

報告番号 ^{*}第 2683号

主論文の要旨

題名 高電圧大容量変圧器の絶縁性能向上に
関する研究

氏名 大久保 仁

主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	大久保	仁
------	----------	---	----	-----	---

変圧器はその歴史が約100年を迎えるなかで、特に近年になって電力需要の増大に対応する送電電圧の上昇とともに急激な高電圧化・大容量化を遂げようとし、一方では世界的エネルギー情勢を背景として低損失変圧器の開発が要請され、変圧器の高効率化、軽量化、コンパクト化が進められている。これらの開発目標を達成してゆくためには、全体の約80%を占める絶縁空間の有効利用技術すなわち絶縁技術に依存するところが大きく、従来以上の変圧器絶縁性能向上を果たさなければならない。

本論文はこのような状況に対処するために、変圧器絶縁性能向上に関して行なった基礎的ならびに実用的研究をまとめたものであり、絶縁技術上の問題点に関する研究と絶縁設計上の課題点に関する研究の2編からなっている。

第1編は絶縁技術上で第一に解決する必要がある流動帯電現象について、調査・解明をし、絶縁技術への応用に関して新しく得られた知見をまとめたものであり、第2編は絶縁設計上で第一に必要なとされていた電界解析技術の開発とその適用に関して新しく得られた研究成果をまとめたものである。

以下に、順を追ってその具体的内容を述べる。

第1編、第1章は流動帯電現象の位置づけと、これまでの研究経過について問題点を論じたものである。すなわち、変圧器内の流動帯電現象は変圧器固有の条件を多く含んでいるが、これまでの研究報告例の中で変圧器内の現象として対処したものがほとんど無く、問題解決のための基本特性の調査ならびに現象解明が不可欠であることを説いた。また絶縁油の帯電のしやすさ、すなわち帯電度の測定の必要性和、帯電発生要因の解明とそれに基づく帯電度低減油開発の要請を説き、流動帯電に関する技術確立と変圧器絶縁技術への応用についての研究が急務であることを述べた。

第2章は、変圧器内の帯電現象の基本特性の調査方法ならびに調査結果をまと

主 論 文 の 要 旨

報告番号	第 2 号	氏名	大久保 仁
------	-------	----	-------

めたものである。すなわち、基本特性として流量・流速および温度特性のあることを示し、帯電量は流速の2～4乗に比例して増加し、一般には50～60℃近傍にその極大点のあることを見出した。一方、円筒コイルモデル、円板コイルモデルによる調査より、静電気放電発生の下限流量特性を求め、また帯電に影響を及ぼす因子として、油流・流路形状、AC課電の有無、固体絶縁物表面状態、絶縁油の種類などを挙げ、それぞれの特性を調査し結果をまとめた。またモデルを用いて、油中において4種類の静電気放電を発生させることに成功し、それぞれの発生形態を分類した。また静電気放電については、それが最終的に変圧器絶縁のAC閃絡に結びつく可能性を調査しまとめたのみならず、初めて静電気放電の物性を明らかにし、放電電荷量が最大約100万pCに達し、放電進展がステップ状とならず平均進展速度が 10^7 cm/secのオーダーであること、ならびに放電による溶存分解ガス特性などを明らかにした。

第3章は絶縁油の帯電のしやすさ、すなわち帯電度を直接測定する帯電度測定装置を新たに開発・実用化した内容をまとめたものである。従来石油産業などで用いられていた装置で変圧器内の現象との等価性を追求することには無理があり、変圧器内の現象と対応のとれる本装置を開発したものである。すなわち、本装置は変圧器内で使用しているクレープ紙を用いて帯電発生部を形成し、全体が密封構造で、絶縁油は変圧器内と同程度に水分量、ガス量などが管理された状態で帯電度を測ることができるようになっている。本装置の特徴は、循環系の中に注入部を有していることであり、10cm程度の絶縁油の帯電度を5分以内で測定できるなど、微量サンプルの短時間測定を可能とし、測定電流値を大きくとったことによる高い再現性と、操作性に依らず誰れでも測定できるなどの汎用性を有し、装置としての実用化を可能とした。

第4章は第3章で開発した帯電度測定装置を駆使し、絶縁油の諸物性と帯電度

主論文の要旨

報告番号

※ 第
乙

号

氏名

大久保

仁

との関係を明らかにしたものである。すなわち、まず絶縁油種類による帯電度の違いを調査し、種類によってひと桁程度の帯電度の違いのあること、並びに劣化による帯電度上昇傾向を明らかにした。これらの結果より、絶縁油劣化成分のいくつかを添加することにより、絶縁油の帯電度をコントロールすることを行ない併せて劣化絶縁油中から劣化成分をフィルタリングで除去することにより、帯電度を改善することができ、静電気放電をも制御できることを明確にした。これらの一連の研究すなわち絶縁油劣化と帯電度上昇との関連調査結果より、劣化抑制による帯電度低減油の開発を行ない、A B（アルキルベンゼン）混合油とB T A（ベンゾトリアゾール）添加油とが優れていることを明らかにし、これらの絶縁油の実用化に対する信頼性検証を行なった。

