紀伊水道直流 500 kV 連系プロジェクトに見る 最先端技術——変換所機器編——

解説

田 中 愁佳夫
関西電力(株)
川 原 昭 人
四国電力(株)
三 瓶 雅 俊
電源開発(株)

キーワード

直流送電, 交直変換, 直流 GIS, 直流リアクトル

1. まえがき

紀伊水道直流連系設備は、日本国内初の 500kV 設計の直流送電 (HVDC, High Voltage Direct Current transmission) 設備である。2000 年 6 月に第 1 期工事分である送電容量 1400MW の設備として運転を開始した。第 1 期設備は、将来第 2 期増設工事を行なって送電容量 2800MW の設備へ拡張することを想定して設計されている。第 2 期増設工事の時期は未定である。従来の HVDC 設備よりも高電圧、大容量の設備であり、多数の新規技術が採用されている。本稿では新規技術の代表的なものを紹介する。

2. 紀伊水道直流連系設備の概要

関西方面での電力需要増加に対応する新しい電源として徳島県阿南市に新設する電源開発の橘湾火力 (出力 105 万 kW×2 台) で発電した電気の内、1400MW を関西系統へ送電するにあたって、紀伊水道を横断する HVDC 送電設備が導入されることになった。

そして紀伊水道 HVDC 設備の容量は、当初 1400MW、将来 2800MW にまで拡張することを考慮して建設することとなった。

図1 60Hz 交流系統 (模式図)

60Hz 系統の基幹送電系統を模式的に示すと図1のようになる。60Hz 系統全体の東側 (関西, 中部) に電力需要が多く、この東側で消費される電力の一部を遠く西側の九州・四国から中国系統を経由して送電 (広域連系)

Recent Technology in the Kii Channel DC 500 kV Link Project
— Converter Station Equipment and Technology —

By Yukao Tanaka (The Kansai Electric Power Co., Inc.), Akihito Kawahara (Shikoku Electric Co., Inc) & Masatoshi Sanpei (Electric Power Development Company, Ltd.).

している。このため、比較的大きい量の電力潮流が東西に細長い中国系統を東向きに通過して流れており、系統の東西間で長周期 (3 秒程度) の電力動揺が発生しやすいこと、系統事故などで東西の送電能力が制限された場合に安定に系統を運用することが難しい、などという問題があった。

紀伊水道 HVDC 設備は、橘湾火力で発電した電気の内 1400MW を紀伊水道経由で関西方面へ送電するという基本的な目的に加え、AC-DC ハイブリッド送電系統を構成して供給信頼度を向上させること、HVDC 設備が潮流制御性に優れるという特長を生かして 60Hz 系統の動揺抑制・安定化を行なうことも目的とされた。

2000 年 6 月に第 1 期工事分である $\pm 250\text{kV}$, 1400MW の設備として運転を開始した。第 1 期設備は、将来の第 2 期増設工事を想定して設計されている。第 2 期増設のコスト低減と工期短縮のため、第 1 期設備のうち第 2 期増設後に DC500kV 回路として使用される部分は当初から DC500kV 設計で製作した機器が据付けられており、制御保護装置にも第 2 期増設に対応した拡張性を持たせた設計になっている。また、第 2 期になって初めて必要になる機器に関しても既に基礎開発を完了している。図 2 に紀伊水道 HVDC 設備の単線結線図を示す。

図2 紀伊水道HVDC設備単線結線図

直流送電線は、四国側の阿南変換所から紀伊半島の由良開閉所までが海底ケーブルで、由良開閉所から関西側の紀北変換所までが架空線で構成されている。海底ケーブルは帰線にも DC500kV 設計のケーブルを施設してあるが、これは本線ケーブルが船舶の錨などによる損傷を受けた場合でも、帰線ケーブルを本線用に切り替えることによって送電能力を維持できるようにするためである。

3. 紀伊水道直流連系設備の機器構成の特徴

3. 1 高信頼度を実現する主回路構成

紀伊水道 HVDC 設備は、60Hz 基幹系統の一部をなす重要設備であり、高い信頼度が要求される。また、送電ルートとして設備の稼働率を高くする必要があり、直流回路の構成を以下のようにした。

