UDC 621.315.1.051.2.024.1: 621.3.015.38

論文

53-B 79

直流送電系統に発生する異常電圧とその抑制対策

正 員 佐々木 三 郎 (電中研)

1. ま え が き

直流送電系統の絶縁設計を適切に行うためには系統に発生する種々の異常電圧について検討を行ない、その抑制および保護対策を考慮しなければならない。直流系統の絶縁協調の考え方は交流系統と同様、避雷器が基盤になるものと考えられるが、ケーブルを含む直流系統の場合、直流ケーブルの絶縁が対地異常電圧のみでなく異常電圧の正負の振幅によっても決まるため、過電圧の波高値がそれほど大きくなくても逆極性成分を含む異常電圧が印加された場合、避雷器が放電せずケーブルに過こくな絶縁責務を与える可能性があると考えられる。またケーブルの静電容量が大きいため、過電圧によりケーブルに充電されるエネルギーが大きくなり、避雷器の動作責務が厳しくなることも考えられる。それゆえ、ケーブルを含む直流系統においては波高値の大きい異常電圧のみならず、逆極性成分を有する異常電圧も検討する必要がある。

一方、我が国のように国土が狭い場合、大地帰路電流による障害を発生させないために導体帰路方式の直流送電系統が採用されていくものと考えられるが、この場合には送電線の本線に発生する異常電圧ばかりではなく、中性線に発生する異常電圧についても検討しなければならない。しかし、このような系統を対象とした異常電圧ならびにその抑制対策についての解析はほとんどないのが現状である。

以上の観点から、直流送電線路として架空線とケーブルを含む導体帰路方式の直流系統をモデルとして選りシミュレータ(DC TNA: DC Transient Network Analyzer)により異常電圧の様相および、その抑制対策について解析した。異常電圧の抑制対策として本報告では、例えば事故が発生したとしても異常電圧の大きさを低く抑える方式として系統の主回路に抑制装置を設置する方式について検討を行なった。

2. 解析対象系統の構成

解析の対象とした系統は、第1図に示すような構成のケーブルを含むモデル直流送電系統(双極、導体帰路方式)であり、その直流定格電圧は250kV、直流定格電流は1,200Aとした。送電線の種類は本線架空線が断面積810mm²の単導体、中性線が断面積240mm²の導体2条、また、直流ケーブルは本線(高压側)が断面積600mm²のOFケーブル、中性線(低压側)が断面積500mm²の架橋ポリエチレンケーブルとした。

解析は直流系統異常電圧シミュレータによった。本装置はいわゆるTNAであり、インダクタンス、コンデンサ、抵抗の組合せから成る π 形線路単位を多段に直列接続することにより、等価的に分布定数線路を構成するものである。送電線の定数のうちインダクタンス、抵抗は大地回路の影響によりその値は周波数特性をもつが、本解析においてもDC~20kHzの周波数領域にわたって周波数特性を考慮して構成しており、ここで検討の対象とした、内部異常電圧の周波数範囲に対して十分に精度高く解析できる。

本解析における架空線の正相インダクタンスは、1.96mH/km(500Hz値)、対地静電容量は5,980pF/km、また、本線ケーブルおよび中性線ケーブルの対地全静電容量は各々18.6 μ Fおよび15.7 μ Fである。

本装置は上記の直流線路模擬部のほかに3相ブリッジよりなる交直変換器モデルを有し、これに通常直流送電で採用される定電流制御装置および定余裕角制御装置を有しているので、直流系統に発生する過渡現象

第1図 解析対象モデル系統

Fig. 1. Model system configuration analyzed.

