

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

■ 酒井 崇行
Takayuki Sakai

■ 吉村 智萌
Tomoaki Yoshimura

■ 岩井 良
Ryo Iwai

油入変圧器の絶縁特性は、これまでモデルによる絶縁破壊試験を実施し、その結果で評価してきた。しかし、よりいっそうの絶縁の合理化を図るためには電界ストレスも加味した評価が必要といえる。今回、変圧器巻線の主要構成要素であるターン間、セクション間の要素モデルによる雷インパルス試験を実施し、理論式および電界解析による絶縁特性を考察した。その結果、放電特性はくさび状の油ギャップが支配的であり、くさび状ギャップの最弱点部の電界に着目することで評価できることを確認した。

1 はじめに

油入変圧器の絶縁特性は、これまでモデルによる絶縁破壊試験を実施し、その結果から評価してきた。しかし、よりいっそうの絶縁の合理化を図るためには電界ストレスも加味した評価が必要といえる。

今回、改めて変圧器巻線の主要構成要素であるターン間、セクション間の要素モデルによる雷インパルス試験を実施した。その結果を用いて、理論式および電界解析による絶縁特性を考察する⁽¹⁾。

本稿では、変圧器巻線の要素モデルによる試験の結果を用いて、ターン間、セクション間の絶縁特性を電界によって評価した方法を報告する。

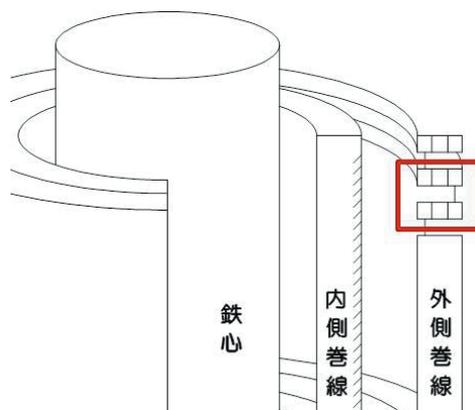


図1 変圧器巻線

2 要素モデルを用いた絶縁試験

2.1 要素モデル

変圧器の巻線のイメージを図1に示す。図中の赤枠のように主要構成要素あるターン間およびセクション間を模擬した要素モデルを図2、図3に示す。要素モデルの断面は図4に示すように、ターン間は電線を突き合わせて模擬し、セクション間は電線間にプレスボード (PB) スペーサを挟み込んで模擬した。電線は平角電線を使用し、被覆はクラフト紙を3~18枚巻き回した。セクション間モデルのPB スペーサは厚さ4 mmとした。モデルの片側は高電圧 (HV) を印加、反対側を接地 (GND) とした。

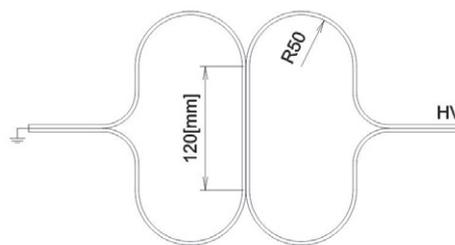


図2 要素モデル (ターン間)

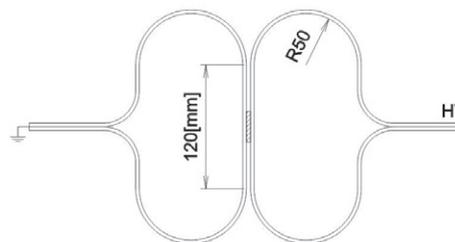


図3 要素モデル (セクション間)

2.2 試験方法

試験回路を図5に示す。雷インパルス発生器を用いて、負極性標準雷インパルス波形 (-1.2/50 μ s) にて試験を実施した。試験は絶縁破壊電圧 (BDV) 予想値の50%から5 kVステップで電圧を印加し、BDVと部分放電開始電圧 (PDIV) を求めた。部分放電 (PD) は、接地線に高周波 CT を取り付けて測定した。絶縁破壊 (BD) 後は、印加線と接地線を次のモデルに付け替えて

