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

正員 井上 保 (東 芝)
正員 寺西 常治 (東 芝)
正員 谷口 安彦 (東 芝)
正員 戸田 克敏 (東 芝)
正員 矢成 敏行 (東 芝)

Dielectric Characteristics of Turn-to-Turn Insulation Models of Gas-Insulated
Transformer under Very Fast Transient Voltages
Tamotsu Inoue, Member Tsuneharu Teranishi, Member Yasuhiko Taniguchi, Member
Katsutoshi Toda, Member Toshiyuki Yanari, Member
(Toshiba Corporation)

This paper deals with the partial discharge inception voltage (PDIV) and breakdown voltage (BDV) characteristics of turn-to-turn insulation models for SF₆ gas-insulated transformers under steep front short pulse voltages, of which waveforms are 35/65 ns and 50/370 ns. It was found out that PDIV under nano-second pulses were 1.05 ~ 1.15 times higher than those under standard impulse voltages and BDV under nano-second pulses were about 1.4 times higher than those under standard impulse voltages. The ratio of impulse PDIV to ac PDIV is 1.40 ~ 1.48 for standard impulse voltages and 1.32 ~ 1.37 for switching impulses.

キーワード: SF₆ガス, ターン間モデル, ガス絶縁変圧器, 急峻波電圧, 部分放電, 破壊

1. まえがき

SF₆ガスを絶縁媒体に用いたガス絶縁変圧器は、変電所防災の観点からそのニーズとともに適用が拡大されている。ガス絶縁変圧器は巻線の絶縁方式、冷却方式の違いから様々な方式に分類され、それぞれ275kVクラスの変圧器が製作されている⁽¹⁾。巻線の絶縁、冷却ともSF₆ガスで行うガス冷却式ガス絶縁変圧器は低電圧小容量クラスが従来より実用化されていたが、近年においては275kV、300MVAまでの変圧器が完成している⁽²⁾。ガス冷却式ガス絶縁方式の巻線には絶縁被覆平角線が使用されているが、それらの絶縁特性についてはこれまでも報告検討されている。例えば最近では、長期信頼性を検討した交流V-t特性及びインパルス電圧のV-n特性についての報告がある⁽³⁾。

ガス絶縁変圧器はその絶縁構成から、ガス絶縁開閉装置(GIS)と直結して変電所スペースを有効に活用できることが利点の1つになっている。しかしこの場合、GISの操作によって断路器サージなどの急峻波サージが発生することは良く知られていることであり⁽⁴⁾、そのサージ電圧がそのまま変圧器に侵入し、変圧器巻線線路端近傍のターン間、セクション間に急峻波電圧を発生させる。従って、変圧器の巻線絶縁強度、特に絶縁信頼性を考える場合、雷インパルス電圧のみならず急峻波電圧に対する絶縁強度の把握も重

要となる。急峻波サージ電圧に対する絶縁強度の調査は、GIS関連で不平等電極を使用した研究が多くなされている⁽⁵⁾。変圧器絶縁に対しては、油浸絶縁紙での例が報告されている⁽⁶⁾が、ガス絶縁変圧器における絶縁強度についての検討はこれまであまりないようである。

ここでは、ガス冷却式ガス絶縁変圧器のターン間絶縁を模擬したモデルを使用して急峻波電圧を始めとした各種の電圧に対する部分放電開始電圧および破壊電圧の調査結果さらに、比較のため実施した被覆した球電極を用いて調査した微小ガスギャップの部分放電開始電圧特性について述べる。

2. 試験方法

<2.1>モデルと処理条件 図1にターン間絶縁モデル形状を示す。モデルは内鉄型変圧器のターン間を模擬したもので2種類のモデルで試験した。モデル(a)は部分放電開始電圧を調査するために使用したもので平角銅線(2.2×10mm)の上に厚さ50μmのポリエチレンテレフタレート(PE T)フィルムを所定の厚さに巻いた絶縁被覆平角線を5本(または3本)を組み合わせて変圧器のターン間を模擬している。そして、その絶縁被覆平角線を挟むように絶縁スパーサが2カ所取り付けられている。このモデルでは、インパルス部分放電を感度良く測定するため、接地側の銅線を使

