

変圧器中性点電位振動の解析手法

Analysis Method about Potential Oscillation at Neutral Point of Transformer

高橋 誠^{※1}
Makoto Takahashi
神部 晃^{※2}
Akira Kanbe
佐藤 徹^{※3}
Toru Satoh

1. はじめに

変圧器には、雷により、稼働中の送電電圧より高い雷サージ電圧が印加されることがある。雷の中には、送電線の各相に対地電圧波形が同じ雷サージ（以下、同相雷サージ）を発生させるものがある⁽¹⁾⁽²⁾。

同相雷サージ電圧が中性点非接地の配電用変圧器の巻線に印加された場合、電圧振動が発生し、中性点の対地電圧が印加端子の電圧より高くなることがある。この電圧振動のことを中性点電位振動という。

変圧器は、中性点電位振動に対し、絶縁破壊しないように設計・製造され、この絶縁の耐力を確認するために非接地雷インパルス耐電圧試験（以下、非接地試験）が実施される⁽³⁾⁽⁴⁾。

このように変圧器の絶縁設計において、中性点電位振動により発生する電圧を正確に把握する事は、品質確保のための重要な項目の一つであることがわかる。

中性点の電位振動の把握は、多段や1段のLCR回路の等価回路による解析計算と実機やモデルを用いた測定実験で行われる。従来の解析や実験においては、単相モデルコイルのみで検討することが多く^{(5)~(9)}、さらに等価回路は、周波数に依存しない回路定数での解析であったので、結果が、実際の製品の試験結果とは合わない場合があった。

筆者らは、同相雷サージに対しては、解析のための等価回路や回路定数が、変圧器の結線方式に大きく依存すること、さらに等価回路定数の周波数依存性の考慮が必要なることを、多くの実験・検討から見出している。

本論文では、これらの知見をもとにした変圧器の中性点電位振動の新しい解析手法について、できるだけ簡易な等価回路と実機の測定データを用いて説明・報告する。さらに中性点電位振動の抑制方法についても提案する。

2. 等価回路による解析

2.1 同相雷サージ解析

同相雷サージは高压側の3相端子一括に電圧印加されるため、この場合は、変圧器を印加端子から中性点へ向けての多段のLCRの等価回路にして解析ができる。一般的な配電用変圧器では、10kHz前後の1次共振が支配的な振動電圧が中性点に発生する。この1次共振に着目した場合は、図1に示す簡易的な等価回路で解析ができる。1段のLCR回路でも、多段の回路でも、LR（等価インダクタンスと等価抵抗）を、どのように求めるかが、等価回路による解析の根本問題である。