- (a)主回路を双極(Bipole)構成とした。これにより、片極が停止した場合でも 1/2 の送電能力を維持できる。
- (b)帰線を 2 条設けた。(北海道本州は 1 条) これにより、帰線 1 条が使用不可能となった場合でも 100% の送電能力を維持できる。
- (c)海底ケーブル区間の事故時に帰線ケーブルを本線ケーブルとして切換え可能とした。これにより、本線海底ケーブル 1 条が使用不可能となった場合でも 100% の送電能力を維持できる。

3. 2 大容量送電を実現する直流主回路定格

前記のように直流回路を双極(Bipole)構成とした。第 1 期で 1400MW、第 2 期で 2800MW を送電するため直流主回路の定格電圧を第 1 期で $\pm 250\text{kV}$ 、第 2 期で $\pm 500\text{kV}$ 、定格電流は 2800A とした。

第 2 期の定格選定に際しては、海底ケーブルの製造設備、敷設工法や直流気中絶縁ブッシング等の技術上の制約、国内既設設備との標準化を図る観点から、 $\pm 500\text{kV}$ 、2800A の定格とした。

第 2 期増設時には、増設した交直変換装置と既設の交直変換装置の直流回路側を直列に接続して、直流電圧を 2 倍の $\pm 500\text{kV}$ にする。直流電流は 2800A で第 1 期と変わらない。また、緊急対応用として定格の 125% で 30 分間の過負荷運転能力を持たせた。過負荷運転では直流電流を $3500\text{A}(2800\text{A} \times 1.25)$ で運転する。

表 1 に、直流回路の定格電圧および電流を、北海道本州間電力連系および南福光 BTB 設備との比較で示す。

表 1 直流回路の定格電圧及び定格電流

	北海道本州	南福光	紀伊水道
直流電圧	$\pm 250\text{kV}$	125kV	$\pm 500\text{kV}$
直流電流 (過負荷運転)	1200A	2400A	2800A (3500A)
変換器 1 台当たり変換容量 (過負荷運転)	300MW	300MW	700MW (875MW)

従来に比べて 2 倍の直流電圧、1.4 倍強の直流電流、2.9 倍強の単機変換容量を達成する事が要求された。

3. 3 直流 GIS の採用

阿南変換所と由良開閉所は海岸から近い位置にあり、屋外設備は海水に起因する塩害汚損を受ける。この汚損は碍子の絶縁性能を低下させるので、塩害地域では電圧当たりの碍子沿面長を長くする必要があり碍子が長大化

する。阿南変換所および由良開閉所の塩害条件を考慮すると、定格電圧 $\text{DC} \pm 500\text{kV}$ の屋外機器をすべて気中絶縁機器で構成することは非現実的なので、気中露出部の少ない直流 GIS (Gas Insulated Switchgear) を新規開発して適用する事となった。

4. 変換器制御・保護システムの新技術

通常の変換所機器は状態変化(開閉器の操作、変圧器のタップ切換など)が必要な場合にのみ機器の制御を行なう、いわば間欠の制御であるのに対し、HVDC 変換設備では変換器運転のために制御を常時かけている点が大きく異なり、変換器制御装置の重要性は大きい。また、紀伊水道 HVDC では容量が第 1 期でも 1400MW と大きく(第 2 期では 2800MW と更に大きい)、電力系統全体に対しての影響度が大きいことから、制御装置には高信頼度・高機能が要求される。紀伊水道 HVDC で新しく採用された制御の代表的なものを紹介する。