用して電流法のバランス回路を構成した。モデル(a)では口出し部分への沿面破壊による絶縁破壊を生じるため部分放電開始電圧のみを求め、モデル(b)で破壊電圧を求めた。

モデル(b)は部分放電開始電圧とともに破壊電圧を調査するものでモデル(a)と同じ絶縁被覆平角銅線2本を抱き合せてターン間を構成している。

モデルは加熱乾燥をしたのち試験用タンク内にセットした。そして、10Pa以下の圧力まで真空引きし、その後SF₆ガスを0.5MPaまで封入して試験に用いた。

モデルの試験個数は1試験条件5~10個である。

図2に被覆球ギャップモデルを示す。球電極は直径40mmのボールベアリングでその表面荒さは0.15μmである。その電極表面に厚さ25μmのPETフィルムを密着させて被覆している。ギャップ長は30倍の顕微鏡を使用して零点を定め、マイクロメーターを使用して調節した。試験時のギャップ長は0.5mm一定とした。試験回数は、1条件10回である。

<2.2>電圧印加方法 ターン間モデルの試験は、2種類の急峻波電圧、雷インパルス電圧(L. Imp)(±1.2/50μs)開閉インパルス電圧(S. Imp)(±250/2500μs)および交流電圧(ac)(50Hz)を印加しておこなった。被覆球電極モデル

モデル(a) (部分放電開始電圧調査用) モデル(b) (破壊電圧調査用)

図1 ターン間絶縁モデル形状

Fig. 1. Structure of turn-to-turn insulation models

図2 被覆球電極

Fig. 2. Structure of covered sphere electrode

では、2種類の急峻波電圧、+L. Imp電圧を印加し試験を行った。ターン間モデル(a)では5本組(または3本)の各銅線の交互に電圧を加え、他の銅線を接地した。ターン間モデル(b)では片方の銅線に電圧を加え、他方は接地とした。同様に、被覆球ギャップモデルでは片方の電極に電圧を加え、他方は接地とした。

(1) 急峻波電圧の発生方法 急峻波電圧の発生にはブルームライン回路を使用したパルス発生装置を用いた。図3にその試験回路を示す。ブルームライン回路の構造は二重同心状の同軸円筒線路となっており、中心円筒導体と中間円筒導体はスパイラル構造として、全長1mの装置で所定のパルス幅を得るようにしている⁽⁷⁾。発生電圧は1GHz急峻波サージセンサ⁽⁴⁾⁽⁸⁾を使用して測定した。

試験に使用した電圧波形を図4に示す。電圧波形は、立ち上がり35ns、パルス幅(ピーク電圧値の50%以上の電圧を保つ時間)65nsおよび立ち上がり50ns、パルス幅370nsである。今後これらの電圧をそれぞれ35/65ns、50/370nsと記す。

(2) 急峻波電圧の試験方法 電圧印加は予想される部分放電開始電圧(PDIV)の約50%より1~2kVステップで電圧を上昇させPDIVを求め、それ以上の電圧では2~5kVステップで上昇させるステップアップ法によった。そして、PDIVと破壊電圧(BDV)を求めた。電圧印加回数は各ステップ1回である。PDIVは銅線の接地側に貫通型の高周波CT(立ち上がり応答時間10ns)を取り付けた電流法のバランス法⁽⁹⁾とイメージインテンシファイア(1.1, 光増倍率10⁵倍)を使用して部分放電に伴う発光を撮影する方法を併用して求めた。L. Impおよび50/370ns電圧を印加し、PDIVを測定した結果、電流法による部分放電の検出と発光が観測される電圧は一致していた。しかし、パルス幅の短い35/65nsの電圧では、バランス法を用いても完全に充電電流をキャンセルできず、電流法のみではPDIVを求めることが困難な場合があった。その場合は、発光を観察する方法にてPDIVを求めた。電流法のインパルス部分放電測定で、検出された電流パルスを時間積分して部分放電電荷を求めた結果、200pC以上の部分放電の検出が可能であった。

