他励式直流多端子送電システムの制御保護方式の開発とシミュレータ試験

正員 大井 寿 (電源開発) 正員 渡辺 勉 (東京電力)

正員 河田 謙一 (関西電力) 正員 林 敏之 (電力中央研究所)

正員 小西 博雄 (日立製作所) 正員 廣瀬 俊一 (東芝)

Development of Advanced Multi-terminal HVDC Control and Protection Systems and Simulator Tests
Hisashi Ooi, Member (Electric Power Development Co., Ltd.)
Tsutomu Watanabe, Member (Tokyo Electric Power Company)
Kenichi Kawada, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.)
Toshiyuki Hayashi, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)
Hiroo Konishi, Member (Hitachi, Ltd.)
Shunichi Hirose, Member (Toshiba Corporation)

A technical project is undertaken for a development of multi-terminal HVDC (MTDC) control and protection systems applicable to future long distance HVDC bulk power transmissions and power network interconnections. Through study and digital analyses of the previously proposed MTDC control and protection systems, advanced voltage margin control system and 2-automatic current regulator (2-ACR) control system are developed with new control functions. Then simulator tests are performed for the two systems with power network models expected to be realized in the future. The results of simulator tests are believed that the two MTDC control and protection systems are capable of applying to the future long distance HVDC bulk power transmissions and power network interconnections in Japan.

キーワード： 直流送電、直流多端子、他励式、制御保護装置、ディジタル解析、シミュレータ試験

1. まえがき

将来のわが国の電力系統は、電源の遠隔化、偏在化および系統の大規模化、複雑化が予想される。そのような電力系統では、交流送電の他に経済性、環境調和性の利点が活用できる直流送電の適用も期待される⁽¹⁾。

わが国の長距離大電力送電に直流送電を適用するためには、遠隔地からの大電力を、系統構成の自由度が確保でき、高信頼度かつ効率的に送電可能な直流多端子送電技術の確立が不可欠である⁽²⁾⁽³⁾。このため著者等は、わが国の系統特性を考慮した高信頼度の他励式直流多端子送電系統(以下「多端子」と略称)の制御保護方式の開発を推進して、内外の実態調査^{(3)~(7)}も踏まえて本目的に適合する制御保護方式として、「改良形電圧マージン制御方式」と「改良形2段ACR制御方式」の2方式を開発した。

この2制御方式を実装した実設備とほぼ同等の制御保護装置を、双極3端子分試作し電力中央研究所(電中研)の「交・直流電力系統シミュレータ」⁽⁸⁾と組み合わせて、多端子の制御機能の性能検証および実用化の確認を行っている。このシミュレータ試験は継続中であるが、当初予定の

第一段階を終了したので研究の目的、機能、試作および性能検証方法、検証結果、評価等について報告する。

2. 制御保護方式開発の目的

わが国の長距離大電力送電に直流送電を適用する場合、系統構成のフレキシビリティおよび系統特性を考慮した、高信頼度の多端子制御保護方式の確立が必要になる。このため、直流多端子技術に関する内外の実態調査結果から、下記項目を重点目的として、多端子制御保護方式を開発することとした。

- ① 高速の情報伝送系に全面的に依存せず、多端子のある端子で変換器の脱落、交流電圧低下などの擾乱時にも、安定運転が継続可能な方式(分散制御性能)。
- ② 双極の直流多端子運転において、端子脱落、直流線路故障などの擾乱が片極に発生しても、健全極に影響を与えにくい方式。
- ③ 開発した制御保護方式を実装した、実設備とほぼ同等の装置を試作(製作の可能性および実用化の確認)し、シミュレータと組み合わせて前記機能および性能の検証を行う。

- ④ シミュレータによる検証試験では、可能な限りわが国の将来の系統構成を想定したモデル系統で行い、実系統への適用性の評価を行う。

3. 開発した制御保護方式

多端子の制御は、1端子が定電圧制御(AVR)により直流電圧を一定に、残りの端子が定電流制御(ACR)により直流電流を一定に制御することが基本である。このためには系統の情報を高速情報伝送系により一箇所で監視し、各端子間で協調のとれた制御を行う「集中制御方式」と、情報伝送系に全面的に依存せず、常に安定運転を継続できる「分散制御方式」とがある^{(2)~(4)}。

