

FRAによる変圧器の異常診断技術

🔗 変圧器，周波数応答分析，故障診断

* 佐野貴弘 Takahiro Sano

概要

変圧器の高経年化に伴い，健全性の確認及び故障の未然防止のためにその内部状態を把握することが必要となる。したがって，内部状態を効果的に評価できるような診断技術の確立が非常に重要である。FRA (Frequency Response Analysis：周波数応答分析) は，変圧器内部の変形や接触不良などを外部から診断するための新たな手法として研究されているが^{(1)~(6)}，現象や診断手法を含めて未解明な点も残されている。IEC60076-18⁽⁶⁾にFRA測定方法が示されているが，これは主にお客様がマクロ的に診断を行うための指針であり，異常部位の特定など詳細な診断を行うことは困難である。

そこで，経年変圧器の異常モデル例として，静電シールドの接地リード線断線と鉄心二重接地の2ケースを選定し，実測及び解析によってFRAの適用性を検討した。静電シールドの接地リード線の断線のケースでは，FRA特性の三相比較及び解析比較によって，初期データがなくても異常部位の推定が可能なることを確認し，巻線系の異常診断に対するFRAの有効性を実証した。また鉄心二重接地のケースでは，低周波数領域におけるFRA特性の初期データとの比較診断が可能であり，鉄心系の外部診断でもFRAが有効であることを確認した。

1. ま え が き

日本の電力需要は，高度成長期に急激に増加した。それに伴い油入変圧器などの電力設備も非常に多く製作された。一方，変圧器の設計期待寿命は一般に30年とされるものの，多くの変圧器が製作後30年以上経過しており，現在でもこれらの多くが稼働中である。今後，高経年変圧器が更に増加することが予測され，それに対する適切な保守管理が必要となる。

その中で，FRA (Frequency Response Analysis：周波数応答分析) は，変圧器内部の変形や接触不良などを外部から診断するための新たな診断手法として近年注目を集めている。異常部位を特定するためのアプローチとして，異常を模擬したモデル実験や，シミュレーションによる検討が挙げられるが，現状では未解明な点が多い。そこで，

経年変圧器におけるFRA診断の適用性確認及び診断手法の確立を目的に，静電シールドのリード線断線及び鉄心二重接地など経年変圧器の異常を想定しFRAを検討したので，本稿で紹介する。

2. FRAの原理及び測定方法

2.1 FRAの原理

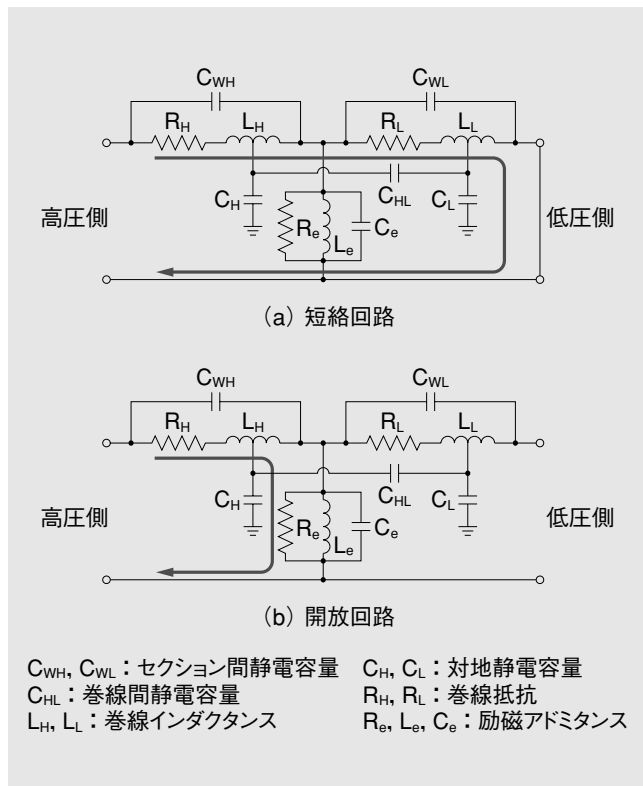
変圧器のインピーダンス Z は，主に巻線のインダクタンスと対地静電容量との合成である。インピーダンス Z はある周波数で共振を生じ，このときの共振周波数 fr は一般に式(1)で表される。