(3) 雷インパルスおよび開閉インパルス試験方法 電圧は、インパルス発生器を用いて発生させた。電圧は急峻波電圧と同じステップアップ法で印加し、PDIV及びBDVを求めた。電圧印加回数は各ステップ1回である。

PDIVも急峻波電圧と同様の方法で求めた。

(4) 交流部分放電試験方法 電圧は予想されるPDIVの

図3 急峻波電圧試験回路

Fig. 3. Test circuit for steep front short duration pulse voltage

図4 急峻波電圧波形

Fig. 4. Voltage waveforms of steep front short duration pulse voltage

約50%より1kVrmsステップで各1分間保持しながら上昇させる1分間ステップアップ法で印加した。部分放電はERA法によって測定した。部分放電検出感度は0.7pCである。なお、交流電圧では、モデル(a)を使用してPDIVのみを求めた。

3. 試験結果

< 3. 1 > ターン間絶縁モデルの結果 図5にSF₆ガス圧0.5MPa（以下すべて絶対圧）でのac, L. Impおよび, S. ImpのPDIVと絶縁被覆厚との関係を、また図6にL. ImpおよびS. ImpのBDVと絶縁被覆厚との関係を示す。さらに図7に急峻波電圧のPDIV、BDV特性を示す。比較のため図7では+L. Impの結果も示している。試験結果の縦軸は、絶縁被覆厚0.5mmの+L. ImpのPDIV(37kV)を1.0と基準化して示してある。急峻波電圧のBDVはその発生装置の関係より絶縁被覆厚0.15mmのみを求めている。

これらの結果より次のようなことがわかる。

電圧の種類によらず、PDIV、BDVは絶縁被覆厚にほぼ比例し高くなる。また、PDIV、BDVとも印加電圧極性の違いによる差は小さい。絶縁被覆厚0.5mmのL. Imp試験結果で正、負両極性による平均値の差の有意差検定を危険率5%で実施した結果、PDIV、BDVとも有意差無しの結果を得た。

急峻波電圧のPDIVおよびBDVをL. Impのそれと比較するとPDIVは上昇傾向が小さいものの、BDVは高くなっている。

< 3. 2 > 被覆球ギャップモデルの結果 図8にSF₆ガス圧0.5MPaでの部分放電開始電界(PDIE)とパルス幅(L. Impでは50μs)の関係を示す。PDIEは被覆表面のガスギャップ部の電界である。図からPDIEはパルス幅が短くなっても余り上昇していないことがわかる。L. ImpのPDIEと比較すると、35/65nsのそれは、1.1倍となっている。

部分放電が生じると、部分放電電流パルスの発生とともに、ガスギャップ部で発光がみられた。しかし、その後PET表面を観察したが、PETの貫通孔がみられないものがあり、部分放電はSF₆ガスギャップの破壊であることが推定された。

4. 検討

< 4. 1 > ターン間モデルの部分放電の発生場所について L. Imp, S. Impとも部分放電開始時の部分放電は電圧のほぼピーク部分で生じた。また、急峻波電圧では、電圧のピークのフラット部分で生じた。図9にI. Iを使用して観測した35/65nsでの発光の様子を示す。部分放電が生じると電流パルスの発生とともにターン間で形成されるくさび部分と思われる部分で発光が認められた。この発光は急峻波電圧、L. Imp, S. Impでは電圧を上昇させても必ずしも大きく広がらず、むしろ1ステップ前で発光していた部分は次のステッ

