

シールド付連続円板巻線の油浸要素モデルによる雷インパルス絶縁特性

■ 吉村 智萌

Tomoaki Yoshimura

■ 酒井 崇行

Takayuki Sakai

■ 尾崎 卓也

Takuya Ozaki

前報⁽¹⁾では、油入変圧器巻線における主要構成要素であるターン間およびセクション間の絶縁特性について、一般的な連続円板巻線を対象に電界を用いた評価を報告した。今回は耐サージ性を高めたシールド付連続円板巻線を対象に評価を実施した。この巻線は、連続円板巻線にシールド用の電線をいっしょに巻き込んだ構造である。この巻線の絶縁特性を評価するためには、要素モデル試験やシミュレーションなどによって、電位分布の把握および電界評価が必要である。そこでまず、電位分布解析を実施して巻線内の電位分布を把握した。そして、そこで得られた電位分布にもとづき要素モデル試験を実施し、絶縁特性の電界評価を実施した。その結果、放電特性は主電線とシールド用の電線間および主電線とプレスボードスペーサ間に形成されるくさび状ギャップ^{注1)}の電界に着目することで評価ができることを確認した。

1 はじめに

前報⁽¹⁾では、油入変圧器巻線における主要構成要素であるターン間およびセクション間の絶縁特性について、一般的な連続円板巻線を対象に電界を用いた評価を報告した。

今回は耐サージ性を高めたシールド付連続円板巻線（以下、シールド巻線）を対象に評価を実施した。この巻線はシールド用の電線（以下、シールド電線）を挿入することで巻線内の直列静電容量を大きくし、その効果で巻線内に侵入したサージの振動を抑制し、耐サージ性を高めている。この巻線の絶縁特性を評価するためには挿入したシールド電線を加味した絶縁特性を評価する必要がある。そこでまず、電位分布の解析に必要な等価回路および回路定数の算定方法を検討し、電位分布解析の精緻化を図った。そして、そこで得られた電位分布にもとづいた要素モデルにて雷インパルス試験を実施し、絶縁特性の電界評価を実施した。本稿ではこの一連の検証について報告する。

2 電位分布

通常運転時の変圧器巻線において、印加端から終端まで均一に電圧分担されている。そこに雷サージのような急峻な高電圧が侵入すると、印加初期は巻線の印加側で電圧分担が大きくなり、振動しながら減衰し、通常運転時の均一な電圧分担に戻る。

電位振動を抑制するためには、巻線内の静電容量を大きくすることが有効である。電位振動が特に大きくなる印加側を部分的に改善できるコンデンサ・カップリング・シールド⁽²⁾と呼ばれるシールド巻線方式がある。今回検討したシールド巻線は、この巻線方式をさらに簡素化し、2セクションごとにシールド電線を挿入する巻線方式とした。図1にシールド巻線の断面図を示す。図1中の○印が主電線で、□印がシールド電線である。

径方向に巻回した電線のブロックをセクションと呼び、これを上下に重ねたときの電線間がセクション間である。図1のように主電線間にシールド電線を挿入することで主電線とシールド電線の静電容量が加わり、巻線内の静電容量を大きくでき、振動抑制効果を得ている。

この巻線の絶縁特性を評価するためには、主電線およびシールド電線に発生する電位を把握する必要がある。一般的に電位分布の解析モデルは2セクションを1ブロックとすることで要素数を抑えている⁽³⁾。この方法では各電線の電位が得られず、シールド電線の電位を把握することができない。そこで、各電線を解析するために、回路定数の算定方法、等価回路を検討し、電位分布解析にてシールド電線の電位を把握する。

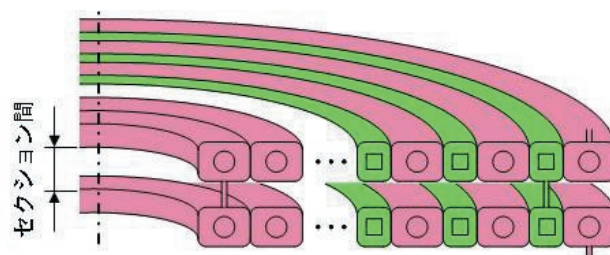


図1 シールド巻線断面

2.1 回路定数の妥当性評価

回路定数の妥当性は、設計寸法から理論計算にて算出した計算値と、巻線インピーダンスの周波数特性を用いた実測値を比較することで評価した。なお、高周波領域（数 MHz 以上）での抵抗成分は、インダクタンス成分に比べてごくわずかなため無視した。

