特集

架空送電線の対風設計（その1 絶縁設計）

Design of Overhead Transmission Line against Wind (Part1 Insulation Design)

北嶋知樹*

Tomoki KITASHIMA

1. はじめに

我が国の電力の供給信頼性は世界的に極めて高い水準にある。例えば1999年の我が国における1軒あたりの年間停電時間は9分であり主要各国（米、英、仏）の1/6～1/8程度となっている。この高信頼度の電力供給の動脈が特別高圧架空送電線路（以下、架空送電線という）であり、一般電気事業者10社（北海道、東北、東京、中部、北陸、関西、中国、四国、九州および沖縄電力、以下電力各社という）の所有する架空送電線の総延長は2002年度末時点で約8万3千kmに達している。

架空送電線は、大気が良好な絶縁体であり、かつその移動（風および対流）によって高い放熱効果が得られるという、言わば自然の恵みを巧みに利用した電力輸送設備である。そのため一般に導体には絶縁被覆のない裸電線が用いられる。また通電によるジュール熱の冷却設備等も不要である。

反面、架空送電線は落雷、強風、氷雪および塩塵などの様々な自然現象に曝される。架空送電線は重要なライフラインであり、これらの厳しい自然現象が発生しても極力絶縁を維持し、安定して電気の輸送機能を果たすように施設されることが求められる。

中でも、特に風への配慮は架空送電線の絶縁設計にとって重要である。強風は電線およびそれを支持する

がいし連等の風方向への変位（横振れ）を生じさせ、電線とその支持物である鉄塔との接近あるいは電線相互の接近をもたらす。この際、電線が大気の絶縁耐力を超えて過度に接近すると絶縁破壊（フラッシュオーバー）が発生し送電不能となる。そのため、各電線と鉄塔等との離隔あるいは電線相互の配置はこれらを考慮して決定されなければならない。

また降湿時には風によって運ばれた雪片が電線に付着する。この際、各電線の不均一着雪による弛度（たるみの大きさ）の不揃い、あるいは着雪の脱落による電線の跳ね上がり現象などが生じると電線相互が接近し、フラッシュオーバーに至ることがある。さらには着雪により電線が非対称断面となることで、風の作用とあいまってギャロッピング現象等を引き起こして、電線相互を接近させ、やはりフラッシュオーバーの原因と成り得る。

また日本は海に囲まれており、結果として台風および冬季季節風によって海塩粒子が飛来し、がいし連に付着すると絶縁耐力が低下する。特に台風では雨を伴わない場合に、強風によりかなり内陸まで海塩粒子が運ばれ、急速汚損となってフラッシュオーバーとなる可能性がある。従ってがいし連の設計（連結個数の決定など）にあたっては、海塩粒子の付着量を予測することが必要となる。

このように架空送電線が自然環境下で安定して電気

* 東京電力株式会社 工務部 送変電建設センター

Transmission & Substations Construction Center, Power System Engineering Department, Tokyo Electric Power Co., Inc.

を送り続けるためには、風によって発生する様々な現象をあらかじめ設計に考慮しておくことが必要となる。

本稿の目的は、架空送電線の対風設計のうち、絶縁設計に関する内容を紹介することであるが、理解を容易にするために、まず送配電系統および架空送電設備について概説する。ついで絶縁設計の基本的考え方と具体的方法について風との関係を中心に紹介する。

2. 送配電系統の概要²⁾³⁾

2.1. 送配電方式

発電所で発生した電力は、変圧器によって大電力の輸送に適当な電圧、すなわち 66~500kV に昇圧され送電線によって伝送される。その後、各地域の変電所を経て、順次低い電圧に変換されながら、配電用変電所に分配供給される。この発電所から配電用変電所まで送る過程を送電系統(その電線路を送電線)と呼び、配電用変電所から家庭や工場まで送る過程を配電系統(その電線路を配電線)と呼ぶ。またこれら一連を総称して送配電系統と呼ぶ。

送配電系統の電気方式としては一部の長距離送電線等を除き、交流方式が世界各国で採用されている。交流方式は系統の各過程においてそれぞれに適した電圧に経済的に変換しうる大きな利点を有することや容易に回転磁界が作れることが主な理由である。

送電系統では架空・地中にかかわらず、交流三相三線式が用いられる。三相三線式は起電力の大きさと周波数が等しく位相が 120° ずつ異なる三つの交流電源を組み合わせた方式であり(図・1)、電線1条あたりの送電電力が他のどの方式よりも大きいという特長を有する。

特別高圧送電系統における三相三線式はY形に結線され、その中性点は送電系統の安定性確保、保護継電器の確実動作などのため、直接あるいは抵抗やリアクタンスなどを通じて接地される(図・2)。