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで， L ：インダクタンス， C ：静電容量

L 又は C の変化に伴い， fr 及び Z が変化する。周波数 f を広範囲に変化させて $Z-f$ 特性を測定し，正常時の特性波形に対する異常発生時の波形変化

*変圧器工場



第1図 変圧器の簡易等価回路

短絡回路は巻線系の異常を、開放回路は鉄心系の異常を診断するのに適した回路である。

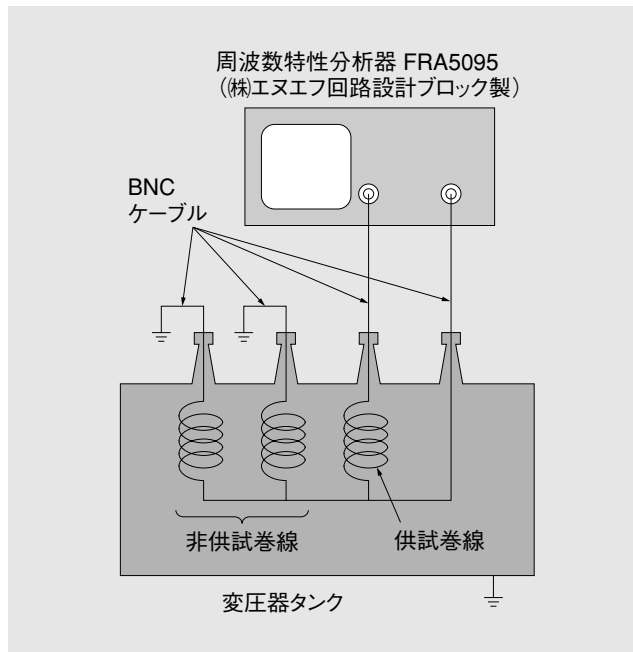
の有無によって内部異常の有無を判定する。巻線のセクション間やターン間などは fr が高い領域にあり、通常の診断技術では部分変形や変位などの検出が困難だが、FRAではそれらを検出できる可能性がある。

2.2 測定回路

第1図に変圧器の簡易等価回路を示す。基本的な二巻線変圧器の高圧側からのFRA測定では、(a)に示す低圧側端子が短絡状態と(b)に示す開放状態の二通りの回路を考えることができる。短絡回路では巻線成分と励磁成分が並列になり、巻線成分の影響が大きくなる。一方、開放回路ではそれらが直列になり、低周波数領域で励磁成分の影響が大きくなる。すなわち短絡回路は巻線系の異常を、開放回路は鉄心系の異常を診断するのに適した回路である。

2.3 測定方法

第2図に三相変圧器のFRA測定システムを示す。周波数を100Hz~1MHzで自動掃引させた正弦波(10Vpeak)を高圧側端子へ印加し、変圧器端子間電圧 V と電流 I から変圧器のインピーダンス Z を算出して、インピーダンスの周波数特性を求める。



