275 kV液冷却式ガス絶縁変圧器の開発

正員 長谷川 泰三 (関西電力)
 正員 別井 孝司 (関西電力)
 正員 大西 修一 (関西電力)
 正員 伊藤 克明 (三菱電機)
 正員 光庵 豊一 (三菱電機)
 正員 牧野 芳弘 (三菱電機)
 正員 中澤 宏司 (三菱電機)

Development of 275 kV Liquid Cooling Type Gas-Insulated Transformer

Taizo Hasegawa, Member, Takashi Betsui, Member, Shuichi Onishi, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc), Katsuaki Itoh, Member, Toyokazu Kohan, Member, Yoshihiro Makino, Member, Hiroshi Nakazawa, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Construction of 275 kV and 500 kV substation in densely populated area is thought to be necessary in the future to keep stable supply of electricity. Using gas-insulated transformer is now considered for substations because gas-insulated transformers are non-frammable and non-explosive. Since completion of 77 kV gas-insulated transformer in 1979, we have continued to research to develop gas-insulated transformers applicable to higher voltage level up to 500 kV. As the results of the research, 275 kV, 300 MVA liquid cooling type gas-insulated transformer has been developed. We introduce the abstract of our study.

キーワード：液冷却式ガス絶縁変圧器，気液混合使用，PPSフィルム，タップ切替器，仕切構造

1. ま え が き

著者らは，将来の電力安定供給対策としての都心部への 500 kV 系統導入構想に対し，防災性，環境調和性に優れた 500 kV ガス絶縁変圧器を最終目標として，昭和 54 年より 77 kV ガス絶縁変圧器の実用化，275 kV ガス絶縁変圧器の開発・実用化を推進してきた^{(1)~(4)}。

このたび，500 kV ガス絶縁変圧器の開発の中で得られた技術成果を適用した 275 kV，300 MVA 液冷却式ガス絶縁変圧器を開発した。ここにその概要を紹介する。

2. 液冷却式ガス絶縁変圧器の概念

一般に，容量が 500 MVA 程度以下のガス絶縁変圧器では油入変圧器の油を SF₆ ガスに置き換え，絶縁・冷

図 1 液冷却式ガス絶縁変圧器の構造
 Fig.1. Structure of liquid cooling type gas-insulated transformer.

却とも SF₆ ガスで行われるが，それ以上の容量ではガスだけの冷却は困難であるため絶縁油に代わる冷媒を使用している⁽⁵⁾。冷媒としてパーフルオロカーボン (C₈F₁₆O：フロロカーボンとも呼称，以下これを用いる) が使用されている。

図2 ガス絶縁変圧器の技術開発の歴史
Fig. 2. History of development of gas-insulated transformer.

SF₆ガスと冷媒としてフロカーボンを使用するにあたり、著者らのガス絶縁変圧器(外鉄形)は図1に示すように、冷却は発熱部(巻線、鉄心)に点線の経路で冷媒を液の状態で流下させて行い、絶縁はタンクに充満したSF₆ガスで行う。冷媒にはガス吸収性の温度特性があるため、負荷変動や周囲温度の変化によって生じるガス圧変動を調整する装置を備えている。

図2には著者らの液冷却式ガス絶縁変圧器開発の歴史を示す。最終目標である500kVまで五つのステップを設定している。第二ステップまでは配管用を実用化後の高電圧・大容量化を目指した絶縁・冷却方式の研究と275kVプロトでの検証。第三、四ステップは絶縁をはじめ、全体に関係するガス圧の最適化、運用面での補機停止対策、現状では高価な冷媒の使用量低減策など一連の技術開発とその検証である。現在、第四ステップにある。

3. 液冷却式ガス絶縁変圧器への適用技術

液冷却式ガス絶縁変圧器の絶縁、冷却、タップ切替器の主要技術について述べる。

〈3・1〉 絶 縁 SF₆ガスの絶縁特性は絶縁油に比べて次の特徴がある。

- (1) 商用周波に対する絶縁耐力と雷インパルスに対する絶縁耐力の比(インパル比)が低い。
- (2) 不平等電界では、絶縁耐力の低下が大きい。
- (3) SF₆ガスの誘導率は1.0であり、複合絶縁系ではSF₆ガス側に電界が集中する。
- (4) SF₆ガスの耐圧はガス圧に依存し、圧力が高いほど耐圧は高い。