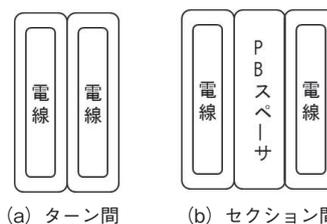


図4 要素モデル断面

繰り返し試験をした。その際に、BD時に発生した気泡やカーボンなどが他のモデルに影響を与えないように絶縁物で区画した。試験に使用した絶縁油は鉱油で、試験前に浄油機を通し真空注油した。各パターンモデル数は10個とした。

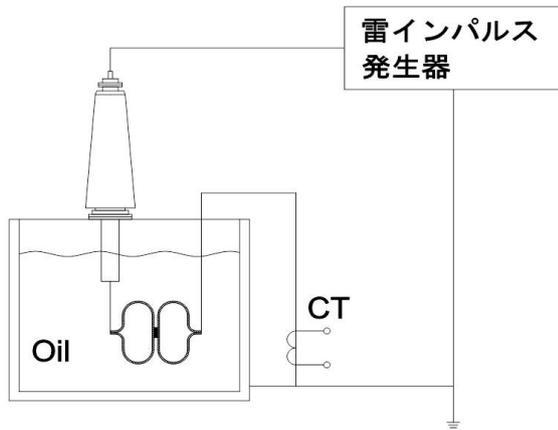


図5 試験回路

2.3 試験結果

ターン間とセクション間のBDVおよびPDIVを図6に示す。ターン間ではBDVより低い電圧でPDを観測したが、セクション間においてはPDが観測されずBDに至った。図6からわかるように、ターン間とセクション間ともに被覆枚数に対して線形関係を示した。また、ターン間とセクション間のBDVの傾きが異なることもわかった。これらのことから、ターン間はPDが発生しても被覆の破壊強度を超えるまで耐えると考えられる。それに対してセクション間では、PDが発生したときに油が橋絡し、被覆にかかる電圧がターン間よりはるかに大きくなることから、PDの発生と同時にBDしたと考えられる。

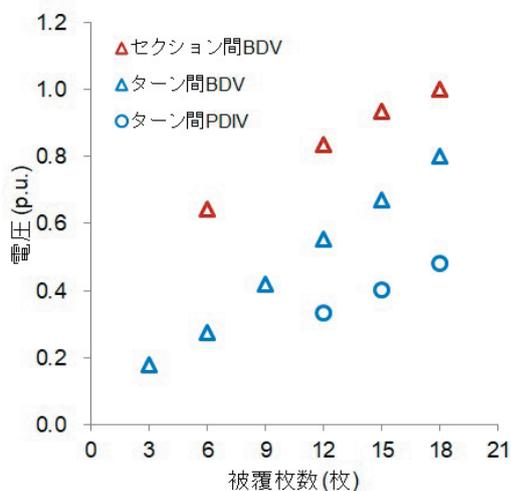


図6 試験結果

3 電界解析による評価方法

3.1 理論式との比較

セクション間の要素モデルのくさび状ギャップ^{注1)}を図7に示す。くさび状ギャップの放電開始電界は、式(1)で表される界面の電束一定の条件から求められる。

$$\epsilon_t E_t \cong \epsilon_g E_g \cong \epsilon_d E_d \dots\dots\dots(1)$$

$$E_g \cong \frac{V}{(2g + 2\frac{\epsilon_g}{\epsilon_t}t + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_d}d)} \dots\dots\dots(2)$$

$$E_g = k \cdot g^{-\alpha} \dots\dots\dots(3)$$

式(2)および(3)から、最弱点部のくさび状ギャップのギャップ長 g と、ギャップが放電する印加電圧 V の関係は式(4)で近似できる⁽²⁾。

$$V \cong k \cdot g^{-\alpha} \left(2g + 2\frac{\epsilon_g}{\epsilon_t}t + \frac{\epsilon_g}{\epsilon_d}d \right) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 t : 被覆厚さ、 d : PBスペーサ厚さ