第2図 三相変圧器のFRA測定システム

変圧器端子間電圧と電流から変圧器のインピーダンスを算出して、インピーダンスの周波数特性を求める。

3. 診断方法

3.1 初期データとの比較

正常時(出荷試験時)のFRA初期データ(fingerprint)と異常発生時のデータを比較し、内部異常の有無を診断する手法であり、最も一般的である。

3.2 三相比較

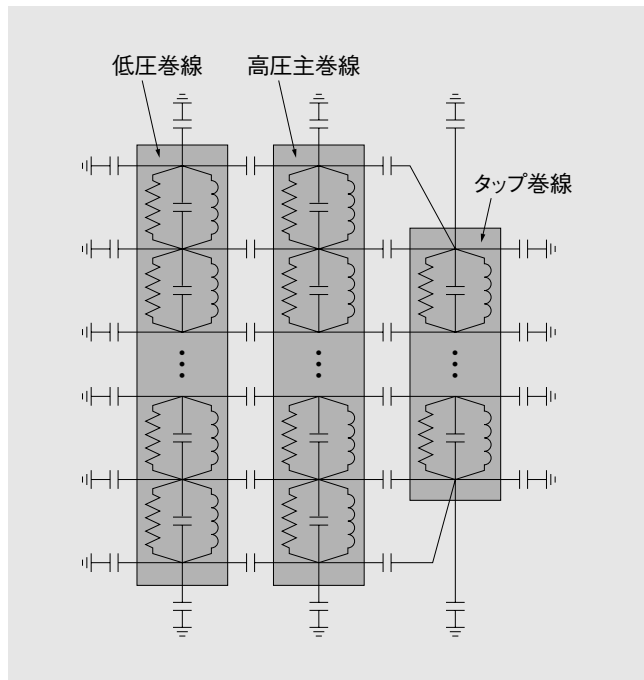
健全な三相変圧器では各相の L 及び C がほぼ等しいため、短絡回路での各相のFRA特性はほぼ一致する。これを利用し、少なくとも一相は健全であると仮定して各相のFRA特性を比較診断する手法である。各相のFRA特性データに差異がある場合、一相又は二相に異常があると診断できる。

3.3 解析比較

FRAは比較的高周波の領域をターゲットとしているため、第3図に示すサージ解析に適用される等価回路を用いることができる。あらかじめ異常部位などを想定して解析することで、 fr 及び Z の周波数特性の変化を把握することができる。実測波形と解析波形の比較によって異常相及び異常部位を診断する。

3.4 診断方法の選定

初期データがある場合は、これとの比較によって診断する。しかし、FRAが盛んに行われるよう



第3図 解析用の変圧器巻線等価回路例(単相モデル)
サージ解析用等価回路をFRA解析に適用した。

になったのはここ数年で、10年以上前に製作された変圧器には初期データがないため、この方法は適用できない。そこで、経年変圧器の巻線系の異常に対しては、三相比較及び解析比較による診断を適用する。

なお、三相三脚鉄心変圧器は中央相の磁路長が他相に比べ短いため、開放回路でのFRA特性は三相で一様でない。したがって三相比較による診断はできず、経年変圧器の鉄心系異常のFRA診断は現状では困難である。

4. 診断検討

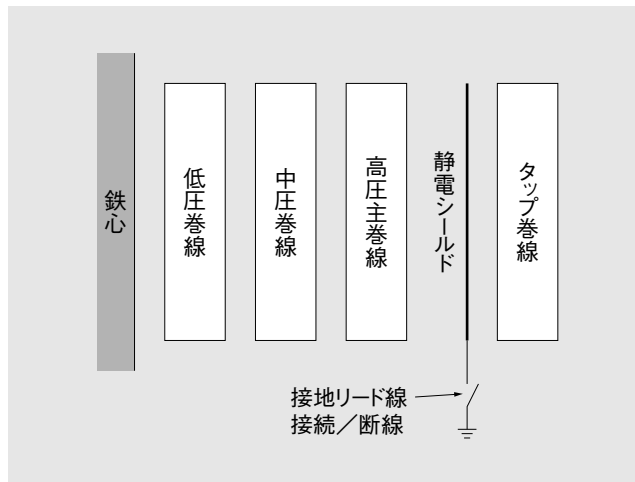
4.1 静電シールド接地リード線の断線診断

4.1.1 診断内容

診断検討対象器の代表モデルとして、三相電力用変圧器(154kV, 150MVA)を選定した。この変圧器の特徴は、サージ侵入時の過電圧抑制対策として、第4図に示すように高圧主巻線とタップ巻線の間には静電シールドが配置されていることである。この静電シールドの接地リード線の断線を想定して検討した。

