

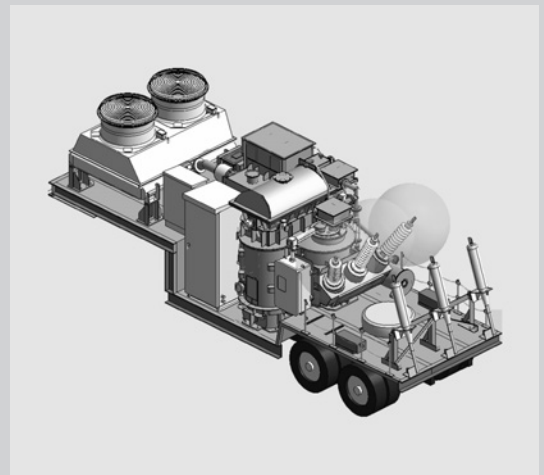
最近の移動用変圧器車技術

🔗 移動用変圧器, 質量管理, 高温絶縁, ハイブリッド絶縁, 三次元CAD, 3D-CAD, 転倒角, 強度解析

* 榎木一寿 Kazuhisa Kushiki * 望月丈義 Takeyoshi Mochizuki * 神尾幸嗣 Koji Kamio

概要

阪神淡路大震災, 東日本大震災と二つの大きな地震以降, 移動用変電設備への需要が高まっており, より大容量かつ多機能であることが要求されている。一方, 移動用変電設備は道路交通法に則り, 質量や寸法, 転倒防止角度などの制限を満たす必要がある。これらの要求に応えるために, 移動用変圧器車では仕様の合理化を提案するとともに, 耐熱性の高い材料を組み込んだハイブリッド絶縁, より精度の高い質量設計のための三次元CADの有効活用と質量管理, 構造変更に対する高度な強度解析などを適用している。



トレーラ積載形移動用変圧器車

1. ま え が き

移動用変電設備に対する関心は, 阪神淡路大震災以降増加しており, 2011年の東日本大震災で加速した。移動用変圧器車(以下, 移動変)についても同様で, 現在, 電力会社を中心にPRを展開している。一方, 使用環境や性能に対する要求は年々厳しさを増しており, これらに対応するためには, より高度な技術が必要となる。**本稿では, 移動変の使用目的や軽量化技術などについて紹介する。**

2. 移動変の使用目的

移動変の仕様には配電用変圧器の適用規格が用いられ, 配電変電所(配変)用の一次電圧66~110kV, 容量20MVA以下の変圧器が主となっており, 運転中の変圧器が停止した場合にその代用と

*スイッチギヤ工場

して使用される。この時, 停止する理由は二つに大別される。一つは計画的なリプレイスや修理の場合, もう一つは突発的な事故対応の場合である。主目的をこれらのどちらにおくのかによって移動変の設計コンセプトは異なってくる。

3. 使用環境及び要求

移動変は, 特定の変電所や場所を想定して設計していない。どこの変電所にも移動できるように, コンパクトで軽量, かつ低騒音な機器が要求される。

計画工事適用目的を主とする場合, できるだけ一般配電用変圧器としての仕様が要求され, 移動変としては大容量で低騒音な仕様となる。計画工事の場合, 使用する時期と場所が明確であり, 事前に車両の通行許可を申請できるため, 申請によって輸送質量を大きく設定しやすいトレーラ積載タイプが有効となる。一方, 緊急対応の場合は事

前申請する時間がないことから、基本的に事前の通行申請が不要な総質量20t以下で、コンパクトなトラックタイプとなる。20t以下の場合、現状では一般的な配変の容量20MVAの製作は困難で、質量と変圧器容量の設定、さらに車検時に計測される転倒角とのバランスを考慮した設計が要求される。

近年、車両の転倒事故が増えていることから、特に特殊車両の場合は車検時に転倒角を実測するようになった。これは車両を実際に30度まで傾けて転倒しないか確認するもので、合格しない場合は車両運行時に制限が課せられ、緊急時の使用が困難となる。**第1図**に移動変の転倒角測定状況を示す。

また移動変の方式には、移動変と車両が一体となっているタイプと、移動変本体と車両を分離して使用可能とするタイプがある。分離するタイプのメリットは、移動時にトレーラや一般トラックの使用が可能となり、移動変としての車検は不要となる。しかし車検や保管の際に、車両から変圧器を降ろす必要があり、積み下ろしの都度大型クレーン車又は専用工場が必要となる。

