超高压不燃変圧器の実用化

正員 水野和宏 (中部電力株式会社)

正員 遠藤 馨 (日立)

正員 坂元 健 (日立)

正員 藤田裕幸 (日立)

正員 平石清登 (日立)

Practical Operation of Perfluorocarbon Immersed 275kV Transformers with Compressed SF₆ Gas Insulation

Kazuhiro Misuno, Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Takeshi Sakamoto, Member Kaoru Endo, Member (Hitachi)

Hiroyuki Fujita, Member Kiyoto Hiraishi, Member (Hitachi)

A perfluorocarbon (PFC) immersed 275kV transformer with compressed SF₆ gas insulation has been under development. This paper clarifies the basic characteristics about cooling and insulation of PFC and the AC partial discharge inception voltage and time characteristics of PFC immersed insulation. It is shown that a prototype 275kV 100MVA three phase transformer can be operated without any trouble during the long-term overvoltage test. This prototype has the AC partial discharge inception strength of higher than 1.5 times the AC test voltage and the lightning impulse breakdown strength of 1.5 times the test voltage. A 275kV 250MVA three phase transformer was developed and is being operated at Abe substation of Chubu Electric Power Co., Inc. The transformer have been operating satisfactory.

キーワード : 変圧器、不燃、パーフロロカーボン、SF₆ガス、長期信頼性

1. まえがき

近年、大都市における電力需要の増大に対応するため、都市の中心部に超高压系統を導入することが進められている。大都市の地下変電所に設置される超高压・大容量変圧器としては、ガス絶縁開閉装置に直結できること、および防災の観点から不燃性を有することが望まれる。SF₆ガス絶縁変圧器はすでに実用化されているが、SF₆ガスの冷却性能が絶縁油に比べて劣るため、当初超高压300MV Aクラスの送電用変圧器の実現は特に小型軽量化の面で困難であった。このため、油入変圧器に代わって、フロロカーボン系の不燃性液体を用い、SF₆ガス絶縁と組み合わせた大容量変圧器の開発が各所で進められた。

(1)~(6)

筆者らも、不燃液体としてパーフロロカーボン (PFC) を用い、SF₆ガス絶縁とを組み合わせた超高压・大容量変圧器の開発を進めてきた。PFCの基礎絶縁および冷却特性の解明、275kV 100MVA三相実規模試作

変圧器による長期課電試験、雷インパルス破壊試験による設計構造の検証というステップを経て実用器として275kV 250MVA三相変圧器を製作し、中部電力の安倍変電所に採用し、営業運転を通じて設計の妥当性を確認した。本論文ではこれらの内容について報告する。

2. 超高压不燃変圧器の概念構造

PFCを用いた超高压不燃変圧器の概念構造を図1に示す。PFCは高価であるため、できるだけ液量を減らすため、巻線と鉄心を絶縁筒内に収納し、その中にPFCを充たし絶縁筒とタンクとの間の絶縁は高気圧SF₆ガスで行うこととした。PFCは巻線と鉄心中を流れ、絶縁および冷却媒体として作用する。PFCは電力用変圧器に使用されている絶縁油に比較して動粘度が非常に低く冷却構造を適切に工夫することにより鉄心および巻線を均一に効率良く冷却することができる。PFCとSF₆ガスを仕切るため、絶縁筒上部には、セパレータを置く。これは液温の変

化により液が膨張、収縮するのに応じて変形するダイヤフラムの機能も有する。PFCの絶縁強度を高めるため、セパレータを介してSF₆ガス圧が加えられる。SF₆ガス圧は、20℃において4500hPaとした。これは、周囲温度-20℃においてガス圧3000hPaを確保すること、ガス漏れ量を考慮して決めた。PFC液は十分に除塵され、脱気、脱水したのち絶縁筒内に注入され絶縁信頼性が高められる。

