間に低周波電圧を重畳し、接地線から低周波の有効分電流を検出し、絶縁抵抗を求め、絶縁劣化レベルを診断する。

配電ケーブルへの適用事例はあるが、電動機への適用事例はない。

#### (12) 電位変化検出法

絶縁層内に中間電極を設け、その電位変化から局部破壊を検出する。電動機への適用の可能性は考えられるが、実機への適用には電極からのリード線を要し、適用困難である。

### (13) 分解ガス検出法

熱劣化，または放電による絶縁材料から発生する分解生成ガスの種類，発生比率により劣化原因を推定する。密閉タイプの機器の運転中の診断法として信頼度の高い手法である。ガスの検出には各種ガス用センサ，ガスクロマトグラフィが使われる。

変圧器，油浸ケーブルに適用されており，電動機では完全密閉でないため検出精度が悪く，適用されていない。汚損が伴うと更に精度が悪い。

### (14) 臭気検出法

絶縁材料の分解生成ガスを臭気センサで検出する。変圧器に適用されており，電動機では完全密閉でないため検出精度が悪く，適用されていない。汚損が伴うと更に精度が悪い。

### (15) 微粒子検出法

分解ガス検出法と類似しているが，より大きな分子，またはガス分子が複数結合した微粒子を検知装置で検出する。

密閉度が高い水素冷却タービン発電機での適用事例はあるが，電動機では分解ガス検出法と同様に検出精度が悪く，適用されていない。

### (16) 水分検出法

機器内の油，ガス中の水分含有量を測定する手法である。

油中にある絶縁体の絶縁物内部に溶け込んだ微量水分量を検出する手法で，電動機の吸湿レベルでは適用できない。

### (17) 測色法

熱劣化による高分子材料の変質を機内に装着したサンプル材料の変色として光ファイバと測色計により機外より測定する。

電動機にはコイル温度を測定するサーチコイルが設置されており，常時監視可能であるため適用されていない。

### (18) 振動検出法

絶縁材料の機械的劣化の原因となる振動を振動加速度計で測定する。

コイルの固有振動数の変化による劣化診断に関わる検討事例はあるが，適用事例はない。通常の絶縁劣化レベルでは検出不可と考えられる。

#### (19) 過熱検出法

絶縁材料の劣化の大きな要因となる温度を検出する。

電動機にはコイル温度を測定するサーチコイルが設置されており、常時監視可能であり、絶縁劣化診断の際にコイル温度レベル、推移兆候は参照されている。

#### (20) 圧力検出法

ガス絶縁機器のガス圧力を計測し、ガス漏れを検知する。電動機では完全密閉でないため適用されない。

### 2. 4. 2 オンライン絶縁劣化診断システム

停止中に実施される絶縁劣化診断試験（絶縁特性試験）の普及ならびに絶縁仕様（製造メーカー）毎の診断試験値の判定要領、判定値の確立によって、固定子コイル絶縁の予防保全を実現し、各産業において、事故/故障頻度低減、設備稼働率向上などの効果を挙げている。

一方、電動機は各種産業において動力源として広く使用されており、電動機を停止しての保守、診断試験では、試験に要する時間と人手を多く必要とする問題点がある。このため、近年、設備を停止させずに電動機の運転中（オンライン）に絶縁診断を行い、傾向管理を含めた予防保全（状態監視保全）を行うことの必要性が高まってきた。

高圧電動機の絶縁劣化診断試験において最も有効である部分放電試験のオンライン診断技術、システムの研究・開発が進み、電動機への適用が普及しつつあるが、低圧電動機を対象としたオンライン絶縁劣化診断技術、診断システムの実用例は見受けられない。以下に高圧電動機にて実用化されているオンライン部分放電計測システムの実例を紹介する。

#### (1) オンライン部分放電計測の種類

オンライン部分放電計測システムは、部分放電信号検出回路、センサの違いにより、結合コンデンサ法、接地線パルス検出法および放射電磁界法の3種類に分類される。

##### ①結合コンデンサ法

この方法は固定子巻線の高圧側回路に、結合コンデンサをあらかじめ取り付け、その低圧側に部分放電測定器を取り付けて測定する。基本的に停止時の部分放電測定と同様の測定回路である。

図 2.16 は固定子スロット内の RTD (RTD: Resistance Thermometer Detector) を検出センサとしたスロットセンサ法である。

##### ②接地線パルス検出法

この方法には、高圧側回路にあらかじめ結合コンデンサを挿入し、その低圧側を接地して、この

接地線にクリップ式パルスセンサを挿入する方法と、シールド付の電力ケーブルを使用している電動機において、高圧側回路への装置取り付けを不要とし、接地線にクリップ式パルスセンサを挿入する方法がある。電動機への接地線パルス検出法の適用例として、先に紹介したスロットセンサ法による部分放電計測装置を用いて高周波変流器（RFCT：Radio Frequency Current Transformer）を接地線に取り付けて接地線に流れる高周波電流を検出する実用例もある。図 2.22 は RTD 検出パルス電流強度と接地線検出パルス電流強度の関係である。RTD をセンサとした場合に比べ、感度が低く、耐ノイズ性に劣る。

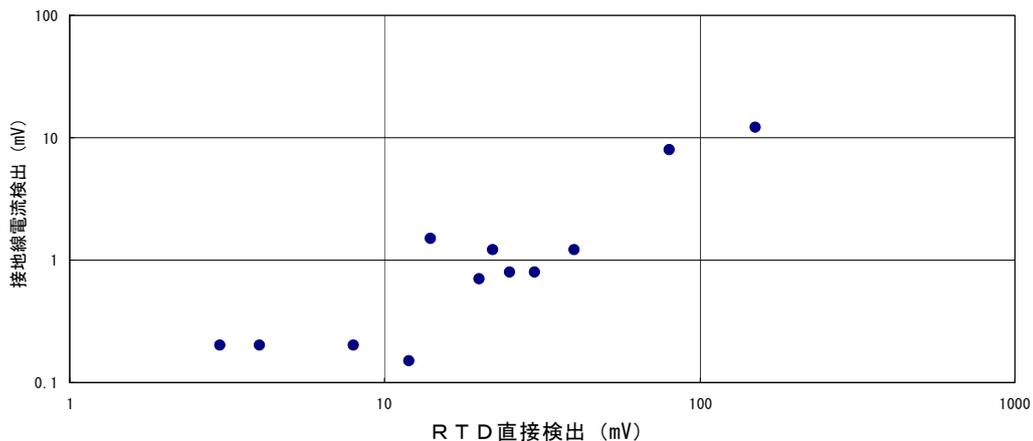


図 2.22 RTD 検出電流と接地線検出電流の関係

高圧側回路に高周波変流器（RFCT）のみを取り付けて部分放電計測する実用例もある。図 2.23 に計測システム構成を示す。この高周波変流器（RFCT）は 3 相一括で口出しケーブルを囲み、3 相の部分放電の和を検出する。各相が均等に劣化し、部分放電の発生が 120 度の位相差をともないつつ各相同様とすると、3 相一括 CT が電源電圧 1 サイクルに検出する部分放電パルスは、図 2.24 のように位相差 60 度毎の正負パルスが交互に現れる形で分布する。

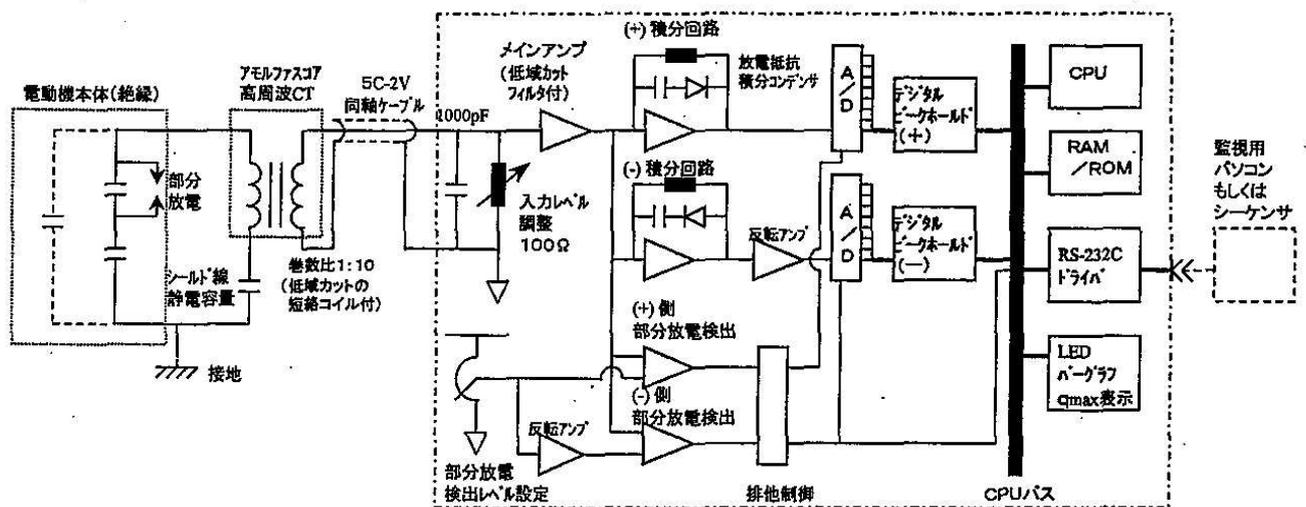


図 2.23 3 相一括 CT による部分放電計測システム構成

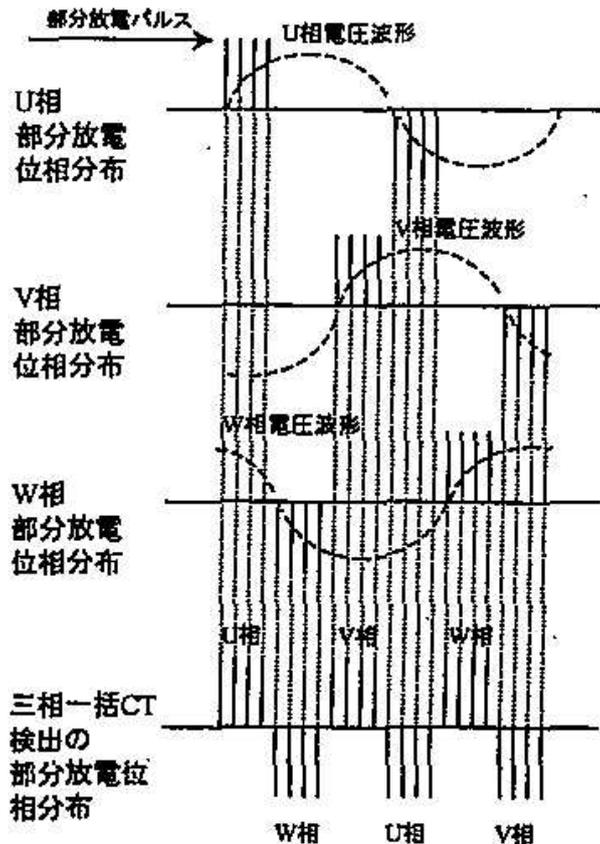


図 2.24 3相一括CTが電源電圧1サイクルで検出する部分放電パルス

### ③放射電磁界法

部分放電に基づく放射電磁界をアンテナで捕らえた部分放電信号を信号処理プロセッサ、解析装置へ伝送する方法である。図 2.25 に放射電磁波検出による部分放電計測装置構成と装置概観を示す。図 2.26, 図 2.27 に部分放電波形ならびに部分放電 (PD) の周波数スペクトラム ( $\sim 4\text{GHz}$ ) を示す。このシステムは平板アンテナを用いて、ノイズレベルが極めて低いGHz帯域の電磁波を検出することで、従来、課題となっていたノイズ除去を不要としている。図 2.27 に示されるように電動機の機内で検出する電磁波は  $2.5\text{GHz}$  の範囲まで信号強度を有し、GHz帯域の電磁波検出が電動機の部分放電現象の検出に有効であることが伺えられる。インバータ駆動機のようにインバータノイズなどのバックグラウンドノイズ (BGN) がある場合の有力な方法と期待される。

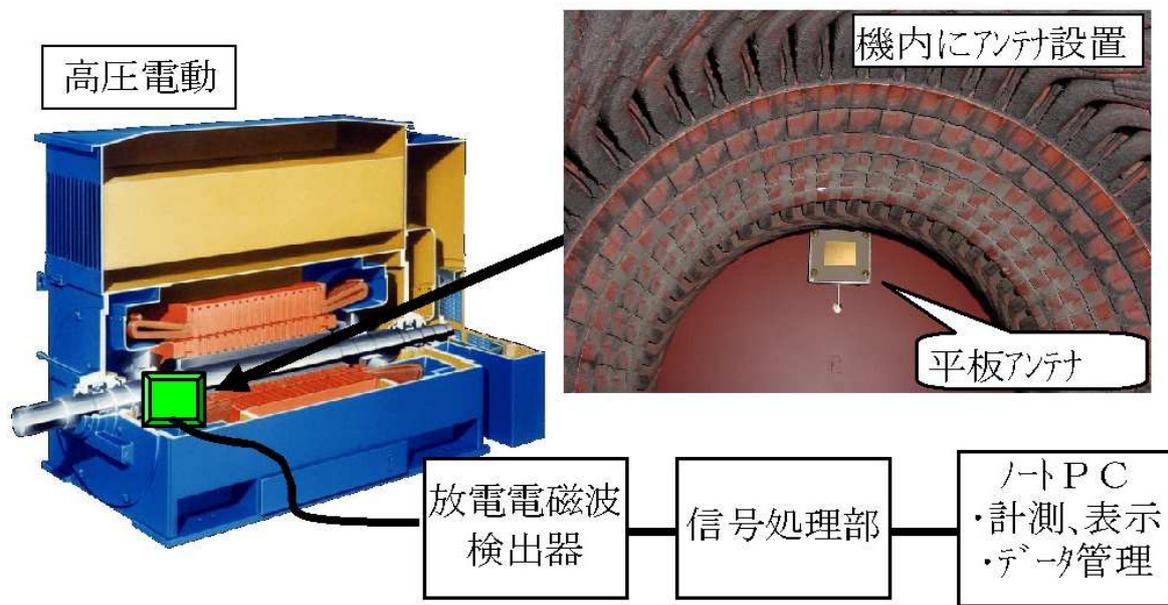


図 2.25 GHz 帯電磁波検出による部分放電計測装置構成

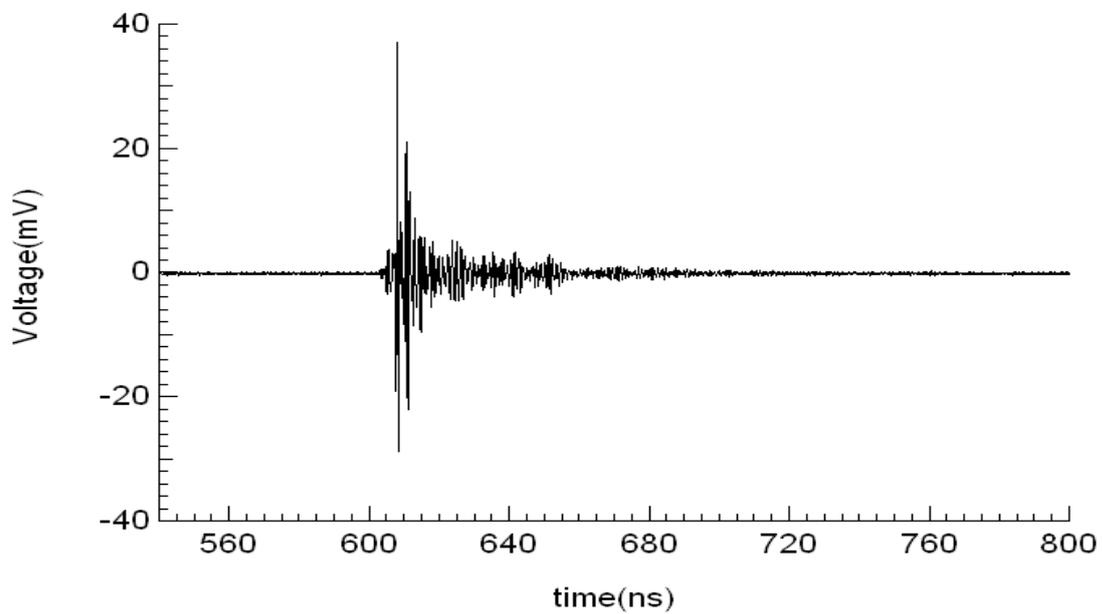


図 2.26 部分放電波形

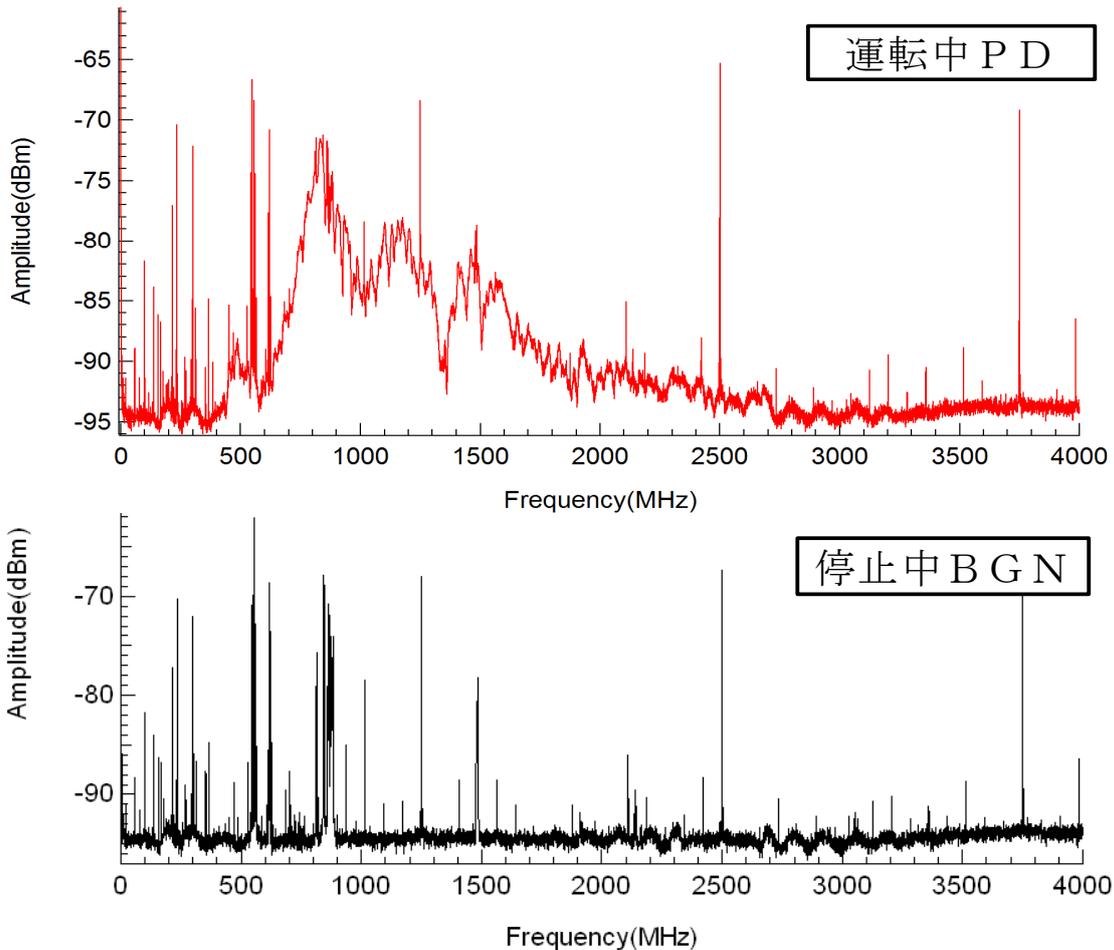


図 2.27 部分放電 (PD) 周波数スペクトラム (~4GHz)

## (2) 部分放電センサとノイズ対策 (判別/除去)

停止中の絶縁診断では電動機が系統から切り離され、試験用変圧器で高電圧が印加されるため、外部からのノイズを考慮する必要はない。一方、オンラインでの部分放電計測を行うと電動機内で発生する部分放電信号のほかに、電源側からも外部ノイズが伝播してくる。従って、オンライン部分放電計測では、これらのノイズを判別/除去して部分放電のみを検出する技術・装置の開発を要する。

現在、実用化されている部分放電計測システムは、部分放電計測感度を高める部分放電センサ、ノイズ対策の機能にて差別化が図られている。以下に電動機に適用されている代表的なアンテナ、ノイズ除去について紹介する。

### ①部分放電センサ

#### a) 結合コンデンサ (Coupling Capacitors)

結合コンデンサを口出し線端子部または、電力ケーブル部などの高圧ライン側に設置する方式である。一般に古くより採用されている。

b) 高周波変流器 (RFCT : Radio frequency CT)

電動機の接地線または中性点接地線に RFCT を設置し、RF 信号を検出する方式である。

c) 測温センサ

固定子スロット内の上下コイル間に挿入されている測温センサ (RTD : Resistance Thermometer Detector) を部分放電センサとして適用する方式である。

d) アンテナ

放電発生近傍、または電動機の外部にアンテナを設置し、放射電磁界、漏洩電磁界を受信する方式である。

②ノイズ除去

a) バンドパスフィルタ方式

信号処理においてフィルタにてノイズ帯域を除去し、部分放電信号と思われる帯域を検出する方式である。

b) 伝播方向性判別方式

2つのセンサを設置し、検出信号の伝播方向より部分放電信号とノイズ信号を判別する方式である。

c) 周波数成分判別方式

部分放電信号とノイズ信号の伝播減衰特性の差異より部分放電信号とノイズ信号を判別する方式である。

d) 平均化方式

検出信号 (パルス) の数サイクル分の平均化し、ランダムノイズを除去し、部分放電信号を検出する方式である。

e) パルス巾検出方式

検出信号 (パルス) 巾により部分放電信号とノイズ信号を判別する方式である。

## 2. 5 第2章のまとめ

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る。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，主に電氣的な手法で，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としている。化学的試験，機械的試験は巻線絶縁の劣化現象との相関性，診断アルゴリズムが明確になっているものが数少ないため，普及に至っていない。

電動機を停止しての保守，診断試験は，試験に要する時間と人手を多く必要とする問題点がある。このため，近年，設備を停止させずに電動機の運転中（オンライン）に絶縁診断を行い，傾向管理を含めた予防保全（状態監視保全）を行うことの必要性が高まってきた。高圧電動機の絶縁劣化診断試験において最も有効である部分放電試験のオンライン診断技術，システムの研究・開発が進み，電動機への適用，実用化がなされている。オンライン部分放電計測の種類は，部分放電信号検出回路，センサの違いにより，結合コンデンサ法，接地線パルス検出法および放射電磁界法の3種類に分類される。

低圧電動機を対象としたオンライン絶縁劣化診断技術，診断システムの実用例は見受けられない。

### 第3章 低圧電動機の絶縁劣化診断の現状

#### 3. 1 低圧電動機の絶縁診断技術の課題

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診断における課題として次の点が挙げられる。

- (1) 現在、絶縁劣化状態を診断する主要なパラメータとなっている絶縁抵抗は付着塵埃量、湿度に大きく依存しており、試験条件によって大きくばらつくため、経年的に進行する絶縁劣化の兆候を検出するパラメータとしては精度に欠ける。
- (2) 低圧電動機は同一プラント内に同運転年数の機器が多台数あるため、定期点検（絶縁試験）周期の延長化が進む中、絶縁抵抗測定、などの従来から一般的に行われている絶縁試験にて絶縁劣化の兆候検出は極めて困難な状況にある。  
原子力発電プラントの例では、1プラントにて稼動している高圧電動機は約40台、低圧電動機は約500台である。定期点検周期、電動機のオーバーホール周期が延長されている現状では、低圧電動機については絶縁劣化兆候を検出して保守を行なう状態監視保全は概ね不可能である。
- (3) 高圧機（発電機、電動機）にて適用されているオンライン絶縁劣化診断装置は絶縁劣化進行に伴う部分放電を検出するものであり、運転電圧以下において放電現象を伴わない低圧電動機の絶縁劣化兆候の検出には適用できない。

上記課題の解決には、低圧電動機の絶縁劣化兆候も診断対象とするオンライン絶縁劣化兆候検出手法に関わる研究とオンライン絶縁劣化診断装置の開発、実用化を要する。

#### 3. 2 低圧電動機の絶縁劣化過程

低圧電動機の絶縁劣化の進展度は電動機構造（保護形式）により異なるが、一般に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、これに熱的ストレス、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）が進展すると言える。絶縁劣化が進展し、巻線の絶縁貫通抵抗が低下すると絶縁抵抗低下が生じ、地絡、相间短絡、レアショート of 絶縁破壊事象に至る。

図3.1～図3.7に著しい汚損に起因した絶縁破壊事象の事例を示し、外部環境、電氣的、熱的、機械的劣化要因の複合作用を表す絶縁劣化過程を図3.8に示す。



(反結線側)



(結線側)

図3.1 固定子コイルエンド外観

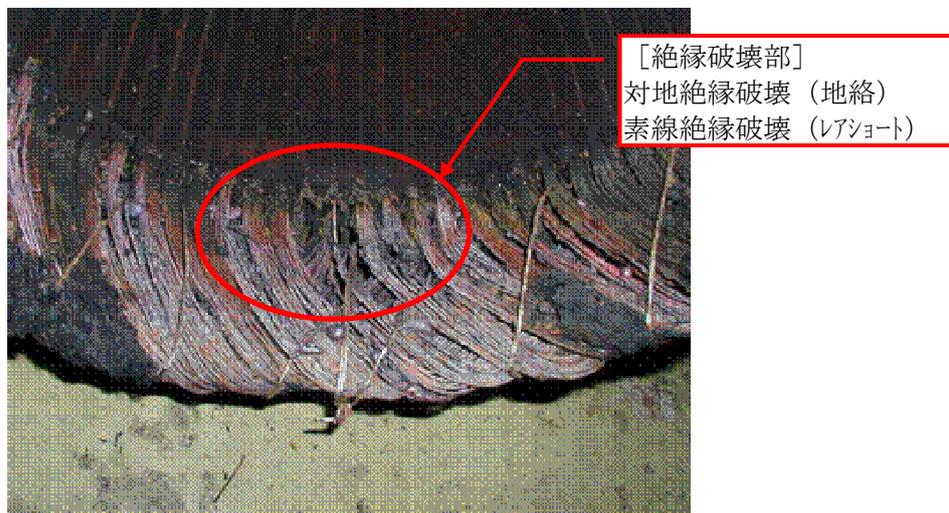


図3.2 (反結線側) 固定子コイルエンド拡大

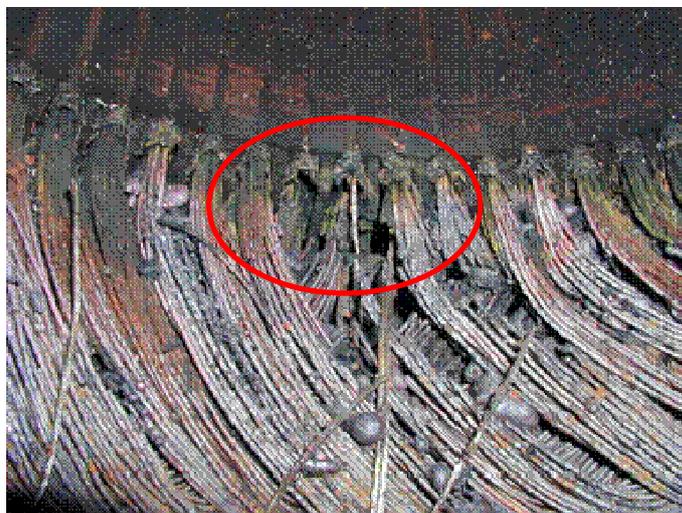


図3.3 (反結線側) 絶縁破壊部拡大



図3.4 (結線側) 固定子コイルエンド拡大



図3.5 (反結線側) 固定子コイルエンドつなぎ線焼損部



図3.6 (反結線側) 固定子コイルエンド先端部焼損部

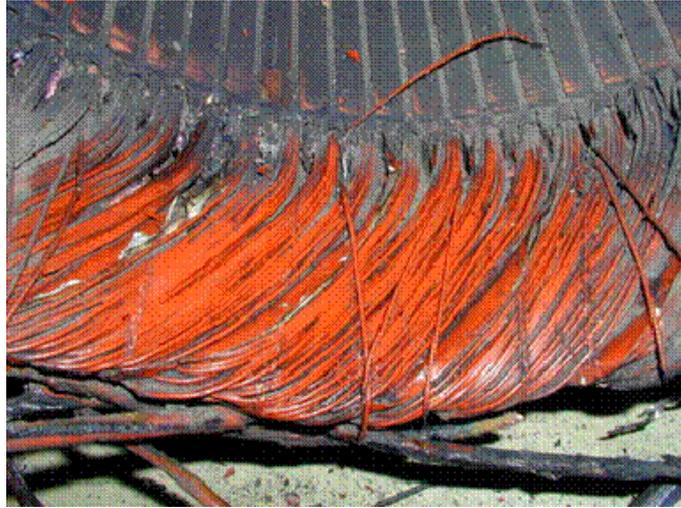


図3.7 コイル表面ダスト除去後のコイル表面

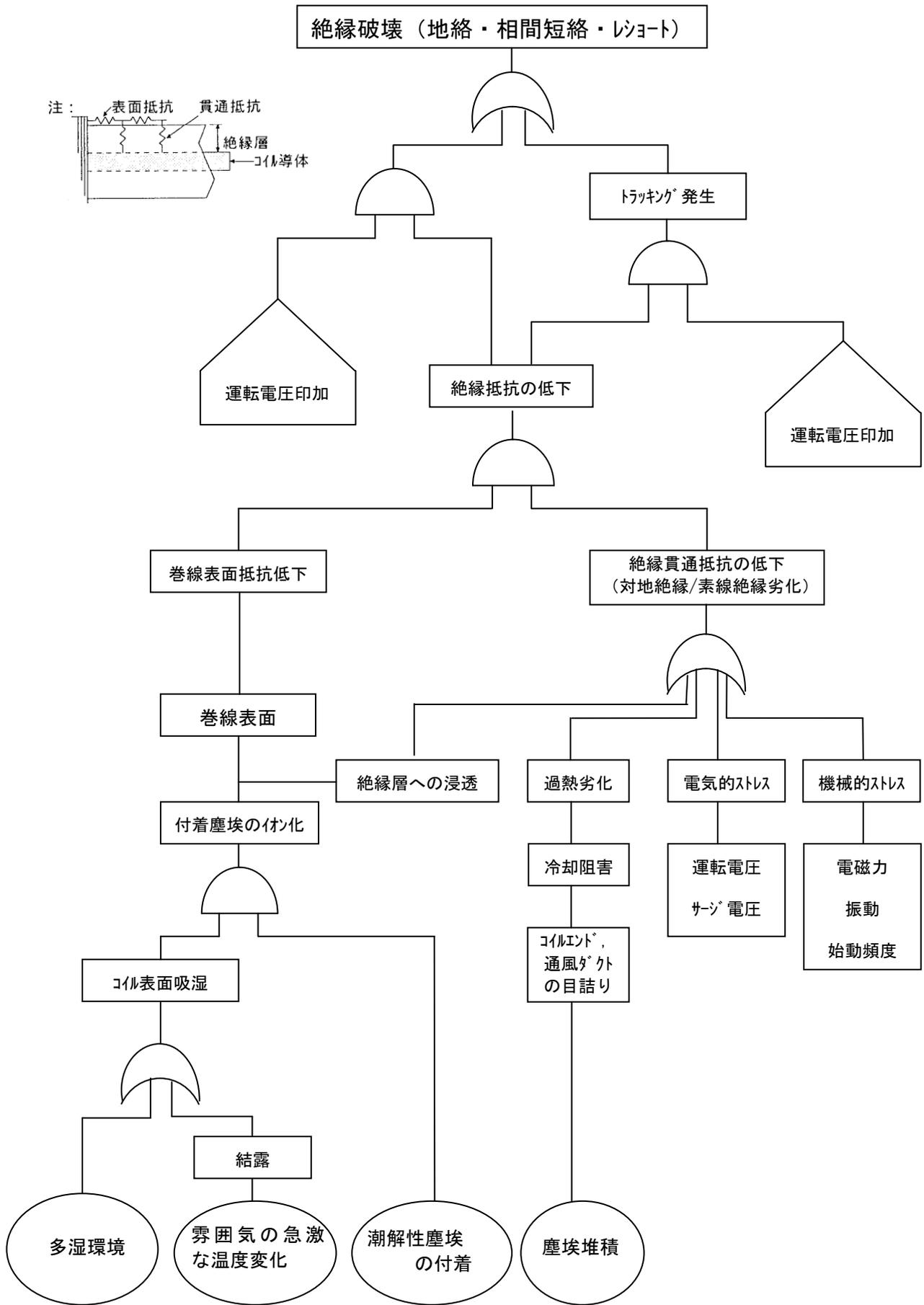


図3.8 低圧電動機の絶縁劣化過程

### 3. 3 絶縁劣化傾向に関わるフィールド調査事例

火力発電所にて実運用されている低圧電動機を対象に絶縁劣化傾向を示す絶縁抵抗低下事象の経歴について調査を行った。

#### (1) 絶縁抵抗低下事象

絶縁抵抗値低下事象の経歴について調査を行ったところ、絶縁抵抗値低下事象は電動機構造が開放形機に集中し、全閉形機では絶縁抵抗値低下事象の経歴はなかった。図3.9、図3.10に絶縁抵抗値低下事象の経歴が確認された開放形電動機をサンプルに絶縁抵抗値低下に至る経過年数と洗浄、乾燥などの絶縁抵抗値回復処置後の絶縁抵抗値の再低下が生じる経過年数に関わるワイブル解析結果を示す。開放形電動機の絶縁抵抗値低下に至る経過年数は、0.23年（99%信頼下限値）であり、乾燥処理等で絶縁抵抗回復処理後再低下が生じる経過年数は0.18年（99%信頼下限値）であった。絶縁抵抗低下には、巻線の表面抵抗低下に起因する場合と巻線の絶縁貫通抵抗低下に起因する場合がある。

#### (2) 塵埃の影響度調査

調査対象機の固定子巻線に付着している塵埃を採取し、成分分析を行い、固定子巻線付着塵埃の絶縁抵抗低下事象への影響度について調査したところ、絶縁抵抗低下事象経歴がある電動機は、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ （潮解性塵埃）の付着量が多く、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ （潮解性塵埃）付着量と絶縁抵抗値には良い相関（相関係数：0.87）が確認された。図3.11に $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ （潮解性塵埃）付着量と絶縁抵抗値の関係を示す。潮解性塵埃の付着量が増すと絶縁抵抗値は低下する。塵埃付着の初期段階は巻線表面抵抗が低下するが、付着塵埃のイオン分子が巻線絶縁層に浸透し始めると絶縁劣化、絶縁貫通抵抗低下を加速させる。

