

論文の内容の要旨

論文題目 変圧器巻線の急峻波による電位振動に関する研究

氏 名 藤田 重人

Very Fast Transient (VFT) は Gas Insulated Switchgear (GIS) 中の断路器等を操作する際に発生する急峻波サージで、急峻な立ち上がりと振動波形を特徴とする。その典型的な波形は立ち上がりが $0.1\mu\text{s}$ 以下で、数 MHz の周波数の振動波形が数十 μs 続く。変圧器に VFT が侵入すると、特に変圧器が GIS に直結する場合、巻線内に高周波電位振動が発生する。VFT により、変圧器や GIS 等の変電機器に発生する高電圧を Very Fast Transient Overvoltage (VFTO) と呼ぶ。

変圧器巻線内の電位振動、特に雷サージによる電位振動はかねてより変圧器にとって重要な問題の一つであり、多くの研究と対策がなされてきた。雷サージは、電圧の立ち上がりが $1.2\mu\text{s}$ で、波尾長が $50\mu\text{s}$ の単極性パルスの試験電圧波形で代表される。VFT は雷サージと比較して高周波であり、変圧器巻線に引き起こす電位振動の周波数も MHz 程度とより高周波になる。このような変圧器巻線内の高周波電位振動の振る舞いについては十分に知られていない。

本論文は、高電圧巻線が静電板と鉄心で囲まれる構造をもつ外鉄形変圧器の巻線内の高周波電位振動に関するものである。更に変電所において VFT が外鉄形変圧器に侵入した際の巻線に対する影響について議論する。

第一に、実変圧器巻線と比較して構成が単純な、静電板に挟まれた 2 枚と 4 枚のモデルコイルを用いて、変圧器巻線内の高周波電位振動現象について調べた。実験では、これらのモデルコイルに 1 周期の正弦波パルスと連続正弦波を正弦波成分の周波数を 5MHz

まで変化させて印加し、コイル接続部電圧とターン間発生電圧の測定を行った。これらの測定には、ターン間発生電圧の直接測定を可能にする光ファイバ・アイソレーション・システム (Sony-Tektronix A6904S) を用いた。

正弦波パルスを印加した場合、測定されたコイル接続部の電圧は、容量性電位分布の計算から得られた両端のコイルの電圧の中間の値となる。このことからコイルの電位は容量性電位分布に従うと考えられる。

一方、コイルの巻始めと終りでは、コイルとコイル接続部の電位差により進行波が発生し、コイルターン間を伝搬する。これらの進行波はターン間の絶縁物を伝搬する電磁波と解釈できる。実験から得られた進行波の伝搬速度は $184\text{m}/\mu\text{s}$ で、伝搬する媒体の比誘電率は $\epsilon=2.6$ となる。この値は、ターン間の絶縁物の比誘電率と一致する。

連続正弦波を印加して得られるターン間発生電圧の周波数特性には、いくつかのピークが見られる。これらのピークは、ターン間を伝搬する進行波の重ね合せにより発生すると考えられる。

第二に変圧器巻線内の高周波電位振動の解析方法を提案した。変圧器巻線内の高周波電位振動は、パルス印加の際に容量性電位分布となるコイルの電位と、コイルとコイル接続部の電位差により発生し、コイルターン間を伝搬する進行波から構成される。伝送線路モデルは、これら二つの要素を考慮する。単導体伝送線路モデルは計算が単純であるという特徴をもつ。多導体伝送線路モデルは計算が複雑になるが、より詳細で正確な解析を可能とする。これらの特徴を生かし、第一に容量性電位分布を考慮する単導体伝送線路で巻線全体を模擬して、各々のコイルに侵入するサージ電圧を計算する。次に注目するコイルを多導体伝送線路で模擬して、これに先に得られたサージ電圧を印加することによりコイル内の詳細な電位振動を解析する方法を提案した。この方法により先に述べたモデルコイルの電位振動を解析した結果、正弦波パルス印加の場合、ターン間発生電圧波形は、形と大きさが実験結果と一致した。しかし、周波数領域の解析では実験と完全な一致は得られなかった。

第三に油を抜いた状態の 500kV 級外鉄形実変圧器巻線を用いて電位振動の実測と単導体伝送線路と多導体伝送線路を併用する解析を行った。

実変圧器巻線内の電位振動は、モデルコイルの場合と同じく、パルス印加の際に容量性電位分布となるコイルの電圧と、コイルの巻始めと終りに発生し、ターン間を伝搬する進行波から構成される。図1に 2MHz の正弦波パルスを印加した場合のターン間発生電圧波形を示す。この図から波形”a”が、コイルの巻始めに発生して巻終りに向かって伝搬していき、波形”b”が、コイルの巻終りに発生して巻始めに向かって伝搬していく様子が見られる。この二つの進行波の伝搬速度は $177\text{m}/\mu\text{s}$ であり、これらを電磁波と考えた場合の伝搬媒体の比誘電率は $\epsilon=2.87$ となる。この値は油が染み込んだ紙の比誘電率と一致する。

図2に 2MHz の正弦波パルスを印加した場合のターン間発生電圧波形の解析結果を示す。ターン間発生電圧波形の形と大きさが、図1の実験結果と一致していることがわかる。