このような構造とすることで、変圧器の不燃化だけでなく、コンサバータが不要となって変圧器高さ、容積が大幅

図1 PFC変圧器の概念構造図

Fig. 1. Structural concept of PFC Transformer

に低減され、しかもガス絶縁開閉装置と容易に直結することができ、地下変電所の所要容積、面積の低減に貢献できる。

3. PFCの基礎特性

PFCは完全にフッ素化された不活性液体で、無色透明、無味無臭であり、不燃性を示す。冷却用としてはスーパーコンピュータの冷却や、新幹線ひかりなどの車載用整流器の冷却などに使用されており、冷却性能が高く化学的に安定な液体である。

〈3・1〉PFC液の物性値 PFC液の物性値を変圧器油と比較して表1に示す。PFC液は不燃性であるほか動粘度が極めて低いため（常温で変圧器油の1/10）、優れた冷却性能を発揮する。また、絶縁耐力も常圧で変圧器油と同等で、良好な絶縁特性を有している。PFC液の沸点は大気圧で約100℃と変圧器油に比べて低い。

〈3・2〉冷却特性 PFC液は動粘度が小さいため、変圧器コイル内の流動特性は変圧器油と大きく異なる。

図2は変圧器の円板巻線を模擬した二次元モデルで2つの折流区を模擬している。1折流区当たり10個のコイルからなっている。各折流区の水平ダクト間隙を2.0mmと5.0mmとし、PFC液の流れ方向の流路幅は9.0mmとしてい

表1 PFC液の物性値

Table 1 Characteristics of PFC in comparison with mineral oil

項 目	PFC液	変圧器油
引 火 点 (℃)	な し	130
密 度* (g/l)	1760	870
動 粘 度* (cSt)	0.8	7.5
沸 点 (℃)	100	280~450
比 誘 電 率	1.86	2.2
比 熱* (cal/g・℃)	0.25	0.45
膨 張 係 数 (1/℃)	14×10^{-4}	7.7×10^{-4}
熱伝導率* (kcal/m・h・℃)	0.05	0.11
交流絶縁破壊電圧 (kV/2.5mm)	> 60	> 60

(注) *は25℃における値

る。コイルはヒーターを埋め込んだ金属板で模擬されている。この二次元モデルにより流量や熱流束を変えて冷却特性を調べた。⁽¹⁰⁾

図3は1折流区の圧力損失の流量依存性を示す。変圧器油の圧力損失は水平ダクト間隙2.0mm流量50ℓ/minで3000hPa程度である。従って、PFC液を用いた場合の圧力損失は変圧器油に比べて非常に小さいことがわかる。図4はコイルからの平均熱流束が2.3kW/m²のとき、コイル表面の温度上昇分布を示すものである。水平ダクト間隙5.0mmの場合には全体的に温度上昇が高い。特に入口付近で非常に遅く、出口部で速いというアンバランスな流速分布になるためである。一方、水平ダクト間隙2.0mmの場合には、冷媒の流れが各水平ダクトに対してほぼ一様となるため、コイルの温度上昇もほぼ均一になっている。この場合コイル表面の温度上昇も低く、計算値とも良く一致している。油入変圧器では水平ダクト間隙は5mm以上であるが、PFC液の場合は水平ダクト間隙を2mmと狭くした方が熱伝達率も高く冷却面でも有利であり、巻線寸法の低減が可能となる。

〈3・3〉絶縁特性 図5はコイル間絶縁モデルを用いて、PFC液の交流部分放電開始電圧及び雷インパルス破壊電圧と液面圧力の関係を調査したものである。液面圧力が1000hPa (1kgf/cm² (大気圧)) では交流及び雷インパルス破壊電圧とも変圧器油とほぼ同等の絶縁耐力を有する。液面圧力の上昇と共に雷インパルス破壊電圧は上昇し、圧力依存性が見られるが、交流部分放電開始電圧は液面圧力にはあまり依存しないことがわかる。交流及び雷インパルスの絶縁耐力は3000hPa (3kgf/cm²) の圧力下では1000hPa (1kgf/cm²) の場合の約1.3倍に向上している。液面圧力を高くすることによって発泡を抑制しガスボイド放電をなくす効果があるためである。

