

高経年変圧器の更新技術

Technologies for Replacement of Aged Transformers

細川 修 山田 慎 柴田 桂吾

■ HOSOKAWA Osamu ■ YAMADA Shin ■ SHIBATA Keigo

1960年代後半から数多く設置された電力用変圧器は、現在、その半数以上が設計寿命の30年を超えており、今後、電力用変圧器の更新の増加が予想される。電力用変圧器の更新には、輸送制約の克服、設備停止期間の短縮、及び環境に対する配慮などが必要である。

東芝は、これらのニーズに応えるために、ASA(Advanced Site Assembly)変圧器を適用した更新技術を開発した。分解輸送のため様々な輸送事情の変化に対応でき、変電所の運転停止期間の短縮や既設変圧器の一部流用も可能で、更に、二酸化炭素(CO₂)排出量も削減できる。

The power transformers stations delivered during the latter half of the 1960s and 1970s have exceeded their 30-year design life expectancy. There is consequently an increasing need for the replacement of such transformers. On the other hand, restrictions on the transportation of transformers have become severe in recent years, and cases in which transformers conveyed in the past cannot be conveyed now are rising. Consideration for the reuse of the main parts when replacing transformers is also required, to reduce the burden on the environment.

In response to these circumstances, Toshiba has developed renewal technologies for aged transformers and has been applying a disassembled transportation technology to their renewal.

1 まえがき

電力用変圧器は、わが国の産業の発展を支える礎として、特に1960年代後半から1970年代にかけて、その設置台数の増加及び高電圧化が進められてきた(図1)。近年、これらの変圧器は当初の設計期待寿命である30年を過ぎているが、設備投資の抑制や平準化を進めるなかで本来の更新時期を超えて運用される場合が多く、高経年変圧器が増加する傾向にある⁽¹⁾。電力流通設備の要となる電力用変圧器の更新に際しては、輸送の制約が少なく、据付期間が短い、また、既設変圧器の一部を流用できるなど環境への配慮が求められている。

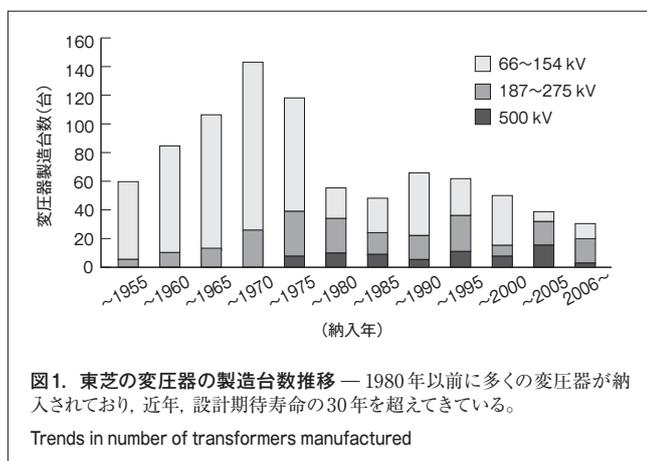


図1. 東芝の変圧器の製造台数推移 — 1980年以前に多くの変圧器が納入されており、近年、設計期待寿命の30年を超えてきている。

Trends in number of transformers manufactured

東芝は、これらのニーズに応えるため、ASA変圧器を適用した更新技術を開発した。ここでは、変圧器における更新技術及び評価と、ASA変圧器を適用した更新技術について述べる。

