

大型変圧器設計高度化の取り組み

技術紹介

■ 岩井 良
Ryo Iwai

■ 吉村 智萌
Tomoaki Yoshimura

■ 五月女 正樹
Masaki Sotome

1 はじめに

わが国で電力用変圧器が製作されるようになり、100年以上が経過した。その間、変圧器の基本構造は大きく変わらないものの、各種基礎試験データの蓄積や解析技術の高度化、新材料の開発などにより、変圧器の設計はたゆまざる進化を続けてきた。

東光高岳においても、1961年にスイスBBC社（現ABB社）との技術提携により66kV 45MVA変圧器を納入して以来、高電圧・大容量化を図り、現在では275kV 450MVAまで製作・納入している。

一方、変圧器に対するニーズも時代とともに大きく変化し、近年では、機器の信頼性向上、小型・軽量化はもとより、低ロス化、環境負荷低減、メンテナンスのミニマム化など多岐にわたっている。さらに、競争の激化や電力システム改革による電気料金の抑制ニーズなどから、大幅なコスト低減も必要となってきている。

東光高岳では、これらさまざまなニーズに対応するため、各種基礎試験や、実規模モデル試験による設計データの蓄積・レビュー、数値解析手法の高度化等に取り組んできている。

本稿では、大型変圧器設計技術高度化の取り組み事例として、貨車輸送変圧器のタンク構造設計に関する取り組みと、変圧器内部の絶縁設計に関する取り組みについて紹介する。

2 タンク構造設計技術の高度化

100MVAを超過するような大型変圧器の輸送は、主として変電所の最寄り駅まで貨車輸送することとなる。貨車輸送の方式は、**図1**に示すように、低床弓形ハリ式、吊り掛け式および落とし込み式に大別されるが⁽¹⁾、質量や旋回半径などの観点からは、輸送制限をもっとも効率的に利用できる吊り掛け式が有利である。しかし、この吊り掛け式輸送の場合、変圧器タンク自体が貨車の一部を形成することから、変圧器タンクに貨車としての強度が要求されることとなり、強固な構造に加え、厳密な強度評価が必要となってくる。そのため、新規タンク開発時には、構造解析による評価に加え、実際にタンクに輸送荷重をかけて強度評価を行う荷重試験を実施してきた。

しかしながら、近年では解析技術の急速な進歩によ

り、大掛かりな荷重試験ではなく、解析による強度評価が主流となってきている。そこで、今回、大幅にコストダウンを指向した実規模モデルにおいて荷重試験を実施し、タンクの強度評価を実施するとともに、その試験結果を解析に反映させることにより、三次元構造解析の精緻化を図った。

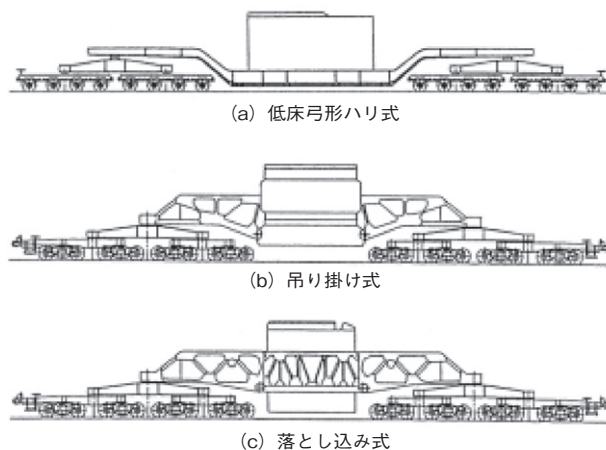


図1 貨車輸送の方式

2.1 荷重試験モデルタンク

荷重試験モデルタンクは、コストダウンを指向した200MVAクラスの実規模タンクとした。**図2**に荷重試験モデルタンクの外観および諸元を示す。



(L7,700 mm × W2,750 mm × H3,400 mm, 25ton)