Suppression of Abnormal Overvoltages on an HVDC Transmission System. By Saburo Sasaki, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry).
佐々木三郎: 正員, 電力中央研究所電力技術研究所系統絶縁部

に対する変換器制御系の応答をも含めて解析できる。本装置の各バルブアームは、その順電圧降下を極力減らすため選定したサイリスタ素子 1 個にて構成されているが、バルブ分圧回路や陽極リアクトルは実規模バルブにおいて多数個直列接続されているものを等価回路化して設置し、直流～サージ領域におけるバルブのインピーダンス特性を模擬している。

本実験において、変換器の制御方式は順変換器側が定電流制御、逆変換器側が定余角角制御とした。直流線路の両変換所端には各々直流フィルタおよびサージキャパシタを設置した。

3. 解析した事故の種類

本報告では、ケーブルを含む系統において波高値の大きい異常電圧や逆極性異常電圧を発生させる事故として、次の 3 種類の事故時における異常電圧の様相を解析したが、まず本章において、各事故について、それがどのような原因によってどのような現象となるものかを説明する。

〈3.1〉 逆変換器側開放時における順変換器の全電圧起動 直流線路の逆変換器側が断線、断路器の開路あるいはバルブの不点弧により開路状態となっている場合に、順変換器側においてこの状態を検知できずに誤って起動すると直流過電圧が発生する。特に、まれではあるが順変換器側が全電圧で起動（以下、全電圧起動という）を行なった場合には、非常に大きな直流異常電圧が発生する。誤起動が発生すれば、その後直ちに保護操作が動作するものと考えられるが、全電圧起動の場合、起動後 10～20 ms で過電圧は波高値に達するので、誤起動を検出後に直ちにバルブにブロック指令を与えたとしても過電圧の発生を抑えること

はできないと考えられる。

〈3.2〉 逆変換器ブロック事故 逆変換器の補機電源が運転中に停電したり、逆変換器を停止させる際にバイパスペアバルブが不点弧をすると、第 2 図に示すように逆変換器側において最後に通流していたバルブがターンオフできないために電流を流し続けることがあり、直流線路に交流電圧成分が侵入すると線路と共振し大きな交流異常電圧が直流線路に発生することがある。ここで、この事故を逆変換器ブロック事故と呼ぶが、この事故と同一の現象は逆変換器の交流側電圧の低下あるいは波形ひずみにより、逆変換器の全ブリッジの上下 2 アームのバルブが同時に持続性の転流失敗を発生した場合にも生ずると考えられる。

〈3.3〉 直流架空線部の地絡事故 直流送電線として架空線のための系統の場合には、周知のように架空線の地絡により健全極側に誘導で発生する異常電圧が問題となり、これに関しては報告例がみられるが、事故極に発生する異常電圧は通常問題にはならないと考えられる。しかし本解析で対象とするような架空線とケーブルの混用系統の場合には、架空線部の地絡により直流ケーブルの絶縁にとって問題となる逆極性異常電圧が事故極ケーブルに発生するため、これについて解析することが必要と考えられる。一方、ケーブルを含む場合も健全極に過電圧が発生するが、その値は本線架空線部で 1.6 pu、本線ケーブル部で 1.2 pu であり⁽⁷⁾、絶縁にとってはそれほど大きな異常電圧ではない。それゆえ、本報告では事故極の本線ケーブルに発生する逆極性異常電圧および中性線ケーブルに発生する異常電圧について解析する。

4. 異常電圧の様相

本章では、第 3 章で述べた事故時に本線ケーブルおよび中性線ケーブルに発生する異常電圧の様相について解析する。異常電圧倍数の基準 1 pu は順変換器出力端における直流定格電圧である。すなわち、1 pu は 250 kV に相当する。

〈4.1〉 逆変換器側開放時における順変換器の全電圧起動 この事故により大きな過電圧が発生するのはこの場合の回路状態が $R-L-C$ 直列回路に直流電圧 E を印加するのと等価であり、かつ直流系統は直流リアクトルのために L が大きく、また R が小さいために振動条件 $R^2 - 4L/C < 0$ を満足するためであると考えられる。この場合、 C に加わる電圧（すなわちケーブルに加わる電圧に相当する）の波高値は過渡現象論より明らかなように、ほぼ $2E$ となる。一方、直流系統の場合、実際にはサイリスタ変換器が含まれてい

第 2 図 逆変換器ブロック事故

Fig. 2. Inverter-block fault.