図-1 交流三相三線式

図-2 結線方式

交流の周波数は通常 50Hz, 60Hz のいずれかが用いられ、これを商用周波数と呼ぶ。我が国では電気事業の黎明期における機器輸入の経緯から、関東以北(北海道、東北および東京電力)は 50Hz、中部以西(中部、北陸、関西、中国、四国、九州および沖縄電力)は 60Hz が採用されている。なお欧州は 50Hz、米国は 60Hz を使用している。

2.2. 送配電電圧

電線路の電圧は線間(相間)電圧の実効値で表現され、三相三線式の場合、線間電圧は対地電圧の $\sqrt{3}$ 倍になる。

電気設備技術基準⁴⁾では、交流電圧の種別について、600V以下を低圧、600Vを超え 7000V以下を高圧、7000Vを超えるものを特別高圧と定めている。

一部に特別高圧の配電線も存在するが、通常は低圧および高圧の電線路は配電線、特別高圧電線路は送電線と言って良い。低圧・高圧の架空配電線は絶縁電線が使用されるが、特別高圧架空送電線は通常、裸電線が使用される。

より大きな電力を効率よく送電するためには、電圧を引き上げることが有効であることから、電力需要の増大に従い、送電線の送電電圧は順次引き上げられた。現在、我が国の特別高圧電線路の公称電圧は 11, 22, 33, 66, 77, 110, 154, 187, 220, 275 および 500kV である。275kV は 1952(昭和 27)年に新北陸幹線(関西電力)、500kV は 1973(昭和 48)年の房総線(東京電力)で初採用された。

なお東京電力では 1000kV 設計の架空送電線の建設を完了させているが、現在は 500kV で運転中である。

3. 架空送電線の設備概要²⁾³⁾

3.1. 概説

送電系統では三相三線式を採用しているので、架空送電線の設備は、鉄塔などの支持物の上部3ヶ所がいし連を取り付け、これに裸電線を吊下していく形態になる。

しかし1回線では故障停電を生ずる確率が高いので、我が国では同一系統に2回線を使用するが多い。送電線では地絡事故などの故障が発生した場合、保護継電器によってこれを速やかに検知し、送受電端に設置された遮断器によって事故相あるいは事故回線を一時開放して回復を待つ。すなわち2回線方式ではいず

れか1回線が故障したとしても他回線で送電を継続でき、故障除去による停電を回避できる。

3.2. 電線

架空送電線に使用する裸電線には初期は硬銅より線 (HDCC; Hard-Drawn Copper Conductor) が主に用いられていたが、昭和 20 年代以降は価格面などから HDCC に代わって鋼心アルミより線 (ACSR; Aluminum Conductor Steel Reinforced) が用いられるようになった。現在は ACSR あるいは鋼心耐熱アルミ合金より線 (TACSR; Thermo-resistant Aluminum alloy C.S.R.) が主に用いられる。

ACSR は直径 3~4mm 程度の硬アルミ線を鋼より線の周囲により合わせた構造を有する (図-3)。TACSR は ACSR の硬アルミ線に代えて高温でも軟化しにくい耐熱アルミ合金を用いたもので、同サイズの ACSR に比べ許容電流が大きいのが特長である。一般に電源送電線など負荷変動の小さい線路は ACSR、負荷変動の大きい線路は TACSR が主に適用される。

通常、66~154kV 級では各相毎に 1 条の電線とする単導体、275kV 以上の超高压送電線では、送電容量およびコロナ騒音低減等の観点から、複数の電線をスベークサで適当な間隔に配置した多導体を用いる。現在、我が国では 2, 3, 4, 6 および 8 導体が実用化されている。

なお近年は人家近傍で風音発生が予想される場合等において、最外層の素線に突起を設けた低風音電線等が使用されることもある⁵⁾。

図-3 鋼心アルミより線(610mm²)の構造

3.3. がいしおよびがいし装置

充電された裸電線を大地および大地と同電位である支持物と絶縁するために用いられるのが、がいしである。

がいしには磁器製、ガラス製、有機ゴム製などがあり、我が国では磁器製の懸垂がいしが主に用いられる。

懸垂がいしは帽子状の磁器を絶縁体とし、これにキヤップおよびピン等の連結金具をセメントで接着したもので (図-4)、線路電圧や電線架線張力および汚損環境等に応じて適切なサイズを選び、必要数を連結して用いる。連結されたがいしをがいし連と呼ぶ。

がいし連は、その沿面でフラッシュオーバーが発生すると地絡電流による続流アークによって損傷を受けることがある。このためフラッシュオーバー通路をがいし沿面から遠ざけることを主目的として、66kV 以上の送電線にはアークホーンと呼ばれる金具が、がいし連の両端に取り付けられる (図-5)。

図-4 懸垂がいしの構造
(250mm クレビス形)