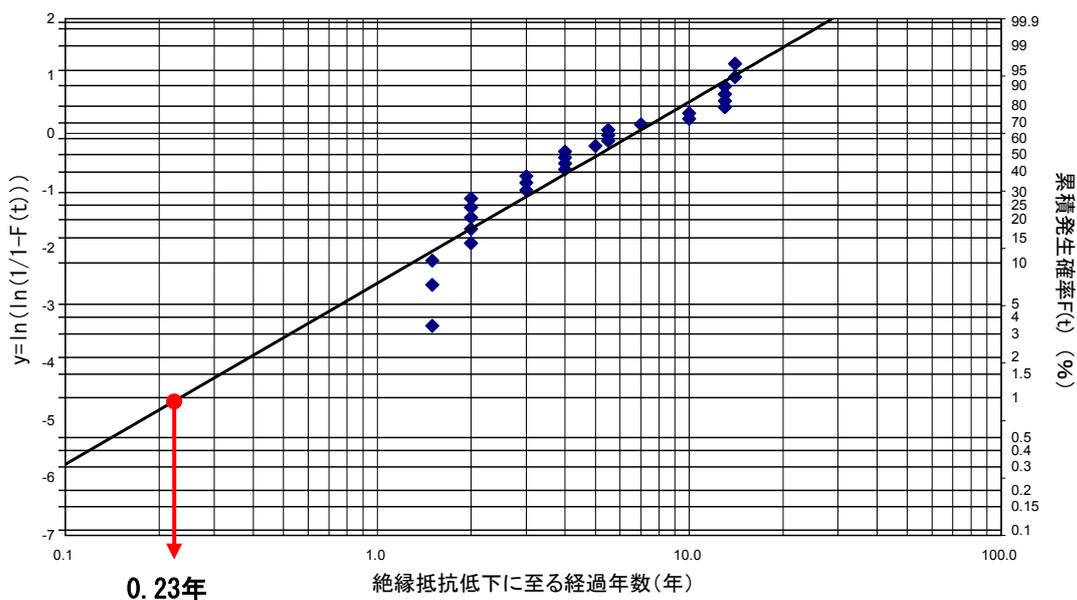


図3.9 絶縁抵抗低下に至る経過年数のワイブル解析結果

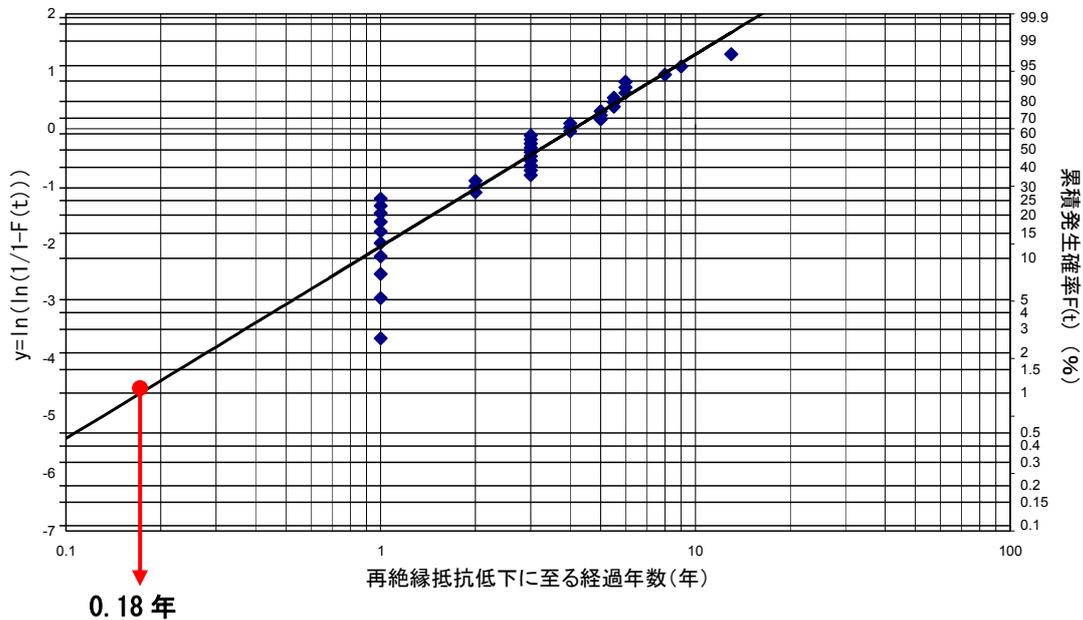


図3.10 再絶縁抵抗低下に至る経過年数のワイブル解析結果

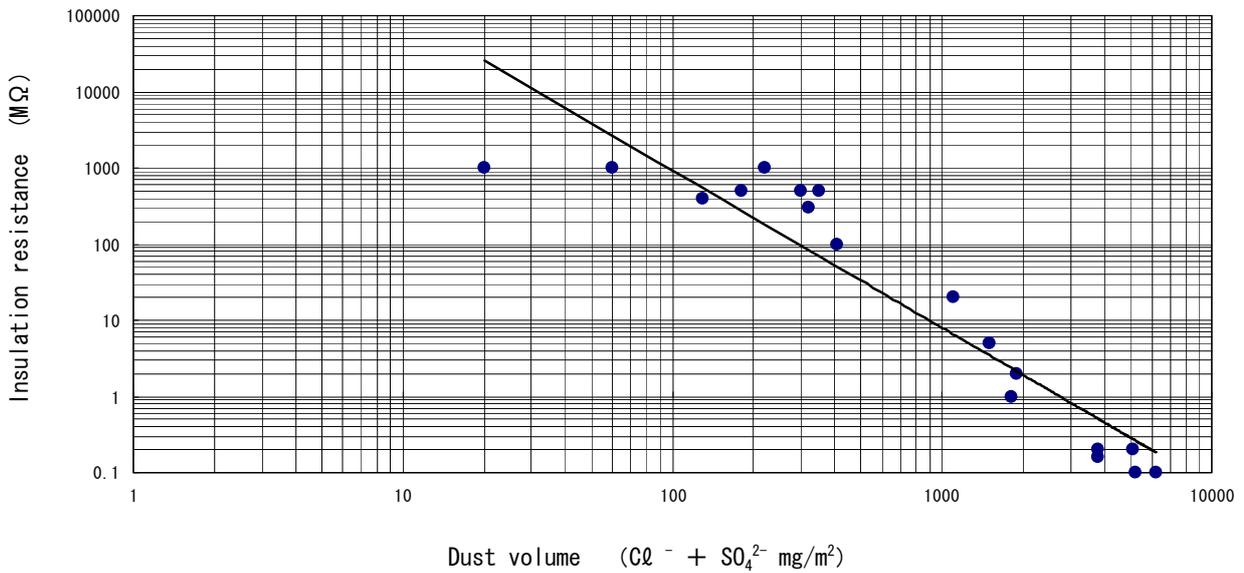


図3.11 潮解性塵埃付着量と絶縁抵抗値

(3) 環境（潮解性塵埃量）調査事例

火力発電所建屋内に設置されている開放形電動機を対象に実施した潮解性塵埃量調査事例を表3.1, 図3.12に示す。

電動機の吸気口にて採取された塵埃中に含まれる潮解性塵埃 (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 量を分析し、電動機の各吸気口より電動機内部へ吸入される潮解性塵埃量 (mg/m<sup>2</sup>・年) を求めた。

表3.1 潮解性塵埃量調査結果

対象機	塵埃採取箇所	運転時間	潮解性塵埃 分析結果 (mg/cm <sup>2</sup> )			年間付着量換算値 (mg/m <sup>2</sup> ・年)		
			Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	合計	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	合計
FDFモータ (A)	負荷側	1104	0.4531	0.2798	0.7329	3.595×10 <sup>4</sup>	2.220×10 <sup>4</sup>	5.815×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.9797	0.2765	1.2562	7.774×10 <sup>4</sup>	2.194×10 <sup>4</sup>	9.968×10 <sup>4</sup>
FDFモータ (B)	負荷側	1104	0.3806	0.2001	0.5807	3.020×10 <sup>4</sup>	1.588×10 <sup>4</sup>	4.608×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.3444	0.1264	0.4708	2.733×10 <sup>4</sup>	1.003×10 <sup>4</sup>	3.736×10 <sup>4</sup>
GRFモータ (A)	負荷側	1104	0.6230	0.2469	0.8699	4.943×10 <sup>4</sup>	1.959×10 <sup>4</sup>	6.902×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.7930	0.2963	1.0893	6.292×10 <sup>4</sup>	2.351×10 <sup>4</sup>	8.643×10 <sup>4</sup>
GRFモータ (B)	負荷側	1104	0.5048	0.1985	0.7033	4.006×10 <sup>4</sup>	1.575×10 <sup>4</sup>	5.581×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.4418	0.1777	0.6195	3.506×10 <sup>4</sup>	1.410×10 <sup>4</sup>	4.916×10 <sup>4</sup>
PAFモータ (A)	負荷側	1104	0.4107	0.2058	0.6165	3.259×10 <sup>4</sup>	1.633×10 <sup>4</sup>	4.892×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.6939	0.2881	0.9820	5.506×10 <sup>4</sup>	2.286×10 <sup>4</sup>	7.792×10 <sup>4</sup>
PAFモータ (B)	負荷側	1104	0.3852	0.1909	0.5761	3.057×10 <sup>4</sup>	1.515×10 <sup>4</sup>	4.572×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.6117	0.2568	0.8685	4.858×10 <sup>4</sup>	2.040×10 <sup>4</sup>	6.898×10 <sup>4</sup>
FWBPモータ (A)	負荷側	1103	0.4319	0.1482	0.5801	3.430×10 <sup>4</sup>	1.177×10 <sup>4</sup>	4.607×10 <sup>4</sup>
	負荷側	1104	0.4319	0.1482	0.5801	3.427×10 <sup>4</sup>	1.176×10 <sup>4</sup>	4.603×10 <sup>4</sup>
トレンポンプモータ	負荷側	1103	0.2903	0.1070	0.3973	2.306×10 <sup>4</sup>	8.498×10 <sup>3</sup>	3.156×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1103	0.2337	0.1111	0.3448	1.856×10 <sup>4</sup>	8.824×10 <sup>3</sup>	2.738×10 <sup>4</sup>
軸冷ポンプモータ (A)	負荷側	258	0.0850	0.0412	0.1262	2.886×10 <sup>4</sup>	1.399×10 <sup>4</sup>	4.285×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	258	0.0779	0.0288	0.1067	2.645×10 <sup>4</sup>	9.779×10 <sup>3</sup>	3.623×10 <sup>4</sup>
軸冷ポンプモータ (B)	負荷側	1020	0.2195	0.1070	0.3265	1.885×10 <sup>4</sup>	9.189×10 <sup>3</sup>	2.804×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1020	0.1841	0.1111	0.2952	1.581×10 <sup>4</sup>	9.542×10 <sup>3</sup>	2.535×10 <sup>4</sup>
軸冷ポンプモータ (C)	負荷側	928	0.1912	0.0988	0.2900	1.805×10 <sup>4</sup>	9.326×10 <sup>3</sup>	2.738×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	928	0.1770	0.0905	0.2675	1.671×10 <sup>4</sup>	8.543×10 <sup>3</sup>	2.525×10 <sup>4</sup>
CPモータ (A)	負荷側	1103	0.2634	0.0938	0.3572	2.092×10 <sup>4</sup>	7.450×10 <sup>3</sup>	2.837×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1103	0.2379	0.1086	0.3465	1.889×10 <sup>4</sup>	8.625×10 <sup>3</sup>	2.752×10 <sup>4</sup>
CPモータ (B)	負荷側	1104	0.3059	0.1086	0.4145	2.430×10 <sup>4</sup>	8.625×10 <sup>3</sup>	3.292×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.2124	0.0691	0.2815	1.687×10 <sup>4</sup>	5.488×10 <sup>3</sup>	2.236×10 <sup>4</sup>
CWBPモータ (A)	負荷側	1104	0.1274	0.0691	0.1965	1.011×10 <sup>4</sup>	5.482×10 <sup>3</sup>	1.559×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.1954	0.1070	0.3024	1.551×10 <sup>4</sup>	8.490×10 <sup>3</sup>	2.400×10 <sup>4</sup>
CWBPモータ (B)	負荷側	1104	0.1359	0.0938	0.2297	1.078×10 <sup>4</sup>	7.443×10 <sup>3</sup>	1.822×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	1104	0.1359	0.0839	0.2198	1.078×10 <sup>4</sup>	6.657×10 <sup>3</sup>	1.744×10 <sup>4</sup>
所内COMP (A)	負荷側	534	0.0142	0.0083	0.0225	2.239×10 <sup>3</sup>	1.362×10 <sup>3</sup>	3,601×10 <sup>3</sup>
	反負荷側	534	0.0425	0.0329	0.0754	6.972×10 <sup>3</sup>	5.397×10 <sup>3</sup>	1.237×10 <sup>4</sup>
所内COMP (B)	負荷側	580	0.0741	0.0494	0.1235	1.119×10 <sup>4</sup>	7.461×10 <sup>3</sup>	1.865×10 <sup>4</sup>
	反負荷側	580	0.0567	0.0283	0.0850	8.564×10 <sup>3</sup>	4.274×10 <sup>3</sup>	1.284×10 <sup>4</sup>

調査対象機において吸気口にて採取されたる潮解性塵埃量とコイルエンドに付着していた潮解性塵埃量を比較すると、コイルエンドに付着した塵埃量は吸気口にて採取された塵埃量の約10%であった。表3.1に示す年間付着量換算値の約10%がコイルエンドに付着しているものと推定され、建屋内に設置されながらも絶縁抵抗が1MΩ以下に絶縁抵抗低下現象が生じる量がコイルエンドに付着する。

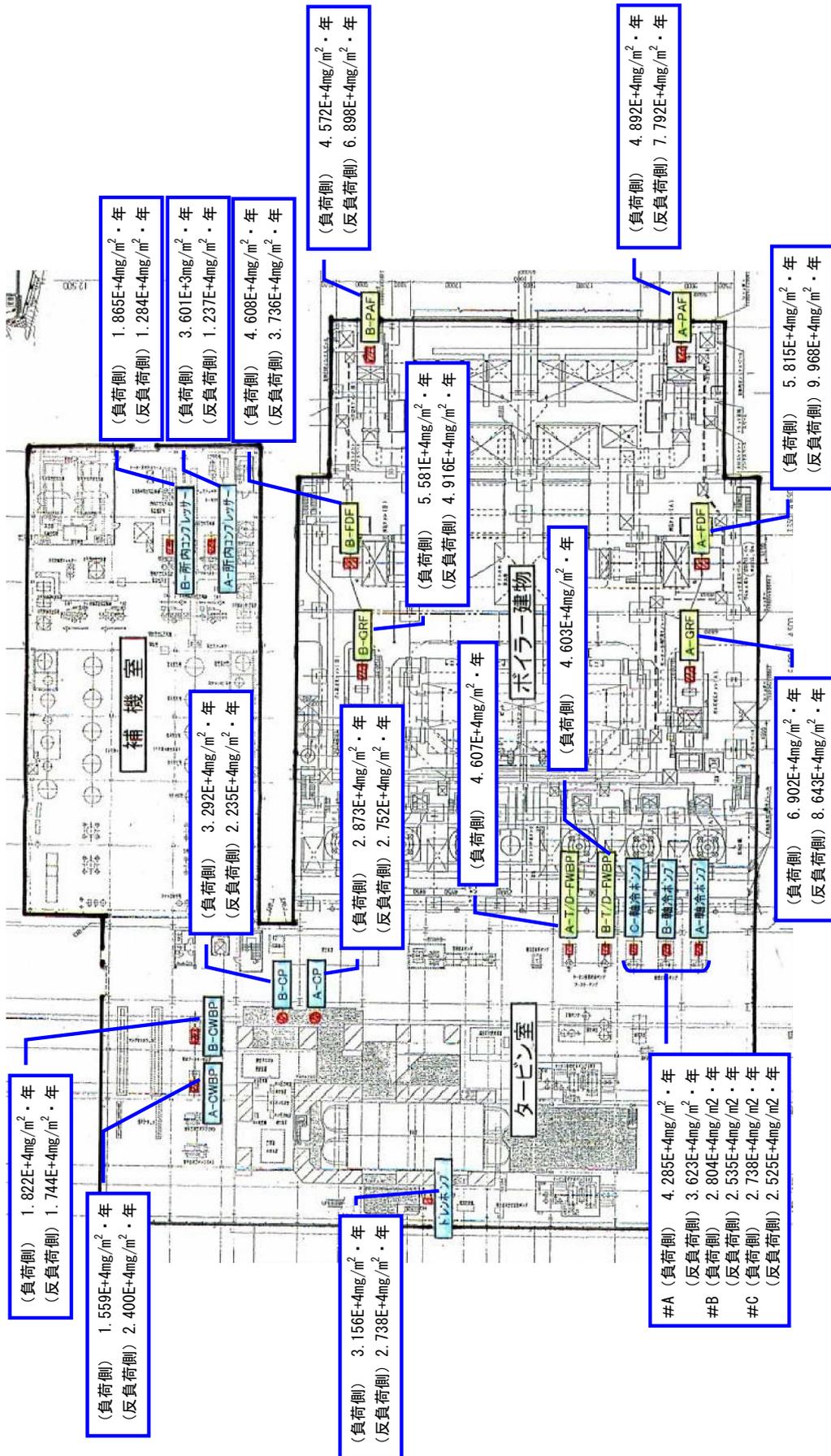


図3.12 電動機の設置箇所と潮解性塵埃量

### 3. 4 低圧電動機の絶縁特性試験

一般に低圧電動機の保全現場において実施されている絶縁特性試験を以下に紹介する。

#### (1) 絶縁抵抗試験

絶縁抵抗は温度，湿度，時間などの外的条件に左右され，測定対象機の定格電圧，容量，絶縁材料に関係している。一般に絶縁抵抗からの絶縁診断として下記の方法が用いられる。

##### ① R<sub>d</sub>/R<sub>w</sub>

絶縁物の劣化が進行し，材料の分解で多孔質化した場合，クラックが生じた場合，コイルエンド表面にダストが付着した場合には，絶縁は湿度の影響を受けやすくなる。このため絶縁抵抗は乾燥時と吸湿時で大きく変化する，乾燥時の絶縁抵抗（R<sub>d</sub>）と吸湿時の絶縁抵抗（R<sub>w</sub>）の比を絶縁劣化状態の評価基準とする方法である。

図3.13はプラントで運用されていた低圧電動機にて採取されたR<sub>d</sub>/R<sub>w</sub>と絶縁破壊電圧値の相関関係で高い相関性（相関係数：0.74）を示す。一般に電動機の保守（洗浄・乾燥処理）の際に洗浄乾燥後の絶縁抵抗と強制加湿終了後の絶縁抵抗を測定し，R<sub>d</sub>/R<sub>w</sub>を求め，絶縁劣化程度を評価する。

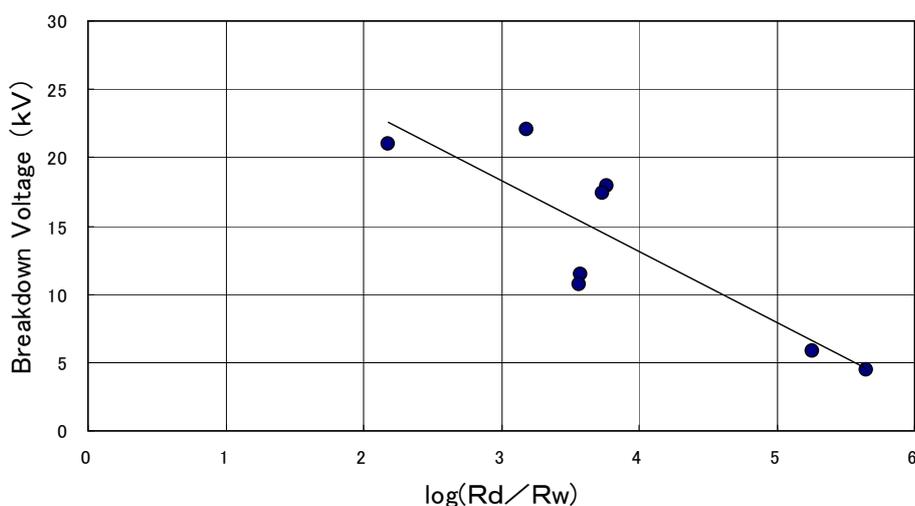


図3.13 R<sub>d</sub>/R<sub>w</sub>と絶縁破壊電圧値

##### ② R C 値

絶縁抵抗値は巻線寸法の影響を受ける。これを補う方法として静電容量と絶縁抵抗との積（R C 値）を共通な劣化指標として評価基準とする方法である。

#### (2) 直流試験 (PI)

絶縁物に直流電圧を印加したときに全電流は瞬時充電電流，吸収電流および漏れ電流の3成分からな

っている。吸湿、汚損状態では漏れ電流の占める割合が増して、時間経過に対して電流の減衰度合いが小さくなる。電流-時間特性から得られる正極指数 (PI) より吸湿/乾燥の程度、劣化状態を推定する。

$$\text{正極指数 (PI)} = \frac{\text{電圧印加 1 分後の電流}}{\text{電圧印加 10 分後の電流}}$$

### (3) 誘電正接試験 ( $\tan \delta_0$ )

電圧- $\tan \delta$  特性および温度- $\tan \delta$  特性から吸湿/乾燥および絶縁層内ボイドの状態、劣化の程度を推定する。絶縁物の誘電正接 ( $\tan \delta$ ) は吸湿や汚損により増大し、熱劣化による分子破断によっても増大する。

### (4) 物理化学診断

絶縁物が熱分解すると、それを構成する高分子の官能基の分解や基本骨格の切断が生じ絶縁破壊する前にその分子構造が異なる。これらの分解や切断の状態を赤外線吸収スペクトルから判定するIR法などがある。

### (5) 外観検査

コイルの変形、変色、ゆるみ等の劣化兆候の有無、程度を確認する。

### (6) 絶縁耐電圧試験

絶縁層に電圧を印加して、残存絶縁強度および劣化状態を確認する。

## 3. 5 絶縁特性試験の有用性

一般に低圧電動機の保守現場にて行なわれている絶縁特性試験、運転年数をもとにした劣化診断 (余寿命推定) の有用性について評価するために、発電プラントにて運転されている電動機を供試機として絶縁特性試験と絶縁破壊試験を行い、絶縁特性値、運転年数と余寿命 (残存絶縁破壊電圧値) の相関性について確認したフィールド調査事例を以下に紹介する。各試験値、運転経過年数の残存絶縁破壊電圧値に対する相関性を表3. 2に、相関性が高い絶縁抵抗値と残存絶縁破壊電圧値、誘電正接試験値と残存絶縁破壊電圧値、運転経過年数と残存絶縁破壊電圧値の相関を図3. 14, 図3. 15, 図3. 16に示す。製造時の初期破壊電圧値の99%信頼下限値を100%として絶縁破壊電圧値を百分率表示した。

残存絶縁破壊電圧値との相関性が最も高いのは絶縁抵抗値 (相関係数 : 0. 81) であり、運転経過年数も高い相関性 (相関係数 : 0. 64) を有する。何れの絶縁特性試験もプラントの停止、電動機の解体を要する

ため、絶縁抵抗値と運転年数に基づく設備保全（劣化兆候管理）が最も有用と考えられる。

表3.2 絶縁破壊電圧値と絶縁特性試験値の相関性

項目	相関性 (相関係数 $R^2$ )
絶縁抵抗測定	有 ( $R^2=0.81$ )
直流吸収試験 (PI)	無 ( $R^2=0.15$ )
$\tan \delta_0$ 試験	有 ( $R^2=0.76$ )
運転経過年数	有 ( $R^2=0.64$ )

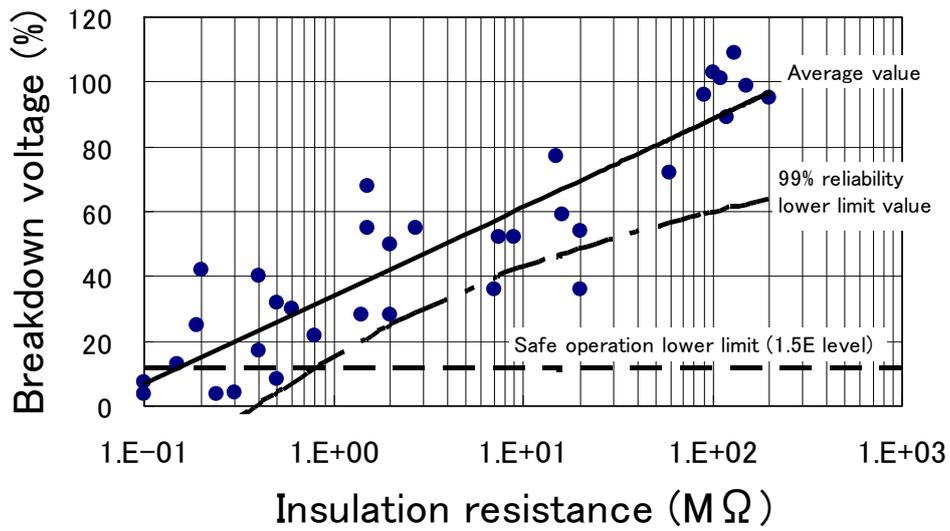


図3.14 絶縁抵抗値と絶縁破壊電圧値

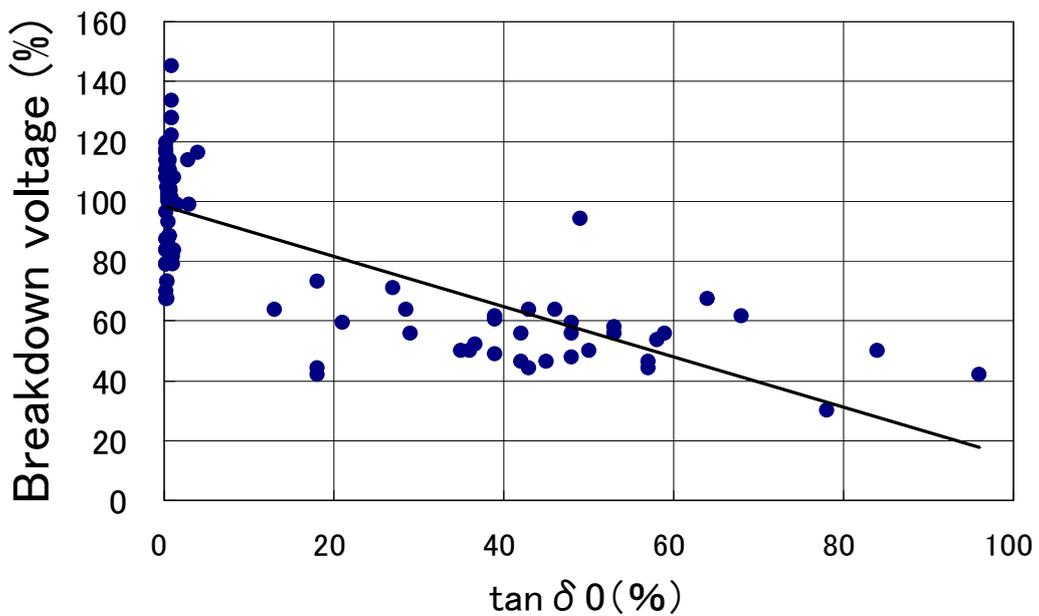


図3.15  $\tan \delta_0$  と絶縁破壊電圧値

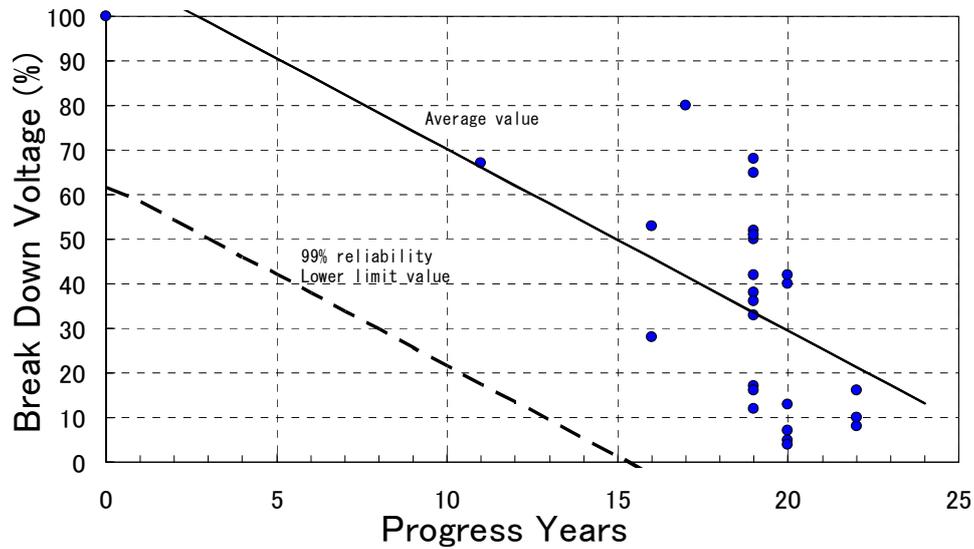


図3.16 運転経過年数と絶縁破壊電圧値

### 3. 6 低圧電動機の点検と保守

一般に保守現場にて実施されている低圧電動機の点検と保守を表3.3に示す。保守現場にて実施されている点検は事後保全、または時間計画保全の範囲に留まっている。

表3.3 低圧電動機の点検と保守

点検	点検周期	点検内容	保守内容
日常点検 (運転中)	1ヶ月	(1)指触または温度計にて運転中の温度計測 ・ フレーム温度 ・ 吸気・排気口の温度 ・ 軸受温度	・ 吸気・排気口の清掃
	毎日	(2)運転状況確認 ・ 電圧、電流 ・ 振動状態	
定期点検 (停止時)	6ヶ月	(1)巻線抵抗測定 (2)絶縁抵抗測定	・ 開放形電動機はエアブローにて機内清掃
分解点検	2~4年	(1)コイル外観目視点検 ・ 汚損状態 ・ 表面の亀裂、剥離の有無 ・ コイルエンドの糸縛り部の緩み有無 ・ ケーブルの亀裂・変色の有無 ・ コイル表面の変色の有無 ・ 楔の緩み・脱落の有無	・ エアブローによるコイル清掃 ・ 油脂付着など汚損状態に応じてスチーム洗浄・乾燥
		(2)絶縁抵抗測定, 他の絶縁試験	・ 絶縁特性管理要領に応じて洗浄・乾燥処理
		(3)構造部品の目視点検 ・ 金属表面の発錆状況 ・ 塗装状態 ・ 軸受外観 ・ 回転確認	・ 異常発生時は部品交換, または修理

電動機メーカー毎に保有する絶縁劣化特性に関わるデータベースをもとに絶縁特性試験の判定基準，保守に関わる管理基準が推奨されている。図3.17に運転状況，絶縁特性試験結果をもとにした管理フローの一例を示す。

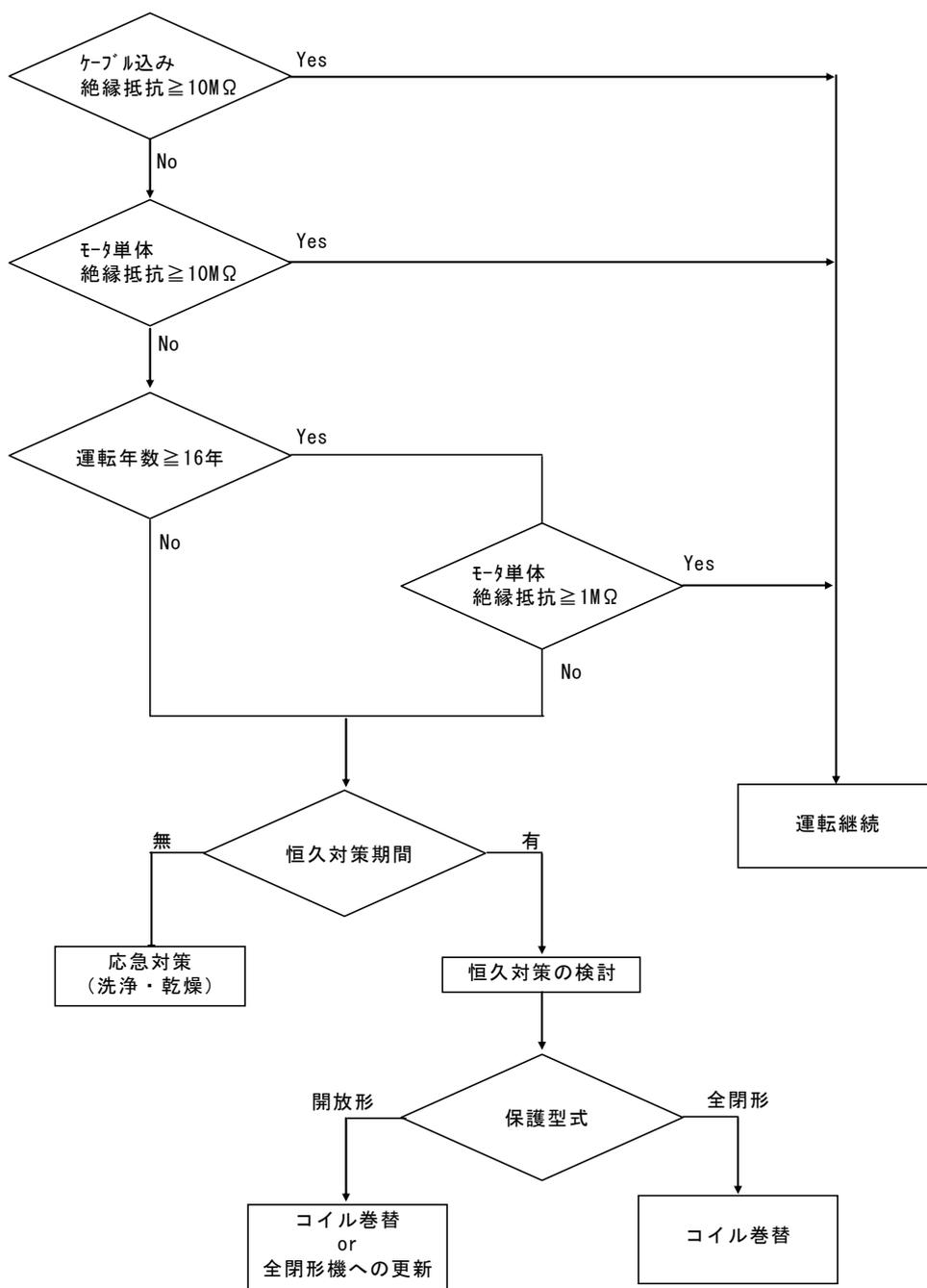


図3.17 低圧電動機の絶縁特性管理フロー例

### 3. 7 第3章のまとめ

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診断における課題として次の点が挙げられ、課題解決には、低圧電動機の絶縁劣化兆候も診断対象とするオンライン絶縁劣化兆候検出手法に関わる研究とオンライン絶縁劣化診断装置の開発、実用化を要する。

- (1) 絶縁劣化状態を診断する主要なパラメータである絶縁抵抗は付着塵埃量、湿度に大きく依存しており、経年的に進行する絶縁劣化の兆候を検出するパラメータとしては精度に欠ける。
- (2) 低圧電動機は同一プラント内に同運転年数の機器が多台数あるため、定期点検（絶縁試験）周期の延長化が進む中、低圧電動機については絶縁劣化兆候を検出して保守を行なう状態監視保全は概ね不可能である。
- (3) 実用化されているオンライン絶縁劣化診断装置は絶縁劣化進行に伴う部分放電を検出するものであり、運転電圧以下において放電現象を伴わない低圧電動機には適用できない。

低圧電動機の絶縁劣化の進展度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、これに熱的ストレス、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。絶縁劣化が進展し、巻線の絶縁貫通抵抗が低下すると絶縁抵抗低下が生じ、地絡、相間短絡、レアショート等の絶縁破壊事象に至る。

一般に低圧電動機の保守現場にて行なわれている絶縁特性試験において残存絶縁破壊電圧値との相関性が最も高いのは絶縁抵抗値（相関係数：0.81）であり、運転経過年数も高い相関性（相関係数：0.64）を有する。何れの絶縁特性試験もプラントの停止、電動機の解体を要するため、絶縁抵抗値と運転年数に基づく設備保全（劣化兆候管理）が最も有用と考えられる。

## 第4章 零相電流分析による絶縁劣化兆候検出

絶縁劣化事象の代表的な例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，正常電源（平衡三相電源）運転時のレアショート，地絡時を模擬した数値解析モデル回路を作成し，正常時と異常時（レアショート発生時，地絡発生時）の不平衡電流，高調波電流について評価した。

### 4.1 絶縁劣化時の零相電流の変化

#### (1) 固定子電流の高調波電流

誘導電動機が通常運転されている場合（平衡三相電源，電源高調波なし，工作誤差なし），図4.1に示すように固定子コイルに電流を流れることにより発生する起磁力（磁束分布）の各相の起磁力波形は矩形波状となる。このため基本波に対して奇数次の空間高調波が発生する。この空間高調波を起磁力高調波と呼ぶ。

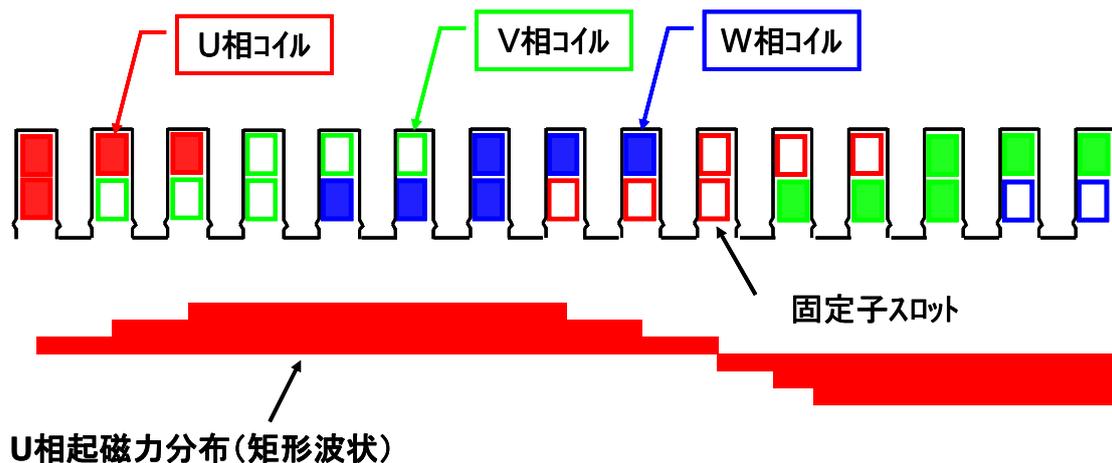


図4.1 起磁力分布の概要

固定子及び回転子スロット，ティース部では磁気抵抗が異なる（スロット上では磁気抵抗が大きく，ティース上では磁気抵抗が小さい）ため，スロット高調波と呼ばれるパーミアンス（磁気抵抗の逆数）高調波が発生する。回転子が回転し，回転子スロットの固定子スロットに対する位置は時間的に変化するためパーミアンス高調波には空間高調波次数に加えて時間高調波次数を含む。（図4.2 参照）空隙磁束密度高調波は，起磁力高調波×パーミアンス高調波であるため，(4.1) 式，(4.2) 式で表現される。

