UDC 621.315.051.024: 621.316.933

論文

49-B 26

直流系統用試作避雷器の動作責務と適用

電力中央研究所 高 梨 貢

1. ま え が き

直流送電系統のサイリスタ変換装置、直流ケーブルなどの絶縁は主として系統に発生する雷撃や異常電圧によって決められ、主要設備の絶縁レベルの選択は直流送電の建設費低減に大きなウェイトを占めている。設備の絶縁レベルを低減するには、制御方式の改善などとともに、直流避雷器によって雷撃や異常電圧のような過電圧を吸収し、過電圧を所要値以下に抑えることが課題となる。

しかしながら、直流送電系統は交流と異なり、電圧、電流に零点がなく、一定値であり、電圧に高調波を含むこと、ならびに送電こう長が長いことなどのために、直流避雷器にはきわめて苛酷な責務が要求されるので、わが国ではまだ、直流高電圧避雷器は開発の域に達していない。

そこで、直流回路の特殊性を考慮した直流避雷器の直流動作責務特性と保護特性に関し実験研究を行ない格段に続流しゃ断性能を向上しうる避雷器直列ギャップを試作した。本試料を用い実験設備のつごう上、相似率を考慮した 10kV 程度の分割単位避雷器の直流動作責務実験を行なった結果、雷撃及びケーブルを有する直流送電系統に発生する異常電圧を吸収して、続流をしゃ断し、避雷器に要求される所定の苛酷な責務に耐えうることを実証するとともに、その仕様ならびに適用について検討を加えた。これらの結果により、実系統用高電圧直流避雷器の開発が促進され、適用方法が確立されることによって、直流送電設備の経済設計、信頼度向上に役だつものと期待される。

2. 等価直流電源回路の検討

直流電源として実際規模の設備がないため、インダクタンス L とコンデンサ C とを組合せた低域ろ波回路を用いた。このような回路を用いた場合、回路定数のとり方によって動作責務特性に影響を及ぼすので以下の実験条件について検討を行なった。

(i) 電源回路として第 1 表に示すような回路定数値をもつ、 T 形、 π 形及び L 形回路を対象とした。

(ii) 直流試験電圧は 4kV 一定で、始動インパルスエネルギーはきわめて小さな値とした。

(iii) 既存の交流系統用の定格電圧 6kV 限流形避雷器（放電開始電圧 20.2kV: 1ms 付近の平均値）を供試した。ただし、続流を変化させるため、特性要素は複数個を直、並列に接続変更している。

(iv) ろ波回路の方形波電流の継続時間は、続流継

第 1 表 ろ波回路の回路定数値

Table 1. Parameters of filter circuits.

回路 定数	L_0 (mH)	L (mH)	C_0 (μ F)	C (μ F)	$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (Ω)
	初段のインダクタンス	2 段目以降のインダクタンス	初段のキャパシタンス	2 段目以降のキャパシタンス	サージインピーダンス
T	T-1	0.5	1	100	3.16
	T-2	1	2	200	3.16
	T-3	2	4	400	3.16
	T-4	3	6	600	3.16
π	π -1	1	2	100	3.16
	π -2	1	4	200	3.16
	π -3	1	6	300	3.16
L	1	—	2,300	—	0.66

On Operation Duty and Application of Trial Surge Diverters for HVDC Systems. By M. TAKANASHI, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry).

高梨 貢: 正員, 電力中央研究所, 技術第一研究所電力第一部 電力遮断研究室

第 1 図 続流限時時の最大端子電圧と続流の関係

Fig. 1. Relation between maximum terminal voltage at current limiting and follow current.

E_s : 試験電圧, C : 大容量コンデンサ, L_0 : 初段インダクタンス
 e_a : 限流ギャップの電圧, Ki^n : 特性要素の電圧降下 (k, n : 定数),
 i : 続流

第 2 図 避雷器動作時の等価回路

Fig. 2. Equivalent circuit at surge diverter operation.