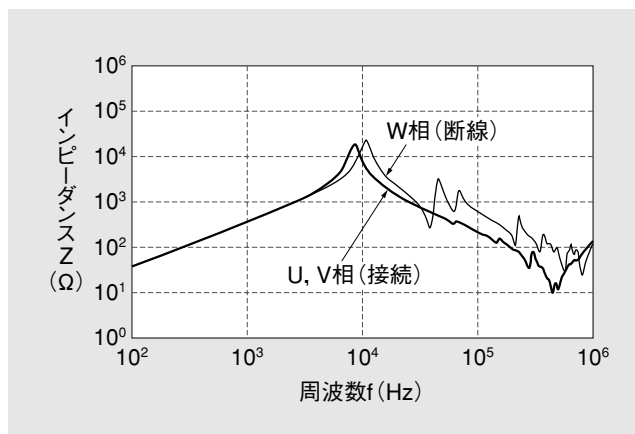
4.1.2 測定結果

第5図にU相及びV相の接地リード線を接続(接地)し、W相のみを断線させたケースの短絡回路によるFRA測定結果を示す。この結果、以下の



第4図 静電シールドの接地リード線断線モデルにおける巻線構造及び回路条件

静電シールドの接地リード線が正常な場合と断線した場合を想定した。



第5図 接地リード線の断線の有無による測定結果(短絡回路)

U相・V相とW相の間に波形の相違が認められる。

特徴が認められた。

- (1) W相の第一 f_r は他の二相に比べ高い
- (2) W相の第一 f_r での Z は他の二相に比べ増加
- (3) 第一 f_r に比べ高周波側の Z に大きな差がある
- (4) 3kHz以下の周波数領域の Z は三相とも一致

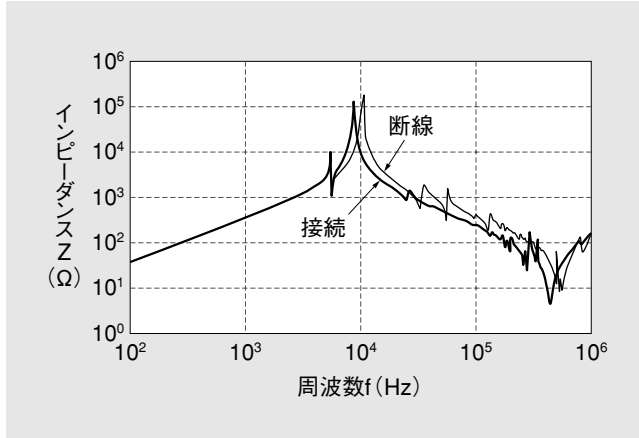
また、第6図に第3図に準じた回路で行った解析結果を示す。リード線接続時の特性に対して、断線時の特性には以下の特徴が認められた。

- (1) 第一 f_r が高い
- (2) 第一 f_r での Z が増加
- (3) 第一 f_r に比べ高周波側の Z に差がある
- (4) 4kHz以下の領域では一致

