直流送電線再起動シーケンスへの直流起動電圧波形の影響

正員 砂辺欣也

正員 合田 豊

正員 田中慎一

(電力中央研究所)

Influence of starting voltage waveform on time sequence to restart DC transmission lines
Kin-ya Sunabe, Member, Yutaka Goda, Member and Sin-ichi Tanaka, Member
(Central Research Institute of Electric Power Industry)

Based on experiments and calculations, this paper describes the influence of the time constant of the DC starting voltage on the no-voltage time required for successful restarting and the time required to complete the restarting.

(1) The 300 kV class DC tension insulator assembly tested in this study was composed of disc-type insulator units used for AC transmission lines. The insulation recovery characteristics of the DC tension insulator assembly after DC arc extinctions of 400 and 4,000 A were obtained by the switching impulse voltage and simulated DC starting voltage. The results showed that both methods obtained the same minimum values for the required no-voltage time. Thus, we verified the validity of this method to calculate the minimum value of the no-voltage time required for successful restarting based on the insulation recovery characteristics obtained by the switching impulse voltage.

(2) Based on the insulation recovery characteristics obtained by the switching impulse voltage after arc extinction, we calculated the relationships between the required no-voltage time and restarting completion time versus the time constant of the DC starting voltage. As the rising time constant of the DC starting voltage increased, the required no-voltage time decreased and the restarting completion time increased. It was shown that reducing the rising time constant of the DC starting voltage was an effective measure to shorten the restarting completion time after the arc extinction.

キーワード：直流アーク、絶縁回復、再起動、直流送電線、がいし装置

1. まえがき

直流送電線は、国外においてはすでに多数建設・運転されている。我が国においては、昭和54年に北海道と本州の電力融通を目的に、250kV直流送電線（北本連系線）が初めて建設・運転された。また、2000年運開を目途に、本州（和歌山県）と四国（阿南市：橘湾石炭火力）間を結ぶ500kV直流送電線（紀伊水道直流送電プロジェクト）が建設されつつある。今後、他の電力系統においても直流送電線の建設が計画されるものと予想される。

一般に、架空送電線の地絡故障では故障電流を一度遮断し、故障点の絶縁が回復すれば再送電が可能な場合が多い。また、上記二例のように、ケーブルと架空送電線との組合せで構成される送電線路においても、故障点が架空線であることが識別できれば、再送電操作が行われるケースもあり得る。そのような再送電操作を前提とした超高圧直流送

電線では、万一地絡故障が発生した場合の再送電時間（無電圧時間）を適切に選定し、再送電の成功率を高めることが送電線の供給信頼度維持・向上のための重要な課題の一つとなる。

我が国では、直流架空送電線における地絡故障時の再起動シーケンスは、図1に示すように考えられている⁽¹⁾。この場合、適切な無電圧時間を選定することが重要であり、そのためには、架空送電線におけるがいし装置の故障アーク消弧後の絶縁回復特性を知る必要がある。

これまでに筆者らは、以下の装置について、直流故障アーク消弧後の絶縁回復特性を実測した。

- ① アークホーンを模擬した間隔1～5mの棒一棒電極装置⁽²⁾
- ② 紀伊水道直流送電プロジェクト用の500kV耐張がいし装置⁽³⁾
- ③ 交流送電用懸垂がいしを使用して模擬した直流

図1 直流送電線地絡故障時の再起動シーケンスの例
Fig. 1 An example of time sequence at fault on DC systems.