続時間の 3 倍以上とした。

〈2・1〉 続流限時時の避雷器端子電圧 第 1 図は T 形回路定数値を変化した場合の続流限時時の最大避雷器端子電圧倍率を示すが、その最高値は $T-4$ 形回路で続流約 450 A にて直流試験電圧の 2.2 倍にも達している。避雷器の端子電圧の変化を第 2 図の単純な回路で考察するに、

$$E_s = e_a + Ki^n + L_0 di/dt \dots\dots\dots (1)$$

続流を限流しつつあるときは、 i は時間 t とともに急速に減少するので、 $di/dt < 0$ であるから、

$$E_s = e_a + Ki^n - L_0 |di/dt| \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで L_0 が無い場合の避雷器端子電圧 ($e_a + Ki^n$ は試験電圧 E_s をこえないが、 L_0 が存在すると (2) 式から E_s より上昇する。

(1), (2) 式の関係は第 3 図に示す初段のインダクタンス L_0 に加わる電圧オシログラムからもわかるとおり、続流が増加する過程では試験電圧降下となり、減少する過程では避雷器端子電圧を試験電圧以上に上

第 3 図 続流しゃ断時の代表的オシログラム

Fig. 3. Typical oscillogram at follow current interrupting.

実験条件: 直流試験電圧 4 kV—定特性要素変化 (直・並列)
 供試器: 既存の交流 6 kV 限流形 (放電開始電圧…20.2 kV/ms 付近の値)

第 4 図 $L_0 |di/dt| (\Delta E)$ と続流の関係

Fig. 4. Relation between $L_0 |di/dt| (\Delta E)$ and follow current.

昇させることとなる。続流が減少する過程の最大変化率 $|di/dt|$ をオシログラム上から求め (第 3 図参照) L_0 との積 $L_0 |di/dt|$ と続流との関係を示すと第 4 図の実線となる。一方、オシログラムより最大避雷器端子電圧 E_{max} と試験電圧 E_s との差 ΔE を求めると第 4 図の点線となり、各条件についての両者は比較的よく一致し、 L_0 または続流が大きくなるほど続流しゃ断における避雷器端子電圧 (ΔE) は上昇する。以上は単純な回路にて考察したが、 $L_0 |di/dt|$ の値は特性要素、アーク電圧など避雷器固有の特性と回路条件の相互作用によって定められるが、実際問題としてこのような L_0 が存在する回路に限流避雷器を適用する場合には、限流時の制限電圧上昇に十分留意する必要がある。また、 L_0 を考慮しなくてもよい直流電源回路では、インパルス阻止用の L_0 をきわめて小さくする必要はある。たとえば 0.5 mH 程度 (今回の供試器では続流 500 A で ΔE は試験電圧の約 20 % の上昇

第 5 図 続流と初段のサージインピーダンスの関係

Fig. 5. Relation between follow current and surge-impedance of first step.

が考えられる。(第 1 図 T-1 曲線)

〈2・2〉 続流値 供試避雷器及び試験電圧 (4kV) を変えずに、初段のサージインピーダンス $Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$ を変化した場合 (π 形回路とした) 続流は第 5 図に示すとおり変化する。実験では Z_0 を 0.65~3.2 Ω に変えたが、続流が比較的小さい範囲 (200 A 以下) では Z_0 の影響は明らかでないが、500~600 A となると、 Z_0 が大きくなるに従って Z_0 による電圧降下が大きくなるため、続流が減少する傾向となる。しかし、 $Z_0 = 1.8 \Omega$ 以下では続流値はほぼ一定値となっている。なお、前掲の第 3 図は $Z_0 = 2.24 \Omega$ (第 1 表 T-2 の回路) のケースであり、続流しゃ断後の端子電圧が低下している一例を示す。したがって、この供試器では、 Z_0 を 1.8 Ω 以下とすれば、試験回路の電圧降下はほとんどなく、大容量の直流電源回路に適用した場合の検証も十分できるものと思われる。