空隙磁束密度に高調波が発生すれば，固定子コイルに誘導される誘起電圧に高調波成分が重畳され，固定子電流に高調波電流が生じる。（図4.3 参照）

$$\text{空間高調波次数} : \frac{ksNs + krNr}{p + 6k \pm 1} \quad (4.1)$$

$$\text{時間高調波次数} : \frac{krNr(1-s)}{p \pm 1} \quad (4.2)$$

ここで、 $Ns$  : 固定子スロット数、 $Nr$  : 回転子スロット数、 $p$  : 極対数（電動機の極数の半分）、 $k$ 、 $ks$ 、 $kr$  : 任意の整数（1, 2, ...）である。

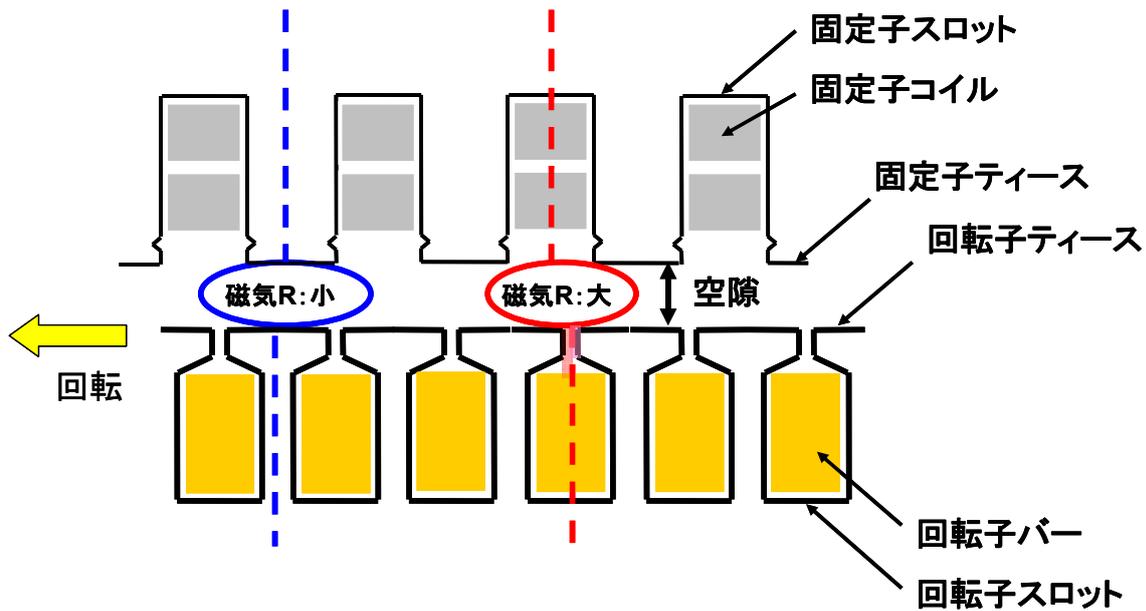


図4.2 パーミアンス高調波発生 の概要

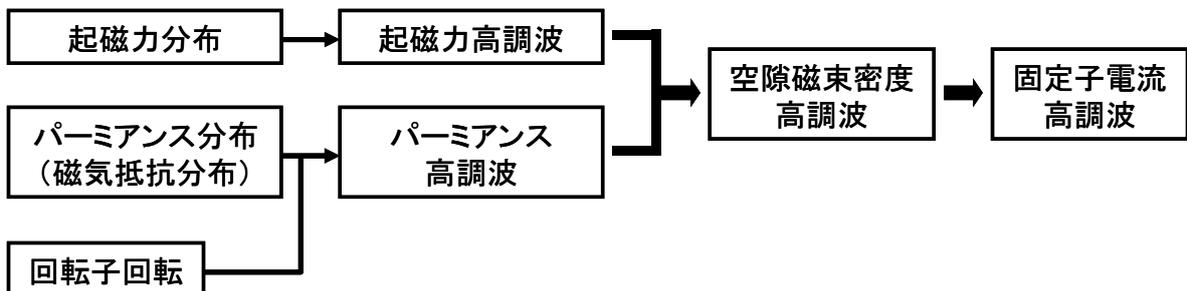


図4.3 固定子電流高調波発生 の概要

鉄心の磁気飽和によるパーミアンス高調波も存在するが、磁気飽和は非線形現象であるため理論的にフーリエ級数展開ができないため、(4.1) 式、(4.2) 式をもとに磁気飽和による高調波を加味した高調波次数は実務上、(4.3) 式、(4.4) 式にて求められている。

$$\text{空間高調波次数} : \frac{ksNs + krNr}{p} + 6k + 4kb \pm 1 \quad (4.3)$$

$$\text{時間高調波次数} : \frac{krNr(1-s)}{p} + 4kb \pm 1 \quad (4.4)$$

ここで、 $Ns$  : 固定子スロット数,  $Nr$  : 回転子スロット数,  $p$  : 極対数 (電動機の極数の半分),  $s$  : すべり,  $k, ks, kr, kb$  : 任意の整数 (1,2,・・・) である。

## (2) 零相電流変化のメカニズム

地絡, レアショートが生じると不平衡電流が発生する。不平衡電流の発生にて起磁力分布, 起磁力高調波が変化し, 空隙磁束密度分布ならびに空隙磁束密度に含まれる高調波成分も変化する。空隙磁束密度の高調波の変化にともなう固定子コイルに誘起電圧の高調波成分が変化し, 零相電流の高調波成分が変化する。(図4.4 参照)

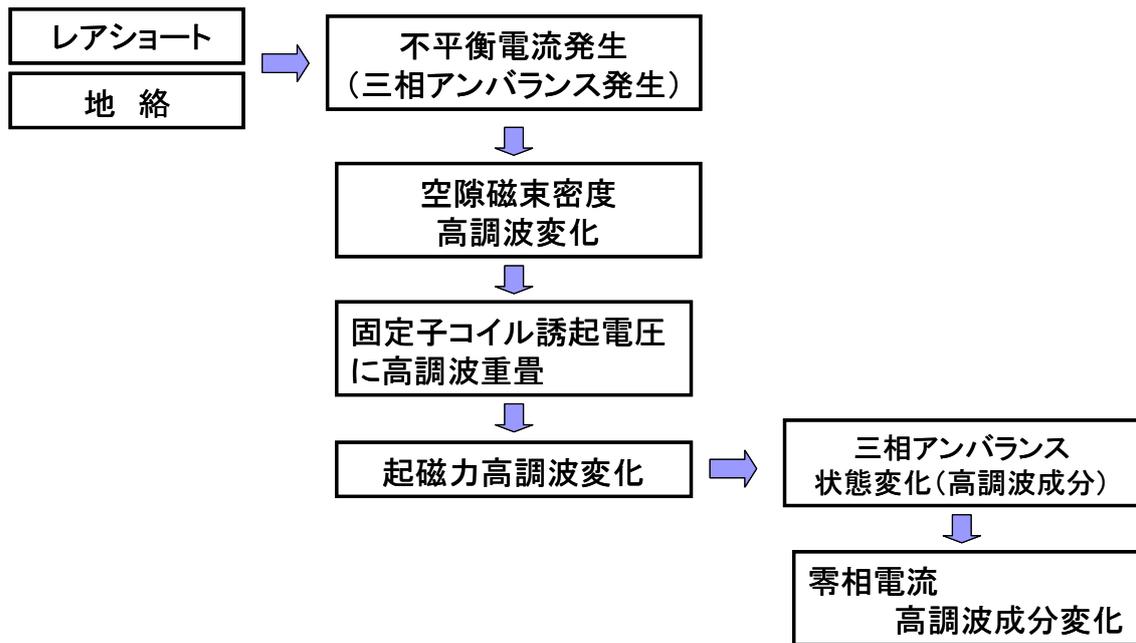


図4.4 零相電流変化のメカニズム

この零相電流の高調波成分の変化兆候を定量的に捉えることができれば, 地絡, レアショートに代表される絶縁劣化現象の前駆現象の検出が可能となり, 合わせてZCTを用いた零相電流の計測, 分析となるのでオンライン計測, 兆候検出が可能となる。

#### 4. 2 零相電流高調波成分の数値解析

地絡，リアショートが発生した場合の零相電流に含まれる高調波成分の特徴について数値解析を用いて評価した。一般に誘導電動機を模擬するT-II形等価回路では高調波電流を評価できないため磁界解析を併用した手法を検討し，正常時と異常時の不平衡電流，高調波電流の差異の有無について評価した。

この空間高調波の評価は，電磁界における基礎方程式であるMaxwell方程式（偏微分方程式）を有限要素法により離散化し，磁気飽和については鉄心材料の磁化特性曲線を数値的に導入することにて数値解析を行う。

##### (1) 基礎方程式

電磁界の基礎方程式はMaxwell方程式であり，変位電流に関する項を無視する準定常場では以下の式で表される。

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}\end{aligned}\quad (4.5)$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot J = 0$$

ここで， $H$ ：磁界強度， $B$ ：磁束密度， $J$ ：電流密度， $E$ ：電界強度である。

また，電磁界の構成式として以下の式が成立する。

$$H = -\frac{1}{\mu} B \quad (4.6)$$

$$J = \sigma E$$

ここで， $\sigma$ ：導電率， $\mu$ ：透磁率である。

また，磁気ベクトルポテンシャル $A$ ，電気スカラーポテンシャル $\phi$ を以下の式で表されるように導入する。

$$E = -\nabla \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.7)$$

$$B = \nabla \times A$$

電流密度 $J$ を渦電流密度 $J_s$ と強制電流密度 $J_f$ に分離することで，(4.5)式～(4.7)式をまとめると，(4.8)式の電磁界支配方程式を得ることができる。

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{\mu} (\nabla \times A + M) \right\} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_s \quad (4.8)$$

## (2) 定式化

(4.8) 式で示された電磁界支配方程式にベクトル公式、Stokesの定理およびGaussの発散定理を用いてGalerkin法により弱定式化する。

$$\int_{R_1} \sigma N \frac{\partial A}{\partial t} dV + \int_{R_1+R_2} \frac{1}{\mu} \nabla \times N (\nabla \times A + M) dV - \int_{R_2} (N \times J_s) dV = \int_{S_2} \frac{1}{\mu} N (\nabla \times A + M) \times n dS \quad (4.9)$$

ただし、領域 $R_1$ は渦電流発生導体が存在する領域であり、 $R_2$ は渦電流発生導体のない磁性体領域（強制電流はこの領域にある）、 $S_2$ は境界条件の領域である。ここで、 $N$ は形状関数、 $n$ は法線方向単位ベクトルである。

## (3) 外部回路の考慮

外部回路として定電圧源および抵抗やインダクタンスが直列に結線された場合の定式化を行う。

(4.9) 式をマトリクス表現すると以下の式で表される。

$$C \frac{dX}{dt} + Hx - Fi = K \quad (4.10)$$

ここで、 $x$ は磁気ベクトルポテンシャルの未知量を並べた縦ベクトル、 $i$ は各相電流を並べた縦ベクトル、右辺 $K$ は永久磁石及び境界条件に関する量である。また、 $C$ 、 $H$ 、 $F$ は(4.9)式の第1、2、3項に対する係数行列である。

各相に対する回路方程式は次式で表される。

$$v = \frac{d\phi}{dt} + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (4.11)$$

ここで、 $L$ 、 $R$ は外部インダクタンス及び外部抵抗のマトリクスであり、一般に対角要素しか持たない。 $v$ は相電圧、 $\Phi$ は鎖交磁束であり、

$$\phi_i = \int_{R_1+R_2} A J_n dV \quad (4.12)$$

$$\Phi = F^t x$$

で表される（添字  $n$  は  $n$  相の巻線を意味しており、 $t$  は転置行列を意味する）。

図4.5に示すような三相Y結線を考えて、 $uv$ 間の電圧 $V_{uv}$ 及び $vw$ 間の電圧 $V_{vw}$ は次式で表される（ $V_{wu}$ は自ずと決定される）。

$$V = \begin{bmatrix} V_{uv} \\ V_{vw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, -1, 0 \\ 0, 1, -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_u \\ V_v \\ V_w \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

この係数マトリクスを $T$ とすれば、(4.11)式は以下に書き換えられる。

$$V = T V = T F \frac{dX}{dt} + T L \frac{di}{dt} + T R i \quad (4.14)$$

この(4.14)式と(4.12)式を連立させて解くことで、線間電圧入力を達成することができる。

#### (4) 回転子の回転の考慮

回転子が速度 $u$ で回転することで $u \times B$ による起電力が発生する。回転機のように回転子が回転することで、固定子と回転子のスロットの位置関係が時々刻々変化するような解析対象には、 $u \times B$ を直接支配方程式中に導入することでは詳細な解析ができないため、回転子座標系を用いた解析が必要となる。

本稿では時間刻み幅を自由に設定でき、かつ空隙中央での回転子側と固定子側のメッシュが一致していなくても回転子の回転を解析できる方法を用いた。この方法は、摺動要素法、浮き節点法等とも似通っているが、ここではスライド要素法という。スライド要素法は以下の考え方で構成される。図4.6に示すように、空隙中央にスライド面を設け、固定子側のメッシュと回転子側のメッシュを分離する。このスライド要素は、周方向に等間隔に作成された平面要素である。ただし、軸方向のメッシュラインは固定子側及び回転子側で合わせておく必要がある。

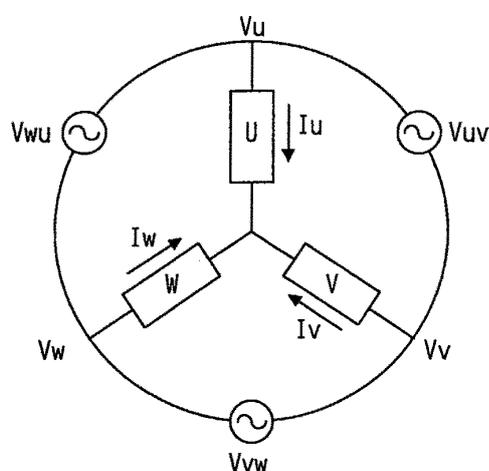


図 4.5 Y 結線

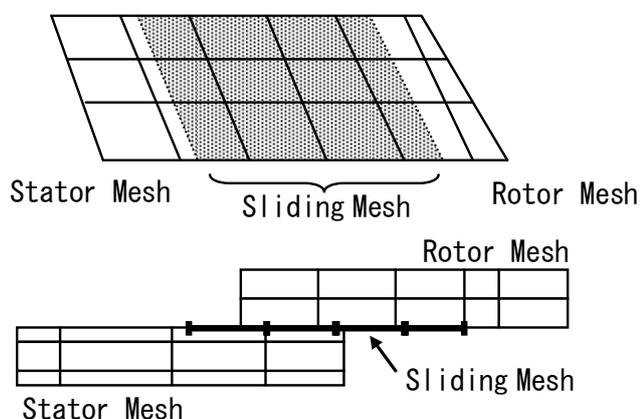
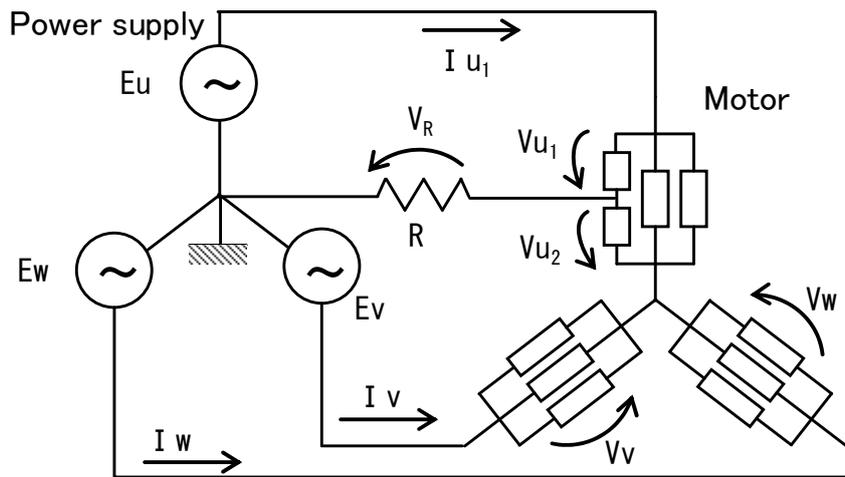


図 4.6 スライディング要素

地絡，リアショート状態を解析する場合，上記の係数マトリクスを地絡，リアショートに合わせて生成することで解析が可能である。解析は，無負荷で巻線の間接点での地絡，リアショートが発生した条件で行った。

#### 4. 3 解析モデル

地絡解析モデル回路を図4.7，図4.8に示す。



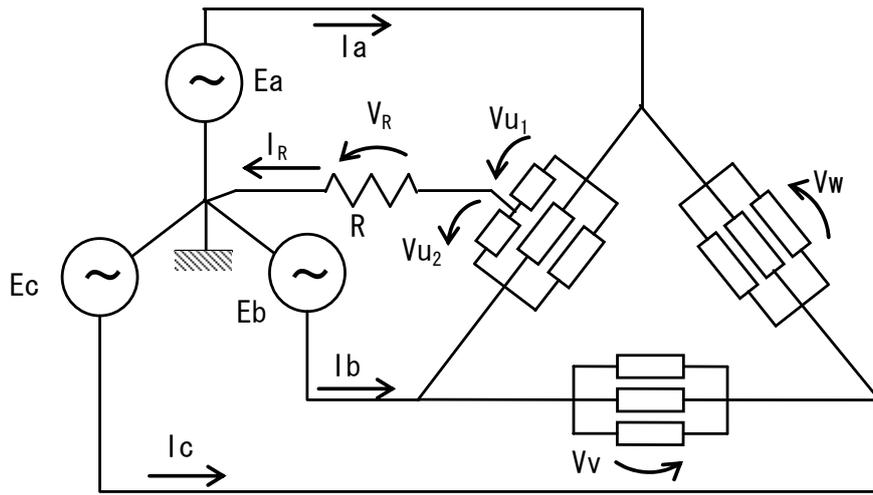
- |  |   |
|--|---|
| Eu, Ev, Ew : phase voltage of power supply                             | [Condition]                                   |
| Vv, Vw : phase voltage of motor  | Connection: 3//Y                              |
| Iv, Iw : phase current of motor  | Earth fault: Center of u-phase (R=1kΩ, 100kΩ) |
| Vu <sub>1</sub> , Vu <sub>2</sub> : earth fault phase voltage of motor | No load running                               |
| V <sub>R</sub> : voltage of earth fault line                           |   |
| Iu <sub>1</sub> : earth fault phase current of motor                   |   |
| R : resistance of earth fault line                                     |   |

図4.7 Y結線 地絡解析モデル

Y結線 地絡解析モデル回路の電圧方程式は下式となる。

$$\begin{aligned}
 E_u &= V_{u_1} + V_R \\
 E_v &= V_v - V_{u_2} + V_R \\
 E_w &= V_w - V_v - E_v
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} E_u \\ E_v \\ E_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{u_1} \\ V_{u_2} \\ V_v \\ V_w \\ V_R \end{pmatrix} \quad (4.15)$$



Ea, Eb, Ec : phase voltage of power supply  
 Ia, Ib, Ic : phase current of power supply  
 Vu<sub>1</sub>, Vu<sub>2</sub> : earth fault phase voltage of motor  
 V<sub>R</sub> : voltage of earth fault line  
 I<sub>R</sub> : current of earth fault line  
 R : resistance of earth fault line

[Condition]  
 Connection: 3//Δ  
 Earth fault: Center of u-phase (R=1kΩ, 100kΩ)  
 No load running

図4.8 Δ結線 地絡解析モデル

Δ結線 地絡解析モデル回路の電圧方程式は下式となる。

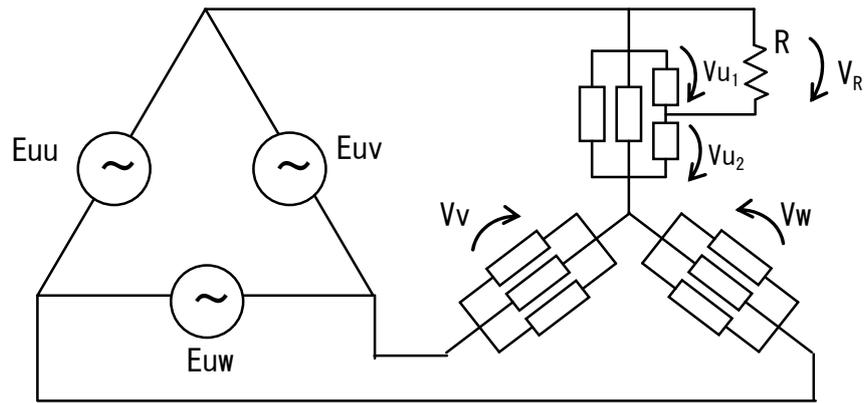
$$\begin{aligned}
 E_a &= V_{u1} + V_R \\
 E_b &= -V_{u2} + V_R \\
 E_c &= -V_V - E_b \\
 V_{u1} + V_{u2} + V_V + V_W &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{u1} \\ V_{u2} \\ V_V \\ V_W \\ V_R \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

(4.15) 式, (4.16) 式の電圧方程式を有限要素法 (磁場解析) と連成解析することで各電流を計算することができる。

$$\begin{aligned}
 \text{零相電流} &= I_{u1} + I_V + I_W \\
 &= (I_R + I_{u2} + I_V + I_W) \\
 &= I_R : \text{地絡電流}
 \end{aligned} \quad (4.17)$$

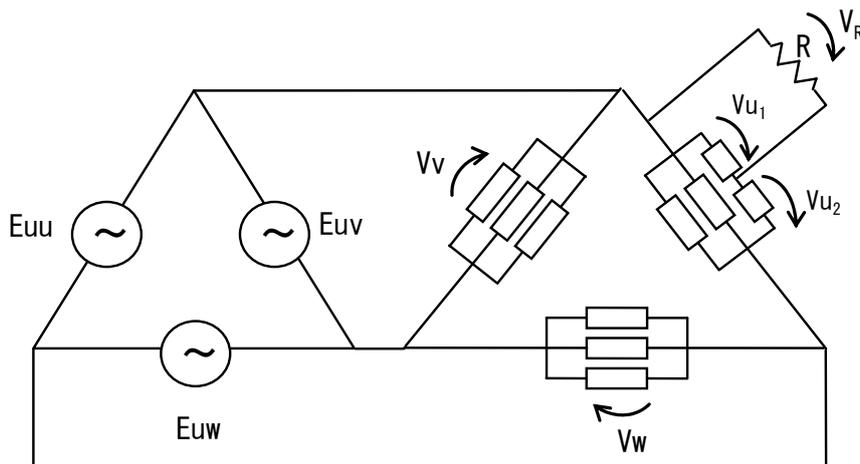
リアシヨート解析モデル回路を図4.9, 図4.10に示す。



$E_{uu}, E_{uv}, E_{uw}$  : phase voltage of power supply  
 $V_v, V_w$  : phase voltage of motor  
 $V_{u_1}, V_{u_2}$  : layer-short t phase voltage of motor  
 $V_R$  : voltage of layer-short line  
 $R$  : resistance of layer-short line

[Condition]  
 Connection: 3//Y  
 Layer-short: Center of u-phase ( $R=1k\Omega, 100k\Omega$ )  
 No load running

図4.9 Y結線 レアショート解析モデル



$E_u, E_v, E_w$  : phase voltage of power supply  
 $V_v, V_w$  : phase voltage of motor  
 $V_{u_1}, V_{u_2}$  : layer-short t phase voltage of motor  
 $V_R$  : voltage of layer-short line  
 $R$  : resistance of layer-short line

[Condition]  
 Connection: 3// $\Delta$   
 Layer-short : Center of u-phase ( $R=1k\Omega, 100k\Omega$ )  
 No load running

図4.10  $\Delta$ 結線 レアショート解析モデル

#### 4. 4 解析結果

電圧方程式と有限要素法（磁界解析）により電流解析を行い、不平衡電流および高調波電流について正常時からの変動について評価を行った。各電流の絶対値は電動機的设计諸元毎に異なることから評価対象とはせず、正常時からの変化に着目した。1次成分の零相電流に含まれる比率は高周波成分に比べ極大であるため、1次成分については省略した。地絡、またはレアショート時には高調波成分が発生、増大すること

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（地絡抵抗），リアショート時の素線間抵抗（リアショート抵抗）が小さくなると3次成分，5次成分が増大する。

(1) 正常状態

図4.11, 図4.12にY結線モデル, Δ結線モデルの正常状態での零相電流に含まれる高調波成分の比率を示す。Y結線モデルでは5次と20次周辺の高調波成分が検出され, Δ結線モデルでは5次成分, 7次成分と20次周辺の高調波が検出された。空隙磁束密度高調波に起因する高調波成分が確認された。

正常運転状態でも微弱であるが, 空隙磁束密度分布による空隙磁束密度高周波が発生する。Y結線回路とΔ結線回路の高調波成分の発生状態に差異が確認されるが, これは線間電圧, 零相電圧, 零相電流の差異による。

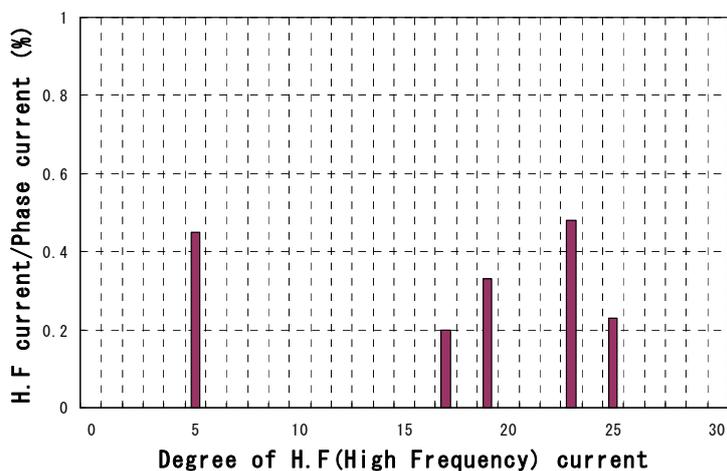


図 4.11 零相電流の高周波成分比率 (Y 結線, 正常状態)

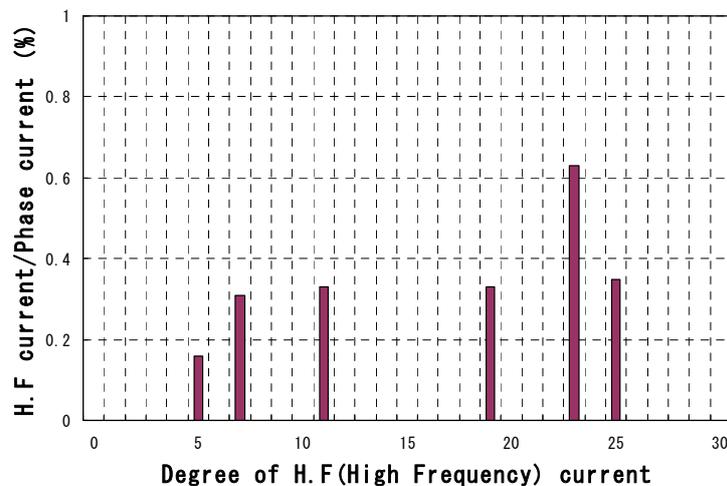


図 4.12 零相電流の高周波成分比率 (Δ 結線, 正常状態)

## (2) 地絡模擬状態

図4.13～図4.16にY結線モデル, Δ結線モデルの地絡模擬状態での零相電流に含まれる高調波成分の比率を示す。

正常状態と比較すると5次成分の変化(増大)が確認され, Y結線モデルでは1.2～1.4倍, Δ結線モデルでは3～5倍に増大しており, 特にΔ結線モデルは地絡抵抗の変化に対し, 大きく変化する。また, 地絡抵抗が小さくなると正常状態では確認されなかった3次成分, 7次成分, 9次成分, 11成分, 13次成分の発生が確認された。

Y結線回路の場合, 地絡抵抗が小さくなり, 絶縁劣化レベルが高まると特徴周波数である5次成分が増大し, 正常状態では発生していなかった7次, 9次などの奇数高次成分が発生する。

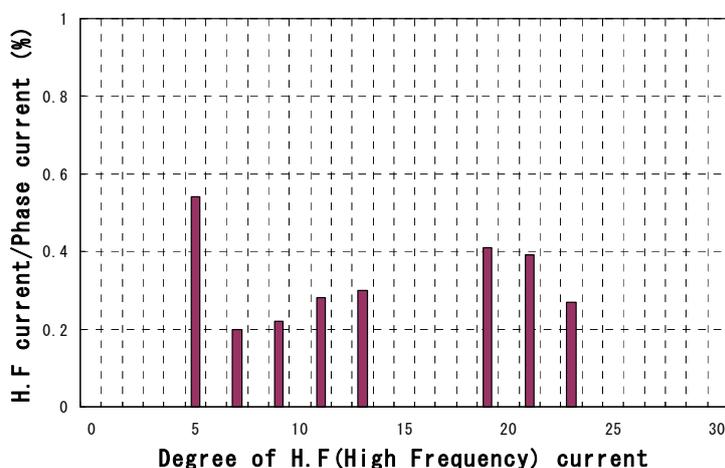


図 4.13 零相電流の高周波成分比率  
(Y 結線, 地絡模擬状態, 地絡抵抗 1kΩ)

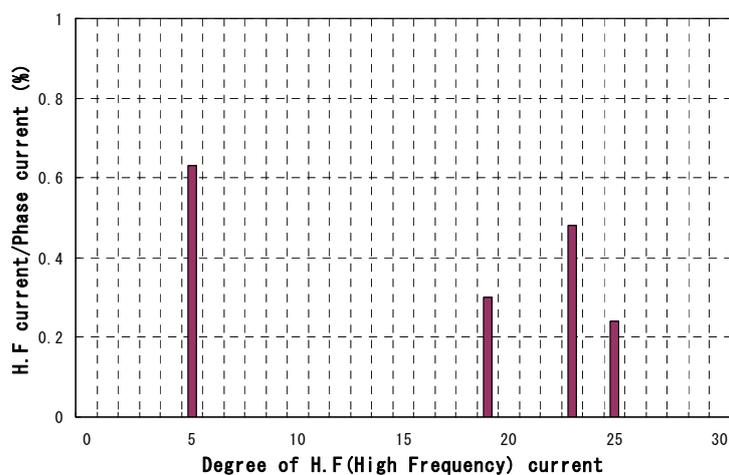


図 4.14 零相電流の高周波成分比率  
(Y 結線, 地絡模擬状態, 地絡抵抗 100kΩ)

△結線回路の場合も地絡抵抗が小さくなり、絶縁劣化レベルが高まると特徴周波数である5次成分が増大し、正常状態では発生していなかった3次、7次、9次などの奇数高次成分が発生する。

Y結線回路、△結線回路ともに地絡抵抗の減少を地絡現象の前駆現象と考えると5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化兆候にて地絡現象の前駆現象、兆候を検出可能と考えられる。

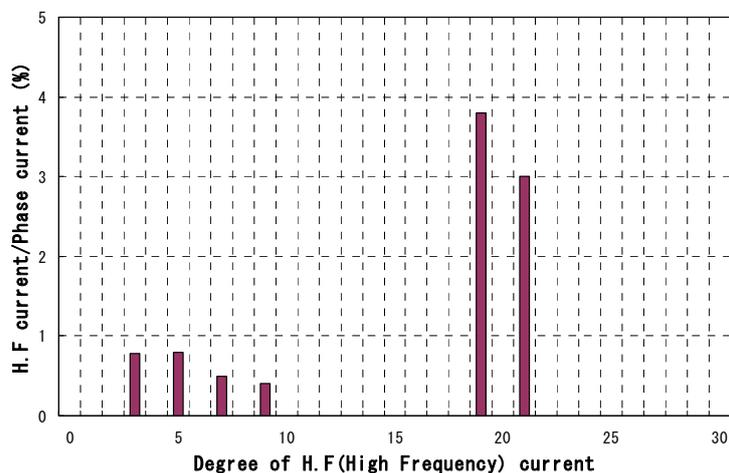


図 4.15 零相電流の高周波成分比率  
(△結線, 地絡模擬状態, 地絡抵抗 1kΩ)

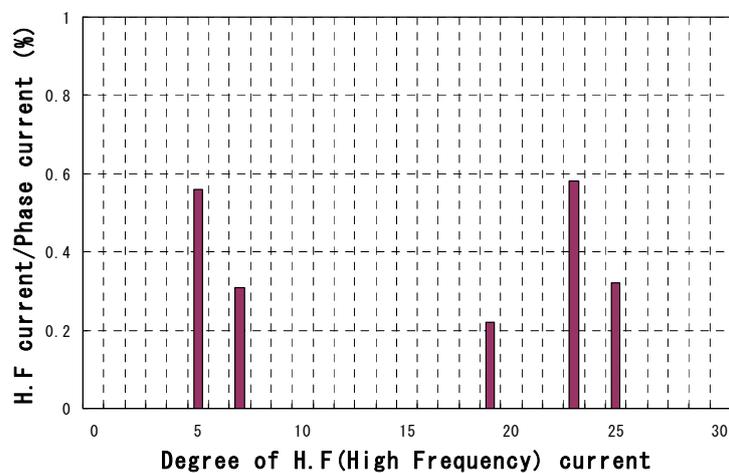


図4.16 零相電流の高周波成分比率  
(△結線, 地絡模擬状態, 地絡抵抗 100kΩ)

### (3) レアショート模擬状態

図4.17～図4.20にY結線モデル、△結線モデルのレアショート模擬状態での零相電流に含まれる高調波成分の比率を示す。

正常状態と比較すると3次成分、5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化（増大）が確認された。特に3次成分と5次成分の変化が顕著である。3次成分はレアショート抵抗が100Ω→0.1Ωに変化する

ことで5~6倍に増大し、5次成分は2倍に増大する。

Y結線回路の場合、レアショート抵抗が小さくなり、絶縁劣化レベルが高まると特徴周波数である3次成分、5次成分が増大し、正常状態では発生していなかった高次成分が発生する。レアショートの場合は微弱ではあるが偶数次成分も発生する。

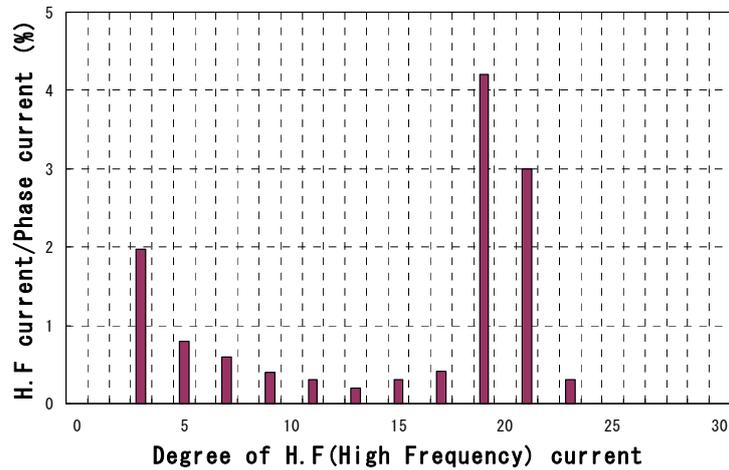


図 4.17 零相電流の高周波成分比率  
(Y結線, レアショート模擬状態, レアショート抵抗 0.1Ω)