$\epsilon_g, \epsilon_t, \epsilon_d$: 油, 被覆, PBスペーサの比誘電率

くさび状ギャップの放電特性を示す式(3)の α は一般に1/3程度であり、 $\alpha = 1/3$ と仮定し、式(4)で最も放電が発生しやすい条件は $dV/dg = 0$ から、表1に示すような最小値(最弱点部)が求まる。また、各被

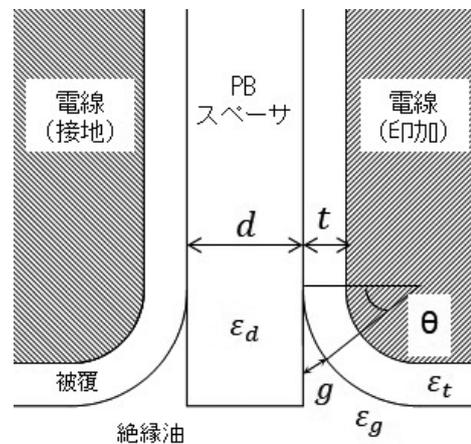


図7 要素モデルのくさび状ギャップ (セクション間)

表1 最弱点部の角度

| 被覆枚数 | $dV/dg = 0$ となる角度 (θ) | |
|------|--------------------------------|--------|
| | ターン間 | セクション間 |
| 3 | 22° | 54° |
| 6 | 27° | 53° |
| 9 | 30° | 51° |
| 12 | 32° | 50° |
| 15 | 34° | 49° |
| 18 | 35° | 48° |

覆における理論式から求めた PDIV と試験結果を図 8 に示す。この図から、ターン間では理論式から求めた PDIV と試験における PDIV、セクション間では理論式から求めた PDIV と試験における BDV の傾向が良く一致した。このことは、セクション間では PDIV = BDV であるといえ、セクション間の試験において PD が観測されなかったこととも一致する。

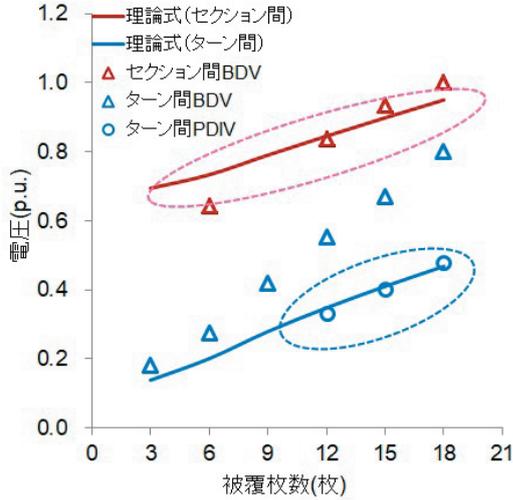


図 8 試験結果と理論式の比較

3.2 電界による評価

試験結果にもとづき、電界解析を用いてくさび状ギャップの評価を実施した。

要素モデル断面を模擬し、二次元の電界解析を実施した結果の一例を図 9 に示す。印加条件は試験で得られた 50% BDV および PDIV とした。くさび状ギャップにおいて、電線と電線および電線と絶縁物の接触部で最も電界が高くなり、そこから離れるほど電界は低くなる分布となった。

図 10 は図 9 の点 A → 点 B の被覆表面電界を示す。この結果から、ターン間では、電線と電線および電線と

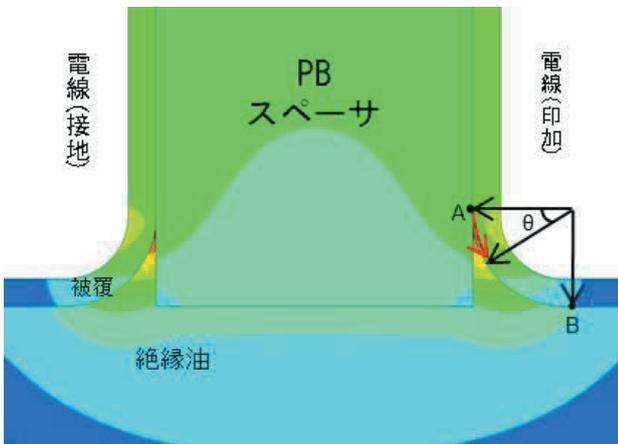


図 9 くさび状ギャップの解析例 (セクション間)