ために電流は逆方向には流れないため、零を過ぎたところで切れ、かつ電圧の位相が電流に比べほぼ 90° 遅れのため電圧は波高値で維持され、電荷は回路の漏れ抵抗によって徐々に放電されることになる。また、実際には印加電圧が変換器の出力電圧なので、この場合、回路が無負荷のため変換器の定電流制御系の動作により最小制御角 (5° 程度) に相当した電圧となる。

一方、直流定格電圧は制御角が 20° 程度で、かつ定格直流電流に対する変換器用変圧器のリアクタンスや抵抗分による電圧降下を差引いた値にとられるため、これらのファクタおよび過渡振動分を考慮すれば全電圧起動により発生する異常電圧の直流定格電圧に対する比は 2 pu 以上となり、最大 2.2 pu 程度となる。

モデル系統の場合は導体帰路方式のため、本線に発生する異常電圧の大きさは中性点サージキャパシタ値により異なり $2.1 \sim 2.2\text{ pu}$ となる。第11図に電圧波形例としてケーブル A 変換所端における対地電圧オシログラムを示す。一方、中性線ケーブルには最大 0.35 pu 、健全極 (事故の発生しないほうの極、この場合一極) には最大 0.2 pu が発生するだけである。全電圧起動により事故極側本線に逆極性異常電圧は発生しないが、この事故が起ると線路全体が $2.1 \sim 2.2\text{ pu}$ に充電されるため、がいしの直流汚損などにより架空線の地絡の発生する確率が大きくなって、〈3.3〉節に示したように逆極性異常電圧が発生したり、また直流避雷器の動作責務が厳しくなるなどの問題があり、異常電圧を抑制する意味は大きいと考えられる。

逆変換器側開放時でも、時定数 $200 \sim 300\text{ ms}$ 程度で電圧を上上げる通常のソフトスタートで起動した場合は、過渡電圧は発生せずに交流電圧の波高値で線路が充電される、いわゆるピーク整流電圧となり $1.4 \sim 1.5\text{ pu}$ である。全電圧起動により発生する異常電圧も時間と共に漏れ抵抗により、このピーク整流電圧に落ち着くことになるので、避雷器の動作責務に全電圧起動時異常電圧を考慮する場合、このピーク整流電圧を避雷器定格電圧に選ぶ必要がある。

〈4.2〉逆変換器ブロック事故 モデル系統のように系統構成が複雑な場合、異常電圧の様相は中性線の接地点、直流リアクトル値、中性点サージキャパシタ値によって異なるので、ここではそれらをパラメータとする。また、逆変換器ブロック事故が発生した場合、事故前の直流電流の大きさにより直流電流が切れずに流れ続ける場合と切れる場合とがあり様相が異なるが、まず切れない場合について解析する。

第3図は、中性線の接地点および中性点サージキャパシタ C_N をパラメータとして、本線ケーブル異常電

第3図 本線ケーブル異常電圧と直流リアクトル値の関係

Fig. 3. Relation between main line cable overvoltages and DC reactor inductance.

圧と直流リアクトル値の関係を示したものである。逆変換器ブロック事故が発生すると、事故前の直流電圧と同極性の異常電圧と逆極性の異常電圧が発生するので、同図にはその両方を示してある。直流リアクトルが 1 H の場合、本線ケーブルには波高値 $1.6 \sim 2.15\text{ pu}$ 、正負の振幅では $2.1 \sim 3.45\text{ pu}$ なる異常電圧が発生する。しかし、直流リアクトル値が大きくなれば異常電圧は小さくなり、例えば 1.5 H の場合には波高値で $1.5 \sim 1.8\text{ pu}$ 、振幅で $1.85 \sim 2.5\text{ pu}$ 、 2 H の場合には波高値で $1.3 \sim 1.5\text{ pu}$ 、振幅で $1.5 \sim 1.9\text{ pu}$ というように異常電圧は抑制される。この理由は直流リアクトルや変換器用変圧器のインダクタンスと、主として本線ケーブルの静電容量によって決まる系統の共振周波数が交流系統の周波数からずれてくるからである。

第1表に B 変換所中性点接地、A 変換所中性点に $5\mu\text{F}$ の C_N を設置した場合の異常電圧値および共振周波数と直流リアクトル値の関係を示す。

第1表 直流リアクトル値と逆変換器ブロック事故時異常電圧および共振周波数の関係

Table 1. Relation between DC reactor and overvoltages by inverter-block fault and natural frequency.

