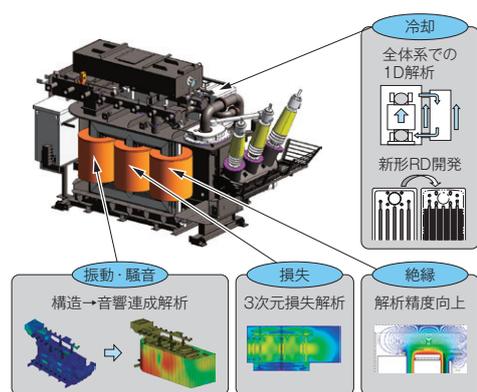


最近の変圧器技術

櫛木一寿 Kazuhisa Kushiki
脇本 聖 Kiyoshi Wakimoto

キーワード 配電用変圧器, 全装輸送, 連成解析, 磁界解析, 騒音解析

概要



構成図

変圧器の設計では最近の3D解析や連成解析を用いた新しい取り組みを行っている。磁界解析では3D解析で精緻な解析を行い、損失低減に活用している。また、磁界解析から振動解析・騒音解析まで連成解析を行い、低騒音化の検討を行っている。

一方、製品では20MVA配電用変圧器の軽量・コンパクト化に取り組んだ。この容量の変圧器は、通常工場から出荷する際、トレーラの積載質量や輸送寸法の制限から分解して輸送するが、今回の取り組みでは、変圧器内部の絶縁油を抜くことなく、完全な全装可搬形とした。輸送制限内とするには10%程度の質量低減が必要であり、絶縁・冷却の合理化、タンクの絞り込みや薄板化で極限まで質量を低減している。

1 まえがき

電力輸送に用いられる変圧器は、歴史が古く基本原理は変わらないものの、適用される技術は進歩している。当社も昨今進化の目覚ましい計算機を用いた解析技術を活用し、製品の特性や経済性の改善を図り、社会インフラへの貢献に取り組んでいる。

近年、変圧器には、初期投資の低減に加え、LCC (Life Cycle Cost) に基づく経済性の考慮や周囲環境に配慮した損失や騒音の低減が要望されている。これらの要望に応えるため、3次元の精緻な磁界解析を実施し、損失低減や負荷騒音の原因となる巻線機械力の計算を行っている。さらに連成解析を行うことで、振動によって最終的にタンクから放射される騒音評価を行い、騒音低減に活用している。

一方、幅広い電力ネットワーク形成のため、数多く設置されている配電用変圧器に対しては、本体の

コスト削減に加え、現地工事の簡略化や工期短縮が要求される。本稿では、社内試験後に解体せずに全装輸送できる20MVA変圧器を開発したので、最近の解析技術と併せて紹介する。

2 最近の解析技術

変圧器は、絶縁・冷却・機械的強度など所定の性能を満足することが求められる。また、周囲環境に配慮した損失や騒音の低減が求められる。さらにグローバル化による競争の激化に対応するため、開発期間の短縮化がこれまで以上に強く求められる。これらの要求を満足するためには、解析による物理現象把握・性能予測・設計最適化が極めて有効である。このため現在、解析技術は変圧器の開発・設計に欠かせないものとなっている。

近年、商用の解析ソフトウェアが広く普及し、そ

の利便性が格段に向上したため、変圧器設計への適用が進んでいる。ここでは3次元解析の活用について2つの事例を紹介する。

(1) 変圧器の構造材漂遊損 大形変圧器のタンクのように寸法の大きな構造材（鋼材）に対し、板厚方向には表皮効果を計算できるだけの細かい要素分割が必要となるため、解析モデルが大規模になる特徴がある。

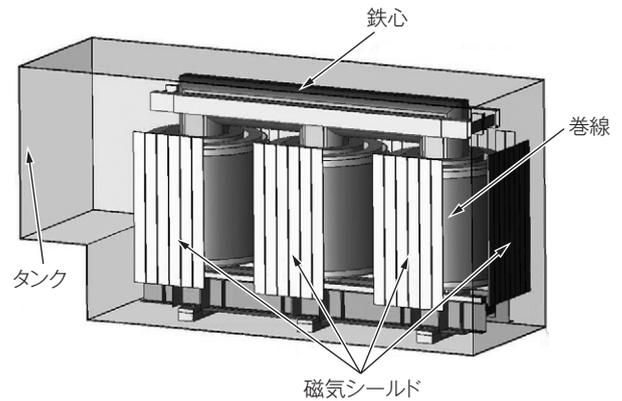
(2) 負荷電流により生じる変圧器の振動・騒音 負荷電流によって生じる磁束密度・ローレンツ力・巻線振動・油の入ったタンクの振動・音響放射を全て考慮しなければ最後の騒音評価までたどり着けないため、複数の現象を連成させて解くことが特徴である。