第5章は第1章～第4章の研究結果をまとめたものであり、流動帯電に関する技術の確立と、その変圧器絶縁技術への応用、ひいては変圧器絶縁の信頼性向上を果たした内容を示したものである。すなわち本研究によりこれまでとられていなかった流動帯電に関する技術がはじめて変圧器絶縁技術に取り入れられたものであり、変圧器構造面からは最大平均流速の上限設定、流路の平滑化、集中流路の分散化、最適化など、また静電気放電発生に対する裕度を明確にする構造の採用などが新たに応用された。また絶縁油特性面からは、帯電度測定装置の開発実用化により、絶縁油帯電度の管理が重要であることを示し、その管理目標値を設定した。さらに帯電度上昇と劣化過程との関連性調査結果より、A B混合油、B T A添加油が帯電度低減絶縁油として実用化できる見通しを得た。また帯電発生と現地処理との関係から帯電度低減のための現地処理法を提案することができた。最後に、確立された本技術を総合的に検証するために、将来のUHVプロト変圧器を用いて変圧器構造面ならびに絶縁油特性面から調査し、十分な信頼性が得られていることを確認した。

主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 大久保 仁
乙

第2編，第1章は変圧器内の絶縁構造の特徴と電界解析技術導入の必要性についてまとめたものであり，これまでの電界解析技術の発展状況を各計算法についてレビューし，変圧器絶縁設計に適用する上での問題点をまとめた。その結果，複雑な絶縁構成に適用できる有限要素法の新たなる精度改良の必要性と，有限要素法と局所場に効果的に使用され精度の高い電荷重畳法とを組み合わせることによって，新しい理想的な電界計算法が開発できる可能性のあることを明らかにした。また変圧器絶縁設計技術が将来とるであろう自動設計のための手法として不可欠な，電界最適化法について技術確立をすることが重要であることを述べた。

第2章は有限要素法による電界計算を変圧器の絶縁設計に適用する上での問題点を列挙し，特に計算誤差の検討，計算精度の改良，そしてプログラムの汎用化を行なった内容についてまとめたものである。特に誤差発生要因の分析をもとに新しく開発した要素再分割法による精度改良法は，有限個の要素分割による数回の繰り返し計算結果より，無限個要素の理想状態における結果を外挿推定できる方法であり，この方法を用いることによって大きな効果の得られることを示した。また有限要素法のプログラムを汎用化し，自動入出力計算を可能とし，現実的に変圧器絶縁設計に応用できるようにしたことを示し，これを用いて絶縁設計に適用した一例は第5章に示されている。

第3章は各種数値電界計算法の特徴の分類，分析結果より，その有する原理・特長が対照的である有限要素法と電荷重畳法とを空間的に結合することによって，両計算法の長所を共有し，短所を補なう新しい手法すなわちコンビネーション法を得ることができることを示したものである。計算原理，結合方法ならびに計算誤差の検証結果を示した後いくつかの適用例を示し，特にブッシングなどの開放空間場の多媒質場の計算や，空間電荷場の計算に本コンビネーション法が適用できるのみならず，従来の単一手法では解けないか，あるいは誤差が非常に大きく

主論文の要旨

報告番号 ※^乙第 号 氏名 大久保 仁

なってしまう場合でもコンビネーション法によって効果的に計算できることを示した。この意味からコンビネーション法は数値電界計算法のひとつの将来方向を示しているものと考えられる。

第4章は与えられた電極形状に対して電界解析をするのみではなく、計算機を用いて自動的に電極表面電界強度分布が最低かつ一様となる電極形状を得る試み、すなわち電界強度の最適化技術を確立した内容をまとめたものである。この電界強度の最適化は、電界空間の有効利用という点から変圧器の縮小化および絶縁信頼性向上のために極めて重要であるのみならず、将来の絶縁設計自動化や製造技術まで含めた自動化に対応する上での必要不可欠な技術である。ここでは Metz の最適化手法をとり上げ、そのポイントであった繰り返し計算の自動化を最適化電荷の自動配置という方法で進めることによって、極めて良好な収束精度を得、実用化できることを示した。変圧器内では高電圧シールド形状をはじめとして、従来は2次元として得られていた理想電極形状のひとつである Borda 形状について計算し、実用的な軸対称拡張 Borda 形状を提示することができた。さらには、表面電荷法を用いて絶縁物形状の最適化を行なう手法についても新たな提案をし、油中スベサ形状やリード支え形状に適用できることを示した。

第5章は第1章～第4章の研究結果をまとめたものであり、電界解析技術の改良・開発の結果、それらがどのように変圧器絶縁設計に適用され、絶縁信頼性向上に寄与しているかをまとめたものである。特に第1章で示した有限要素法の汎用化によって、従来の絶縁設計法の域を越え、高精度の信頼性の高い絶縁設計を可能としたことを示した。

以上本論文は、筆者が高電圧大容量変圧器の絶縁技術上の問題点であった流動帯電現象の技術確立ならびに絶縁技術への応用について行なった研究成果と、絶縁設計上の課題であった数値電界解析技術の開発とその絶縁設計への適用につい

主論文の要旨

報告番号	※甲第 乙	号	氏名	大久保	仁
<p>て行なった研究成果とを記述するとともに、将来の変圧器絶縁設計の技術的發展の方向を示唆したものである。</p>					