直流リアクトル (H)	1.0	1.5	2.0
異常電圧倍数 (pu)	+1.9 -1.4	+1.7 -0.9	+1.4 -0.4
共振周波数 f (Hz)	34	28	25

$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{DC} + L_T)C}}$, L_{DC} : 直流リアクトルのインダクタンス (H), L_T : 変換器用変圧器の漏れインダクタンス (H), ここで, $L_T = 0.2\text{ H}$, C : 本線ケーブルの静電容量 (F)

第4図は中性線の接地点および直流リアクトル値をパラメータとして、本線ケーブル異常電圧および中性線ケーブル異常電圧と中性点サージキャパシタ C_N との関係を示したものである。本線ケーブル異常電圧は B 変換所中性点が接地の場合には C_N による影響は少ないが、 A 変換所中性点が接地の場合には影響が大きく、 C_N が $35\mu\text{F}$ のときに最小となるが、 C_N が更に大きな値の場合、過電圧値は非常に大きくなり、例えば直流リアクトルが 1H 、 C_N が $120\mu\text{F}$ の場合には 2.2pu となる。

中性線ケーブル異常電圧は、 A 変換所中性点が接地されている場合に大きな値となるが、その値は C_N により大きく変化し、 $35\mu\text{F}$ のときに最大となる。この理由は、 $C_N=35\mu\text{F}$ の場合に中性線ケーブル異常電圧に影響を与える共振周波数成分の一つに 50Hz に近いものが存在するからである。中性線ケーブル異常電圧も本線ケーブルと同様、直流リアクトル値が大きくなるに従って小さくなり、例えば中性点サージキャパシタが $35\mu\text{F}$ の場合、直流リアクトルが 1H の場合に 0.95pu のものが、 1.5H の場合 0.85pu に、 2H の場合には 0.65pu に減少する。一方、 B 変換所中性点が接地の場合には中性線ケーブル異常電圧は小さく 0.25pu 以下である。第5図に、本線ケーブルおよび中性線ケーブルに発生する異常電圧の波形例を示す。

次に、逆変換器ブロック事故発生後、直流電流が切れる場合の様相を解析する。直流電流が切れるのは、事故により発生する交流電流と直流電流の重畳電流が零をよぎるためである。そのため、事故前の直流電流が小さかったり、事故により発生する交流電流が大き

い場合に起る可能性がある。逆変換器ブロック事故時に直流電流が切れると、逆変換器側が開放となる一方順変換器側は運転状態のため逆変換器側開放時の全電圧起動と同様の現象が発生し、切れた後に直流線路は非常に大きな直流電圧により充電される。第5図(c)は A 変換所中性点が接地、 B 変換所中性点に $85\mu\text{F}$ の C_N を設置、直流リアクトルが 1H の場合の本線ケーブル電圧波形であるが、4回目の振動で電流が切れ 2.9pu という大きな直流異常電圧が発生している。

以上解析したように、逆変換器ブロック事故の異常電圧は特に直流ケーブルなどに非常に厳しいストレスを与えるので、その抑制対策を考慮する必要がある。

〈4・3〉 直流架空線部の地絡事故 第6図は、本線ケーブルの両端に発生する逆極性異常電圧の波高値

第5図 逆変換器ブロック事故時異常電圧波形例

Fig. 5. Abnormal overvoltage waveforms caused by inverter-block fault.

第4図 本線ケーブルおよび中性線ケーブル異常電圧と中性点サージキャパシタの関係
Fig. 4. Relation between abnormal over-voltages and neutral point surge capacitor.

第6図 地絡点とケーブル部逆極性異常電圧との関係

Fig. 6. Relation between distance of fault point from A station and reverse polarity voltages.