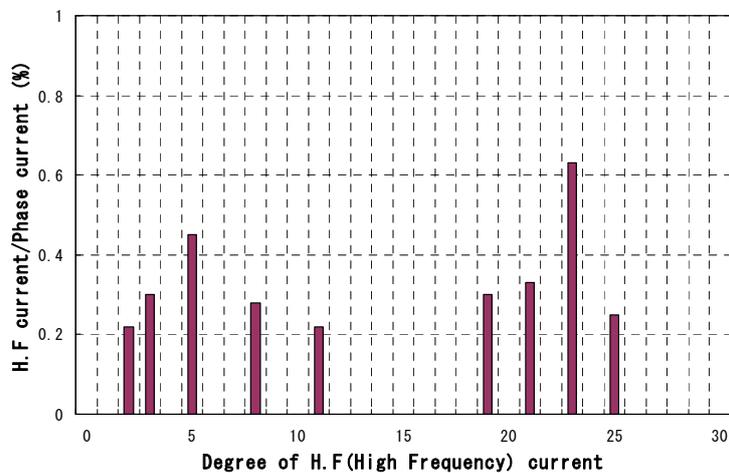


図 4.18 零相電流の高周波成分比率  
(Y結線, レアショート模擬状態, レアショート抵抗 100Ω)

Δ結線回路の場合もレアショート抵抗が小さくなり、絶縁劣化レベルが高まると特徴周波数である3次成分が増大し、正常状態では発生していなかった5次、7次、9次などの奇数高次成分が発生する。

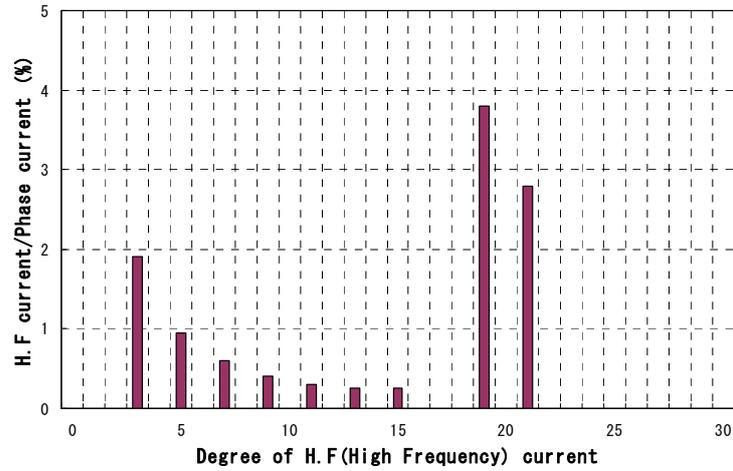


図 4.19 零相電流の高周波成分比率  
( $\Delta$ 結線, レアショート模擬状態, レアショート抵抗  $0.1\ \Omega$ )

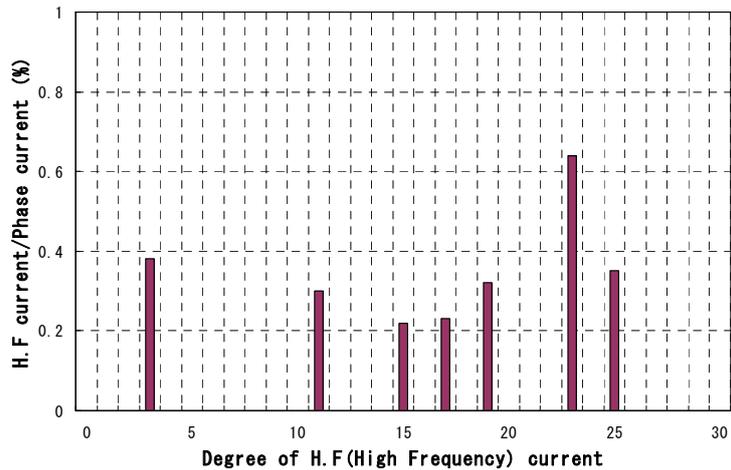


図 4.20 零相電流の高周波成分比率  
( $\Delta$ 結線, レアショート模擬状態, レアショート抵抗  $100\ \Omega$ )

Y結線回路,  $\Delta$ 結線回路ともレアショート抵抗の減少をレアショート現象の前駆現象と考えたと3次成分, 5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化兆候にてレアショート現象の前駆現象, 兆候を検出可能と考えられる。

#### 4. 5 第4章のまとめ

絶縁劣化事象の代表的な例である地絡, レアショートが生じると不平衡電流が発生する。不平衡電流の発生にて起磁力分布, 起磁力高調波が変化し, 空隙磁束密度分布ならびに空隙磁束密度に含まれる高調波成分も変化する。空隙磁束密度の高調波の変化にともなう固定子コイルに誘起電圧の高調波成分が変化し, 零相電流の高調波成分が変化する。この零相電流の高調波成分の変化兆候を定量的に捉えることができた

ら、地絡、レアショートに代表される絶縁劣化現象の前駆現象の検出が可能となり、合わせてZCTを用いた零相電流の計測、分析となるのでオンライン計測、兆候検出が可能となる。

正常電源（平衡三相電源）運転時のレアショート、地絡時を模擬した数値解析モデル回路を作成し、正常時と異常時（レアショート発生時、地絡発生時）の不均衡電流、高調波電流について評価した。

数値解析モデルにおける地絡抵抗、レアショート抵抗の減少を絶縁劣化現象の前駆現象と考えると3次成分、5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化兆候にて絶縁劣化現象の前駆現象、兆候を検出可能と評価される。

#### （1）正常状態

Y結線モデルでは5次と20次周辺の高調波成分が検出され、 $\Delta$ 結線モデルでは5次成分、7次成分と20次周辺の高調波が検出された。空隙磁束密度高調波に起因する高調波成分が確認された。正常運転状態でも微弱であるが、空隙磁束密度分布による空隙磁束密度高周波が発生する。

#### （2）地絡模擬状態

正常状態と比較すると5次成分の変化（増大）が確認され、Y結線モデルでは1.2～1.4倍、 $\Delta$ 結線モデルでは3～5倍に増大しており、特に $\Delta$ 結線モデルは地絡抵抗の変化に対し、大きく変化する。また、地絡抵抗が小さくなると正常状態では確認されなかった3次成分、7次成分、9次成分、11成分、13次成分の発生が確認された。

Y結線回路、 $\Delta$ 結線回路ともに地絡抵抗の減少を地絡現象の前駆現象と考えると5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化兆候にて地絡現象の前駆現象、兆候を検出可能と考えられる。

#### （3）レアショート抵抗状態

正常状態と比較すると3次成分、5次成分ならびに他の奇数次成分の変化（増大）が確認された。特に3次成分と5次成分の変化が顕著である。3次成分はレアショート抵抗が $100\Omega \rightarrow 0.1\Omega$ に変化することで5～6倍に増大し、5次成分は2倍に増大する。

Y結線回路、 $\Delta$ 結線回路ともレアショート抵抗の減少をレアショート現象の前駆現象と考えると3次成分、5次成分ならびに他の奇数高次成分の変化兆候にてレアショート現象の前駆現象、兆候を検出可能と考えられる。

## 第5章 絶縁劣化模擬試験

### 5.1 絶縁劣化の模擬と試験回路

低圧誘導電動機の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（地絡、レアショート）を模擬した試験回路にて負荷運転中の零相電流の変化について確認した。図5.1、図5.2に試験回路を示す。

#### (1) 供試電動機仕様

出力：60 kW 電圧：440 V 周波数：60 Hz 回転数：1200 rpm

#### (2) 絶縁劣化状態の模擬要領

##### ①地絡模擬

コイルエンドのコイル素線に電線を半田付し、外部に取り出し、取り出し線とアース間に1 k Ω、10 k Ω、100 k Ω、800 k Ωの抵抗を接続する。

##### ②レアショート模擬

コイルエンドのコイル電線に電線を半田付し、外部に取り出し、取り出し線間に短絡回路を構成する。

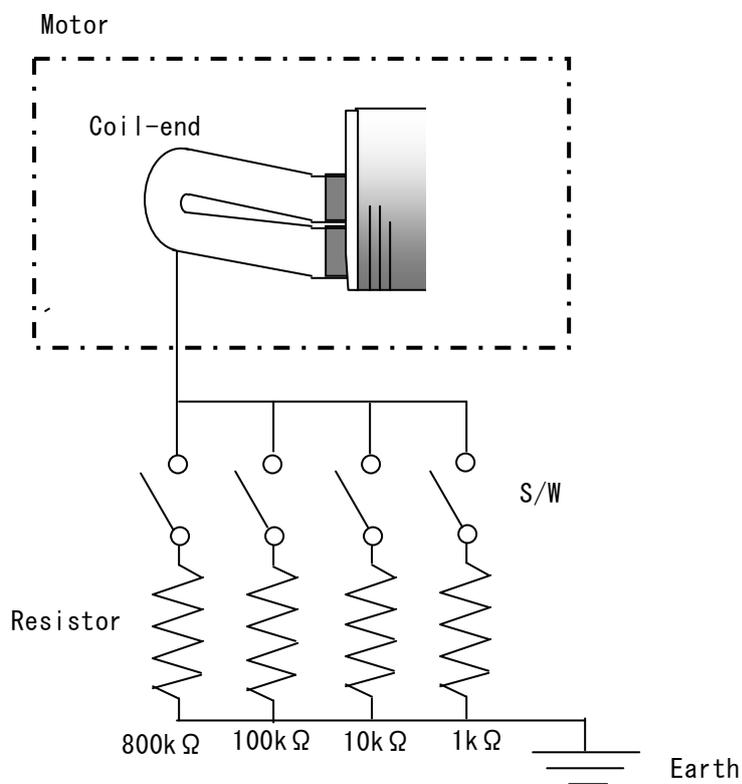


図5.1 地絡模擬試験回路

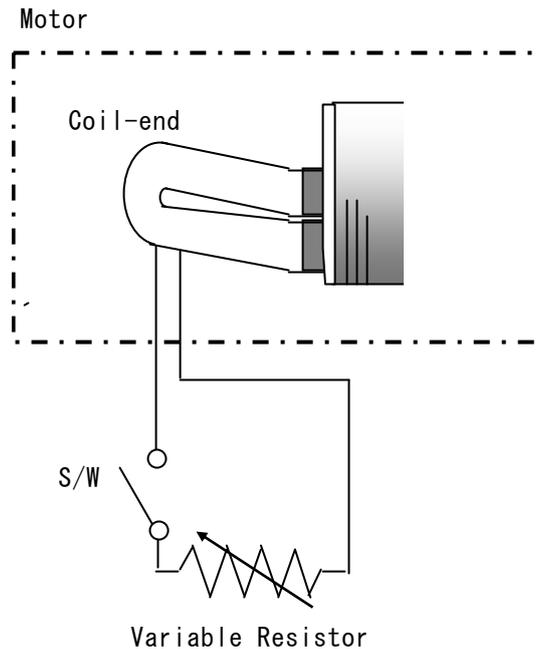


図5.2 レアショート模擬試験回路

### (3) データ収集要領

絶縁劣化模擬試験回路にて零相電流をアナログデータとして収集し、そのアナログデータをA/D変換する。

## 5. 2 差分波形の生成と特徴抽出

正常状態、地絡模擬状態ならびにレアショート模擬状態における零相電流波形の変化を明確に抽出するために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、差分波形の特徴を抽出するために差分波形の高速フーリエ変換 (FFT)、短時間スペクトル (STS)、ウェーブレット変換 (CWT) を行った。

### (1) 差分波形の生成

差分波形は、正常状態、劣化模擬状態の生波形をデジタル化し、正常状態波形データと劣化模擬状態波形データの差分より差分波形を生成した。

$$[\text{差分波形データ}] = [\text{劣化模擬状態波形データ}] - [\text{正常状態波形データ}]$$

### (2) サンプリング周期の検討

差分波形生成のための生波形のデジタル化の際のサンプリング周期を [200kHz 10000点] と [20kHz 10000点] による差分波形と差分波形分析結果を比較し、差分波形の特徴抽出に有利なサンプリング周期を確認した。

### ①差分波形

地絡模擬状態（地絡抵抗：800k $\Omega$ ，100k $\Omega$ ，10k $\Omega$ ，1k $\Omega$ ），レアショート模擬状態（レアショート抵抗：220 $\Omega$ ，200 $\Omega$ ，140 $\Omega$ ，120 $\Omega$ ，90 $\Omega$ ）のサンプリング周期 [200kHz 10000点] にて生成した差分波形を図5.3～図5.11に示す。

地絡模擬状態，レアショート模擬状態ともに60Hz成分の基本波に高次成分が重畳した波形であり，絶縁劣化模擬レベル（地絡抵抗，レアショート抵抗）の差異に応じて高次成分の重畳の状況が異なる。

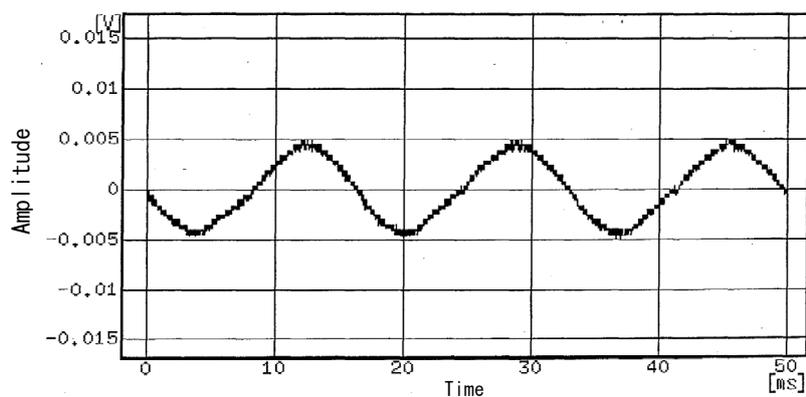


図5.3 差分波形  
(地絡模擬状態，地絡抵抗800k $\Omega$ ，200kHzサンプリング)

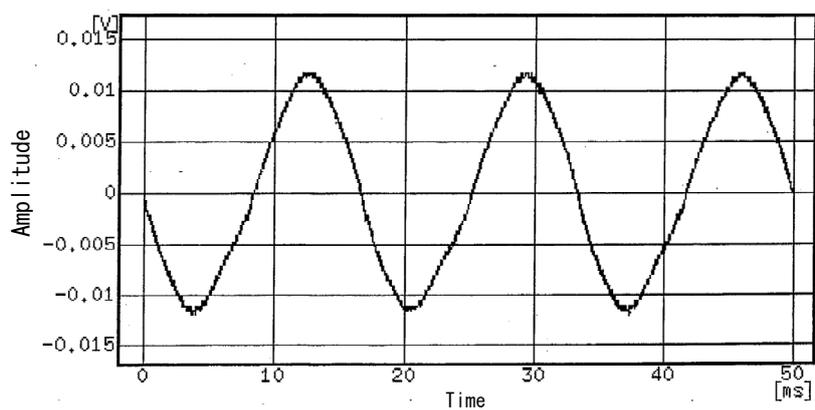


図5.4 差分波形  
(地絡模擬状態，地絡抵抗100k $\Omega$ ，200kHzサンプリング)

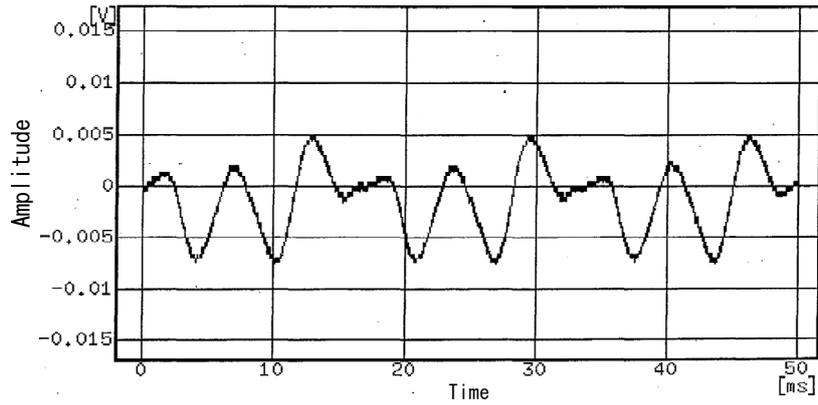


図5.5 差分波形  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗 $10\text{k}\Omega$ ,  $200\text{kHz}$ サンプリング)

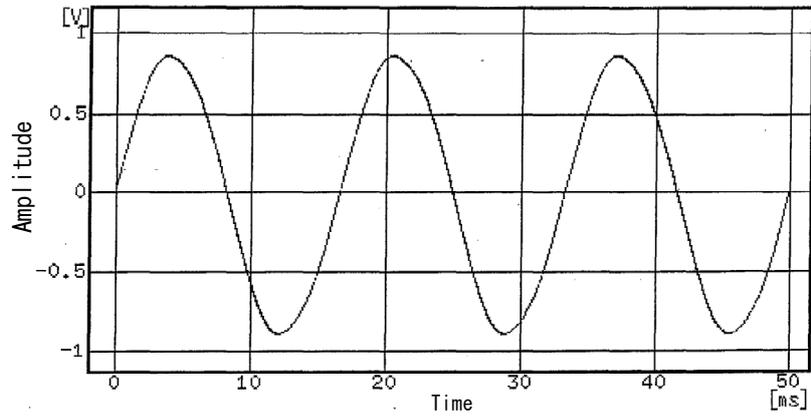


図5.6 差分波形  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗 $1\text{k}\Omega$ ,  $200\text{kHz}$ サンプリング)

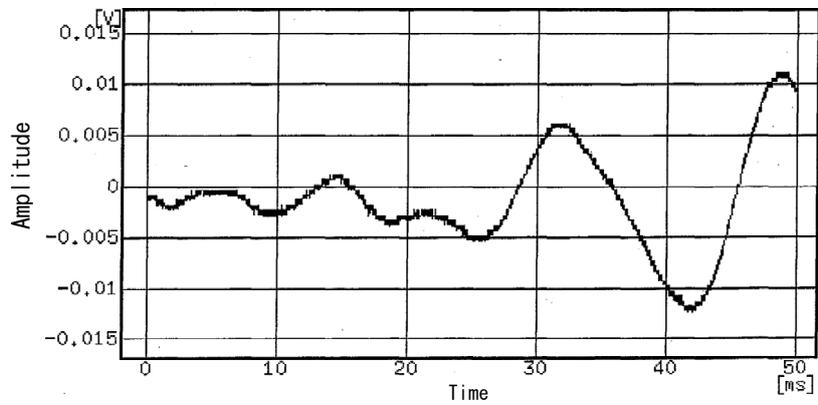


図5.7 差分波形  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗 $220\Omega$ ,  $200\text{kHz}$ サンプリング)

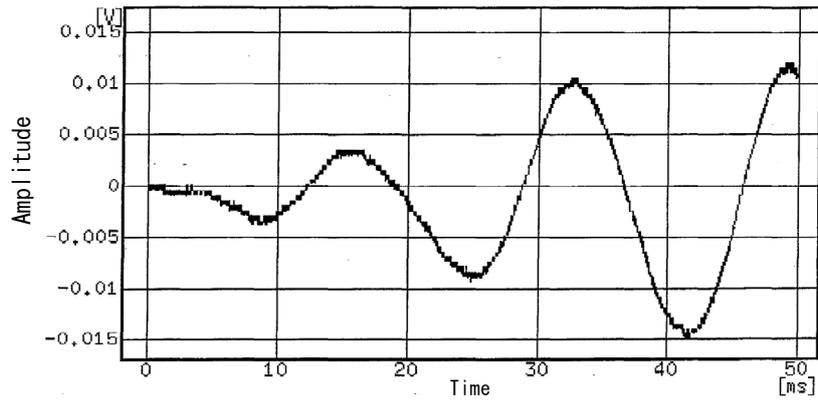


図5.8 差分波形  
(リアショート模擬状態, レアショート抵抗 $200\Omega$ , 200kHzサンプリング)

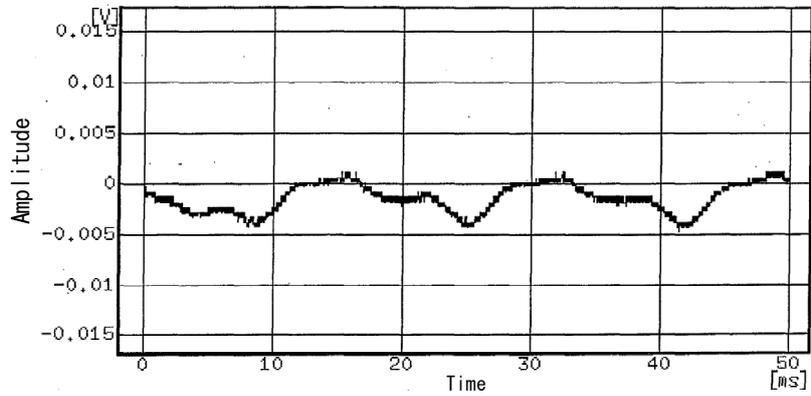


図5.9 差分波形  
(リアショート模擬状態, レアショート抵抗 $140\Omega$ , 200kHzサンプリング)

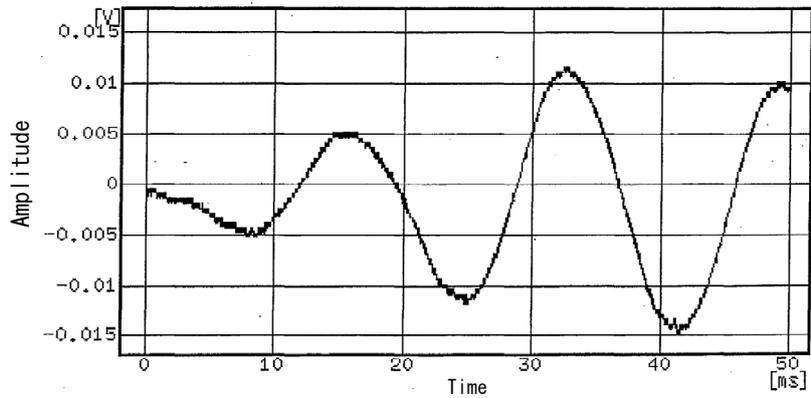


図5.10 差分波形  
(リアショート模擬状態, レアショート抵抗 $120\Omega$ , 200kHzサンプリング)

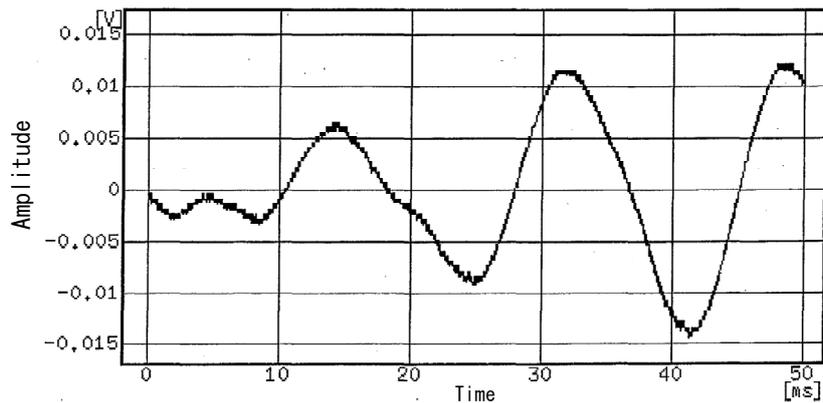


図5.11 差分波形  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗 $90\ \Omega$ , 200kHzサンプリング)

サンプリング周期 [20kHz 10000点] にて生成した差分波形を図5.12～図5.20に示す。

サンプリング周期 [200kHz 10000点] にて生成した差分波形と同様に地絡模擬状態, レアショート模擬状態ともに60Hz成分の基本波に高次成分が重畳した波形であり, 絶縁劣化模擬レベル (地絡抵抗, レアショート抵抗) の差異に応じて高次成分の重畳の状況が異なる。

差分波形自体に200kHzサンプリングと20kHzサンプリングの有意差は確認されなかった。

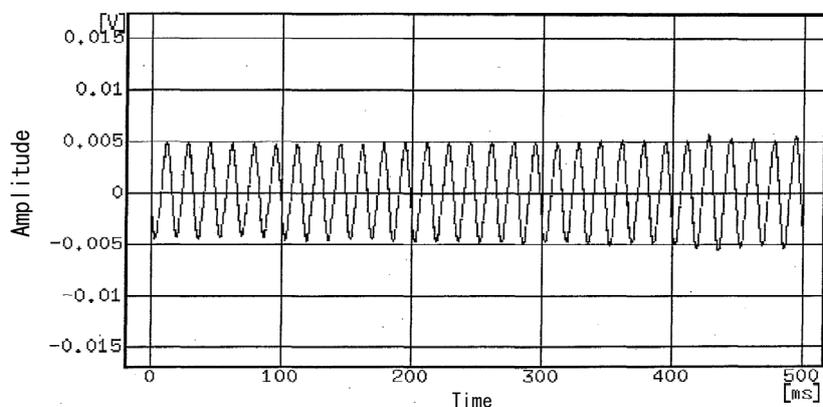


図5.12 差分波形  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗 $800\text{k}\ \Omega$ , 20kHzサンプリング)

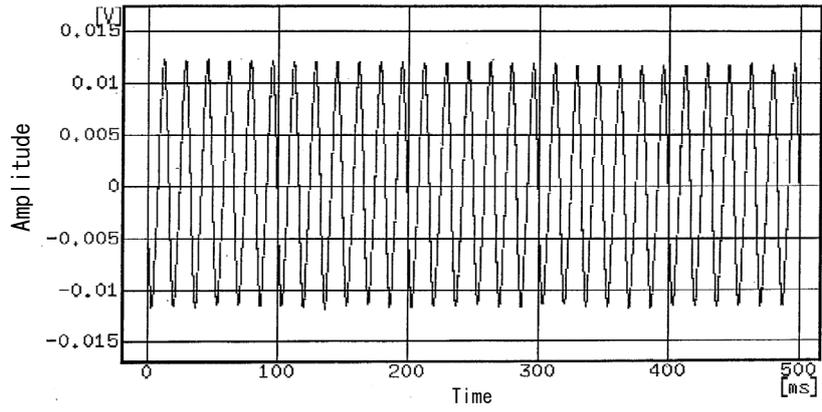


図5.13 差分波形

(地絡模擬状態, 地絡抵抗100k $\Omega$ , 20kHzサンプリング)

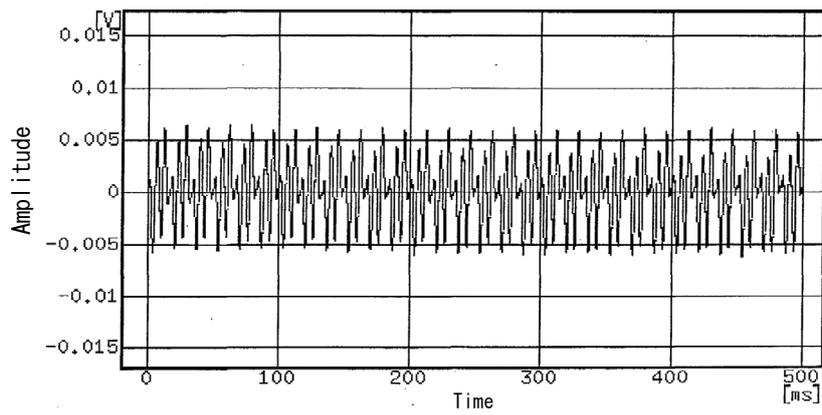


図5.14 差分波形

(地絡模擬状態, 地絡抵抗10k $\Omega$ , 20kHzサンプリング)

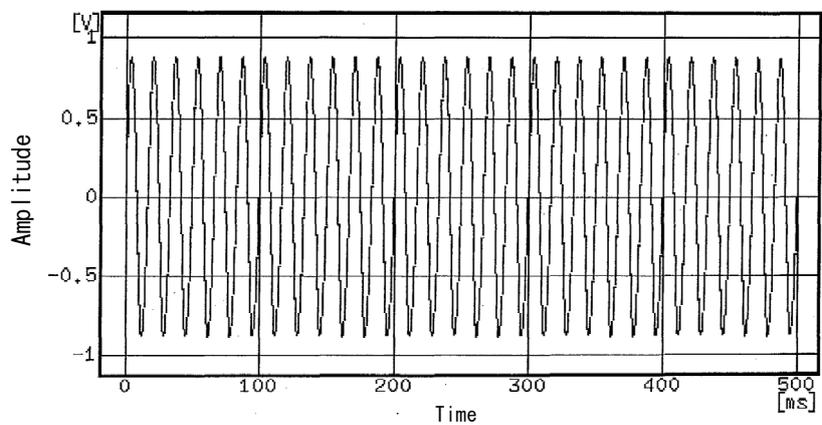


図5.15 差分波形

(地絡模擬状態, 地絡抵抗1k $\Omega$ , 20kHzサンプリング)

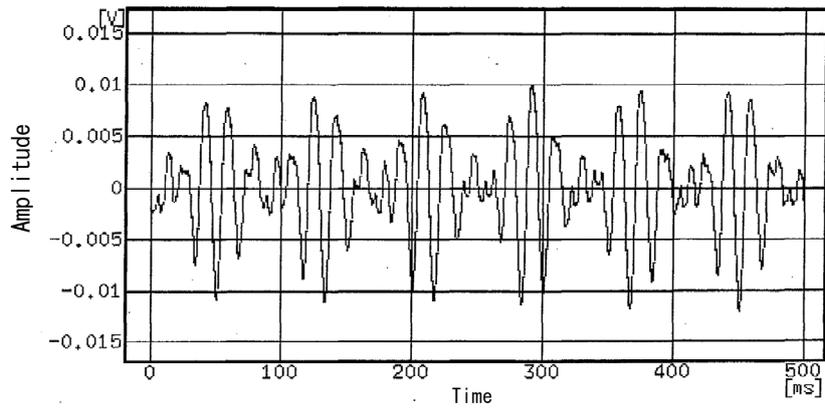


図5.16 差分波形

(レアショート模擬状態, レアショート抵抗220Ω, 20kHzサンプリング)

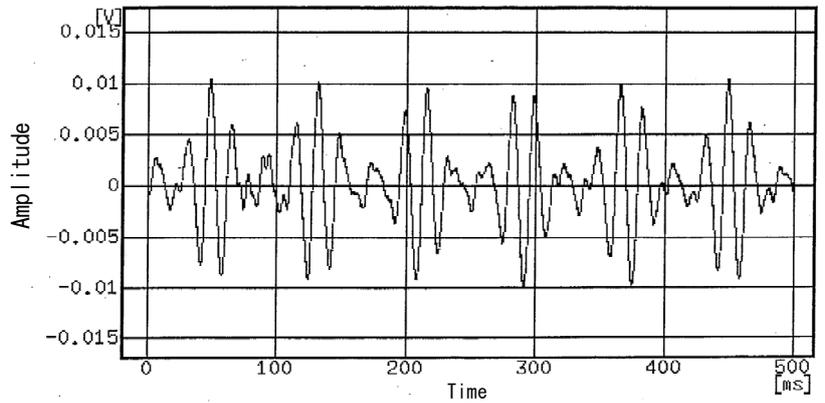


図5.17 差分波形

(レアショート模擬状態, レアショート抵抗200Ω, 20kHzサンプリング)

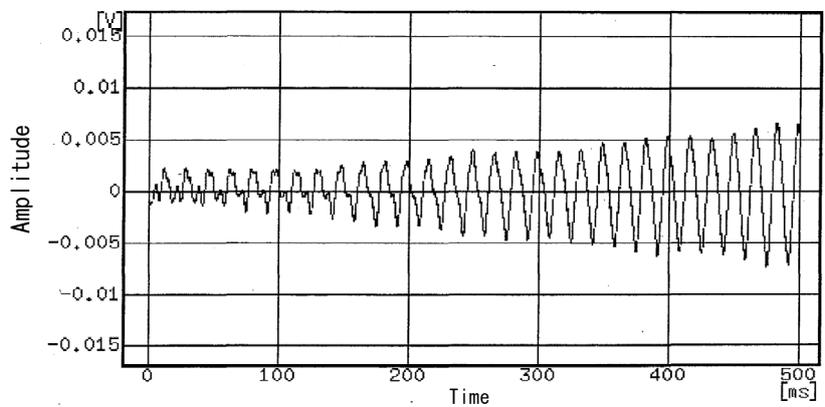


図5.18 差分波形

(レアショート模擬状態, レアショート抵抗140Ω, 20kHzサンプリング)

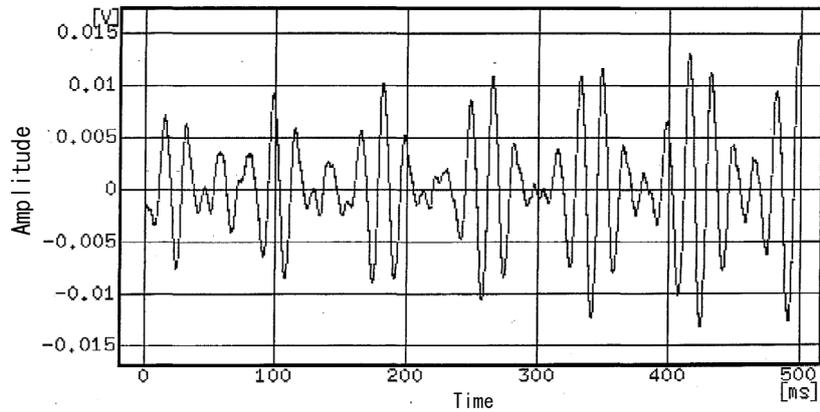


図5.19 差分波形

(レアショート模擬状態, レアショート抵抗120Ω, 20kHzサンプリング)

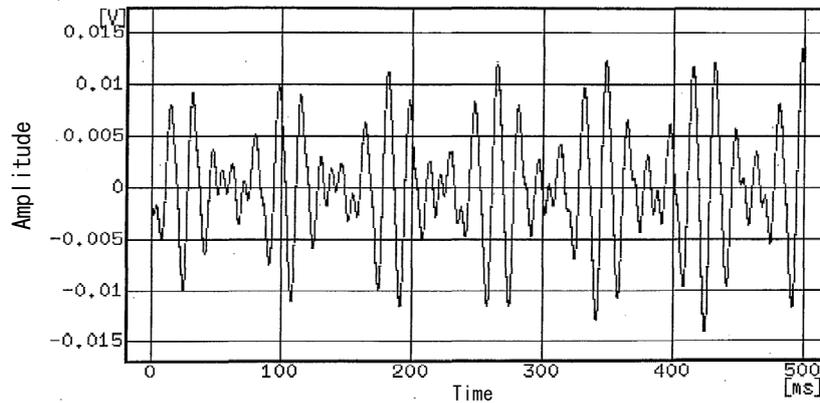


図5.20 差分波形

(レアショート模擬状態, レアショート抵抗90Ω, 20kHzサンプリング)

## ②高速フーリエ変換

地絡模擬状態（地絡抵抗：800kΩ, 100kΩ, 10kΩ, 1kΩ）、レアショート模擬状態（レアショート抵抗：220Ω, 200Ω, 140Ω, 120Ω, 90Ω）のサンプリング周期 [200kHz 10000点] にて生成した差分波形の高速フーリエ変換結果を図5.12～図5.20、サンプリング周期 [20kHz 10000点] にて生成した差分波形の高速フーリエ変換結果を図5.21～図5.29に示す。

図5.12から図5.15の検出周波数分布の変化を見ると、数値解析にて確認された地絡抵抗の変化に応じた3次成分、5次成分の特徴周波数帯域の検出周波数分布の変化は確認されるが、特徴周波数ならびに他の高次成分の信号強度変化は検出困難である。

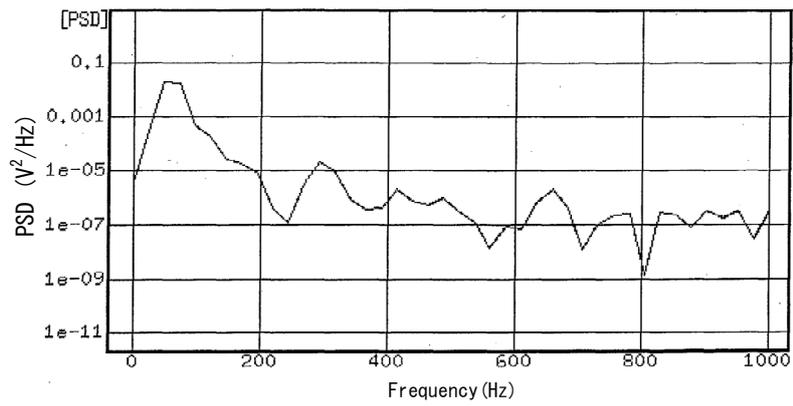


図5.12 高速フーリエ変換  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗800kΩ, 200kHzサンプリング)