500kV級耐張がいし装置ならびに三種（V吊、Y吊、I吊）の懸垂がいし装置⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

そして、これらの中で、アーク消弧後の絶縁回復特性に与えるアーク電流、極性、アーク継続時間、がいし装置の種別、発弧経路、がいし連個数などの影響を明らかにした。これらの絶縁回復（耐電圧）特性は試験設備の都合でいずれも緩波頭インパルス電圧を用いて求めている。

しかし、実系統の直流送電線の再起動時に故障点に加わる電圧（以下、直流起動電圧と呼称）は、立上り時間が0.15～0.25秒（立上り時定数：0.05～0.08秒）の非常にゆっくりと立上る直流電圧と考えられる⁽¹⁾。そのため、緩波頭インパルス電圧により求めた絶縁回復特性から、ただちに無電圧時間の最小値を把握することは難しい。

そこで、筆者らは、直流起動電圧波形を数式で表し、これと緩波頭インパルス電圧により求めた絶縁回復特性とから、再起動に成功する無電圧時間の最小値を算出する手法を提案した⁽²⁾。そして、上記のそれぞれの装置について無電圧時間の最小値を試算して示した^{(2)～(6)}。

これまで、直流起動電圧のように立上り時間の長い波形により、再起動時の無電圧時間について検証された例は見当たらない。交流送電用懸垂がいしを用いて模擬した直流300kV級耐張がいし装置について、今回初めて、直流起動電圧を模擬した直流電圧（以下、直流起動模擬電圧と呼称）により、無電圧時間の評価を行った。また、無電圧時間および再起動完了までの時間に対する直流起動電圧の立上り時定数の影響について検討した⁽⁷⁾。本論文は、それらの結果を取りまとめたものである。

2. 供試がいし装置

試験設備上発生可能な直流電圧値が300kVまでであることから、300kV級の耐張がいし装置を構成することにした。

紀伊水道直流送電プロジェクト（500kV送電線）における軽汚損（最大等価塩分付着密度：0.03mg/cm²）区域用耐張がいし装置（460mm直流懸垂がいし27個連）のがいし

連結長は約5.3mである。これに対し、今回、交流送電線用の380mm高強度懸垂がいし15個連で構成した供試がいし装置のがいし連結長は約3.6mとなり、がいし連長から見てほぼ直流300kV級耐張がいし装置に相当すると考えられる。

図2に供試がいし装置の試験状況写真を示す。径間約35mの引留鉄塔間に絶縁用がいしを用いて地上高約10mの位置に供試がいし装置を取り付けた。がいし装置がほぼ水平に近づくように約3トンの張力を加えた。

図2 供試耐張がいし装置の試験状況写真
Fig. 2 A photograph of tension insulator assembly in test.

3. 試験条件および試験方法

〈3・1〉 故障アーク電流値と継続時間 今回実施した故障アーク消弧後の絶縁回復特性試験条件を表1に示す。直流架空送電線における本線地絡故障時のアーク電流値は、最大時、定常運転電流（数千A）の1.5～2倍程度に増加するといわれている⁽¹⁾。しかし、順変換器側定電流制御（ACR）の作用で、急速に定常運転電流の約10％程度（数百A）に低減される⁽⁸⁾。このように極く短時間（0.02秒以下）の大電流に引き続き定常運転電流以下の電流が0.1秒以上継続する場合、アーク消弧後の絶縁回復は、後者の電流値の特性に依存する⁽³⁾。したがって、極く短時間の大電

表1 アーク消弧後の絶縁回復特性試験条件

Table 1. Test conditions for determining insulation recovery characteristics after arc extinction.

供試がいし装置		300kV級耐張がいし装置	
故障電流波形の種別		直流電流	
電源電圧		40kV	
アーク電流	波形	直流方形波	
	極性	線路側が正極性	
	電流値	400、4,000A	
	継続時間	0.1秒	
発弧方法		0.3mmφまたは0.8mmφ銅線	
発弧経路		がいし下面直線	
気象条件		無風	
プローブ電圧	波形	緩波頭インパルス電圧	直流起動模擬電圧
	定数	200/1,500μs	時定数：0.05秒