これらの特徴を考慮して絶縁設計を行うことになる

が、構造面では次の配慮をしている。

(i) 巻線端部では電界が集中するので、巻線端部は電界緩和用シールドを多用している。

(ii) ガス圧に関しては高いほど絶縁は縮小できるが、タンク重量の増大や、ガス圧を調整するガス圧調整装置の規模、圧力に関する法規制も考慮して総合評価し、使用最高圧力を第2種圧力容器とならない2kg/cm²gを超えない圧力(1~2kg/cm²g)で使用する事とした。なお絶縁設計ガス圧は調整幅下限の1kg/cm²gで行っている。

(iii) 巻線のターン間絶縁は、油入変圧器のコイル絶縁紙ではガス中の耐圧が低い場合プラスチックフィルムを採用している。材料の候補としては種々あるが、万一の補機電源喪失時(巻線への冷媒循環が断たれた状態)の運転時間確保を考慮して耐熱性の高いPPS(ポリフェニレンサルファイド)フィルムを抽出・選定し、ガス絶縁変圧器への適合性の確認試験を行った。その結果、耐熱性、機械強度など、十分な実用性能があることがわかった。以下に試験結果を紹介する。

〈3・2〉 PPSフィルムの寿命特性

(1) 耐熱寿命特性 次の方法、条件で試験を行った。

方 法: 加熱促進劣化法

雰 囲 気: SF₆ガス+フロカーボン雰囲気

寿命推定: 補償効果法⁽⁶⁾

指標特性: 引張り強さ

試 片: 短冊形、無荷重

温 度: 210°C, 240°C, 250°C, 270°C

加熱日数: 最長190日

結果は図3のとおりで、寿命半減温度は13度則が成立

図 3 PPS フィルムの耐熱寿命特性
Fig. 3. Life-time characteristics of PPS film.

表 1 PPS フィルムのヒートサイクル
試験結果
Table 1. Heat-cycle test result of PPS film.

条 件	PPS フィルムの強度
ヒートサイクル前	22.2 kg/mm ²
ヒートサイクル後	21.6 kg/mm ²

表 2 PPS フィルムの加振試験結果
Table 2. Vibration test result of PPS film.

条 件	PPS フィルムの強度
加 振 前	22.2 kg/mm ²
加 振 後	22.0 kg/mm ²

している。

(2) ヒートサイクルの影響 次の方法、条件で試験を行った。

- 方 法：繰返し通電ヒートサイクル法
- 雰 囲 気：SF₆ガス+フロロカーボン雰囲気
- 指標特性：所定の促進劣化後のヒートサイクルによる引張り強度
- 試 片：コイルに巻いた状態
- 温 度：150°C×65 hrの促進劣化
(110°C⇔226°C)×4 サイクル

結果は表 1 のとおりで、ヒートサイクルによる強度の低下はほとんどない。

(3) 振動の影響 次の方法、条件で試験を行った。

- 方 法：加振機による連続加振
- 雰 囲 気：フロロカーボン液中
- 指標特性：所定の促進劣化後の加振による引張り強度
- 試 片：コイルに巻いた状態でスペーサで締め付け
- 温 度：150°C×65 hrの促進劣化

図 4 コイルへの冷媒供給構造
Fig. 4. Structure of the liquid-supplying into coils.

図 5 コイル内温度分布
Fig. 5. Temperature distribution in coil.

振 動：120 Hz, 20 μ , 24 hr
結果は表 2 のとおりで、振動による強度の低下はほとんどない。

〈3・3〉 冷 却 冷媒として使用するフロロカーボンは冷却に関係する物性として絶縁油に比べて粘度が低いことが特徴である。また、現状では高価であるために少量で効率良く冷却する工夫が必要である。このための構造としてフロロカーボン液をコイル面、鉄心面に直接導いて流下させる構造を採用した。特にコイルの冷却に関しては低粘度のフロロカーボン液が表面全体に分流するように、外鉄形油入変圧器で実績のある冷却構造をベースに、冷却ダクト、スペーサの配置を工夫した。図 4 にコイルへの冷却供給構造を示す。冷却器で冷やされた冷媒は図中矢印のようにタンク内の冷媒供給管へ導かれ、各コイルの上部に設けた絶縁物製の冷媒保持チャンネルを通してコイルの両面を

図6 負荷時タップ切換器の外観
Fig. 6. Outside view of on-load tap-changer.

図7 タップ切換器の回路構成
Fig. 7. Circuit-configuration of tap-changer.