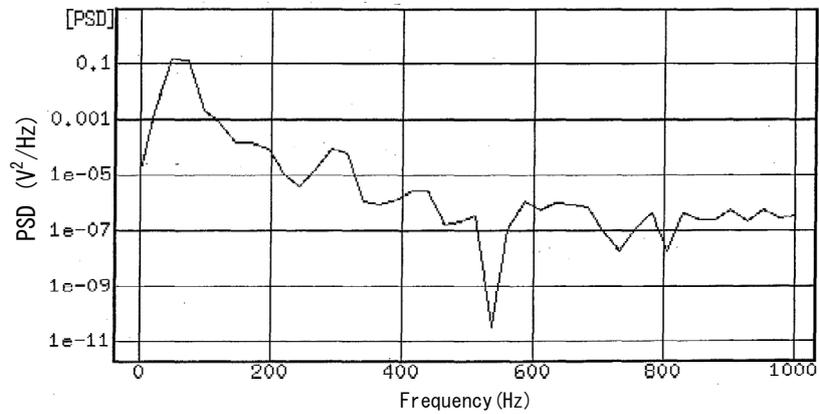


図5.13 高速フーリエ変換  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗100kΩ, 200kHzサンプリング)

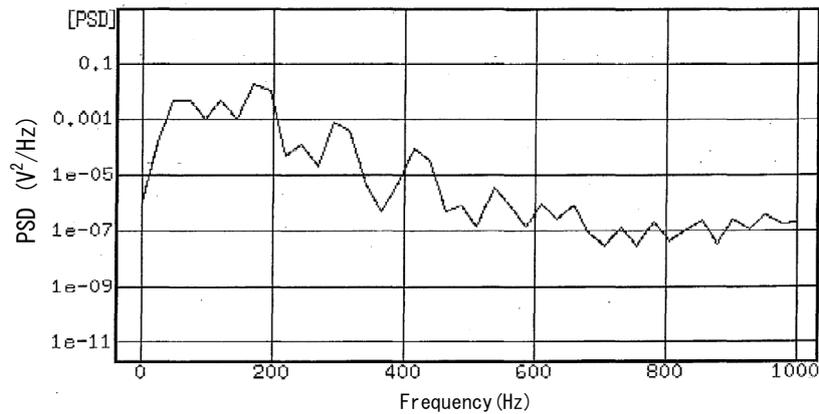


図5.14 高速フーリエ変換  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗10kΩ, 200kHzサンプリング)

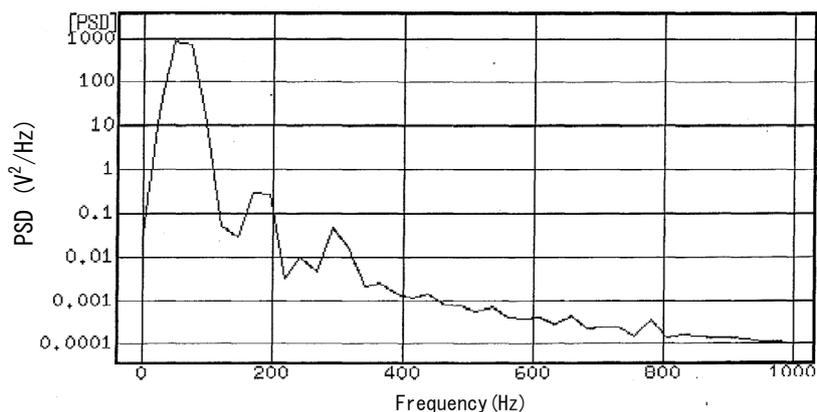


図5.15 高速フーリエ変換  
(地絡模擬状態, 地絡抵抗1k $\Omega$ , 200kHzサンプリング)

レアショート模擬の場合も図5.16から図5.20の検出周波数分布の変化を見ると、数値解析にて確認されたレアショート抵抗の変化に応じた3次成分, 5次成分の特徴周波数帯域の検出周波数分布の変化は確認されるが、特徴周波数ならびに他の高次成分の信号強度変化は検出困難である。

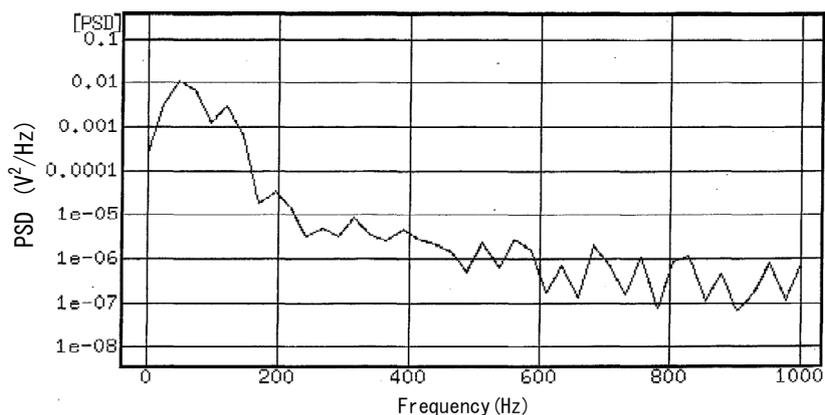


図5.16 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗220 $\Omega$ , 200kHzサンプリング)

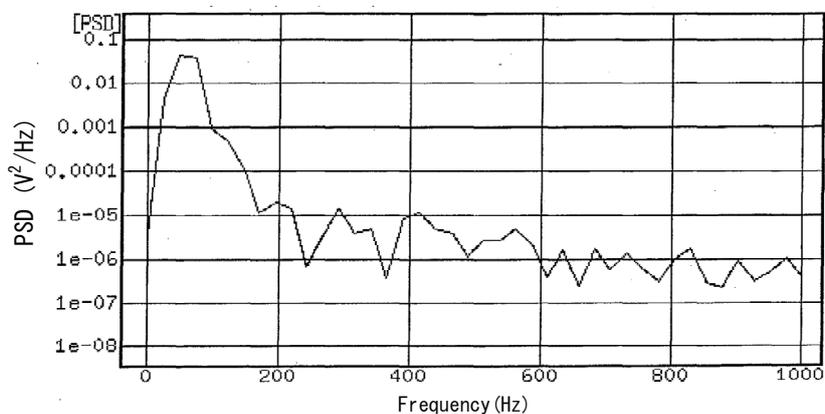


図5.17 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗200 $\Omega$ , 200kHzサンプリング)

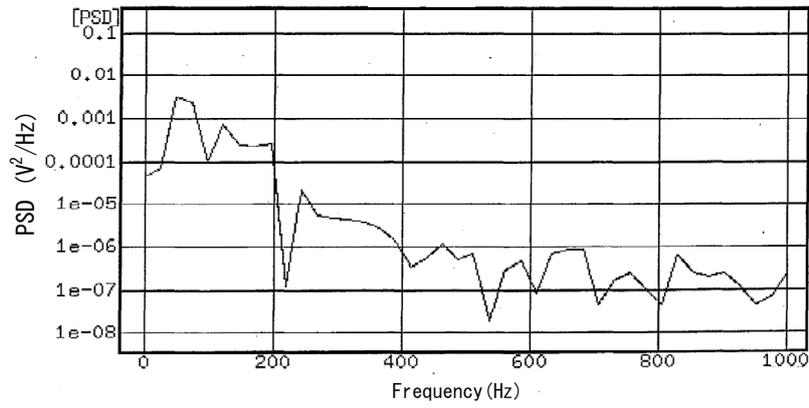


図5.18 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗140Ω, 200kHzサンプリング)

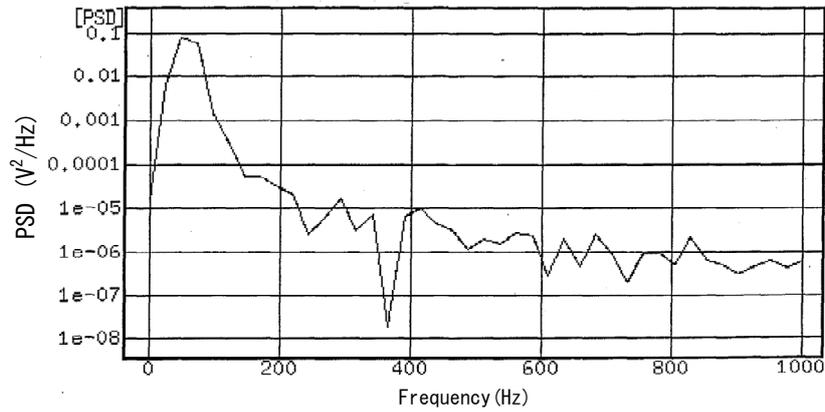


図5.19 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗120Ω, 200kHzサンプリング)

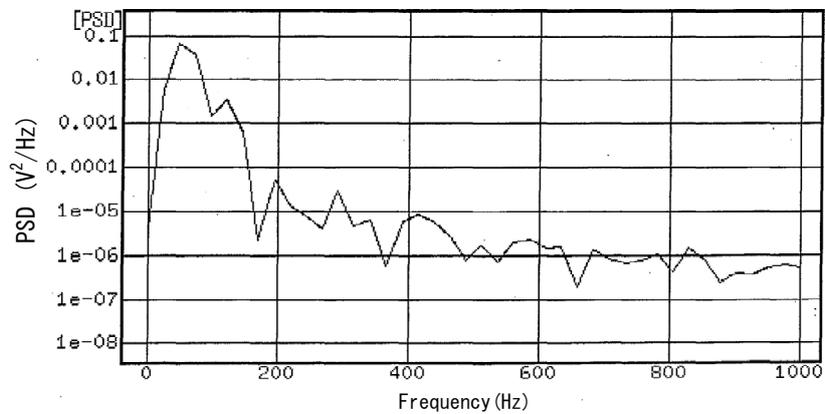


図5.20 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗90Ω, 200kHzサンプリング)

図5.21から図5.24の検出周波数分布の変化を見ると、数値解析にて確認された地絡抵抗の変化に応じた3次成分、5次成分の特徴周波数帯域の検出周波数分布の変化が確認され、また特徴周波数ならびに他の高次成分の信号強度変化を明確に検出している。

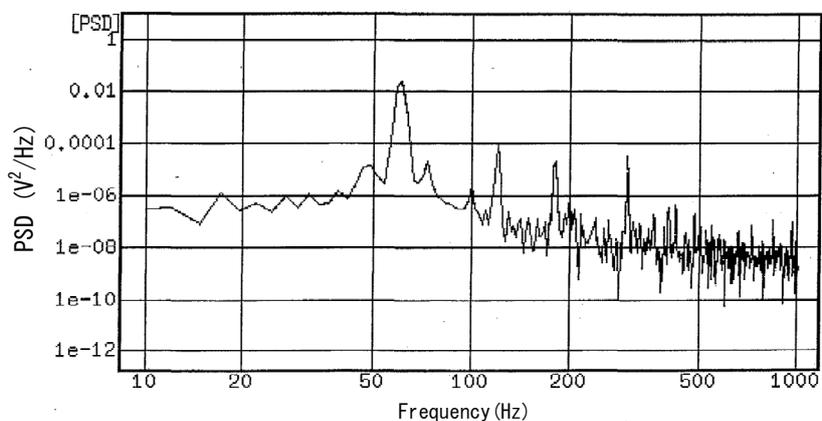


図5.21 高速フーリエ変換（地絡模擬状態，地絡抵抗800kΩ，20kHzサンプリング）

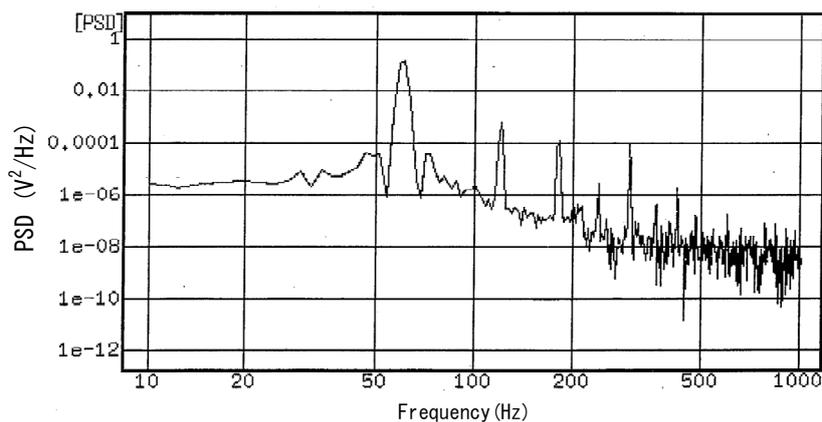


図5.22 高速フーリエ変換（地絡模擬状態，地絡抵抗100kΩ，20kHzサンプリング）

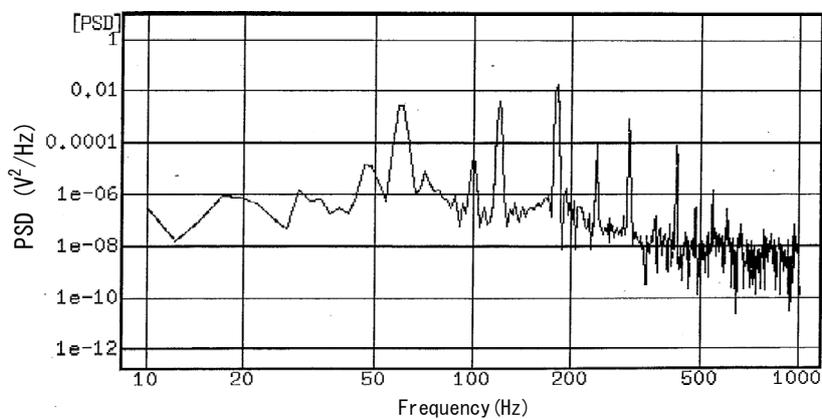


図5.23 高速フーリエ変換（地絡模擬状態，地絡抵抗10kΩ，20kHzサンプリング）

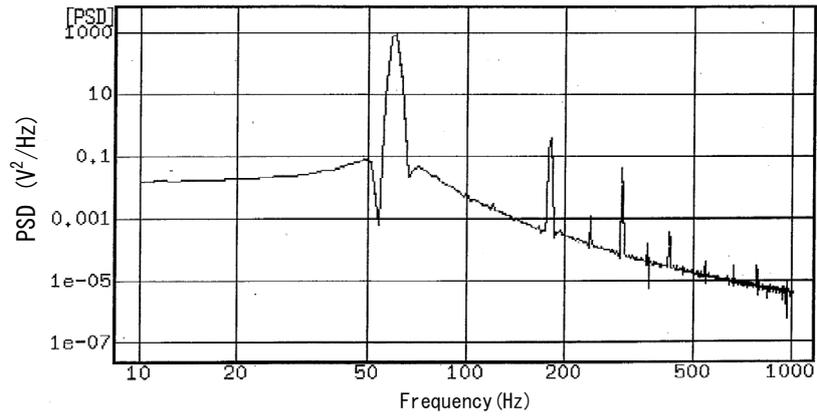


図5.24 高速フーリエ変換（地絡模擬状態，地絡抵抗1kΩ，20kHzサンプリング）

レアショート模擬の場合も図5.25から図5.29の検出周波数分布の変化を見ると，数値解析にて確認されたレアショート抵抗の変化に応じた3次成分，5次成分の特徴周波数帯域の検出周波数分布の変化が確認され，特徴周波数ならびに他の高次成分の信号強度変化を明確に検出している。

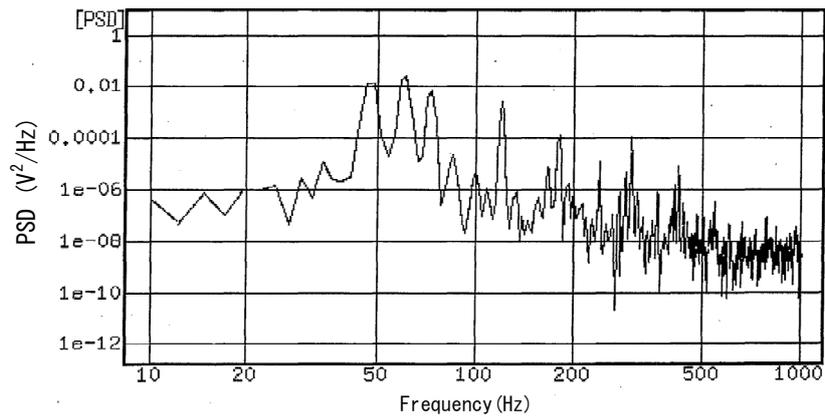


図5.25 高速フーリエ変換

（レアショート模擬状態，レアショート抵抗220Ω，20kHzサンプリング）

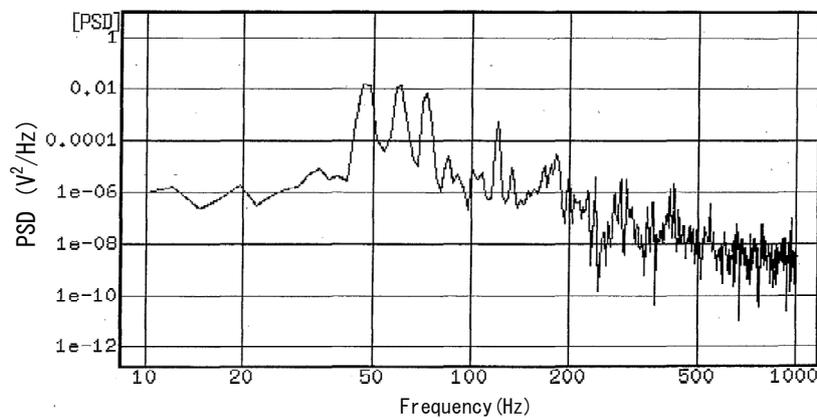


図5.26 高速フーリエ変換

（レアショート模擬状態，レアショート抵抗200Ω，20kHzサンプリング）

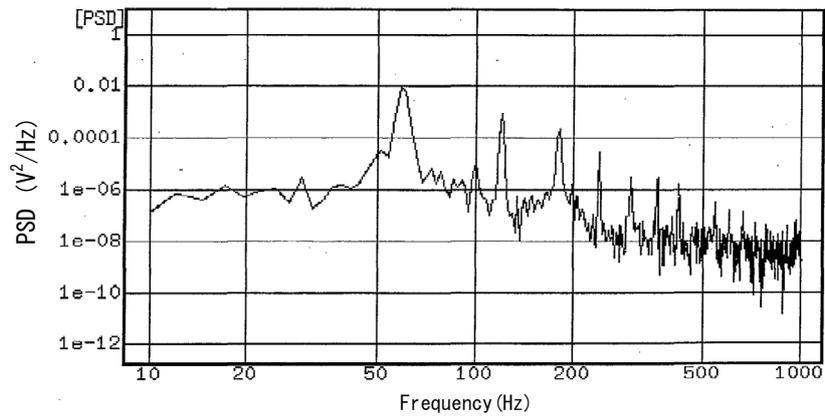


図5.27 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗140Ω, 20kHzサンプリング)

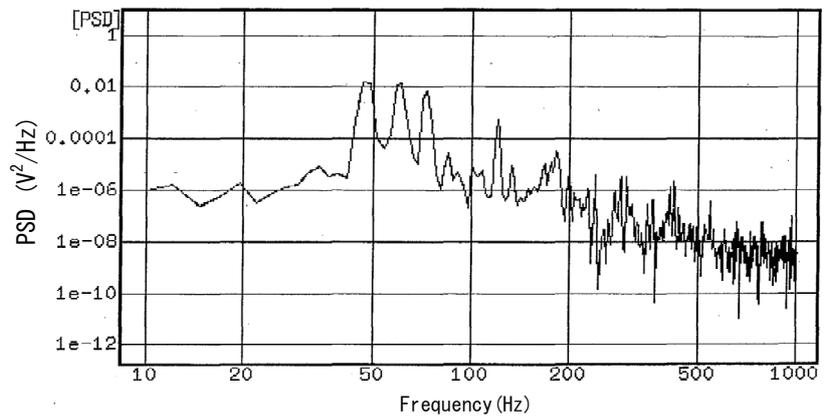


図5.28 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗120Ω, 20kHzサンプリング)

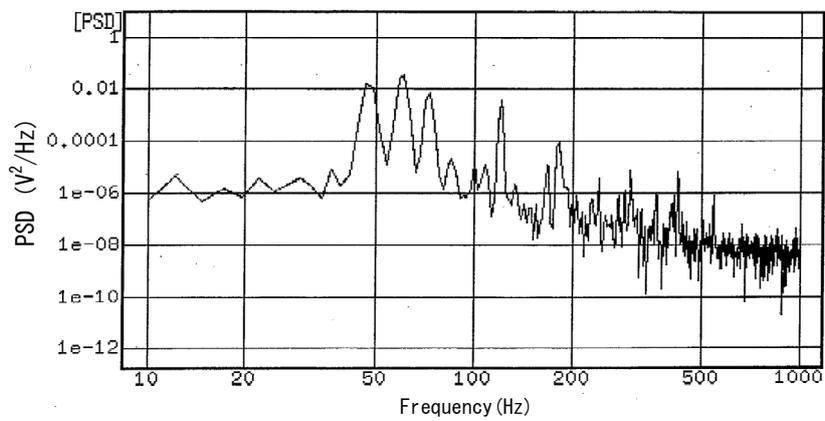


図5.29 高速フーリエ変換  
(レアショート模擬状態, レアショート抵抗90Ω, 20kHzサンプリング)

何れの劣化模擬状態も20kHzサンプリング波形の高速フーリエ変換による波形分析にて数値解析で確認された絶縁劣化レベルを表す地絡抵抗，リアシヨート抵抗の変化に応じた3次成分，5次成分の特徴周波数の変化ならびに信号強度変化を明確に検出している。サンプリング周期は [200kHz 10000点 (約3波)] より [20kHz 10000点 (約30波)] が差分波形の特徴抽出には有利であると評価されるため，絶縁劣化模擬試験ではサンプリング周期 [20kHz 10000点] にて差分波形を生成し，波形分析・評価することとした。

### 5. 3 絶縁劣化模擬試験結果

#### 5. 3. 1 零相電流の生波形評価

##### (1) 地絡模擬状態

図5. 30に正常状態，図5. 31～図5. 34に地絡模擬状態の零相電流の生波形を示す。

地絡抵抗10k $\Omega$ ～800k $\Omega$ の地絡模擬状態の零相電流波形は正常状態と波形，振幅ともに顕著な差異が確認されなかった。

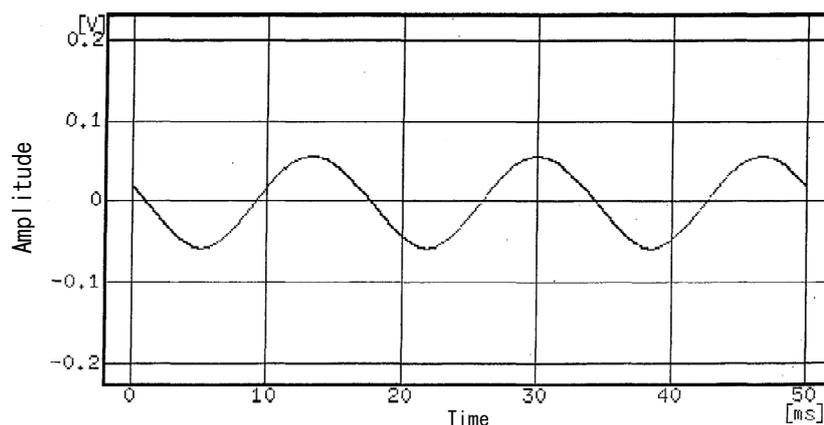


図5. 30 零相波形 (正常状態)

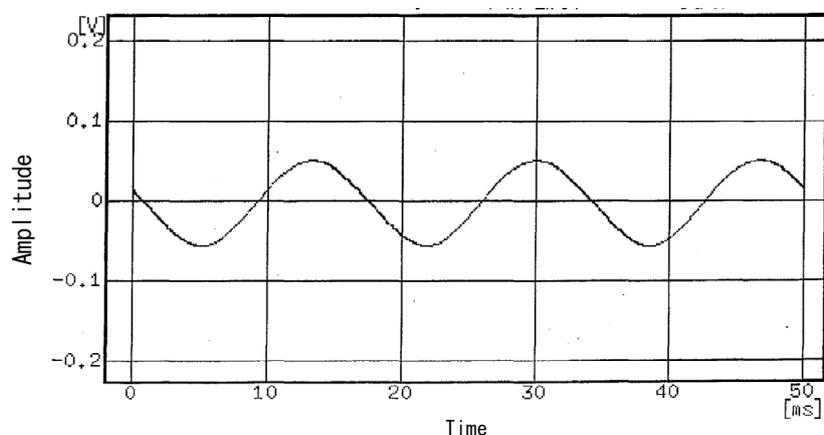


図5. 31 零相電流波形 (地絡模擬状態，地絡抵抗800k $\Omega$ )

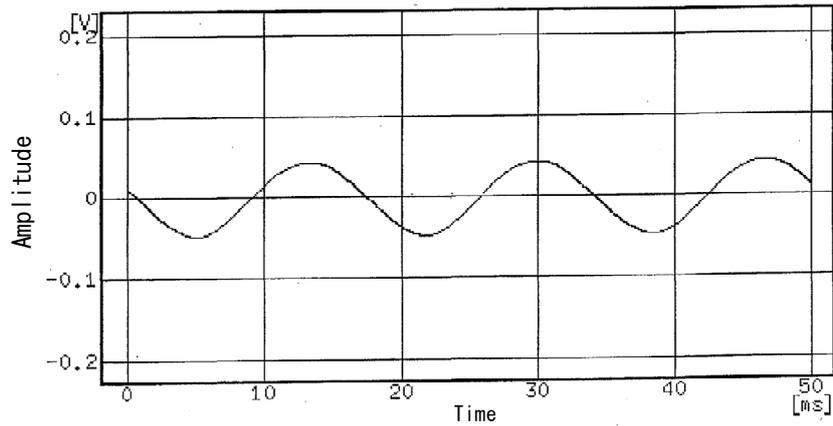


図5.32 零相電流波形（地絡模擬状態，地絡抵抗100kΩ）

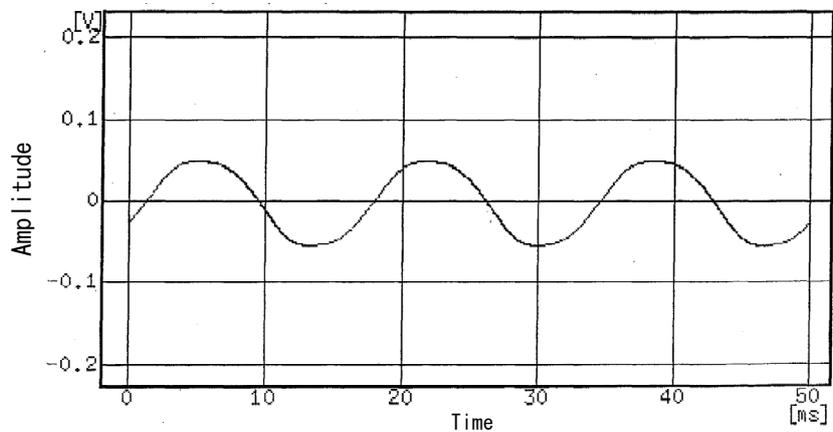


図5.33 零相電流波形（地絡模擬状態，地絡抵抗10kΩ）

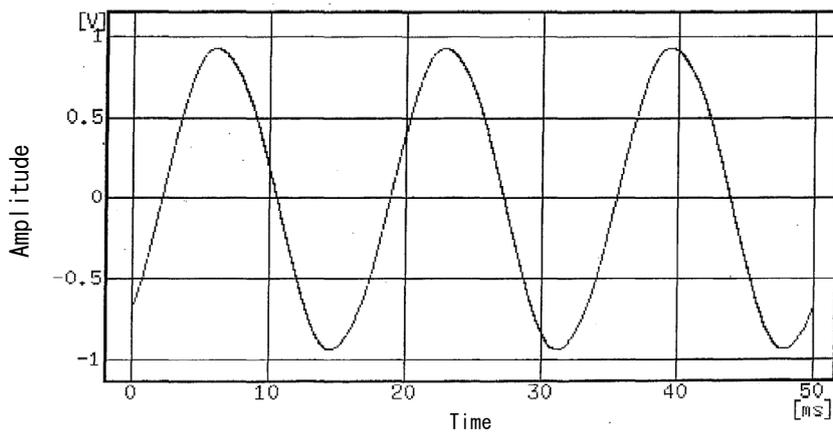


図5.34 零相電流波形（地絡模擬状態，地絡抵抗1kΩ）

地絡抵抗が1kΩまで低下すると図5.34のとおり波形（振幅）の変化が確認されたが，正常状態と地絡模擬状態の零相電流波形自体の差異にて地絡抵抗の変化にともなう地絡現象の前駆現象を定量的に検出するのは困難と評価される。

(2) レアショート模擬状態

図5.35～図5.39にレアショート模擬状態の零相電流の生波形を示す。

レアショート抵抗の変化に対する零相電流波形の変化, 正常状態との差異が確認されなかった。これは絶縁劣化にて生じる高調波が零相電流の基本波に対し微弱であるためと考えられる。地絡模擬状態と同様に正常状態とレアショート模擬状態の零相電流波形自体の差異にてレアショート抵抗の変化にともなうレアショート現象の前駆現象を定量的に検出するのは困難と評価される。

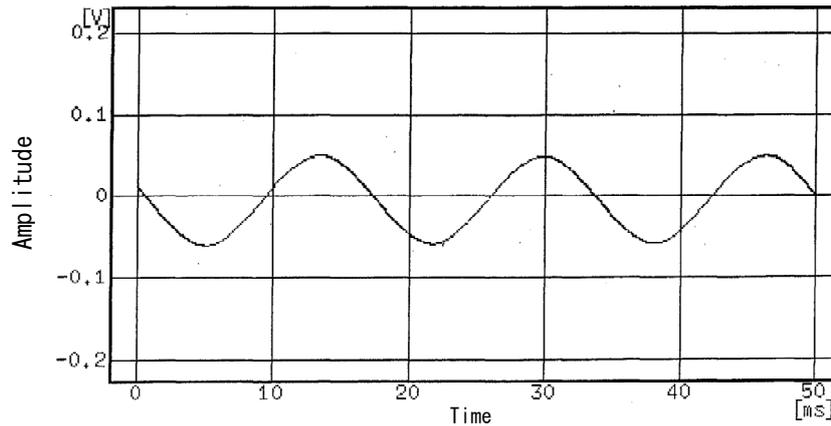


図5.35 零相電流波形 (レアショート模擬状態, レアショート抵抗90Ω)

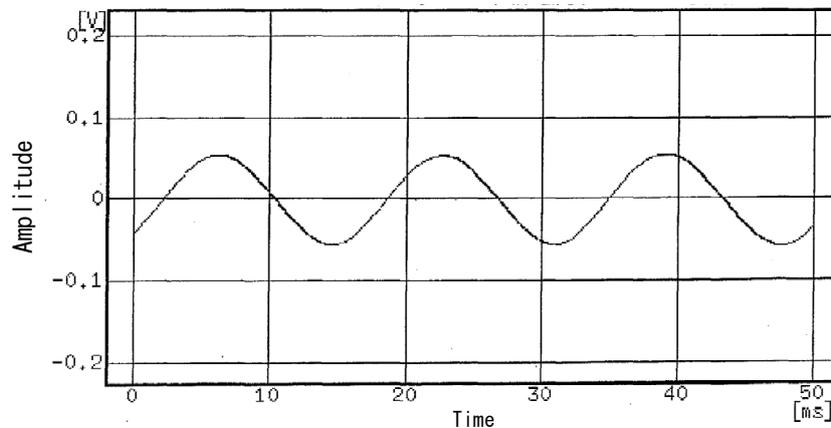


図5.36 零相電流波形 (レアショート模擬, レアショート抵抗120Ω)

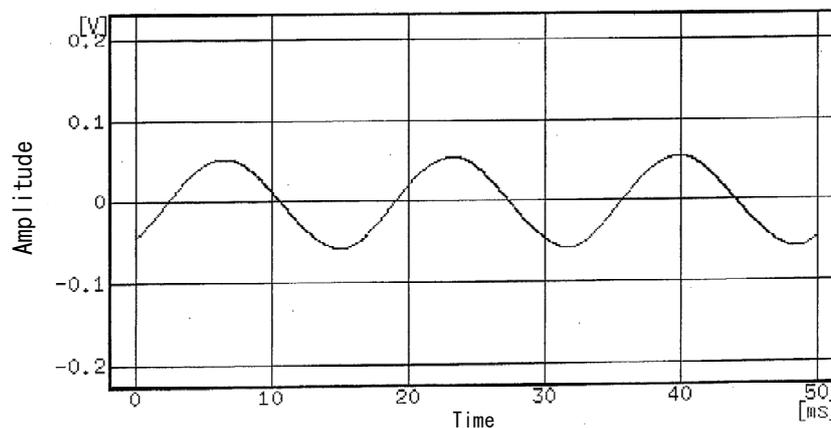


図5.37 零相電流波形 (レアショート模擬状態, レアショート抵抗200Ω)

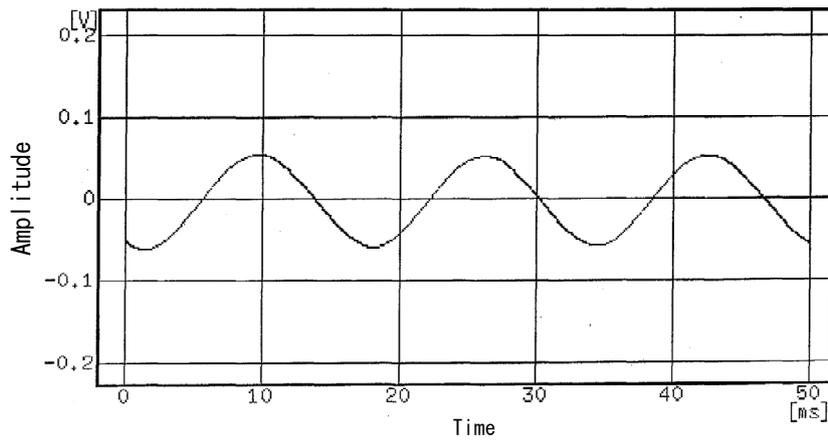


図5.38 零相電流波形（リアショート模擬状態，リアショート抵抗140Ω）

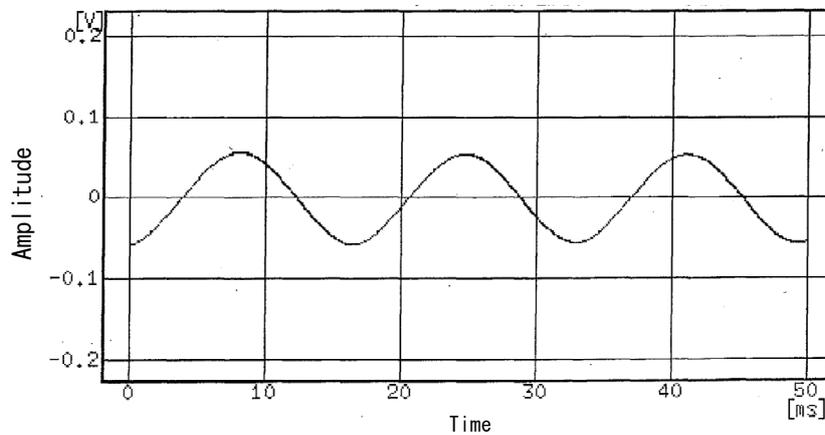


図5.39 零相電流波形  
（リアショート模擬状態，リアショート抵抗220Ω）

### 5. 3. 2 差分波形評価

図5.40～図5.48に正常状態と劣化模擬状態の零相電流差分波形を示す。

地絡模擬状態，リアショート模擬状態ともに地絡抵抗，リアショート抵抗の変化，所謂，絶縁劣化レベルの変化に対し，零相電流差分波形自体に変化が確認された。

#### (1) 地絡模擬状態

図5.40～図5.43に地絡模擬状態の差分波形を示す。

地絡抵抗800kΩの波形は電源周波数（60Hz）を主成分とする波形で，地絡抵抗が100kΩに低下すると60Hz成分が増幅している。更に地絡抵抗が10kΩ，1kΩへと低下すると高次成分が重畳した波形へ変化している。数値解析にて確認された地絡抵抗の変化に応じた高次成分変化が確認され，高速フーリエ変換などの波形分析による特徴抽出の有効性が期待される。

(2) レアショート模擬状態

図5.44～図5.48にレアショート模擬状態の差分波形を示す。

レアショート抵抗220Ω, 200Ωの波形は電源周波数(60Hz)を主成分とする波形に高次成分が重畳した波形でレアショート抵抗の変化に対し、高次成分が変化している。地絡模擬状態と同様に高速フーリエ変換などの波形分析による特徴抽出の有効性が期待される。

5.3.3 差分波形分析結果

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、絶縁劣化模擬状態に対する差分波形変化の特徴抽出について評価した。

(1) 地絡模擬状態

表5.1に零相電流差分波形の波形分析結果を要約し、差分波形の高速フーリエ変換(FFT)による波形分析結果を図5.21～図5.24、短時間スペクトル分析(STS)、連続ウェーブレット変換(CWT)の波形分析結果を図5.40～図5.47に示す。