従来は、等価インダクタンス（以下、等価L）について

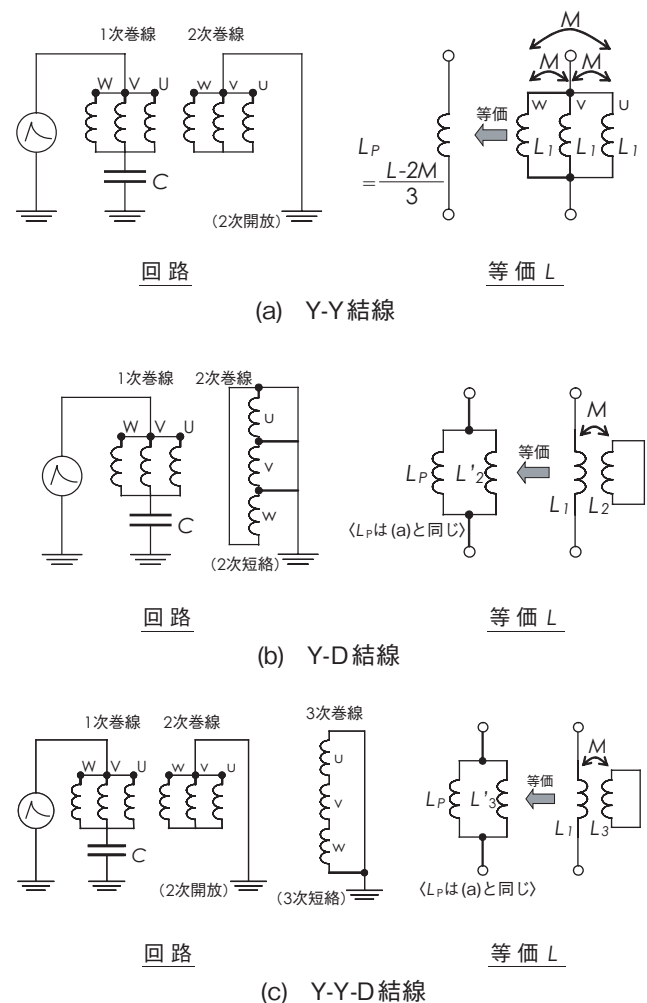


図2 非接地雷インパルス試験回路と等価L

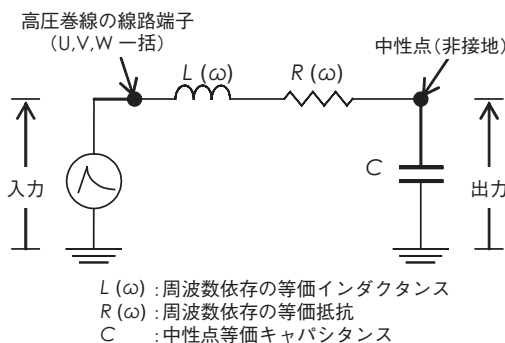


図1 同相雷サージ解析の等価回路

※1 電力事業部 変圧器設計G
 ※2 電力事業部 新技術開発G
 ※3 電力事業部

は、空心コイルのインダクタンスであるとか、単相コイルのみのリーケージインダクタンスであるというような考えが主流にあり^{(5)~(9)}、理論と実験結果の乖離をきたしていた。

筆者らの結論は、「この LR は各相の1次、2次、3次のコイルの組み合わせによる、リーケージインピーダンス(短絡インピーダンス)」である。これは、3相変圧器の中性点を接地して各端子に同相電圧を印加した場合の印加側から見たインピーダンスであり、中性点接地変圧器の零相インピーダンス(以下 Z_0)と本質的には同じものである⁽¹⁰⁾。

配電用変圧器には、各種の巻線方式があるが、同相雷サージ解析の LR の値については、結局は中性点接地条件の Z_0 を求めることに帰結する。しかし、このインピーダンスは商用周波数での値ではなく、高い周波数までの L と R の値が必要となるのは勿論である。

2.2 変圧器の結線と等価インダクタンス

(1) Y-Y 結線

同相雷サージに対する変圧器の絶縁耐力は、非接地試験により確認される。変圧器がY-Y結線の場合の非接地試験時の回路と等価 L について図2(a)に示す。なお、図では、簡略化のため、等価 R を省略しているが、等価 L は Z_0 と同じものと理解されたい。

Y-Y結線では、同相電圧に対して2次側で短絡回路が形成されていないので、 Z_0 は一見、一相分コイルの自己インダクタンスが支配的な励磁インピーダンスのみの並列と考えられる。しかし同相電圧の一括印加は他相の1次巻線での短絡となるため、 Z_0 は、1次-1次のリーケージインピーダンス(図2(a)の L_p)になる。これは、励磁インピーダンスよりもかなり小さくなる。

(2) Y-D 結線

回路と等価 L を図2(b)に示す。2次側のデルタ巻線は同相電圧に対して短絡回路を形成するため、 Z_0 は、1次-1次と、1次-2次の並列になる。1次-2次の方が、1次-1次より小さく、このため、 Z_0 は正相インピーダンスとほぼ同じになる。

(3) Y-Y-D 結線

回路と等価 L を図2(c)に示す。 Z_0 は、1次-1次と、1次-3次の並列になる。1次-3次のインピーダンスは、1次-1次より小さく、Y-D結線での1次-2次より大きいため、 Z_0 はY-Y結線とY-D結線の中間の値となる。

