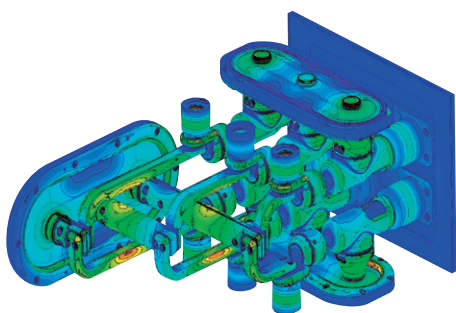


スイッチギヤの解析技術

長網 望 Nozomu Nagatsuna
小嶋康之 Yasuyuki Kojima

キーワード スイッチギヤ, 電磁界解析, 応力・強度解析, 機構解析, 熱流体解析

概要



有限要素法によるスイッチギヤ全体の大規模電界解析例

一般的に機器の設計では、高性能化や開発期間の短縮、開発費の削減などの要求に応えるため、解析を用いた設計の精度向上や効率化を図る必要がある。当社ではスイッチギヤの開発における解析技術として、電磁界解析や応力・強度解析、機構解析、熱解析を適用している。各々の解析技術は、開発機器を効率良く設計する上で全て重要な手段となっており、解析技術を向上して適用することで、製品開発の高精度化及び高速化を実現している。

1 まえがき

スイッチギヤは受変電設備の一部を構成する主要機器で、真空遮断器 (VCB)・断路器 (DS)・接地開閉器 (ES) などの要素を複合的に組み合わせた装置である。機器の高性能化や開発期間の短縮、開発費の削減などの要求に応えるためには、解析を用いた設計の精度向上や効率化を図る必要があり、近年各種解析技術が重要な役割を果たすようになってきている。本稿では、当社で採用しているスイッチギヤの各種解析技術を紹介する。

2 スイッチギヤの解析技術

2.1 解析項目と解析対象

第1表にスイッチギヤを設計する上で主に用いる解析項目と解析対象を示す。

第1表 スイッチギヤの主な解析項目と解析対象

4区分の解析項目とそれぞれ対象となる検討内容や機器などの対象を示す。

解析項目	内容	対象
(1) 電磁界解析	<ul style="list-style-type: none"> ●絶縁評価 (静電界・小電流開閉時の開離度検討) ●大電流通電時の電磁力 ●電磁石の動作 	<ul style="list-style-type: none"> ●主回路部・母線・DS など ●主回路部・母線 ●電磁操作器
(2) 応力・解析	<ul style="list-style-type: none"> ●曲げ・引張り強度 ●耐震性能 	<ul style="list-style-type: none"> ●主回路部・主回路導体支持がいし ●機構部・構造部
(3) 機構解析	<ul style="list-style-type: none"> ●開閉動作特性 	●VCB・DS・ES
(4) 熱解析	<ul style="list-style-type: none"> ●運転通電時の温度上昇 ●アーク熱流 	●ガス封入タンク内構造物・遮断器接点間

(1) 電磁界解析 スイッチギヤは電力系統に配置されるため、主回路通電部と接地タンク間の絶縁性能や事故電流通電時の電磁力に対する強度が必要とされる。その評価方法として、前者では電界解析、

後者では電磁界解析を用いている。

(2) 応力・強度解析　スイッチギヤの主回路構造物や搭載機器の操作機構部の応力評価に使用している。また、機器の耐震性能について、最近では実加振による試験に替わって解析による評価を行うことが一般的になっているため、一層応力解析の果たす役割は増している。

(3) 機構解析　VCBやDSの開閉特性は、遮断性能を決める重要な要素となる。例えばVCBの小形化や高性能化を達成するには、操作力を効率良く遮断部に伝達することが必要となり、設計手段として機構解析の導入が進んできている。

(4) 熱解析　スイッチギヤのタンク内部では、主回路の通電やタンク外の渦電流による発熱の影響を受ける。主回路部及び周辺構造物の温度上昇を把握し、機器の小形化や大容量化を検討するために熱解析が必要とされる。

