ガス絶縁変圧器ターン間絶縁のインパルス電圧に対する各種絶縁特性

正員 井上 保 (東芝)

正員 寺西 常治 (東芝)

正員 池田 正巳 (九州工業大学)

正員 柳父 悟 (東芝)

Dielectric Characteristics of Turn-to-turn Insulation of Gas-Insulated Transformer for Various Impulse Voltage Application

Tamotsu Inoue, Member Tsuneharu Teranishi, Member Masami Ikeda* Member Satoru Yanabu Member (TOSHIBA Corporation) (Kyusyu Institute of Technology*)

This paper deals with the dielectric characteristics of turn-to-turn insulation for SF_6 gas-insulated transformers for impulse voltages which are supposed to impinge on transformer in the field. Those are alternate application of impulse voltages with inverse polarities, superimposed application of impulse voltages on ac voltages and repetitive application of impulse voltages.

We obtained following results. The application of inverse polarity impulse and the superposition of impulse on ac voltage have no effect on dielectric strength of turn-to-turn insulation. And the repetitive application of impulse voltages over the partial discharge inception voltage level dose not promote degradation of turn-to-turn insulation.

キーワード ターン間絶縁 インパルス電圧 交流・インパルス重畳電圧 V-n 特性 ガス絶縁

1. まえがき

防災上の観点などから SF_6 ガスを冷媒および絶縁媒体に用いたガス絶縁変圧器の社会的需要が高まっており、高電圧大容量のガス絶縁変圧器の運転実績も徐々に増えている。

変圧器は運転中にさまざまなサージ電圧を多数回受ける。現地で運転されている変圧器のサージ電圧に対する絶縁信頼性を評価する上での絶縁特性として、

(1)交流電圧とインパルス電圧の重畳電圧による絶縁特性

(2)インパルス電圧による V-n 特性

が挙げられ、これまでも油入変圧器での調査報告が行われている。例えば、(1)に関してはターン間絶縁⁽¹⁾⁽²⁾、セクション間絶縁⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾について報告されている。それらの結果によると、重畳電圧においてはターン間⁽²⁾や巻線の電位分布を改善したハイセルキャップ巻線を模擬したセクション間⁽³⁾ではその影響がないこと、さらにセクション間⁽⁵⁾では交流電圧の重畳によってインパルス破壊電圧が低下する場合のあることが明らかになっている。また、(2)に関してはターン間絶縁の多数回のサージ電圧に対する絶縁特性は、1,000 回連続に印加して破壊電圧は初期値の

約 90%に低下すること⁽¹⁾が報告されている。

ガス絶縁機器の(1),(2)に関しては、ガス絶縁開閉装置 (GIS)の絶縁スペーサ沿面や SF_6 ガス単体で数多くの絶縁特性が報告されている⁽⁶⁾が、ガス絶縁変圧器で採用されいる被覆絶縁においてはセクション間絶縁の V-n 特性⁽⁶⁾が報告されているにすぎない。

このような観点から、ここでは、被覆絶縁線を使用して、インパルス電圧の V-n 特性および交流とインパルス電圧の重畳絶縁特性について述べる。

本報告による次の観点は、逆極性印加による影響調査である。

ガス絶縁変圧器や油入変圧器のターン間絶縁において、インパルス電圧を印加すると全路破壊前にターン間の対向する二本の被覆平角線の導体平坦部の上下に形成されるくさび状のギャップ部分でインパルス部分放電が発生することが知られている⁽¹⁾⁽⁷⁾。ガス絶縁変圧器の巻線絶縁にはポリエチレンテレフタレート (PET) フィルム等表面抵抗の大きな材料が使用されている。そのため、インパルス部分放電による電荷が残留した時の絶縁特性の検討の必要性が指

摘されている⁽⁷⁾。この様なことから、ターン間で部分放電が発生した後の逆極性サージ電圧印加による絶縁特性の把握も絶縁信頼性を考えた場合重要となる。

本報では以上の観点から、運転中に加わる各種サージ電圧に対する絶縁信頼性の評価の一助にすべく、変圧器巻線モデルのうち、ターン間絶縁モデルを使用して、交流電圧とインパルス電圧の重畳電圧における絶縁特性、インパルス電圧による V-n 特性および極性反転インパルス電圧印加における絶縁特性について調査した結果について述べる。