この変圧器巻線に連続正弦波を印加して得られた1-2ターン間発生電圧の周波数特性には、モデルコイルの場合と同様、いくつかのピークが見られた。これらのピークの中で

最大のものは、4.2MHzに現れるピークで、大きさは印加電圧の0.27倍であった。

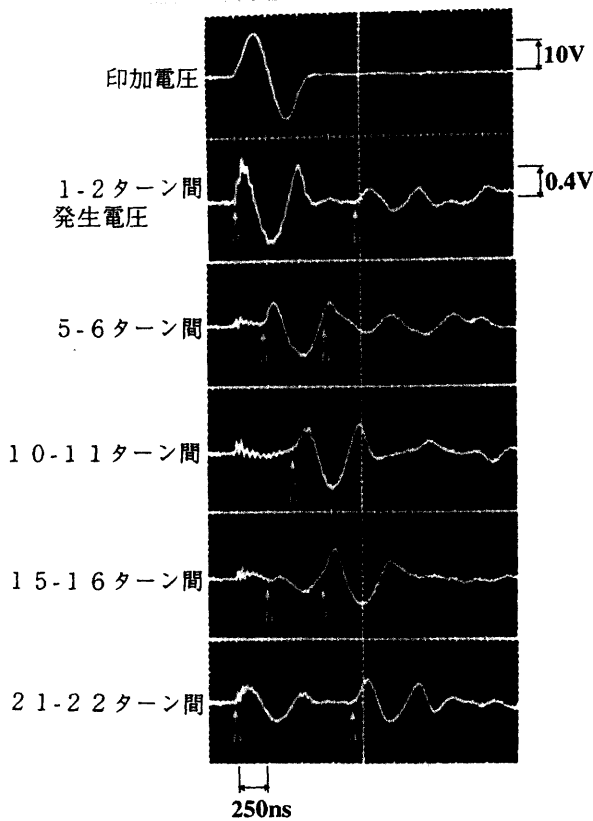


図1 500kV実変圧器巻線のターン間発生電圧の測定結果

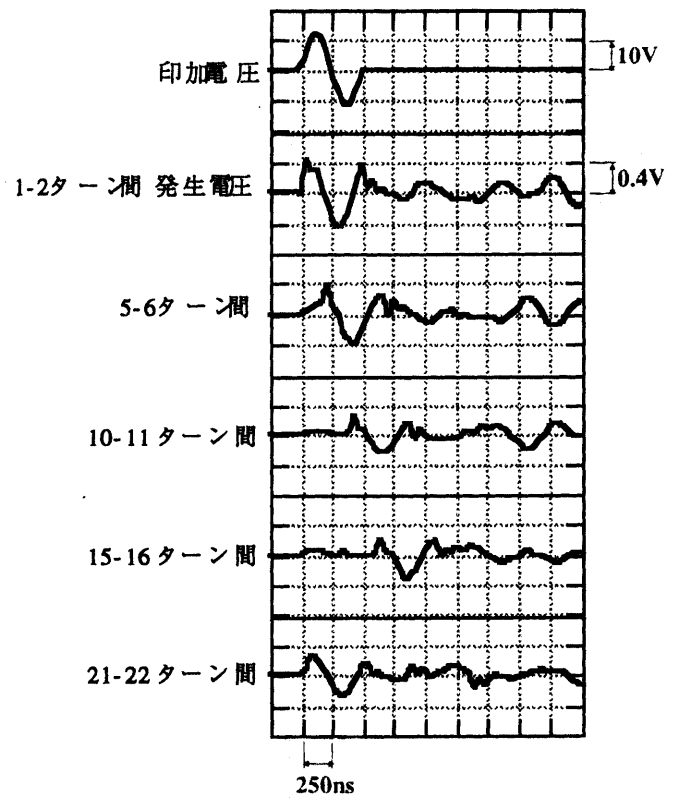


図2 500kV実変圧器巻線のターン間発生電圧の解析結果

最後に変圧器に侵入するVFTの急峻な立ち上がりと振動波形について、変電所の回路構成をパラメータとしてラプラス変換を用いた解析を行った。更に、VFTが変圧器に侵入した際の巻線に対する影響について、先に述べた500kV級外鉄形実変圧器巻線についてケーススタディを行った。

変圧器に侵入するVFT波形の電圧の立ち上がりの大きさは最大で2p.u.となる。パルス印加の際にコイルターン間に発生する電圧は、図1から印加電圧の0.04倍である。よって、VFTの立ち上がりによりターン間に発生する電圧は、最大で0.08p.u.になると予想される。これを実電圧に直すと32.7kVとなる。

VFTの振動波形を構成する高調波の周波数は、GIS母線の長さや変圧器の静電容量で決まる。ここでは、第1高調波を基本波と呼ぶことにする。変圧器に侵入するVFTの高次の高調波の振幅は、基本波と比較して十分に小さく変圧器巻線に与える影響は限定される。

VFTの振動波形により変圧器巻線に発生する電圧について、偶然にもVFTの振動波形の基本波の周波数が、先に示した500kV級外鉄形実変圧器巻線のターン間発生電圧の周波数特性に現れるピークの周波数と一致した場合について考える。この場合、ターン間に発生する電圧が最大になるのは、VFTの振動波形の基本波の周波数が4.2MHzのピークの周波数と一致した場合で、発生する電圧は0.133p.u.となる。これを実電圧に直すと54.3kVとなる。

典型的な 500kV 変圧器のターン間の耐電圧は、雷インパルスに対して 100kV で、急峻な振動波形に対しては絶縁耐力が 25% 向上する。そのため、この変圧器の場合、VFT の侵入に対してターン間の絶縁には問題は生じない。この例のように通常は、外鉄形変圧器の場合、VFT の振動波形の基本波の周波数がターン間発生電圧のピークの周波数と一致した場合でも問題はないと考える。

ただし、VFT の基本波の振幅は周波数が低くなると大きくなる。そのため、低周波領域にターン間発生電圧の大きなピークがある変圧器の場合は注意を要する。