図6は交流絶縁破壊強度のギャップ長依存性を示すが、変圧器油の場合よりも傾きは平坦になり、破壊強度も1.5倍程度優れた液体である。変圧器油に比べて大きな絶縁強度があり、絶縁寸法の縮小が可能である。⁽⁹⁾

図2 二次元冷却モデル
Fig. 2. Two-dimensional cooling model

図3 流量と圧力損失の関係

Fig. 3. Relationship between flow rate and pressure loss in a section with baffles in the two-dimensional cooling model

図4 コイル温度上昇

Fig. 4. Temperature rise distribution on the coil surface in the two-dimensional cooling model

4. PFC絶縁の部分放電開始V-t特性

変圧器の長期的な絶縁性能を把握するには、PFC絶縁の部分放電開始V-t特性を明らかにしておく必要がある。そこで、ターン間絶縁を模擬した絶縁モデルと、コイル間絶縁を模擬した絶縁モデルの二つのモデルを使って部

図5 コイル間モデルの絶縁特性

図6 交流絶縁破壊強度のギャップ長依存性

Fig. 6. Gap length dependence of AC breakdown strength

分放電開始のV-t特性を調べた。図7に各モデルの構成を示す。最低ガス圧を想定して、いずれも3000hPaのPFC中で試験している。

ターン間絶縁モデル、コイル間絶縁モデルの部分放電開始

V-t特性をそれぞれ図8、図9に示す。V-t特性を $V = kt^{(-1/n)}$ で表すと、

ターン間絶縁モデルでは $n = 8.8$

コイル間絶縁モデルでは $n = 6.0$

となった。これらのnの値は、油浸紙絶縁での $n = 2.4$ に比べて大きく⁸⁾、より平坦な特性であった。

コイル間絶縁モデルにおける部分放電開始電圧をワイブルプロットした結果を図10に示す。形状パラメータは $a = 0.47 \sim 0.69$ であった。ターン間絶縁モデルでは $a = 0.42 \sim 0.53$ であり、いずれも初期故障形であった。

(1) ターン間モデル

(2) コイル間モデル

図 7 絶縁モデルの形状

図 8 ターン間絶縁モデルの部分放電開始V-t特性

Fig. 8. PDIV-t characteristics of turn-to-turn insulation model

図 9 コイル間絶縁モデルの部分放電開始V-t特性

Fig. 9. PDIV-t characteristics of inter-coil insulation model

5. 275kV100MVA実規模試作変圧器

第2節で説明した概念構造での実用性を確認するため、275kV100MVAの実規模変圧器を試作し、各種の性能確認試験及び、特殊試験を実施した。^{(7),(11)}

実規模試作変圧器の仕様を表2に示す。

図 10 コイル間モデルでの部分放電開始ワイブルプロット

Fig. 10. PDIV-t characteristics for inter-coil insulation model plotted in Weibull chart

表 2 実規模試作器の仕様

Table 2 Specifications of Prototype transformer

項 目	仕 様
電 圧	275 / 33 kV
容 量	100 MVA
冷 却 方 式	送液風冷式
周 波 数	60 Hz
相 数	3 相
インピーダンス	2.2 %
絶 縁 種 別	E 種
試 験 電 圧	一次: AC460kV, LIWL: 1050kV 二次: AC 70kV, LIWL: 200kV
封入ガス圧	4500 hPa

表 3 実規模試作器性能試験結果

Table 3 Performance test results of prototype transformer

項 目	試作変圧器	油入変圧器
周温からの液温上昇	3.4℃	3.5℃
周温からの巻線温度上昇	4.5℃	5.5℃
無負荷損失	4.4kW	4.4kW
負荷損失	4.75kW	4.64kW
騒音	6.8dB(A)	7.4dB(A)