2. 試験方法

<2-1> 供試モデルと処理条件 図 1(a) (b)にモデル形状を示す。試験には図に示す 2 種類のモデルを使用した。どちらのモデルも変圧器巻線のターン間を模擬したもので、平角銅線(2.2×10mm)の上に厚さ 50 μm のポリエチレンテレフタレート(PET)フィルムを片側 0.5 mm 厚さに巻いた絶縁被覆平角銅線を抱き合わせたものである。

モデル(a)は主として部分放電開始電圧を測定するために用いたもので、後述するバランス法での部分放電開始電圧測定のため、5 本 (または 3 本) の絶縁被覆平角線で構成されている。

モデル(b)は部分放電開始電圧とともに破壊電圧を測定するために用いたモデルである。このモデルでは、並列に 2 個のサンプルに電圧を印加することによって、後述するバランス法で部分放電開始電圧を測定した。モデル(b)のみで破壊電圧を求めたのは、モデル(a)では口出し部分への沿面破壊が生じるためである。

図 1 モデル形状

Fig.1 Model structure

モデルは 90°C で 72 時間加熱乾燥を実施したのち、試験用タンクにセットし 10Pa 以下の圧力まで真空引きし、その後、0.5MPa まで SF₆ ガスを封入して試験に供した。

<2-2> 試験種類と電圧印加方法 次の 3 種類の試験を実施した。

(1)逆極性インパルス電圧交互印加試験 (以後、逆極性インパルス試験)

正極性標準雷インパルス電圧(+1.2/50 μs)を印加後同一レベルの負極性雷インパルス電圧を印加する。破壊が生じなかった場合は 2~5kV 電圧を上昇させ、正極性、同一レベルの負極性電圧を印加する。この順序の試験を破壊が生じるまで繰り返した。電圧印加の間隔は 1 分間である。

逆極性電圧印加試験とは別に試験結果を比較するため、正極性または負極性の同一極性電圧を各 1 回印加するステップアップ法でも調査した。

逆極性インパルス試験、同一極性ステップアップ法とも電圧はモデル (a) については 3 本の絶縁平角線を用いた場合では中央の線に印加した。両側の 2 本の線は立上がり 10ns を有する高周波 CT を介して接地した。また、5 本のモデルについては図 1 (a) に示すように、交互の絶縁平角線に電圧を印加した。さらに、モデル (b) に対しては同時に 2 個のサンプルを使用してそれぞれのサンプルの片側の平角線に電圧を印加し、他方は前述の高周波 CT を介して接地した。

電流法によるインパルス部分放電測定は、サンプルからの接地線がそれぞれ CT の逆方向になるように接続し、充電電流をキャンセルさせるバランス法にて行った。この場合、同時刻に両側のターン間より部分放電が発生した場合、その大きさはその測定原理から実際より小さく検出されることがある。部分放電測定の感度は電流パルスを時間積分した結果、200pC 以上測定できることを確認している。さらに、電流法による部分放電測定のほか、イメージインテンシファイア(浜松ホトニクス社製、型式 C2166)を使用して、放電光の観測を行った。

なお、モデル (a), (b) で部分放電開始電圧に差はなかった。さらに、モデル(a)の場合、絶縁被覆平角線を 3 本と 5 本使用したモデルで試験に用いたが、両方で部分放電開始電圧に差がなかった。

(2)V-n 特性試験

正極性の標準雷インパルス電圧を使用し、ステップアップ法によって求めた平均破壊電圧を 100% として、その 70~95% のインパルス電圧を破壊するまで繰り返し印加する方法で試験を行った。電圧印加の間隔は 30 秒とした。使用したモデルは (b) であり、1 度に 2 個のサンプルを使用して試験した。課電途中で片方のサンプルが破壊した場合は新しいサンプルと交換し、その後継続して電圧を繰り返し印加した。但し、10,000 回印加しても破壊が生じない場合はそこで試験を中断した。