これらの特徴は、実測特性とほぼ一致している。

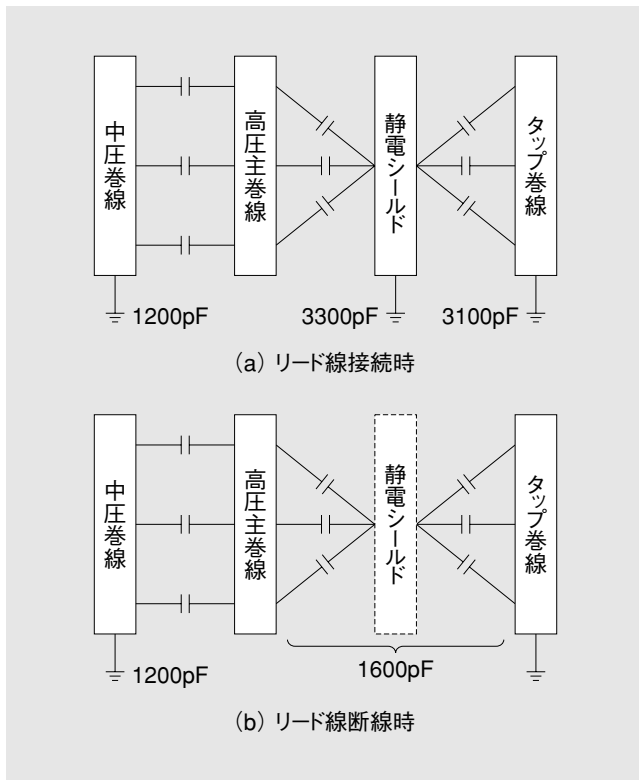
4.1.3 考察

リード線断線の有無によるFRA波形の変化要因



第 6 図 接地リード線の断線の有無による解析結果 (短絡回路)

実測特性の傾向とほぼ一致している。

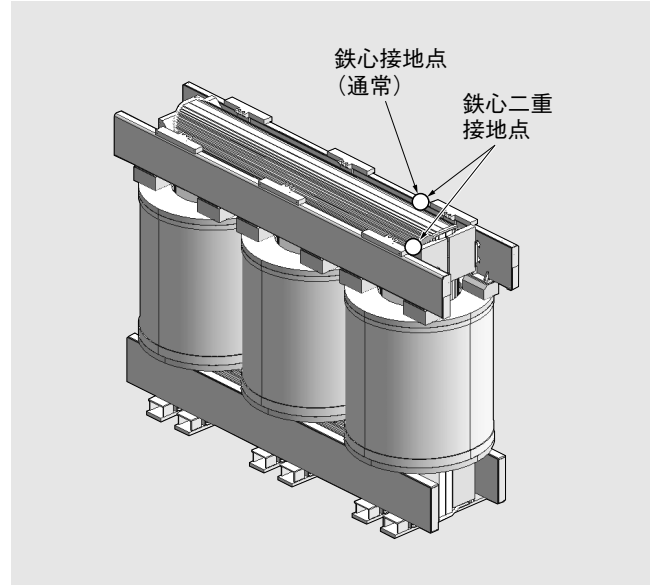


第 7 図 高圧巻線周囲の静電容量

リード線が断線すると、高圧主巻線-タップ巻線間の静電容量が小さくなる。

として、以下のことが推定できる。第 7 図に高圧巻線周囲の静電容量を示す。

接地リード線接続時の高圧主巻線の対地静電容量は、(a) に示すように約 4500pF であるが、リード線断線時 (静電シールド浮遊電位の場合) の高圧主巻線の対地静電容量は、(b) に示すように約 2800pF となり約 38% 減少する。したがって、式(1) から理論的には f_r は $1/\sqrt{C}$ に比例し、リード線断線時の方が約 27% 高くなる。ここで、実測及び解



第 8 図 鉄心二重接地モデルの鉄心接地部位
上ヨークで二重接地した。

析のリード線接続時に対する断線時の第一 f_r は、第 5 図及び第 6 図より両者ともに約 26% 高くなり、理論値とほぼ一致した。

また、実測・解析ともにリード線断線時には 30~70kHz 及び 100~300kHz で新たな共振点が出現した。これは、リード線接続時には静電シールド効果で高圧主巻線とタップ巻線の相互の影響が遮断されたが、断線時にはタップ巻線の共振が巻線間の静電容量を通して高圧主巻線に影響したことが原因と考えられる。