したがって、解析や実験を単相分コイルのみで模擬しようとする、Y-D結線では正規の同相電圧の3相印加時の特性と概ね一致するが、Y-Y結線、Y-Y-D結線では、異なった特性を示す。

2.3 等価インダクタンス確認実験

(1) 実験方法

前項で示した考えを確認するため、正規の3相接続(以下、3相)と単相コイルのみ(以下、単相)での、中性点の周波数伝達関数の測定実験を行った。

周波数伝達関数は電位振動の本質的な特性を示している⁽¹¹⁾。もし3相と単相の周波数伝達関数が同一であれば、単相コイルのみで模擬的な解析が可能となる。

実験は、77kV 20MVA級、Y-Y-D結線の電位振動実験用の変圧器で行った。3相の実験は、変圧器の2次、3次巻線の接続を変えて図2に示す3種類の結線方式で行った。単相の実験は、図3に示す接続で行った。

(2) 実験結果

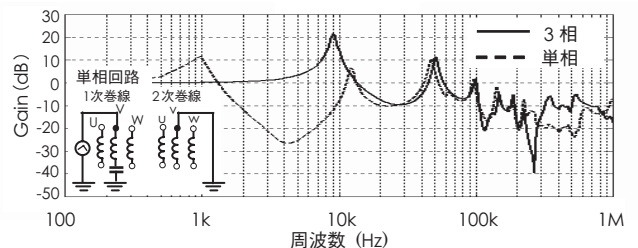
各種結線で測定した中性点の周波数伝達関数を図3(a)(b)(c)に示す。同時に、単相コイル実験の回路も示した。

① Y-Y 結線

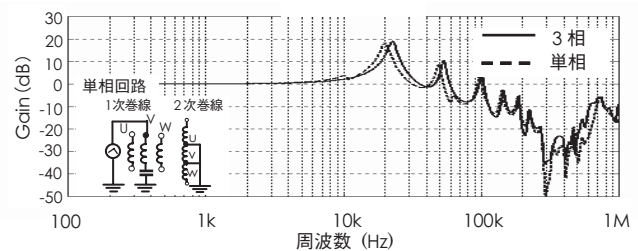
3相では等価 L は、1次-1次リーケージとなり、1次共振周波数 f_0 は9kHzである。単相のみの測定では L は自己(励磁)インダクタンスになってしまうので、 f_0 は1kHzと大幅に低くなってしまい、単相コイルでの解析は不可能となることがわかる。

② Y-D 結線

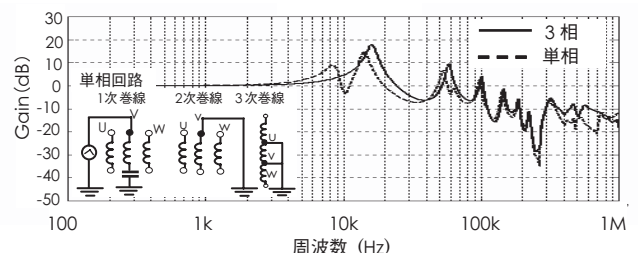
3相では等価 L は正相インピーダンス(1次-2次リーケージ)となり値は低いため、 f_0 は20kHzと高くなる。当然ながら単相での特性も、ほぼ同じとなる。