〈2・3〉 続流継続時間 $L = 1 \text{ mH}$, $C = 2,300 \mu\text{F}$ の L 回路 ($Z = 0.66 \Omega$) の等価直流電源回路を用い、放電開始電圧の異なる 2 種の既存の交流系統用 6 kV 限流形避雷器を供試し、直流試験電圧を 5~15 kV に変化し動作責務実験を行ない、続流継続時間について第 6 図の結果を得た。継続時間は続流が比較的小さいとギャップによる限流効果が少く、また続流が大きくなると続流しゃ断までに時間を要するためいずれも継続時間は長くなる傾向となり、限流形避雷器特有の特性を示している。続流しゃ断に成功した続流継続時間

実験条件: 直流試験電圧を 5~15 kV に変化
供試器: 既存の交流 6 kV 限流形, 2 種

第 6 図 動作責務実験より得られた続流継続時間

Fig. 6. Follow current duration times obtained by operation duty test.

はすべて 3 ms 以下となっていることから、これらの供試器を対象とした場合の直流電源の継続時間 (方形波) は 3 ms 以上あればよいこととなる。したがってこれ以上の電源コンデンサは、たとえば開閉サージ動作責務実験用の線路用コンデンサとして充当することができよう。

上記の考察から限流形避雷器を対象とした電源の波回路定数として、 $L_0 = 0.5 \text{ mH}$, $Z_0 = 1.8 \Omega$ 以下とすると $C_0 = 150 \mu\text{F}$ 以上となる。また、直流電源の継続時間 T を 3 ms とすると

$$T = 2(n-1)\sqrt{LC} \dots\dots\dots (3)^{(1)}$$

より波回路の段数 n は 5 段を要する。しかし、供試器の限流特性が優れている場合、あるいは開閉サージ動作責務のように大きな続流を流す場合の回路定数に対しては、さらに Z_0 , L_0 値を小さく C_0 , n 値を大きくする必要がある。

3. 試作直流避雷器の動作責務特性

直流避雷器の消弧原理は交流避雷器とは基本的に異なる。すなわち、交流用避雷器の続流しゃ断は、一般的には電圧、電流の自然零値で行なわれるのに比べ、直流避雷器はギャップ中を流れるアーク電流を磁束によって引伸し、冷却させることによりアーク抵抗を高め、強制的に電流零値を確立させる限流方式が採用される。

〈3・1〉 試作直流避雷器 一般に続流しゃ断性能は直列ギャップ個数に比例するので、しゃ断性能を示す数値としての、放電開始電圧/動作責務限界電圧の

第 7 図 試作直流ギャップの説明図

Fig. 7. Illustration diagram of trial series gaps.

比を 1 に近づけるためには、避雷器全体の直列ギャップ個数を増し、かつ、各ギャップに並列にそう入するインピーダンスを適切な値に選定し、全体の放電開始電圧を低下させることが有効であることに着目し、第 7 図(a), (b) に示す構成の避雷器ギャップを直流避雷器用として試作した。

分圧インピーダンス（キャパシタ C と抵抗 R を並列接続）を $Z_3 \ll Z_1 \ll Z_2$ の値に選び、 a, b ギャップをおおの v 及び $v/2$ で放電するように整定すると全体の放電開始電圧 $E \approx v$ となる。すなわち、 $E=v$ の電圧が加わると $v/2$ の電圧が b ギャップに加わりまず放電する。すると分圧インピーダンスにより a_4 ギャップにはほぼ v に近い電圧が加わるから a_4 ギャップが放電し、ついで、 a_3, a_2, a_1 ギャップの順序で連続放電し全放電にまで移行する。従来形方式では $Z_1=Z_2$ であり、 Z_3 と b ギャップがないため $E=4v$ となるが、試作ギャップでは、放電開始電圧を従来形（平等分圧方式）の $1/4$ に近い値にまで低下させることができる。直列ギャップ個数 4 個に対し、分圧インピーダンスを調整したところ、1ms 付近の放電開始電圧の実験値は平等分圧方式（ $Z_1=Z_2, Z_3$ と b ギャップなし）の 35%，数 μs にて 37% まで低下した。

試作直流避雷器用として、上記の試作ギャップと直列に接続した特性要素は既存の交流系統用のものを使用した。その DLR 値〔公称放電電流 10kA の制限電圧 (crest)/交流定格電圧 (rms)〕は 2.4~2.5 である。