(3)交流電圧とインパルス電圧の重畳電圧試験 (以後、重畳試験)

図2に重畳試験回路を示す。あらかじめ試験用変圧器よりモデルに所定の交流電圧を印加しておき、ブロッキングコンデンサを介してインパルス電圧発生器から標準インパルス電圧を印加することによって重畳電圧を発生させた。インパルス電圧の重畳位相は位相調整器とトリガー発生装置によって調整した。

印加電圧条件は、重畳位相とインパルス電圧極性を変え、交流電圧の極性/インパルス電圧の極性で表わした場合、(正)/(正)、(正)/(負)、(負)/(正)、(負)/(負)の4条件とした。インパルス電圧の交流電圧への重畳位相はすべてピーク($\theta=90$ 度、 $\theta=270$ 度)である。重畳時の交流電圧レベルは交流単独試験で求めた平均部分放電開始電圧を100%としたときの30、50および70%の3条件とした。図3に重畳試験での電圧波形の1例を示す。電圧印加方法は所定の交流電圧を印加した状態で、交流電圧による部分放電が発生していないことをERA法で確認後、インパルス電圧を

図3 交流/雷インパルス電圧重畳時の電圧波形

Fig.3. Wave form of ac and imp. superimposed voltage

10kV ステップで各1回破壊するまで印加するステップアップ法で行った。インパルス電圧重畳印加後は、約1分間交流部分放電の発生の有無を測定感度10pCで監視した。なお、インパルス部分放電測定を電流のバランス法で実施したため、試験はモデル(b)を同時に2個使用して行った。

3.試験結果

<3-1>逆極性インパルス試験 図4に部分放電開始電圧(PDIV)と破壊電圧(BDV)をワイブル確率紙にプロットして示す。横軸の電圧は正極性のステップアップ法で求めた平均部分放電開始電圧(37kV)を1.0で基準化してある。図に示すように、BDVおよびPDIVは電圧印加方法によらずワイブル分布の直線によく乗りワイブル分布に従うことがわかる。表1にワイブル分布関数を $F(v)=1-\exp[-(V/\alpha)^m]$ として表わした時の α :尺度パラメータ、 m :形状パラメータおよびワイブル分布から計算される50%確率PDIVおよびBDVを示す。

図4および表1に示す結果より次のことがわかる。

(1)逆極性インパルス電圧を交互に印加した時の50%確率PDIVは通常のステップアップ法で求めた正極性および負極性のPDIVと差がない。同様に、逆極性電圧印加での

図2 重畳試験回路

Fig.2. AC and imp. superimposed test circuit

図4 逆極性インパルス試験結果

Fig.4. Test results of impulse polarity reversal test

表1 ターン間絶縁モデルにおける部分放電開始電圧および破壊電圧のワイブルパラメータ

Table 1. Weibull parameters of PDIV and BDV of turn-to-turn insulation models

電圧印加方法 極性	同一極性ステップアップ法				逆極性電圧印加	
	正極性		負極性		PDIV	BDV
尺度パラメータ α	1.02	2.99	0.99	3.11	0.99	2.81
形状パラメータ m	23.9	12.9	32.6	10.5	24.3	10.3
50%確率電圧 V_{50}	1.00	2.91	0.98	3.01	0.97	2.72
備考	50%確率電圧: 正極性ステップアップ法による平均 PDIV(37kV)を 1.00 とする					

BDV も同一極性印加の場合と差がない。逆極性電圧印加の PDIV、BDV を同一極性印加の場合のそれと平均値の差の有意差検定を危険率 5% で実施した結果、いずれの組み合わせにおいても有意差無しの結果を得た。

(2) 逆極性印加によるばらつきは PDIV の方が BDV に比べて小さい。そして、BDV のばらつきは正極性、負極性の通常のステップアップ法による印加とほぼ同じである。また、PDIV のばらつきは正極性のそれと同じである。

(3) 同一極性によるばらつきも PDIV より BDV の方が大きい。そして、BDV のばらつきは正負両極性でほぼ同じであるが、PDIV のばらつきは正極性の方が大きい。