4.2 鉄心二重接地の診断

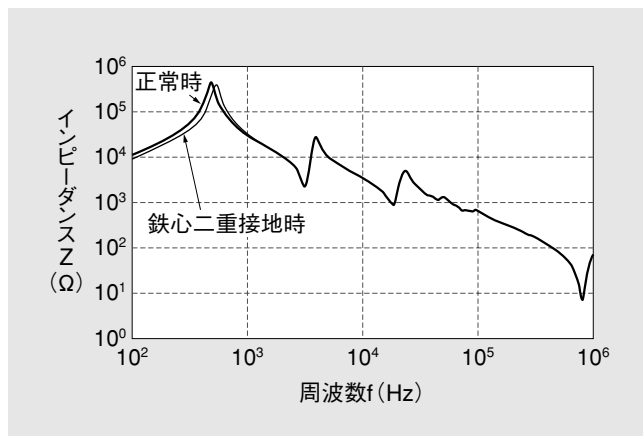
4.2.1 診断内容

鉄心を含む変圧器内部構造物が多重接地されると、循環電流によって局部過熱を生ずることがある。そこで、三相電力用変圧器 (230kV, 150MVA) を対象器とし、鉄心が通常の接地状態の場合と二重接地させた場合について比較検討した。第 8 図に鉄心の接地部位を示す。

4.2.2 測定結果及び考察

FRA測定結果の代表例として、第 9 図に開放回路による FRA 特性の比較波形 (U 相) を示す。鉄心の通常接地と二重接地の FRA 特性の特徴は低周波領域 (0.1~1kHz) にあり、それ以外の周波数領域 (1k~1MHz) では有意差が認められなかった。

また通常接地の場合と比較して、二重接地は第一共振周波数が高く、共振点でのインピーダンスが小さいという特性が得られた。この要因は二重



第9図 鉄心接地状態の違いによる測定結果（開放回路）

二重接地の場合、0.1～1kHzの低周波領域で波形の相違が認められる。

接地で鉄心が部分短絡し、励磁インダクタンスが小さくなり、 $1/\sqrt{L}$ に比例して共振周波数が高くなったためと推定できる。

5. む す び

静電シールドの接地リード線が断線した場合、FRA特性の三相比較及び解析比較によって、初期データがなくても異常部位の推定が可能なが確認でき、巻線系の異常診断に対するFRAの有効性を実証した。精度の向上によって、巻線のセクション間やターン間などの異常診断にも適用可能と考える。なお、経年変圧器の静電シールド部のリード線断線をFRA外部診断で検出した実績は既に報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

また変圧器鉄心が二重接地された場合、低周波数領域でFRA特性の変化が認められたことから、初期データがあれば鉄心系の外部診断へFRA測定が適用できることを確認した。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) J. A. S. B. Jayasinghe, Z. D. Wang, A. W. Darwin, P. N. Jarman : “Practical Issues in Making FRA Measurements on Power Transformers,” Proceedings of 14th ISH, G-013, 2005
- (2) M. de Nigris, R. Passaglia, R. Berti, L. Bergonzi, R. Maggi : “Application of modern techniques for the condition assessment of power transformers,” CIGRE Session 2004, A2-207, 2004
- (3) T. Sano, K. Miyagi : “Experimental Investigation on FRA Diagnosis of Transformer Faults,” 電学論B, 127巻7号, 2007, pp.791-796
- (4) 佐野貴弘・小川吉晴・下之園隆明・和田忠幸 : 「FRAによる実運用変圧器の異常診断事例」, 電学論B, 131巻1号, 2011, pp.78-85
- (5) T. Kobayashi, Y. Mametani, T. Sano, Y. Ogawa, K. Miyagi, Y. Shirasaka : “Using DGA and FRA to Develop New Technology for the Diagnosis of Areas Subject to Abnormal Overheating on Actual Transformers,” CIGRE SC A2 & D1 JOINT COLLOQUIUM 2011, PS1-O-19, 2011
- (6) International Electrotechnical Commission : “IEC 60076-18 Power transformers-Part 18 : Measurement of frequency response,” 2012

《執筆者紹介》



佐野貴弘 Takahiro Sano
変圧器の電気設計に従事