〈3・2〉 普通動作責務特性 普通動作責務試験では供試避雷器に公称放電電流を流すことが規定されているが、変換所内ではこのような電流が流れる機会がほとんどないこと。また、〈3・3〉節で述べる開閉サージ動作責務試験の場合では、公称放電電流に比べ開閉サージ電流のほうがエネルギーの面で苛酷となるから、続流しゃ断実験として雷電流を省略しても差しつかえないものと考え、特に公称放電電流を考慮しない等価動作責務実験を行なった。

第 8 図は $L=1\text{mH}$, $C=2,300\mu\text{F}$ の L 回路 ($Z=0.66\Omega$) の等価直流電源と小エネルギーのインパルス発生器を組合せ、直流試験電圧を 4.8~11.5kV に変化し、試作直流避雷器 (1ms 付近の平均放電開始電圧: 12.1kV) について普通動作責務特性を求めた結果を示す。本器の放電開始電圧/動作責務限界電圧の比を K とすると、 K は約 1.1 倍であり放電開始電圧に近い直流電圧まで続流しゃ断が可能である。なお参考までに既存の交流系統用限流形避雷器の動作責務限界を故意に求めたところ、最も良い特性のものでも K は 1.8 倍程度であり（交流系統用避雷器では一般に $K=1.3$ 倍程度）、大幅に改良しなくては直流系統に使用できない。

試作直流避雷器のように動作責務性能が向上すると第 8 図の点線に示すように限流時の端子電圧が上昇しその最高値は直流試験電圧の 1.6 倍にも達するが、適用にあたり放電開始電圧/直流試験電圧の比の最小値として 1.37 倍程度が要求されるとすれば、〔第 4 表 (1) 3 欄参照〕限流時の端子電圧は第 8 図より約 1.34 倍となるから絶縁協調上特に問題とはならない。しか

第 8 図 試作避雷器の動作責務特性

Fig. 8. Operation duty characteristic of trial surge diverter.

し、さらに低い保護レベルを採用するような場合には動作責務性能を低下させることにより限流時の端子電圧を低めるなど、性能上の調整が必要となろう。

〈3・3〉 開閉サージ動作責務特性 架空線340km、ケーブル40kmを有する直流送電系統を対象とし、送電線路の残留電圧が直流系統電圧の1.5倍となった苛酷な条件にて系統電圧が投入され開閉サージが発生したとき、平滑リアクトルの両端に設置された避雷器が動作したケースについて実験を行なった。実験条件として線路側に設置される避雷器⑨の直流定格電圧を300kVと想定し、(第3表⑥欄参照)10kVの分割単位避雷器に換算⁽²⁾した回路定数として第2表の値を選び第9図に示す回路で実験を行なった。

(1) 開閉サージ電圧波形と避雷器の動作 平滑リアクトル L より線路側のキャパシタ C_L の残留電圧を E_L 、電源側のキャパシタ C_s の電圧を E_s としスイッチ S 及び3点ギャップ始動後における電源側及び線路側の電圧 v_s, v_L は回路の損失などによる減衰がないものとするば次式となる。

$$v_s = E_s + \frac{(E_L - E_s)C_L}{C_s + C_L}(1 - \cos \omega t) \dots (4)$$

$$v_L = E_L + \frac{(E_L - E_s)C_s}{C_s + C_L}(\cos \omega t - 1) \dots (5)$$

第2表 ケーブルを有する直流送電線路の回路定数値

Table 2. Circuit constant values of DC transmission lines used cables and overhead lines.