表5.1 差分波形分析結果(地絡模擬状態)

劣化模擬状態		評 価	波形分析結果		
			FFT	STS	CWT
地絡	地絡抵抗 800kΩ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz, 300Hz</li> <li>• (STS) 短時間 16msec 毎に 0～200Hz が発生 8msec 毎に 450Hz が発生</li> <li>• (CWT) 3msec 毎にスケール 5 が発生</li> </ul>	図 5.21	図 5.40	図 5.44
	地絡抵抗 100kΩ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz, 300Hz</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～200Hz が発生 8msec 毎に 450Hz が発生</li> <li>• (CWT) 3msec 毎にスケール 5 が発生 8msec 毎にスケール 2 が増加</li> </ul>	図 5.22	図 5.41	図 5.45
	地絡抵抗 10kΩ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz, 180Hz, 300Hz, 420Hz</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～200Hz が発生 8msec 毎に 450Hz が発生</li> <li>• (CWT) 3msec 毎にスケール 5 が発生 8msec 毎にスケール 2 が増加</li> </ul>	図 5.23	図 5.42	図 5.46
	地絡抵抗 1kΩ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 60Hz, 180Hz, 300Hz が増大</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～200Hz が発生・増大 8msec 毎に 450Hz が発生・増大</li> <li>• (CWT) 3msec 毎にスケール 5 が発生・増大 8msec 毎にスケール 2 が増加</li> </ul>	図 5.24	図 5.43	図 5.47

### ①高速フーリエ変換

地絡抵抗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。

図5.21, 図5.24の [地絡抵抗 800kΩ] と [地絡抵抗 1kΩ] の分析結果を比較すると, 何れの分析結果も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 (180Hz), 5次成分 (300Hz) を明確に捉えており, 地絡抵抗の変化 (800kΩ → 1kΩ) 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) の変化にて下記のごとく定量検出・監視が可能である。

- ・3次成分 (180Hz) :  $2.1 \times 10^{-5} \text{ V}^2/\text{Hz}$  →  $3.9 \times 10^{-1} \text{ V}^2/\text{Hz}$
- ・5次成分 (300Hz) :  $3.5 \times 10^{-5} \text{ V}^2/\text{Hz}$  →  $4.0 \times 10^{-2} \text{ V}^2/\text{Hz}$

数値解析にて得られた地絡抵抗の変化に応じた3次成分, 5次成分の特徴周波数ならびに他の高次成分の信号強度変化 (周波数変化, 信号強度変化) を定量的に検出しており, 地絡現象の前駆現象を定量的に検出手法として差分波形の高速フーリエ変換による特徴抽出は有効と評価される。

### ②短時間スペクトル分析

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く, 高速フーリエ変換と同様に地絡抵抗の変化にともなう特徴周波数の変化, 信号強度の変化を定量検出・監視が可能である。

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。

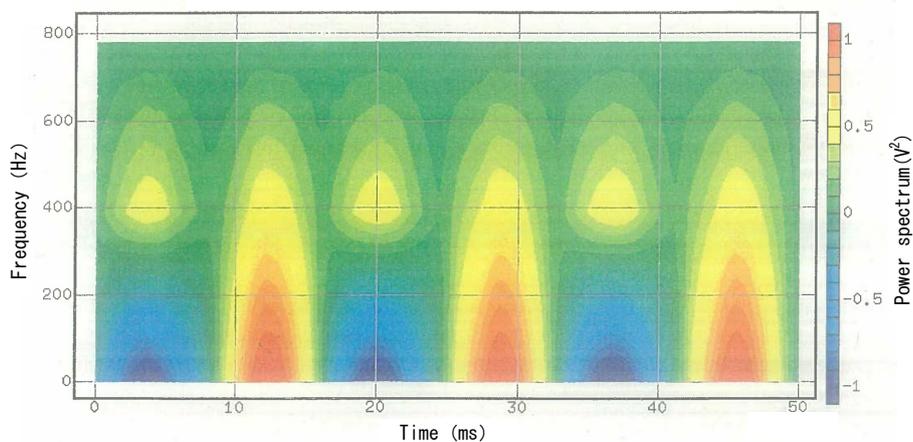


図5.40 短時間スペクトル分析 (地絡模擬状態, 地絡抵抗800kΩ)

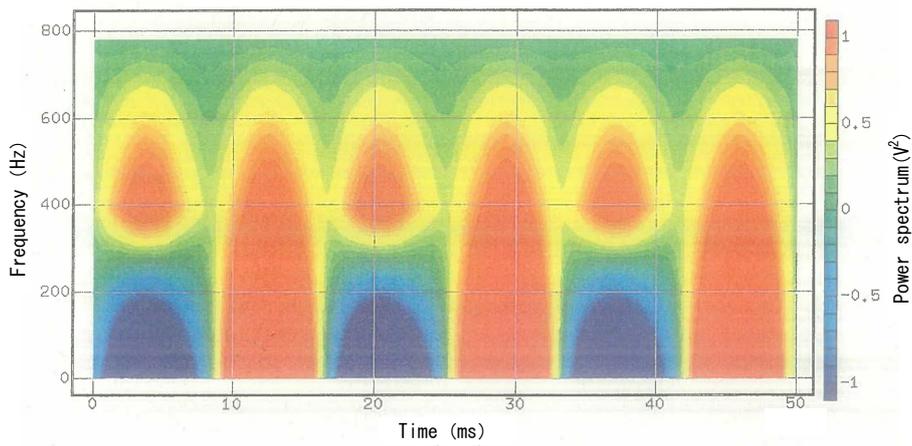


図5.41 短時間スペクトル分析（地絡模擬状態，地絡抵抗100k $\Omega$ ）

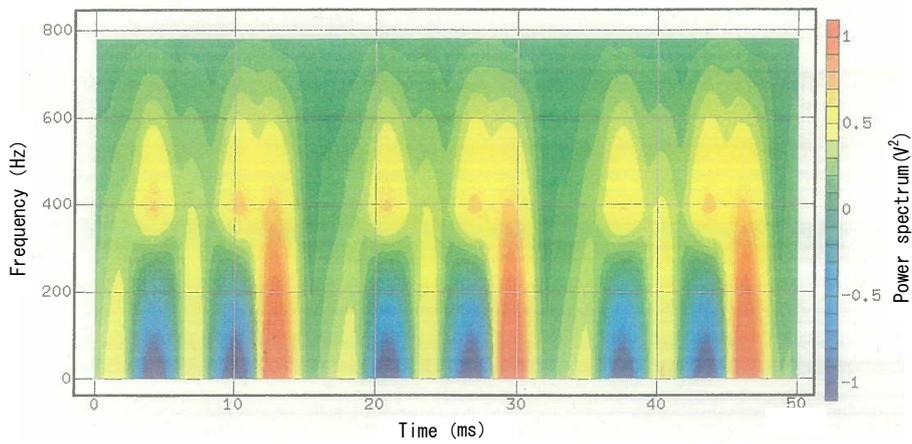


図5.42 短時間スペクトル分析（地絡模擬状態，地絡抵抗10k $\Omega$ ）

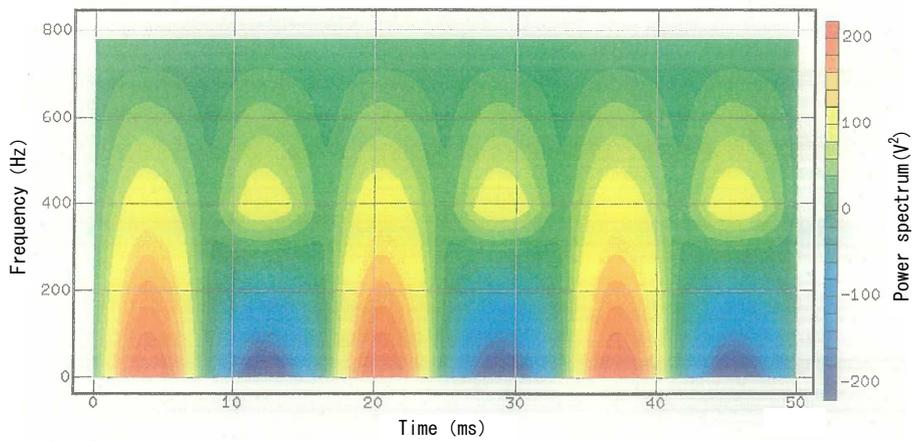


図5.43 短時間スペクトル分析（地絡模擬状態，地絡抵抗1k $\Omega$ ）

### ③連続ウェーブレット変換

短時間スペクトル分析と同様に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。地絡抵抗の変化にともなう特徴周波数変化の検出については，高速フーリエ変換に比べ定性的となる。

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。

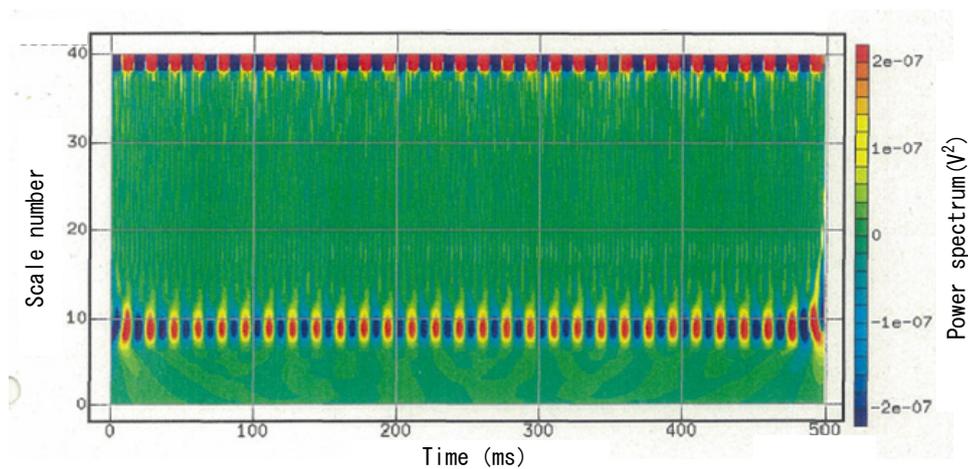


図 5.44 連続ウェーブレット変換  
(地絡模擬状態，地絡抵抗 800k $\Omega$ ，20kHz サンプリング)

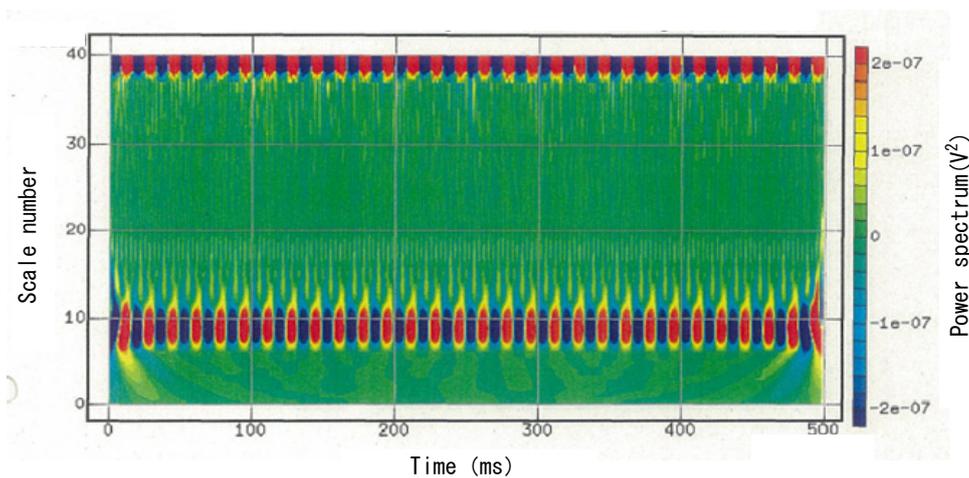


図 5.45 連続ウェーブレット変換  
(地絡模擬状態，地絡抵抗 100k $\Omega$ ，20kHz サンプリング)

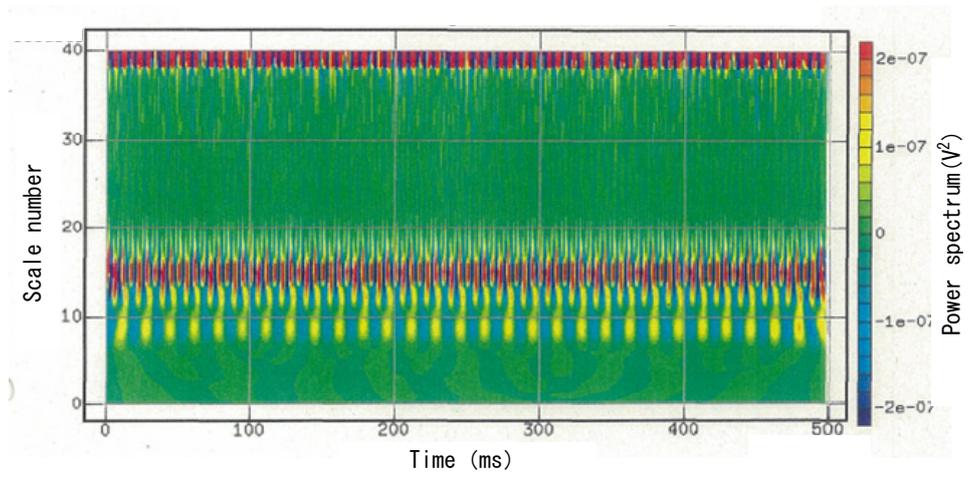


図 5.46 連続ウェーブレット変換  
 (地絡模擬状態, 地絡抵抗  $10\text{k}\Omega$ ,  $20\text{kHz}$  サンプリング)

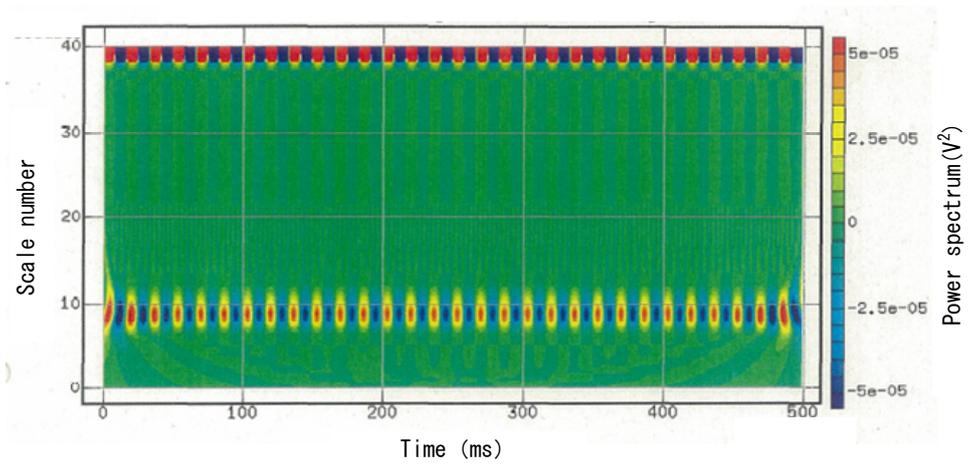


図 5.47 連続ウェーブレット変換  
 (地絡模擬状態, 地絡抵抗  $1\text{k}\Omega$ ,  $20\text{kHz}$  サンプリング)

(2) レアショート模擬状態

表5.2に零相電流差分波形の波形分析結果を要約し、差分波形の高速フーリエ変換（FFT）による波形分析結果を図5.25～5.29、短時間スペクトル分析（STS）、連続ウェーブレット変換（CWT）による波形分析結果を図5.48～図5.57に示す。

表5.2 差分波形分析結果（レアショート模擬状態）

劣化模擬状態		評 価	波形分析結果		
			FFT	STS	CWT
レアショート	レアショート抵抗 220 Ω	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 60Hz 成分が増大</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～400Hz が発生 8msec 毎に 400Hz が発生</li> <li>• (CWT) 2msec 毎にスケール6 が発生 8msec 毎にスケール2 が増加 4msec 毎にスケール4 が発生</li> </ul>	図 5.25	図 5.48	図 5.53
	レアショート抵抗 200 Ω	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz, 300Hz</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～400Hz が発生 8msec 毎に 400Hz が発生</li> <li>• (CWT) 2msec 毎にスケール6 が発生 8msec 毎にスケール2 が増加 4msec 毎にスケール4 が発生</li> </ul>	図 5.26	図 5.49	図 5.54
	レアショート抵抗 140 Ω	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～40Hz が発生 8msec 毎に 400Hz が発生</li> <li>• (CWT) 2msec 毎にスケール6 が発生 8msec 毎にスケール2 が増加 4msec 毎にスケール4 が発生</li> </ul>	図 5.27	図 5.50	図 5.55
	レアショート抵抗 120 Ω	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 60Hz 成分が増大</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～40Hz が発生 8msec 毎に 400Hz が発生</li> <li>• (CWT) 2msec 毎にスケール6 が発生 8msec 毎にスケール2 が増加</li> </ul>	図 5.28	図 5.51	図 5.56
	レアショート抵抗 90 Ω	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (FFT) 卓越周波数は 60Hz</li> <li>• (STS) 16msec 毎に 0～40Hz が発生 8msec 毎に 400Hz が発生</li> <li>• (CWT) 2msec 毎にスケール6 が発生 8msec 毎にスケール2 が増加</li> </ul>	図 5.29	図 5.52	図 5.57

①高速フーリエ変換

レアショート抵抗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。

数値解析にて得られたレアショート状態の特徴周波数である3次成分(180Hz), 5次成分(300Hz), 他の高調波成分を明確に捉えており, 本模擬試験モデルではレアショート抵抗の変化にともなう特徴周波数変化, 信号強度変化は確認されなかったが, 周波数変化, 信号強度変更ともに定量検出・監視が可能である。

## ②短時間スペクトル分析

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く，高速フーリエ変換と同様に地絡抵抗の変化にともなう特徴周波数の変化，信号強度の変化を定量検出・監視が可能である。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。

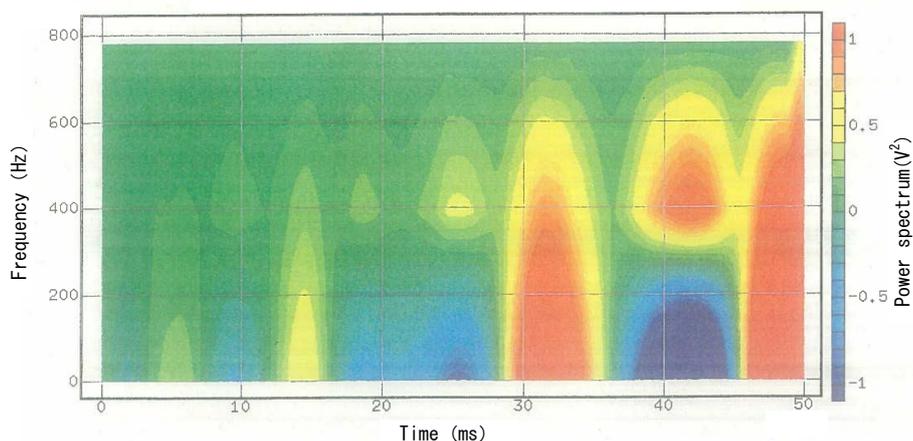


図5.48 短時間スペクトル分析（レアショート模擬状態，レアショート抵抗220Ω）

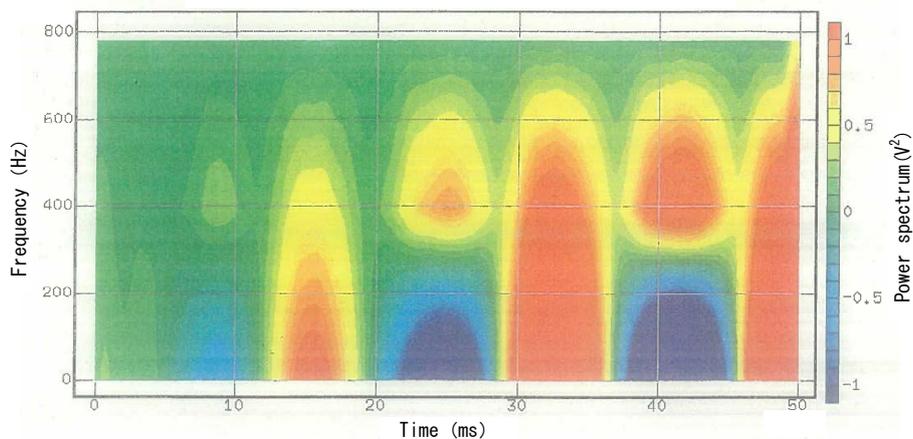


図5.49 短時間スペクトル分析（レアショート模擬状態，レアショート抵抗200Ω）

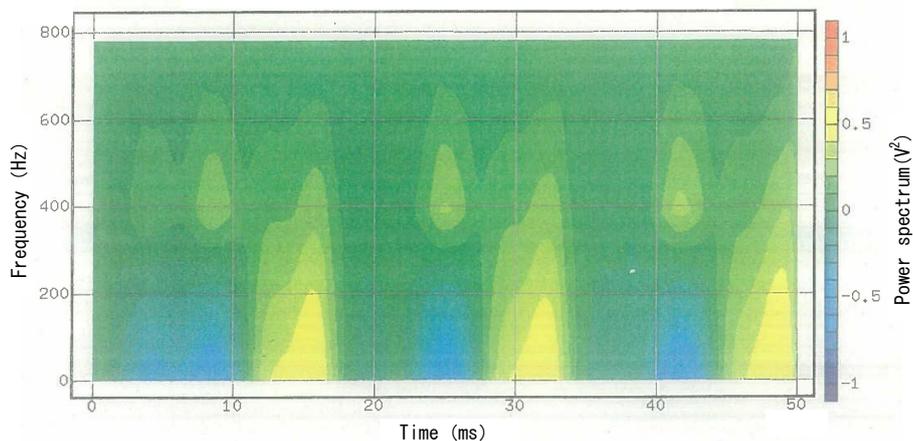


図5.50 短時間スペクトル分析（レアショート模擬状態，レアショート抵抗140Ω）

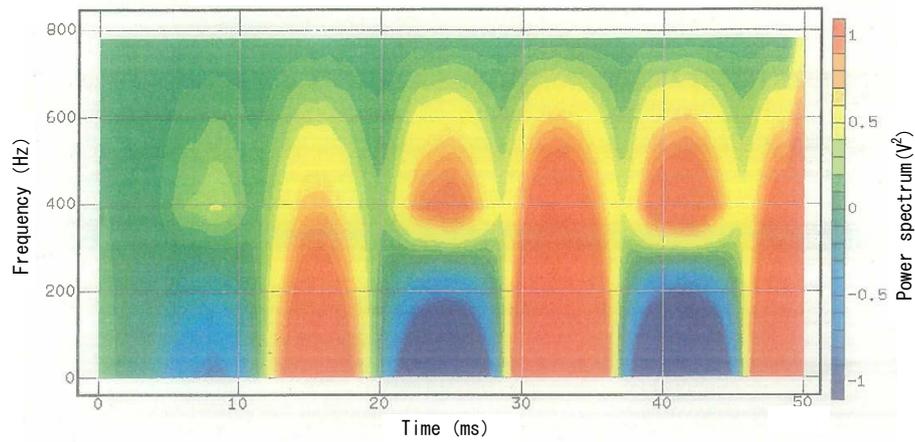


図5.51 短時間スペクトル分析（レアショート模擬状態，レアショート抵抗120Ω）

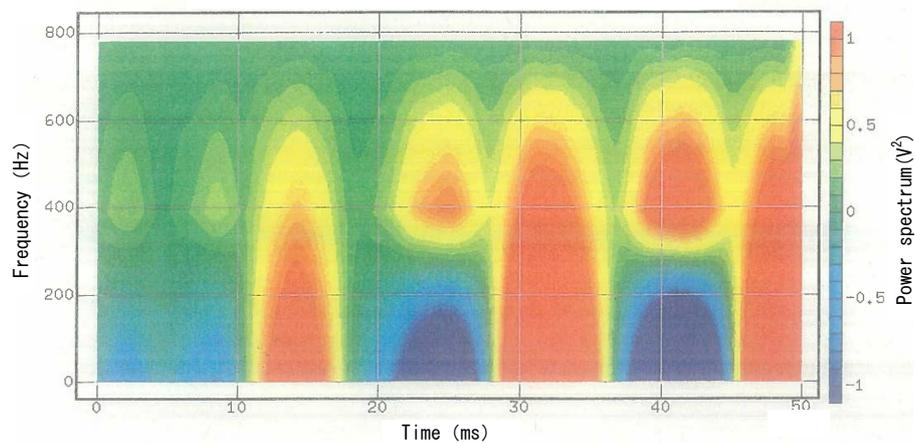


図5.52 短時間スペクトル分析（レアショート模擬状態，レアショート抵抗90Ω）

### ③連続ウェーブレット変換

短時間スペクトル分析と同様に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。地絡抵抗の変化にともなう特徴周波数変化の検出については，高速フーリエ変換に比べ定性的となる。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。

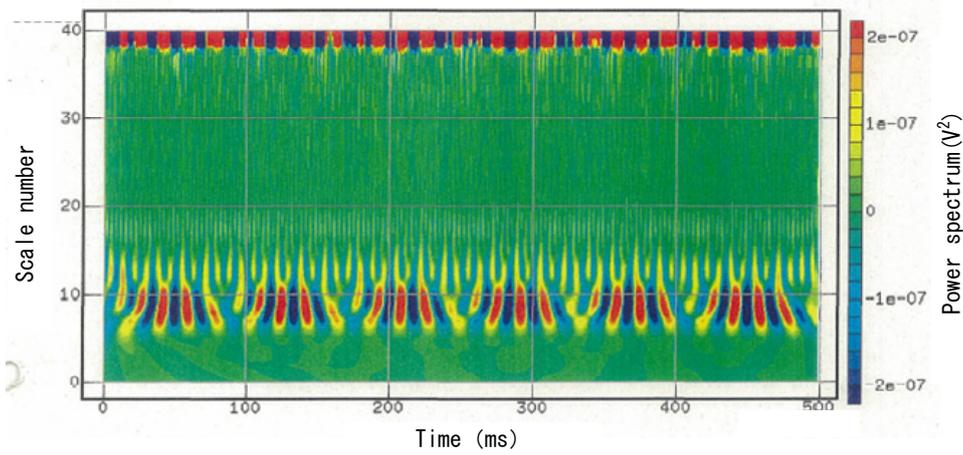


図 5.53 連続ウェーブレット変換  
(リアショート模擬状態, リアショート抵抗  $220\ \Omega$ , 20kHz サンプリング)

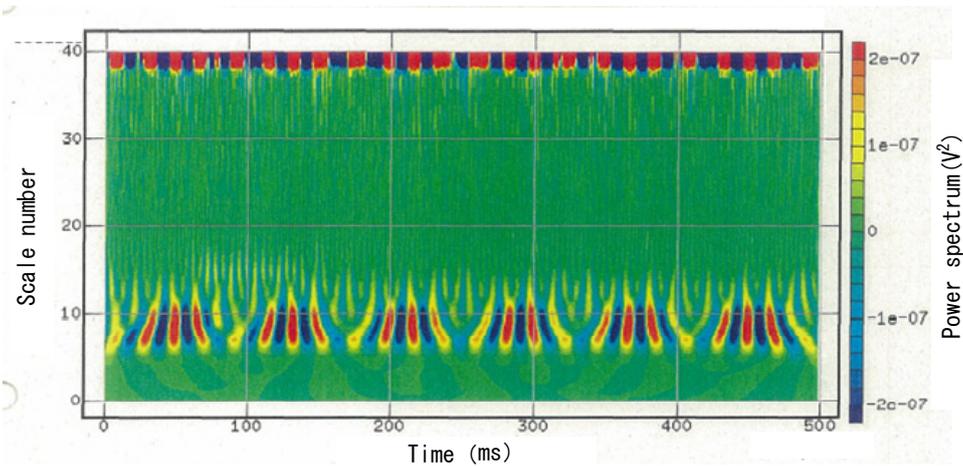


図 5.54 連続ウェーブレット変換  
(リアショート模擬状態, リアショート抵抗  $200\ \Omega$ , 20kHz サンプリング)

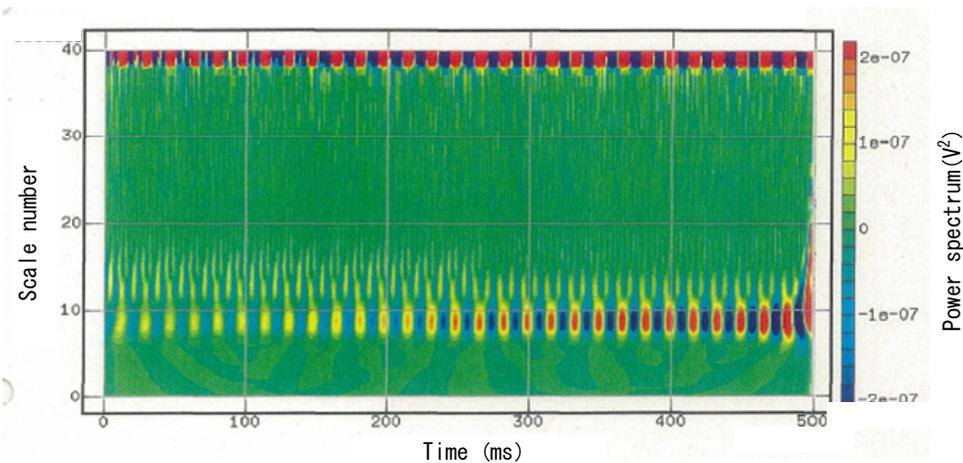


図 5.55 連続ウェーブレット変換  
(リアショート模擬状態, リアショート抵抗  $140\ \Omega$ , 20kHz サンプリング)

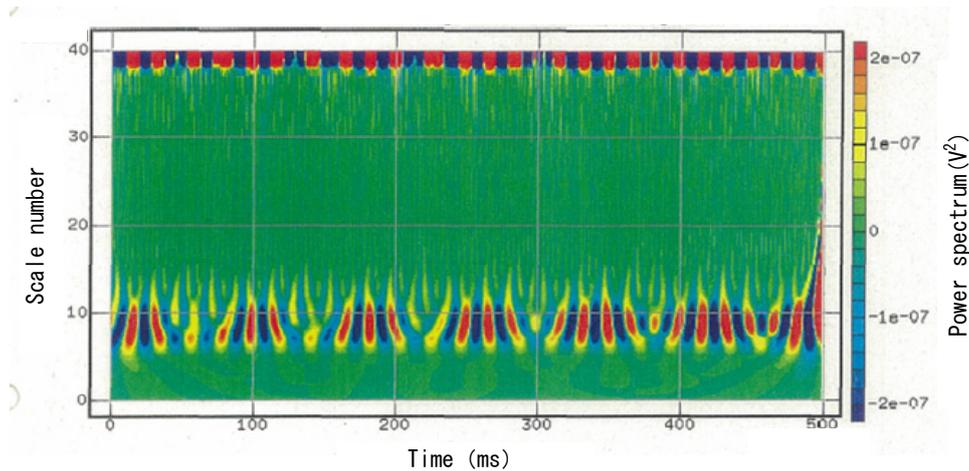


図 5.56 連続ウェーブレット変換  
(リアショート模擬状態, リアショート抵抗  $120\ \Omega$ , 20kHz サンプルング)

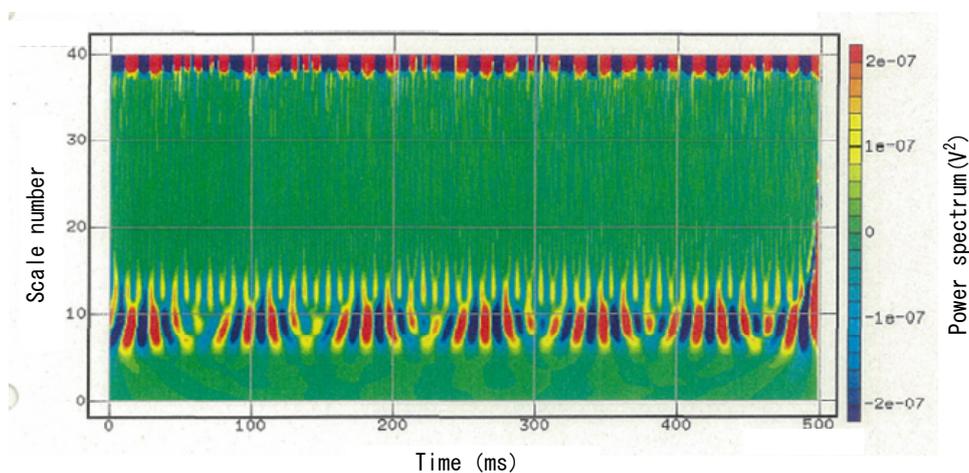


図 5.57 連続ウェーブレット変換  
(リアショート模擬状態, リアショート抵抗  $90\ \Omega$ , 20kHz サンプルング)

### (3) 差分波形分析手法の適用

零相電流の生波形ならびに差分波形自体では正常状態と劣化模擬状態の差異，変化を明確に確認することができなかった。一方，高速フーリエ変換，スペクトル分析，連続ウェーブレット変換による波形分析を用いると差分波形の変化を確認することができ，数値解析結果と整合する周波数変化，信号強度変化事象を検出できた。特に高速フーリエ変換にて絶縁劣化事象の進展（地絡抵抗変化，リアショート抵抗変化）にともなう特徴周波数の周波数変化，信号強度変化を定量検出が可能であることが確認された。

波形分析・特徴抽出特性，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，監視は絶縁劣化兆候による波形変化を定量的に検出可能であり，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。

#### 5. 4 第5章のまとめ

低圧誘導電動機の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（地絡，レアショート）を模擬した試験回路にて負荷運転中の零相電流の変化について確認した。

正常状態，地絡模擬状態ならびにレアショート模擬状態における零相電流波形の変化を明確に抽出するために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，差分波形の分析にて絶縁劣化兆候を抽出した。差分波形は，正常状態，劣化模擬状態の生波形をデジタル化し，正常状態波形データと劣化模擬状態波形データの差分より差分波形を生成した。

差分波形生成のための生波形のデジタル化の際のサンプリング周期を [200kHz 10000点] と [20kHz 10000点] による差分波形と高速フーリエ変換による差分波形分析結果を比較し，差分波形の特徴抽出に有利なサンプリング周期を確認した。20kHzサンプリング波形では数値解析で確認された絶縁劣化レベルを表す地絡抵抗，レアショート抵抗の変化に応じた3次成分，5次成分の特徴周波数の変化ならびに信号強度変化を明確に検出でき，[200kHz 10000点 (約3波)] より [20kHz 10000点 (約30波)] が差分波形の特徴抽出には有利であると評価されるため，絶縁劣化模擬試験ではサンプリング周期 [20kHz 10000点] にて差分波形を生成し，波形分析・評価することとした。

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，絶縁劣化模擬状態に対する差分波形変化の特徴抽出について評価した。零相電流の生波形ならびに差分波形自体では正常状態と劣化模擬状態の差異，変化を明確に確認することができなかったが，高速フーリエ変換，スペクトル分析，連続ウェーブレット変換による波形分析を用いると差分波形の変化を確認することができ，数値解析結果と整合する周波数変化，信号強度変化事象を検出できた。特に高速フーリエ変換にて絶縁劣化事象の進展（地絡抵抗変化，レアショート抵抗変化）にともなう特徴周波数の周波数変化，信号強度変化を定量検出が可能であることが確認された。波形分析・特徴抽出特性，汎用性，データ処理速度絶縁劣化事象の進展速度（年単位）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，監視は絶縁劣化兆候による波形変化を定量的に検出可能であり，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 オンライン絶縁診断システムの開発

### 6.1 オンライン絶縁診断システムの概略

前章にて絶縁劣化兆候検出のための零相電流波形の波形分析手法として有効であることが検証された零相電流の差分波形の高速フーリエ変換による波形分析を用いた絶縁劣化診断プロトシステムを試作した。図6.1にプロトシステムの概略を示す。本プロトシステムは、ラインケーブルに取り付けられたZCT2次電流を電圧換算し、A/D変換する信号処理部、信号処理部と診断部（PC）間のデータの授受を行うデータ伝送部、データ解析・診断を行う診断部で構成する。

#### (1) システム構成

##### ①信号処理部

信号処理部の概略を図6.1に示す。信号処理部は、演算増幅器、A/Dコンバータ、CPU、メモリ及びRS232Cドライバにより構成される。演算増幅器は、ZCT2次電流を電圧換算した電圧信号をA/Dコンバータが処理できる電圧に増幅し、A/Dコンバータにて演算増幅器からアナログ電圧信号をデジタル信号に変換し、CPUへ伝送する。CPUでは、A/Dコンバータ、メモリ及びRS232Cドライバの制御を行う。また、RS232Cドライバは、CPUからの制御によりデータ伝送部とのデータ伝授を行うためのレベル変換を行う。メモリはCPU制御によりA/Dコンバータのデジタル信号（採取したデータ）を格納する。