(a) Y-Y 結線



(b) Y-D 結線



(c) Y-Y-D 結線

図3 周波数伝達関数の比較

③ Y-Y-D結線

予想通り、Y-Y結線とY-D結線との中間の特性となる。単相コイルでの解析はY-Y結線ほどではないが、かなり困難と考えられる。

以上の結果から、等価 L は、零相インピーダンスによるものであることが確認できた。

2.4 等価回路の周波数伝達関数による解析

(1) 周波数伝達関数 $G(\omega)$

中性点の周波数伝達関数 $G(\omega)$ を図3のように実機で測定しておけば、どんな入力波形に対しても、発生する中性

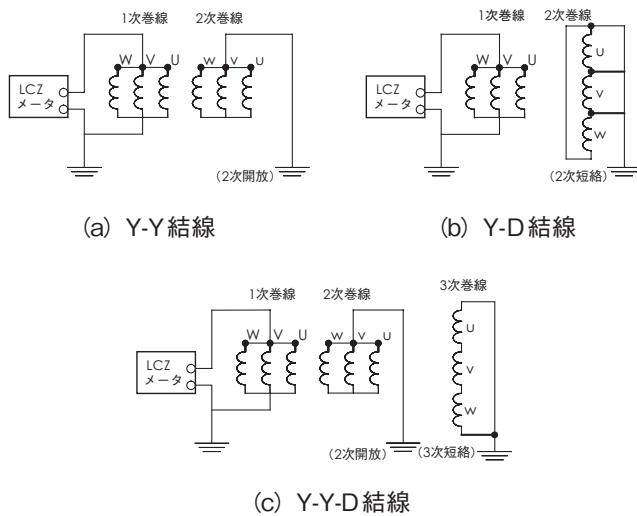
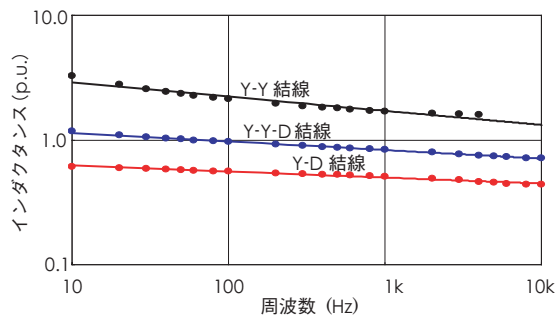
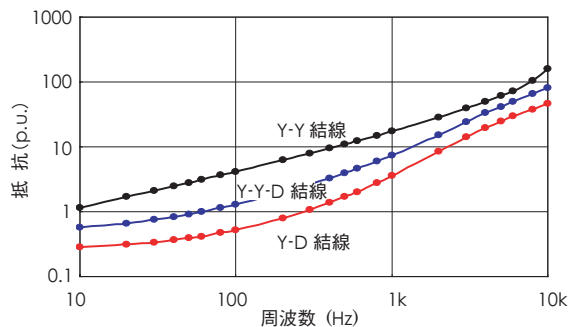


図4 LR測定回路



(a) インダクタンスの周波数特性 ($L(\omega)$)



(b) 抵抗の周波数特性 ($R(\omega)$)

図5 実機でのLR測定結果

点電圧波形を正確に計算で求めることができる⁽¹¹⁾。とすれば、等価回路による解析は不要ではないかと思われる。しかし、実測 $G(\omega)$ だけでは、その特性を示す原因を探ることが困難であり、改良設計に活かすことができない。

このため筆者らは、実測 $G(\omega)$ のみならず、等価回路(1段～多段 LCR 回路)を用いての解析を行い、設計に有効活用している⁽¹²⁾。その一例として今回は、等価回路解析の妥当性を、簡単な1段 LCR 回路(図1)にて確認する。

(2) 等価回路定数の算定

前述のように $R(\omega)$ $L(\omega)$ は中性点接地条件での零相インピーダンスではあるが、周波数依存性があるため、実機で測定する。測定回路を図4に、測定結果を図5に示す。 $L(\omega)$ は周波数増大に伴い低下し、 $R(\omega)$ は増加した。等価キャパシタンス C は、共振周波数 f_0 から逆算して求める。

(3) 等価回路の $G(\omega)$

図1の等価回路の周波数伝達関数 $G(\omega)$ は、(1)式で与えられる。これは単純な2次ローパスフィルターの伝達関数である。

$$G(\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 L(\omega)C + j\omega R(\omega)C + 1} \dots (1)$$

