

# 関西電力(株)犬山開閉所向け SVG用変圧器の完成

中嶋陽一\* 貞廣光紀\*\*  
西田 剛\* 西村和敏\*\*  
東 武志\*

Completion of Transformer for SVG(STATCOM) in Inuyama Switching Station of Kansai Electric Power Company, Inc.  
Yoichi Nakashima, Tsuyoshi Nishida, Takeshi Higashi, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura

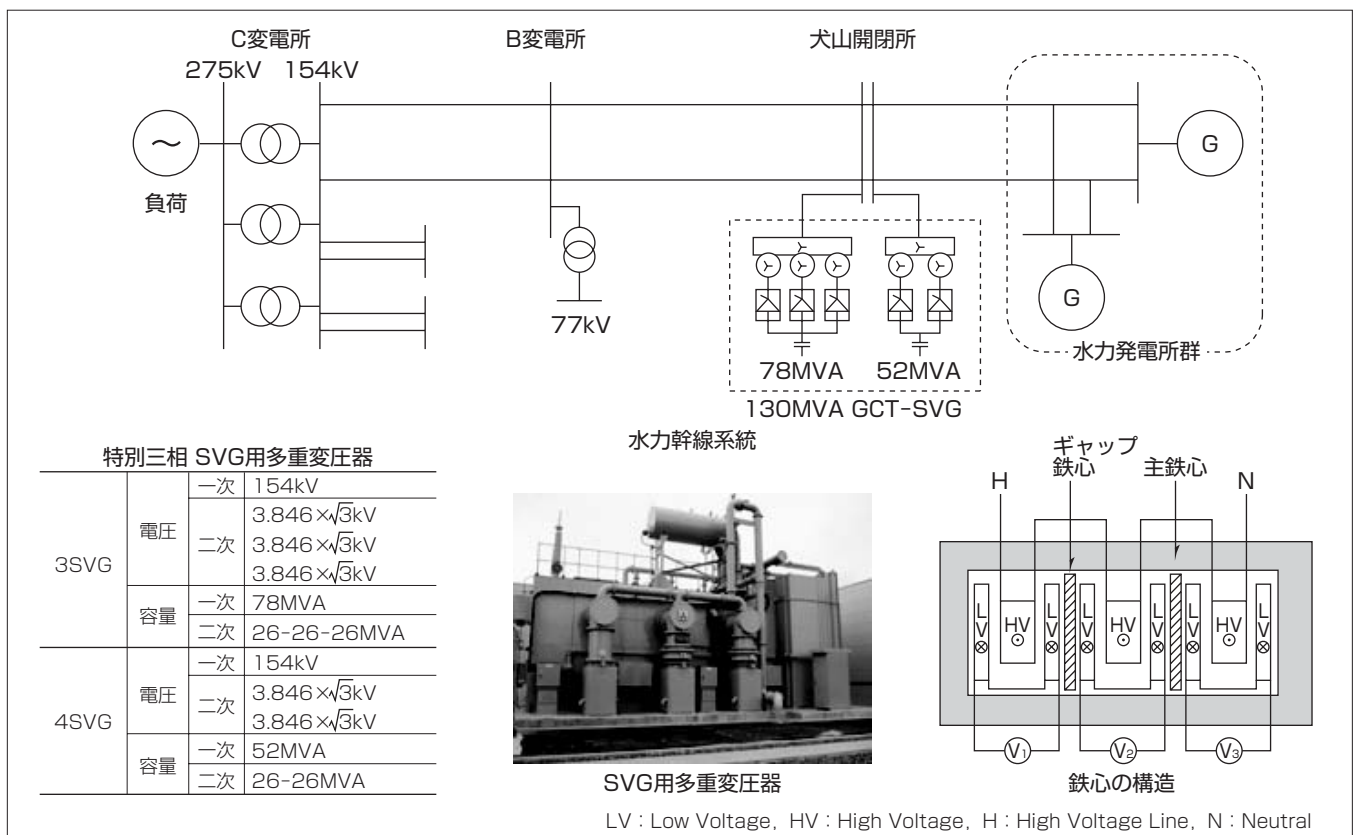
## 要 旨

関西電力(株)犬山開閉所では、系統の安定度向上を目的に、1991年から運用していた80MVA GTO(Gate Turn-Off)-SVG(Static Var Generator)<sup>(注1)</sup>から過渡安定度向上機能を付加した130MVA GCT(Gate Commutated Turn-off)-SVGへ更新し、2013年6月から運転を行っている。