4. 1 電力動揺抑制制御

電力動揺抑制制御は、「紀伊水道直流連系設備の概要」の項で述べた、60Hz 系統で起こりやすい系統動揺を抑制するための制御で、パワーモジュレーションとも呼ぶ。阿南変換所および紀北変換所で検出する四国および関西の系統周波数を入力量とし、系統の動揺を抑制するよう、適切に直流電力を変調する。抑制対象とした動揺モードは、60Hz 系統東西間の動揺モード(全系モード)と、1 つの系統とそれ以外の系統間の動揺モード(ローカルモード)の 2 モードとした。この開発では、主要発電機、変換器および 60Hz 系統全体をモデル化したデジタル解析に加えて、制御装置を試作して電力システムシミュレータと組み合わせ、シミュレーションによる検証も行なった。対象とした 2 つの動揺モードに対して有効な動揺抑制が実現されている。⁽¹⁾

4. 2 交流系統事故時運転継続制御

サイリスタを用いた変換装置は、原理上、逆変換(直流から交流へ変換)運転している場合に交流電圧が低下すると直流から交流への変換動作ができなくなる欠点がある。このため、従来は逆変換運転している側の交流系統で送電線絡事故などによる電圧低下が起きた場合、変換器を一旦停止して再起動するように設計されていた。変換器の停止から送電量が元のレベルまで復帰するのに数 100msec かかり、その間は HVDC システムによる送電は途絶えてしまう。しかし、交流系統電圧低下は多くの場合数 10ms 程度の継続時間しかなく、一旦停止ー再起動という従来の変換器動作は、送電線を再開路後すぐに送電能力が回復する交流送電線に比べて見劣りしていた。

紀伊水道 HVDC ではこの点を改善するため、変換器制御装置に改良を加え、交流系統電圧が低下した場合でも一旦停止せず、電圧低下中もサイリスタに点弧パルスを出し続けて運転を継続するようにした。これはサイリ

スタバルブに光サイリスタ（後述）を適用しているからこそ実現可能な運転方式である。これにより交流系統電圧が復帰したらずちに送電が再開できるようになり、基幹送電系統として交流送電線と同等の信頼度が確保できた。⁽²⁾

4. 3 軸ねじれ振動抑制制御

大容量の変換所の近くに発電所がある場合、変換器と発電機の相互作用により発電機に軸ねじれ振動（SSR：Sub-Synchronous Resonance）が発生しやすいことが知られており、実際に HVDC 変換器近傍の発電機が軸ねじれ振動現象を起こし破壊に至った例もある。振動の周波数が同期周波数（50Hz や 60Hz）よりも低いことが Sub-Synchronous の呼び名の由来である。発電機の軸系は、ねじりバネとしての軸およびマスとしての発電機・タービンなどからなり、複数の振動モードがある。軸は系統周波数に対応する角速度で回転しているが、軸ねじれ振動が発生すると角速度が定常値を中心に振動（変動）し、発電機出力の周波数は定格周波数を中心に振動（変動）する。周波数の変動が変換器の動作に影響して変換器が発電機からとりこむ電流を変化させ、この変化した電流が発電機を介して再び軸振動へ影響を与える。この相互作用の結果、軸ねじれ振動が持続したり発散傾向に向かうことがあると、軸に疲労が起きたり、場合によっては破壊に至る。

紀伊水道 HVDC では、阿南変換所のすぐ近くに橋湾火力発電所があり SSR の発生が懸念された。発電機と変換器を詳細にモデル化した解析の結果から従来の変換装置では SSR が発生する危険性が示され、変換器に新たに SSR を抑制する制御が必要となった。

SSR を抑制する手法として、軸に発生した振動をうち消すトルクを発電機が発生するような電流を変換器が発生するようにサイリスタバルブの点弧タイミングを制御するという手法をとり、これに適した変換器制御方式を開発した。制御の入力量は変換所交流母線電圧の周波数とし、発電所から変換所への検出量信号の伝送を不要とした。開発では、発電機、変換器、交流系統を詳細にモデル化したデジタル解析に加えて、試作した制御装置と電力システムシミュレータによるシミュレーションによる検証も行なった。この SSR 抑制制御の効果で、通常の系統条件はもとより、最も SSR 発生の危険性がある阿南変換所から四国系統への送電線がルート断となった系統、いわゆる発電機と変換器の単独系統でも SSR 発生のない安定な運転が可能となっている。基幹送電系統として、そのような系統条件下でも橋湾火力から関西への送電を維持継続することが可能となっている。⁽³⁾⁽⁴⁾