多端子の、ある端子で脱落、交流電圧低下などの擾乱が発生した場合、安定運転継続のためには、高速情報伝送系により速やかに各端子の電力(電圧、電流)指令値を変更しなければならない。分散制御方式では、この電力指令値変更を高速の情報伝送系に頼らず、各端子の電圧-電流特性で対応する方式である。内外の実態調査によると多端子の基本制御保護方式は、これまで各種提案されているが、分散制御性能を有する方式は「電圧マージン制御方式」と「2段ACR制御方式」の2方式が代表的である。

本研究ではこの2方式を対象とし、以下に述べる機能を付加して、それぞれ「改良形電圧マージン制御方式」および「改良形2段ACR制御方式」と呼称する制御保護方式を開発した。なお、前者はすでに同名の方式が提案されているが、その方式に新機能を付加したもので、ここでは同一名称とした⁽⁴⁾。

〈3.1〉制御機能の課題の抽出 本研究開発では、電圧マージン制御方式と2段ACR制御方式の多端子制御機能および性能について、モデル系統においてデジタル解析(電中研Y法、EMTP)により、特性評価と実用化のための課題の抽出を行った。この結果すでに指摘されている課題の他に、新たな課題が抽出された。これらについて、その対策とともに次項に述べる。

〈3.2〉制御機能の課題と改良点 前述の抽出した課題に対し、その対策を検討して有効と評価される制御機能を、モデル系統においてデジタル解析により検証した。この評価、検証をもとに下記の改良機能を考案して、すでに述べた2方式に付加した(○:すでに提案されているが今回初めてシミュレータ試験した機能、●:今回改良、追加しシミュレータ試験した機能)。

(1) 改良形電圧マージン制御方式

- REC端子脱落時の安定運転(REC1-REC2-INV運転時)

〔課題〕順変換器(REC)のうちの1端子脱落により、故障極側のREC、逆変換器(INV)の電流バランスがとれず、安定運転を継続できない。

〔改良〕情報伝送系に頼らずINV端子でREC端子の脱落を検出し、INVの電流指令値(I_{dp})を最小値(I_{dpmin})に変更して、動作点をつくり安定運転を確保する。

- 小容量系統に接続されたINV端子交流電圧低下時の安定運転

〔課題〕小容量系統に接続されたINV端子では、交流電圧低下時転流失敗が連続して安定運転できない。

〔改良〕交流電圧低下にともなうINV側直流電圧低下で、VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter)を動作させ、直流電流を低減して連続転流失敗を防止する。

- INV端子脱落時の安定運転(REC-INV1-INV2運転時)

〔課題〕INV端子脱落により、REC端子の送電電力を全て健全INV端子が受電するため、健全INV端子が過負荷になる。

〔改良〕INV端子に直流電流最大値制御(ACRm)を追加し、過負荷とならない動作点を得る。

(2) 改良形2段ACR制御方式

- 故障除去後の電力回復の高速化

〔課題〕INV端子脱落后、あるいは交流系統故障除去後、速やかな電力回復ができない。

〔改良〕故障除去後に直流電流の回復が遅い場合は、INV端子の直流電圧指令値(U_{dp})を一時的に低減する制御(EDC)を行い対処する。

- REC端子の至近端故障での電力変動抑制

〔課題〕REC端子の交流故障時に直流電圧が低下すると、VDCOLが動作してさらに直流電流が減少し電力の変動が大きくなる。

〔改良〕VDCOLの動作開始電圧を下げ、動作復帰の電圧を上げるヒステリシス特性で対処する。

- INV端子脱落時の健全極変動抑制(REC-INV1-INV2運転時)

〔課題〕双極運転中に片極側INV端子脱落時、健全極側の直流電圧が低下し、VDCOL動作で直流電流が低減して健全極の直流電力が一時的に減少する。

〔改良〕VDCOLの動作開始電圧を下げるとともに、同一端子の健全極の転流失敗を防止するため、INV端子脱落時に、同一端子の健全極の β 進め制御を行う。

〈3.3〉改良形電圧マージン制御方式の制御機能

(1) 制御ブロックと変換器の電圧-電流特性

図1に改良形電圧マージン制御方式の制御ブロックを、また図2に変換器の電圧-電流特性を示す。ただし、後備保護制御であるVDCOL特性は除いている。

図1 改良形電圧マージン制御方式の制御ブロック

Fig.1. Block Diagram of Advanced Voltage Margin Control

図2 改良形電圧マージン制御方式の電圧-電流特性
Fig.2. Voltage-Current Characteristics of Advanced Voltage Margin Control