これに、上記で算定した各定数を代入すれば、伝達関数が計算できる。周波数依存の $R(\omega)$ $L(\omega)$ は測定データを直接入れてもよいが、筆者らは近似式を代入して計算している。

この方法で計算した周波数伝達関数を図6に示す。10kHz前後の共振までは実機測定と合っているが、当然ながら共振より高い周波数では計算と測定は合っていない。さらに高い共振周波数も考慮する場合は、等価回路を多段に細分化していく必要がある。しかし、今回のような標準雷インパルス波形に対しては、10kHz前後の共振が支配的なので波形計算に問題はない。

2.5 等価回路 $G(\omega)$ による波形計算

以上の等価回路 $G(\omega)$ を用いて、中性点の電圧波形を計算する。

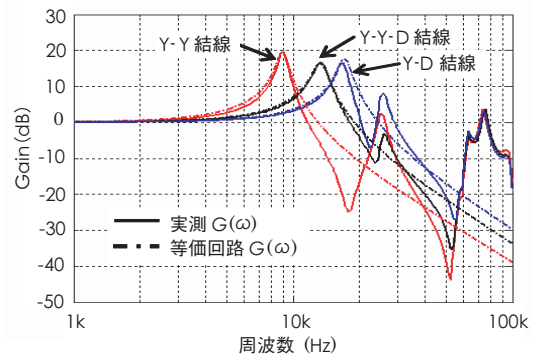


図6 等価回路 $G(\omega)$ と実測 $G(\omega)$

$G(\omega)$ による波形計算は、まず、入力のインパルス電圧波形 $u(t)$ をフーリエ変換 (FFT) する。

$$u(t) \xrightarrow{\text{FFT}} U(\omega) \quad \dots \dots (2)$$

これに周波数伝達関数 $G(\omega)$ を掛け、出力 (中性点) のフーリエ変換 $Y(\omega)$ を得る。

$$Y(\omega) = G(\omega)U(\omega) \quad \dots \dots (3)$$

この $Y(\omega)$ を逆フーリエ変換 (FFT^{-1}) して、電圧波形 $y(t)$ を得る。

$$y(t) \xleftarrow{\text{FFT}^{-1}} Y(\omega) \quad \dots \dots (4)$$

このように等価回路の $G(\omega)$ で計算した結果と、比較のための実測 $G(\omega)$ での計算結果を図7に示す。両者は良く一致しており、この等価回路は妥当であるといえる。

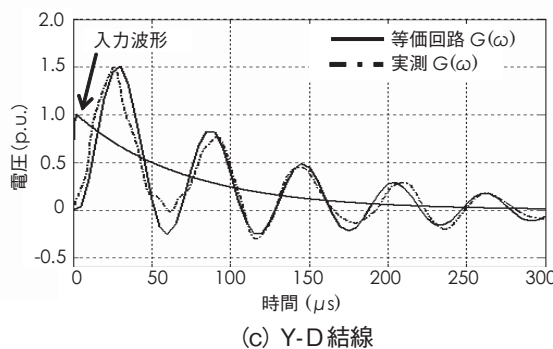
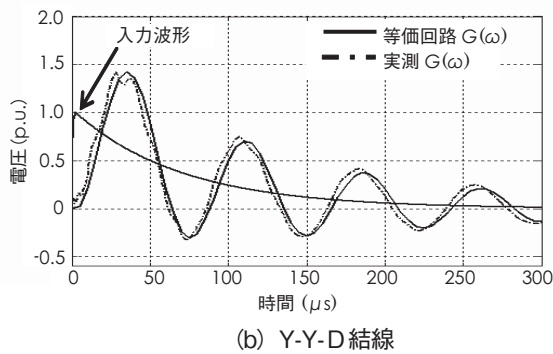
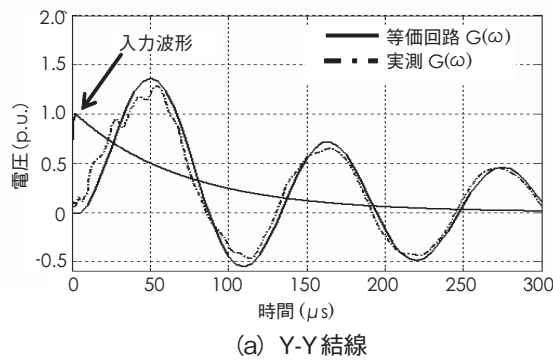