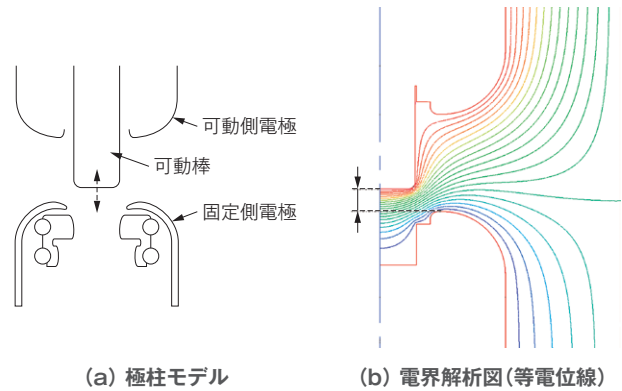
以下では、これらの解析技術の具体例を紹介する。

2.2 電界解析

スイッチギヤの絶縁設計に用いる電界解析では、幾何学的形状に基づいて各部に発生する電界強度を求める。当社では、解析対象の規模に応じて解析手法を使い分けている。比較的小規模で多条件の結果を整理する場合、2Dの有限要素法（FEM）又は3Dの表面電荷法を用いる。一方、スイッチギヤ各部の概略形状が決まり、全体の電界分布を解析する場合、多量のデータを処理する大規模解析となるため、電界計算に特化した市販ツールを用いている。

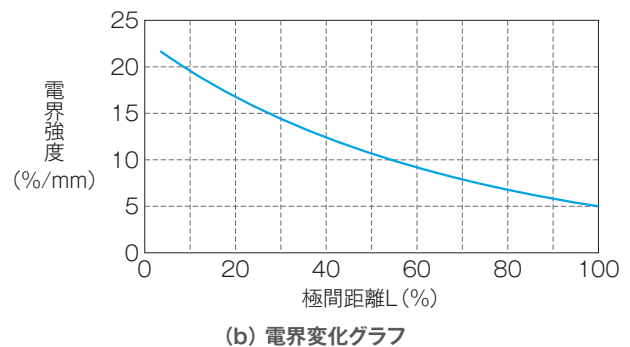
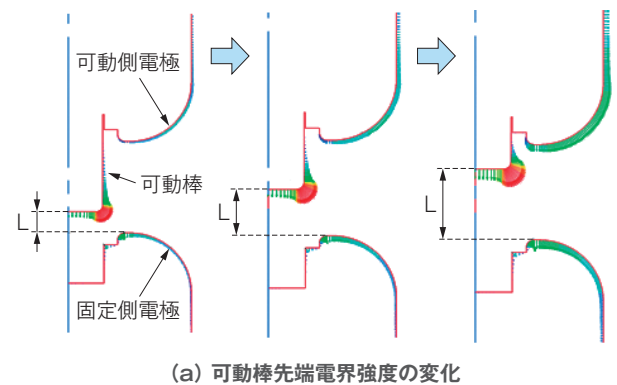
第1図に比較的小規模かつ多条件による解析の例として、DS極柱部の開閉途中位置における電界解析モデル及び等電位線の分布を示す。可動棒が図の位置から開路位置に向かうに従い、可動棒先端部の電界強度は低下する。**第2図**に電界強度の変化を示す。DS極間の各位置における電界分布を求め、負荷開閉時における開離度の目安値をつかむことができる。

