

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13628 号
------	---------------

氏 名 中根 龍一

論 文 題 目

直流高電圧(HVDC)電力機器の複合絶縁構成における電荷挙動
と電界推移に関する研究

(Charge Behavior and Electric Field Transition for Composite
Insulation Systems in HVDC Power Equipment)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	早川 直樹
委員	名古屋大学	教授	横水 康伸
委員	名古屋大学	准教授	小島 寛樹
委員	愛知工業大学	教授	大久保 仁
委員	九州大学	教授	末廣 純也
委員	名古屋工業大学	教授	水野 幸男

中根龍一君提出の論文「直流高電圧(HVDC)電力機器の複合絶縁構成における電荷挙動と電界推移に関する研究」は、HVDC電力機器の中でも主要な交直変換用変圧器を構成する絶縁油/PB複合絶縁、および直流ガス絶縁開閉装置(DC-GIS)を構成するSF₆ガス/固体スーパサ複合絶縁を対象とし、各々の複合絶縁構成における電荷挙動および電界の発生・推移メカニズムについて定量的に明らかにするとともに、実験的に検証したものである。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、高品質で信頼性の高い電気エネルギー供給システムとして、直流電力システムのメリットとそれを構成するHVDC電力機器および電気絶縁材料に関する研究動向と技術課題を述べている。

第2章では、複合絶縁系における交流電圧印加時と直流定常状態の電界分布特性の違いについて明確にし、さらに固体絶縁物の形状や配置が直流定常状態の電界分布特性に及ぼす影響について明らかにした。絶縁油/PB複合絶縁においては、交流印加時は油中に電界が集中し、直流定常状態はPB内部に電界が集中する。特に絶縁油とPBの導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} が大きくなるほどPB内部に電界が集中する特性を利用することで、PB配置によって直流電界分布を制御し、電気絶縁性能の向上を図ることができることを示した。一方、SF₆ガス/固体スーパサ複合絶縁においては、ガスとスーパサの導電率比 σ_{EP}/σ_{gas} によって直流定常状態の電界分布特性が大きく変化する。導電率比 $\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$ の条件においては電界分布に対してスーパサの導電性が支配的であり、直流電圧印加時においても交流印加時とほぼ同一の分布特性を示す。しかし、導電率比 $\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$ の条件においては電界分布に対してガスの導電性が支配的であり、絶縁スーパサ界面の電荷蓄積が顕著になることで最大電界の場所が固体スーパサ内部に移行する。さらに、交流印加時と直流定常状態において絶縁スーパサ上に沿ったガス中電界ストレスおよび、異物付着時の沿面電界ストレス双方の整合性を考慮した絶縁スーパサの最適な形状設計が重要であることを示した。

第3章では、直流定常状態の固体絶縁物表面上の帯電分布と、それに起因する直流極性反転時の電界ストレスの関係性について、各々の複合絶縁系における電荷挙動に基づき検討した。絶縁油/PB複合絶縁においては、あらかじめ絶縁油中に電荷キャリアが多く存在するため、電界分布の決定には常に絶縁油の導電性が支配的である。そして、直流印加直後から直流極性反転までのプロセスを実際の電荷挙動に基づき明らかにした。さらに、直流極性反転時の電界ストレスに対して蓄積電荷がどの程度寄与するか、すなわち寄与率CR(Contribution ratio)を定義することで、直流定常状態のPB表面上帯電電荷による発生電界は直流極性反転時の油中電界ストレスに最大で50%まで寄与し、PB厚さおよび温度や劣化による導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} の変化に依存しておよそ20-50%程度であることを定量的に示した。一方、ガス/固体スーパサ複合絶縁においては、電荷供給状態によって複合絶縁系全体の導電特性が決定される。スーパサの導電率が支配的な場合(SCD conditions, $\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$)においてはスーパサ内部からの電荷供給が主であると考えられ、直流定常状態においては帯電による電界変歪はほとんど見られない。しかし、ガスの導電性が支配的な場合(GCD conditions, $\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$)においてはガス中に部分放電のような顕著な電荷供給源が考えられる。したがって、この場合十分な時間が経過した直流定常状態において帯電による電界変歪が大きく生じ、さらにその蓄積電荷量が直流極性反転時の電界ストレスを決定する主要因であることを定量的に明らかにした。