これらの解析は元々難易度が高い上、解析結果は条件の異なる様々な変圧器で実測結果と一致することが求められる。このような観点から、製品検討で種々ノウハウを蓄積し、おおむね実用の域に到達してきた。

2.1 変圧器の構造材漂遊損解析の実用化

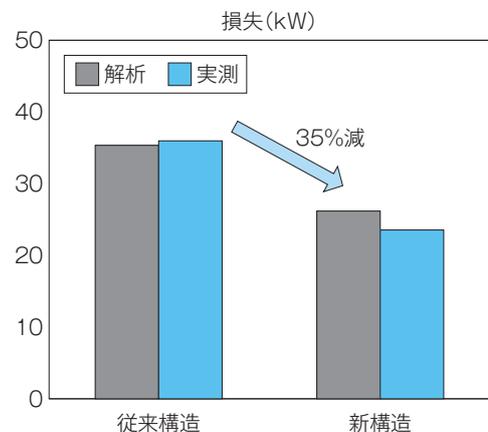
変圧器の漂遊損を低減するため、漏れ磁束がタンクに入らないようにタンクの内側に磁気シールドを設置する方法がある。従来は2次元の損失解析を行い、磁気シールドの寸法や配置を決定してきた。しかし、2次元解析では3次元的な磁束分布を考慮できないため、構造の大幅な変化に精度よく対応できないことや、適正な磁気シールド配置を決定できないことなど、不十分な点があった。限られた磁気シールドの量でより効果的に漂遊損を減らすためには、3次元の損失解析が必要である。

そこで、製品を模擬した3次元有限要素法による損失解析を行った。第1図に3Dモデル（従来構造）を示す。損失の発生源を把握し方針を検討するために磁束分布や損失分布を可視化し、対策ポイントを明確化した。そして、その対策ポイントに対し磁気シールドの寸法・本数・配置など種々の調整を行い、新構造を求めた。第2図に従来構造と新構造での損失解析結果と実測結果を示す。解析結果は、従来構造・新構造ともに実測結果に対し近い値が得ら



第1図 3Dモデル（従来構造）

鉄心・巻線・タンク・磁気シールドなどから成る製品の3Dモデルを示す。



第2図 損失解析結果と実測結果

従来構造と新構造での解析結果と実測結果を示す。解析結果は実測結果に対し近い値が得られ、この例では実測で35%程度削減できた。

れ、本解析は十分実用の域に到達していることが精度の面からも裏付けられている。この例では、実測で構造材漂遊損を35%程度削減することができ、有用性を確認した。

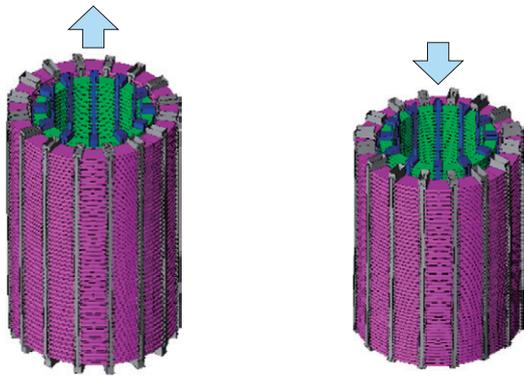
大容量変圧器の製品設計への3次元損失解析適用では、解析モデルが大規模になり、要素数増大に伴う解析時間の増加が問題となる。そのため、いかに解析時間を短くできるかが実用上重要となる。大規模解析を行うにあたり、形状の簡略化や並列計算の採用などで現実的な解析時間まで短縮することができた。また、大容量器では特に低圧側が大電流となるため、大電流リード周りのブッシングポケットなどに生じる損失も考慮し、解析精度の向上を図っている。