2 変圧器更新におけるニーズと課題

変圧器を更新する際には、電力系統全体の信頼性維持及び向上を図り、更新期間中の電力系統への影響を最小限とするため、以下に示す様々な条件を満足する必要がある。

- (1) 輸送方法 変電所周辺の宅地化や道路事情の変化に伴い、従来と同じ方法では変圧器を輸送できない地点が増加している。また、鉄道ダイヤの過密化に伴い、従来に比べ鉄道による輸送が困難となってきている。制約が少ないトレーラでの輸送を可能とするためには輸送質量を低減する必要がある。
- (2) 設備停止期間 電力の安定供給と高信頼化への要求の高まりから、更新のための長期間の設備停止は困難となっており、停止期間を最短とする機器構造及び据付工法の確立が求められる。
- (3) 環境への配慮 変圧器更新に伴い使用する資材量を削減するとともに、既設変圧器の一部を流用できる構造とする、低騒音化や低振動化を図るといった対環境面での配慮も必要となる。

- (4) 経済性 普遍的な要求として、仕様の見直し、新技術や新規工法の適用、及び現地試験の合理化などによる変圧器更新費用の低減が求められる。
- (5) 大容量化 既設設備と同じ構造及び容量での更新ではなく、設置スペースは同じでありながら、送電能力向上のために大容量化を求められる場合がある。
- (6) 解体方法 将来の変圧器更新時のために、変圧器の解体作業が行いやすい構造が望まれる。

3 変圧器の更新技術

変圧器の更新は、巻線だけを新規に製作して鉄心、絶縁物、及び本体タンクなどは既設変圧器のものを流用する部分更新と、変圧器を新規に製作する全体更新に大きく分類される。以下に、当社が保有する部分更新と全体更新の技術について述べる。

3.1 部分更新技術

油入変圧器の寿命要因は、主として巻線に使用している絶縁紙やパルプ系絶縁物の熱劣化と考えられ、変圧器の延命化のためには巻線を更新することが不可欠となる。

部分更新では、巻線、劣化の進んだパルプ系絶縁物、及びガasketなどを更新し、鉄心やタンクなどは既設変圧器のものを再度流用する。この場合、既設変圧器から流用する鉄心や絶縁物の分解、点検、及び再組立てでの品質管理が重要となる。また、部分更新時に大容量化を行う場合、新規に製造

する巻線設計に最新の冷却設計及び絶縁設計を適用し、巻線の縮小化と軽量化を図る必要がある。

部分更新のフローを図2に示す。組立て後の品質を確保するには、現状では更新する変圧器を工場に持ち帰って作業することが基本となる。これには、現地から工場までの輸送制約が少ないこと、更に、長期間の変圧器停止が許容されることが前提となる。

このように、部分更新は制約条件が多いため変圧器の更新件数に占める割合は少ないが、当社においては、発電所向けの主変圧器などで巻線を更新し変圧器を延命化した事例がいくつかある。

3.2 全体更新技術

現在、経年変圧器の更新のほとんどは全体更新で行われている。4章で述べる環境の側面からも、全体更新の需要は今後ますます増えるものと考えられる。

変圧器の全体更新は、交換する変圧器本体を一体で輸送する方式と、変圧器を分解して輸送し現地で再組立てを行う分解輸送方式に分類される。近年、変電所周辺の宅地化や道路事情の変化に伴い、過去に輸送できた変圧器が輸送できなくなってしまうケースが増加しており、輸送サイズが小型で輸送質量が低減できるASA変圧器の適用が増えてきている。

ASA変圧器では、変圧器の中身を小さなユニットに分割して輸送する技術、これらを現地で再組立てする技術などが重要であり、これらの詳細については5章で述べる。また、ASA変圧器の場合、中身の分解、再組立、及び輸送が迅速かつ容易にできる構造となっており、部分更新による延命化にも容易に対応できるため、将来における設計自由度が増えることで最適な対応が可能になる。更に、万一変圧器内部で事故が起こった場合は、一体輸送では修理のために変圧器を工場に持ち帰る際の輸送許可申請に時間を要し、迅速な対応ができない場合もありえるが、ASA変圧器であればこのリスクも回避できる。