(4) 逆極性電圧印加での部分放電開始は、負極性印加後電圧を上昇させた正極性で 100% 生じた。破壊は電圧を上昇させた後の正極性で 53%，正極性印加後同一電圧での負極性で 47% が生じた。

(5) 部分放電に伴う発光をイメージインテンシファイアを使用して観察した結果、ターン間のくさび状ガスギャップの部分で発光が観測された。

図5にイメージインテンシファイアを使用しての放電光の観測例を示す。放電による光は2本の平角線が形成するくさび部分に沿って生じている。同一極性の電圧を印加した場合、一旦発光が観測されても電圧を上昇させた次のステップで発光の範囲が前のステップでの発光の範囲より狭い場合があった。同様に、部分放電電流波形も電圧上昇前に比べてパルスの数が少なくなる場合があった。これに対して逆極性電圧印加の試験においては、部分放電発生後、同じレベルの逆極性を印加した場合でも逆極性電圧印加前より広い部分で発光するとともに部分放電電流パルスの数および大きさが大きくなった。なお、電圧を上昇させ、破壊電圧近くになると、同一極性の電圧を印加した場合および逆極性を印加した場合でもターン間のくさび部全体で発光が観測された。

(6) 破壊は同一極性ステップアップ法、逆極性印加とも同じで、2本の絶縁平角線が対向する角部(図1(b) a-a断面における角部)で生じた。

<3-2> V-n 特性試験結果 図6に破壊までの回数をワイブル確率紙にプロットして示す。印加電圧 70% においては試験した6個のサンプル全てが10,000回まで破壊しなかったため、図にはプロットしていない。

図6に示すように、破壊までの回数はワイブル分布の直線上に乗り破壊までの回数がワイブル分布に従うことがわ

図5 インパルス部分放電によるターン間の発光の様子
Fig.5. Light emissions caused by impulse partial discharges

かる。表2にワイブル分布関数を $F(n) = 1 - \exp\{-(n/\alpha)^m\}$ として表わした時の α : 尺度パラメータ, m : 形状パラメータおよびワイブル分布から計算される 50% 確率破壊回数 n_0 を示す。表に示すように、形状パラメータ m は $V=85\%$ の結果を除いて 1 以下となっており、一般に初期故障型と呼ばれる故障形態となっている。

図7に V-n 特性を示す。縦軸は正極性の同一極性ステップアップ法の平均破壊電圧を 100% で示してある。また、図に示す直線は表2に示した 50% 破壊確率回数(平均回数)を最小二乗法によって直線近似して求めたものである。V-n 特性の傾きを $V = A \cdot n^{-k}$ として表わした場合、 $k = 0.026$ となる。V-n 特性試験後、10,000 回耐えたサンプル

図6 破壊確率分布

Fig.6 Probability distribution of breakdown voltage of turn-to-turn insulation models

表2 ターン間絶縁モデルの破壊電圧のワイブルパラメータ

Table 2. Weibull parameters of breakdown voltage of turn-to-turn insulation models

電圧(%)	95	90	85	80
尺度パラメータ α	7.4	297	661	5369
形状パラメータ m	0.85	0.63	1.05	0.91
平均回数 n_0	4.8	166	466	3585

図7 ターン間絶縁モデルのV-n特性

Fig.7 V-n characteristics of turn-to-turn insulation models

ルを点検した結果、絶縁表面に傷は見られなかった。破壊は他の試験と同様2本の絶縁平角線が対向する角部で生じていた。

<3-3>重畳試験結果 図8に試験結果を示す。図において、縦軸はステップアップ法で求めた標準雷インパルス単独印加時の正極性のインパルス部分放電開始電圧を100%として、また横軸は印加交流電圧のレベルで示している。なお、インパルス部分放電は、電流パルスを時間積分した電荷で200pC以上発生した場合をまた、交流部分放電は10pC以上の部分放電電荷が検出された場合を部分放電の開始とした。図に示す結果より次のことがわかる。