2.2 負荷電流により生じる変圧器の振動・騒音解析

2.2.1 磁界・構造連成解析による巻線振動評価

第3図に巻線の周波数応答解析結果を示す。2種類（円板・円筒）の巻線に対し、気中通電時のローレンツ力を加振力とする巻線の振動を解析し、モデル実験の結果を再現した。解析対象は、タンクを除く変圧器の中身部分とした。巻線の電磁機械力を求める解析手法を、短絡電流だけでなく負荷電流にも適用し、通電時の騒音の検討に活用している。常規運転時の巻線振動解析では、巻線の固有振動特性と加振力であるローレンツ力の分布が重要と考えられ、3次元の固有値解析や周波数応答解析を行っている。短絡時に比べ発生力が小さいため変形は微小で、油浸プレスボードは線形材料（弾性率一定）としてモデル化した。

卓越モードは巻線の設計によるが、この例では解析の結果、第3図に示すように電源周波数50Hzの2倍の100Hzで、円板巻線では軸方向の伸縮が、円



(a) 円板巻線の軸方向伸縮モード



(b) 円筒巻線の径方向楕円モード

第3図 巻線の周波数応答解析結果

2種類（円板・円筒）の巻線に対し、気中通電時のローレンツ力を加振力とする振動を解析した結果、実測で認められた軸方向の伸縮モードと径方向の斜めの楕円モードが、応答解析でそれぞれ再現された。

筒巻線では径方向の斜めの楕円モードが顕著となった。これは、同様の条件で実施した実験結果を再現している。また、振動解析で適切な減衰係数を設定することで、応答解析の加速度の結果が実験結果に近い値となることも確認している。

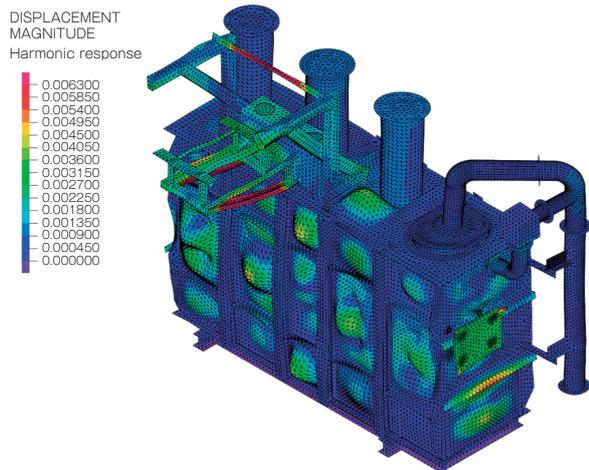
このように、巻線で生じる電磁現象を考慮した振動解析を行うことで巻線振動を制御することができ、巻線振動を低減することで変圧器の低騒音化が期待できる。

2.2.2 実器モデルの構造・音響連成解析による騒音評価

変圧器の負荷電流騒音を解析で評価する場合、いくつかの物理現象を考慮する必要があり、より高度な技術が必要となる。特に油入変圧器の騒音を解析する上で課題となるのは、変圧器内部の絶縁油を考慮した振動解析である。これについては、粘性を無視し質量や波動伝播を考慮できる要素を使用することで解決し、通常の流体要素を扱うよりも計算の収束性や計算コストを改善している。また、簡易的に変圧器を模擬した基礎実験でも解析と実測の振動特性は良好な一致を示している。

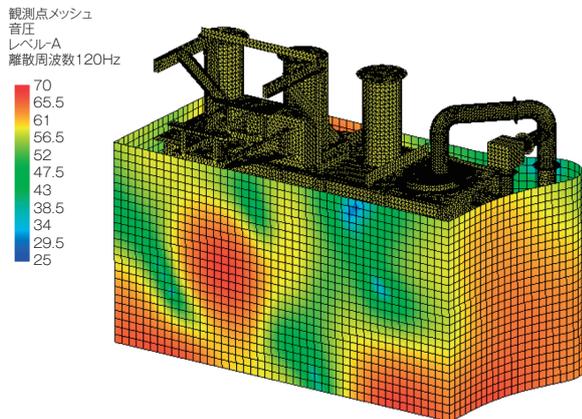
以下に実器モデルで騒音を評価した事例を紹介する。実器モデルで周波数応答解析を行うにあたり、タンクはシェル要素、絶縁油は前述の要素でモデル化している。タンク内部の中身は省略し、タンク外部には重量物（放熱器・ブッシング・コンサベータなど）が配置されるが、これらは集中質量や梁でモデル化し、解析モデルが大規模になり過ぎないように配慮している。振動源はタンク内部の流体部分から巻線部分（3相分）を円筒形にくりぬいた領域を作成し、その境界面に巻線の振動モード（前述の巻線振動解析を参照）に合わせて強制振動を、3相交流を考慮し120°位相をずらして与えている。第4図に実器モデルの周波数応答解析結果を示す。