3.3 更新技術の比較

これまで述べた更新技術の特徴について比較した結果を表1に示す。

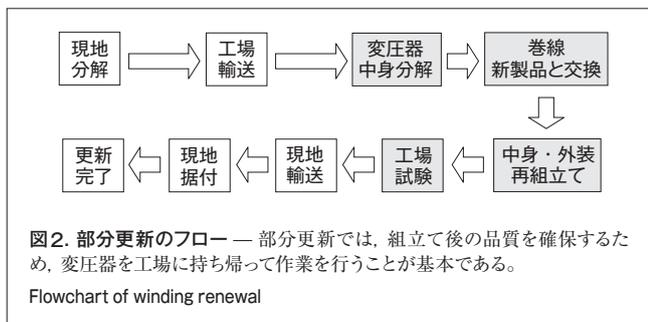
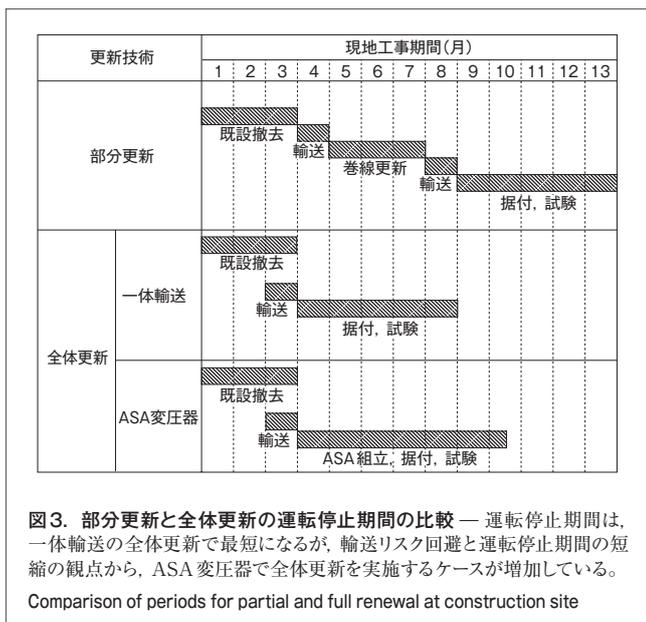


表1. 部分更新と全体更新の比較

Comparison between partial and full renewal of transformer

更新技術	輸 送	停止期間	現地据付工事	設 計
部分更新	変圧器を工場に持ち帰り、更新後、現地に再出荷するため、納入当時と同様に輸送できることが条件。	工場での巻線更新期間(約3か月)が必要で、持帰り及び再出荷を加えると、停止期間は最長。	現地の組立ては外装品だけで、工期は一体輸送と同等。	大幅な設計変更は困難。現在の製造技術で対応できない場合もある。
全体更新	一体輸送	既設変圧器の撤去後に、更新変圧器の現地据付ができるため、停止期間は最短。	同上 また、停止期間の短縮には、新しい機器を設置するスペースが別に必要。	新規設計で自由度が高い。輸送制約の考慮が必要。
	ASA変圧器	既設変圧器の撤去後に、更新変圧器の現地据付ができるが、上記と比べASA変圧器の現地組立期間(約1.5か月)が必要。	分解して輸送した変圧器の現地組立用の防塵(じん)ハウスと、現地組立期間が必要。また、停止期間の短縮には新しい機器を設置するスペースが別に必要。	同上



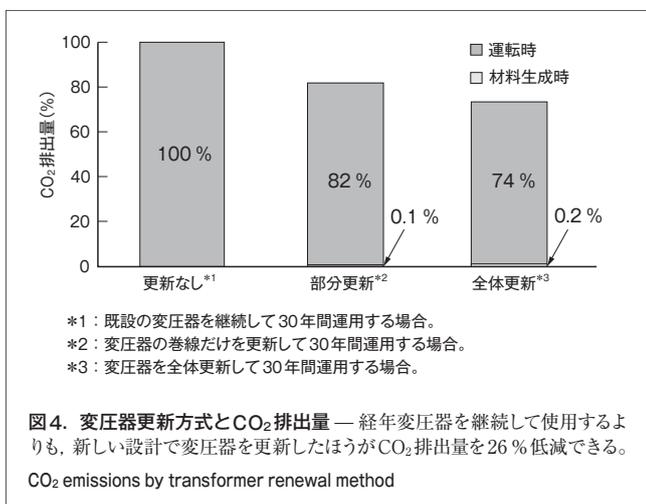
全体更新の場合は、部分更新と比べて使用部材のコストは若干上昇するものの、**図3**に示すように運転停止期間を大幅に短縮できる。