ると地絡点の関係を示したものであるが、A変換所側ケーブルヘッドより30kmの地点で地絡した場合に最大値0.7puが発生している。同図で括弧の中に示した数値は、その地点で地絡した場合に発生する異常電圧の周波数であるが、ケーブルを含む場合、ケーブルヘッド地絡時の1kHzを除いては異常電圧の周波数は80~250Hzと比較的低いことがわかる。この周波数は地絡点からケーブルヘッドまでの線路のインダクタンスとケーブルの静電容量から決まる周波数にほぼ一致する。一方、中性線ケーブルには最大0.65puの電圧が発生するが、 C_N が大きくなれば低くなる。

上記のように、送電線地絡時に直流ケーブルに発生する電圧はそれほど大きくないが、この事故が全電圧起動や逆変換ブロック事故と重なった場合には、例えば同極性異常電圧が2.2puの場合、1.5pu程度の逆極性異常電圧が発生し、振幅では3.7puとなるのでケーブル絶縁にとって非常に厳しいものとなり、何らかの抑制対策が必要となる。

5. 異常電圧抑制対策とその効果

前章で架空線とケーブルからなる導体帰路方式直流システムにおいて発生する異常電圧の様相を明らかにしたとその結果、直流ケーブルの絶縁にとって過剰な異常電圧が存在するので、何らかの抑制対策の必要であることを示した。抑制のための一つの方法として変換器の制御に頼る方法⁽⁵⁾も考えられる。本報告では異常電圧要因が発生した場合でも、大きな異常電圧を発生させないための対策として主回路構成による抑制対策について検討を行なった。この方法によれば、事故の種類が異なってもよく似た様相の異常電圧を発生させる事故すべてに効果があると考えられる。

直流ケーブルにとって厳しい異常電圧の様相は、単極系統の場合も双極系統の場合も同様なので、抑制対策の検討にあたっては単極系統を対象とした。系統条件はB変換所中性点接地、A変換所中性点に5 μ Fの中性点サージキャパシタ設置、直流リアクトルは、1Hの場合を基本とした。その他の条件の場合も同様に抑制対策は有効である。

前章で直流ケーブルに発生する異常電圧は、直流リアクトルや中性点サージキャパシタの値により影響されることを示した。そしてそれらの値を適当に選定すれば異常電圧はある程度抑制できることを示した。しかしながら、それらの値は過電圧抑制の観点からのみでは選ぶことはできない。それゆえ、本報告では主回路に抑制装置を設置する下記の二つの方式を提案し、その抑制効果を検討する。

第7図 異常電圧抑制用ダイオード(RBD)の設置

Fig. 7. Installation of reverse biased diode (RBD) for overvoltage suppression.

第8図 異常電圧抑制用ダンピング回路の設置

Fig. 8. Installation of DC damping circuits.

(1) 逆極性異常電圧を抑制するために第7図に示すように、両変換所端における直流送電線の本線と中性線間に定常運転時においては逆バイアスとなる方向にダイオード (Reverse Biased Diode: RBD) を設置する方法⁽¹⁰⁾。

(2) 両変換所端における直流送電線の本線と中性線間に、第8図に示すような構成のダンピング回路を設置する方法。

〈5・1〉 逆バイアス接続ダイオードによる異常電圧抑制 逆バイアス接続ダイオードによる抑制対策は当然のことながら逆極性成分を発生させる事故、すなわち逆変換ブロック事故や送電線地絡事故に対して有効であり、全電圧起動のような同極性異常電圧に対しては効果がない。しかしながら、全電圧起動時でも地絡事故が重なった場合には効果がある。また、アバランシェ・ダイオードの高耐電圧、大容量のものの製作が可能であれば、降伏電圧を所要のレベルに選択したダイオードにより同極性異常電圧の抑制も可能であると考えられる。

第2表は、逆変換ブロック事故、送電線地絡事故および全電圧起動後送電線地絡事故時に本線ケーブル、中性線ケーブルに発生する異常電圧について、逆バイアス接続ダイオードを設置した場合の抑制効果を設置しない場合と比較して示し、また事故時に逆バイアス接続ダイオードに流れる電流の最大値を示したものである。ここで、電流の基準1puは系統の直流定