次に、音響解析では振動解析で使用したモデルから一部の部品（放熱器・ブッシング・コンサベータなど）と内部流体要素を削除している。またJEC-2200-2014で規定されている位置に騒音評価面を新たに作成し、地面は全反射とした。解析手法に境界要素法を用いているため空間全体に要素を分割す



第4図 実器モデルの周波数応答解析結果

巻線の強制振動を与え、内部の絶縁油を考慮したタンクの振動解析結果を示す。



第5図 音響解析結果

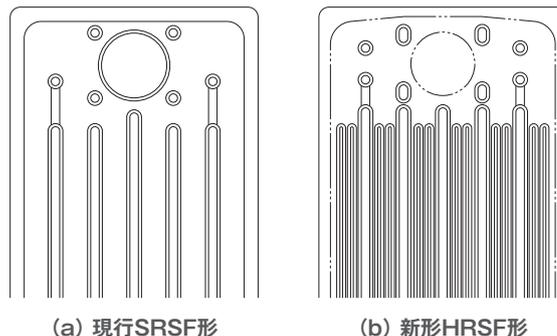
JEC規格の騒音評価面での音圧解析結果を示す。実際の測定点と同じ位置で音圧解析結果のパワー平均をとると、実測と一致した。

る必要が無く、計算コストを削減している。

第5図に音響解析結果を示す。解析結果から騒音評価面で音圧分布を出力することができる。実際の測定点と同じ位置で音圧解析結果のパワー平均をとると、実測とよく一致した。さらに、同じ容量でタンク構造が異なる変圧器の音響解析結果と実測結果を比較し、両方の騒音の大小関係が解析で再現できることを確認している。

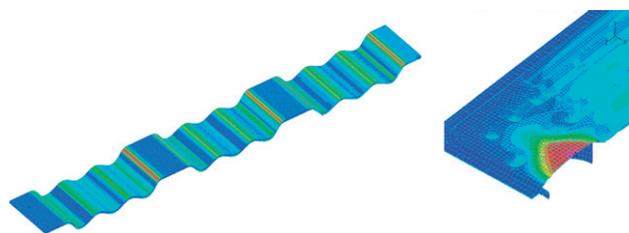
3 新形放熱器の開発

一般的に変圧器の冷却は、タンクの表面積だけで



第6図 パネル形状比較

新旧の形状の違いを示す。新形放熱器は、放熱面積と強度向上のため折り曲げと溶接部を追加した。



第7図 放熱器パネルの解析結果

解析の結果でひずみの分布を示す。パネルを折り曲げた時に割れが生じないように解析を行った。

は発生損失に対する放熱面積が不足するため、タンク周辺にパネル形放熱器を配置することで放熱面積を確保し、油の温度上昇を抑えている。当社では、海外グループ会社のMeiden Metal Engineering Sdn. Bhd.で幅の狭いSRSF形、幅の広いRSD形のパネル形放熱器を製造・販売している。

今回のプレス成形設備の更新に伴い、SRSF形の後継であるHRSF形を開発した。第6図にパネル形状の比較を示す。HRSF形の開発コンセプトは、放熱面積の増加と油量の低減を行い、またパネル板厚の削減を検討し、変圧器の軽量・コンパクト化に貢献することである。

HRSF形の開発では、弾塑性有限要素法解析を用いてプレス成形解析を実施し、プレスの加工性と破断限界の制約の下、放熱面積の最大化と油量の最小化を図った。第7図に放熱器パネルの解析結果を示す。同様に、破壊強度の最大化を目的として、上下ヘッダ部構造とスポット溶接間隔を検討した。また、SRSF形との互換性を維持するため、HRSF形

第1表 開発した放熱器の検証結果

放熱器の試作で検証した結果を示す。面積・油量・質量が低減し、試験結果では強度や温度特性に問題は無かった。

検証項目	測定値	検証方法
放熱面積*1	+6%	ヒートランで確認
油量*1	-30%	質量測定
鋼材質量*1	-6%	質量測定
疲労試験	クリア	22,000回圧力試験
破壊試験	0.7MPa以上	破壊試験

