

修士学位論文要約 (令和 4 年 3 月)

## 周波数応答解析 (FRA) 手法による電力用変圧器巻線の異常診断を想定した伝達関数評価に関する研究

小林 諒太

指導教員：斎藤 浩海, 研究指導教員：八島 政史

### Study on Transfer Function Evaluation Assuming Abnormality Diagnosis of Power Transformer Windings by FRA Method

Ryota KOBAYASHI

Supervisor : Hiroumi SAITOH, Research Advisor : Masafumi YASHIMA

Winding deformation is one of the major reasons behind the transformer failures. Winding deformation may result from very large electromagnetic forces generated when high short circuit current flows into the windings. Though the minor winding deformations do not necessarily lead to an immediate transformer failure, however, its mechanical integrity is greatly reduced to withstand future mechanical and electrical stresses. Therefore, the detection of minor winding deformation is very essential to take immediate remedial actions. Frequency response analysis (FRA) is attracting attention as a method for detecting the deformation of transformer.

#### 1. はじめに

電力用変圧器経は高経年化により、絶縁紙やプレスボードの機械的耐力が低下する。これが起点となり巻線の位置ずれや変形等の異常が発生する恐れがある。巻線異常によって、想定以上の電磁力が発生し、変圧器を破壊に至らしめる可能性がある。現在変圧器の巻線異常を検出する手法として周波数応答解析 (Frequency Response Analysis : FRA) が注目されている。

#### 2. FRA 伝達関数と三次元電磁界モデル

FRA とは巻線端子間や巻線間で例えば数 10Hz の低周波領域から数 MHz の高周波領域まで連続的に測定した伝達関数を参照データと比較し、その変化から巻線の変形や位置ずれ等を検出する手法である。伝達関数は入力電圧と出力電圧の比で定義される。周波数を掃引することで、従来の短絡インピーダンス測定では検出できない容量成分の変化も検出対象となる。しかしながら、現在伝達関数の結果を解釈する客観的な手法は確立されておらず、伝達関数の解釈は現場の熟練者に委ねられている。客観的な診断手法を確立するためにはデータの蓄積が必要であるが、活用できる実変圧器には限りがある。欧州を中心に、実変圧器に対して様々な変圧器の異常を施した伝達関数測定を行い、データの蓄積がなされているが、なお不十分であるのが現状である。そこで、幾何学的構造を模擬した三次元電磁界解析モデルによる伝達関数の解析と理論検証の推進に期待が持たれる<sup>1)</sup>。

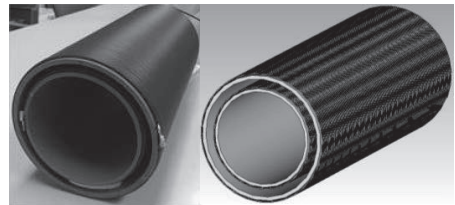


図 1 二重巻線実験モデルと電磁界解析モデル

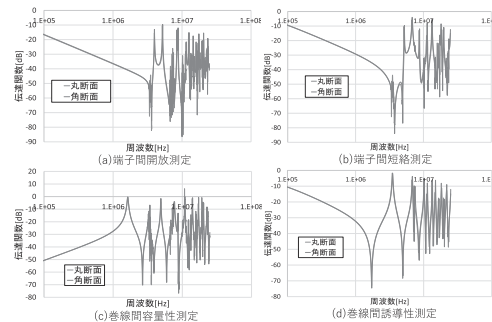


図 2 丸断面巻線モデルと角断面巻線モデルでの FRA 伝達関数の解析結果の比較

#### 3. 電磁界モデルの改良

先行研究における電磁界モデルの課題として、解析時間の長さが挙げられる<sup>2)</sup>。解析時間の短縮化のために、従来は円形であった巻線の銅線部の断面形状に正方形を採用した角断面モデルを作成した。図 1 に二重巻線実験モデルおよび解析モデルを示す。角断面巻線の採用によって、120 巻の二重巻線モデルの解析時間を従来のモデルに

比べて3/7程度に短縮することを実現した。図2に二重巻線構造における4種類の伝達関数測定手法<sup>3)</sup>(a)端子間開放測定,(b)端子間短絡測定,(c)巻線間容量性測定,(d)巻線間誘導性測定の解析結果を示す。4種の測定種別で丸断面モデルと角断面モデルの解析結果は概ね一致しており、角断面モデルで検討可能である見通しを得た。

#### 4. 二重巻線構造モデルによる巻線位置ずれおよび巻線変形の模擬とFRA伝達関数の検討

実変圧器で起こる巻線異常である、巻線位置ずれ、径方向変形、軸方向変形およびピッチ変形をそれぞれ実験モデルで作成した。二重巻線位置ずれモデルでは、巻線長に対し1%(3mm)、2%(6mm)、3%(9mm)、4%(12mm)の位置ずれを起こし測定を行った。また二重巻線モデルの外側巻線に変形モデルを配置し、二重巻線変形モデルを構築した。図3に作成した二重巻線位置ずれおよび変形モデルを示す。実験モデルの巻線長は300mm巻数120巻で、外側巻線外径120mm内側巻線外径95mmである。巻線位置ずれの検討において、位置ずれによる共振周波数の変化に着目し、最小位置ずれ検出量を0.88%(2.65mm)と推定した。