今回の概念構造を採用した結果、同一仕様の油入変圧器に比べて中身重量は約9.4%、総重量は約8.2%、容積は約7.5%に小さくなっている。

実規模試作変圧器の性能試験結果を表3にまとめて示す。絶縁試験ではAC、雷インパルス電圧とも試験電圧に異常無く耐えることを検証できた。PFC液により直接冷却する構造としているため、巻線の温度上昇が低いこと、および騒音が6.3ホンと低いことが特長である。

6. 長期信頼性の検証

PFC変圧器の長期信頼性を確認するため、実規模試作変圧器の長期課電試験を実施した。⁽⁸⁾

〈6・1〉長期課電試験の考え方 試験電源の都合上、連続通電ができなかったため、1.2E（E；常規運転電圧）で1日8時間の通電時間とし、それを積算して、長期試験を行うこととした。その際、次のような考え方で試験電圧と累積課電時間を決めた。

部分放電開始電圧Vと時間tに関する確率分布は、次の2変数ワイブル分布 $P(V, t)$ で与えられるとする。

$$P(V, t) = 1 - \exp \{ -(V/V_0)^m \cdot (t/t_0)^a \} \quad (1)$$

ここで、mは電圧形状パラメータ、aは時間形状パラメータであり、 $n = m/a$ の関係がある。

部分放電が発生しない確率 $R(V, t)$ は次式で与えられる。

$$R(V, t) = 1 - P(V, t) = \exp \{ -\theta \cdot V^m \cdot t^a \} \quad (2)$$

ここで、定数 $\theta = -1 / (V_0^m \cdot t_0^a)$ である。

電圧Vで連続課電時間t（分）を1サイクルとし、これをN回繰り返しても部分放電が発生しない確率は、

$$R^N(V, t) = \exp \{ -\theta \cdot V^m \cdot t^a \cdot N \} \quad (3)$$

である。今、1.2Eで1日8時間連続課電し、これをN回繰り返す、その間に部分放電が発生しない確率を $R^N = 0.98$ とすると、

$$\theta = \ln(0.98) / (1.2^m \cdot (8 \cdot 60)^a \cdot N) \quad (4)$$

である。ここで、 $R^N = 0.98$ は正規分布での 2σ のときに相当する。実器の運転条件として、運転期間を30年とし、その間に次のような過電圧が変圧器に加わると仮定する。

負荷遮断時を考慮して、 $1.45E \times 0.2$ 秒が3回

一線地絡時を考慮して、 $1.25E \times 2.0$ 秒が100回

前記の基礎モデルでの試験結果より、部分放電開始V-t特性の傾きnとして小さい方の $n = 60$ を選び、時間形状パラメータは $a = 0.5$ とする。 $V = k \cdot t^{-1/60}$ の関係をを用いて、上記過電圧を常規運転電圧（1.0E）での時間に換算すると、それぞれ $3 \times 1.45^{60} \times (0.2/60) \div 48.1 \times 10^6$ 分、 $100 \times 1.25^{60} \times (2.0/60) \div 2.2 \times 10^6$ 分となり、1.45Eの過電圧分が大部分を占める。上記運転条件で無部分

図11 累積課電時間と実器運転期間中の無部分放電信頼度の関係

Fig. 11. Relationships between probability of no partial discharge occurrence in transformer for 30 years and total summation time of the overvoltage

放電である確率と1.2E累計課電時間との関係を求めると、図11のようになる。V-t特性の傾きnを40、50とした場合も同様に計算され、図11にプロットされている。

〈6・2〉長期課電試験 図11において安全側に見て $n = 40$ をとり、前記運転条件で無部分放電である信頼度Rが正規分布での 3σ に相当する99.865%になるのは、1.2Eの過電圧試験で累計568時間課電したときである。実際には、さらに余裕を見て総計720時間の課電試験を行うことにした。このとき、 $n = 40$ でのRは99.89%であり、 $n = 60$ としたときのRは99.97%とさらに高くなる。