絶縁物の接触部からの角度が小さいほど被覆枚数による電界値の差が大きく、接触部から離れるほど、電界値は収束する傾向を示している。一方セクション間では、被覆枚数が変化しても同等な値を示している。これは、前節の式 (2) から PB スペースサ厚さ d が影響していることがわかり、電界解析の妥当性が確認できた。これらのことから、セクション間よりターン間の方が被覆表面電界に対する被覆の影響が大きいといえる。

次に、前節の表 1 で示したくさび状ギャップの最弱点部の電界を図 11 に示す。セクション間 BDV 時の電界値とターン間 PDIV 時の電界値がほぼ同じ値であることを確認した。

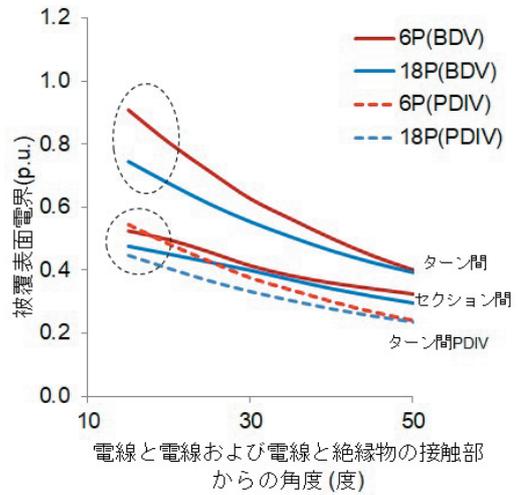


図 10 被覆表面に沿った電界値

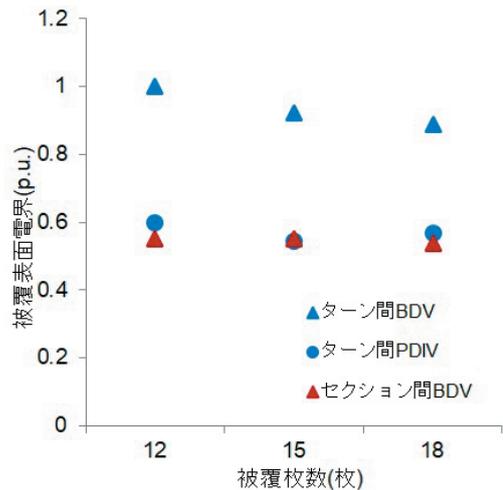


図 11 最弱点部の被覆表面電界

3.3 まとめ

ターン間、セクション間の要素モデルによる試験結果を理論式および電界解析を用いて評価することで、次のことがわかった。セクション間の BDV と PDIV は同等であること。また、ターン間とセクション間のくさび状

ギャップの最弱点部になる角度の PDIV の電界は同等であること。これらのことから、ターン間、セクション間ともに電界で絶縁特性が評価可能であると考ええる。

4 おわりに

本稿では、ターン間、セクション間の要素モデルによる試験結果を理論および電界解析を用いて絶縁特性を考察し、絶縁特性の電界での評価方法について検討した。その結果、ターン間、セクション間ともにくさび状ギャップの最弱点部になる角度を見ることで、電界で絶縁特性が評価可能であることが確認できた。電界による評価を絶縁評価に組み込むことで、より精度のよい体系的な絶縁評価ができるようになり、試験回数の削減などの検証の効率化や絶縁の信頼性向上にも貢献できると考える。今後は、さらなる検討を進め、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:「変圧器巻線の要素モデルにおける絶縁特性」, 平成 31 年電気学会全国大会, 5-143 (2019)
- (2) 井関昇, 倉橋晟, 松浦清:「油中沿面放電」, 富士電機

技報, 第 9 号 (1964)

■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。



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
大型変圧器の研究・開発に従事



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
大型変圧器の研究・開発に従事



岩井 良

電力プラント事業本部 大型変圧器製造部
大型変圧器設計グループ 所属
大型変圧器の設計・開発に従事