注. ※1. 現行SRSF形との比較

はパネル幅・取り付けパイプ径・パネルピッチを同一とし、既設の変圧器にも使用した。開発したHRSF形の特長は、以下のとおりである。

- (1) 放熱面積が増加
- (2) 油量を削減
- (3) 軽量化の実現
- (4) 強度の強化（形状及び溶接）
- (5) 互換性を確保

試作器で確認試験を行い、第1表の結果を得た。放熱面積は増加し、油量・質量は低減しているものの、破壊強度は現行品以上の結果となった。結果は良好であり、今後各製品へ適用していく。

4 配電用変圧器の全装輸送化

4.1 開発コンセプト

電力用に用いる配電用変圧器の容量は、一般的に10～30MVAが使用されている。このうち、電力需要の点から最も製作台数の多い容量は20MVAである。20MVAの変圧器を輸送するには、輸送上の寸法と質量の制限から部分的に分解し、内部の絶縁油を抜くのが通常である。この場合、現地で再度組み立てと注油が必要となり、現地工期に大きく影響する。小容量器と同様に解体することなく輸送できれば製造者とお客様にメリットがあるため、需要の多い20MVAでも全装輸送できる製品開発に取り組んだ。全装輸送の定義は、絶縁油のみを抜いて輸送する場合も含むが、今回は絶縁油を入れた完全な状態での全装輸送を目指した。全装輸送ができれば、社内での解体作業が不要となり、また据え付け工事現

場への機器搬入及び組み立て作業が省略できる。これにより、納期や工期の短縮が見込める。さらに自然災害などで機器に障害が生じた場合、全装輸送での入れ替えができれば速やかな復旧にも貢献できる。

近年、トレーラも軽量化され輸送質量も増加する傾向にあるが、特殊なトレーラを使用しない全装輸送の可能性を検討した。この場合、当社の現行設計品から10%程度の質量低減が必要となる。長年、軽量化やコンパクト化を検討している機器であり、容易には実現できなかったため、軽量化は、3項で記述した放熱器のパネル設計から見直した。絶縁や冷却合理化の検討による中身構造のコンパクト化、さらにタンクの薄板化や徹底した絞り込みを行い、目標を達成した。

開発目標は輸送の許可申請を考慮し、質量は35t以下、寸法は住宅街など道路が狭い場合を考慮してW3000×H3620×L6000mm（床面）以下とした。

4.2 中身構造の軽量化

変圧器の中身構造のコンパクト化・質量削減は、絶縁検討手法の精度向上及び温度検討手法を見直し、絶縁と冷却の合理化を検討することで実現した。絶縁解析は精度が比較的高い自社作成ソフトを利用しているが、一部補正が必要となるため裕度のある設計を行っていた。精度向上のためプログラムを見直し、更に従来の等電位線に加えコンター図を表示できるよう可視化機能を改善した。絶縁検討手法の精度向上で、従来の構造で余裕のあった部位の絶縁寸法の縮小を検討し、最大で約15%縮小した。

製品の検討では、絶縁検討に加え温度評価も重要な検討項目である。冷却と絶縁は排反する関係にあり、巻線の絶縁寸法を縮小すると、そこを通る絶縁油などの冷却媒体の流れに影響するため、絶縁と冷却を合理化する必要がある。それには、様々な条件が考慮できる精度のよい温度評価技術が必要となる。この場合、変圧器全体の解析を行う必要があるが、計算機が発達した現在でも複雑な構造を持つ変圧器全体を温度解析することは不可能である。

そこで今回、変圧器全体を評価するため一部単独で行った解析結果を用い、1D解析を活用することで全体の温度評価を精度よく算出する手法を確立した。後述するとおり実測値と解析値はよく一致し、十分な精度が得られることが確認できた。これにより、様々な機器への対応や条件の違いに対しても精度よく温度を評価することができた。これらの技術改善で、精度向上のみならず検討そのものが容易にできるようになり、変圧器の中身質量を4%減量することに成功した。