図12は長期課電試験の状況である。課電試験期間中部分放電の発生は無く、PFCの電気的特性も変化は無く、高い絶縁信頼性を有することを検証することができた。

課電試験に引き続いて110%の過励磁試験を行い、鉄心の温度上昇による材料の安定性を調べた。過励磁試験の累積課電時間は過電圧試験と同じ720時間とした。PFC液温が最も高く、外気温により35.0～48.0℃に変化したが、鉄心表面、鉄心締め付金具、タンク表面などの温度はPFC液温より低く、問題ない値であった。試験期間中、騒音、振動とも異常は認められなかった。

長期課電試験の前後におけるPFC中のガス分析結果を行った。SF₆とCF₄に少量の増加が認められた。CF₄はPFC中にもともと多量に存在する低沸点成分である。SF₆ガスはゴム膜セパレータから透過してきたと考えられる。この程度の増加では絶縁性能には影響を与えなかった。

7. 苛酷試験

実規模試作変圧器の長期課電試験後、一般特性を測定し、課電試験前と特性に変化がないことを確認した後、苛酷試験を行った。PFC液循環状態での交流耐電圧試験、負極性雷インパルス耐電圧試験、零気圧交流耐電圧試験では、部分放電の発生はなく、各試験条件に耐えることを確認した。交流過電圧試験については、試験電圧の150%（690kV）まで課電し、部分放電の発生なく耐えるこ

図12 長期課電試験状況

Fig. 12. Prototype 275kV 100MVA transformer under overvoltage test

とを確認した。

雷インパルス耐電圧試験では、V相巻線の高電圧試験用ブッシングに付け代え、V相巻線端子に雷インパルスの全波電圧、截断波電圧を印加した。275kVの試験電圧（全波1050kV）を100%とし、100%電圧から10%ピッチで昇圧し、絶縁破壊するまで試験を行った。140%（全波1470kV）電圧までは異常なく耐えたが、150%（全波1575kV）電圧に昇圧した第1回目印加で絶縁破壊した。この裕度は油入変圧器と同等であり十分な値といえる。

雷インパルス試験で絶縁破壊させたV相巻線を解体し、巻線の点検を行った。油入変圧器での放電例と比べて、破壊痕跡には特徴的なことはなかった。また、その他の巻線や鉄心、タンク表面などについて点検を行ったが、締め付け部の緩み、放電、加熱、錆びなどによる変色などの異常は認められなかった。これらにより、PFC変圧器が実用性能を十分有することを検証できた。

8. 275kV 250MVA 実用変圧器

本研究で開発した構造を適用した不燃変圧器を製作し、実使用状態での運転特性の確認を行った。表4に実用器の仕様を示す。

この実用器を実変電所に設置する際、現地連続監視システムとともに設置し、異常診断を行いながら運転を支援するとともに、データ収集を行った。変圧器は1991年6月より、営業運転に入り現在まで順調な運転を継続している。図13は275kV 250MVA実用器を実変電所に設置した状況で、左側がPFC変圧器、右側が同一仕様の油入変圧器である。PFC変圧器は油入変圧器に比べて、中身重量、総重量、変圧器高さ、据付け面積、容積がそれぞれ、90%、82%、84%、96%、81%に小さくなっている。また、コンサベータが不要であること、スペーサによってGISに直結できることが特長である。

表4 275kV 250MVA 実証器仕様
Table 4 Specifications of 275kV 250MVA PFC transformer

項 目	仕 様
電 圧	275 / 77 kV
容 量	250 MVA
冷 却 方 式	送液風冷式
周 波 数	60 Hz
相 数	3 相
インピーダンス	2.2 %
絶 縁 種 別	E 種
試 験 電 圧	一次: AC460kV, LIWL: 1050kV 二次: AC160kV, LIWL: 400kV
封入ガス圧	4500 hPa
騒 音	50 ホン

図13 中部電力株式会社安倍変電所275kV250MVA三相PFC変圧器（左側）と三相油入変圧器（右側）

Fig. 13. 275kV 250MVA PFC-immersed transformer (left side) and conventional oil-immersed transformer (right side) with the same specifications. These are operating now at Abe Substation of Chubu Electric Power Co., Inc.