図5 L. Imp, S. Imp, acの 部分放電開始電圧

Fig. 5. Partial discharge inception voltages under L. Imp, S. Imp and ac

図6 L. Imp, S. Impの破壊電圧

Fig. 6. Breakdown voltages under L. Imp and S. Imp

図7 急峻波電圧の試験結果

Fig. 7. Test results of steep front short duration pulse voltage

ブでは発光が認められないことがあった。しかし、破壊前の電圧では、ターン間全体で発光がみられた。これらの様子は、印加電圧の極性及び電圧の種類によらずほぼ同じであった。

L Imp試験時の部分放電開始時の電流パルスを積分して部分放電電荷を求めると500~800pCであった。部分放電電荷は電圧を上昇させても必ずしも大きくならず、小さくなる場合もあり、PDIVの1.5倍程度までは500~3000pCであった。

部分放電に伴う発光が前述のような振る舞いを示すのは、部分放電のストリーマによって、絶縁被覆表面に電荷蓄積が生じ⁽¹⁰⁾、次のステップでの部分放電の発生を抑制するためと考えられる。

一方、交流電圧の場合は、部分放電開始時の部分放電電荷は、50~70pCであり、電圧を上昇させるとL Impの場合とは異なり、部分放電電荷は急激に大きくなり、PDIVの1.4倍では1000pC以上となった。これは、電圧印加時間が1分間とパルス電圧と比較し長時間であることに加え、電圧極性が連続して反転しているためと考えられる⁽¹¹⁾。なお、静止写真で1分間開放によって撮影観測した結果、ターン間のくさび部分全体で発光が認められた。

部分放電発生後モデルをタンクより取り出し点検したが、絶縁物表面に放電痕は認められなかった。しかし、トナーによって帯電の有無を調査した結果、ターン間のくさびギャップに相当する部分で帯電の発生が確かめられた。この結果や部分放電に伴う発光場所から、インパルスで生じる部分放電はくさび部分のガスの破壊によるものと考えられる。

図10に50/370ns電圧での部分放電発生時の電流パルスの例を示す。電流パルスは正、負両極性で生じている。これは充電電流をキャンセルさせるため、2本の銅線から接地電流が逆向きに流れるようにCTに接続している。従って部

図8 被覆球ギャップモデルの試験結果

Fig. 8. Test results of spherical model

図9 部分放電発生による発光

Fig. 9. Light emission by impulse partial discharge

図10 部分放電による電流パルス
Fig. 10. Current pulses by impulse partial discharge

分放電で2本の銅線に流れ込んだ電流は極性が反対になる。つまり、正パルスは高周波CTの順方向に部分放電パルス電流が流れるターン間で、また負パルスは逆方向のターン間で部分放電が発生したことを意味している。

< 4. 2 > V-t 特性 ターン間モデルを使用して交流電圧から急峻波電圧までの時間範囲で求めたPDIVおよびBDVをV-t特性として図11、図12に示した。なお、縦軸はL. Impでの正負それぞれの平均PDIVおよびBDVを1.0とし、横軸はそれぞれの電圧のパルス幅あるいは半波尾長で示してある。

PDIVは波尾長が短くてもその上昇傾向は小さく、たとえば、パルス幅65nsでは標準波インパルス電圧の1.05~1.15倍となっており、被覆球ギャップのPDIEとほぼ同じ特性である。一方、BDVはS. Impのうち、+S. Impの絶縁厚0.3mmの結果がL. Impと比較して高くなっているが、他の結果はL. ImpとS. Impではあまり差がない。なお、+S. Imp, 0.3mmの結果のみがL. Impと比べて高くなった理由は不明である。そして、BDVは急峻パルス電圧で上昇し、パルス幅65nsでL. Impの1.3~1.4倍となっている。