ASA変圧器の場合、一体輸送に比べ現地での工期が必要となるが輸送質量を大幅に低減できる。変圧器の更新にあたり運転停止期間の短縮や輸送リスク回避の観点から、全体更新をASA変圧器で実施するケースが増えている。

4 環境面からの変圧器更新評価

近年、地球温暖化防止のため、CO₂排出量の削減が地球規模で進められており、変圧器更新の方針決定の際にもCO₂排出量といった環境の側面からの評価が求められることがある。

1970年ころに製作された400MVA級発電所用変圧器を対象に、三つの形態でCO₂排出量のライフサイクル評価を実施



*1: 既設の変圧器を継続して30年間運用する場合。
*2: 変圧器の巻線だけを更新して30年間運用する場合。
*3: 変圧器を全体更新して30年間運用する場合。

した結果例を**図4**に示す。この検討は、材料生成時と運用時の損失(負荷率100%)によるCO₂排出量に着目して算出したものである。

図4に示すように、材料生成時のCO₂排出量はすべてのケースで全体の0.2%以下と非常に小さく、運転時のCO₂排出量が支配的である。最新の設計を適用した変圧器に更新した場合、運転時の損失が低減するため、更新しない場合に比べ部分更新で18%、全体更新では26%のCO₂排出量を削減できることがわかる。

5 ASA変圧器の現地組立技術

当社は、275 kV-250 MVA ASA変圧器を1992年に納入して以来、多くのユーザーにASA変圧器を納入してきた。この間、設計及び作業改善をそのつど実施し、現地での組立作業の効率化を図っている。今回、屋外変電所向けに、天候による工事遅延などが生じない全天候型工法を適用する改善を行った。ここでは、新旧の現地組立工法について述べる。

5.1 従来の現地組立工法

5.1.1 輸送単位 工場での試験が完了した変圧器は、中身の脱脂乾燥を実施し、鉄心やコイルなど輸送単位に分解する(**表2**)。

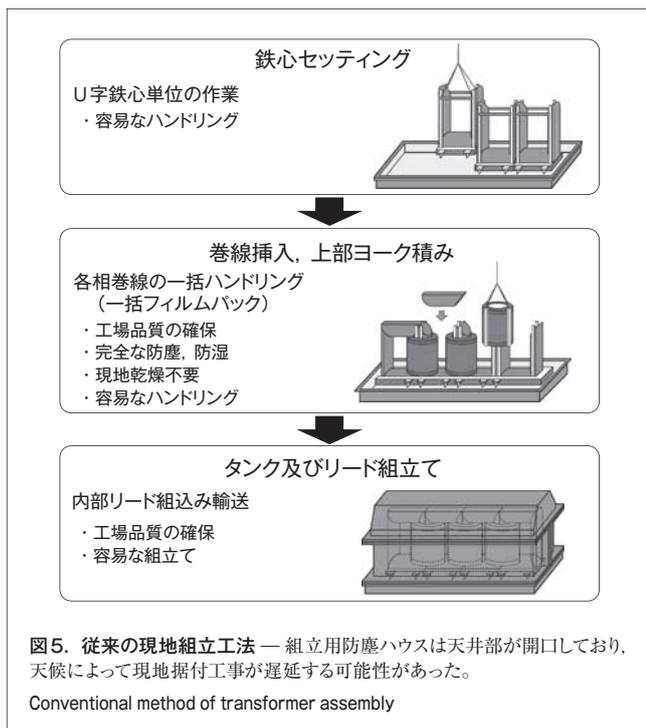
これらの中で、トレーラを含めた輸送質量はU字鉄心が最大となり、バンク容量1,500 MVAの500 kV変圧器の場合では60 t程度となる。このU字鉄心をトレーラで輸送するには、特殊車両の確保、事前の輸送申請、及び輸送のための道路のコンサルティングなどが必要となり、事前の準備に半年以上の日程確保が不可欠となる。