各測定種別で巻線異常による第1共振点から第5共振点までの周波数と伝達関数の変化を表1に示す。FRA診断を行う上で伝達関数の変化から巻線異常を推定する。その際に、その変形の時だけ起こる伝達関数の変化が巻線異常を推定する上での着目点となる。巻線異常推定の指標となる変化を検討してみると、径方向変形では、端子間開放測定の第1、第2、第3共振点および端子間短絡測定の第1、第2共振点付近での伝達関数の変化が、他の変形の伝達関数の傾向と異なっている。巻線位置ずれでは、巻線間容量性測定で他の変形で変化があまり現れなかった第4、第5共振点で伝達関数が変化している。軸方向変形では、端子間短絡測定で第5共振点が高周波にシフトし、伝達関数が大きくなる傾向を示し、他の変形での伝

表1 巻線異常を生じた場合の伝達関数における共振周波数とdB値の変化

端子間開放測定										
巻線異常の種類	f <sub>1</sub> 付近		f <sub>2</sub> 付近		f <sub>3</sub> 付近		f <sub>4</sub> 付近		f <sub>5</sub> 付近	
	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB
ピッチ変形	⇔	↑	N.A	↓	N.A	↓	⇔	↑	N.A	↑
巻線位置ずれ	⇔	N.A	⇔	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	↑
軸方向変形	⇔	↑	N.A	↓	N.A	↓	⇔	N.A	N.A	↑
径方向変形	⇔	↑	↓	↓	N.A	↓	⇔	N.A	N.A	↑

端子間短絡測定										
巻線異常の種類	f <sub>1</sub> 付近		f <sub>2</sub> 付近		f <sub>3</sub> 付近		f <sub>4</sub> 付近		f <sub>5</sub> 付近	
	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB
ピッチ変形	⇔	↑	⇔	↑	N.A	↑	⇔	N.A	⇔	↑
巻線位置ずれ	N.A	↑	N.A	N.A	N.A	N.A	⇔	N.A	N.A	↑
軸方向変形	⇔	↑	⇔	N.A	⇔	↑	N.A	N.A	⇔	↓
径方向変形	N.A	↓	⇔	↓	N.A	↓	⇔	N.A	N.A	N.A

巻線間容量性測定										
巻線異常の種類	f <sub>1</sub> 付近		f <sub>2</sub> 付近		f <sub>3</sub> 付近		f <sub>4</sub> 付近		f <sub>5</sub> 付近	
	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB
ピッチ変形	⇔	N.A	⇔	↓	⇔	↓	N.A	N.A	N.A	N.A
巻線位置ずれ	⇔	N.A	N.A	↑	⇔	↑	⇔	↓	⇔	↓
軸方向変形	⇔	N.A	⇔	↑	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
径方向変形	N.A	N.A	⇔	↑	⇔	N.A	N.A	N.A	N.A	↓

巻線間誘導性測定										
巻線異常の種類	f <sub>1</sub> 付近		f <sub>2</sub> 付近		f <sub>3</sub> 付近		f <sub>4</sub> 付近		f <sub>5</sub> 付近	
	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB	f	dB
ピッチ変形	⇔	↑	N.A	N.A	N.A	↑	⇔	↑	⇔	↓
巻線位置ずれ	⇔	N.A	⇔	N.A	⇔	↑	⇔	N.A	N.A	N.A
軸方向変形	⇔	↑	N.A	N.A	⇔	↑	N.A	N.A	⇔	↓
径方向変形	⇔	N.A	N.A	N.A	N.A	↑	N.A	N.A	N.A	↑

達関数の振る舞いと逆の変化をしている。ピッチ変形では、巻線間容量性測定で第3共振点の伝達関数が小さくなる傾向を示し、他の変形の伝達関数の傾向と異なっている。これらの点が、伝達関数から巻線異常を推定する上での着目点となると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、巻線部に正方形を採用した角断面モデルを作成し解析時間の短縮化を図った。また実変圧器で起こる巻線異常である巻線位置ずれ、径方向変形、軸方向変形およびピッチ変形を模擬したモデルを作成し、伝達関数を取得した。測定結果からFRA診断により変圧器の巻線異常を検出するための知見を整理した。さらにこれを基に、FRA伝達関数の測定結果から巻線異常の様相ならびにその程度を診断することが基本的に可能であると評価した。

#### 文献

- 1) CIGRE A2.53, Advances in the interpretation of transformer FRA, CIGRE Technical Brochure 812 (2020)
- 2) 菊池秀平 ほか:「変圧器のFRA診断を想定した過渡現象解析モデルの検討—巻線モデルに対する伝達関数解析手法—」, 令和2年電気学会B部門大会, 332 (2020)
- 3) IEC60076-18: Measurement of Frequency Response, ED.1, IEC Std. (2012)

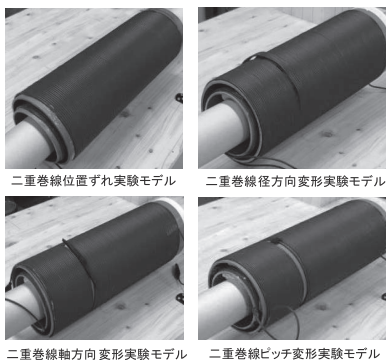


図3 二重巻線位置ずれおよび変形モデル