4. 軽量化技術

移動変では、軽量化は重要な課題であり、当社では以前からアルミ製タンクの採用や、防爆に対しても有効なタンクとコンサベーター一体構造、低騒音アルミクーラー、ポリマーブッシングなどの採用を進めている。より精度の高い最適設計のため、近年力を入れている三つの軽量化技術を以下に紹介する。

4.1 ハイブリッド絶縁

従来の移動用変圧器では、一般的なクラフト紙よりも耐熱性能の高い耐熱絶縁紙（アミン添加紙）を巻線部に適用して変圧器規格JEC-2200の規定より10K高い平均巻線温度上昇70Kを採用し、変圧器本体の小形軽量化を進めてきた。今回紹介するハイブリッド絶縁技術は、IEC60076-14に規定されているHybrid Insulation Systemを適用し、油入変圧器よりも耐熱クラスの高い乾式変圧器やガス絶縁変圧器に使用される高温絶縁材料（アラミド紙）



第1図 移動変の転倒角測定状況
実際に製作した移動用変圧器を車両ごと30度傾けて、転倒しないか確認している状況を示す。

第1表 温度上昇限度（IEC60076-14）

IEC60076-14で紹介されている高温絶縁材料を使用した油入変圧器の温度上昇限度を示す。

	通常機器	Mixed insulation system	Semi-hybrid insulation system	Hybrid insulation system	
高温絶縁材料の耐熱クラス	N/A	130	120	155	
最高油温 (K)	60	60	60	60	
平均巻線温度 (K)	65	65	75	95	
高温絶縁材料使用部の温度上昇限度 (K)	N/A	110	90	130	
高温絶縁材料適用状況 (部位は第2図参照)	①	N/A	N/A	N/A	高温絶縁材料
	②	N/A	高温絶縁材料	N/A	高温絶縁材料
	③	N/A	高温絶縁材料を高温部のみ使用	N/A	高温絶縁材料
	④	N/A	高温絶縁材料を高温部のみ使用	高温絶縁材料	高温絶縁材料
	⑤	N/A	N/A	N/A	高温絶縁材料

注. N/A : Not applicable (非該当)

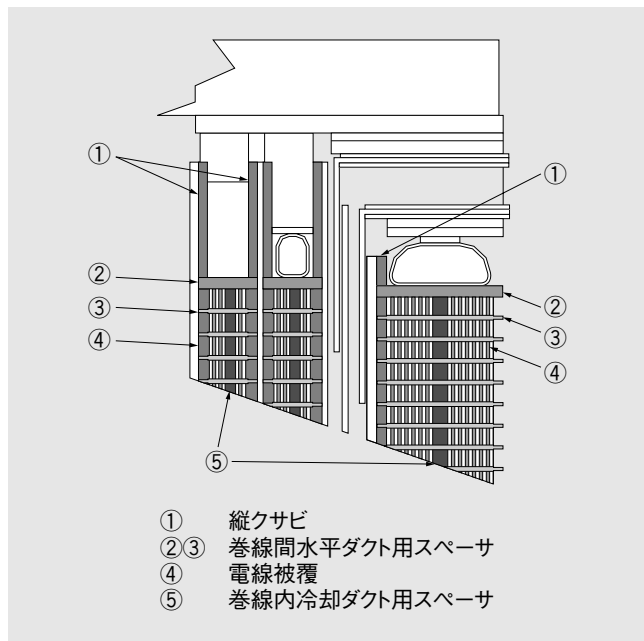
を巻線部に採用し、平均巻線温度上昇を95Kまで引き上げるもので、更なる高電流密度化による巻線のコンパクト化と、変圧器本体の小形・軽量化を実現した。**第1表**に温度上昇限度を、**第2図**に高温絶縁材料使用部位を示す。

移動用変圧器の機器仕様によって効果は異なるが、電線の使用量が多い高インピーダンス器ほど効果は大きくなり、変圧器の中身質量は、10~20%程度の低減効果が見込まれる。しかしながら中身質量が低減される一方で発熱量が増大するため、冷却容量の大きな冷却装置が必要となり、適正な冷却性能を有する冷却装置の選定が重要となる。