図2 荷重試験モデルタンク（試験車両への積載状況）

2.2 荷重試験

(1) 測定項目

荷重試験モデルタンクに試験荷重を印加し、各部の応力および変位量を測定した。

応力測定にはひずみゲージを使用し、応力の集中する箇所を中心に、75ポイントの測定を実施した。また、変位量の測定は、レーザ距離計などにより、長辺方向の側板およびタンク底板など、14ポイントの測定を実施した。

(2) 試験方法, 試験条件

荷重試験の状況を図3に示す。荷重試験は、荷重試験モデルタンクを試験車両に積載し、荷重試験枠とジャッキ受け台の間に設置した油圧ジャッキにて、タンク底板上に試験荷重を印加する。試験荷重は、輸送時の動荷重模擬および安全率として、輸送質量の1.5倍とし、6段階に分けて荷重印加および除荷を行い、各段階における応力および変位量を測定した。

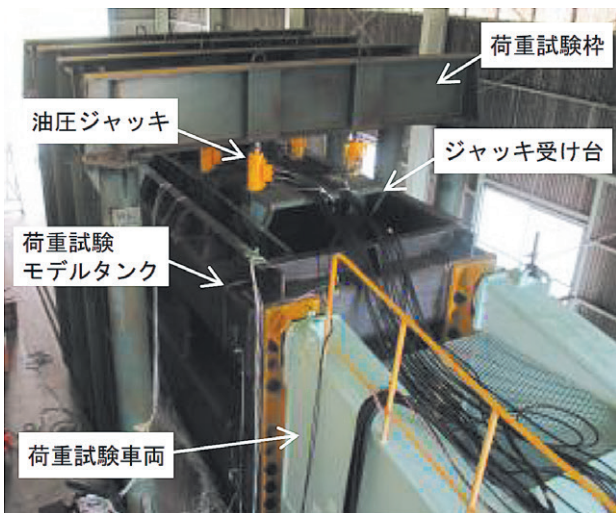


図3 荷重試験の状況

(3) 試験結果

図4に、最大荷重印加時の応力および除荷後の残留応力の測定結果を示す。最大荷重時でも、すべての測定点において降伏点(215~245 MPa)を下回り、また除荷後の残留応力においてもほぼゼロとなることが確認できた。

荷重試験のほか、真空、加圧および吊りなど、各種荷重条件においても同様の測定を実施し、応力および変位量が許容値以下であることを確認している。

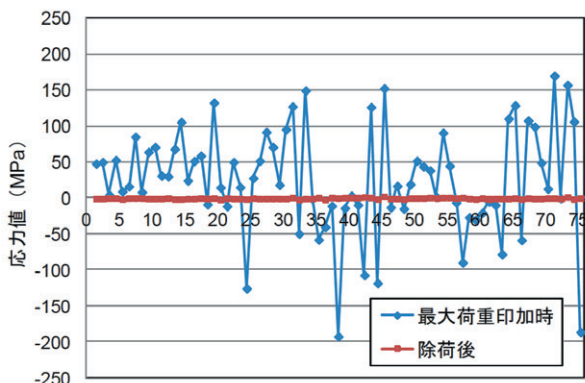


図4 測定結果 (応力値)