回路要素	対象要素	こう長 (km)	単位静電 容量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	総合値	300kV/ 10kV 換算
線路側キャ パシタ	ケーブル	40	0.52	20.8 μF	770 μF
	架空線	340	0.014	4.76 μF	
平滑リアク トル				1H	30mH
電源側キャ パシタ				50 μF	1,500 μF

第9図 開閉サージ動作責務実験回路

Fig. 9. Circuit used to switching surge operation duty test.

$$\text{ただし、}\omega = \sqrt{C_s + C_L / LC_s C_L}$$

ここで、 $E_L = 1.5 E_s$ 、 C_s : 1,500 μF 、 C_L : 770 μF 、 L : 30mH とすると、開閉サージ電圧波形 v_s, v_L は第10図となり、約40Hzの低周波振動が発生する。 v_s, v_L 波形が発生した瞬時に電源側⑧及び線路側避雷器⑨が動作した場合を考察するに、避雷器動作後続流し断までの続流継続時間は〈2・3〉節で述べたよう

第10図 開閉サージ電圧波形例

Fig. 10. Typical waveform of switching surge voltage.

(a) 電源側避雷器

(b) 線路側避雷器

実験条件: 電源側電圧... 6kV、線路側残留電圧... 9kV

対象線路 (ケーブル...40km

架空線...340km

供試器: 既存の交流系統用、6kV限流形

(放電開始電圧...20.2kV)

第11図 直流系統電圧の1.5倍の線路残留電圧に対する避雷器の開閉サージ動作オシログラム例

Fig. 11. Typical oscillogram at surge diverters discharging transmission lines charged 1.5 times of the system voltage.

に 3ms 以下であるから、⑧及び⑨避雷器の続流しゃ断時における端子電圧はおおの E_s 及び $E_L=1.5 E_s$ にはほぼ等しくなる。第 11 図は直流電源側電圧 6 kV、線路の残留電圧を 9kV とし、電源側及び線路側に設置した既存の交流系統用 6kV 限流形避雷器（放電開始電圧 20.2kV, 1ms 付近の平均値）の動作オシログラム例を示す。⑧避雷器の端子電圧は残留電圧の影響をほとんど受けないから普通動作責務とはほぼ同等の責務となるが、⑨避雷器は残留電圧のピークに近い端子電圧で続流をしゃ断することとなり、残留電圧の大きさ分だけ ($E_L - E_s$) その責務は苛酷となる。以上の検討から開閉サージ動作責務が要求される避雷器は線路側に設置される⑨避雷器が対象となるので、以下その動作責務について考察する。

(2) 開閉サージ動作責務特性 放電開始電圧 12.7kV (1ms 付近の平均値) の試作直流避雷器を供試し、線路残留電圧 E_L を直流試験電圧 E_s の 1.5 倍の一定条件にとり、直流試験電圧を 5.5~10kV に変化した場合における開閉サージ動作責務実験を行ない第 12 図に示す結果を得た。その責務は放電開始電圧 (一定) と直流試験電圧の比が小さくなるほど苛酷となるが、この比をとった開閉サージ動作責務性能限界における K_s 値は 1.35 倍程度で、続流のピーク値は 800A にも達している。なお、参考として既存の交流系統用限流形避雷器の開閉サージ動作責務性能限界を故意に求めたところ K_s 値は 2.7 倍程度である。

上記のとおり試作直流避雷器は動作責務性能が優れている反面、第 12 図の点線に示すように限流時における端子電圧が高くなり、動作責務限界では直流試験

第 12 図 試作避雷器の開閉サージ動作責務特性

Fig. 12. Switching surge operation duty characteristic of trial surge diverter.

第 13 図 変換所避雷器接続図

Fig. 13. Schematic diagram of surge diverters for one pole of DC converter.

電圧の 1.9 倍にも達するが、適用上要求される開閉サージ動作責務性能は (開閉サージ保護レベル/直流定格電圧) 1.88 倍 (第 4 表 (2) 3 欄参照) であり、この場合の端子電圧の上昇は、第 12 図より 1.64 倍となるから適用上問題とはならない。

4. 直流避雷器の直流定格電圧と適用

〈4・1〉 直流避雷器直流定格電圧の選定 検討の対象とした変換所は第 13 図に示すように、2 グループ直列の 12 相変換所で、交流側線間電圧は 120kV、直流出力電圧は 125×2 、直流電流は 1.2kA、変圧器のリアクタンスはおおの 20% とし、各避雷器は図のように設置されるものとした。これら各避雷器の端子電圧は図中の略図に示すように複雑な波形、波高値となるので、避雷器直流定格電圧の選定は容易ではない。