SVGシステムは、系統の監視及び無効電力の供給を調整するインバータ制御装置と、系統電圧へ昇圧するSVG用変圧器から構成されている。今回のSVGシステムは、3段多重構成78MVA-SVGと2段多重構成52MVA-SVGの2系並列のシステム構成であるため、SVG用変圧器を

2種類納入した。SVG用変圧器は、一般的な変圧器と異なり商用周波数波形ではなく矩形(くけい)波の電圧が印加されるため、技術的な課題も一般的な変圧器とは異なる。さらに、変圧器の低圧側に接続されるインバータが複数あるため、インバータの出力を同時に系統へ供給するには、複数の変圧器を設けるか、又は同一鉄心内に複数の巻線を配置する多重変圧器とする必要がある。今回は、三菱電機製外鉄形変圧器の巻線配置の特長を生かしてコンパクトに仕上げるために、多重変圧器を採用した。

(注1) SVGを欧米ではSTATCOM(STATic synchronous COMPensator)と称する。



## 関西電力(株)犬山開閉所向けSVG用変圧器

定格容量78MVAと52MVAのSVG用変圧器を関西電力(株)犬山開閉所に納入した。同一鉄心内に複数の巻線を配置する多重変圧器を採用し、コンパクト化を図った。2013年6月から運用を開始している。

## 1. ま え が き

SVG用変圧器は、低圧側から印加される複数の矩形波を高圧側で合成し、正弦波に近い波形を得る(図1)。そのため、インバータ1台に対して1組の低圧巻線と高圧巻線が必要である。したがって3段多重構成の場合は3組の低圧巻線と高圧巻線が必要であり、2段多重構成の場合は2組の低圧巻線と高圧巻線が必要である<sup>(1)(2)</sup>。さらに、SVG用変圧器特有の要求仕様と印加波形に含まれる高調波に対する対策も必要である。

本稿では、矩形波の電圧が印加されることによる様々な技術課題に対してどのように対処したか、及び外鉄形変圧器が多重変圧器にどのような利点を持っているかについて述べる。