5.1.2 現地組立とその課題 分割して輸送した変圧器の各輸送単位は、品質確保のために、現地での組立用防塵(じん)ハウスの中で**図5**に示す手順で組立てを行う。

表2. ASA変圧器の主な輸送構成

Main transportation units of conventional method of ASA transformer

輸送単位	形状	個数
鉄心(U字鉄心)		4
鉄心(上部ヨーク)		3
コイル		3
上部タンク		1
中間タンク		2
下部タンク		1



防塵ハウスは天井部が開口する構造で、重機を用いて変圧器の輸送単位を防塵ハウス内に天井部からつり入れて組立てを行う。雨天時には、雨水が防塵ハウス内に浸入してしまうため作業を中止する場合があります、天候によって現地据付工事が大きく遅延する可能性がある。

また、ASA変圧器の鉄心は、U字鉄心が三相5脚鉄心の場合4分割してつり上げるが、質量は軽くなっているにもかかわらず、鉄心起立には鉄心に衝撃を与えないように汎用重機を2台使用し、広い作業スペースが必要である(図6)。

このように従来の工法では、天候による工期遅延が懸念され、現地で広大な作業スペースを必要とすることが課題であった。

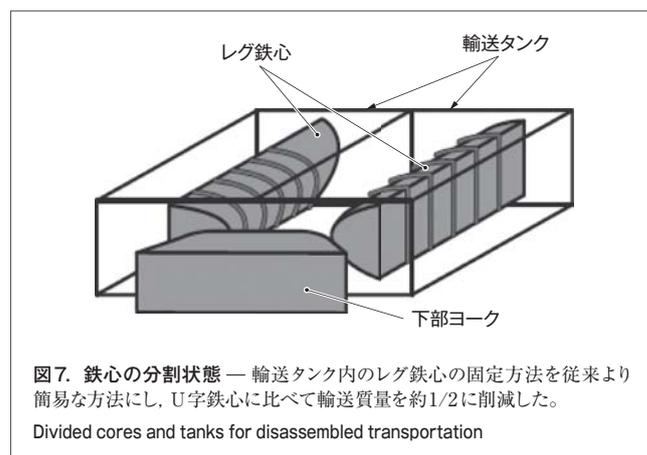
5.2 新規開発の現地組立工法

当社が、新規に開発した現地組立工法の特長を以下に述べる。

5.2.1 輸送質量の軽減 輸送制約が厳しくなる近年の社会情勢に対応し、今回、トレーラを含めた輸送質量を50t以下とする輸送形態をターゲットに開発した。この輸送での分割構造について以下に述べる。

- (1) 鉄心 従来のU字鉄心から下部ヨークを抜いて二つのレグ鉄心に分割し、それぞれを専用の輸送タンクに収納して輸送する。鉄心の分割状態を図7に示す。輸送タンク内のレグ鉄心の固定方法を従来よりも簡易な方法とすることで、U字鉄心と比べて輸送質量を約1/2に削減した。

従来のASA変圧器で確立された現地組立てでの品質を確保するために、分割して輸送したレグ鉄心と下部ヨークは、現地で再度U字鉄心に組み立てる。二つのレグ鉄心輸送タンクを現地で連結してレグ鉄心間の位置決めを