しかしながら、各避雷器の定常電圧波高値、すなわち転流振動による過電圧を計算するに際し、交流側の線間電圧を基準にとれば次の二つの条件を考慮すればよいので、容易に計算を行なうことができる。

(i) 交流系の負荷しゃ断係数: 交流系の電圧上昇を示すから直流系の各電圧も比例して上昇する。

(ii) 転流振動による過電圧: 避雷器設置場所により異なり、個別に詳細な検討が必要である。転流振動による過電圧倍数 β はダンピング回路により異なるが、一般に 1.3~1.4⁽³⁾ である。ここでは $\beta=1.35$ 倍としたとき想定される条件のうち最もきびしい場合を考慮し、文献 (4) に示した。転流振動による最大過電圧倍数を採用した。

転流振動による過電圧は商用周波の毎周期に発生するので、交流系統用避雷器を対象として考えると (定

第 3 表 250 kV 変換所用避雷器の直流定格電圧と保護レベルの提案

Table 3. Proposal of rated voltage and protective level of HVDC surge diverters to used in the 250 kV thyristor converter stations.

避雷器番号 (第13図参照)	転流振動による最大過電圧 (kV) ③	直流定格電圧 (kV) ⑤	雷サージ保護レベル (kV) ⑥	開閉サージ保護レベル (kV) ④	備 考
③～⑥	$\sqrt{2} \times 120 \times 1.35^* \times 1.1 = 252$	$\frac{202}{(\text{③} \times 0.8)}$ 0.8: $\mathcal{E}$	$\frac{384}{(\text{⑤} \times 1.9)}$	$\frac{364}{(\text{⑤} \times 1.8)}$	*: 文献(4)参照
②	$\sqrt{2} \times 120 \times 1.35^* \times 1.1 \times 1.1 = 278$ 1.1: アース電圧上昇	$\frac{223}{(\text{同上})}$	$\frac{423}{(\text{同上})}$	$\frac{400}{(\text{同上})}$	
①	$\sqrt{2} \times 120 \times 2.193^* \times 1.1 = 409$	$\frac{389}{(\text{③} \times 0.95)}$ 0.95: $\mathcal{E}$	$\frac{739}{(\text{同上})}$	$\frac{700}{(\text{同上})}$	
⑦	$\sqrt{2} \times 120 \times 1.213^* = 1.1 = 226^3$	$\frac{226}{(\text{同上})}$	$\frac{429}{(\text{同上})}$	$\frac{407}{(\text{同上})}$	
⑧	$\sqrt{2} \times 120 \times 2.051^* \times 1.1 = 383$	$\frac{383}{(\text{同上})}$	$\frac{728}{(\text{同上})}$	$\frac{690}{(\text{同上})}$	
⑨	250 $\times$ 1.1 $\times$ 1.1 = 303 1.1: リップルその他	$\frac{303}{(\text{同上})}$	$\frac{697}{(\text{⑤} \times 1.9 \times 1.1 \times 1.1)}$ 1.1: 10 kA 避雷器 1.1: 放電ひん度	$\frac{690}{(\text{⑤} \times 1.8 \times 1.1)}$ 1.1: 放電ひん度	転流サージ考慮外

註 ③欄の1.1倍: 交流系の負荷 χ 断係数, ⑥欄の120 kV: 交流側の線間電圧

格電圧) = (転流振動による最大過電圧) となり, 各設置場所の避雷器に対しては第3表③欄の値となるが, この考え方をすべての避雷器に適用することは適切とはいえない。たとえば, サイリスタ A-K 間, (第13図の③～⑥避雷器) 変圧器の対地用避雷器 (第13図の②, ① 避雷器) は端子電圧が著しく低下する期間があるので, 消弧条件が良くなるから, これらの避雷器に対しては (直流定格電圧) = $\mathcal{E} \times$ (転流振動による最大過電圧) とすべきである。ただし, $\mathcal{E} \leq 1$ とする。このような考え方をとり入れれば避雷器の性能検証には手数を要するが, 保護レベルの低減が可能になると思われる。