部分放電の発生は、部分放電に伴う発光の観測からターン間にできるくさび状のガスギャップの破壊であることがわかった。したがって、ターン間モデルのPDIVは被覆電極微小ギャップでのガスの破壊特性に従うと考えられる。このようなことから、被覆電極を用いて、被覆微小ギャップでのPDIEを測定したが、35/65nsの急峻波の場合でもL. Impに対して1.1倍程度しか上昇しなかった。

ところで、被覆電極微小ギャップのPDIEはSF₆ガスの臨界破壊電界と比べ、約1.4倍となっている。被覆微小ガスギャップの破壊電界は電極表面からの初期電子の発生が抑制されるため裸電極でのBDVより高くなるのが既に確かめられており、このときの初期電子の供給源として、被覆表面からの電子の電界放出が推定されている⁽¹²⁾。この考え方によれば、被覆微小ギャップにおいては被覆表面の電界がある値になれば、初期電子は十分供給されることになる。さらに、準平等電界の微小ギャップでは、ストリーマの形成時間遅れは極めて短いと考えられる。このようなことから、急峻波電圧においてもPDIVの上昇傾向が小さくなったものと考えられる。

これに対し、ターン間モデルが全路破壊にいたるためには、絶縁被覆を貫通する必要がある。破壊痕跡を観察する

図11 部分放電開始電圧のV-t特性

Fig. 11. V-t characteristics of partial discharge inception voltage

図12 破壊電圧のV-t特性

Fig. 12. V-t characteristics of breakdown voltage

と、被覆表面のフィルムが一部炭化し、溶けた跡があった。すなわち、くさび部分のガスギャップで発生した部分放電のエネルギーで絶縁フィルムが熱的損傷を受け破壊に至ったと推定される。したがってBDVは、印加電圧のエネルギーに左右され、印加時間の短い急峻波電圧のBDVがL. Impに比べて高くなったものと考えられる。

< 4. 3 > インパルス比 表1にL. Imp及びS. Impに対するPDIVと交流PDIVとの比(インパルス比)を示した。これらより以下のことがわかる。

(1) L. Impに対するPDIVのインパルス比は1.40~1.48、S. Imp電圧に対するインパルス比は1.32~1.37の範囲内にある。

(2) インパルス比は絶縁被覆厚さに依存しない。

これらのインパルス比は同軸円筒ギャップで求められたSF₆ガスギャップのインパルス比⁽¹³⁾とほぼ等しくなっている。

表1 PDIVのインパルス比 (SF₆ガス圧0.5MPa)
Table 1. Impulse ratio of PDIV (SF₆ gas: 0.5MPa)

電圧	S. Imp		L. Imp	
	正極性	負極性	正極性	負極性
被覆厚				
0.3mm	1.33	1.37	1.41	1.48
0.5mm	1.34	1.32	1.43	1.40
0.6mm	1.34	1.37	1.41	1.44

5. まとめ

ガス絶縁変圧器ターン間絶縁モデルを使用して急峻波電圧を始めとして各種電圧でのPDIVおよびBDVを求め次のようなことが明らかになった。

(1) ターン間モデルのインパルス部分放電はターン間に形成されるくさび部分で発光を伴って生じ、PDIVは絶縁被覆厚にほぼ比例して高くなる。また、インパルスBDVも絶縁被覆厚が厚くなるほど高くなる。

(2) ターン間モデルのインパルスPDIV、BDVに印加電圧の極性による相違は認められない。

(3) ターン間モデルのPDIVは波尾長が $1\mu\text{s}$ 以下になっても上昇傾向が小さい。一方、BDVは波尾長が短くなると上昇する。パルス幅65nsの急峻波電圧の場合、標準波インパルス電圧と比べPDIVが1.05~1.15倍、BDVが1.4倍となった。これは、PDIVはターン間にできるくさびギャップ部分のSF₆ギャップの破壊で決まるのに対し、BDVは被覆の絶縁破壊で決まるためと考えられる。このことは被覆微小ガスギャップの試験結果からも確かめられた。