行ったうえで、輸送タンクを防塵タンクとして活用しつつ下部ヨークの組立てを行い、精度高くU字鉄心を復元する。このように輸送タンクは、現地での再組立用治具として、またU字鉄心起立用治具としても使用する。

- (2) 巻線 新工法では、下部ヨークを分解することで鉄心の輸送質量が低減できたことから、変圧器を鉄機械化して巻線の質量を低減する一方で、鉄心の質量は増加させる設計とした。また、輸送タンク内の固定構造を簡素化し、輸送タンクにアルミニウム材を使用することで軽量化を図り、輸送質量の軽減を実現した。

5.2.2 全天候型中身組立工法

- (1) 鉄心起立 現地で再組立てを行ったU字鉄心を、後述する防塵ハウスに設置された門型リフタを使用して起立させる(図8)。新工法では門型リフタだけで鉄心を



図8. 門型リフタによる鉄心起立状態 — 門型リフタだけで鉄心を起立できるため、従来の1/4のスペースで済み、作業の高さが10m以内でよい。

Core standing by gate-type crane



図10. ASA変圧器の現地据付 — 全天候型中身組立工法を初めて適用した東京電力(株)新所沢変電所向け525 kV-1,000 MVA変圧器は、2008年6月に運転を開始した。

Overview of ASA transformer at Shin-Tokorozawa Substation of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

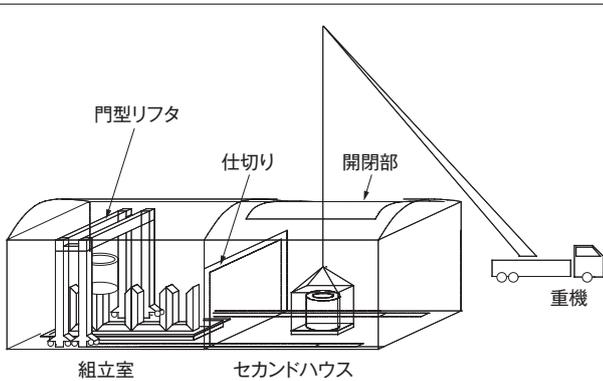


図9. 全天候型の変圧器組立状況 — 機器をセカンドハウス内に搬入後、天井を閉じ、門型リフタだけで輸送タンクからの開梱や変圧器の組立てができ、雨天であっても作業が可能である。

Transformer assembly in all-weather-type house

起立できるため、従来の約1/4のスペースで済む。また、省スペースとともに作業高さが10 m以内でよいことから、地下変電所や水力発電所など、高さに制約がある場所でも適用が可能である。

(2) 中身組立て 新工法での防塵ハウスは、図9に示すように組立室とセカンドハウスで構成され、セカンドハウスの天井部には重機で機器の搬入ができるよう開閉部を設けている。また、組立室とセカンドハウス間に開閉可能な仕切りを設け、この仕切りを閉めて、組立室内の環境を維持したままで、セカンドハウスの天井部を開放し機器を搬入できる。

防塵ハウス内に、組立室とセカンドハウス間を移動できる門型リフタを設置して、60 tクラスの重量物のつり上げ、セカンドハウスから組立室への変圧器の移動、及び変圧

器の組立作業に使用する。このような配置と構成により、機器をセカンドハウス内に搬入後はセカンドハウス天井部を閉じて、門型リフタだけで輸送タンクからの開梱（こん）や変圧器の組立作業を行うことができるため、雨天であっても搬入時以外は風雨にさらされることなく作業が可能となる。