サイリスタ A-K 間避雷器を対象に $\mathcal{E}$ 値を求める実験として, <3.2> 節で述べた普通動作責務実験方法を用い, 動作責務限界電圧に近い試験電圧 (約 10% 低下) にて続流 χ 断を行なわせた後, 転流振動による過電圧を模擬した約 $100 \times 2,000 \mu\text{s}$ 波形のサージ電圧を印加し, 6 kV 限流形避雷器の絶縁回復特性を求めた結果, 続流 χ 断後 1 ms にて放電開始電圧平均値の 85% 以上に絶縁を回復し, 100～700 A に続流を変化したが (特性要素の値変化) 絶縁回復特性に及ぼす影響は明らかでない。一方, 同種形式 4 台について, 直流試験電圧を上昇させ, 普通動作責務実験を行ない動作責務限界を求めたところ, 動作責務限界電圧/放電開始電圧平均値の比は 45～55% である。

上記実験の結果, たとえば, 動作責務限界電圧を直流定格電圧とし, 続流 χ 断後 1 ms における絶縁回

復電圧を転流振動による最大過電圧とすれば, $\mathcal{E} \approx 0.65(55\%(\text{上限値})/85\%(\text{下限値}))$ となる。しかし, $\mathcal{E}$ 値は形式あるいは動作責務性能の変動などにより相異なることも考えられるので, より安全側の数値として第3表⑤欄に示すように②～⑥避雷器では 0.8, ① 避雷器では②～⑥避雷器より消弧条件が若干悪くなるので 0.95 の値を採用し, 直流定格電圧として第3表⑤欄の値を定めた。なお, Sarbach 氏⁽⁵⁾は対地用避雷器に対し, 転流振動による最大ピークに等しい大きさの直流電圧に対してよりも消弧条件が良くなるものとして $\mathcal{E} = 0.8$ を用いている。

<4.2> 保護レベルの提案 避雷器の公称放電電流として変換所内 5 kA, 線路側 10 kA を考慮した 250 kV 変換所用避雷器の開閉サージ保護レベルを, 直流定格電圧の 1.8 倍としても, 試作直流避雷器を用いれば第8図及び第12図に示すとおり普通動作責務及び開閉サージ動作責務が達成できる見通しが得られた。なお, BBC, AEG, Siemens の ± 400 kV 直流送電系統に設置予定の避雷器に対しても 1.8 倍の値が用いられている。⁽⁵⁾ 雷サージ保護レベルは放電電圧-時間特性を考慮し, 開閉サージ保護レベルより約 5% 高い直流定格電圧の 1.9 倍の値を採用した。上記の値を用い 250 kV 変換所用各避雷器の雷及び開閉サージ保護レベルを提案すると第3表 ⑥, ④ 欄となる。ただし, ⑨の避雷器に対しては放電ひん度が多いこと, また雷サージ保護レベルについては 10 kA 避雷器を用いるため, 制限電圧上昇分としておのおの 1.1 倍の裕

第 4 表 試作直流避雷器の適用
Table 4. Application of trial surge diverter.

(1) 普通動作責務

避雷器番号 (第 13 図参照)	開閉サージ保護レベル 転流振動による最大過電圧 (倍)		動作責務性能 $\left(K = \frac{\text{放電開始電圧}}{\text{動作責務限界電圧}}\right)$ 第 8 図より		限流時の最大制限電圧 $\left(\text{⑤値に対する} \frac{\text{限流時最大端子電圧}}{\text{直流試験電圧}}\right)$ 第 8 図より	
	第 3 表より ④	保護レベル 5% 低下 (④×0.95) ⑤	(倍) ③	裕度 (%) $\left(\frac{\text{⑤}-\text{④}}{\text{⑤}} \times 100\right)$ ④	(倍) ⑥	裕度 (%) $\left(\frac{\text{⑤}-\text{⑥}}{\text{⑤}} \times 100\right)$ ①
③ ~ ⑥	1.44 (364/252)	1.37	1.10	19	1.34	2
②	1.44 (400/278)	1.37	1.10	19	1.34	2
①	1.71 (700/409)	1.63	1.10	32	1.21	25
⑦	1.80 (407/226) *	1.71	1.10	35	1.19	30
⑧	1.80 (690/383) *	1.71	1.10	35	1.19	30