(2) 変換器の制御特性

改良形電圧マージン制御方式は、各端子の変換器に以下の制御特性を持たせる。

各端子の変換器は、変換器に流れる直流電流を指令値 (I_{dp}) に保つための定電流制御 (ACR) と、直流電圧を指令値 (U_{dp}) に保つための定電圧制御 (AVR) を持たせる。

- ① 直流電圧は各端子のうちの1端子で電圧指令値 (U_{dp}) になるように制御し、残りの端子は直流電流が電流指令値 (I_{dp}) になるように制御する。
- ② 各 REC 端子と各 INV 端子の直流電流指令値 (I_{dp}) には以下の関係を持たせる。

$$\sum_{rec} (I_{dp}) - \sum_{inv} (I_{dp}) = \Delta I_{dp} \quad \Delta I_{dp}: \text{電流マージン} \quad \text{--- (1)}$$

- ③ 各端子の変換器の直流電圧指令値 (U_{dp}) には異なった値を与え、直流系統の電圧決定端子には電流マージン (ΔI_{dp}) を与えて、直流電圧を U_{dp} に制御する。
- ④ INV 端子で REC 端子脱落を検出して INV 端子の直流電流指令値 (I_{dp}) を最小値 (I_{dpmin}) まで下げる。
- ⑤ INV 端子に最大直流電流の指令値を持つ第2の定電流制御 (ACRm) を設ける。

図1に示す制御ブロックでは、変換器の運転電流を決める定電流制御 (ACR) と REC の定電圧制御 (AVRr) の最大値と、INV の定電圧制御 (AVRi) と変換器の電流最大値制御 (ACRm) の最大値とをとり、これらと定余裕角制御 ($A \gamma R$) のうちの最小値を選択し、この選択された値で変換器を制御する。

(3) INV 端子での REC 端子脱落検出

REC の脱落検出は運転中、潮流反転指令なし、情報伝送系異常、直流電圧低下のAND条件の成立で行い、この条件が INV 端子で成立したとき、INV 端子の直流電流指令値 (I_{dp}) を最小値 (I_{dpmin}) に切り替える。図1に示す制御ブロックでは、REC 端子脱落検出の制御の記載は省略している。

(4) VDCOL 制御特性

VDCOL は転流失敗からの自復を助け、また交流電圧低下時に変換器が必要とする無効電力の増加を抑えて、交流系統故障除去後の電力回復を速めることが期待できる。しかし、直流電圧の変動に応動させて直流電流をむやみに振らせると、逆に転流失敗からの自復を遅らせ、故障除去後の電力回復も遅くなる。このため、故障時間の短い場合には動作させないで、主保護失敗時に動作させる。また、遠方端交流系統故障などによる比較的軽度の直流電圧低下時に動作

させないために、直流電圧が 0.6pu 以下となったときに動作させる特性とする。

直流電圧に応じた電流指令値の変更は、直流電圧低下時の変換器の必要とする無効電力を一定に保つ特性とする。図3に、定格運転時に直流電圧が低下した場合の変換器の必要とする無効電力を一定とする直流電流値 (実線) と、これを考慮した VDCOL 特性 (破線) を示す。この破線特性により定電流制御 (ACR) に与える電流指令値 (I_{dp}) は次式となる。ただし、電流指令値は最小運転電流でリミットする。

$$\begin{aligned} U_d > 0.6 U_{dp} & \quad I_{dp}' = I_{dp} \\ U_d \leq 0.6 U_{dp} & \quad I_{dp}' = \frac{I_{dp}}{2 \times 0.6 \times U_{dp}} U_d + \frac{I_{dp}}{2} \end{aligned} \quad \text{--- (2)}$$

図3 無効電力を一定とする直流電圧と直流電流の関係
Fig.3. Relationships of DC Current and DC Voltage in order to keep Converter's Reactive Power Constant