第2表 逆バイアス接続ダイオードによる
異常電圧抑制効果およびダイオード電流

Table 2. Overvoltages with and without
RBD and RBD currents. (pu)

事故種類 ダイオード(RBD) 場所	逆変換器ブ ロック事故		送電線地絡		全電圧起動後 送電線地絡	
	なし	あり	なし	あり	なし	あり
本線ケーブル 異常電圧	+1.9 -1.4	+1.25 -0.35	+1.0 -0.55	+1.0 -0.4	+2.1 -1.2	+2.1 -0.8
中性線ケーブル 異常電圧	+0.2 -0.3	+0.1 -0.2	+0.1 -0.3	+0.1 -0.3	+0.2 -0.6	+0.2 -0.6
ダイオード 電	—	1.7	—	0.9	—	1.9

(a) ダイオードなし (b) ダイオードあり

第9図 逆変換器ブロック事故時本線
ケーブル異常電圧の逆バイアス
接続ダイオードによる抑制

Fig. 9. Overvoltage waveforms caused
by inverter-block fault with and without
RBD.

格電流である。すなわち 1pu は 1,200 A に相当する。

第2表より、逆変換器ブロック事故時における本線の異常電圧は、ダイオードの通流により逆極性が大きく抑制されているばかりでなく、同極性分も抑制されていることがわかる。第9図は逆変換器ブロック事故時における本線ケーブル異常電圧の抑制波形を示したものであるが、ダイオードを設置した場合、同極性異常電圧が 1.25pu、逆極性異常電圧が 0.35pu、振幅で 1.6pu というように波高値では約 35%、振幅では約 50% も抑制されており、その効果の大きいことがわかる。このように同極性異常電圧も抑制される理由は、逆極性異常電圧の発生ごとに導通するダイオードにより本線と中性線間が短絡されるため、振動回路条件が変化、すなわち本線と中性線間に存在する静電容量を短絡することになり、その後の振動が抑制されるため正極性分も抑制されるものと考えられる。このダイオードが設置されていれば、電流の断も発生しないので、前章に示したような波高値の非常に大きな直流異常電圧の発生も抑制される。事故時にダイオードに流れる電流の最大値は 1.7pu である。

次に、送電線地絡時に発生する逆極性異常電圧の抑制効果をみるために、A 変換所端で地絡した場合について、逆バイアス接続ダイオードを設置した場合と設

置しない場合を比較したが、第2表に示すように、不設置の場合の 0.55pu が設置した場合 0.4pu と約 30% 抑制されている。ダイオード電流の最大値は 0.9pu である。また、全電圧起動により 2.1pu なる異常電圧が発生後に地絡した場合、逆極性異常電圧は 1.2pu が 0.8pu に抑制され、ダイオードには 1.9pu の電流が流れる。

送電線地絡の場合の抑制効果が逆変換器ブロック事故時より小さい理由は、送電線地絡の場合、

(1) 逆極性異常電圧の最大値が第1波で発生するため、その後の振動を抑制しても効果が現われない。

(2) 異常電圧の周波数が比較的高いため、変換所端からケーブルまでの線路のインピーダンス ($R + j\omega L$) が大きく、これに伴い電位も大きくなり、変換所端の逆極性電圧が零に抑制されてもケーブル部では電位が大きくなる。

逆バイアス接続ダイオードをケーブルヘッドに設置すれば、ケーブルに発生する逆極性異常電圧を更に大きく抑制することが可能である。

逆バイアス接続ダイオードの所要電流定格は、逆変換器ブロック事故時の電流最大値 1.7pu および全電圧起動と送電線地絡が重なった場合の電流最大値 1.9pu に耐える必要がある。ダイオードに流れる電流は連続ではなく半波だけなので2倍の裕度をみるとすると、その電流定格は系統電流の4倍弱になるので、変換器用サイリスタバルブと同程度あるいはそれ以下の電流定格でよいと考えられる。