##### ②データ伝送部

データ伝送部は、信号処理部のRS232Cドライバからのシリアル信号を用いて、LANへのプロトコル変換を行い、診断部へデータを伝送する。

尚、I/Fカードは、入力部にRS232Cインターフェイスを備え、出力としてPCMCIA及びイーサネットポートを備えるとともに、診断部との通信プロトコルへの変換を行う。

##### ③診断部

診断部は、データ伝送部からのデータ伝授を行い、絶縁劣化診断のための差分波形生成、波形解析などの計測データの演算処理と絶縁劣化兆候検出と絶縁余寿命診断を行う。プロトシステムでは計測データの演算処理機能の搭載に留め、グラフィック機能、絶縁余寿命診断ロジック機能の搭載は省略した。

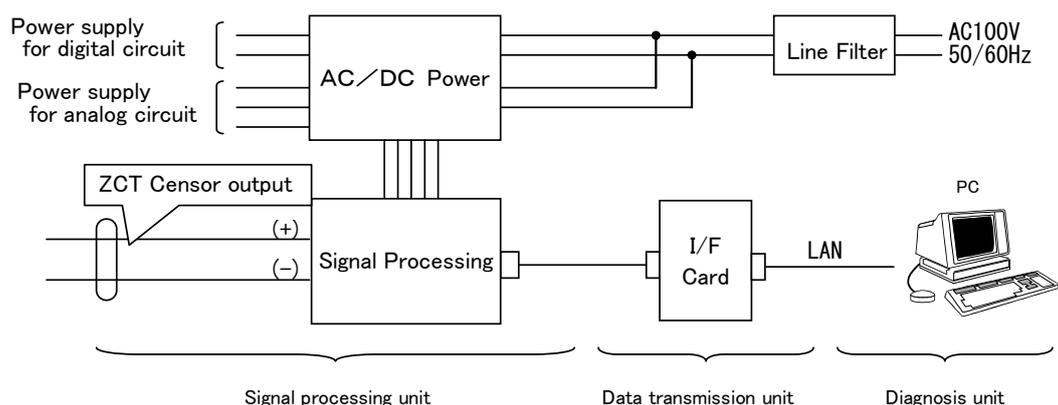


図6.1 オンライン絶縁診断システムの概要

## (2) 絶縁診断フロー

零相電流監視／波形解析による絶縁劣化診断の診断フローを図 6.2 に示す。

- ①正常状態の零相電流波形ヲアナログ計測し，サンプリング周期 20kHzにてデジタル波形を生成し，基本波形とする。  
電動機の新製・据付時，既設機への適用の場合は定期点検時などに正常状態を確認できた時点でのデータを基本波形とする。
- ②基本波形の高速フーリエ変換を行い，1次成分（電源周波数）のパワースペクトル密度（ $P_1$ ）を算定する。
- ③運転中（絶縁劣化進行中）の零相電流を計測し，基本波形と同様にサンプリング周期 20kHzにてデジタル波形を生成し，基本波形との差分を求めて差分波形を生成する。
- ④生成された差分波形の高速フーリエ変換を行い，特徴周波数のパワースペクトル密度（ $P_n$ ）を算定する。
- ⑤6.2項で説明する運転中（絶縁劣化進行中）の差分波形の特徴周波数のパワースペクトル密度（ $P_n$ ）と基本波形の1次成分のパワースペクトル密度（ $P_1$ ）に対する比率（差分波形PSD比率）を算定し，差分波形PSD比率の変動をトレンド監視し，絶縁劣化レベル判定を行なう。  
絶縁劣化レベル判定の判定基準は，6.4項にて検討した判定基準を用いる。

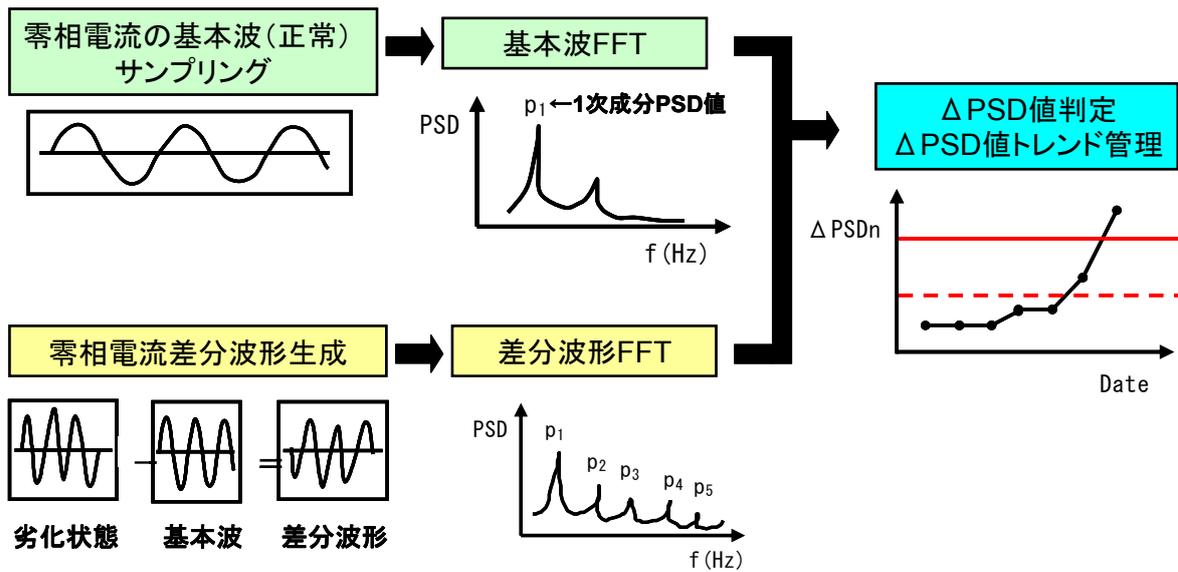


図 6.2 零相電流分析による絶縁診断フロー

## 6. 2 差分波形PSD比率 (ΔPSD)

前項の検証試験と同様に検証試験モデルを用い、正常状態を基本波形とし、絶縁劣化模擬状態の波形と基本波形の差分波形を生成した。各絶縁劣化模擬状態の差分波形の高速フーリエ変換 (FFT) を行い、高速フーリエ変換 (FFT) より得られる卓越周波数のパワースペクトル密度 (PSD) の変化兆候と絶縁劣化レベルとの相関性について評価した。

相電流値と同様に電動機の運転負荷状態で変動することと、差分波形の特徴周波数 (卓越周波数) 成分の変化兆候を評価することを考え合わせ、生成された差分波形の最大波高値をもとに差分波形を正規化し、差分波形の高速フーリエ変換 (FFT) を行うこととした。

零相電流差分波形の高速フーリエ変換 (FFT) 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。

劣化模擬状態差分波形の卓越周波数成分のPSD値の基本波形 (正常状態) の1次成分PSD値に対する比率  $\Delta PSD_n$  を (6.1) 式のごとく定義した。

$$\Delta PSD_n = p_n / P_1 \quad (6.1)$$

- $\Delta PSD_n$  : 絶縁劣化状態PSD比率 (n = 1, 2, 3, ...)
- $p_n$  : 絶縁劣化模擬状態の差分波形PSD値 (n = 1, 2, 3, ...)
- $P_1$  : 基本波形1次成分PSD値

(1) 地絡模擬状態

図6.3～図6.7に地絡模擬状態の零相電流差分波形の波形解析にて得られた各卓越周波数の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_n$ ) と絶縁抵抗値の関係を示す。

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 ( $\Delta PSD_n$ ) は増大する。特に 3 次成分, 5 次成分は特徴的であり, 数値解析結果と同様に地絡抵抗の変化に対する変化が顕著に確認された。3 次成分, 5 次成分は基本波 (1 次成分) に変化兆候が確認されない絶縁抵抗 10M $\Omega$ ～1000M $\Omega$ の状態においても絶縁抵抗の変化に対する差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_n$ ) の変化が確認される。3 次成分, 5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_n$ ) は零相電流の基本波に変化がない状態でも前駆現象の定量検出が可能と評価される。通常の電動機の保守において用いられている絶縁抵抗警報値 (10M $\Omega$ ) レベルから故障値 (1M $\Omega$ ) レベルの差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_n$ ) の変化量が大きく, 3 次成分, 5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_n$ ) は異常判定において有効かつ取り扱いやすい計数である。

2 次成分, 4 次成分については差分波形の卓越周波数として検出されたが, 地絡抵抗に対する特徴的な変化兆候は確認されなかった。地絡模擬状態では地絡抵抗, 地絡電流が直接的に絶縁抵抗, 零相電流に影響を及ぼすが, 2 次成分, 4 次成分は絶縁抵抗の変化に対する変化が確認されないのは, 数値解析, 絶縁劣化模擬試験結果と整合する。

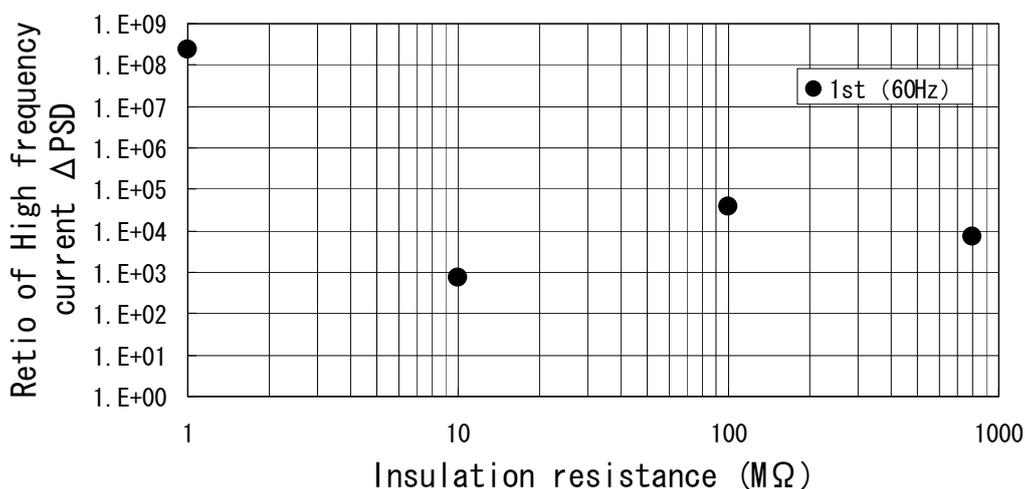


図6.3 絶縁抵抗値と  $\Delta PSD$  値 (地絡模擬状態, 60Hz成分/1次成分)

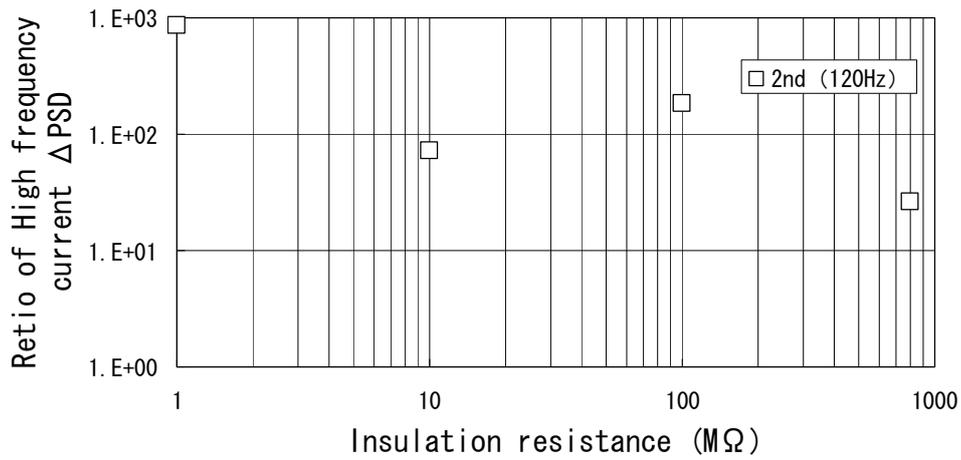


図6.4 絶縁抵抗値とΔPSD値（地絡模擬状態，120Hz成分/2次成分）

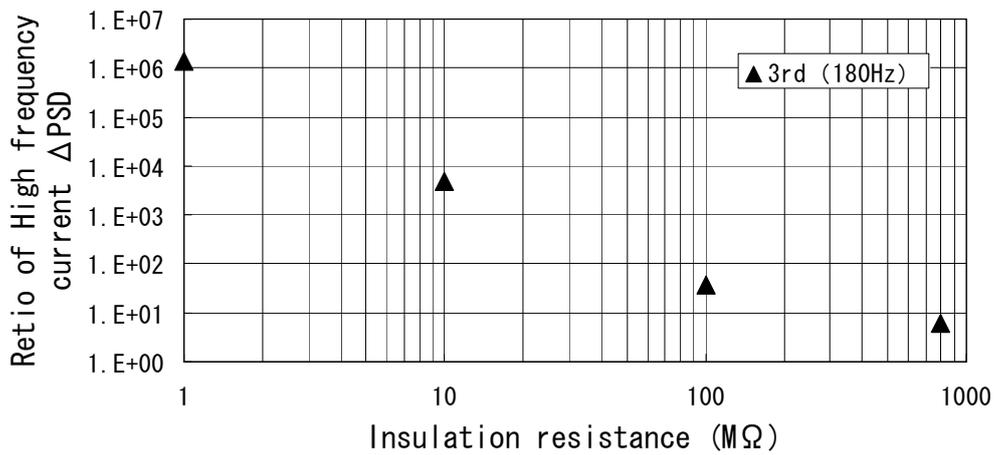


図6.5 絶縁抵抗値とΔPSD値（地絡模擬状態，180Hz成分/3次成分）

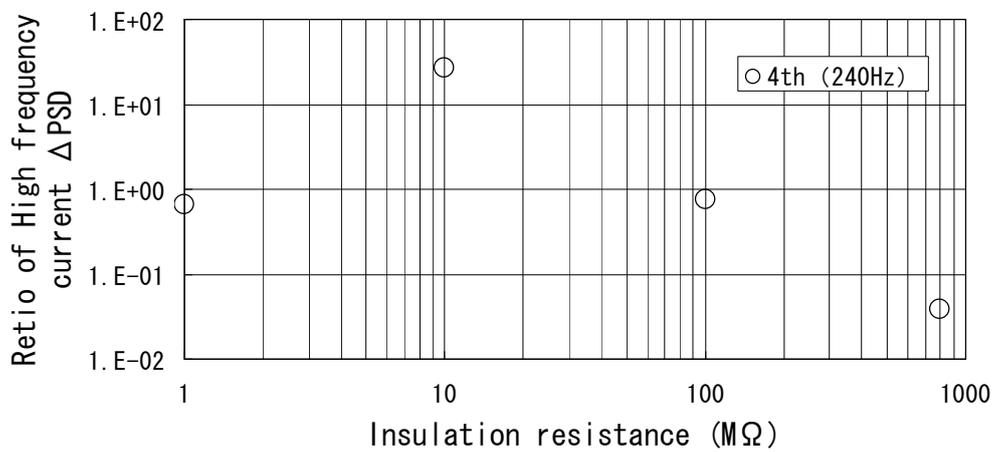


図6.6 絶縁抵抗値とΔPSD値（地絡模擬状態，240Hz成分/4次成分）

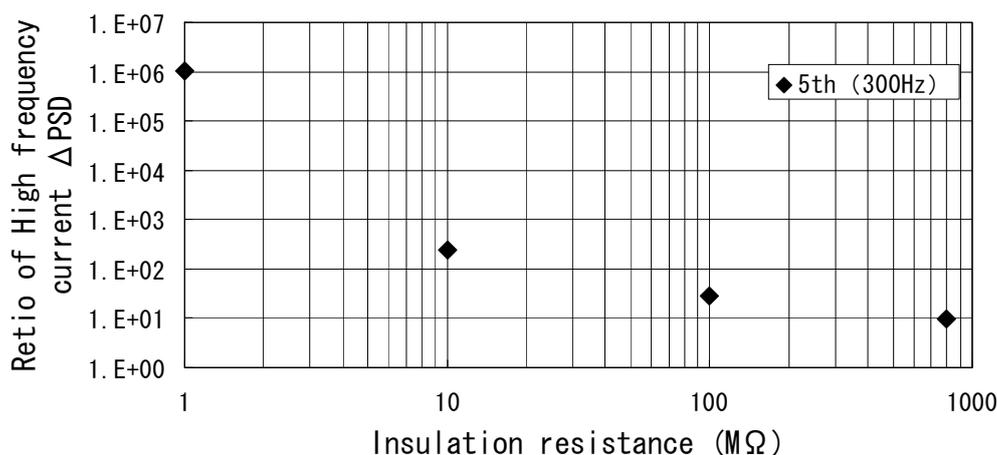


図 6.7 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値 (地絡模擬状態, 300Hz 成分/5 次成分)

(2) レアショート模擬状態

図 6.8～図 6.12 にレアショート模擬状態の零相電流差分波形の波形解析にて得られた各卓越周波数の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD<sub>n</sub>) と絶縁抵抗値の関係を示す。

レアショート模擬状態の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD<sub>n</sub>) 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が、各特徴周波数の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD<sub>n</sub>) レベルの差異が確認され、3 次成分、5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) レベルが低い。

レアショート模擬状態ではレアショート抵抗の変化が直接的に絶縁抵抗に影響を及ぼさないため地絡模擬状態ほどに差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD<sub>n</sub>) と絶縁抵抗との相関は得られないが、数値解析、絶縁劣化模擬試験にて得られたように 3 次成分、5 次成分の特徴周波数のレアショート抵抗に変化に対する差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変動が大きい。レアショート事象に対しても 3 次成分、5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD<sub>n</sub>) の監視は有効であると評価される。

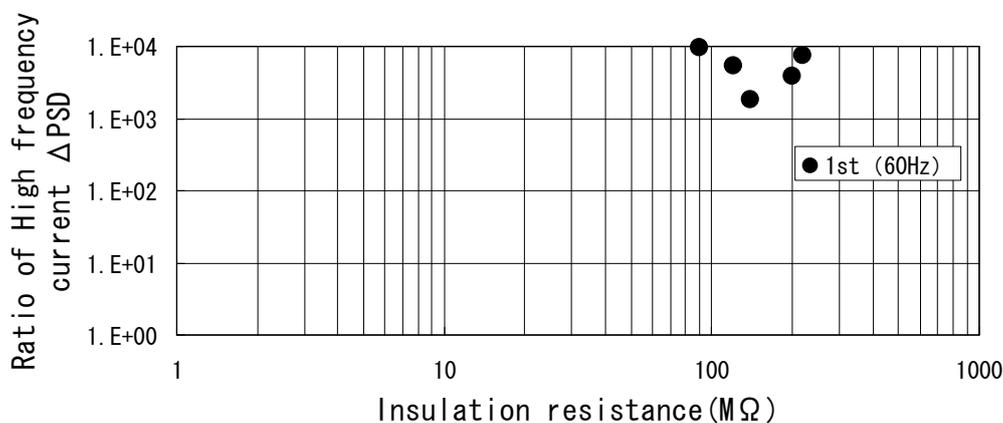


図 6.8 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値 (レアショート模擬状態, 60Hz 成分/1 次成分)

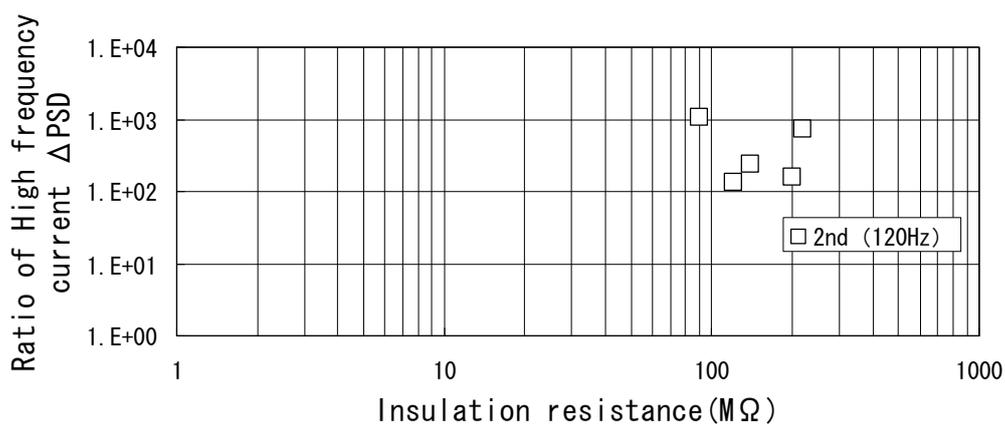


図 6.9 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値 (リアショート模擬状態, 120Hz 成分/2 次成分)

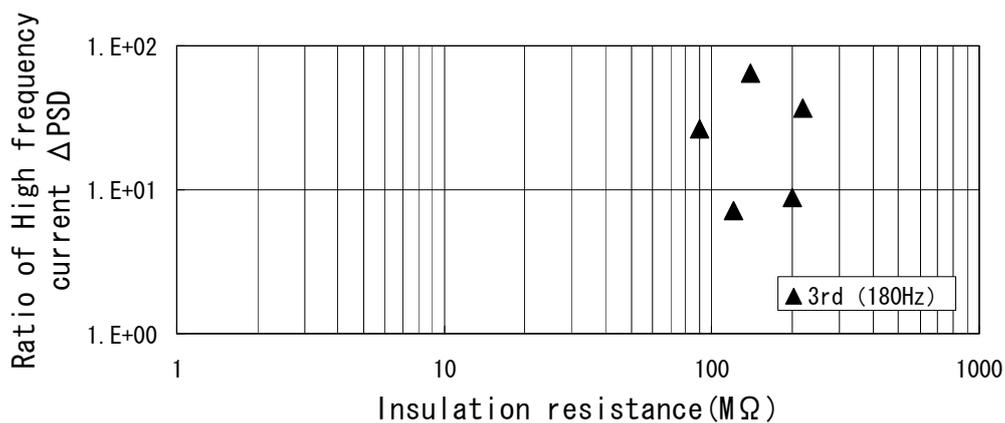


図 6.10 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値 (リアショート模擬状態, 180Hz 成分/3 次成分)

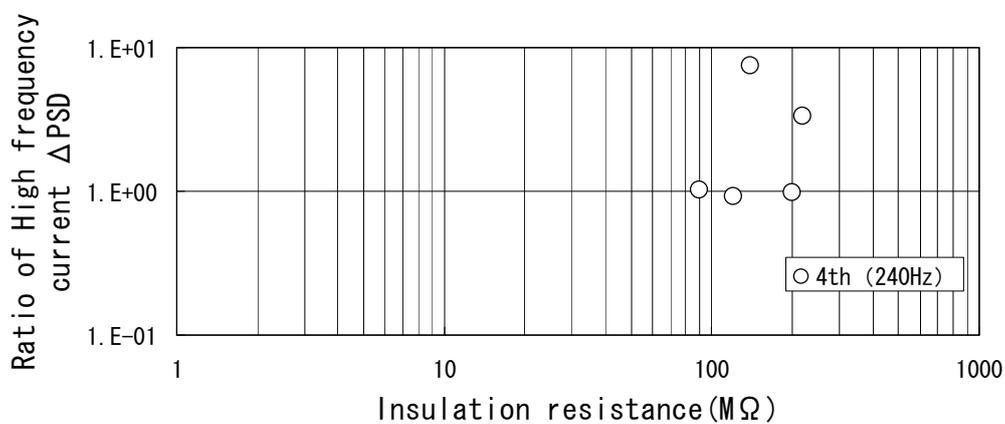


図 6.11 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値 (リアショート模擬状態, 240Hz 成分/4 次成分)

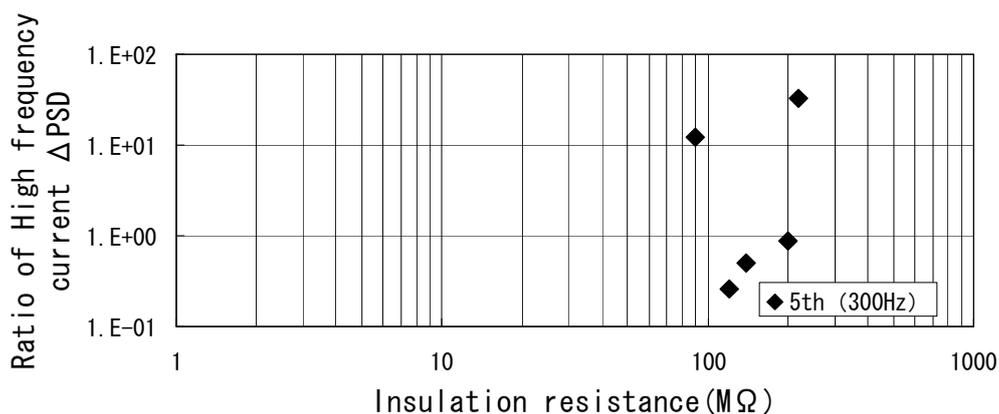


図 6.12 絶縁抵抗値と  $\Delta$ PSD 値（リアショート模擬状態，300Hz 成分/5 次成分）

絶縁劣化模擬試験結果より差分波形の卓越周波数（1 次成分，2 次成分，3 次成分，4 次成分，5 次成分）の検出・監視，特に数値解析でも絶縁劣化レベルが高くなる際の特徴周波数として得られた 3 次成分，5 次成分の差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）の変化兆候の監視が絶縁劣化現象の前駆現象の検出に有効であることが確認された。

### 6. 3 零相電流分析によるオンライン絶縁診断手法の有効性

絶縁劣化模擬モデルでの零相電流分析に加えて発電プラントにて使用中の低圧電動機の零相電流分析と残存絶縁破壊電圧値と高い相関性を有する絶縁抵抗値測定を行い，零相電流分析による絶縁診断手法の有効性について評価した。

図 6.13～図 6.15 に絶縁劣化模擬試験に使用した電動機と発電プラントにて使用中の電動機にて計測された絶縁抵抗値と零相電流の基本波次数と特徴周波数（3 次成分，5 次成分）の差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）を示す。発電プラントにて使用中の電動機の零相電流の基本波形と差分波形の 1 次成分 PSD 値は，絶縁抵抗値が 1000MΩ 以上を有していたので計測開始時の波形データを基本波形とした。

従来の絶縁特性試験法は電動機が運転されている状態（オンライン状態）では実施できず，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零相電流の差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）を計測・監視を可能とし，また劣化進行度を差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）の変化量にて定量評価できることが確認された。

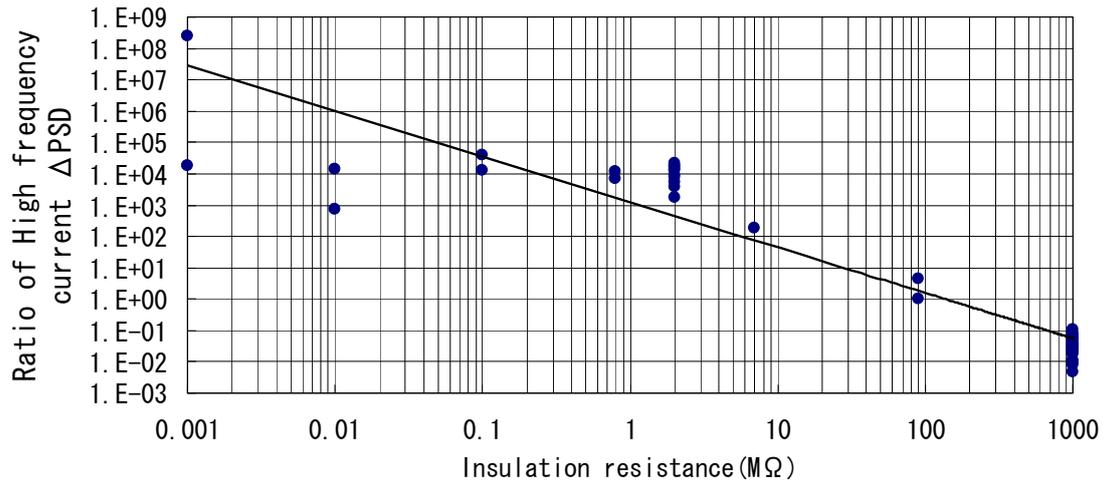


図 6.13 絶縁抵抗値と  $\Delta\text{PSD}_1$  値 (60Hz 成分/1 次成分) の相関

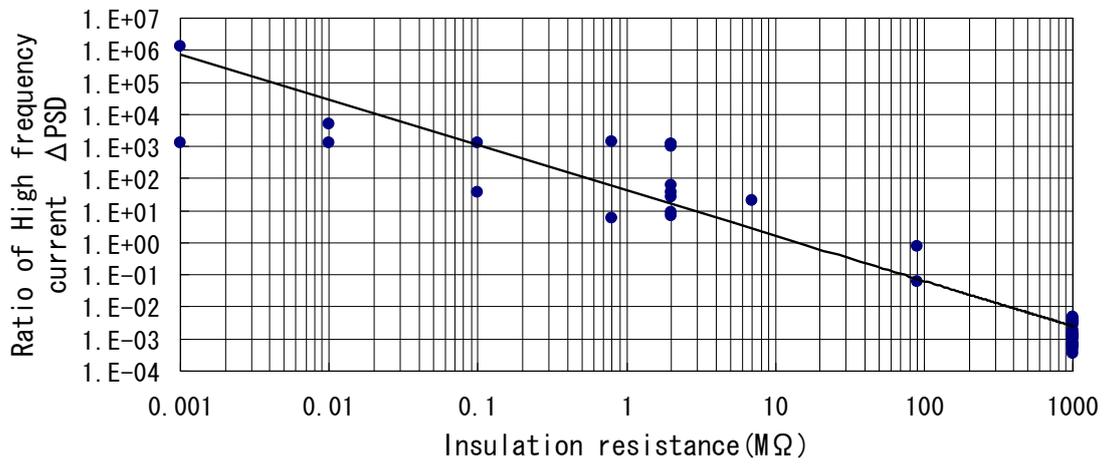


図 6.14 絶縁抵抗値と  $\Delta\text{PSD}_3$  値 (180Hz 成分/3 次成分) の相関

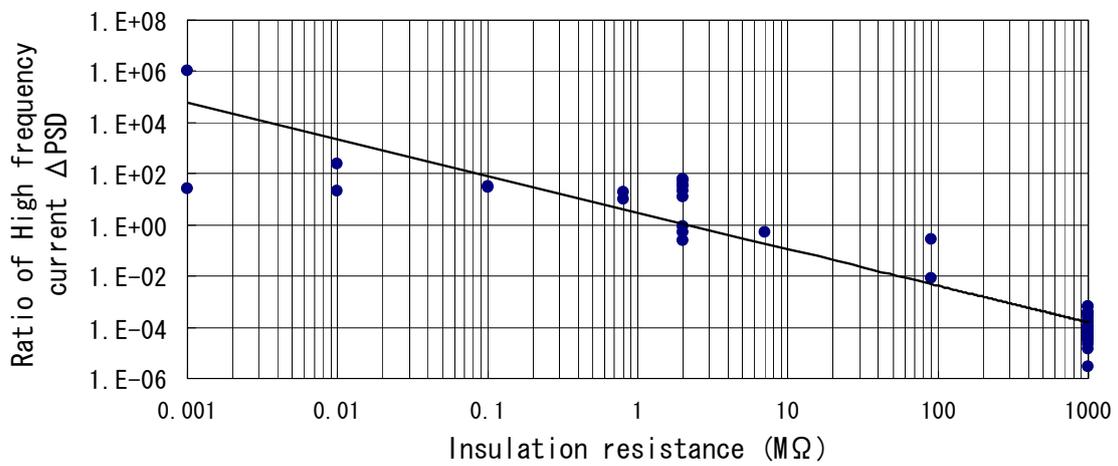


表 6.1 に示すとおり 1 次成分, 3 次成分, 5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗値の相関係数は 0.87~0.89 であり, 何れの周波数も高い相関性を有する。絶縁抵抗値にもとづく絶縁劣化診断と同等の信頼性を図 3.14 に示す絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関性を考え合わせると, 零相電流の差分波形 PSD 値および差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の監視は, 絶縁劣化兆候検出は元より, 絶縁余寿命診断において有効性が期待される。

表6.1  $\Delta$ PSD値と絶縁抵抗値の相関性

差分波形成分	相関係数
1 <sup>st</sup> (60Hz)	0.87
3 <sup>rd</sup> (180Hz)	0.89
5 <sup>th</sup> (300Hz)	0.87

#### 6. 4 絶縁劣化判定基準

絶縁劣化模擬試験結果, ならびに図 6.13~図 6.15 の差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗値との相関, 図 3.14 の絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関をもとに差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) による絶縁劣化判定基準を設定した。

- (1) 図 3.16 において「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絶縁抵抗値の警報値 ( $0.8M\Omega$ ), 故障値 ( $0.15M\Omega$ ) とする。
- (2) 図 6.13~図 6.15 より絶縁抵抗警報値, 故障値における各特徴周波数の  $\Delta$ PSD 値の平均値を  $\Delta$ PSD の警報値, 故障値とする。表 6.2 に各特徴周波数の  $\Delta$ PSD 値判定基準を示す。

表 6.2  $\Delta$ PSD 値の判定基準

差分波形成分	警報値	故障値
1 <sup>st</sup> (60Hz)	$1.7 \times 10^3$	$2.0 \times 10^4$
3 <sup>rd</sup> (180Hz)	$5.8 \times 10$	$6.1 \times 10^2$
5 <sup>th</sup> (300Hz)	4.2	$4.6 \times 10$

- (3) 絶縁劣化レベルの傾向監視, ならびに直接的に絶縁抵抗に影響を及ぼさないレアショート事象を考慮し, 表 6.2 の  $\Delta$ PSD 値判定基準に加え,  $\Delta$ PSD 値の変動に関わる判定基準を設定した。レアショート模擬試験は 1 ターン短絡状態で, 最も低い劣化レベルの試験結果であるためレアショート模擬試験にて確認された  $\Delta$ PSD 値の変動幅をもとに表 6.3 に示す  $\Delta$ PSD 変動値の判定基準を設定した。

表 6.3 ΔPSD 変動値の判定基準

差分波形成分	警報値	故障値
1 <sup>st</sup> (60Hz)	初期値×100	初期値×200
3 <sup>rd</sup> (180Hz)		
5 <sup>th</sup> (300Hz)		

表 6.2, 表 6.3 の差分波形 PSD 値比率 (ΔPSD) 判定基準を用いた零相電流の差分波形 PSD 値比率 (ΔPSD) の監視にて、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。

## 6. 5 絶縁余寿命推定要領の検討

### 6. 5. 1 絶縁余寿命推定要領

差分波形 PSD 値比率 (ΔPSD) と絶縁余寿命 (破壊電圧値, 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 (ΔPSD)], [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, 破壊電圧値)] の相関性より絶縁余寿命年を推定する方法を検討した。図 6.16 に絶縁余寿命推定フローを示す。

- (1) 差分波形生成し, 差分波形の高速フーリエ変換 (FFT) を行い, 特徴周波数 (1 次成分, 3 次成分, 5 次成分) の差分波形 PSD 値比率 (ΔPSD) を算定する。
- (2) [絶縁抵抗値－差分波形 PSD 比率] (図 6.13～図 6.15) より各特徴周波数 (1 次成分, 3 次成分, 5 次成分) の差分波形 PSD 値比率 (ΔPSD) に相当する推定絶縁抵抗値を求め, 各推定絶縁抵抗値の中の最小値を推定絶縁抵抗値 (M<sub>x</sub>) として破壊電圧値を推定する。
- (3) [絶縁抵抗値－破壊電圧値] (図 3.14) より推定絶縁抵抗値 (M<sub>x</sub>) に相当する推定破壊電圧値 (BDV<sub>x</sub>) を求める。
- (4) [運転経過年数－破壊電圧値] (図 3.16) より推定破壊電圧値 (BDV<sub>x</sub>) に相当する推定運転経過年数 (N<sub>x</sub>) を求める。推定絶縁劣化レベル (破壊電圧値レベル: BDV<sub>x</sub>) から安全運転限界 (BDV<sub>0</sub>) に至る年数を絶縁余寿命年 (N<sub>l</sub>) とし, 安全運転限界 (BDV<sub>0</sub>) に相当する運転経過年数を N<sub>0</sub> と推定運転経過年数 (N<sub>x</sub>) より絶縁余寿命年 (N<sub>l</sub>) を式 (6.2) 式より求める。