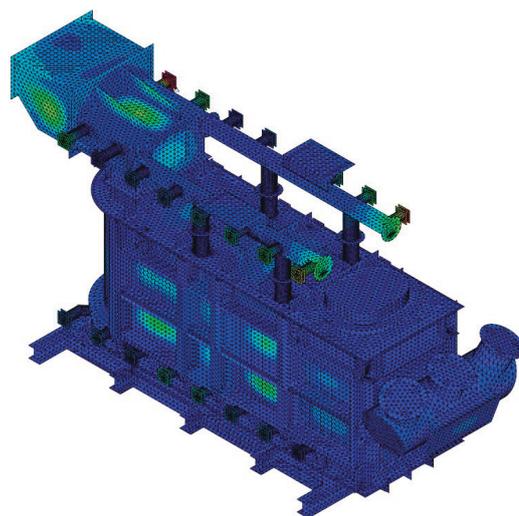
4.3 外装構造の軽量化

変圧器の外装構造で質量を低減する場合、変圧器総質量で大きな割合を占める変圧器内部の油量とタンクや締金などの製缶品が検討の対象となる。現行の20MVA配電用変圧器では総質量に対し、油量が約25%、製缶品が約15%となり、これらの削減が変圧器軽量化に効果的であることが分かる。そこで外装構造では変圧器タンクの内容積縮小化による油量削減及びタンクの薄板化による軽量化を検討した。

変圧器タンクの内容積縮小化は、タンク形状を半オーバル構造とし、コンパクト化した中身体格に合わせることで油量を削減した。また、絶縁寸法及び中身部品のタンク入れ時の寸法を確保した上で、タンクを絞り込んだ構造を採用した。3項で紹介した新形放熱器の採用と併せ、合計で約16%の油量削減を達成した。

4.4 変圧器タンクの薄板化による軽量化

変圧器タンクの薄板化は軽量化には効果的だが、タンク強度と騒音に影響を与える可能性があり、十分な検討が必要である。タンク強度は、形状が複雑でなければ理論計算式によって計算できるが、今回検討した変圧器タンクは絞り込みやオーバル構造を採用した複雑な形状であることから、精緻な計算が必要となる。そこでCAEを用いてタンク強度検討を行っている。第8図に耐真空強度解析結果を示す。補強鋼材の本数やピッチなどを検討し、許容応力値以下になるよう設計して鋼材質量を約19%削減した。



第8図 耐真空強度解析結果

応力の分布を示す。補強構造を検討した際、強度解析を実施した。

第2表 試作器の検証結果

試作器で検討した項目と検証結果を示す。検討項目に対し、結果が良好であった。

項目	検証結果	検討内容に対する検証結果	
		検討	検証
絶縁	○	検討	計算精度向上・絶縁寸法縮小（最大15%）
		検証	絶縁試験クリア
温度	○	検討	1D解析を用い、全体系の解析で精度向上
		検証	実測値に対し油温度が1K以内の誤差
騒音	○	検討	従来設計から30-50%薄板化・低騒音構造検討
		検証	騒音値は従来設計品と比較し同程度
その他特性	○		

4.5 検証と製品化

軽量化・寸法削減の設計を検討し、目標を上回る設計を完了させ試作器を製作した。第2表に試作器の検証結果を示す。検証結果は良好で、製品化の目途が立った。今後は製品へ適用することになり、初号器は東京電力パワーグリッド(株)へ納入する。

5 むすび

最近の変圧器技術として、3次元解析を活用した損失と騒音の検討事例、新形放熱器の開発、20MVA配電用変圧器の油入り全装可搬化の取り組みを紹介した。

解析技術は進歩し、変圧器の開発・設計に欠かせないものとなっている。製品の設計過程でも3次元解析や連成解析を積極的に用い、新しい取り組みを行っている。磁界解析では3次元の精緻な解析を行い、構造材漂遊損の低減に活用している。また、磁界解析から巻線の振動解析あるいは絶縁油の入ったタンクの振動解析、さらには騒音解析まで連成解析を行い、低騒音化の検討を行っている。今後、実器での活用や実測との突き合わせを積み重ね、更に解析精度を向上させ、製品でより効果的に活用し、製品競争力の強化に貢献する検討を行っている。

新形放熱器の開発では、変圧器の軽量・コンパクト化に貢献するよう、放熱面積の増加・油量の削減・パネル板厚の低減を図った。

製品開発では、20MVA 配電用変圧器の軽量・コンパクト化に取り組んだ。この容量の変圧器はこれまで全装輸送はできなかったが、今回の取り組みでは変圧器内部の絶縁油を抜くことなく、完全な全装

可搬形とした。輸送制限内とするには10%程度の質量低減が必要で、絶縁・冷却の合理化、タンクの絞り込みや薄板化で極限まで質量を低減した。

今後も当社は、これらの技術で社会インフラへの貢献に努めていく所存である。

・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》



榎木一寿
Kazuhisa Kushiki
変電機器工場
変圧器の設計・開発に従事



脇本 聖
Kiyoshi Wakimoto
変電機器工場
変圧器の開発に従事