2.3 三次元構造解析

(1) 解析方法

構造解析は、製品設計と解析の連携性が良く、また、溶接部の模擬など、細部のモデリングや詳細評価が可

能な、ソリッドモデルにて実施した。なお、短辺方向に対象な構造のため、1/2モデルとし、解析負荷の軽減を図った。図5に解析モデルおよび荷重条件を示す。

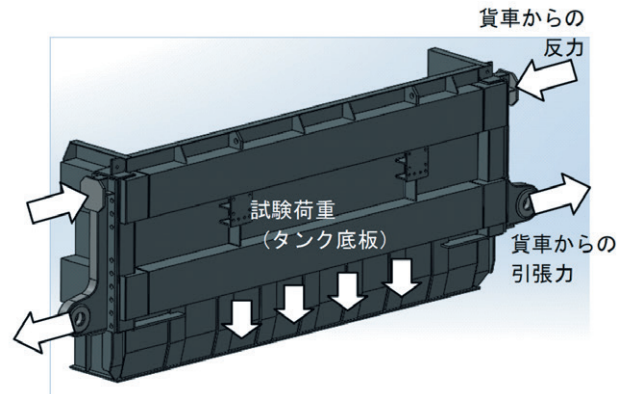


図5 解析モデルおよび荷重条件

(2) 解析結果

図6に解析結果(応力分布)を、図7に各部の応力の実測と解析の比較を示す。一般的なソリッドモデルの構造解析では、溶接部をモデリングせず接触面を鉄板どうしの全面接着とするが、補強の近傍は応力の集中しやすい箇所でもあることから、必要に応じ溶接をモデリングするなど、より詳細に解析を実施した。その結果、図7に示すとおり、解析と実測がほぼ一致し、今後、解析での精度の高い強度評価が可能となったことが確認できた。

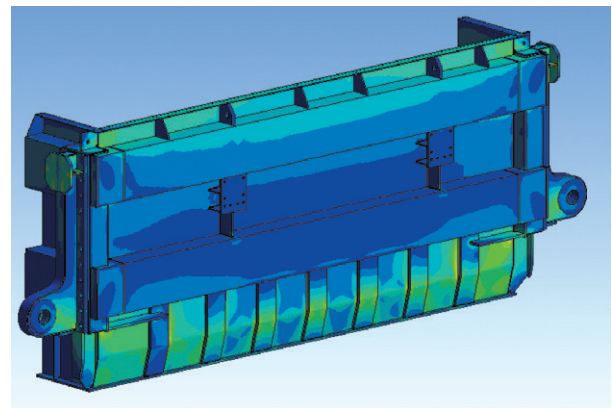


図6 解析結果 (応力分布)

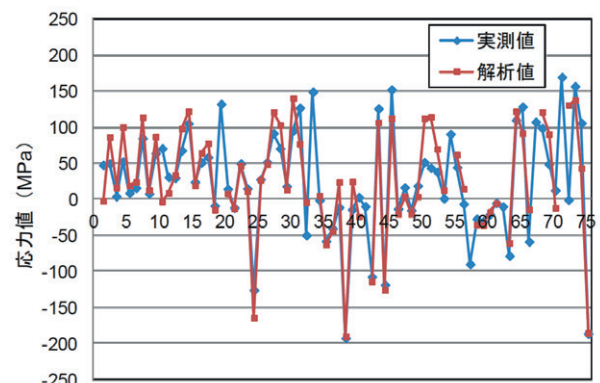


図7 実測と解析の比較 (応力値)

2.4 まとめ

今回、実規模クラスのモデルタンクを使用した荷重試験を実施し、コストダウンを指向した新型タンクの強度を確認するとともに、測定結果をもとに解析精度を向上させることができた。

なお、変圧器のタンクは、輸送荷重のほか、工場内移動時の吊り荷重、注油時の耐真空および内部異常時の内圧上昇に対して、適切な強度を確保する必要があり、同様に試験と解析評価を実施し、総合的に最適な補強構造を採用している。

今後は、この成果を踏まえ、解析を有効活用することにより、設計リードタイムの短縮や更なるコストダウンタンクの開発を進めていく。

3 絶縁設計技術の高度化

変圧器内部の絶縁には、ターン間、セクション間、主ギャップ間、リード～アース間、裸電極間など、さまざまな絶縁構造が存在しているが、いずれも絶縁油と油浸した絶縁紙およびプレスボードを組み合わせた複合絶縁を基本としている。