図7 波形計算結果

3. 中性点電位振動の抑制

3.1 振動抑制の基本

(1) 共振の鋭さQ

中性点の電位振動は1次共振が支配的であり、その解析は、1段のLCR回路で求められることを示した。この1次共振を抑制するためには、共振の鋭さ Q を下げることに帰着する。 Q は、

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots \dots (5)$$

であるので、 Q を下げるには、 R を大きく、 L を小さく、 C を大きくすればよい。特に R を大きくすることが効果的である。しかし商用周波数で R を大きくすることは、損失の増加となるため、高周波での R を増加させる手段が必要である。前出の図5(b)の高周波領域で R をさらに大きくすれば、 Q は抑制できることになる。これには、巻線の表皮効果損や高周波での漂遊損を増大させる方法が考えられる。

(2) 結線方式別の対策

結線方式を考慮して、図1の等価回路を書き直すと、図8となる。ここで L_2 、 R_2 が等価的な2次側 (短絡回路が形成される巻線) のインダクタンスと抵抗である。

① Y-Y 結線

Y-Y 結線では、この L_2 、 R_2 は、他相の1次巻線となる。等価インピーダンスは、前述のように Z_0 となる。 Q を下げるには、高周波数領域での R を大きくするのがよいが、主巻線を変えることとなり、対策は困難な場合が多い。

② Y-D 結線

この場合の L_2 、 R_2 は、2次巻線となる。これも主巻線となるため、 R を増加させる対策は難しい。2次巻線の分割や配置の工夫で、 $R(\omega)$ が変わることは経験されているが、有効な手法はまだ見つかってはいない。

③ Y-Y-D 結線

この結線での L_2 、 R_2 は、3次巻線となる。3次巻線は第3高調波の低減、中性点の安定化の目的で設けられ、容量も小さく、巻線材の選定や配置など設計の自由度は高い。したがって3次巻線の工夫により、振動抑制できる可能性は高い。

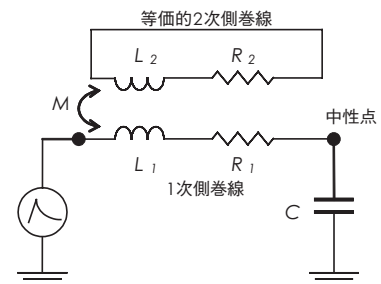


図8 結線方式を考慮した等価回路

今回、3次巻線に外部インピーダンスを付加して、振動抑制ができることを確認したので、次に説明する。

3.2 外部インピーダンスによる振動抑制

(1) 抑制回路

今までの検討から、Y-Y-D結線変圧器は、高周波数領域で R 分を大きくすれば Q が下がることがわかった。これを実証するために、3次巻線に外部インピーダンスを接続する振動抑制対策を考案し⁽¹³⁾、その解析計算と実験を行った。

抑制方法は、3次巻線の Δ 結線を開放し(オープンデルタ)、そこに外部インピーダンスとして、インダクタンス(L_{ex})と抵抗(R_{ex})を並列にして挿入する方法である(図9)。こうすることにより、低い周波数では L_{ex} によりインピーダンスは低くなり、高い周波数になると R_{ex} が振動抑制として働くようになる。確認のための $G(\omega)$ の計算と測定実験は、これまでと同じく、実験用変圧器で行った。

(2) 計算結果

計算により、外部インピーダンスの効果を確認した。

計算は、 L_{ex} を固定し(2mH)、 R_{ex} を変化させて行った。変圧器の等価回路の定数は、実験用変圧器の1次-1次と1次-3次のリーケージインピーダンスを測定して求めた。なお、 L_{ex} 、 R_{ex} は3次巻線の本来の目的を損なわない値を選んでいる。