(4) 雷インパルス電圧に対するインパルス比は1.40~1.48、開閉インパルス電圧に対するインパルス比は1.32~1.37の範囲内にある。

なお、今回の破壊試験結果はステップアップ法の結果であり、今後インパルス部分放電による残留電荷の影響についても検討する必要があると考えられる。

(平成8年1月22日受付、同年5月15日再受付)

参考文献

- (1) 塩野、池田、川嶋：「ガス絶縁変圧器の現状と動向」，電学論B，110-7，522(平2)
- (2) 高橋、伏見、濱田、戸田、小林、池田、寺西、稲葉：「275kV 300MVA ガス冷却式ガス絶縁変圧器の完成」，平6年 電力エネルギー部門大会 論文2 No.585 (平6)
- (3) 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，10-7，533(平2)
- (4) Y.Yanabu, H.Murase, H.Aoyagi, H.Okubo, Y.Kawaguchi "Estimation of Fast Transient Over-voltage in Gas-Insulated Substation", IEEE Transaction on Power Delivery Vol.5, No4 Nov.1990
- (5) S.Matsumoto, H.Aoyagi, H.Murase, Y.Ozawa, I.Ohshima: "Non-Uniform Field Flashover Characteristics in SF₆ Gas Under Positive Steep-Front and Oscillating Impulse Voltages", IEEE OIC581-9 PWRD Oct.1990
- (6) A.J.Vandermaar, M.G.Wang, J.B.Neilson, K.D.Srivastava "The Characteristics of Oil-Paper Insulation Under Fast Front Impulse Voltages", 8th ISH, pp.239-242, 1993
- (7) T.Teranishi, et al "A 600kV Blumlein Modulator for an X-Band Gystron", 8th IEEE Pulsed Power Conference, pp.315-318 San Diego, June, 1991
- (8) 村瀬、大久保、青柳、柳父：「GIS用1GHz急しゅ波サージセンサの開発」，電学論 B，109,1(平元)
- (9) A.Inui, T.Inoue, T.Teranishi, H.Murase, I.Ohshima, K.Toda

"Dielectric Characteristics of Static Shield for Coil-End of Gas Insulated Transformer", IEEE EI, Vol.27, pp.572-577, June (1992)

(10) H.Muramoto, Y.Yamagata, A.Inui, T.Teranishi, I.Ohshima, T.Yanari "Partial Discharge Characteristics of Wedge Gap in SF₆ Gas-Insulated Transformer" 7th ISH, 31.10 pp.45-48 1991

(11) 乾、寺西、大久保、柳父「SF₆ガス中くさびギャップにおける部分放電特性」，電学論 A, 110, 2(平2)

(12) 花井、寺西、村瀬、大島「雷インパルス電圧に対するSF₆ガス中被覆微小ギャップの絶縁特性」平3年 電力エネルギー部門大会 論文1 No.43 (平3)

(13) 川口、毛受：「SF₆ガス絶縁の技術的諸問題」東芝レビュー、25-2(昭45)

井上 保 (正員) 1949年7月3日生。1968年3月宮崎工業高校電気科卒業。同年4月(株)東芝入社。以来重電技術研究所において主として油入変圧器及びガス絶縁変圧器絶縁の研究に従事。

寺西 常治 (正員) 1946年2月10日生。73年3月名古屋大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月(株)東芝入社。変圧器開発設計に従事。79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。

谷口 安彦 (正員) 1947年8月25日生。1968年3月有明工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。以来、重電技術研究所において、がいし汚損及び変圧器絶縁の研究に従事。

戸田 克敏 (正員) 1956年12月1日生。1981年東京大学大学院電気工学修士課程修了。同年4月(株)東芝入社。主として電力用変圧器、ガス絶縁変圧器の開発に従事。

矢成 敏行 (正員) 1938年8月1日生。1962年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。主として電力用変圧器の開発ならびに設計に従事。1984年電気学会論文賞受賞。工学博士