ターン間やセクション間など、比較的要素モデル化しやすい絶縁構成については、その破壊電圧や破壊現象について、東光高岳でもこれまで数多くの試験を実施してきた。しかしながら、リード支持部については、リード線の表面電界、支持物の沿面電界、支持物とリード線とのクサビ状ギャップなど、複数の要因が複雑に絡み合うため、要素モデル試験での絶縁評価が困難であり、実構造を模擬した絶縁検証試験が必要となってくる。

今回、リード支持部の実構造を模擬した雷インパルス絶縁試験を実施し、更なる構造合理化を図った。

3.1 モデル構造

モデルは、巻線とブッシングを接続するブッシングリード部を模擬し、紙巻軟銅より線（以下、リード線）を、ブッシングアダプタを模擬した金属構造物（アース）に取り付けた絶縁物にて支持する構造とした。また、リード線の支持部には、絶縁耐力の向上およびリード線の被覆保護を目的に、プレスボードを巻回した。模擬アダプタの直径は、300 mm、400 mm および 500 mm の3通りとした。

なお、模擬アダプタには、モデルの電界に影響を与えないよう配慮した扉を設け、リード線および支持絶縁物の交換が容易な構造とした。

3.2 試験方法

試験は、リード線、模擬アダプタおよび支持絶縁物からなるリード支持モデルを、絶縁試験タンク内に設置

し、1,550 kV まで印加できるよう、550 kV ブッシングを介して試験電圧を印加した。絶縁試験装置およびリード支持モデルの取り付け状況を図8に、試験時の回路構成を図9に示す。

試験波形は負極性標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μ s) とし、破壊想定値の70%から50 kV ステップで各1回、電圧を印加した。

リード支持モデルのn数は各アダプタ径につきn=5とし、最も実器サイズに近い ϕ 500 mm モデルのみn=10とした。



(a) 絶縁試験装置外観

(b) リード支持モデル取り付け状況 (絶縁試験装置内部)

図8 絶縁試験装置

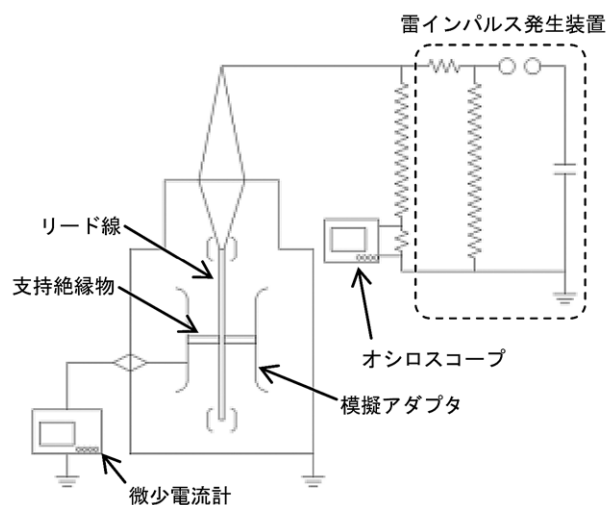


図9 試験時の回路構成

3.3 試験結果

(1) 破壊様相

図10にφ500 mmモデルにおける放電の進展経路の一例を示す。どのモデルにおいても同様の破壊様相を示しており、その進展フローは以下と考えられる。

- ①リード線と支持絶縁物の接触点を起点に、模擬アダプタに向かって支持絶縁物表面を沿面放電
- ②支持絶縁物の端部から模擬アダプタに油中閃絡（放電経路全体がアース電位となる）
- ③リード線と支持絶縁物の接触点がアース電位となり、そこから破壊しやすいリード線部まで保護絶縁物表面を沿面放電し、リード線部の被覆を貫通破壊