〈3.4〉改良形2段 ACR 制御方式の制御機能

(1) 制御ブロックと変換器の電圧-電流特性

図4に改良形2段 ACR 制御方式の制御ブロックを、また図5に変換器の電圧-電流特性を示す。

図4 改良形2段 ACR 制御方式の制御ブロック
Fig.4. Block Diagram of Advanced 2-ACR Control

図5 改良形2段 ACR 制御方式の電圧-電流特性
Fig.5. Voltage-Current Characteristics of Advanced 2-ACR Control

(2) 変換器の制御特性

改良形 2 段 ACR 制御方式は、3.2 項で述べた機能の他に、各端子の変換器に以下の制御特性を持たせる。

- ① 各端子の変換器には 2 つの定電流制御 1、2 (ACR1、ACR2) と 1 つの開ループ定電圧制御 (CVC) を持たせる。
- ② 各端子の変換器の直流電圧指令値 (U_{dp}) には異なった値を与えるが、REC の電圧指令値 (U_{dp}) の最小値は INV の電圧指令値 (U_{dp}) の最大値よりも高く設定する。
- ③ 電圧決定端子の直流電流指令値 (I_{dp}) は REC であっても INV であっても、自端の運転電流よりも電流マージン (ΔI_{dp}) 分大きくする。
- ④ 常時の電圧決定端子は、最も低い電圧指令値 (U_{dp}) が与えられた REC か、最も高い電圧指令値 (U_{dp}) が与えられた INV のいずれかとする。
- ⑤ 上記のように設定すれば、何らかの原因で任意の端子の変換器が脱落しても、少なくとも REC 端子と INV 端子が各 1 端子以上残っていれば、残りの端子の変換器は指令値を変更をしなくても安定運転を継続できる。

(3) INV 端子の電圧指令値操作制御 (EDC)

図 4 の制御ブロックに示すように、INV 端子に直流電流が電流指令値 (I_{dp}) 以下を所定時間継続した場合 (図 4 中の LD により検出)、一旦直流電圧指令値 (U_{dp}) を低減させる電圧指令値操作制御 (EDC) 機能を新たに追加した。これにより、REC と INV 端子間の電位差を大きくして直流電流を迅速に立ち上げ、故障除去後の融通電力の回復を速めることができる。

(4) ヒステリシス付き VDCOL 制御特性

INV 端子が転流失敗を起こした場合に、転流失敗した INV 端子に電流が集中し自復が困難になる。これを抑制するため、REC 端子には VDCOL を付加している。交流線路故障による短時間で比較的軽度の直流電圧低下時には不必要に VDCOL を動作させないよう、VDCOL 動作開始の直流電圧指令値 (U_{dp}) を下げ、VDCOL 動作復帰の電圧指令値 (U_{dp}) を上げるようヒステリシス特性を持たせた。ヒステリシス付き VDCOL は、図 5 の REC 端子の電圧-電流特性に示すように、直流電圧が指令値 (U_{dp2}) 以下になった場合に動作させ、直流電圧が指令値 (U_{dp3}) 以上に回復した場合に復帰させる。

(5) β 進め依頼制御

双極多端子では、片極 (たとえば一極) の INV 端子脱落時に健全極 (+ 極) の直流電圧が振動して、健全極 INV 端子が転流失敗する可能性がある。一般的に、 β 進め制御は自端子 INV の連続転流失敗を防止する目的で機能させていたが、双極変換器での片極の INV 端子脱落時に、脱落端子から同一変換所内健全極 INV 端子に β 進め依頼制御を行い、健全極の転流失敗を防止する機能を追加した。

〈3.5〉装置構成と機能 製作の可能性確認およびシミュレータによる検証試験のため、改良形の高端子制御保護方式を実装した装置を試作した。多端子の構成は最小単位である双極 3 端子とした。試作した各装置と直流多端子の各端子との関係を図 6 に示す。

図 6 制御保護装置の構成

Fig.6. Advanced Control and Protection Systems

図 6 に示す各装置の主な機能を以下に述べる。

(1) 極間制御装置 (1 装置 = 双極共通)

極間制御装置は、各極の共通制御装置に運転モードと指令値を設定して、極としての起動停止を指示し、各端子の運転状態の表示を行う。運転モードは REC/INV、電圧決定端子、制御方式 (改良形電圧マージン制御方式/改良形 2 段 ACR 制御方式) などを設定できる。

(2) 共通制御装置 (各極 1 装置 = 双極分)