流下して冷却する。この構造によって冷媒使用量が約20%低減できた。

コイル冷却構造の検証に関しては、まず冷媒の流れが目視できる実規模大のモデルを製作して分流状態を確認するとともに、通電試験でコイル各部の温度分布を測定し、図5に示すように導体の温度が最も高くなる部分でも約5%高い程度であって、十分な冷却性能を有することを確認した。

〈3・4〉 負荷時タップ切換器 ガス絶縁変圧器用負荷時タップ切換器は、油入変圧器用のように遮断・潤滑・絶縁媒体となる絶縁油がないことから、既に実用化している配変用ガス絶縁負荷時タップ切換器の技術を延長し、275 kV対応の高電圧・大容量化開発を行った。負荷時タップ切換器の全体の姿を図6に示す。特徴は次のとおりである。

(1) 電流開閉素子としては配変用と同様、切換開閉時のSF₆ガス中への多頻度アーク発生をなくすために真空スイッチを使用しているが、今回は高電圧・大容量対応として新たに開発された真空スイッチを採用

図8 タップ選択器用接触子
Fig. 8. Contact for tap-selector.

中間電極なしではB+C間の耐電圧責務はA、D間のほぼ2倍。
中間電極ありではA、B、C、D間の耐電圧責務がほぼ同レベル。

図9 中間電極による耐電圧責務の低減
Fig. 9. Reduction of withstand voltage duty using additional electrode.

した。

(2) 回路構成としては真空スイッチの切換開閉能力が十分にあるので、機構の単純化および切換開閉器のコンパクト化が図れる図7のような1抵抗3真空スイッチ方式を採用した。

(3) タップ選択器用接触子は配変用と同様、潤滑油のないガス雰囲気中においても摩耗粉をほとんど発生することのないローラコンタクト方式を採用しているが、通電電流が配変用の300 A程度に対し大容量器では800 A程度になるため、図8のような2本のローラを並列接触させる2並列コンタクト式とした。

(4) タップ選択器各部の電圧は配変用に比べて高くなるが、電極形状の改善、ガス圧の増加および図9のような中間電極の設置による電極間の耐電圧責務の低減などにより275 kV用として実用的な寸法レベルでの高電圧化を達成した。

〈3・5〉 負荷時タップ切換器の別室化 従来、負荷時タップ切換器は本体と同一のタンク内に設置されていたためにタップ切換器の点検時には本体内のガスも

図 10 本体とタップ切替器の仕切構造
Fig. 10. Separation between transformer and tap-changer.

図 11 仕切り構造の応力分布
Fig. 11. Mechanical stress distribution on separator.

表 3 仕切り構造の応力解析値と実測結果
Table 3. Result of analysis and measurement of mechanical stress on the separator.

単位 (kg/mm ²)					
圧 力	2.0 kg/cm ² 外圧		1.0 kg/cm ² 内圧		備 考
位 置	A	B	A	B	—
解 析 値	-0.66	-0.31	0.30	0.16	常温
実 測 値	-0.60 (23.2)	-0.30 (46.3)	0.28 (49.6)	0.13 (107)	常温
	0.67 (20.7)	-0.73 (19.0)	0.41 (33.9)	0.30 (46.3)	80℃

注 1) 位置 A, B は図 11 に示す。
2) () は許容値に対する裕度を示す。
3) 外圧は本体側からの圧力を, 内圧は
タップ切替器室からの圧力を示す。

同時に抜取る必要があった。今回開発したガス絶縁変圧器ではこのような作業を省略し, 保守・点検の容易化を目的として本体と負荷時タップ切替器との間に仕切り構造を設けた。

図 10 は仕切りの概念図を示す。構造としては絶縁物製の筒に貫通端子を配し, 外側に本体のリードを, 内側にタップ切替器のリードを接続している。

仕切り構造の機能上, 差圧に対する強度の確保が重要であり応力解析(有限要素法)を実施するとともに実

図 12 長期課電通電試験中の検証器
Fig. 12. Transformer under long term running test.

図 13 275 kV, 300 MVA 変圧器の外形(例)
Fig. 13. Out line of 275 kV, 300 MVA liq-uid cooling type transformer (example).