5. サイリスタバルブ

1990 年代に製造された国内 HVDC 用サイリスタバルブは全て空気絶縁水冷式の基本構成を採用している。空気絶縁式は油絶縁式に比べて設置面積が小さく保守性が

よく、水冷式は風冷式に比べて冷却効率が良く大容量化に向いており、空気絶縁水冷式が現在の主流となっている。紀伊水道直流連系設備用サイリスタバルブもこれを踏襲している。紀伊水道直流連系設備用サイリスタバルブの特長には以下のようなものがある。

5. 1 世界最大容量 8kV-3.5kA 光サイリスタの適用

紀伊水道直流連系設備では、新しく開発した世界最大級の定格 8kV の光サイリスタを適用した。大容量サイリスタの採用は、バルブに使用するサイリスタ素子数の低減が可能とし、サイリスタバルブの低損失化、小型化の原動力となっている。

日本では 1980 年代から光サイリスタを適用したサイリスタバルブが実用化されており、最近では海外メーカーも光サイリスタを適用し始めている。高電圧を扱う HVDC 用サイリスタバルブに適用するには、次に述べるような点で電気点弧サイリスタに比べて光点弧サイリスタが優れている。電気点弧式サイリスタを適用する場合に問題になるのは、サイリスタを点弧するためのゲート信号を大地電位の制御装置から主回路電位のサイリスタへ伝送する経路に主回路電圧に耐える絶縁を施す必要があることで、このため部品点数が増え構成が複雑になる。また、電気点弧サイリスタへのゲート信号を発生する回路の電源を主回路からき電する構成になり、部品点数が増え構成が複雑になり、また、系統事故などで交流系統電圧が低下した時の運転上・保護上のパフォーマンスが低下することも問題である。光サイリスタを適用すれば、ゲート信号の絶縁は光信号を伝送するライトガイドで容易に行なうことができるし、主回路からき電するゲート信号発生回路はまったく不要となる。このため、部品点数の少ない単純な構成となり、交流系統電圧低下時でも運転上・保護上のパフォーマンスが低下しない。交流系統事故時運転継続制御（前記 4. 2 項）の実現も、この光サイリスタの特長に負っている。また、光信号を用いることから耐ノイズ性が向上する事もメリットである。

5. 2 サイリスタ素子特性のコントロール

サイリスタバルブの運転損失を最小にするように光サイリスタ製造時に特性をコントロールした。⁽⁵⁾ その結果、変換容量(700MW)に対する損失の割合は 0.29% となり、従来の 0.35% から約 20% 低減に成功した。

サイリスタバルブの損失で支配的なのは、サイリスタで発生する損失とスナバ回路で発生する損失であり、低損失のサイリスタバルブを作るためにはこの 2 種類の損失を低下させなければならない。

サイリスタで発生する損失を小さくするには、ひとつにはシリコンウエハーを大口径化して電流密度を低めることが有効である。定格 8kV の光サイリスタでは、口径 6 インチという大口径のシリコンウエハーを採用した。

スナバ回路損失を小さくするのはサイリスタの逆回復電荷量を小さくするのが有効である。逆回復電荷量を小さくするにはキャリアの寿命（ライフタイム）を短くす

るのが効果的だが、従来の手法ではサイリスタの高耐圧化やサイリスタの低損失化との両立の面で限界があった。そこで、定格 8kV の光サイリスタではキャリアのライフタイムを小さくする新しい手法としてプロトン照射によるライフタイムコントロールを適用した。これにより、高耐圧で損失が小さく、かつ、逆回復電荷も小さい光サイリスタの製造が可能となりサイリスタバルブの低損失化を実現した。