4.2 三次元CAD設計を有効活用した質量管理

軽量化と大容量化を実現するためには、精度の

高い質量管理が必要となる。設計質量の精度を上げることで制限質量により近づけた設計が可能となり、その分変圧器容量を増加できる。現在、設計には三次元CADを利用しており、軽量化のために複雑な形状となる移動変の質量計算に活用している。



第2図 高温絶縁材料使用部位

IECで紹介されている巻線内に耐熱クラスの異なる材料を用いた場合の巻線構造図を示す。

また移動用変圧器では、質量超過を防ぐために、製作途中での部品単位・工程ごとの設計質量と実測質量の差をトレースする必要がある。また部品単位まで細分化した実測質量のデータを蓄積することで、設計質量の精度向上が可能となる。

製作途中の各段階では、作業者が細かく質量を測定しているが、測定漏れのないよう正確に測定することは難しい。あまり細分化しても測定誤差が累積されてしまうため、ある程度のブロック単位で測定するが、細かい部品の取り付け状況が不明確で、測定漏れや重複が起きていた。その対策として、各工程で測定する部品やブロック単位で質量の集計表を作成し、その集計表に3D-CADのデータからイメージ図を貼り付け、質量測定する部品が一目で分かるようにした。これによって質量測定の重複や漏れを防ぎ、精度よく質量管理することが可能になった。昨年製作した移動用変圧器で、上記の質量管理表を使って質量測定・管理を実施した結果、質量25tの製品に対し、最終実測質量と質量管理表による集計値で誤差100kg以下と高い精度の質量管理を実現できた。第2表に質量集計表を示す。

第2表 質量集計表

移動用変圧器の質量管理強化のため使用している「質量管理表」の一例を示す。

	下タンク質量	設計値	実測値	差		下タンク質量	設計値	実測値	差
	下タンク+ 一次ポケット	***.*	***.*	*.*		バルブ組	6.0	6.0	0
	ハンドホール+ BCTカバー	8.0	8.0	0		一次BCT	26.0	26.0	0
	ダイヤル温度計+ 支え	6.0	5.5	-0.55		LTC軸受け	3.0	3.5	0.5
	SPO組	12.0	10.0	-2.05		加速度計	15.0	15.0	0
	SPO支え	2.0	2.0	0		BUP支え	10.0	9.5	-0.55

4.3 強度解析による最適構造設計

移動用変圧器に使用される部品は、積載質量の制限や大容量化の要求に対して、最大限の軽量化を実現しつつ、機器の移動が頻繁に行われることから、強度の信頼性を十分に確保する設計が必要となる。また機器の外装部品は軽量化のためアルミ合金を使用しており、一般的な鉄鋼材料に比べ疲労を含めた強度が低いため、評価を慎重に行う必要がある。そのため、現在は新設計の都度有限要素法を用いた強度解析で強度を検討し、機器の信頼確保と軽量化を実現している。

変圧器に用いる外装部品の強度評価は、製作時に実施される真空注油に対する座屈を含めた耐真空強度と、機器の移動時に発生する振動による疲労強度について解析を実施し、強度を評価している。

4.3.1 耐真空強度

一般的な変圧器タンクの強度は、複雑な形状でなければ理論による計算式で評価が可能である。一方、形状が複雑な場合には計算機が目覚ましい発展を遂げる以前から、部分的に構造を模擬して解析による強度評価を行ってきた。計算機の処理速度が飛躍的に向上した現在では、複雑な形状をしたタンクでも、全体モデルを用いて、詳細な部位まで解析による強度評価を設計時に行っている。

移動用変圧器タンクの耐真空強度評価も、タンク形状が複雑であるため、全体の解析モデルで評価している。第3図に耐真空強度解析結果を示す。解析では、アルミ合金の設計許容値以下の範囲で