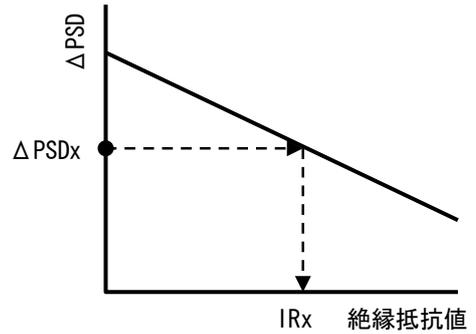
$$N_l = N_0 - N_x \quad (6.2)$$

差分波形分析 (FFT)

差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta PSD_x$ ) 算定

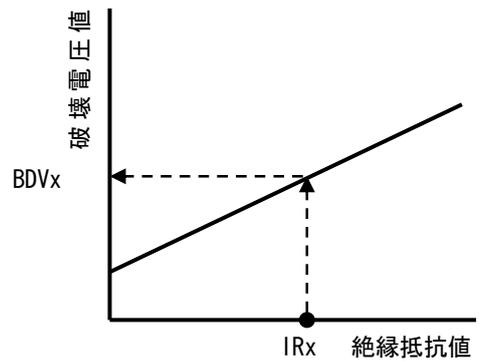
絶縁抵抗値 ( $M_x$ ) 推定

- ・ [絶縁抵抗値 - 差分波形 PSD 比率] より差分波形分析 (FFT) より算定された特注周波数 (1 次成分, 3 次成分, 5 次成分) の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD_x$ ) に相当する推定絶縁抵抗値 ( $IR_x$ ) を求める。



破壊電圧値 ( $BDV_x$ ) 推定

- ・ [絶縁抵抗値 - 破壊電圧値] より推定絶縁抵抗値 ( $IR_x$ ) に相当する推定破壊電圧値 ( $BDV_x$ ) を求める。



絶縁余寿命年推定

- ・ 推定絶縁劣化レベル (破壊電圧値レベル:  $BDV_x$ ) から安全運転限界 ( $BDV_0$ ) に至る年数を絶縁余寿命年 ( $N_L$ ) とする。
- ・ [運転経過年数 - 破壊電圧値] より推定破壊電圧値 ( $BDV_x$ ) に相当する推定運転経過年数 ( $N_x$ ) を求める。
- ・ 安全運転限界 ( $BDV_0$ ) に相当する運転経過年数を  $N_0$  と推定運転経過年数 ( $N_x$ ) より絶縁余寿命年 ( $N_L$ ) を求める。

$$N_L = N_0 - N_x$$

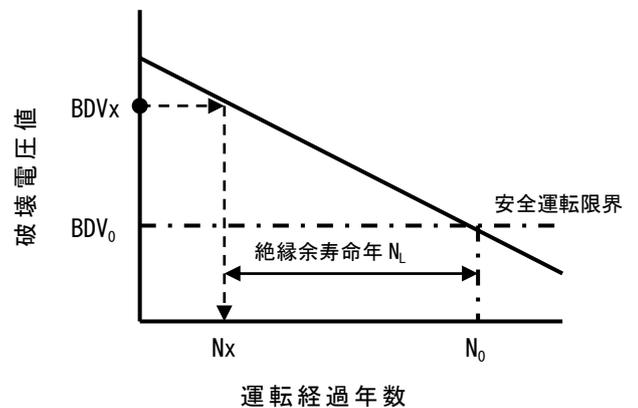


図 6.16 絶縁余寿命年推定フロー

## 6. 5. 2 絶縁余寿命推定事例

発電プラントにて使用中の低圧電動機より計測された差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD$ ) をサンプルデータとして、絶縁抵抗値、破壊電圧値、ならびに余寿命年を推定した。

### (1) 電動機仕様

- ・出力：60 kW      ・電圧：440V      ・極数：6P      ・用途：ポンプ
- ・運転経過年数：12 年

### (2) 計測値と推定値

表 6.3 に絶縁抵抗値と差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD$ ) の計測値と絶縁抵抗値、破壊電圧値、運転経過年数、絶縁余寿命年の推定値を示す。

表 6.3 絶縁余寿命推定事例

差分波形成分	計測値		推定値			
	$\Delta PSD$	絶縁抵抗値	絶縁抵抗値	残存破壊電圧値	運転経過年数	絶縁余寿命年
1 次	4.5	90M $\Omega$	49M $\Omega$	80%	8 年	16 年
3 次	$6.2 \times 10^{-2}$		102M $\Omega$	89%	5 年	19 年
5 次	$8.3 \times 10^{-3}$		62M $\Omega$	83%	7 年	17 年

#### ①絶縁抵抗値の推定

絶縁抵抗値と差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD$ ) の相関関係 (図 6.13~図 6.15) より求められた最小二乗平均と計測された差分波形 PSD 比率 ( $\Delta PSD$ ) をもとに絶縁抵抗値 (IR) の推定値を算定した。

[1 次成分 (60Hz)]

$$IR = \left( \frac{\Delta PSD}{1265} \right)^{\frac{1}{-1.4513}} = 49 \text{ M}\Omega$$

[3 次成分 (120Hz)]

$$IR = \left( \frac{\Delta PSD}{42.043} \right)^{\frac{1}{-1.4085}} = 102 \text{ M}\Omega$$

[5 次成分 (300Hz)]

$$IR = \left( \frac{\Delta PSD}{3.0713} \right)^{\frac{1}{-1.4312}} = 62 \text{ M}\Omega$$

## ②破壊電圧値の推定

絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関関係(図 3. 14)より求められた最小二乗平均と推定絶縁抵抗値(IR)をもとに絶縁抵抗値 (BDV) の推定値を算定した。

[1 次成分 (60Hz)]

$$BDV = 11.848 \times \ln(IR) + 34.012 = 80\%$$

[3 次成分 (120Hz)]

$$BDV = 11.848 \times \ln(IR) + 34.012 = 89\%$$

[5 次成分 (300Hz)]

$$BDV = 11.848 \times \ln(IR) + 34.012 = 83\%$$

## ③絶縁余寿命年の推定 (図 6. 17 参照)

運転経過年数と破壊電圧値の相関関係(図 3. 16)より求められた最小二乗平均と推定破壊電圧値 (BDV) をもとに運転経過年数 ( $N_x$ ), 絶縁余寿命年 ( $N_L$ ) の推定値を算定した

[1 次成分 (60Hz)]

$$N_x = \frac{BDV + 110.93}{-4.0742} = 8 \text{ 年}$$

$$N_L = N_0 - N_x = 16 \text{ 年} \quad (N_0 : \text{安全運転下限破壊電圧値到達年 } 24 \text{ 年})$$

[3 次成分 (120Hz)]

$$N_x = \frac{BDV + 110.93}{-4.0742} = 5 \text{ 年}$$

$$N_L = N_0 - N_x = 19 \text{ 年} \quad (N_0 : \text{安全運転下限破壊電圧値到達年 } 24 \text{ 年})$$

[5 次成分 (300Hz)]

$$N_x = \frac{BDV + 110.93}{-4.0742} = 7 \text{ 年}$$

$$N_L = N_0 - N_x = 17 \text{ 年} \quad (N_0 : \text{安全運転下限破壊電圧値到達年 } 24 \text{ 年})$$

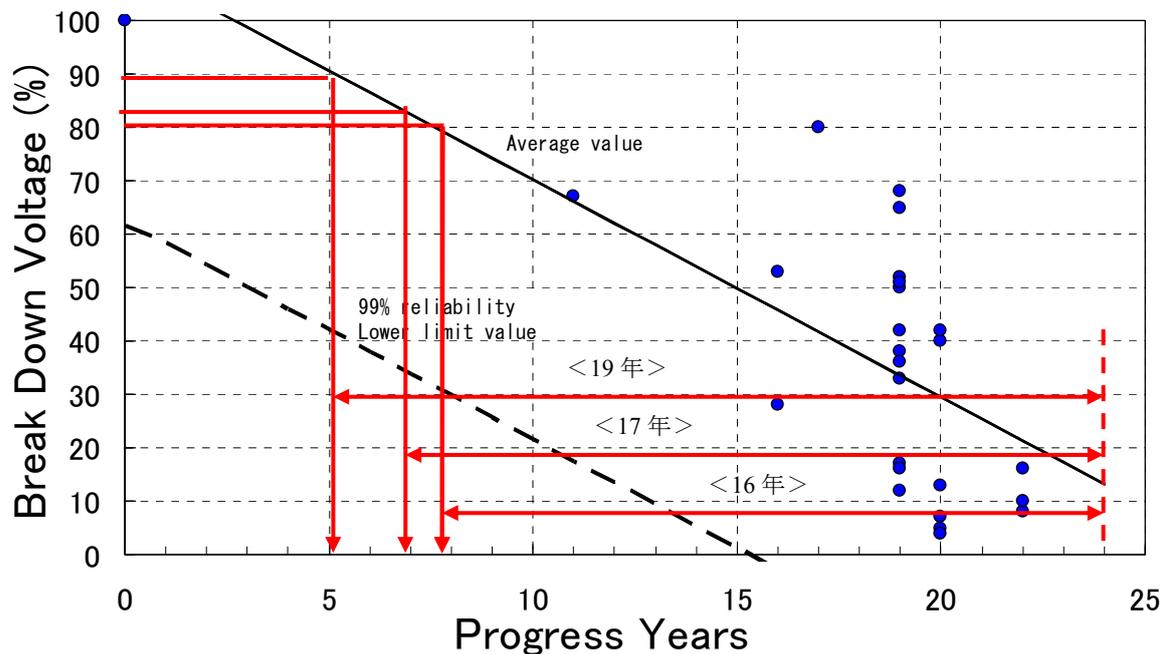


図 6.17 絶縁余寿命年の推定

破壊電圧値ならびに絶縁余寿命年を推定する際、絶縁抵抗値と破壊電圧値の相間関係、運転経過年数と破壊電圧値の相間関係の最小二乗平均を用いたが、診断対象機の重要度、要求故障率（非破壊率）に応じて任意の信頼区間（信頼下限）をもとに推定することを提案する。一般に原子力発電所などの重要プラントで運用されている電動機に対しては99%信頼下限が用いられている。

絶縁抵抗値の計測値と推定値を比較すると、推定値の計測値に対する誤差率は1%～11%で高い精度が確認された。サンプル機の絶縁劣化の進行度（破壊電圧値）が確認されていないため、この推定精度を絶縁余寿命年の絶対値推定の精度として取り扱うには実証データを積み重ねる必要があるが、オンラインモニタリングの段階での多数の診断対象機の絶縁劣化レベルのスクリーニング、保守の優先度評価には十分な精度を有する。

差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）と絶縁破壊電圧値のデータベースを構築できていないため、既存の絶縁劣化データベースを用いた差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）による絶縁余寿命推定要領について検討したが、差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）と絶縁破壊電圧値の相間データベースを構築することで、差分波形 PSD 比率（ $\Delta$ PSD）による絶縁余寿命推定の推定精度の向上と多種多様の診断対象機に適用できる絶縁劣化則の構築が期待できる。

## 6. 6 第6章のまとめ

第5章にて絶縁劣化兆候検出のための零相電流波形の波形分析手法として有効であることが検証された零相電流の差分波形の高速フーリエ変換による波形分析を用いた絶縁劣化診断プロトシステムを試作し、零相電流波形の波形分析による絶縁劣化兆候検出の有用性について検証した。

絶縁劣化模擬試験モデルと絶縁劣化診断プロトシステムを用い、正常状態を基本波形とし、絶縁劣化模擬状態の波形と基本波形の差分波形を生成した。各絶縁劣化模擬状態の差分波形の高速フーリエ変換を行い、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 値に対する比率である差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) を (6.1) 式のごとく定義し、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 ( $\Delta$ PSD) は増大する。特に3次成分、5次成分は特徴的であり、数値解析結果と同様に地絡抵抗の変化に対する変化が顕著に確認された。3次成分、5次成分は基本波 (1次成分) に変化兆候が確認されない絶縁抵抗  $10\text{M}\Omega \sim 1000\text{M}\Omega$  の状態においても絶縁抵抗の変化に対する差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変化が確認される。3次成分、5次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) は零相電流の基本波に変化がない状態でも前駆現象の定量検出が可能と評価される。通常の電動機の保守において用いられている絶縁抵抗警報値 ( $10\text{M}\Omega$ ) レベルから故障値 ( $1\text{M}\Omega$ ) レベルの差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変化量が大きく、3次成分、5次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) は異常判定において有効かつ取り扱いやすい計数である。

レアショート模擬状態の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) 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が、各特徴周波数の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) レベルの差異が確認され、3次成分、5次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) レベルが低い。レアショート模擬状態ではレアショート抵抗の変化が直接的に絶縁抵抗に影響を及ぼさないため地絡模擬状態ほどに差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗との相関は得られないが、数値解析、絶縁劣化模擬試験にて得られたように3次成分、5次成分の特徴周波数のレアショート抵抗に変化に対する差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変動が大きい。レアショート事象に対しても3次成分、5次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の監視は有効であると評価される。

地絡模擬状態、レアショート模擬状態の差分波形分析結果より差分波形の卓越周波数 (1次成分、2次成分、3次成分、4次成分、5次成分) の検出・監視、特に数値解析でも絶縁劣化レベルが高くなる際の特徴周波数として得られた3次成分、5次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変化兆候の監視が絶縁劣化現象の前駆現象の検出に有効であることが確認された。

絶縁劣化模擬モデルでの検証試験に加えて発電プラントにて使用中の低圧電動機の零相電流分析と残存絶縁破壊電圧値と高い相関性を有する絶縁抵抗値測定を行い、零相電流分析による絶縁診断手法の有用性について評価した。

従来の絶縁特性試験法は電動機が運転されている状態 (オンライン状態) では実施できず、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零相電流の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) を計測・監視を可能とし、また劣化進行度を差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の変化量にて定量評価できることが確認された。

1 次成分、3 次成分、5 次成分の差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗値の相関係数は 0.87~0.89 であり、何れの周波数も高い相関性を有する。零相電流の差分波形 PSD 値および差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の監視は、絶縁劣化兆候検出は元より、絶縁余寿命診断において有効性が期待される。

差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗値との相関、絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関をもとに差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) による絶縁劣化判定基準を設定した。「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絶縁抵抗値の警報値 ( $0.8M\Omega$ )、故障値 ( $0.15M\Omega$ ) とし、差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) と絶縁抵抗値との相関より各特徴周波数の  $\Delta$ PSD 値の平均値を  $\Delta$ PSD の警報値、故障値として表 6.2 に示す絶縁劣化判定基準を設定した。差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) の判定基準に加えて、絶縁劣化レベルの傾向監視、ならびに直接的に絶縁抵抗に影響を及ぼさないレアショート事象を考慮し、差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) の変動に関わる判定基準を設定した。レアショート模擬試験は 1 ターン短絡状態で、最も低い劣化レベルの試験結果であるためレアショート模擬試験にて確認された  $\Delta$ PSD 値の変動幅をもとに表 6.3 に示す差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) 変動値の判定基準を設定した。

零相電流の差分波形 PSD 値および差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の計測・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。

本稿では差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) 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推定する方法を検討した。サンプル機にて採集されたデータにて絶縁余寿命年推定を行ない、絶縁抵抗値の計測値と推定値を比較すると、推定値の計測値に対する誤差率は 1%~11% で高い精度が確認された。サンプル機の絶縁劣化の進行度 (破壊電圧値) が確認されていないため、この推定精度を絶縁余寿命年の絶対値推定の精度として取り扱うには実証データを積み重ねる必要があるが、オンラインモニタリングの段階での多数の診断対象機の絶縁劣化レベルのスクリーニング、保守の優先度評価には十分な精度を有する。

## 第7章 結 論

本論文では、電動機の絶縁劣化事象の代表的な事象である地絡、レアショート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検証した。

正常状態と地絡やレアショートなどの絶縁劣化事象発生した異常状態における零相電流波形、零相電圧波形には差異が生じ、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変化兆候を定量的に検出できることが確認された。また、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を有し、零相電流分析による絶縁診断手法の絶縁劣化兆候検出ならびに異常判定における有効性について理論的かつ実験的に確認できた。

### 7. 1 零相電流波形分析による絶縁劣化兆候検出手法

数値解析ならびに絶縁劣化模擬試験にて、地絡、またはレアショート時には零相電流の高調波成分の発生、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。

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、波形変化を確認することができなかった。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うことで高調波成分の発生・変化を検出できた。中でも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特徴周波数成分の周波数変化ならびに信号強度変化とともに定量的に検出できることが確認された。

地絡、レアショート発生の前駆現象における絶縁貫通抵抗低下の過程、所謂、絶縁劣化進展にともない零相電流の1次成分（電源周波数）、3次成分、5次成分の発生・変動が特徴的に生じる。これらの特徴周波数の強度レベル（PSD値）は電動機負荷の増減でも増減することを踏まえ、差分波形の卓越周波数成分の基本波形（正常状態）の1次成分PSD値に対する各卓越周波数のPSD値の比率 $\Delta$ PSDを(6.1)式のごとく定義し、各卓越周波数の差分波形PSD比率 $\Delta$ PSDをもとに特徴量を検出・監視することとした。絶縁貫通抵抗が低下し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。

1次成分、3次成分、5次成分の差分波形PSD比率 $\Delta$ PSDと絶縁抵抗値の相関係数は0.87～0.89であり、何れの周波数も高い相関性を有する。図3.14に示す絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関性を考え合わせると、零相電流の差分波形PSD値および差分波形PSD比率（ $\Delta$ PSD）の監視は、絶縁抵抗値にもとづく絶縁劣化診断と同等の信頼性を有し、絶縁劣化兆候の定量検出を可能とする。

## 7. 2 絶縁劣化診断と判定基準

差分波形 PSD 値比率と絶縁抵抗値との相関、絶縁抵抗値と破壊電圧値の相関をもとに差分波形 PSD 値比率による絶縁劣化判定基準を設定した。

「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絶縁抵抗値の警報値 ( $0.8M\Omega$ )、故障値 ( $0.15M\Omega$ ) とし、差分波形 PSD 値比率と絶縁抵抗値との相関関係より絶縁抵抗警報値、故障値における各特徴周波数の差分波形 PSD 値比率の平均値を差分波形 PSD 値比率の警報値、故障値として絶縁劣化判定基準 (表 6.2) を設定した。差分波形 PSD 値比率の判定基準に加えて、絶縁劣化レベルの傾向監視、ならびに直接的に絶縁抵抗に影響を及ぼさないレアショート事象を考慮し、差分波形 PSD 値比率の変動に関わる判定基準を設定した。レアショート模擬試験は 1 ターン短絡状態で、最も低い劣化レベルの試験結果であるためレアショート模擬試験にて確認された  $\Delta$ PSD 値の変動幅をもとに差分波形 PSD 値比率変動値の判定基準 (表 6.3) を設定した。

零相電流の差分波形 PSD 値および差分波形 PSD 比率 ( $\Delta$ PSD) の計測・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り、保守計画の時間効率、費用効率向上を図ることができる。

## 7. 3 オンライン絶縁劣化診断システムの開発

### (1) オンライン絶縁診断の実現

劣化模擬試験にて絶縁劣化兆候検出のための相電流波形の波形分析手法として有効であることが実証された零相電流の差分波形の高速フーリエ変換 (20kHz サンプリング) による波形分析を用いた絶縁劣化診断プロトシステムを試作した。本プロトシステムは、ラインケーブルに取り付けられた ZCT 2 次電流を電圧換算し、A/D 変換する信号処理部、信号処理部と診断部 (PC) 間のデータの授受を行うデータ伝送部、データ解析・診断を行う診断部で構成する。信号処理部で零相電流のアナログ波形より差分波形を生成し、診断部にて差分波形の高速フーリエ変換を行い、特徴周波数の差分波形 PSD 値比率 ( $\Delta$ PSD) を算出する。

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。ま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ることが確認され、実用化に十分に対応できる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。

## (2) 低圧電動機の絶縁劣化診断技術の課題解決

零相電流分析によるオンライン絶縁診断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る。

①絶縁劣化パラメータ（絶縁抵抗）の試験条件によるばらつきが大きい。

運転状態（絶縁劣化進展環境）での絶縁劣化パラメータ（差分波形PSD比率（ $\Delta$ PSD））のオンライン監視，傾向監視が可能となるため，従来の試験条件によるばらつきは考慮不要となる。

②診断対象が多台数である。

絶縁劣化パラメータ（差分波形PSD比率（ $\Delta$ PSD））のオンライン監視が可能となり，プラント停止，電動機の停止・分解を要しないので，多台数の診断が可能となる。また，診断環境整備にはラインケーブルへのZCT取付とZCTの2次側リード線の引き出しを要するが，電動機の改造は不要である。

③オンライン絶縁劣化診断装置の実用化例がない。

零相電流波形分析による絶縁劣化兆候検出手法を用いたオンライン絶縁劣化診断システムは低圧電動機に適用，実用化が可能であるオンライン絶縁劣化診断システムであり，低圧電動機の設備保全の高度化（事後保全→状態監視保全）と保全コスト低減の実現を十分に期待できるものである。

## 第8章 今後の展開

### 8. 1 絶縁余寿命推定手法の確立

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推定する方法を検討した。

計測・算出された差分波形 PSD 値比率より絶縁抵抗値を推定し、推定絶縁抵抗値より破壊電圧値を推定、推定残存電圧値より絶縁余寿命年を推定する。サンプル機にて採集されたデータにて絶縁余寿命年推定を行ない、絶縁抵抗値の計測値と推定値を比較すると、推定値の計測値に対する誤差率は1%～11%で高い精度が確認された。サンプル機の絶縁劣化の進行度（破壊電圧値）が確認されていないため、この推定精度を絶縁余寿命年の絶対値推定の精度として取り扱うには実証データを積み重ねる必要があるが、オンラインモニタリングの段階での多数の診断対象機の絶縁劣化レベルのスクリーニング、保守の優先度評価には十分な精度を有する。今後、フィールドデータの蓄積において差分波形 PSD 比率と絶縁破壊電圧値の直接の相間データベースを構築することで、差分波形 PSD 比率による絶縁余寿命推定の推定精度の向上と多種多様の診断対象機に適用できる絶縁劣化則の構築が期待でき、フィールドデータの収集に取り組む。

### 8. 2 高圧電動機への適用検討

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る。高圧電動機の絶縁劣化進展時の部分放電と同様に零相電流差分波形の高調波が絶縁劣化の前駆現象検出に有効であるか、否かを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。

# 謝 辞

本研究は、筆者が東芝三菱電機産業システム株式会社および早稲田大学大学院情報生産システム研究科において実施したものです。

筆者が設備診断技術研究・開発関連の業務に携わり始めた当初より技術指導して頂き、本研究を進めるにあたり終始直接ご指導頂きました早稲田大学大学院情報生産システム研究科 大島浩教授に対して心から御礼申し上げます。また、審査頂きました早稲田大学大学院情報生産システム研究科 松本將教授および吉江修教授に深く御礼申し上げます。

このような研究を実施できたのは筆者個人の力ではなく、以下の方々の強力なご援助の賜物であります。お名前を書き記し、改めて感謝の意を表します。

当社におきましては筆者の直接の上司として研究遂行のために多大の理解とご指導頂きました当社回転機システム事業部 飯田博文氏(元大形回転機第二部 部長)、回転機第一部 神寄英俊 部長に感謝致します。

電動機の設備診断技術、絶縁劣化診断技術、絶縁技術に関しては、三菱電機プラントエンジニアリング株式会社 沖田哲夫氏(元三菱電機株式会社 長崎製作所回転機製造部 部長)、入江眞生氏(元三菱電機株式会社 長崎製作所回転機製造部 主幹)、三菱電機株式会社 電力システム製作所 池田郁夫博士、当社大形回転機第二部 丸亀達則主任にご指導、ご助言頂きました。

検証試験、フィールドデータ収集・分析には当社大形回転機第二部 栗田基次次長、西田直正主任の多大なる協力を頂きました。またデータ収集・解析ツール製作には三菱電機エンジニアリング株式会社神戸事業所 大場義久課長に多大のご尽力を頂きました。筆者が所属してきた当社大形回転機第一部、大形回転機第二部の各課の皆様方には種々のご援助頂きました。深く御礼申し上げます。

最後に、これまでの長きに亘る筆者の研究生活と会社業務の両立を支えてくれた家族ならびに両親に感謝致します。

## 参考文献

### 【第1章】

- (1) 河村達雄, 田中祀捷: 「電気設備の診断技術 改訂版」, 電気学会 (2003)
- (2) 電気学会技術報告 1196号: 「誘導機の故障診断技術」(2010)

### 【第2章】

- (3) 東村豊, 藤岡慎英, 高村誠: 「電動機の運転中部分放電測定における雑音識別法の検討」, 電気学会絶縁材料研究会資料, Vol.EIM-89, No.9-20, pp.41-48 (1989)
- (4) K.Kimura: "Recent Research Activities on On-Line Insulation Diagnosis for High Voltage Rotating Machines", T.IEE Japan, Vol.110-B, No.12, pp.991-994, 1990  
木村健: 「回転機のオンライン絶縁診断技術の動向」, 電学論B, 110巻12号, pp.991-994 (1990)
- (5) 電機学会技術報告 464号: 「絶縁材料技術開発の歴史的展開」(1993)
- (6) 電機学会技術報告 182号: 「絶縁劣化診断法」(1994)
- (7) 佐々木洋敏: 「回転機巻線の劣化診断技術」, 電気学会一般産業研究会資料, Vol.GID-01, No.20-26, pp.7-12 (2001)  
F.C.Trutt, J.Sottile, J.K.Kohler: "Condition Monitoring of Induction Motor Stator Windings using Electrically Excited Vibrations", Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Conf., Vol.37, No.4, pp.2301-2305, 2002
- (8) H.henao, C.Demian, G.A.Capolino: "A Frequency-Domain Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an External Flux Sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.39, No.4, pp.1272-1279, 2003
- (9) Y.Kaneda, M.Yoshimura, H.Muto, H.Iwanaga, O.Hamamoto: "Monitoring System of Partial Discharge for High-Voltage Motor using GHz Electromagnetic Wave Detection", IEE Japan, Technical Meeting, 2-029, pp.34-35, 2005  
兼田吉治, 吉村学, 武藤浩隆, 岩永英樹, 濱本修: 「GHz帯電磁波検出による電動機用部分放電計測装置」, 電気学会全国大会論文集, No.2-029, pp.34-35 (2005)
- (10) 金子正光, 上田隆司, 大坪昌久, 本田親久, 竹之内修, 福良淳司, 田中和洋, 鶴田芳男: 「超音波法による運転中水車発電機固定子巻線の長期部分放電特性」, 電気学会放電研究会資料, Vol.ED-05, No15-18, pp.33-38 (2005)

- ( 1 1 ) R.M.Tallam, S.B.Lee, G.C.Stone, G.B.Kliman, J.Yoo, T.G.Habetler, R.G.Harley: " A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines ", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.43, No.4, pp.920-933, 2007
- ( 1 0 ) S.Grubic, J.M.Aller, B.Lu, T.G.Habetler: " A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems ", IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol.55, No.12 pp.4127-4136, 2008
- ( 1 1 ) Noriyoshi Sawada, Sumio Yano, Hachiro Furuichi, Osamu Hamamoto, Hideki Iwanaga, Yoshiharu Kaneda: " Application of On-Line Partial Discharge Monitoring Technique for High-Voltage Motors ", IEE Japan, Technical Meeting, 2-006, pp.6-7, 2010  
 澤田憲良, 矢野住夫, 古市八郎, 濱本 修, 岩永英樹, 兼田吉治: 「高圧電動機への運転中部分放電監視技術の適用」, 電気学会全国大会論文集, No.2-006, pp.6-7 (2010)

### 【第3章】

- ( 1 2 ) 電気学会技術報告 182号: 「絶縁劣化診断試験方法」(1983)
- ( 1 3 ) 電気学会: 「絶縁システム複合要因劣化に関する研究の現状」, 電学技報, 部, No.225, pp.27-38 (1986)
- ( 1 4 ) T.Gokyu, M.Shimabara, S.Matsuda, Y,Kitano: " Insulation Diagnosis and Environmental Deterioration of Low Voltage Induction Motors ", T.IEE Japan, Vol. 107-D, No.9, 1987  
 後久敏夫, 島原稔, 松田智, 北野幸信: 「低圧電動機絶縁の環境劣化と絶縁診断技術」, 電学論 D, 107 巻 9 号 (1987)
- ( 1 5 ) Z.Ohba, M.Gonfou, N.Morita: " Estimation Method of Isolation Deterioration for Large DC Machines based on humidity dependency of Isolation resistance ", T.IEE Japan, Vol.115-D, No.9, pp.1158-1164, 1995  
 大場善次郎, 権藤幹雄, 森田登: 「絶縁抵抗の湿度依存性に基づく大形直流機の絶縁劣化評価法」, 電学論 D, 115 巻 9 号, pp.1158-1164, 1993
- ( 1 6 ) 藤井貴志: 「全閉型低圧誘導電動機の絶縁劣化評価技術の研究」, R&D Kansai, No.378, pp.11-12 (1994)
- ( 1 7 ) T.Watanabe: " The current situation of diagnosis for insulation deterioration of high voltage induction motors in nuclear power plants: ", T.IEE Japan, Vol.121-B, No.9, pp.1236-1241, 2001  
 渡邊常秀: 「原子力発電所における高圧電動機の絶縁劣化診断の現況」, 電学論 B, 121 巻 9 号, pp.1236-1241, 2001

#### 【第4章】

- (18) T.Sonoda, R.Ueda, T.Ohtsu: "Detection of Zero-Sequence Current and its Current Sensor", T.IEE Japan, Vol.113-D, No.2, 1993  
園田敏勝, 上田隆三, 大津敏彦: 「零相電流検出と電流センサ」, 電学論 D, 113 巻 2 号 (1993)
- (19) H.Hirotsuka, K.Tsuboi, Y.Nakamura, F.Ishibashi: "A Study of the Electromagnetic Vibration of a Squirrel-Cage Induction Motor Caused by Time-Harmonic Voltages", T.IEE Japan, Vol.113-D, No.3, pp.394-402, 1993  
廣塚功, 坪井和男, 中村敬就, 石橋文徳: 「かご形誘導電動機の高調波電圧による電磁振動発生に関する考察」, 電学論 D, 113 巻 3 号, pp.394-402, 1993
- (20) 電気学会技術報告 486号: 「回転機電磁界解析ソフトウェアの適用技術」(1994)
- (21) K.Tsuboi, I.Hirotsuka, F.Ishibashi: "Causes and Characteristics of the Electromagnetic Vibration of A Squirrel Cage Induction Motor under Loaded Condition", T.IEE Japan, Vol.117-D, No.1, pp.73-80, 1997  
坪井和男, 廣塚功, 石橋文徳: 「かご形誘導電動機の負荷時における電磁振動の発生原因と特徴」, 電学論 D, 117 巻 1 号, pp.73-80, 1997
- (22) 電気学会技術報告 776号: 「回転機の $\mu$ -チャイルド $\pi$ コリアク $\pi$ のための電磁界解析」(1999)
- (23) H.Kometani, S.Sakabe, A.Kameari: "3-D Analysis of Induction Motor with Skewed Slots Using Regular Coupling Mesh", IEEE Trans. Magn., Vol.36, No.4, pp.1769-1775, 2000
- (24) 井上修和, 青木勝: 「低圧小型モーター用リアソート試験器の開発」, 三菱電線工業時報, 第 96 号, p.26 - 30 (2000)
- (25) H.Kometani: "Study of Some Skew Effects for an Induction Motor by 3-D Analysis", T.IEE Japan, Vol.122-D, No.12, 2002  
米谷晴之: 「三次元解析による誘導電動機のスキューの効果に関する検討」, 電学論 D, 122 巻 12 号 (2002)
- (26) M.Arkan, D.Kostic-Perovic, P.J.Unsworth: "Modeling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnosis", Electric Power Systems Research 75, pp.57-66, 2005
- (27) S.B.Lee, J.Yoo, K.Younsi, R.M.Bharadwaj: "An Online Groundwall and Phase-to-Phase Insulation Quality Assessment Technique for AC-Machine Stator Windings", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.42, No.4, pp.946-957, 2006
- (28) H.Iwanaga, H.Inujima: "Insulation Deterioration Detection by Zero-Sequence Current Analysis for Induction Motors", T.IEE Japan, Vol.131-D, No.12, pp.1457-1464, 2011

岩永英樹,犬島浩:「誘導電動機の零相電流分析による絶縁劣化兆候検出の検討」,電学論 D,131 卷 12 号, pp.1457-1464 (2011)

#### 【第5章】

(29) S.M.A.Cruz, A.J.M.Cardoso: "Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuits in DTC Induction Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.40, No.5, pp.1349-1360, 2004

(30) H.Nakamura, Y.Mizuno, T.Suzuki: "Diagnosis of Short Circuit Faults in Stator Winding of Motor based on Hidden Markov Model", T. IEE Japan, Vol.126-B, No.9, pp.917-925, 2006

中村久栄,水野幸男,鈴木達也:「隠れマルコフモデルに基づいた電動機固定子巻線の短絡診断」,電学論 B, 126 卷 9 号, pp.917-925, 2006

(31) H.Iwanaga, H.Inujima: "Insulation Deterioration Detection by Zero-Sequence Current Analysis for Induction Motors", T. IEE Japan, Vol.132-D, No.12, pp.1084-1090, 2012

岩永英樹,犬島浩:「誘導電動機の零相電流分析による絶縁劣化診断システムの開発」,電学論 D,132 卷 12 号, pp.1084-1090(2012)

#### 【第6章】

(32) A. Iga: "Proposal for the Presumptive Method of the Breakdown Voltage for the XLPE Cables by Statistical Technique", T. IEE Japan, Vol.111-D, No.10, pp.835-844, 1991

伊賀敦:「統計的手法による CV ケーブルの破壊電圧推定法の提案」,電学論 D, 111 卷 10 号, pp.835-844, 1991

(33) 平林庄司,越場宏,川上剛,岩淵直:「高圧交流電動機固定子巻線絶縁の経年変化とその診断」,三菱電機技法, Vol.56, No.9, pp.39-43 (1982)

(34) 日本電機工業会調査報告:「低圧機器の更新推奨時期に関する調査」(1992)

(35) 電機学会技術報告 502 号:「電力設備の絶縁余寿命推定法」(1994)

(36) 電機学会技術報告 752 号:「絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化と判定の実態」(2000)

(38) 日本電機工業会調査報告:「誘導電動機の更新推奨時期について」(2000)

(39) K.Kimura, T.Iwabuchi, K.Morooka, Y.Ishikawa: "Assessment of remaining insulation life of high voltage induction motors" Proc. Elector Electron Insulation Conf., Vol.19, pp.295-299, 1989

# 研究業績

## 1. 学術誌原著論文

- ( 1 ) 岩永英樹,犬島浩 :「誘導電動機の零相電流分析による絶縁劣化診断システムの開発」,電学論 D,132 卷 12 号, pp.1084-1090 ( 2012 )
- ( 2 ) 岩永英樹,犬島浩 :「誘導電動機の零相電流分析による絶縁劣化兆候検出の検討」,電学論 D,131 卷 12 号, pp.1457-1464 ( 2011 )

## 2. 国際会議論文

- ( 1 ) Hideki Iwanaga, Hiroshi Inujima : " Insulation Deterioration Detection by Zero-Sequence Current Analysis for Induction Motor ", IEEE International Conference on Industrial Technology, Feb. 2013

## 3. その他

- ( 1 ) 片岡昭雄,岩永英樹,他 16 名 :「誘導機の故障診断技術」,電気学会技術報告 第 1196 号,( 2010 )
- ( 2 ) 澤田憲良,矢野住夫,古市八郎,濱本 修,岩永英樹,兼田吉治 :「高圧電動機への運転中部分放電監視技術の適用」, 電気学会全国大会論文集, No.2-006, pp.6-7 ( 2010 )
- ( 3 ) 市川修,佐藤之彦,岩永英樹 :「故障診断の共通的手法」,電気学会産業応用部門大会シンポジウム,2007 ( 8 月 )
- ( 4 ) 山田慎一郎,石橋文徳,岩永英樹,中村雅憲 :「固定子の故障診断技術」,電気学会産業応用部門大会シンポジウム,2007 ( 8 月 )
- ( 5 ) 兼田吉治,岩永英樹,他 3 名 :「GHz 帯電磁波検出による電動機用部分放電計測装置」,電気学会全国大会論文集, No.2-029, pp.34-35 ( 2005 )
- ( 6 ) 兼田吉治,岩永英樹 :「高圧電動機のオンライン絶縁診断によるコストダウン」,化学装置 2003 年 12 月号 ( 2003 )
- ( 7 ) 宮原正敏,岩永英樹,他 2 名 :「発電機 / モータの絶縁評価と更新技術」,三菱電機技報 2003 年 12 月号 ( 2003 )