計算値と実測値を比較した結果を表1に示す。L はインダクタンス、Cp は巻線と対地間の並列静電容量、Cs は巻線内の直列静電容量（径方向および軸方向の各電線間の直列静電容量の合成静電容量）である。表1より各回路定数の計算値に対する実測値の差は10%以下であり、回路定数の算出方法の妥当性を確認した。

表 1 回路定数の計算値と実測値の比較

	L	Cp	Cs
計算値／実測値の比率	104%	91%	90%

2.2 等価回路の妥当性評価

等価回路の妥当性は、電位振動の解析波形と実測波形を比較することで評価した。解析波形は、2.1 節で検討した回路定数と今回検討した等価回路を用いて電位振動解析した波形である。実測波形は、実規模のシールド巻線を用いて測定した波形である。

(1) 検証に使用した実規模シールド巻線

図 2 に検証に使用した実規模シールド巻線を示す。実規模シールド巻線の構成は、検証対象の実規模シールド巻線と内径側に金属製シリンドラを配置し、内径側巻線との静電容量を模擬した。図 2 中の巻線上部口出し線に標準雷インパルス波形 (1.2/50 μ s) を印加する構造とし、金属製シリンドラおよび巻線下部口出し線を接地する構造とした。

(2) 等価回路

図 3 に図 2 の実規模シールド巻線の印加端 2 セクション分の等価回路を示す。この 2 セクション分を積み重ねて巻線全体の等価回路を構成した。図 3 より、隣り合った電線は静電容量で結合し、巻回している電線は自己インダクタンスで結合した。シールド巻線と金属製シリンドラ、シールド巻線と対地は静電容量で結合し

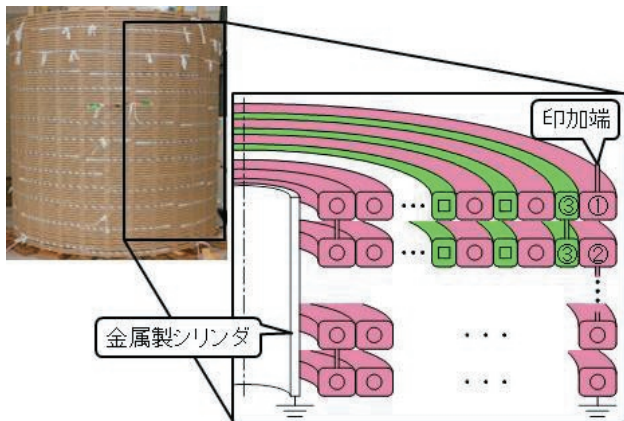


図 2 実規模シールド巻線

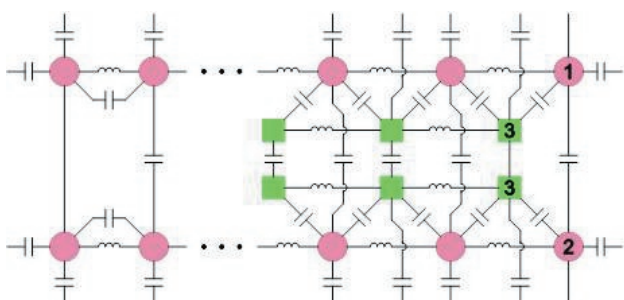
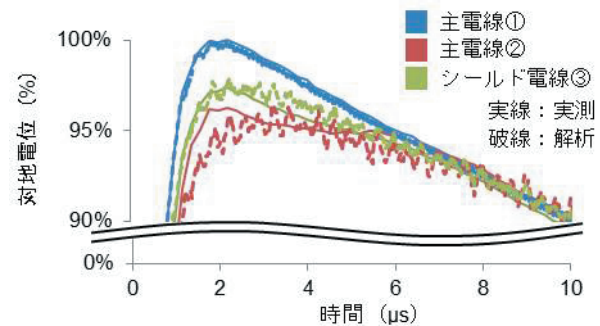