異常電圧抑制用ダイオードは定常運転時には系統電圧に対して逆バイアスとなるように接続されるが、電力の急速潮流反転時には通常、潮流反転は電圧の極性を反転させることにより行なわれるため、ダイオードの接続方向も切替えることが必要である。潮流反転は指令により行なわれ、また指令後 200~500ms と比較的長い時間を要して反転されるため、ダイオードの接続変更も潮流反転信号により切替スイッチを動作させて自動的に行なわせることができる。切替スイッチとしては、その所要動作時間からみてしゃ断器や高速度断路器を用いることができると考えられる。

〈5・2〉 ダンピング回路による異常電圧抑制 ダンピング回路の構成としては種々のものが考えられるが、具体的なモデル系統を対象にしてダンピング回路による抑制効果について検討された例は少ない。特にケーブル系統を対象にしたものは見られない。そこでケーブル系統におけるダンピング回路の最適な構成、最適な定数について定量的に検討するため、大きな異常電圧を発生させる事故、すなわち全電圧起動および

逆変換器ブロック事故を対象にその抑制効果を検討した。ダンピング回路の構成は第8図に示したように、(a)図はコンデンサ、リアクトル、抵抗の直列接続(CLR形)、(b)図はコンデンサ、抵抗の直列接続(CR形)の二種類である。

第10図はCR形ダンピング回路を設置した場合の抑制効果を、ダンピング回路のコンデンサ C_D をパラメータとして示したものであるが、 C_D が大きいほど抑制効果大きい。同図より、全電圧起動時の異常電圧2.1puは、 $C_D=10\mu\text{F}$ のときに1.7pu、 $C_D=20\mu\text{F}$ のときに1.5pu(いずれも $R_D=500\Omega$ のとき)に抑制され、逆変換器ブロック事故時異常電圧+1.9pu, -1.4puは $C_D=10\mu\text{F}$ のときに+1.1pu, -0.4pu、 $C_D=20\mu\text{F}$ のときに+1.05pu, -0.15pu(いずれも $R_D=50\Omega$ のとき)と抑制されている。

第11図は本線ケーブルA変換所端における全電圧起動時の対地異常電圧抑制波形例を示したものであり、また第12図は逆変換器ブロック事故時の異常電圧抑制波形例を示したものである。両図より、ダンピ

第10図 CR形ダンピング回路による異常電圧の抑制

Fig. 10. Relation between overvoltages and damping capacitor of CR-type damping circuits.

第11図 全電圧起動時異常電圧のCR形ダンピング回路による抑制波形例

Fig. 11. Overvoltage waveforms suppressed by CR-type damping circuits in case of full deblocking.

第12図 逆変換器ブロック事故時異常電圧のCR形ダンピング回路による抑制波形例

Fig. 12. Overvoltage waveforms suppressed by CR-type damping circuits in case of inverter-block fault.

第13図 ダンピング回路用抵抗と異常電圧の関係

Fig. 13. Relation between overvoltages and damping resistor of CR-type damping circuits.

ング回路は両方の事故に対し大きな抑制効果を持っていることがわかる。

第13図は、ダンピング回路の抵抗 R_D の影響をみるために R_D をパラメータにとって異常電圧抑制効果をみたものである。同図より、CLR形に対してもCR形に対しても最適な抵抗値は事故の種類やダンピング回路のコンデンサ値により異なり、例えば全電圧起動に対しては $C_D=20\mu\text{F}$ のときは $R_D=500\Omega$ 、 $C_D=10\mu\text{F}$ のときは $R_D=1\text{k}\Omega$ が最適値であり、逆変換器ブロック事故に対しては $50\sim 500\Omega$ が最適値である。

次に、CLR形ダンピング回路とCR形ダンピング回路の抑制効果を比較すると、全電圧起動時、逆変換器ブロック事故時とも、CLR形のほうがCR形よりもわずかに抑制効果大きい。CLR形の場合、リアクトルを設置する必要があるため、ダンピング回路の各要素の絶縁協調や経済性を考慮すればモデル系統の