第4章では、直流電圧印加時の複合絶縁系における直流印加直後から直流定常状態までの実際の機器において考えられる準平等・不平等電界ストレスの時間・空間推移特性について検討した。絶縁油/PB複合絶縁においては、直流印加直後から直流定常状態に時間推移するにつれて電荷蓄積によりPB内部に電界が集中していく。このとき油中電界の時定数 τ はおよそ10-1,000sである。さらに、電界空間の場所によって油中電界の時間変化特性(時定数)が大きく異なり、最大電界の場所も変化する。特に、直流印加直後から直流定常状態に至る過程において、直流印加直後における1番最初の油中電界ストレスよりも高い電界ストレスが生じることがあることが判明した。一方、ガス/固体スーパサ複合絶縁においては、複合絶縁系の導電状態によってガス中電界の時定数 τ が異なる。ガスの導電性が支配的な場合($\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$)、時定数 τ はおよそ400-500h、スーパサの導電性が支配的な場合($\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$)、時定数 τ は3,000-4,000hのオーダーであることを示した。特にガスの導電性が支配的である場合($\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$)においては、絶縁油/PB複合絶縁と同様に電界空間の場所によってガス中電界の時間変化特性が異なり、最大電界の場所が移り変わっていく。さらに、直流印加直後から直流定常状態における時間変化において直流印加直後におけるガス中電界ストレスよりも高いストレスが生じることがあることを明らかにした。

第5章では、ガス/固体複合絶縁における部分放電下の電荷蓄積過程について実測と解析の両面から検討を行った。基礎的な絶縁媒質である空気/PMMA複合絶縁とGIS内部絶縁を模擬したSF₆/エポキシ複合絶縁における部分放電下の電荷挙動を考慮した電界手法を構築した。そして、直流印加直後から固体絶縁物上の電荷蓄積によって部分放電が抑制される直流定常状態までの表面電位の時間推移の実測値と解析値が概ね一致し、解析モデルの有用性を検証した。さらに、部分放電によって形成されるガス中の高導電率領域を定量的に評価し、固体絶縁物上の電荷蓄積による電界変歪によって高導電率領域が偏向する。特に、ガス中の高導電率領域の時間進展にともない、電荷が主に蓄積する場所も時間推移することから、部分放電によって形成されたガス中の高導電率領域は、ガス/固体複合絶縁の電荷蓄積過程を決定付ける主要因であることを定量的に明らかにした。

第6章では、絶縁油/PB複合絶縁の交直変換用油入変圧器実器モデルおよびガス/固体スーパサ複合絶縁のガス中実形状絶縁スーパサモデルを用いて、各々の直流電力機器における試験電圧条件を提案し、それらの値に基づい

論文審査の結果の要旨

た電気絶縁性能の検討を行った。交直変換用油入変圧器実器モデルにおいては、絶縁油とPBの導電率比 σ_{oil}/σ_{PB} が大きくなるほど直流定常状態において電界分布のPB配置依存特性が顕著になるとともに、第1油道部分の油中の電界ストレスが緩和され、十分な絶縁性能を有する傾向を示す。しかし、その分PB表面上の蓄積電荷が増大し、直流極性反転時においては、外部電界と重畳することで油中に大きな電界ストレスが生じる。したがって、直流定常状態に達する十分な印加電圧時間の後、直流極性反転を行うことで交直変換用油入変圧器の第1油道部分における電気絶縁性能を評価することができる。実形状絶縁スペーサモデルにおいてはスペーサの導電性が支配的である場合 ($\sigma_{EP} > \sigma_{gas}$)、直流定常状態において絶縁スペーサ表面上の電荷蓄積が顕著に表れないため、それにともない直流極性反転時においてガス中に電界ストレスはそれほど生じない。しかし、ガスの導電性が支配的である場合 ($\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$)、直流定常状態において絶縁スペーサ表面上の電荷蓄積が顕著に表れる。したがって、直流極性反転時において大きなガス中電界ストレスが生じ、絶縁性能的に厳しい条件となる。したがって、ガスの導電性が支配的 ($\sigma_{EP} < \sigma_{gas}$) な場合を想定した直流定常状態に達する十分な印加電圧時間の後、直流極性反転を行うことで、GIS内部の正常および異常状態を評価することができる。

第7章では、各章で明らかになった知見および物理的メカニズムをまとめ、本研究の成果および今後の展望について示した。

以上のように、本研究で得られた成果は、直流電力システムを構成するHVDC電力機器の複合絶縁構成における電荷挙動と電界推移メカニズムを明らかにすることにより、合理的かつ信頼性の高い電気絶縁設計に資するものであり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である中根龍一君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。