(1)インパルス部分放電開始電圧は印加交流電圧、重畳位相が変化してもインパルス電圧単独印加時の部分放電開始

図8 交流/インパルス電圧重畳試験結果

Fig.8 Test results of AC and imp. superimposed test

電圧と差がない。重畳時の破壊電圧は重畳位相、印加交流電圧が変化してもインパルス電圧単独印加時と差がなく、破壊電圧に与える交流重畳の影響はない。インパルス電圧単独印加時の破壊電圧と重畳時の破壊電圧を平均値の差の有意差検定を危険率5%で実施したが、どの組み合わせにおいても有意差なしの結果を得た。

(2)破壊するまでインパルス部分放電によって交流部分放電がトリガーされ、交流部分放電が発生するケースはなかった。

重畳電圧における破壊箇所はインパルス電圧単独印加時のそれと変わらず、2本の絶縁被覆平角線が対向する角部であった。

4.考察

<4-1>逆極性インパルス電圧試験結果について ターン間絶縁モデルにおけるインパルス部分放電開始は対向する絶縁被覆平角線の角部にできるくさび状のガスギャップの破壊であることが明らかになっている⁽⁷⁾。また、今回の試験結果で正極性単独印加と負極性印加の部分放電開始電圧の平均値にも差がないことがわかった。

逆極性のインパルス電圧を印加する場合も部分放電開始前においてはターン間のくさび状のギャップのガスの状態は変化が生じないと考えられる。この様なことから部分放電開始電圧が同一極性印加の場合と変わらなかったものと考えられる。同様に、逆極性電圧印加試験での部分放電開始が電圧を上昇させた正極性で決まっているのも部分放電開始電圧が正極性、負極性の単独印加で差がないことからうなずける結果である。

部分放電開始電圧以降も同極性の電圧をステップアップ

法で上昇させると部分放電は前述のように発光、電流パルスとも少なくなる場合があった。しかし、電圧を上昇させ、破壊電圧近くなると、ターン間のくさび部全体で発光が観測された。一方、逆極性電圧を印加した場合は部分放電開始電圧よりわずかに高い電圧においてもより広い部分で発光が見られるとともに電流パルスが大きくなった。これは、部分放電の発生により部分放電の発生場所である被覆平角線の角部のくさび状ガスギャップを形成する絶縁被覆(PET)表面に電荷が蓄積され、この電荷が同極性の電圧印加時の部分放電発生を抑制し、逆極性電圧印加時の部分放電の発生を促進したためと考えられる。例えば図5の放電光に見られるように、同極性のインパルス電圧を印加した場合、前の電圧によって発光した部分は次の電圧で発光が見られず、他の部分で発光している。一方、逆極性印加の場合は前の電圧で発光した部分に加えてターン間くさび部全体で発光が見られる。

破壊は同一極性電圧印加、逆極性電圧印加のいずれの試験においてもインパルス部分放電開始電圧以上で生じている。したがって破壊時にはその前のステップで生じたインパルス部分放電により絶縁物表面に電荷が蓄積されていることが予想される。しかし、破壊電圧のばらつきが異なるため、低確率部分では正極性印加と逆極性印加では差があるものの、平均値においては逆極性インパルス電圧を印加しても破壊電圧に差がなかった。これは次のように考えられる。

次項のV-n特性調査結果で述べるように、ターン間絶縁のインパルス電圧に対する破壊は初期故障型であると考えられ、部分放電発生レベルを超えたインパルス電圧を繰り返し印加しても絶縁物の劣化を引き起こしている様子は見られない。また、ターン間絶縁の破壊はPETの貫通強度で決まるため、PET表面に蓄積した残留電荷が破壊電圧にほとんど影響しなかったものと考えられる。

<4-2>V-n特性試験結果について 表1から正極性平均インパルス部分放電開始電圧は平均破壊電圧の34%であり、今回のV-n特性試験においてはいずれの電圧も部分放電が発生している領域の試験である。しかし、10,000回耐えたモデル(印加電圧:70%)も試験後の点検で絶縁被覆に損傷は見られなかった。また、ワイブル分布からその破壊形態は初期故障型であるといえる。