補強のピッチ・厚さ・形状を変化させ、変圧器タンクの総質量が最小値になるよう最適化設計している。

4.3.2 輸送強度

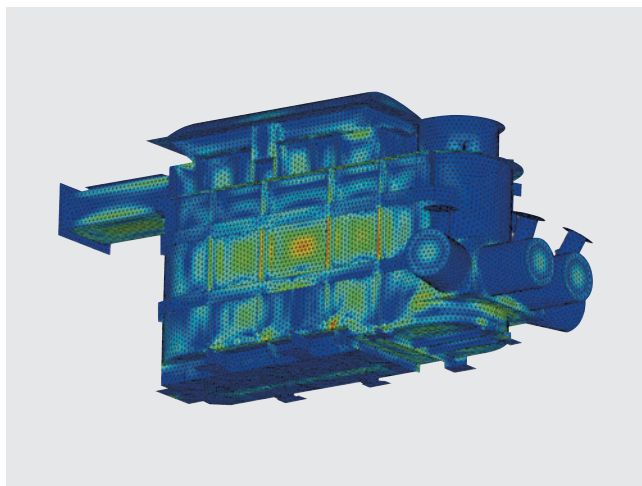
移動用変圧器は、災害時や緊急対応など必要とされる場所への移動が頻繁に行われる。移動時は機器に繰り返し荷重が作用するため、輸送による疲労を考慮した強度評価が必要となる。

使用しているアルミ合金の材料強度は、曲げや引引っ張りの静的な荷重試験と、繰り返し荷重を考慮した疲労試験を社内で実施している。疲労強度は、1千万回程度の繰り返し荷重を与え、得られた結果から、近似的に無限の繰り返し荷重に耐える許容応力値を設定している。

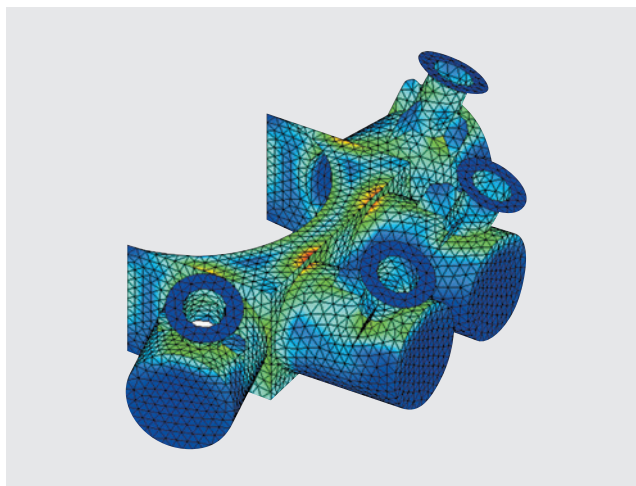
一方、輸送時の解析については、部分モデルを用いた動的な応答解析で必要な部位の評価を実施している。第4図に動的な応答解析の一例となるブッシングポケットの解析結果を示す。動的な応答を加味した応力解析の結果と測定した材料の疲労強度から、輸送強度の信頼性を確保する設計を行っている。なお輸送強度は、解析による机上検討だけでなく、最終的に走行試験を実施して健全性の確認を行っている。

4.3.3 強度解析のまとめ

以上のように、移動用変圧器は一般の変圧器に較べて使用環境が厳しいため、製作時に作用する静的な荷重や輸送時の動的な荷重を想定した解析で強度評価し、材料の評価や走行試験と合わせ信頼性を確保している。今後、お客様の要求にお応



第3図 耐真空強度解析結果
移動用変圧器の全体モデルで耐真空強度解析を実施して得られた応力分布図を示す。



第4図 ブッシングポケット輸送時応答解析結果
移動用変圧器のブッシングポケットをモデル化し、輸送時の動的な応力解析を行った結果を示す。

えして、更なる大容量化や軽量化を実現するため、新材料の採用や最適化を進める所存である。

5. む す び

軽量・大容量に対する要求は、今後も続くと考えられ、さらに緊急時の現地作業を簡素化するため、遮断器と一体になった機器の要求も出てきている。幸いにも当社は世界に誇る真空遮断器を有しており、更なる軽量化と合わせてこの技術を盛り込んだ製品開発に取り組んでいく。

また、環境に優しく冷却性能が高く比重の軽いパームヤシ油を用い、より軽量で高品質な移動変の開発にも取り組んでいく所存である。

・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》



櫛木一寿 Kazuhisa Kushiki
変圧器の開発に従事



望月丈義 Takeyoshi Mochizuki
変圧器の構造設計に従事



神尾幸嗣 Koji Kamio
変圧器の電気設計に従事