共通制御装置は、各端子間の協調した起動停止、潮流反転制御を行う。このため、本装置は各端子に起動、停止、保護等の指令、電圧、電流の指令値等の信号を伝送する。

(3) 制御保護装置 (各極 3 装置 = 3 端子分)

制御保護装置は、共通制御装置からの指令を受け、制御角を決定して変換器にパルス信号を与える。改良形電圧マージン制御方式と改良形 2 段 ACR 制御方式の双方を実装しているが、選択されたどちらか一方の方式で制御する。

4. 開発した制御保護方式の解析による検証

3.2 項で述べた制御機能の課題に対処する改良点 (付加機能) は、モデルシステムでデジタル解析 (Y 法、EMTP) により、性能検証を行いその有効性を確認した。ここでは、そのモデルシステムおよびデジタル解析結果の一部を述べる。

〈4.1〉制御機能検証のためのモデルシステムの選定 開発した多端子制御方式の解析による制御機能検証の対象となるモデルシステムは、「UHV 送電特別委員会 (昭和 53 年～60 年)」で検討された「原子力電源からの長距離大電力送電」を参考として、3 モデルシステムを選定した⁽¹⁾。このモデルシステム選定の基本的な考え方は以下のとおりである。

- ・直流システムは、連系交流システムの違いがわかりやすいよう、単純な 3 端子構成とし制御保護方式を検討できるようにする。
- ・交流システムも電源、送電線、負荷変電所の単純な構成とし、交直変換所端の短絡容量比 (SCR) をパラメータとして変更させる。
- ・発電機については、現実に近い制御系 (励磁系、ガバナ系など) を模擬する。
- ・3 つの交流システム間の交流による連系の「有り」と「無し」の場合を検討する。

上記により1電源交直並用系統、1電源単独送電系統および2電源単独送電系統の3モデル系統を選定した。図7および8に、後述のデジタル解析とシミュレータ試験結果で言及している1電源交直並用系統および2電源単独送電系統のモデル系統を示す。なお、図7に示す1電源交直並用系統は、端子1と端子2間の並列交流系統が電氣的に遠距離にあり、このように呼称した。

図7 1電源交直並用系統

Fig.7. AC/DC Parallel Network with One Generator Source

図8 2電源単独送電系統

Fig.8. AC/DC Isolated Network with Two Generator Sources

また、図9に直流主回路を示す。

図9 双極直流3端子主回路

Fig.9. HVDC 3-terminal Bipolar Circuit

〈4.2〉改良形電圧マージン制御方式の検証 改良形電圧マージン制御方式の付加機能の検証では、そのうちのREC端子脱落時の安定運転(図8の2電源単独送電系統、REC1-REC2-INV運転時)のY法の解析結果を述べる。

たとえば、REC1(0.45pu)-REC2(0.45pu)-INV(0.9pu)で双極運転中に、+極のREC2(0.45pu)端子が脱落すると、脱落の瞬間にはREC1(0.45pu)-INV(0.9pu)運転となり、有効電力のバランスがとれずこのままでは運転継続ができない。こ

のため、高速の情報伝送系に頼らずINV端子でREC2端子の脱落を検出し、本INV端子の電流指令値を最小値($I_{dpmin}=0.1pu$)に変更して、動作点を確保して運転継続を可能とした。この場合のY法の解析結果を図10に示す。

図10 改良形電圧マージン制御方式のREC端子脱落解析

Fig.10. Simulation for REC Terminal Drop-out with Advanced Voltage Margin Control

図10は、前述の運転状態で同図中の2秒時点で+極のREC2(0.45pu)端子が脱落した場合の解析結果である。脱落した+極側に過渡的な振動が見られるが、健全端子はREC2(0.45pu)の運転電力分だけ減少させた新しい動作点、REC1(0.45pu)-INV(0.45pu)で運転継続している。この時健全極の一極側への影響はほとんど見られない。

〈4.3〉改良形2段ACR制御方式の検証 改良形2段ACR制御方式の付加機能の検証では、そのうちの故障除去後の電力回復の高速化(図7の1電源交直並用系統、REC-INV1-INV2運転時)のEMTPの解析結果を述べる。