V=80%の場合の50%破壊回数は前述のV-n特性の式から約3,500回となる。一方、図4および表1に示した正極性ステップアップ法による破壊確率分布からV=80%における破壊確率を求めると、 $P(80\%)=1-\exp(-(2.91 \times 0.8/2.99)^{12.9})$ から、約3.9%になる。これはV-n特性による破壊確率の方が低くなっていることを意味している。これらのことから多数回印加による破壊電圧の低下は部分放電による絶縁被覆の劣化の進展によるものでなく、他の要因が支配的であったものと推定される。

ところで、変圧器の寿命期間に受ける雷撃は一般に数100回といわれている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。今回の試験結果によると破壊

電圧の低下は1,000回印加してもわずか15%であり、変圧器の工場試験電圧レベルに対する避雷器保護レベルの比が70~80%程度であることを考えると、現地での多数回サージ電圧に対しても問題とならないと考えられる。

<4-3>重畳試験結果について インパルス電圧を交流電圧に重畳印加しても部分放電開始電圧および破壊電圧はインパルス単独のそれと差がなかった。部分放電は絶縁平角線のくさび状ガスギャップの破壊である。裸電極を用いてSF₆ガスギャップについて実施された重畳試験では、重畳時の破壊電圧とインパルス単独印加時の破壊電圧とは差が無いという結果が得られている⁽⁵⁾。今回の試験は絶縁被覆された平角線を電極としているが、ガスギャップの破壊は電極間のガス空間が一定の破壊電界に達すれば生じるという点では同じである。交流重畳によって破壊の瞬間のガスギャップの電界値が高くなっているわけではないことを考えると、今回のターン間絶縁モデルの部分放電開始電圧が交流重畳によって影響されなかったことも肯ける。

また、インパルス電圧重畳によって交流電圧の部分放電がトリガーされ発生するケースはなかった。油入変圧器のモデルによる試験結果⁽¹⁾⁽²⁾によると、交流電圧がある程度高いとインパルス電圧の印加によって交流の部分放電がトリガーされ継続する場合がある。その発生の原因はインパルス部分放電がターン間のくさび状油ギャップの破壊を意味し、その時発生した気泡が交流部分放電を誘発するためと考えられている。

これに対し、ガス絶縁においてもターン間のくさび部分でインパルス部分放電による局部的なガス温度の上昇や分解ガスの発生をくさび状ガスギャップに生じることが考えられる。しかし、その熱ガスや分解ガスによるくさびギャップ部分のガスの絶縁強度への影響が小さく、交流電圧が部分放電開始電圧の70%においてもインパルス電圧の印加によって交流の部分放電がトリガーされることがなかったものと考えられる。

変圧器は通常、交流試験電圧において無部分放電となるように設計されている。運転時に加わるターン間の交流電圧はターン間電圧の高いハイセルキャップ巻線においても高々数1000Vであり、今回の重畳時の交流電圧70%の電圧値より充分低い値となっている。今回の試験結果から、印加交流電圧が交流部分放電開始電圧の70%以下であれば、インパルス電圧印加によって交流部分放電がトリガーされることがなく、インパルス破壊電圧が低下することもないことがわかった。

このようなことから運転中の変圧器にサージ電圧が侵入しても絶縁上問題になることはないといえる。これより、油入変圧器と同様、ガス絶縁変圧器においても工場試験で重畳試験の必要性はなく、インパルス電圧の単独試験で絶縁試験を行っておけば現地でのサージ電圧侵入に対しても信頼性は確保できると考えられる。

5.まとめ

ガス絶縁変圧器のターン間絶縁モデルを使用して、(1)インパルス電圧の逆極性印加における絶縁特性 (2) $V-n$ 特性試験 (3) 交流/インパルス電圧の重畳電圧における絶縁特性について調査し次のようなことが明らかになった。

(1)インパルス電圧を1分間隔で極性を变化させ交互に印加してもインパルス部分放電開始電圧、破壊電圧は同極性インパルス電圧のステップアップ法で求めた部分放電開始電圧、破壊電圧と変わらなく、逆極性印加の影響はなかった。

(2) $V-n$ 特性の試験結果、一定電圧におけるモデルの破壊までの回数はワイブル分布の初期故障型を示し、 $V-n$ 特性の傾きは $V=A \cdot n^{-k}$ としたとき $k=0.026$ であった。