9. まとめ

不燃性で冷却特性に優れたPFCを用いた大容量不燃変圧器を開発した。今回開発した不燃変圧器の特長は以下のとおりである。

(1) 巻線及び鉄心の構造は従来の油入変圧器と基本的に同一構造であり、確立された製作法が適用でき、十分な信頼性を有する。

(2) 冷却をPFC液で行うため、冷却特性が良くコイル間の間隙を小さくでき、変圧器の小形化が可能である。同一仕様の油入変圧器と比較すると、容積を約80%に低減でき、都市部の地下変電所に採用することにより、地下変電所の所要容積を低減できる。

なお、今回開発した方式の不燃変圧器については、平成6年度に運転開始する中部電力の地下変電所に採用する予定である。

(平成6年7月27日受付)

文 献

- (1) J.R.Morris et.al : "A New Concept for a Compressed Gas-Insulated Power Transformer", 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp.178-183, April 1-6, 1979.
- (2) W.J.McNutt et.al : "Technology Development for Advanced Concepts in Gas-Insulated Power Transformers", IEEE Transactions pp.2171-2177, July 1982.
- (3) EPRI Report, "Gas/Vapor- and Fire-Resistant Transformers", EI-1430, June 1980.
- (4) Y.Harumoto et.al : "Development of 275kV EHV Class Gas-Insulated Power Transformer", IEEE Transactions on Power Apparatus and systems,

Vol.PAS-104, No.9, pp.2501-2507, September 1985.

(5) H.Muramoto et.al: "Development and Application of the 275kV-300MVA Separate-Cooling/Sheet-Winding Gas-Insulated Transformer", 1991 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp.599-605, September 22-27, 1991.

(6) Y.Mukaiyama et.al: "Development of a Perfluorocarbon Liquid Immersed Prototype Large Power Transformer with Compressed SF₆ Insulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, No.3, pp.1108-1116, July 1991.

(7) I.Takagi et.al: "Basic Characteristics Perfluorocarbon for Large Power Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.4, pp.1809-1825, October 1988.

(8) 遠藤他: 変圧器絶縁の長時間交流V-t特性 (2)、昭和58年電気学会全国大会633

(9) 高木他: パーフロロカーボン液及びその液浸複合絶縁系の絶縁破壊特性、第22回電気絶縁材料シンポジウム (平成元年10月)

(10) 高木他: 不燃変圧器巻線の冷却特性、平成元年度日本機械学会日立地方講演会410 (平成元年9月)

(11) 向山他: 275kV 100MVA 三相不燃変圧器の実規模試作 平成元年電気学会全国大会820

藤田 裕幸

(正員) 1955年12月7日生まれ。80年3月広島大学大学院工学研究科材料工学専攻博士課程前期修了。同年4月(株)日立製作所入社。以来、同社国分工場にて大形変圧器の設計に従事。

平石 清登

(正員) 1938年8月25日生まれ。62年3月東京工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。以来、同社国分工場にて大形変圧器の設計開発に従事。

水野 和宏

(正員) 1958年4月23日生まれ。83年3月豊橋技術科学大学電気電子工学専攻修士課程修了。同年4月中部電力(株)入社。主として変電機器の技術開発業務に従事。

坂元 健

(正員) 1941年1月17日生まれ。65年3月九州大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。以来、同社日立研究所、機械研究所にて電気機器の冷却、伝熱の研究に従事。日本機械学会会員。日本伝熱学会会員。

遠藤 馨

(正員) 1938年10月19日生まれ。57年3月福島県立喜多方商工高校卒業。同年4月(株)日立製作所入社。以来、同社日立研究所にて変圧器の絶縁に関する研究に従事。