2段ACR制御方式では、高速の開ループ定電圧制御(CVC)で直流電圧を一定に制御しているが、交流系統故障などを除去後、各端子が事前の運転状態に回復時、RECおよびINVのいずれの端子とも定電圧制御(CVC)が動作する場合がある。このためいずれの端子でも定電流制御(ACR)が行われなため、直流電流の回復が遅れる場合がある。この対策はいくつかあるが、最も効果的な方法は、直流電流指令値(I_{dp})と実際の直流電流値(I_d)との乖離をINV端子で検出して、一定時間INV端子の直流電圧指令値(U_{dp})を5~50%程度低減する制御(EDC)である。

このEDCの効果について、REC(1.0pu)-INV1(0.5pu)-INV2(0.5pu)で双極運転中に、INV1端子の至近端交流3線地絡故障除去(3LG0)後の有効電力の回復特性を、EMTPにより解析した。故障除去後、有効電力の事前値までの回復にEDCを機能させない場合は、約250msかかっていたが、EDCを機能させると約100msに短縮できた。EMTPの解析では、このEDCの動作中は、RECとINVとの電位差が大きくなり、直流

電流が迅速に立ち上がり、EDC による事前状態への速やかな有効電力の回復が確認できた。

5. シミュレータ試験結果と考察

〈5.1〉シミュレータ試験の目的と試験法 開発した多端子制御保護方式は、デジタル解析により検証しているが、実証的な性能確認を行うためシミュレータ試験で実用性能の検証を実施することにした。

試作した多端子制御保護装置は、「交・直流電力システムシミュレータ」と組み合わせて各種試験を行い、各試作装置のシステムとしての総合性能を検証している。このシミュレータ試験は、3端子が無限大系統に接続される構成と、4.1項で述べた3モデル系統の構成で行っている。無限大系統でのシミュレータ試験は、系統条件に左右されず、2端子および3端子の基本動作と擾乱時の動作を確認し、各モデル系統での試験のリファレンスとするためである。

シミュレータでの試験は、事前に定めた試験法にもとづいて実施している。この試験法は、各モデル系統において、試作した制御保護装置の実用化のために付加した機能の検証が可能であることを前提にして取りまとめた。試験法で最も重要となる結果の評価方法は、既設2端子直流送電設備の運転経験、デジタル解析結果から決めている。

シミュレータでの主な試験項目を以下に示す。

- ・基本動作確認試験
 - 一括起動停止、個別起動停止、設定値急変、一括潮流反転、個別潮流反転
- ・擾乱時の動作確認試験
 - 保護連動、端子脱落、直流線路故障(制御保護に直流遮断器を適用した場合としない場合)、交流線路故障

〈5.2〉改良形電圧マージン制御方式の試験結果 シミュレータ試験のうち改良形電圧マージン制御方式におけるREC脱落時の動作試験結果を以下に述べる。

図11に2電源単独送電系統(図8)にて、REC1(0.5pu)-REC2(0.5pu)-INV(1.0pu)の3端子運転中で、正常時●とREC2端子(電流制御端子)が脱落時の動作点○を示す。

図11 REC端子脱落時の変換器の電圧-電流特性
Fig.11. Converters' Operating Points in REC Drop-out

電圧制御はINV端子(電圧決定端子)で行っている。REC2端子の脱落によりINV端子が必要とする電流が不足するので、潮流反転して電流バランスをとろうとする。INV端子では潮流反転指令がなく直流電圧が低下したことを検出して、直流電流指令値(I_{dp})を最小値0.1puに変更する。INV端子の電流がREC1端子の電流に等しくなると安定動作となる。

図12に前記REC脱落動作のシミュレータ試験波形を示す。端子脱落から90ms後にINV端子でREC端子脱落を検出して直流電流指令値(I_{dp})を最小電流値(I_{dpmin})に変更することにより、新しい動作点に向かって電圧と電流が変化し、脱落から250ms後に新しい安定動作点に達している。したがって、脱落時に高速の情報伝送装置を使って各端子間で電流指令値(I_{dp})を調整する必要はない。INV端子の直流電圧が過渡的に1.11pu上がっているが、約280ms後に事前値に戻っている。その他脱落にともなった過電圧、過電流の発生はない。また、このREC脱落時のシミュレータ試験結果は、図11に示すREC脱落時の電圧-電流特性に一致している。

なお、端子脱落時の過渡的な送電状態から正規送電状態への移行は、情報伝送装置を使って各端子に新たな直流電圧指令値(U_{dp})および直流電流指令値(I_{dp})を与えることにより行える。