第3図に市販の汎用ソフトを使用したスイッチギヤ全体の大規模電界解析例（3D-FEMの例）を示す。大規模解析ツールの適用によって、スイッチ



第1図 DS極柱部の2D電界解析結果例

可動棒動作中のある位置における状態を示す。可動棒が紙面上下方向に動作する。

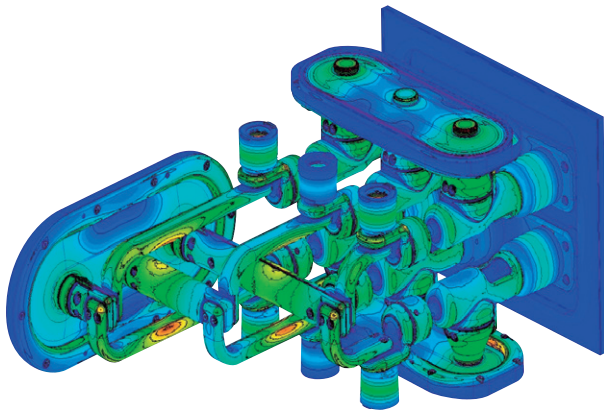


第2図 断路部可動棒の各位置における電界強度の変化

可動棒が開路動作する（固定側電極から離れる）様子を示す。(b)では、開路距離Lが大きくなるに従い、可動棒先端の電界強度が低下することを示す。

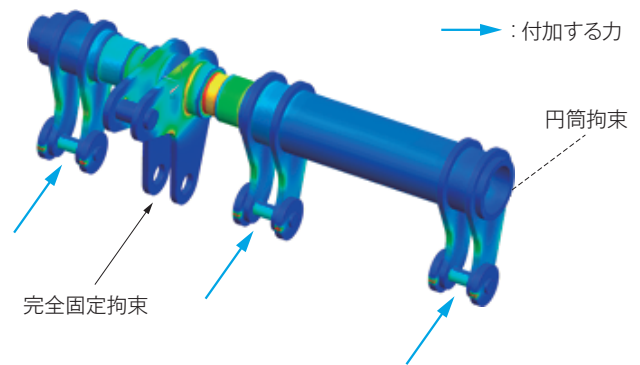
ギヤ全体の電界強度を把握し、最適な形状や配置を一括して検討できる。

絶縁性能評価には、各種解析によって得られた電界結果を基に別途評価が必要となるが、形状に基づく電界強度を正確に導出することが電界解析では重要である。



第3図 大規模電界解析例（3D-FEMの例）

スイッチギヤガスコンパートメント内の電界解析結果を示す。電界強度が小から大に変化するにつれて、表示色が青から赤に反映される。



第4図 複雑形状の応力解析例

VCB操作軸の例を示す。円筒形状の軸に駆動レバー（三相一括用及び各相用）が溶接され、各相のレバー先端部に力を加えることで、三相ごとの変位を求める。

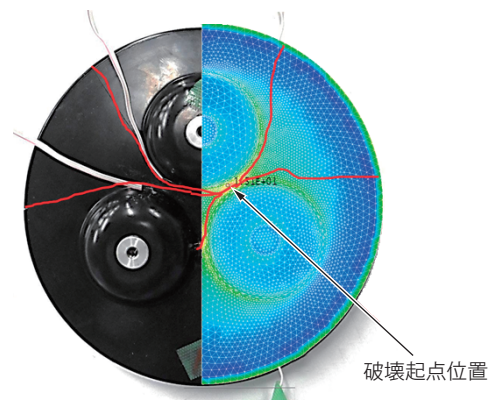
2.3 応力解析

スイッチギヤの構造設計に用いる応力・強度解析は、大きく構造解析と熱応力解析に分類される。両者とも市販ツールを用いた有限要素法で解析するが、手計算では対応しきれない複雑な形状も解析できる点が強みである。

第4図に複雑形状の応力解析例を示す。主軸に三相一括駆動用及び各相のVCB極柱部に連結されるレバーが軸に溶接された構造である。設定条件として、軸に円筒拘束、三相一括駆動レバーに完全固定拘束などを与え、各部の応力や変位を求める。

第5図に三相スペーサ破壊試験と解析結果との相関性を示す。解析の流れはモデリングから始まり、メッシュの作成・境界条件の設定・結果の出力の順に進める。中でも境界条件の設定が重要で、実器の動作を忠実に再現した条件設定が必要となる。出力された結果と材料強度を比較し、十分な安全率を確保できていると判断できた場合、実際に破壊試験を実施して解析結果との整合性を確認する。構成は絶縁物と貫通導体の三相スペーサで、スペーサ周囲を拘束条件とし、スペーサ厚み方向に圧力を付加させた。応力解析結果と破壊試験時の破壊起点を同時に示す。解析結果から求めた破壊起点位置と実験値がよく一致していることを確認できる。