計算結果を図10に示す。 Q は R_{ex} が約30 Ω 前後で $Q \approx 2$ となる。これ以上 R_{ex} を大きくすると、今度は1次-1次の、低い周波数での共振(L_p と C による)が現れてくる。 Q は5程度から2程度までに低減でき、 R_{ex} には最適値があることがわかる。この計算により、最適な外部インピーダンスの設計が可能となる。

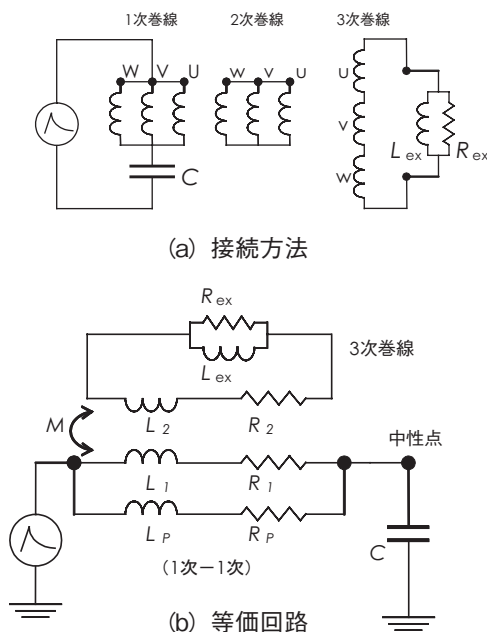


図9 外部インピーダンスによる振動抑制回路

(3) 実験結果

実機に外部インピーダンスを接続して、 $G(\omega)$ の測定実験を行った。実験結果を図11に示す。図10の計算結果と同様の結果が得られ、外部インピーダンスを付加することにより、 Q は低くなり、振動を抑制できることが実験によっても検証できた。

(4) まとめ

外部インピーダンスを3次巻線に挿入することにより、中性点の電位振動を大幅に下げられることが確認できた。

抑制原理は高周波領域で抵抗分を大きくして、 Q を下げることによっているので、外部インピーダンスではなくても1次-3次の特性で抵抗分を大きくできれば、外部要素なしで振動抑制が可能となる。

外部要素を用いる例として、中性点にアレスタを挿入して過電圧を吸収する方法がある。これも有効な方策ではあるが、外部要素を用いるなら、今回の外部インピーダンスを用いる方法のほうが、絶縁レベルが低い汎用部品の使用が可能になり、信頼性やコストの面で有利であると考えられる。