図 3 シールド巻線の等価回路

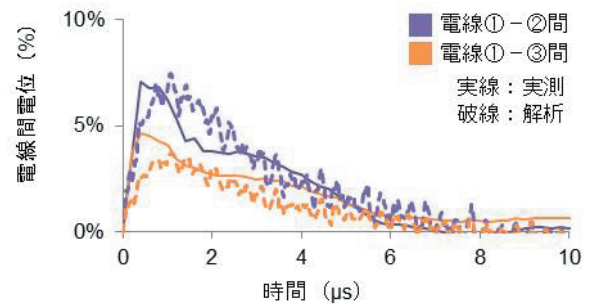
た。図 3 中の電線①～③は、図 2 中の電線①～③と同一位置を示す。

(3) 電位振動波形

図 2 を用いた実測および図 3 を用いた解析による、各電線の対地間、各電線間の電位振動波形を図 4 に示す。印加電圧の最大値を 100% として規格化した値で示す。実線が実測結果で、破線が解析結果である。図 4 より、波形の立ち上がり、ピークの位置、波形の立ち下りの形状がおおむね一致したものの、解析波形に短い周期の振動が重畳した。これは等価回路に抵抗がないことで振動が際立ったものと考えられる。またピーク値については、いずれの波形においても 1% 以内の差で一致しており、この程度の差であれば実用上問題ないと考えられる。よって、今回検討した等価回路の妥当性を確認した。



(a) 対地間電位



(b) 電線間

図 4 電位振動波形

2.3 シールド電線の電位

図 4 の実測と解析の電位振動波形の 1 μ s における値を初期電位分布とし、図 5 に示す。図 5 よりシールド

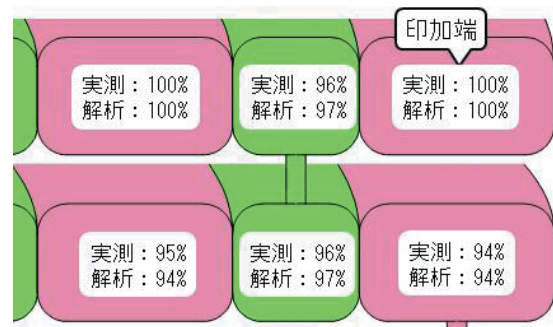


図 5 初期電位分布

電線の電位は隣接する主電線との電位差が約3%で、主電線のセクション間が約6%であった。よって、主電線のセクション間の電位差を100%とするとシールド電線の電位は約50%であることがわかった。

3 要素モデル試験

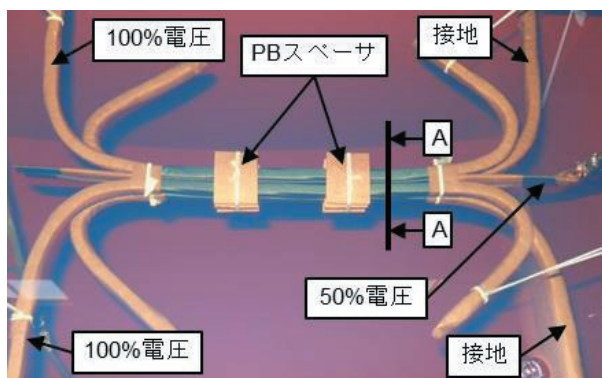
2.3節で得られたシールド電線の電位を印加できる要素モデルを検討し、要素モデル試験にて絶縁特性を取得する。