5. 3 新しい構造設計で外形寸法・重量を縮小

空気絶縁水冷式の基本構成を踏襲しながらも、新しい構造の採用でサイリスタバルブを従来技術に比べて外形寸法、重量ともに小型軽量化を実現した。

外形寸法の小型化は、サイリスタバルブを構成するサイリスタモジュールの小型化と、サイリスタモジュールを支える全体構造の小型化とによって実現されている。

HVDC 用サイリスタバルブではサイリスタを多数個直列に接続して使用する。紀伊水道 HVDC のサイリスタバルブの 1 アームは 40 個のサイリスタ素子を直列に用いている。1 アームは 6 個のモジュールから構成されている。8kV という高耐圧サイリスタ素子の適用によって、従来の 250kV サイリスタバルブでは 8 モジュールで構成していたアームを 6 モジュールで構成できた。モジュールの主要部品のひとつであるサイリスタスタックは、サイリスタ 7 個とヒートシンク 8 個を交互に積み重ねて約 10 トンの力で圧接した構造である。圧接力が不足したり面圧が均一でないと局所的な加熱を起こす。設備の寿命期間として想定している 30 年間にわたって、圧接力が均一かつ低下しないことが要求される。紀伊水道 HVDC のサイリスタバルブでは、新しく開発したリング状に整形した FRP バンドを使用したスタック構造が採用されている。従来のスタック構造に比較して、シンプルな構造を実現し軽量化にも寄与している。⁽⁶⁾ また、スタック以外の部分も、従来からの基本的な部品レイアウトを踏襲しながら構造や材料に改良を加えて大幅な軽量化に成功した。スタックの軽量化と、それ以外の部分の軽量化の相乗効果で、サイリスタモジュールの重量は従来の 300MW 変換器と同レベルの約 400 kg を実現している。サイリスタモジュールの軽量化は、サイリスタバルブの全体構造を構成する材料の軽量化をも可能とし、相乗効果でサイリスタバルブ全体重量もさらに軽量化された。

全体構造の小型化は、サイリスタ素子の高耐圧化と絶縁距離の合理化に負うところが大きい。サイリスタ素子の高耐圧化によって、従来は 8 モジュールで構成していたサイリスタアームを 6 モジュールで構成できた。これによりサイリスタバルブ 1 台当たりのモジュール数が 3/4 となり、主として高さ方向の寸法縮小をもたらしている。これに加え、FRP 製支柱の沿面距離、金属部材間の気中ギャップ間隔などの絶縁距離を合理化し、高さ方向の寸法を縮小した。これは、構造部材の FRP 製の

支柱・サイリスタモジュールなどで構成した実規模大のサイリスタバルブ絶縁モデルを作成して得た知見を基に設計している。⁽⁷⁾⁽⁸⁾

単機容量 700MW という大容量の変換器を構成するサイリスタバルブを小型・軽量で実現できたことは、据付面積が小さく保守が容易という空気絶縁水冷式バルブの特長を失うことなく、設備の建設やメンテナンス面で従来設備と同様の手法が適用できることとなった。設備の取り扱いも容易なものとなっている。

6. 直流 GIS

直流 GIS (Gas Insulated Switch-gear) は紀伊水道直流連系設備で初めて適用された。

直流 GIS は阿南変換所と由良開閉所の直流回路全部と、紀北変換所の直流リアクトル周辺回路(第 2 期に DC500kV で使用する部分)に適用した。直流 GIS で特徴的な技術を以下に紹介する。

6. 1 直流 GIS の特殊性

GIS を直流電圧で使用する場合は以下の点に留意する必要がある。

- ・装置内部の異物の管理の徹底
- ・絶縁物の特性を考慮した設計

異物とは、切削加工や機構部の摺動により発生する針状金属の事を主に指している。GIS を交流回路に適用する場合にも異物の管理は実施しているが、直流回路に適用する場合には一層厳しい管理が必要である。その理由は、GIS 内部に異物があり直流電圧が印加した場合にファイアフライ現象という特殊現象が起き、GIS の耐電圧性能が低下してしまうためである。また、直流電圧を絶縁物に長時間印加すると、分極・帯電などが起き、電界分布が乱れるなどして絶縁性能が低下してしまう。これらの点が交流 GIS とは異なる点である。

