

高周波変圧器におけるシールド材料の比較検証

©Muhammad Muaz Hafizi Bin Alias, 米富律騎, 日下佳祐 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

Solid-State Transformer(SST)は従来の商用変圧器と比較して高効率・高パワー密度な特性を有することから、データセンターやスマートグリッドなどへの応用が期待されている。一方で、送電系統への落雷は電力システムに損傷を与えて、SSTにおいても雷サージによる絶縁破壊が課題となる。その対策として、変圧器の一次側と二次側の巻線の間に導電性シールドを設けることで、一次側に発生したサージ電圧が二次側への伝搬されるのを防ぐことが可能となる。しかし、高周波変圧器においてはシールドに発生する渦電流によって電力損失が増大する。

本稿では高周波変圧器におけるシールド材料の渦電流に与える影響を、有限要素解析を用いた電磁界解析により解析したので報告する。

2. 高周波変圧器におけるシールドの影響

Fig. 1 に変圧器の断面図を示す。導電性シールドは高周波変圧器一次巻線と二次巻線の間に挿入されており、接地されている。送電系統の高電圧側に雷サージが発生した時、変圧器の一次巻線には大きな過渡過電圧が印加され、一次巻線の電位が急激に上昇する。これにより、一次巻線と二次巻線の間に強い電界が発生し、絶縁破壊や雷サージが低電圧側へ伝搬するおそれがある。Fig. 2 に示す導電性の内部シールドは接地への低インピーダンス経路として機能し、サージ電流を大地へ逃がすことで二次側の保護する。

高周波変圧器では、シールドに生じる渦電流が効率に強く影響するため、材料特性および構造を慎重に検討する必要がある。シールドは高い導電率を有し、雷サージを効果的に抑制するための低インピーダンス経路として機能する。一方で、導電率が高すぎると渦電流損失が増加し^[1]、磁束の到達が妨げられる。この渦電流は元の磁束に対して反対方向の磁束を発生させ、結果として全体の磁束密度を低下させる。したがって、導電率、損失および動作周波数のバランスを最適化することが、高周波変圧器の効率とサージ保護性能を両立するために重要である。

また、内部シールドにおける導電率の違いが渦電流損失に与える影響を評価するために、高導電率材料としてはアルミ (3.7×10^7 S/m)、低伝導率材料としては高抵抗コーチ

ング材である 838 AR (3.1×10^2 S/m)を選定した。さらに、これらの中間領域における導電率の影響を検討するため、 $10^3 \sim 10^6$ S/m の範囲で導電率を変えて内部シールドにおける導電率の変化によるシールドの渦電流損失の影響を評価した。

3. シミュレーション結果

本稿ではシールド材の影響を有限要素解析ソフトウェア JMAG により検証した。本解析では、周波数 30 kHz、一次電流 65 A とし巻数比を 2:1 にすることで二次電流 130 A に流れるよう設定した。Fig. 3 に導電率とシールド損失を示す。本結果より導電率が 310 S/m から 2.0×10^4 S/m の範囲では、シールドの渦電流損失は増加したが、導電率が 2.0×10^4 S/m を境に、損失が減少することを確認した。原因として高い導電率材料では磁場を遮蔽するため、磁束が減少してシールド損失が低下する。これにより、二次側に誘起電圧が著しく低下してしまうため、トランス全体の効率は低くなる。一方、低い導電率を有する材料は、磁場が遮蔽されず一次側と二次側との磁気結合が強まり、二次側に誘導電流が流れることを確認した。

Fig. 4 は磁束線のシミュレーション結果を示している。Fig. 4(a)は高い導電率のシールド材を用いた時は、磁束がシールドに遮蔽されることからコアに磁束が到達しないことが分かる。一方、Fig. 4(b)は低い導電率のシールド材を用いた場合、シールドに遮蔽されずコアに磁束が到達することを確認した。

今後はシールド損失とシールド損失の低減手法の検討を行う予定である。

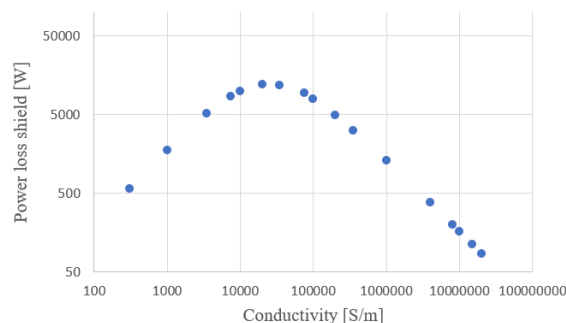


Fig. 3. Relationship between conductivity and shielding loss.

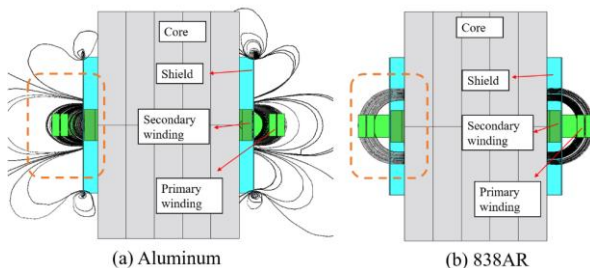


Fig. 4. Simulation result of magnetic flux line.

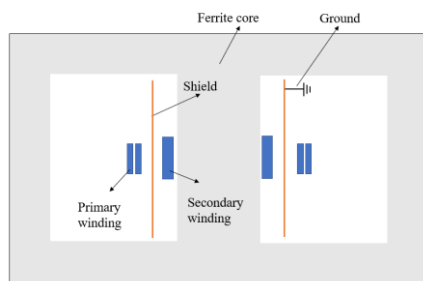


Fig. 1. Shield structure in high-frequency transformer.

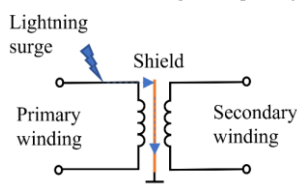


Fig. 2. Circuit diagram of high-frequency transformer.

参考文献

[1] Z. Li, et al., "High-Frequency Transformer Design With Medium-Voltage Insulation for Resonant Converter in Solid-State Transformer", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, No.8(2023).