3.1 シールド巻線の要素モデル

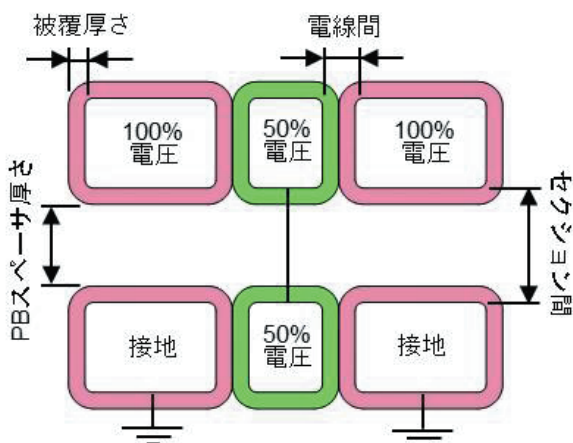
シールド巻線を模擬した要素モデル（以下、要素モデル）を図6(a)に示し、この要素モデルの断面図を図6(b)に示す。上側の主電線に100%の電圧（以下、100%電圧）、下側の主電線を接地とし、シールド電線には50%の電圧（以下、50%電圧）を印加できるモデルとした。上下の電線間にはプレスボードスペーサ（以下、PBスペーサ）を挟み固定した。パラメータは被覆の厚さとした。

3.2 試験方法

試験回路を図7に示す。雷インパルス発生器を用い



(a) 要素モデル外観



(b) 要素モデル断面 (A-A 断面)

図6 シールド巻線を模擬した要素モデル

て、負極性雷インパルス波形 ($-1.2/50\mu\text{s}$) にて試験を実施した。試験は、想定した絶縁破壊電圧の50%から5kVステップで電圧印加し、部分放電開始電圧 (PDIV)、絶縁破壊電圧 (BDV) を測定した。部分放電は、接地線に流れる印加時の充電電流を打ち消して測定する差動検出法⁽³⁾にて測定した。絶縁油は鉱油を使用し、試験前に浄油し真空注油した。

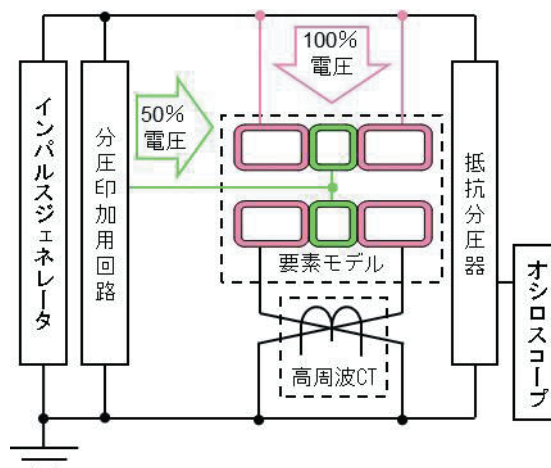


図7 試験回路

3.3 要素モデル試験結果

要素モデルの試験結果を図8に示す。前報のセクション間モデルにおいて、BDVとPDIVが同等であることが確認されている。今回実施した試験の結果、要素モデルのBDVは前報のセクション間モデルのBDVとよく一致したものの、要素モデルのBDVの約60%でPDIVが測定された。要素モデルのPDIVの傾きは、前報のターン間モデルPDIV、セクション間モデルBDVと一致した。これらのことから、部分放電は主電線とシールド電線間および主電線とPBスペーサ間のくさび状の油ギャップで発生し、セクション間の油が橋絡する電界に至ることで絶縁破壊すると考える。

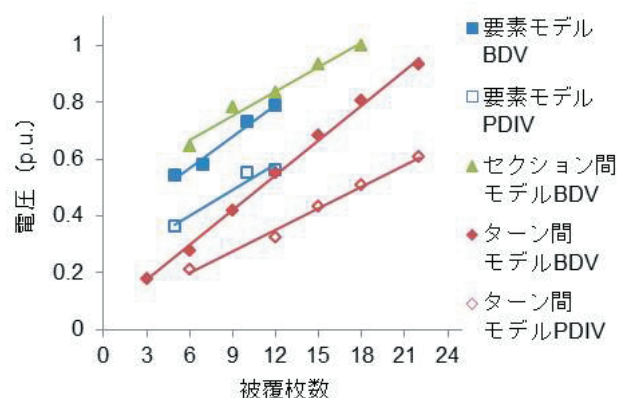


図8 試験結果

4 電界解析評価

4.1 要素モデルの電界解析

前報にて、ターン間、セクション間の絶縁特性は、形成されたくさび状ギャップの最弱点部となる角度での電界で評価できることがわかっている⁽¹⁾。最弱点部の角度はくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点である。今回もこの部分に着目して、電界にて評価を実施する。