図12 改良形電圧マージン制御方式のREC端子脱落時のシミュレータ試験波形

Fig.12. Analog Simulator Test Result in REC Drop-out with Advanced Voltage Margin Control using Actual Controls

〈5.3〉改良形2段 ACR 制御方式の試験結果 シミュ

レータ試験のうち改良形2段 ACR 制御方式については、交流線路故障除去後の電力の迅速な回復に関する付加機能の動作試験結果を以下に述べる。

図13に1電源交直並用系統(図7)にて、REC(1.0pu)-INV1(0.5pu)-INV2(0.5pu)の3端子運転中で、正常時●とINV2端子の至近端交流1線地絡故障(1LG)中の動作点○を示す。

図13 INV端子至近端1LG0時の変換器の電圧-電流特性
Fig.13. Converters' Operating Points in AC 1LG0 Fault close to INV

図13は電圧指令値操作制御(EDC)機能有りでの各変換器の動作点を説明するもので、電圧制御はINV1端子で行っている。故障(1LG)中、INV1端子は、定電流制御2(ACR2)で電流を絞り込むが、INV2端子では交流線路故障のため定電流制御が行われず、REC端子からの電流のうち、INV1端子で吸収できない分がINV2端子に流れる。故障が除去(1LG0)されると直流電圧が立ち上がるが、INV1端子が故障前の直流電圧指令値(Udp)の状態では、REC端子とINV1端子の間の電位差が小さいため、INV1端子の直流電流の立ち上がりが遅れる。EDC有りの場合、直流電流の立ち上げを速めるため、直流電流が電流指令値(Idp)の80%以下となりこれが20ms以上継続すると、INV1およびINV2端子の直流電圧指令値(Udp)を20%下げている。

EDC有りでシミュレータ試験波形を図14(1)に、EDC無しでのシミュレータ試験波形を図14(2)に示す。図14の試

験波形において、故障除去(1LG0)時の直流電圧と直流電流の動きから融通電力の回復を比較評価する。

EDCを動作させた図14(1)では、故障(1LG)中に直流電流が電流指令値(Idp)の80%以下が、20ms以上継続したため、INV1端子とINV2端子でEDCが動作している。電圧決定端子であるINV1端子では、EDCで直流電圧指令値(Udp)を20%下げることにより、故障除去(1LG0)後、直流電圧が立ち上がり定電流制御2(ACR2)から定電圧制御(CVC)に移行した後の定電流制御1(ACR1)への移行が速くなる。INV1端子では、直流電流を故障発生から150msで電流指令値(Idp)まで速やかに増加させている。故障除去後のINV1端子の直流電流増加により、故障(1LG)による転流失敗のためβ進めを行っているINV2端子への直流電流の増加が抑えられ、INV2端子はその後転流失敗を起こしていない。

EDCを動作させない図14(2)では、故障除去(1LG0)後、電圧決定端子であるINV1端子の直流電圧指令値(Udp)は操作されず、開ループ定電圧制御(CVC)により直流電圧を指令値(Udp)に維持するため、INV1端子の直流電流の回復が遅く、その分β進めを行っているINV2端子の直流電流が増加して、INV2端子は再び転流失敗を起こしている。

図14(1)および(2)を比較すると、EDCを動作させた方がINV1端子の直流電流の回復が速く、直流電圧は故障発生後からほぼ同じ時間で定格電圧に到達していることから、EDCによる有効電力の迅速な回復に対する効果が確認できた。

6. まとめ

将来系統への適用が可能な多端子の制御保護方式として、「改良形電圧マージン制御方式」と「改良形2段ACR制御方式」を開発した。この2制御方式を実装した制御保護装置を試作し、電中研の「交・直流電力系統シミュレータ」と組み合わせて制御性能の検証を行った。その結果、従来の多端子制御保護技術に対して、以下の検証ができた。

- ・「改良形電圧マージン制御方式」ではRECやINV脱落時の安定運転、小容量系統に接続されたINV端子交流電圧低下時の安定運転等の動作確認。
- ・「改良形2段ACR制御方式」では故障除去後の電力回復の高速化、REC端子至近端故障時の電力変動抑制、INV

図14 改良形2段ACR制御方式のINV端子至近端1LG0時のシミュレータ試験波形

Fig.14. Analog Simulator Test Result in 1LG0 Fault in INV with Advanced 2-ACR Control using Actual Controls