流については考慮せず、アーク電流値は、400Aおよび4,000Aとした。また、故障電流継続時間は、0.1秒とした。

〈3・2〉 故障アーク発弧経路および発弧方法 故障アーク発生は、がいしの表面汚損あるいは雷撃等により自然にフラッシュオーバーすることが望ましいが、試験実施上困難なため、発弧用銅線を使用した。銅線の太さは、アークが継続する範囲で、できるだけ細い方がその影響を少なくできる。そのため、アーク電流400Aの場合、0.3mm ϕ および同4,000Aの場合、0.8mm ϕ を選定した。

銅線の布設位置は、がいしの汚損によるフラッシュオーバーを想定して、鉄塔側がいし金具（ソケットキャップ）と線路側がいし金具（ボールピン）間をがいし装置の下面に沿って直線的に結ぶ方法とした。これは、アークおよび発生ガスの浮上がいしにより妨げられるため、がいし上面発弧よりも絶縁回復にとって過酷側の条件といえる⁽⁹⁾。また、ジャンパー線側からの電流の供給はアークに対して上方への強い電磁力を与え、絶縁回復を速める効果が予想されるため、架線側からの電流供給とした。

〈3・3〉 ブローイング電圧波形 耐電圧値を実測するために印加する電圧として、図3に示す緩波頭インパルス電圧および直流起動模擬電圧を用いた。以下、これらをブローイング電圧と呼称する。

緩波頭インパルス電圧（同図(a)）は波頭長が約200 μ s、半波尾長が約1,500 μ sである。

一方、直流起動模擬電圧の場合、実系統の直流送電線の直流起動電圧に近い、立上り時定数が約0.05sとなる直流電圧波形（同図(b)）を発生させた。これは、直流系の起動時間 $t_R = 0.15$ 秒の直流起動電圧に相当する。

(a) 緩波頭インパルス電圧 (b) 直流起動模擬電圧

図3 ブローイング電圧波形

Fig. 3 Waveforms of probing voltage.

〈3・4〉 アーク電流とブローイング電圧の極性

故障アーク消弧後の耐電圧特性は、アーク電流とブローイング電圧の極性により若干異なる⁽⁴⁾。直流送電線の場合、正（負）極性のアーク電流消弧後には正（負）極性の線路電圧が、印加される。耐張がいし装置の場合、正極性のアーク電流とインパルス電圧の組合せの方が、負極性の組合せよりもアーク消弧後のインパルス耐電圧が低い結果が得ら

れている⁽⁴⁾。したがって、この組合せを試験条件として採用した。

〈3・5〉 気象条件 気象条件の内、風は、故障アークあるいはアーク消弧後のガスを移動・冷却するため、絶縁回復を早める効果がある。したがって、最悪条件として、無風条件を選択した。実際には、40m×25m×29m（高さ）の建屋内で試験を実施し、その他の気温、気圧、湿度は自然状態とした。

〈3・6〉 絶縁回復特性試験回路および試験手順

絶縁回復特性測定試験回路を図4に示す。直流アーク電源は、短絡発電機から3相変圧器を介し、シリコン整流器にて3相全波整流して得ている。試験手順としてはまず、バイパススイッチBPSWを開放状態、高速度断路器HSDSを投入状態として、発電機電圧を予定の電圧に調整した後、電源側遮断器を投入し、発弧用銅線、HSDSに直流電流を通電する。銅線は瞬時に溶断・発弧し、がいし沿面に沿って、気中アークを生ずる。発弧から0.1秒後にBPSWを投入すると電流はバイパスされ、アークは強制的に消弧される。消弧後、HSDSを開放し、消弧から t (s)後にブローイング電圧発生電源から緩波頭インパルス電圧または直流起動模擬電圧を印加する。供試がいし装置がこれらに耐えるか否かにより、絶縁回復特性を測定する。

図4 アーク消弧後の絶縁回復特性試験回路

Fig. 4 Test circuit for determining insulation recovery characteristics after arc extinction.