## 2. SVG用変圧器への技術的要求

### 2.1 仕様面の要求

SVG用変圧器に要求される機能は、①1組ごとの低圧巻線と高圧巻線間のインピーダンスが各組とも同じであることと、②それぞれの低圧巻線間のインピーダンスを大き

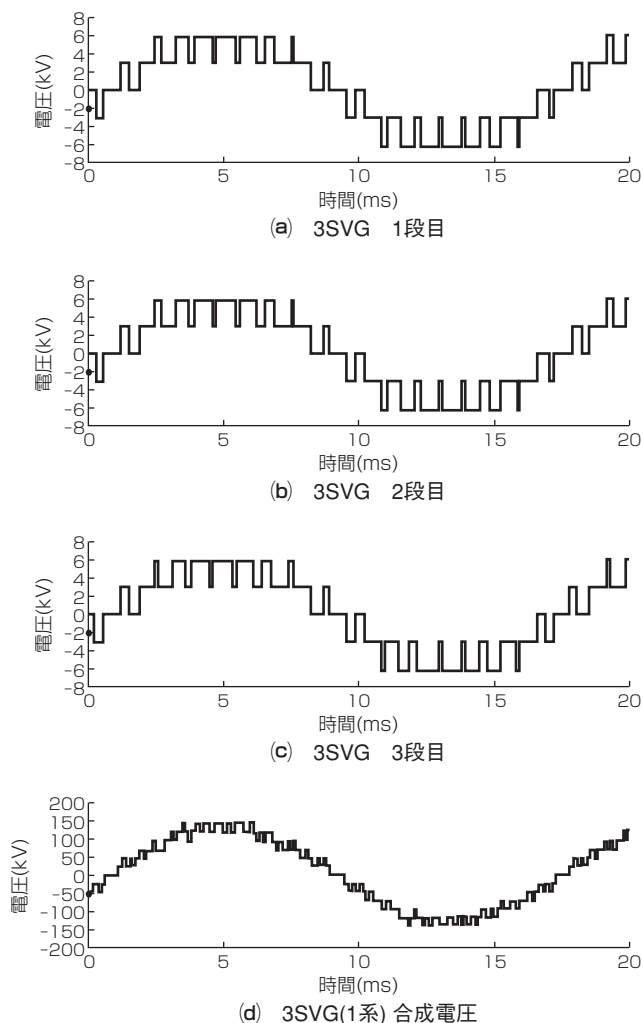


図1. 多重変圧器の矩形波の合成

くすることである。①は、各組のインピーダンス電圧を同じにするためである。②は、SVG用変圧器は低圧巻線に印加される矩形波が各段によって異なるため、その電位差によって低圧巻線間に循環電流が流れ、この循環電流が大きいとインバータへ悪影響を及ぼすためSVG用変圧器では低圧巻線間のインピーダンスを大きくすることが要求される。これらの2つの機能を満足する手法の1つとして、1組ごとの低圧巻線と高圧巻線に鉄心を分離する方法がある(図2)。しかし、この方法では質量・設置面積・コストが過大になる。そこで、今回のSVG用変圧器では外鉄形変圧器の特長を生かし、低圧巻線と高圧巻線の組みを複数重ね合わせる構造を採用した(図3)。外鉄形変圧器では、多重化は低圧巻線と高圧巻線の組みを複数重ね合わせることで容易に可能である。これは、外鉄形変圧器が内鉄形変圧器のように円筒形巻線を同心円状に組み合わせる構造ではなく矩形平板の巻線を重ね合わせる構造で、複数の巻線を同一鉄心で構成しても容易にインピーダンスを合わせることが可能なためである。また、低圧巻線間のインピーダンスを大きくするために、ギャップ鉄心と呼ばれる構造(図3)を採用している。ギャップ鉄心を低圧巻線と高圧巻線の組みの間に挿入することで、それぞれの低圧巻線間のインピーダンスを大きくできる。この構造を採用することで、鉄心を分離する構造と比較して据付面積が約40%、質量が約20%削減可能となった。

### 2.2 矩形波の電圧印加による技術的課題と対策

商用周波数波形ではなく、矩形波の電圧が印加されることによる変圧器の技術的課題は、①無負荷損失の増加、②漂遊損失の増加、及び③騒音の増加の3点が挙げられる。

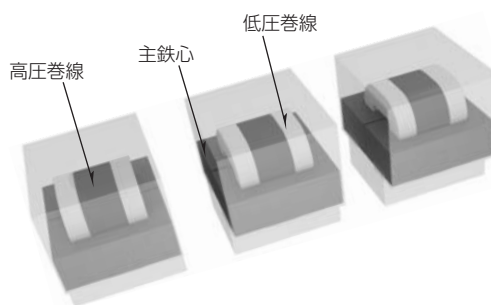


図2. 分離鉄心を採用した構造(1相分)

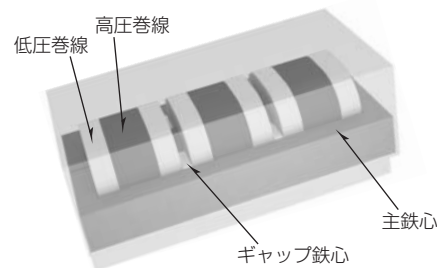


図3. ギャップ鉄心を採用した構造(1相分)

①は“周波数に比例して磁束密度の約2乗に比例するヒステリシス損失”と“周波数の2乗に比例して磁束密度の2乗に比例する渦電流損失”の和で構成される。矩形波は、商用周波数波形と比較して高調波成分が多量に含まれているため、それら高調波が無負荷損失に及ぼす影響を考慮する必要がある。今回の多重変圧器では、過去のモデル試験で得られたデータを基に無負荷損失の増加率を推定し、損失設計と冷却設計に反映させた。