端子脱落時の健全極の変動抑制等の動作確認。

開発した2制御保護方式は、分散制御性能により、高速の情報伝送系に依存せず、多端子の1端子に擾乱が発生した場合でも擾乱除去後の安定運転継続が可能である。

7. あとがき

他励式直流多端子送電システムの制御保護方式について、その開発の経緯、制御機能および性能検証シミュレータ試験結果の一部を報告した。試作した多端子制御保護装置は、わが国の系統特性を前提に、わが国の信頼度レベルを考慮した所要の運転性能を有するよう付加機能を具備しており、「改良形電圧マージン制御方式」と「改良形2段ACR制御方式」を装備している。

モデル系統でのシミュレータ試験は、今後も予定しており、これらの結果の評価を待たねばならないが、現在までの検証結果では、開発したいずれの改良形制御保護方式とも、将来の実系統への適用が可能な特性を有していると考えている。

最後に、本研究開発は資源エネルギー庁の補助金を受け、著者所属の電力会社および電中研ならびに北海道、東北、中部、北陸、中国、四国、九州の各電力会社の共同研究として実施していることを付記するとともに、関係各位に感謝申し上げます。

(平成8年10月25日受付、同9年2月17日再受付)

文 献

- (1) UHV送電特別委員会報告：「UHV直流送電に関する研究」、電中研 UHV送電特別委員会報告書、委員会報告 Z85802、(1985-6)
- (2) 石川巖、他：「直流多端子送電集中制御装置の開発」、電学論 B、597、(1977-10)
- (3) 竹中清：「直流多端子系の高信頼度制御方式」、電中研研究報告、T88013、(1988-12)
- (4) 堀内進、原築志、他：「直流多端子分散形制御のシミュレータによる有効性検証」、電学論 B、1051、(1986-12)
- (5) L. Knudsen, et al. : "Description and Prospective Application of New Multi-terminal HVDC System Concepts," Group 14 CIGRE 1990 Session, 14-201, (1990-8)
- (6) D. McCallum, et al. : "Multiterminal Integration of the Nicolet Converter Station into Quebec-New England Phase II HVDC Transmission System," Group 14 CIGRE 1994 Session, 14-103, (1994-8)
- (7) V. Arcidiacono, et al. : "System Commissioning Tests for the SACOI-2 HVDC Three-terminal Link,"
- (8) 町田武彦、松岡徳治、他：「交流・直流電力シミュレータの開発」、電中研総合報告、117、(1984-5)

大井 寿

(正員)1948年10月10日生まれ。1971年3月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。同年電源開発㈱に入社。以来、主に工務部にて直流送電関係の技術開発、保守運用に関する業務に従事。現在、工務部次長。

渡辺 勉

(正員)1953年4月29日生まれ。1978年3月京都大学工学部研究科(電気工学専攻)修士課程終了。東京電力㈱に入社。以来、主に技術部にて、基幹系統計画、UHV・50万Vケーブルなど新技術関連の系統計画の業務に従事。

河田 謙一

(正員)1952年2月9日生まれ。1977年3月大阪大学大学院修士課程終了。関西電力㈱に入社。主として系統運用・保護関係の業務に従事。現在電力システム室系統技術課長。

林 敏之

(正員)1945年10月19日生まれ。1971年3月京都大学大学院修士課程終了。同年(財)電力中央研究所入所。1993年電力システム部長。1995年上席研究主幹(直流新技術課題推進担当)。この間、1978~79年米国テキサス大学にて客員研究員、1992~94年北見工業大学客員教授。直流送電の解析、制御に関する研究に従事。工学博士。1981年電気学会論文賞受賞。IEEE会員。

小西 博雄

(正員)1948年2月6日生まれ。1972年3月大阪大学大学院工学研究科(電気工学専攻)修士課程終了。同年㈱日立製作所入社。同社日立研究所において、主として直流送電システムの制御保護装置の研究開発に従事。同社主管研究員。1988年5月電気学会論文賞受賞。工学博士。

廣瀬 俊一

(正員)1950年12月27日生まれ。1977年3月名古屋大学大学院修士課程終了。同年㈱東芝入社、府中工場勤務。HVDC、SVC、燃料電池、核融合用電源などのパワーエレクトロニクス分野の仕事に従事し、現在に至る。