ようなケーブル系統に対して、CR 形のほうが推奨される。

以上より、モデル系統におけるダンピング回路による異常電圧抑制効果について最適な構成および定数値をまとめると、 $C_D=5\sim 20\mu\text{F}$ 、 $R_D=500\Omega$ なる CR 形ダンピング回路を選定すれば、全電圧起動に対しても逆変換器ブロック事故に対しても効果がある。

6. 結 論

導体帰路方式の架空線—ケーブル直流系統に発生する代表的な内部異常電圧の様相を明らかにすると共に提案した抑制装置による抑制対策の有効性を示した。

モデル系統を対象にした解析により得られた主な結果は下記のとおりである。

(1) 解析系統において逆変換器側開放時の全電圧起動により 2.1 pu、逆変換器ブロック事故により 1.9 pu なる異常電圧が本線ケーブルに発生することがある。

(2) 逆変換器ブロック事故時には最大 0.95 pu、送電線地絡時には 0.65 pu なる異常電圧が中性線ケーブルに発生することがある。

(3) 逆変換器ブロック事故時に、同極性分が 1.9 pu、逆極性分が 1.4 pu というように振幅で 3.3 pu の異常電圧が、また、送電線地絡時には逆極性分が 0.7 pu なる異常電圧が本線ケーブルに発生することがある。

(4) 直流リアクトルの値を適当に選定すれば、逆変換器ブロック事故時に本線および中性線に発生する異常電圧を抑制できる。

(5) 本線と中性線間に逆バイアス接続ダイオード (RBD) を設置すれば、本線ケーブルに発生する振動性異常電圧を抑制できる。

(6) 異常電圧抑制用ダンピング回路の最適な構成および最適な定数値を示した。5~20 μF のコンデン

サと 500 Ω の抵抗の直列接続からなる CR 形ダンピング回路の本線と中性線間への設置が有効である。

この報告で示した抑制方式を適用する場合には、下記の事項を考慮し、技術的、経済的な問題を総合的に検討して最適な方式を決める必要がある。

(1) 外部異常電圧のように過電圧をあるレベル以下に低減できない異常電圧と抑制レベルの協調。

(2) 他の保護対策や抑制対策との比較ならびに協調。

終りに、この解析を行なうにあたり、終始温かいご援助と有益なご助言を頂きました、電力中央研究所電力技術研究所 有働所長、尾崎部長、町田次長、高梨室長に深く感謝致しますと共に、実験にあたって多大のご援助を頂きました電力中央研究所 尾野孝夫氏、松原広治氏に厚くお礼申し上げます。

(昭和 52 年 8 月 27 日受付、同 52 年 12 月 12 日再受付)

文 献

- (1) T. Takenouchi, et al.: Hokkaido-Honshu HVDC Link. CIGRE SC 14 (1977)
- (2) E. Uhlmann & G. Flisberg: "HVDC: Insulation Coordination Part 1: Generation of overvoltages", *Direct Current* 2, 1, 8 (1971)
- (3) J. D. Ainsworth, et al.: "Overvoltages appearing on HVDC cables due to converter operation", *ibid.* 1, 2, 83 (1969)
- (4) N. G. Hingorani: "Monopolar metallic return operation of long distance HVDC transmission systems", *IEEE T* 73 430-6 (1973)
- (5) Å. Ekström & E. Borg: "DC line overvoltages in connection with injection of alternating voltages into the line", CIGRE WG 33-05 (1977)
- (6) 佐々木: 「導体帰路直流系統における変換所内事故時の直流線路異常電圧」電中研報 73060 (昭 48-12)
- (7) 尾野, 他: 「導体帰路直流系統の線路地絡時の異常電圧」同上 73091 (昭 49-6)
- (8) 佐々木: 「直流系統に発生する異常電圧の抑制方式」同上 175039 (昭 51-4)
- (9) 町田: 「直流送電系の制御・保護方式の開発と安定度向上対策に関する研究」同上 65064 (昭 40-11)
- (10) 特許出願 No. 51-006625 (昭 51-1)