図9に電界解析結果の一例を示す。主電線の印加条件は試験で得られた PDIV および BDV とし、シールド電線の印加条件はその 50% 値とした。

主電線とシールド電線の間に形成されるくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点が点 A および点 B である。主電線またはシールド電線と PB スペースの間に形成されるくさび状ギャップの接触点から $dV/dg = 0$ を満たす点が点 C および点 D である。

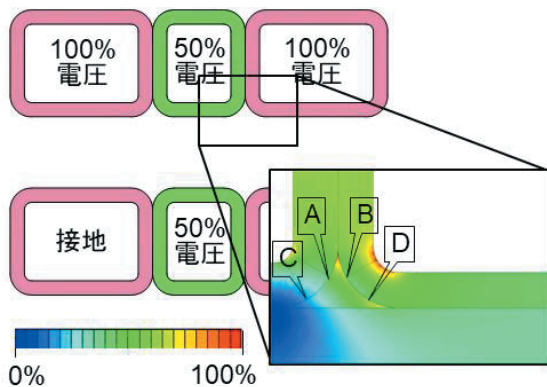


図9 電界解析結果

4.2 電界解析での評価結果

表2に各被覆枚数における各部位の電界を示す。表2の各電界値は、前報のターン間 PDIV 時の電界値で規格化した値である。

前報のターン間モデルの PDIV 時の電界と今回の要素モデルの PDIV 時の電界を比較すると点 B および点 D において同程度であった。このことから部分放電は、主電線とシールド電線間および PB スペースと主電線間のくさび状ギャップで発生し、前報同様にくさび状ギャップの電界で評価できると考える。

前報で、セクション間 BDV 時の電界値およびターン間 PDIV 時の電界値が被覆枚数によらずほぼ同じ値であることが確認されている。しかし、今回の要素モデルの BDV 時の電界は、被覆枚数が増加するにつれ低下する傾向が得られ、前報のターン間 BDV 時の電界と似た傾向であった。また、図8の試験結果においてもターン間モデル BDV と要素モデル BDV の傾きが一致しており、この傾向は被覆の破壊強度が影響したものと考えられる。

表2 各電界解析結果

	被覆枚数	電界の評価点			
		点 A	点 B	点 C	点 D
PDIV 時電界	5 枚	1.04	1.18	0.45	0.99
	10 枚	0.84	1.01	0.30	0.98
	12 枚	0.70	0.87	0.24	0.88
BDV 時電界	5 枚	1.55	1.75	0.67	1.47
	10 枚	1.11	1.34	0.40	1.30
	12 枚	0.98	1.22	0.34	1.23

単位：p.u.

5 おわりに

今回、電位振動解析の結果および、要素モデル試験の結果を用いて、シールド巻線の雷インパルス絶縁特性を評価した。その結果、部分放電特性は主電線とシールド電線間および主電線と PB スペース間のくさび状ギャップの電界で評価することができることがわかった。

今回の検討によって、電界解析を用いてシールド巻線の雷インパルス絶縁特性を評価することができた。引き続き、より信頼性の高い製品開発に繋げていきたい。

参考文献

- (1) 酒井崇行, 吉村智萌, 岩井良:「変圧器巻線の油浸要素モデルによる雷インパルス絶縁特性の評価方法の検討」, 東光高岳技報 No.6 (2019)
- (2) 森山昌和:「大容量変圧器における最近の諸問題」, 日立評論 1968 年 2 月号 (1968 年)
- (3) 電気学会:「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」, 電気学会技術報告, 第 1218 号 (2011)

語句説明

注 1) くさび状ギャップ: 本稿では、電線と電線または電線と絶縁物間に形成される V 字または三角形の形状をした微小ギャップのこと。その部分では、一般的に放電しやすいとされている。

吉村 智萌

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属

酒井 崇行

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属

尾崎 卓也

技術開発本部 技術研究所
解析・試験技術グループ 所属