4. あとがき

同相雷サージに対する変圧器中性点電位振動の新しい解析手法を示した。

中性点電位振動の要因となるインダクタンスが変圧器のどこの部分に起因しているかを、理論と実験により明確

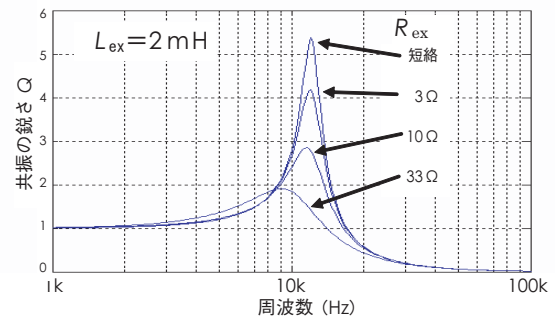


図10 振動抑制対策後の計算結果

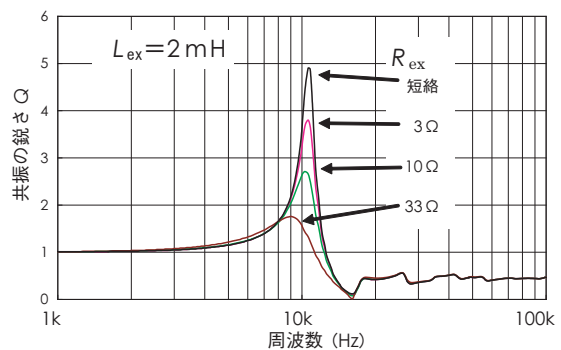


図11 振動抑制対策後の実験結果

化した。これにより、変圧器の結線の違いによる中性点電位振動の様相の差や単相実験の適用条件などが原理的に明らかになった。

またこれらの理論検討や実験検証にも周波数伝達関数 $G(\omega)$ による解析が有効であることを示した。

さらに、これらの原理的検討から、中性点電位振動の抑制は、リーケージインピーダンスの等価 R の高周波域での増加策が有効であることがわかった。特に、Y-Y-D結線変圧器においては3次巻線に外部インピーダンスを付加することが有用であることを示した。今後、外部インピーダンスによる振動抑制の実用化に向けた研究を推進していきたい。

参考文献

- (1) 電気学会：『高電圧大電流工学』電気学会大学講座 (1993)
- (2) 植田、依田、宮地：「77kV変電所で観測される侵入雷サージの特徴」電気学会論文誌B Vol.116, No.11 (1996)
- (3) 電気学会：「静止誘導器インパルス耐電圧試験」電気規格調査会標準規格 JEC-03041 (1999)
- (4) 電気学会：『電気機器工学 I (改訂版)』電気学会大学講座 (1990)
- (5) 川口：「変圧器巻線内部電位振動計算のための諸定数の算出について」電気学会論文誌B Vol.89, No.3 (1969)
- (6) 奥山、池田：「変圧器のコイル間および中性点の衝撃電位に影響を与える諸因子に関する考察」電気学会論文誌B Vol.89, No.6 (1969)
- (7) 大石：「内鉄形変圧器の過渡内部電位振動の数値解析」電気学会論文誌B Vol.89, No.4 (1969)
- (8) 池田、奥山：「変圧器移行電圧算出法」電気学会東京支部大会 160 (1968)
- (9) Miki, Hosoya, Okuyama: "A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings" IEEE Trans, Vol.PAS-97, No.3 (1978)
- (10) 高橋、神部、永田、佐藤：「変圧器中性点電位振動の解析について」電気学会静止器研究会 SA-07-87 (2007)
- (11) 佐藤、神部、高橋、神谷：「周波数伝達関数を用いた変圧器の電位解析手法」電気学会全国大会 No.945 (1993)
- (12) 佐藤、神部、高橋、小松「変圧器モデルの周波数伝達関数に基づいたサージ解析法」電気学会全国大会 No.1372 (1994)
- (13) 公開特許公報(A) 特開2007-123368

最近公開された愛知出願

特許

公開番号	名 称	発明者	共同出願人
2008-18369	廃棄木材からの有害物質除去装置	田中 良	名古屋大学
2008-50062	被搬送物の搬送装置及び被搬送物の取外し方法	加藤 雅彦 鈴木 康夫	
2008-118809	系統連携用電力変換システムの単独運転保護方法及び単独運転保護装置	神部 晃 桑原 祐 有川 清二	
2008-137451	無人搬送車の自動充電方法及び装置	片平 洋一 駒田 圭成 里 成典	トヨタ自動車株式会社 日清紡績株式会社
2008-199829	モールド電動機	杉浦 博幸	
2008-301646	モータ冷却装置	鈴木 博文 森田 高義 出口 守留	
2008-302363	粉碎処理装置	西尾比呂史 吉田 憲幸 安福 勝彦	TOTO株式会社

最近登録された愛知出願

特許

特許番号	名 称	発明者	共有権利者
4078012	自動排水装置	高須 祐二	TOTO株式会社
4118259	直流地絡検出装置	青山 浩二 加藤 英成	
4146748	ブラシレスモータの制御装置	駒田 圭成 長田 剛 山崎 周一	
4216538	ブラシレスモータの制御装置	西尾比呂史 吉田 憲幸 安福 勝彦	TOTO株式会社