

# 複合絶縁構成における絶縁破壊機構の解明と 固体絶縁スイッチギヤの高電界設計に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科  
佐藤 純一

脱 SF<sub>6</sub> ガス機器の更なる小型化，高電圧化のためには，気体絶縁部および沿面絶縁部の絶縁性能向上が重要である。特に，固体絶縁スイッチギヤにおいては，ほとんどの部分を固体絶縁物で絶縁しているが，遮断器や断路器などの開閉機器の可動絶縁部が固体化できないため，複合絶縁構成における気中部分および沿面部分の絶縁性能向上が重要であり，固体絶縁スイッチギヤの全体の大きさを左右する。大気中の電極間に固体絶縁物を挿入した複合絶縁構成は，気中における絶縁耐力を向上させる方法の一つとして一般的によく知られており，この絶縁構成で発生する放電現象はバリア放電として広く知られている。しかし，本研究のような金属電極に厚肉の被覆を施した複合絶縁構成における絶縁特性についてはあまり報告がない。また，大気中の背後電極を有する沿面絶縁構成についても古くから研究が行われており，沿面放電が伸びやすく絶縁破壊電圧が低い傾向にあることが一般的に知られている。しかし，これまでの沿面放電に関する研究の多くは，絶縁物面上に金属電極を配置し，金属電極と絶縁物との接触面から放電が進展する構成であり，本研究のような埋込電極と背後電極を有する沿面構成における絶縁特性についてはあまり報告がない

そこで，本研究では，地球温暖化係数の大きな SF<sub>6</sub> ガスを使用しないスイッチギヤとして固体絶縁スイッチギヤを開発するとともに，更なる高信頼・高電界設計を行うために，気体／固体複合絶縁構成の絶縁性能の向上を目的として，電極に厚肉の固体絶縁物の被覆を施すことによる気中部分の絶縁性能向上効果，固体絶縁物に電極を埋込むことによる沿面の絶縁性能向上効果および固体絶縁物に高誘電材料を用いることによる沿面の絶縁性能向上効果について検討した。その結果，以下の結論を得た。

1. SF<sub>6</sub> ガスを全く使用せず，小型・軽量化，保守の省力化を図るとともに安全性・信頼性を向上させた 24/36kV 固体絶縁スイッチギヤを開発し，実用化した。開発した固体絶縁スイッチギヤの機械的・電氣的信頼性を検証することにより，新しく開発した要素技術の有効性を明らかにするとともに，固体絶縁スイッチギヤとしての十分な信頼性を有することを示した。さらに，固体絶縁スイッチギヤの中で唯一固体化できない可動絶縁部の絶縁構成の性能向上が固体絶縁スイッチギヤの高電界化，高信頼性に向けた技術課題であることを示した。
2. 電極にエポキシ被覆を施した気中／固体複合絶縁系における絶縁性能向上効果を実験的に調べるとともに，気中ギャップの絶縁破壊機構について検討した。さらに，絶縁

性能向上効果について検討した。まず、被覆電極は破壊電圧向上に有効であることを示した。次に、これらの絶縁構成における絶縁破壊機構を理論的に検討し、気中の絶縁破壊機構は、不平等電界まで拡張された気中の絶縁破壊理論によって説明することができ、絶縁破壊特性は電界計算に基づく電離指数を用いて推定することができることを明らかにした。さらに、絶縁破壊機構から得られた計算式を用いて、有効ギャップ長、見かけの電極直径、誘電体の3つのパラメータが気中ギャップの絶縁破壊特性に及ぼす影響について検討し、この絶縁構成における絶縁破壊特性向上効果は、これらの3つのパラメータの複合効果であることを明らかにした。

3. 埋込電極と背後電極を有する気体/固体複合絶縁系における沿面絶縁性能向上効果を実験的に調べるとともに、この構成における沿面絶縁破壊機構について検討した。まず、埋込電極と背後電極を有する沿面モデルにおいて、埋込電極半径、エポキシ円板厚さ、エポキシ円板半径をパラメータとして絶縁特性を調査し、埋込電極は沿面絶縁破壊電圧を上昇させる効果があることを明らかにした。次に、これらの絶縁構成における放電形態を観測し、絶縁破壊機構の検討を行った結果、沿面の絶縁破壊機構は沿面の電界分布によって取り扱いが異なり、本研究で考慮した沿面構成では下記の場合に別けて考える必要があることを明らかにした。

- (1) 部分放電は最大電界点で開始し、そのメカニズムは気中コロナと同等と考えられ、部分放電開始電圧は気中のコロナ開始電界を用いて推定することができる。
- (2) 最大電界点から両方向にそれぞれ極性の異なる沿面放電が進展し、そのメカニズムおよび進展特性は背後電極が存在する沿面の場合と同様である。
- (3) 上記のいずれかの方向へ進展する沿面放電が対向電極に到達した時にほぼ全電圧が他方の沿面に印加されるとして沿面破壊電圧を推定することができる。

さらに、検討した絶縁破壊機構、部分放電開始機構を考慮し、定数を補正した横井・鈴木の実験式により放電進展特性を求め、絶縁破壊電圧を計算することにより、実験値と比較的良く一致し、この絶縁構成における沿面絶縁破壊電圧を予測可能であることを示した。

4. 気中複合絶縁構成および沿面複合絶縁構成において、本研究で得られた絶縁破壊機構を適用することにより、固体絶縁スイッチギヤの更なる高電界設計が可能であることを示した。さらに、これまでの研究成果をもとに、72/84kV級の可動絶縁部実機相当モデルを設計、試作して耐電圧性能検証を実施し、定格電圧84kVの定格雷インパルス耐電圧および定格商用周波耐電圧に満足することを確認した。これにより、複合絶縁構成の高電圧化に向けた本研究の成果の有効性を確認した。

本論文で得られた成果は、72/84kVクラス以上のより高い電圧階級の固体絶縁スイッチギヤの実現に活かされるとともに、24/36kVクラスの固体絶縁スイッチギヤの縮小化に貢献可能であると考えられる。