以上のような手順で強度検討を実施し、解析ツールの高度化とともにサンプルの製作数は減少し、開発スピードの向上と開発費用の削減が進んでいる。



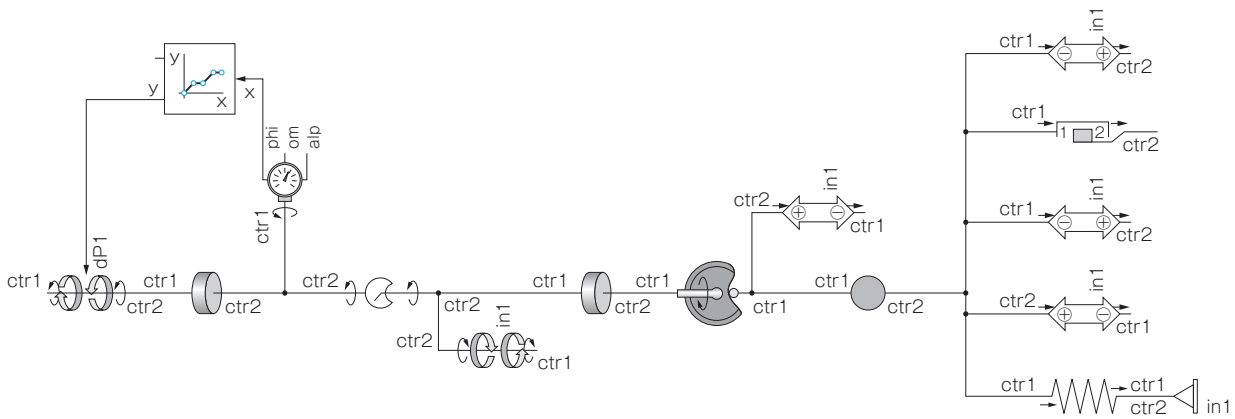
第5図 三相スペーサ破壊試験と解析結果との相関性

三相スペーサ周囲の面を固定し、スペーサ厚み方向に圧力をかけると絶縁物に応力が発生し、破壊強度を超えると破壊する。解析結果と一部重ねて比較している。

2.4 機構解析

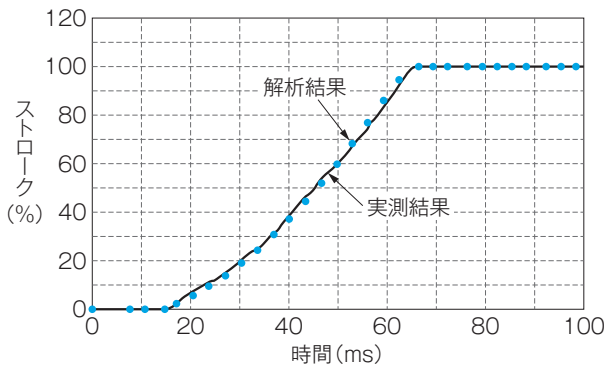
スイッチギヤの主要機器であるVCBの操作機構を設計する上で、電流遮断性能を左右する開閉動作特性の精度の高い事前検討が重要である。設計初期段階である程度の概略構造を設定し、特定の負荷条件で必要となるばね特性・ストローク・レバー比などを決める。仕様を満足する動作特性が得られるまで条件を変えて計算を繰り返し、最適な設計を求めている。

従来、機器の開閉動作特性検討は、エネルギー法による計算を行っていたが、様々な条件で計算するには、多大な時間が必要であった。現在、VCBなど



第 6 図 VCB 閉路動作シミュレーションモデル構築例

VCB 閉路時の操作機構部をモデル化し、ばねやギャップ、質量の要素を電気回路のように接続して構築した例を示す。

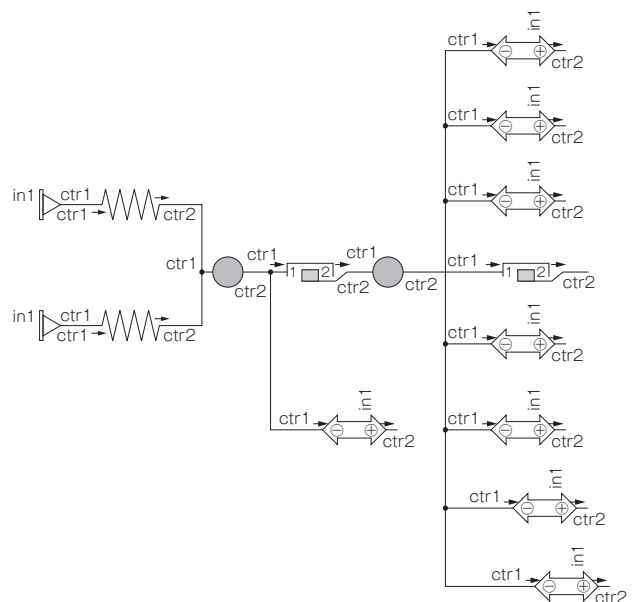


第 7 図 閉路時の極柱ストローク

第 6 図で構築したモデルの解析結果を示す。点表示の解析結果と実線の実測波形が良く一致していることを示す。

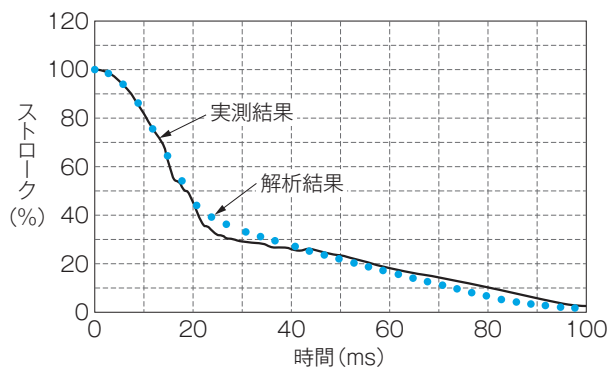
の動作特性の検討には、ID-CAEを用いた一次元シミュレーションによる機構解析を使用している。この手法は、ばね特性・負荷・レバー比・質量などをそれぞれ物理要素モデルで模擬し、それらを電気回路のように構成することで、各要素同士が物理パラメータを相互にやり取りして結果を出力する。