6. 2 GIS 母線・絶縁スペーサ

GIS 母線を構成するタンク・中心導体の設計では、ファイアフライ現象を考慮して寸法、材料の選定を行っている。ファイアフライ現象とは、直流電圧を印加した時に GIS タンク内面にあった異物が静電力で中心導体に引き寄せられ、中心導体表面に到達後は部分放電を起こしながら動き回る現象のことで、その際、異物の周辺から微かな光を放つことからファイアフライ(螢の意)の名がある。GIS 内部に異物が残らない製造・据付方法の工夫・管理を行なうとともに、万一、異物があつた場合でもその影響を最小化するような設計上のいろいろな工夫をしている。例えば、異物に働く静電気力を小さくするようなタンク内面の表面処理や、異物が動いた場合にトラップの中に誘導して捕獲するような構造を採用している。また、適切なマージンを持った電界設計により異物による問題が起きないようにしている。⁽⁹⁾

直流 GIS の中心導体を支える絶縁スペーサは、帯電や異物付着による絶縁特性の悪化を最小限にするため、

形状や内部構造に工夫を凝らし、AC用GISのスペーサとは異なる独特の形状のスペーサとなっている。⁽¹⁰⁾

6. 3 直流用避雷器

避雷器とは巨大なバリスタと考えればよい。常時の印加電圧に対しては高抵抗値で電流が流れず、異常時の過電圧に対しては低抵抗値となり電流が流れる。過電圧に対して避雷器が低抵抗値になり電流が流れると発生過電圧レベルは避雷器のない場合に比べて抑制される。高性能な避雷器の適用により、各種機器、特に高電圧機器の耐電圧値(絶縁レベル)を低く設定することができ、小型化・低コスト化を図ることができる。

世界のHVDC機器の雷サージに対する耐電圧(LIWLという)を調査したところ、定格直流電圧の3倍程度が一般的だったが、紀伊水道HVDCではLIWLを1300kV(定格直流電圧の2.6倍)へ低減することを目指して高性能避雷器を開発し実用化した。これにより、直流送電線および変換所直流機器の小型化、低コスト化に大きく寄与した。

一般の交流送電の場合でも同様だが、過電圧印加により避雷器が一旦動作すると、送電線路に蓄えられていた静電エネルギーが避雷器に流入し熱に変換される。この処理エネルギーは静電容量と電圧の2乗(CV^2)に比例して大きくなる。ケーブルは一般に架空送電線よりも静電容量が大きい、紀伊水道HVDCでは直流送電線にケーブル区間があり、また直流回路電圧も±DC500kVと高電圧なため避雷器は大きなエネルギー処理責務を達成する必要があった。これには単位体積当たり処理エネルギーが大きくかつ大口徑の避雷器素子を多並列で使用する事で対処している。⁽¹¹⁾ なお、第1期設備では避雷器はDC250kV仕様である。

6. 4 帰線強制消弧装置(MRTB)

MRTBは開閉器の一種で、紀北変換所の帰線回路と対地間に接続されている。直流送電線の架空線区間(由良-紀北間)では、鉄塔への落雷により帰線が地絡事故を起こす事があるが、両端の変換器を一旦停止せずにこの地絡事故を除去するために用いるのがMRTBである。MRTBは常時は開放状態で、帰線に地絡事故が起きると投入され紀北変換所の帰線回路を接地する。すると地絡点の事故電流はMRTBの方を流れるようになり、事故点の地絡アークは消滅し事故が除去される。その後、MRTBを再び開放してMRTBに流れていた直流電流を帰線回路へ転流させる。MRTBは直流遮断能力が必要である。MRTBは遮断部にガス遮断器を使い、その遮断時内部アークの負性抵抗特性とLC周辺回路とで発生する自励振動を利用してMRTB遮断部を流れる電流にゼロクロス点を作って遮断し、MRTBの直流電流を帰線へ転流させる。使用するガス遮断器のアーク特性、周辺回路のLC、帰線回路の定数などを詳細に模擬した解析により、過負荷運転時DC3500Aまで転流可能なMRTBを開発、実用化した。⁽¹²⁾