4. 緩波頭インパルス電圧に対する絶縁回復特性

図5にアーク電流400Aおよび4,000A、アーク継続時間0.1秒のアーク消弧後の絶縁回復特性を緩波頭インパルス電圧で測定した結果を示す。

アーク電流400Aの場合の絶縁回復特性は、アーク消弧から0.15秒で約170kV、0.20秒で約300kVの耐電圧値となっ

ている。この特性曲線はインパルス耐電圧を V_{imp} (kV)、アーク消弧からの時間を t (s) として、概略次式で表される。

$$V_{imp} = 2,560 \cdot (t - 0.083) \dots \dots \dots (1)$$

この絶縁回復特性から、300kVの直流運転電圧が立上り時定数 $100 \mu s$ (波頭長 $200 \mu s$ のインパルス電圧相当) で印加されるものとすれば、再起動に成功するために必要な無電圧時間の最小値 t_{RCL} は、約0.20秒である。

また、アーク電流4,000Aの場合のアーク消弧後の絶縁回復特性は、アーク消弧後0.20秒で約100kV、0.29秒で約300kVの耐電圧値となっている。この特性曲線は概略次式で表される。

$$V_{imp} = 2,360 \cdot (t - 0.16) \dots \dots \dots (2)$$

この絶縁回復特性から、300kVの直流運転電圧が立上り時定数 $100 \mu s$ (波頭長 $200 \mu s$ のインパルス電圧相当) で印加されるものとすれば、再起動に成功するために必要な無電圧時間の最小値 t_{RCL} は、約0.29秒である。

図5 緩波頭インパルス電圧に対するアーク消弧後の絶縁回復特性

Fig.5 Insulation recovery characteristics by the switching impulse voltage after arc extinction.

5. 直流起動模擬電圧に対する絶縁回復特性と再起動に必要な無電圧時間

供試がいし装置について、アーク電流約400Aを0.1秒間通電し、アーク消弧後 t_{RCL} (s) (0.10秒または0.12秒) に直流起動模擬電圧を印加し、絶縁回復状況を測定した結果を図6に示す (同図の直流起動模擬電圧 V_{dc} の波形は、2回の試験を重ねて描いている)。無電圧時間 t_{RCL} が0.10秒ではフラッシュオーバーせず、0.10秒ではフラッシュオーバーしている。したがって、再起動成功に必要な t_{RCL} の最小値は両値の間 (0.10~0.12秒) にあることが分かる。

また、アーク電流約4,000Aを0.1秒間通電し、アーク消弧後 t_{RCL} (s) (0.13、0.15、0.17および0.20秒) に直流起動模擬電圧を印加し、絶縁回復状況を測定した結果を図7に示す (同図の V_{dc} の波形は、4回の試験を重ねて描いている)。 t_{RCL} が0.20秒ではフラッシュオーバーせず、0.17秒以下ではフラッシュオーバーしている。したがって、必要な t_{RCL} の最小値は両値の間 (0.17~0.20秒) にあることが分かる。

図6 400Aアーク消弧後の直流耐電圧特性

Fig. 6 DC withstand voltage characteristics after arc extinction of 400A.

図7 4,000Aアーク消弧後の直流耐電圧特性

Fig. 7 DC withstand voltage characteristics after arc extinction of 4,000A.

6. 直流起動電圧の立上り時定数と無電圧時間ならびに再起動完了までの時間

〈6・1〉 直流起動電圧の立上り時定数と無電圧時間

図8はアーク消弧後の絶縁回復特性の概念図を示している。特性①は、緩波頭インパルス電圧による絶縁回復特性である。アーク消弧後 t (s) における耐電圧 V_{imp} (kV) は、式(1)および(2)から、次式で表される。

$$V_{imp} = \alpha_v \cdot (t - t_0) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 α_v (kV/ μs) は、絶縁回復速度、 t_0 (s) は回復遅れ時間である。