②は変圧器の巻線に電流が流れると生じる磁束が巻線やタンクなどの金属構造物に鎖交することで生じる損失であり、巻線に流れる電流の“周波数の約2乗”と“絶対値の約2乗”に比例する。SVG出力電流のFFT(Fast Fourier Transform)結果の例を図4に示す。高調波電流の各次含有率は1%以下と基本波に対し十分小さいものの、40次以上の高次高調波を含んでいるため漂遊損失に及ぼす影響は無視できない。そのため、漂遊損失は、SVG出力電流に含まれる各高調波電流を解析し、それぞれの周波数ごとに漂遊損失を計算した。この漂遊損失の増加も、損失設計と冷却設計に反映させた。

③は主鉄心の磁歪(じわい)現象によって発生する励磁騒音と通電時に巻線に発生する電磁力によって発生する電磁騒音がある。SVG用変圧器では、高調波電流の絶対値は基本波電流と比べて非常に小さいため電磁騒音の増加は無視できるレベルであるが、インバータ電圧に含まれる高調波電圧の各次含有率は10%程度の大きさを持っているため、励磁騒音の増加は無視できない。高調波電圧の含有率の一例を図5に示す。

今回のSVG用変圧器に印加される波形が励磁騒音に及ぼす影響を検証するため、図6に示す変圧器のミニモデルを製作し、印加波形の違いによる騒音値の変動を検証した。その結果、商用周波数波形の印加時と比較して騒音が増加

することが確認された。また、測定した騒音波形から周波数特性を解析した結果を図7に示す。図から、高周波領域(約1,200Hz以上)で騒音が増加することを確認した。高周波領域の騒音増加対策として、今回のSVG用変圧器では防音タンク構造を採用した。防音タンクの効果は周波数が高い領域程顕著になるため、防音タンク構造の採用によって高周波領域の騒音増加を抑えている。