6. 5 直流GIS用500kV回路用抵抗付き断路器

第2期増設後のHVDC設備では、DC250kVを印加した状態で開閉することが可能な直流回路用断路器が何台か必要になる。これは、送電を中断しないでDC250kV運転からDC500kV運転(またはその逆)に切り替えるための操作である。DC250kVを印加した状態で断路器を開閉するとサージ電圧を発生し、近傍の機器の絶縁に有害である。断路器の電極部に1kΩの抵抗器を装備することによって、完全な開放状態から、まず1kΩを介して接続した状態を経て、金属電極同士で接続、という2ステップの開閉動作を行えばサージ電圧の問題がないことを計算機シミュレーションにより確認した。⁽¹³⁾ 断路器の電極部に抵抗器を設け、電極形状も工夫して、通常の断路器と同じ電極操作機構で上記の2ステップの開閉動作を行なう抵抗付き断路器を開発した。

ほとんどの直流回路用断路器はDC250kV印加状態で開閉操作を行なう必要がなく1kΩの抵抗を装備する必要はない。第1期工事で設置した直流回路用断路器はどれも抵抗器つきにする必要のないものばかりであるため、抵抗器つき断路器は実際にはまだ設置されていない。

7. 変換用変圧器・直流リアクトル

変換器用変圧器と直流リアクトル(DCL)とは基本的な構造は同一である。交流用の変圧器・リアクトルと比較してHVDC用で特に考慮すべき事項には絶縁と損失がある。また、直流リアクトルではインダクタンスの直線性(飽和しにくい特性)にも注意を要する。

変換器用変圧器と直流リアクトルの絶縁構成は、油浸紙と絶縁油で構成される油浸紙複合絶縁構造であり、絶縁設計の基本思想は共通である。交流電圧を印加した場合は油浸紙と絶縁油の2つの材料の誘電率の比率に従った電界分布となるが、直流電圧を印加した場合は抵抗率の比率に従った分布となる。この誘電率の比率は1:1に近いので交流電界の分布は均一で良好な電位分布が得やすいが、抵抗率の比率は1:10~1:100程度であり、直流電圧は油浸紙の部分に電圧分担が集中するという特徴がある。また、HVDC設備の運転制御で送電方向を逆向きにすると(潮流反転という)直流電圧の極性が反転するが、この電圧の極性反転も油浸紙複合絶縁に対して大きなストレスとなる。

直流電圧と極性反転のストレスに対し、従来は絶縁紙部分の厚みを大きめにとる設計で対応していた。紀伊水道HVDC向けDC500kV用変圧器・リアクトルを設計するに当たり、直流および極性反転電圧に対する油浸紙複合絶縁の絶縁特性の基礎データを再調査し、最新の知見に基づく合理的な絶縁設計を行った。⁽¹⁴⁾

変圧器・リアクトルの損失に関して特徴的なのは、変換器運転に伴って発生する高調波電流による発生損失である。高調波電流によって巻き線や鉄心を始めとする各部に発生する漂遊損失を解析し、低損失となる構造を採

用した。⁽¹⁵⁾

HVDC システムの直流リアクトルには事故時の直流回路電流を制限する役割があり、直流回路電流が定格の2倍程度の過電流でも飽和しない(インダクタンスが低下しない)ことが要求される。直流リアクトルでは空心コイルを磁気シールドで囲んだ構造を採用し、過電流領域でもインダクタンスが大幅には減少しない特性を実現している。直流電流が流れた状態でのインダクタンスを測定する試験は従来は難しかったが、試験用直流電源からリアクトルへ通電する際の過渡現象(di/dt , dv/dt など)を測定してインダクタンスを求める試験法を実用化した。この試験法により、過電流領域でもインダクタンスが大幅には低下しない特性である事を工場試験で確認できた。⁽¹⁶⁾

8. むすび

ここでは、紀伊水道HVDCプロジェクトに採用されている新技術の代表的なものを紹介した。本プロジェクトには、ここで紹介した以外にも、多くの新技術が取り入れられており、正にHVDC技術の集大成といえることができる。今回の新技術は、今後の直流送電を含めた電力システムの拡充にあたり、大きく貢献するものと確信している。