この工法を初めて適用した東京電力(株)新所沢変電所向け525 kV-1,000 MVA変圧器は、2008年6月に運転を開始している（図10）。

6 ASA変圧器技術を応用した 現地部分更新の検討

発電所用変圧器では、発電機の定期点検などによる長期停止期間に合わせて、変圧器を工場に持ち帰り巻線を更新して寿命延長を図った例があるが、変電所用変圧器では長期間の停止が難しく、輸送面でも問題が多いことから、現時点で部分更新はほとんど行われていない。現在、ASA変圧器を用いた全体更新が主流であるが、部分更新は、既設変圧器の鉄心やタンクなど資源の有効活用とともに、最新の巻線設計による損失の低減といったメリットがある。分解輸送技術の応用により、現地での部分更新が実現できれば停止期間の短縮が可能となり、変電所用変圧器でも更新技術の選択肢となりえる。

一方、海外では主として経済性と変圧器の停止期間を短縮するという点から、現地で変圧器の改修や修理をする例が報告されている。運転中の変圧器に不具合が発生し修理を行う場合と、経年変圧器の巻線を交換し延命化する場合とがあるが、双方に共通する実情と課題として以下が挙げられる。

(1) 現地設備 変圧器の中身部分の修理や交換を行うためには防塵、温度、及び湿度が管理された工場と同等の作業環境が必要である。現地にあらかじめ建屋が設置されている場合と、一時的に防塵ハウスを設置する場合とがある。双方とも、建屋やハウス内の作業にクレーンなどの重機が必要で、特に一時的なハウスでは作業に適した重機の選択が重要となる。

(2) 乾燥処理 現地で巻線や構造物に使用されている絶縁物を乾燥するための方法が考案されている。絶縁物の温度を高くして水分を低下させる方法として、熱油噴霧や循環による方法と巻線の通電加熱による方法があり、真空処理と組み合わせることで効果的に水分を除去できる。

(3) 試験 変圧器中身の改修や交換後の健全性確認には、基本的に工場試験と同等の試験を実施している。ただし、耐電圧試験は変圧器の容量及び試験電圧に応じた試験器材と試験電源が必要となるため、高電圧・大容量変圧器の場合、現地での試験実施が困難である。

また、現地での実施が困難な試験項目として温度上昇試験と雷インパルス試験があるが、海外の事例では、設計データでの評価、若しくは、低減電流や低減インパルス電圧で行っている場合がある。

海外では現地での変圧器部分更新の実例があるものの、現時点では信頼性の面で多くの課題があり、国内での実施例はない。しかし、これまで述べてきたASA変圧器の技術を応用して以下に示す課題を解決することで、既設変圧器の簡易な寿命延長技術として現地での部分更新を実現できると考えられる。

- (1) 既設変圧器の現地での分解工法
- (2) 既設変圧器の現地での巻線の交換工法
- (3) 現地作業及び運転停止期間の短縮
- (4) 品質確保のための施策
- (5) 現地での試験工法

当社は、これらの課題を克服して実用化を進め、次世代のASA変圧器として、また既設変圧器の延命化技術として提案していきたい。

7 あとがき

高経年変圧器の更新について、現状の部分更新と全体更新の例、及び近年増加するASA変圧器技術を適用した全体更新の例と、その技術を応用した今後の現地での部分更新の可能性について述べた。

経年変圧器の更新需要の増加が今後いっそう見込まれており、当社独自のASA変圧器技術を応用した現地での部分更新について、技術開発を更に進めていく。

文 献

- (1) 大久保仁. 電力用変圧器の保全運用とコンディションベース保守の動向. OHM. 94. 3, 2007, p.28-33.



細川 修 HOSOKAWA Osamu

電力流通・産業システム社 電力流通事業部 電力変電技術部主務。変電機器のエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Transmission & Distribution Systems Div.



山田 慎 YAMADA Shin

電力流通・産業システム社 浜川崎工場 変圧器部主査。電力用変圧器の設計業務に従事。電気学会会員。

Hamakawasaki Operations



柴田 桂吾 SHIBATA Keigo

電力流通・産業システム社 浜川崎工場 変圧器部主務。電力用変圧器の製造技術業務に従事。

Hamakawasaki Operations