器を製作して検証を行った。図 11 および表 3 に応力解析と実測の結果を示す。これらから, 解析の精度と裕度の確認ができた。

4. 総合性能と検証

以上述べた技術を検証するために 275 kV, 300 MVA の一相分を製作した。その検証は製品試験として JEC 204 に準拠して油入変圧器で行われている試験項目を実施したほか, 万一ガス圧が低下しても, 絶縁上直ちに運転を停止しなくてもよいことの確認のため, 定格電圧での 0 気圧耐電圧試験などを実施した。

製品試験で初期性能を確認した後, 屋外で裸電通電試験を実施中である(平成元年 1 月現在継続中)。この試験は長期耐久性の検証と実運転状態を想定したデータを取得することが目的である。図 12 に裸電通電試験中の変圧器を示す。

5. ガス絶縁変圧器の採用効果

以上紹介した液冷却式ガス絶縁変圧器では油入変圧器と比較して次の特徴がある。

(1) 総重量で約 6% 減, 機器容積で約 14% 減と小

形・軽量な変圧器。

(2) 騒音が約5ホーン低い変圧器。

(3) 消化設備などの防災設備が不要な変圧器。

上記の特徴を生かせる次のような変電所に適用することにより、総合的なコストメリットが得られる。

(i) 総合ビルの中に設置する地下式変電所(小形軽量、高度な防災性を要求される変電所)

(ii) 都市周辺の屋外変電所(低騒音、高速な防災性を要求される変電所)

図13に275kV、300MVA(低騒音形)の外形の一例を示す。

6. あとがき

以上、500kVガス絶縁変圧器を最終目標として進めている技術開発の主な内容を本誌を借りて紹介した。著者らの液冷却式ガス絶縁変圧器への主な適用技術をまとめると以下のとおりである。

(1) 巻線絶縁に耐熱性の高いPPSフィルムを採用し、万一の補機電源喪失状態での運転も考慮した。

(2) 個々の巻線に冷媒を直接供給して冷却効率を高め、冷媒使用量を低減した。

(3) 絶縁ガスと冷媒の混合使用によるガス圧変動はガス圧調整装置で調整し、使用最高圧力を 2 kg/cm^2 未満とした。

(4) タップ切換器は中間電極の認置で電極間耐電圧責務を低減し、コンパクト化した。

(5) 本体とタップ切換器の間に仕切り構造を設けて、タップ切換器の保守・点検性を向上した。

なお、ガス絶縁変圧器の実用化に伴って機器の異常診断技術の確立が必要になってくるため、本体の性能向上技術開発と並行して研究を推進している。異常診断に関しては別の機会に報告したい。

(平成元年11月30日受付)

文 献

- (1) 黒田・吉田・柁山・玉置・博多・中澤:「275kV絶縁変圧器の開発」, 昭59電気関係学会関西支部連大, G3-39
- (2) 黒田・吉田・柁山・玉置・博多・中澤:「275kVガス絶縁変圧器長期耐久試験」, 昭60電気学会全大, 716
- (3) 黒田・吉田・柁山・玉置・博多・中澤:「275kVガス絶縁変圧器長期耐久試験(2)」, 昭60電気関係学会関西支部連大, G3-53
- (4) Y. Harumoto, Y. Kabayama, Y. Kuroda, Y. Yoshida, H. Kan, Y. Miura, E. Tamaki & T. Hakata: "DEVELOPMENT OF 275kV EHV CLASS GAS-INSULATED POWER TRANSFORMER". IEEE/PES 85 WM 181-1 (1985)
- (5) 前田・玉置:「ガス絶縁変圧器の開発動向」, 電学誌, 106, 30 (昭61-1)
- (6) 宮本・牧野:「薄葉絶縁材料の耐熱寿命推定法の検討」, 電学論A, 103,

長谷川 泰 三 (正員)

昭和22年2月11日生。46年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月関西電力(株)入社。以来変電関係業務に従事。62年12月工務部発

変電工事課長。

別 井 孝 司 (正員)

昭和25年5月14日生。51年3月名古屋工業大学大学院修士課程修了。同年4月関西電力(株)入社。以来変電関係業務に従事。61年12月工務部発変電工事課副長。

大 西 修 一 (正員)

昭和30年4月26日生。51年3月舞鶴工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。主としてガス絶縁変圧器、静止型無効電力発生装置の開発に従事。61年2月工務部発変電工事課員。

伊 藤 克 明 (正員)

昭和24年3月31日生。47年3月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。以来、変圧器用負荷時タップ切換装置の開発・設計に従事、現在に至る。

光 庵 豊 一 (正員)

昭和23年5月5日生。46年3月岡山大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。以来、電力用変圧器の開発に従事、現在に至る。

至る。

牧 野 芳 弘 (正員)

昭和 19 年 9 月 7 日生。39 年 3 月
県立兵庫工業高等学校工業化学科卒
業。同年 4 月三菱電機(株)入社。以
来，絶縁材料の研究開発に従事，現

在に至る。

中 澤 宏 司 (正員)

昭和 30 年 5 月 30 日生。55 年 3 月
名古屋大学大学院電気工学修士課程
修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。以
来，電力用変圧器の開発に従事，現

在に至る。