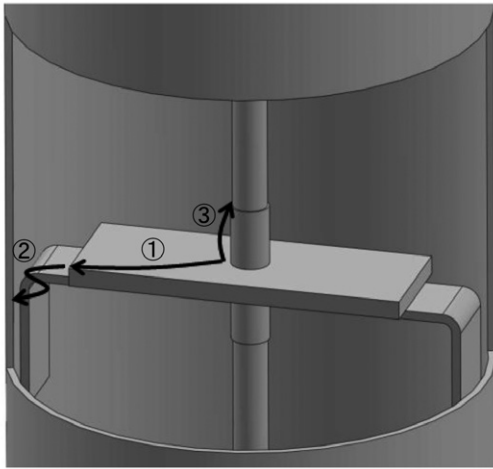


図10 放電の進展経路

(2) 電界評価

破壊の始発がリード線表面であるため、破壊時のリード線表面の電界に着目して整理した。図11に破壊時の電界を示す。図11は、支持絶縁物がない場合と比較しやすいよう、破壊時のリード線の電界を、支持絶縁物がない場合の破壊電界を1.0 p.u.として正規化している。なお、支持絶縁物がない場合の破壊電界については、過去に報告されている90%SOV^{注1)}に関する考え方⁽²⁾に基づいて検討した。

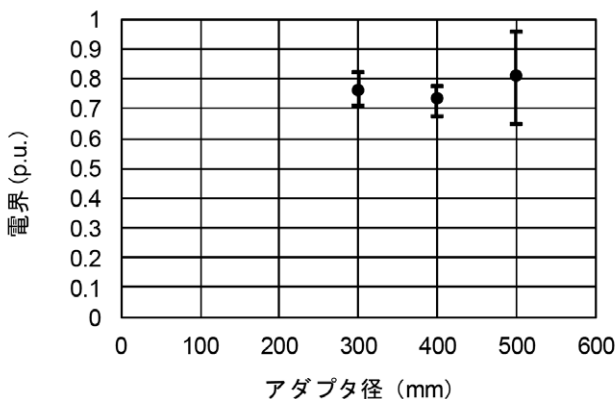


図11 破壊時の電界

破壊時の電界は、分散分析による評価の結果、アダプタ径によらず一定であるという結果となった。また、破壊時の電界は、支持絶縁物を取り付けられることにより、リード線と支持絶縁物間に微小なクサビ状ギャップが生じたこと、および、等電位線に垂直な沿面経路ができたことなどが要因となり、支持絶縁物がない場合に比べ、20%～25%程度低下する結果となった。

3.4 まとめ

今回の実構造を模擬した絶縁試験から、リード線の支持部の破壊様相および破壊時の電界を確認することができた。破壊の過程は、クサビ状ギャップ部を起点とした沿面放電、油中閃絡および絶縁被覆の貫通破壊と、さまざまな破壊現象の組み合わせではあるが、本構造においては、リード支持がある場合も、リード線表面の電界をベースに絶縁設計が可能であることが確認できた。

4 おわりに

変圧器の設計に必要な要素技術は、今回紹介した構造設計や絶縁のほか、冷却、騒音（振動）、電磁機械力など、多岐にわたる。今後も、基礎試験を実施し着実にデータを蓄積していくとともに、数値解析による設計高度化を進め、より高品質、高機能な変圧器を開発し、顧客のニーズに応じていく所存である。

■参考文献

- (1) 日本貨物鉄道株式会社監修 社団法人 日本鉄道車両機械技術協会：「特大貨物・甲種鉄道車両等輸送取り扱い方解説書」
- (2) 毛受新一、池田正己：「変圧器油の絶縁破壊の統計的考察について」、電気学会雑誌，Vol.92，No.12（1972）

■語句説明

注1) 90%SOV：90% Stressed Oil Volume（90%課電体積）。不平等電界における体積効果は、全油体積ではなく、90%以上の電界下にある油体積で評価できるという考え方。

岩井 良

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

吉村 智萌

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

五月女 正樹

電力プラント事業本部
大型変圧器製造部 大型変圧器設計グループ 所属