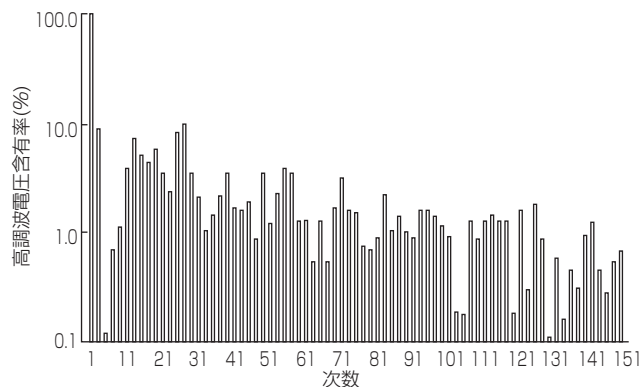


図5. インバータ電圧に含まれる高調波電圧含有率

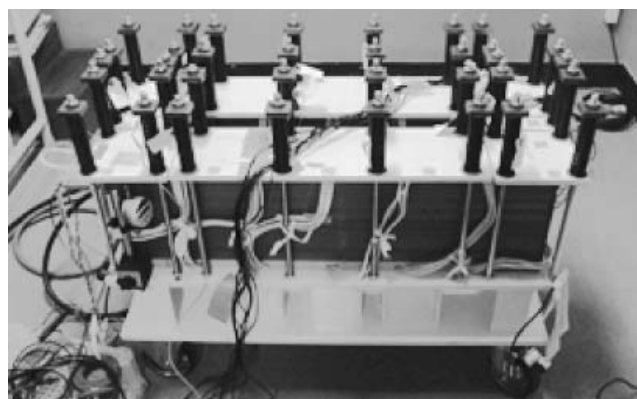


図6. 騒音検証用変圧器のミニモデル

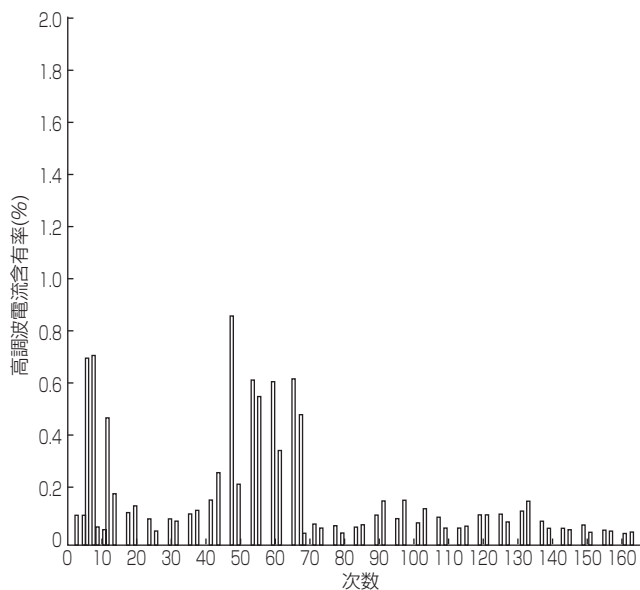


図4. SVG出力電流に含まれる高調波電流含有率

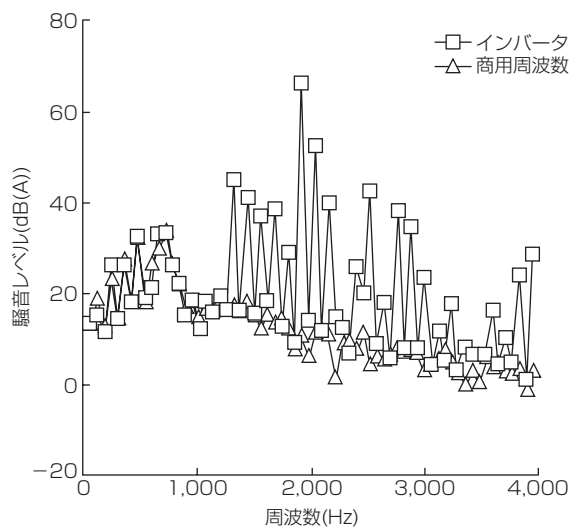


図7. インバータ波形と商用周波数波形の騒音特性比較





図8. シキ1000形貨車の3両連結輸送形態



図10. 基礎据付状態



図9. 低床トレーラーでの変圧器輸送

### 3. 変圧器の輸送と据付け

大型変圧器の据付地までの輸送は、据付地の最寄り港まで海上輸送して、最寄り港から低床トレーラーに積み替えて輸送する方式が一般的である。しかし、今回の犬山開閉所は内陸に所在しているため、最寄り港から据付地までの距離が長いという問題があった。そこで、開閉所の最寄り駅まで貨車輸送する方式を採用した。変圧器を貨車輸送する場合、トンネルや駅構内を通過するため輸送寸法(高さ・幅)に制約が発生する。また、最寄り駅から現地まではトレーラー輸送が必要であり、今回は特別三相方式を採用した。

特別三相方式とは、単相構造の変圧器を上部タンクで一体化する方式である。主な利点は、普通三相方式と比較して輸送質量及び寸法の縮小が可能であり、さらに、単相方

式と比較して据付面積の縮小が可能なのが挙げられる。

最寄り駅まで輸送する貨車は、シキ1000形貨車を採用した。シキ1000形貨車は同時に3両まで連結して運行することが可能であるが、1両当たり55tという積載質量制約がある。今回の変圧器は、質量低減設計を実施することで55t以下を満足した。図8にシキ1000形貨車を3両連結編成した輸送形態を示す。

最寄り駅から開閉所までは図9に示すような低床トレーラーを利用し、変圧器を1相ずつ夜間輸送した。

低床トレーラーで据付地まで輸送された変圧器は、コロ引き工法で基礎上まで運ばれ、ジャッキアップ方式で基礎上に配置された。図10に基礎へ据付後の変圧器の状態を示す。基礎に据え付けた後は、上部タンク・防音タンク及び外装品を取り付け、変圧器の据付を完了した。

### 4. むすび

関西電力(株)犬山開閉所向けSVG用変圧器の構造的特徴とSVG用変圧器特有の技術的検討内容について述べた。今後も系統安定化にSVGシステムが貢献していくものと思われる。その貢献を少しでも大きくできるよう、外鉄形変圧器技術の有効活用性を検討していきたい。

### 参考文献

- (1) 今西隆夫, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)における系統事故時の運転実績, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 111 (2014)
- (2) 岩崎慎也, ほか: ルート断による系統分離時の零相過電圧拡大および機器への影響に関する検討, 平成27年電気学会全国大会, 6-221 (2015)