第 6 図に VCB 閉路動作シミュレーションモデル構築例を、第 7 図に閉路時の極柱ストロークを、第 8 図に VCB 開路動作シミュレーションモデル構築例を、第 9 図に開路時の極柱ストロークを示す。VCB の動作特性検討に用いるモデルは比較的簡単な構成で、各要素モデルに必要な数値を入力して解析すると数秒程度で計算され、精度の良い結果が得られる。第 7 図及び第 9 図から、解析及び実験結果がよく一致し、本ツールの実用性を確認できる。



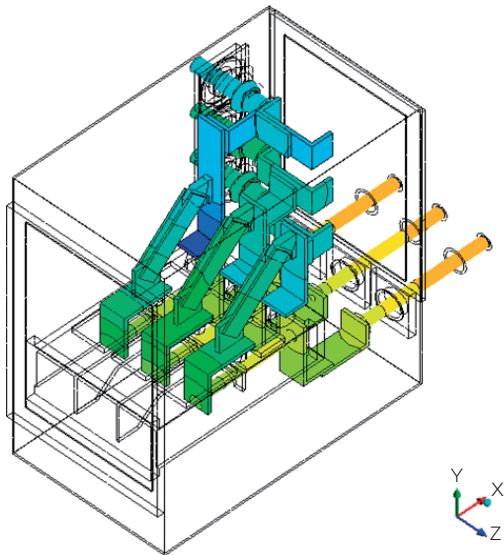
第 8 図 VCB 開路動作シミュレーションモデル構築例

VCB 開路時の操作機構部をモデル化し、ばねやギャップ、質量の要素を電気回路のように接続して構築した例を示す。



第 9 図 開路時の極柱ストローク

第 8 図で構築したモデルの解析結果を示す。点表示の解析結果と実線の実測波形が良く一致していることを示す。



第10図 流体解析例（固体温度）

主回路部通電時の温度上昇結果を示す。明るい色は温度上昇が高いことを示している。

このようなある程度決まったモデルを構築すれば、数値を変更するだけで他機種にも比較的容易に応用でき、機構動作特性の検討に要する時間を短縮でき、ひいてはVCBの設計時間の短縮にもつながる。今後の動作機構設計ツールとして有効活用し、精度の高い検討に活用していく。

2.5 熱解析

ガス絶縁開閉装置（GIS）は、高電圧箇所の絶縁のために絶縁ガスが密閉容器内に封入されている。タンク内は、主回路部に数千Aの電流が常時流れて数百Wの熱が発生し、絶縁ガス中を自然対流で伝達する。近年の機器小形化に伴い、機器全体の発熱密度の上昇とともに、機器内部の温度が上昇しやすくなり、規格で定められている温度上昇限度を満足することが容易ではなくなっている。したがって、解析による事前検討を精度良く実施することが必要であり、熱回路網によって熱検討が必要な対象機器

と熱流体解析の必要な機器との区分ができる。このような解析によって求めた各部位の温度上昇が規定の範囲内に収まっていることを確認した。

第10図に流体解析例（固体温度）を示す。熱検討では、熱回路網又は流体解析による温度上昇を検討し、黄色から橙色部で示された発熱が集中する箇所や冷却が十分でない箇所を洗い出し、内部機器配置の最適化を行っている。

3 むすび

当社で使用しているスイッチギヤの各種解析技術を紹介した。近年、解析技術の高度化が進んでいく中で、解析手法の標準化、つまり解析専門家ではなく手順書などを基に設計業務の一環として設計者であれば誰でも使用できることが必要とされている。現状は、解析する上でノウハウや感覚的なセンスに依存する部分が多いため、今後とも解析技術者の育成やマニュアル化を進めていくことが有効と考える。解析技術を製品の性能や信頼性を高める重要なツールとして設計に適用し、お客様に信頼性の高い製品を提供できるよう努める所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



長網 望
Nozomu Nagatsuna
変電機器工場
スイッチギヤの開発検証試験に従事



小嶋 康之
Yasuyuki Kojima
変電機器工場
スイッチギヤの開発設計に従事