*: 転流振動による最大過電圧=直流定格電圧

(2) 開閉サージ動作責務 (線路残留電圧=直流定格電圧の 1.5 倍)

避雷器番号 (第 13 図参照)	開閉サージ保護レベル 直流定格電圧 (倍)		開閉サージ動作責務性能 $\left(K_s = \frac{\text{放電開始電圧}}{\text{開閉サージ動作責務限界電圧}}\right)$ 第 12 図より		限流時の最大制限電圧 $\left(\text{⑤値に対する} \frac{\text{限流時最大端子電圧}}{\text{直流試験電圧}}\right)$ 第 12 図より	
	第 3 表より ④	保護レベル 5% 低下 (④×0.95) ⑤	(倍) ③	裕度 (%) $\left(\frac{\text{⑤}-\text{④}}{\text{⑤}} \times 100\right)$ ④	(倍) ⑥	裕度 (%) $\left(\frac{\text{⑤}-\text{⑥}}{\text{⑤}} \times 100\right)$ ①
⑨	1.98 (600/303)	1.88	1.35	28	1.64	12

度を見込んだ。

〈4・3〉 直流系統用試作避雷器の適用 試作避雷器の適用を検討するにあたり、その保護レベルとして開閉サージ保護レベルを基準にとり、1ms 付近の放電開始電圧あるいは統流限流時の端子電圧上昇値と比較検討したが、その主な理由は

(i) 変換所内には波高値の高い急しゅんサージの侵入が考えられないこと。

(ii) 限流時に発生する端子電圧上昇 (制限電圧) 時間が 1~3ms であることによる。

放電開始電圧は絶縁協調上からみて上限値をとる必要があるが、最近の避雷器の放電電圧変動は比較的に少いので、その変動分として実験データに用いた平均値 (1ms 付近の値, 10 回以上測定) に 5% を上積みすることとした。(第 4 表④欄に用いている)

変換所内各避雷器に対する開閉サージ保護レベル/転流振動による最大過電圧と試作避雷器の動作責務性能及び限流時における最大制限電圧の関係を比較すると第 4 表となる。ただし、⑨避雷器は開閉サージ動作責務性能を対象とした。同表④、①欄に示すとおり、試作直流避雷器を用いれば変換所のいずれの場所にも裕度をもって適用できるから、適切な保護が期待できるものと思われる。なお、転流振動による最大過電圧

に適合できれば、②値を考慮した直流定格電圧に対してはさらに裕度をもって適用できる。

5. む す び

直流送電系統を過電圧から保護するためには、適切な直流避雷器を適用することが必要である。本報告は試作直流避雷器について、避雷器の基本性能である動作責務からみた性能限界を明らかにするための実験研究を行ない、直流避雷器実用化の見通しを得たものである。

本実験研究の遂行にあたり、電力中央研究所電力第一部 有働部担任、同部電力遮断研究室 尾崎 室長からは有意義なご示唆とご討論を載き、電力遮断研究室各位、中でも横倉、佐々木、加藤研究員には種々ご助力を賜った。また、東京芝浦電気、三菱電機の関係者より種々ご便宜を載いた。ここに銘記し深謝します。(昭和 48 年 3 月 19 日受付, 同 48 年 12 月 6 日再受付)

文 献

- (1) たとえば, JEC-187, 68 (1973)
- (2) 電気学会標準規格 JEC-156, 27 (1963)
- (3) 杉本・加藤, 他: 日立評論 53, 4, 394 (昭 46-4)
- (4) 佐々木・高梨・尾崎: 昭 48 電気学会全国大会 No. 1005
- (5) E. Sarbach: Brown Boveri. Riv. 55, 346 (1968-7)