最後に、新技術開発に協力頂いた関係各位に御礼を申し上げます。
(平成12年9月6日受付)

文 献

- (1) 松野, 山地, 鈴木, 野呂, 小向, 村尾:「直流送電による電力動揺抑制制御の検討」平成7年電気学会全国大会 1422, pp6-335-336, 1995
- (2) 佐藤, 本庄, 山地, 吉野, 荒井:「HVDC Converter Control for Fast Power Recovery after AC System Fault」1996年IEEE Summer Meeting, 96SM449-4PWRD
- (3) 塚本, 瓦井, 本庄, 森, 野呂, 荒井:「直流送電システムにおける総合動作解析・検討」平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1996
- (4) 松原, 東, 本庄, 吉野, 田能村, 大田:「軸ねじれ振動抑制制御の開発」平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1996
- (5) 田辺, 小林:「直流送電用バルブのためのサイリスタ特性の最適化検討」電学論B Vol.117-B No.7 pp1024-1031, 1997
- (6) 山田, 橋本, 色川, 松本, 矢野, 田辺:「高電圧・大容量光サイリスタの圧接技術」平成7年電気学会全国大会 677 pp4-14, 1995
- (7) 田辺, 長谷川, 山地, 色川:「Insulation Characteristics of 500kV Water-Cooled Thyristor Valve for HVDC Transmission」電学論B Vol.117-B, No.6 pp791-796, 1997

- (8) 大植, 山地, 色川, 中垣, 伊村:「直流送電用500kV級サイリスタバルブの構造開発」平成8年電気学会全国大会, 1996
- (9) 吉田, 山地, 畑野, 保科, 青柳, 小林, 石川:「直流500kV GIS 母線の絶縁設計と絶縁性能の検証」平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1996
- (10) 長谷川, 山地, 三瓶, 小林, 青柳, 石川:「直流500kV GIS 用絶縁スペーサの開発」平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1995
- (11) 田中, 高畑, 畑野, 小松, 清水, 竹科, 野月, 小山:「DC500kV ガス絶縁タンク形避雷器の開発」
- (12) 竹治, 高畑, 畑野, 越塚, 西脇, 小林:「MRTB/NCB 用SF6ガスアークによる自励発振直流遮断」平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1995
- (13) 竹治, 高畑, 色川, 西脇, 越塚, 田辺:「直流500kV GIS 用抵抗投入方式断路器によるサイリスタバルブの保護」平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1995
- (14) 池田, 茂木, 谷口, 吉田, 中越, 畑野:「油浸絶縁沿面の直流と極性反転電圧の絶縁破壊特性」電学論B Vol.119-B No.3 (1999) pp381-187
- (15) 吉田, 山地, 三瓶, 井坂, 坂倉, 池田, 毛受:「変換用変圧器漂遊損の周波数特性の解析」電学論B, Vol.115B No.4, 1995
- (16) 池田, 井坂, 坂倉, 吉田, 中越, 畑野:「空心直流リアクトルのインダクタンスの非線形特性」電学論B Vol.119 No.8/9 (1999)

田中愁佳夫

(正員) 1949年生まれ。1973年3月東京工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。同社総合技術研究所にて電力システムの解析、系統安定化装置の開発に従事。現在、同社電力システム事業本部にて電力システムに関する業務に従事。

川原 昭人

(正員) 1952年生まれ。1970年3月京都大学工学部電気工学科卒業、同年四国電力株式会社入社。主として電力部門に関する業務に従事。現在、同社電力部橋湾系統プロジェクトチームにて直流設備関係各種業務に従事。

三瓶 雅俊

(正員) 1951年生まれ。1977年3月東京理科大学理工学研究課修士課程修了、同年4月電源開発(株)入社。北海道本州間連系設備、紀伊水道直流連系設備の設計施工に従事。現在、工務部変電技術グループにて直流送電関連業務に従事。日本電気学会、米国電気学会、CIGRE 会員。