アーク消弧後 t_{RCL} (s) に系統を再起動した時、故障点の電圧 (= ②直流起動電圧) V_f (kV) は、次式で表し得る。

$$V_f = V_0 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t - t_{RCL}}{\tau}\right) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $t \geq t_{RCL}$ 。 V_0 (kV)は送電線運転電圧、 τ (s)は起動電圧の立上り時定数である。

この時、アーク消弧から再起動を開始するまでに必要な無電圧時間の最小値 t_{RCL} は次式で求められる⁽²⁾。

$$t_{RCL} = \frac{V_0}{\alpha_v} + t_0 - \tau \left\{ 1 + \ln\left(\frac{V_0}{\alpha_v \cdot \tau}\right) \right\} \dots\dots\dots (5)$$

図9は、図5(緩波頭インパルス電圧により実測したアーク消弧後の絶縁回復特性)からアーク消弧後、再起動を成功させるために必要な t_{RCL} を直流起動電圧の立上り時定数 τ を変えて、計算したものである。 τ が大きい程 t_{RCL} を短くできることが分かる。ちなみに、アーク電流400/4,000Aの場合、 $\tau=100\mu s$ に対する t_{RCL} (0.20/0.29s)は、緩波頭インパルス電圧(立上り時定数: $100\mu s$ 相当)で求めた絶縁回復特性において、300kVに回復した時間(0.20

図8 アーク消弧後の絶縁回復特性の概念図

Fig. 8 An example of insulation recovery characteristics after arc extinction

図9 直流起動電圧の立上り時定数と無電圧時間

Fig. 9 Relation between time constants of restarting voltage and no-voltage times after arc extinction.

/0.29s)を示している。また、 $\tau=0.05s$ に対する t_{RCL} (0.11/0.19s)は、直流起動模擬電圧 ($\tau=0.05s$)によって得られた t_{RCL} (0.10~0.12/0.17~0.20s)と一致している。

この結果から、緩波頭インパルス電圧により求めた絶縁回復特性を用いて、再起動時の無電圧時間の最小値 t_{RCL} を計算により求める手法の妥当性が明らかになった。

〈6・2〉 直流起動電圧の立上り時定数と再起動完了までの時間 直流送電線地絡故障時の再起動時には、アーク消弧から無電圧時間 t_{RCL} をもって、立上り時定数が τ である直流起動電圧が印加される。この時、電圧印加から線路電圧の95%に到達するまでの時間(直流系の起動時間) t_R (s)は次式で表される⁽²⁾。

$$t_R = 3 \cdot \tau \dots\dots\dots (6)$$

したがって、図8で示したようにアーク消弧から再起動が完了(線路電圧が95%まで回復)するまでの時間 t_c (s)は次式となる。

$$t_c = t_{RCL} + t_R = t_{RCL} + 3 \cdot \tau \dots\dots\dots (7)$$

図10は直流起動電圧の立上り時定数 τ とアーク(400Aおよび4,000A)消弧から再起動が完了するまでの時間 t_c との関係を示す。図9で示したように τ の増加とともに t_{RCL} を短くすることが可能であるが、反対に t_R が増加するため、 t_c は τ が0.02秒程度まではほとんど変化しない。さらにこれより τ が増加すると t_R の増加が著しくなり、 t_c は急増する。したがって、 t_c を短く抑えるためには τ を短くすることが有効であるといえる。ちなみに実系統では、 τ は、概ね0.05秒以上であればサイリスタパルプの制御によって、調整可能とされている。

図10 直流起動電圧の立上り時定数によるアーク消弧から再起動が完了するまでの時間の変化

Fig. 9. Relation between time constants of restarting voltage and times until completion of restarting after arc extinction.