(3)交流電圧/インパルス重畳電圧においてもインパルス部分放電開始電圧、破壊電圧は重畳位相、印加交流電圧に関係なく、インパルス単独の部分放電開始電圧、破壊電圧と同じであった。また、インパルス電圧重畳によって交流部分放電がトリガーされ発生するケースは無く、重畳の影響はない。

以上のように、インパルス電圧を使用して、現地で運転されている条件を考慮して、3種類の絶縁特性の調査を実施した。その結果、交流電圧重畳あるいは逆極性インパルス電圧印加はターン間絶縁のインパルス部分放電開始電圧および破壊電圧に影響を与えないこと、また、インパルス電圧の繰り返しによる破壊電圧の低下は確率的なもので部分放電による絶縁劣化の進展は認められないことなどが明らかになった。これらの結果より、現在工場試験として実施されているインパルス電圧試験で、現地での様々なサージ電圧に対する絶縁信頼性が確保できると考えられる。

(平成11年04月28日受付, 平成11年10月27日再受付)

参考文献

- (1) 井上・本多・大久保・小倉:「交流電圧に繰り返しインパルス電圧が重畳したときの変圧器モデルの絶縁強度」電学論B, 106巻2号(昭61-2)
- (2) 野々村・岩田・高須・寺西・井上・大島:「交流/雷インパルス重畳時の変圧器ターン間絶縁の絶縁特性」電気学会 高電圧研究会資料 HV-90-18(1990-9)
- (3) 山崎・唐木・高須・井上・村瀬・寺西:「ハイセルキャップ円板巻線セクション間モデルの交流/雷インパルス重畳電圧絶縁特性」電気学会電力・エネルギー部門大会 No.587 (平5)
- (4) 野々村・岩田・高須・鎌田・古川・前島:「変圧器コイル間モデルのAC/雷インパルスおよびAC/開閉インパルス重畳絶縁特性の比較」電気学会 高電圧研究会資料 HV-90-19(1990-9)
- (5) 高須・萬屋:「交流電圧、雷インパルス重畳時のGIS, 変圧器の絶縁特性」電気学会 高電圧研究会資料 HV-90-17(1990-9)
- (6) 小林・熊谷:「ガス絶縁変圧器巻線モデルの $V-t$, $V-n$

特性」電学論B, 110巻, 10-7, 533(平2)

- (7) 井上・寺西・谷口・戸田・矢成:「ガス絶縁変圧器ターン間絶縁モデルの急峻波領域における絶縁特性」電学論B, 116巻10号(平8-10)
- (8) 統計的絶縁設計調査委員会:「変電所耐雷設計に関する統計的手法の検討」電気学会技術報告(1部)第137号(昭59)
- (9) 試験電圧標準特別委員会 ワーキンググループI:「 $V-t$ 特性からみた500kV油入変圧器の交流絶縁試験の検討」電気学会技術報告(II部)第47号(昭51)

井上 保 (正員) 1949年7月3日生。1968年宮崎工業高校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。以来、電力・産業システム技術開発センターにおいて主として油入変圧器及びガス絶縁変圧器の絶縁に関する研究に従事。

寺西 常治 (正員) 1946年2月10日生。1973年3月名古屋大学大学院電気工学専攻博士課程終了。同年4月(株)東芝入社。変圧器開発設計に従事。1979年より主として変圧器絶縁に関する研究に従事。工学博士。IEEE会員。

池田 正己 (正員) 1943年9月14日生。1962年3月神奈川工業高校電気科卒業。同年(株)東芝入社。同社重電技術研究所において油入絶縁および高電圧技術開発を担当。83年浜川崎工場変圧器部に転籍、以来電力用変圧器の開発設計などの業務に従事。1999年5月より九州工業大学客員教授 電気学会論文賞、進歩賞受賞。工学博士(慶應大学)

柳父 悟 (正員) 1941年7月15日生。1964年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。主として高電圧・大電流現象に関する研究と高電圧大容量変電機器の開発に従事。工学博士 IEEEフェロー会員 電気学会 論文賞、進歩賞、著作賞等受賞, Dyke賞等受賞