7. むすび

交流用懸垂がいしを用いて構成した300kV級直流耐張がいし装置の400Aおよび4,000A直流アーク消弧後の絶縁回復特性を緩波頭インパルス電圧および直流起動模擬電圧により実測した。その結果、両アーク電流において、緩波頭インパルス電圧に対する耐電圧特性から算出した無電圧時間の最小値と直流起動模擬電圧を直接印加して求めた値とがよく一致することが確認でき、緩波頭インパルス耐電圧特性から、再起動に成功するために必要な無電圧時間の最小値を算出する手法の妥当性が実証できた。

さらに、上記の緩波頭インパルス電圧によるアーク消弧後の絶縁回復特性をもとに、再起動時に必要な無電圧時間および再起動完了までの時間に対する直流起動電圧の立上り時定数の影響を計算で求めた。その結果、直流起動電圧の立上り時定数を長くすれば無電圧時間は短縮されるが、逆に再起動が完了（線路電圧が95%まで回復）するまでの時間は遅くなることが判明した。すなわち、再起動完了時間を短く抑えるには、直流起動電圧の立上り時定数をより短くすることが有効である。

おわりに、本研究の機会を与えて頂いた当所横須賀研究所吉田幸雄所長、狛江研究所 林敏之直流新技術課題推進担当、本論文取りまとめ全般にわたりご指導ご討論頂いた、高須和彦電力部長に深く感謝の意を表します。

（平成11年1月20日受付、同4月23日再受付）

文 献

- (1) 電気学会編：直流送電技術解説、p92（1978年）、オーム社
- (2) 砂辺欣也、稲葉次紀：「超高压直流送電線における故障アーク消弧後の絶縁回復特性」、電学論Vol.110-B、No.2、p138-146（1990年2月）
- (3) 砂辺欣也：「500kV直流碍子装置の故障アーク消弧後の絶縁回復特性」、電中研・依頼報告W94511（1995年4月）
- (4) 砂辺欣也、合田豊、田中慎一：「直流故障アーク消弧後の絶縁回復特性（その2）—500kV直流耐張碍子装置の場合—」、電中研・研究報告W95036（1996年5月）
- (5) 砂辺欣也、合田豊、田中慎一：「直流故障アーク消弧後の絶縁回復特性（その3）—500kV直流V吊、Y吊および直吊懸垂がいし装置の場合—」、電中研・研究報告W96008（1997年4月）
- (6) 砂辺欣也、合田豊、田中慎一：「500kV級直流がいし装置の故障アーク消弧後の絶縁回復特性」、電学論Vol.118-B、No.2、p182-190（1998年2月）

- (7) 砂辺欣也、合田豊、田中慎一：「直流故障アーク消弧後の絶縁回復特性（その4）—直流起動電圧立上り時定数の影響—」、電中研・研究報告W97033（1998年6月）
- (8) 直流系統技術調査専門委員会：「交直連系系統の動特性」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第258号（1987年10月）
- (9) Y. Goda, S. Matsuda, T. Inaba and Y. Ozaki: "Behavior of Post Arc Gas after Arc Interruption on UHV (1,000 kV Class) Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp.887-893 (April 1994)

砂辺 欣也（正員）1944年9月7日生まれ。67年3月関東学院大学工学部二部電気工学科卒業。63年4月～77年6月超高压電力研究所勤務。77年7月電力中央研究所入所。現在、横須賀研究所電力部主任研究員。工学博士。主として、直流アーク現象に関する研究に従事。

合田 豊（正員）1956年4月1日生まれ。79年3月名古屋大学電気学科卒業。同年4月電力中央研究所入所。91年～92年米国コネティカット大学客員研究員。現在、横須賀研究所電力部上席研究員。工学博士。主として、電力流通設備の大電流アーク現象に関する研究に従事。IEEEシニア会員。

田中 慎一（正員）1971年1月29日生まれ。95年3月山形大学大学院修士課程修了。同年4月電力中央研究所入所。現在、横須賀研究所電力部研究員。主として、送電線における故障アークの挙動に関する研究に従事。