図-5 がいし連に取付けられたアークホーン

がいし装置 (がいし連と架線金具の総称) は、鉄塔への取付方式によって、大きく懸垂がいし装置と耐張がいし装置に分類される。

懸垂がいし装置 (直吊) は架渉線を鉄塔腕金から吊り下げて先端に電線を支持するもので、鉄塔への取付点を中心に自由に触れる構造となっている (図-6)。

耐張がいし装置は、鉄塔に電線を引き留める形で支持するもので前後径間の線路走向が変化する箇所、地形影響などで前後鉄塔の電線支持点高低差が著しい箇所などに使用される (図-7)。

一般に懸垂がいし装置を用いた鉄塔を懸垂鉄塔、耐張がいし装置を用いた鉄塔を耐張鉄塔と呼ぶ。

3.4. ジャンパ装置

耐張がいし装置の場合に前後径間の電線を電氣的に接続するのがジャンパ線であり、付属する金具等を含めてジャンパ装置と呼ぶ。

ジャンパ線には 154kV 以下では本線と同じ電線を用いることが多いが、275kV 以上の多導体送電線では、

ジャンパ深さの抑制による鉄塔のコンパクト化あるいはジャンパ取付作業の省力化などを目的として、アルミパイプを利用した「パイプジャンパ装置」あるいはH鋼や鋼管を水平に吊り下げ、これにジャンパ線を沿わせる「吊下式ジャンパ装置」が用いられることも多い。

図-6 懸垂がいし装置 (500kV)

図-7 耐張がいし装置・パイプジャンパ装置(1000kV)

3.5. 支持物

我が国では66kV以上の架空送電線の支持物には殆ど鉄塔が使用される。鉄塔の基本形状は回線数や電線配置方式によって決定され、2回線方式が多い我が国

では鉄塔の左右に3段の腕金を設けて3相の電線を支持する方式（垂直2回線配列）が主に採用される。

基本形状が決定されるとがいし連やジャンパ線の影響による横振れ、風の乱れによる電線相互の接近を考慮してもフラッシュオーバーを発生しない絶縁間隔を保つよう電線配置寸法が決定される。これを装柱設計と呼ぶ。

図-8に電圧と鉄塔規模（垂直2回線配列）との関係を示す。電圧が高くなると必要絶縁間隔が増大するため、結果として鉄塔が大型化する傾向にある。

鉄塔の構成部材には一般に等辺山形鋼が用いられるが、大型鉄塔では中空鋼管あるいはコンクリート充填鋼管が用いられることもある。鋼管鉄塔は単位重量あたりの価格は山形鋼鉄塔よりも高価であるが、山形鋼よりも大きな荷重に対応可能であり、また山形鋼よりも風圧荷重が低減するため、鉄塔基礎工事費が山形鋼鉄塔よりも安価になるというメリットがある。

送電用鉄塔の高さは、地上と電線の絶縁距離、各電線間の絶縁距離によって決まり、絶縁距離は電圧が高くなるほど長くなる。そのため、1000kV設計のUHV送電線の鉄塔は100mを越えるものとなる。図中の数字は概略の値。

図-8 高電圧化に伴う鉄塔の大型化

4. 絶縁設計の概要⁹⁾¹⁰⁾

4.1. 過電圧と基本的考え方

送電線路には運転電圧はもとより、様々な要因による過電圧（異常電圧ともいう）が発生する。したがって絶縁設計においては過電圧の種類とその性質を知ることが必要になる。

送電線路に発生する過電圧は大別すると

- ①内部過電圧（内雷）
- ②外部過電圧（外雷）

の2種類に分かれる。

内部過電圧は送電系統の開閉操作に伴って発生する過渡的過電圧（以下、開閉サージという）や3相のうちの1相が地絡放電を生じた場合の健全相の電圧上昇現象等を指す。

外部過電圧は主として落雷によって発生するサージ電圧であり、電線あるいは鉄塔への雷撃による直撃雷と雷雲と大地との間に放電を生じた際などの誘導によって発生する誘導雷とに大別される。

架空送電線の絶縁設計の基本的考え方は「系統に発生する内部過電圧に対してはフラッシュオーバーを起こさない」とこととされている。これは比較的頻繁に発生する内部過電圧によってしばしば事故が発生しては送電の安定上支障があるためである。

一方、雷撃による外部過電圧には大きな幅があり、すべての雷に対してフラッシュオーバーを起こさせないように絶縁強化するのは事実上不可能である。このため雷撃に対する事故低減対策としては、架空地線の施設によって電線への雷直撃を極力防止し、かつ鉄塔の接地抵抗を低減して雷撃電流を速やかに地面に流し、鉄塔から電線への逆フラッシュオーバーを極力少なくするなどの、いわゆる耐雷設計技術によって対応するのが基本である。さらに、このような対策を施しても防止できない雷事故に対しては、高速度再閉路方式（フラッシュオーバーした相を系統から切り離した後、1sec程度の短時間で再投入する方式）の採用やアークホーンの取付によってフラッシュオーバーによる影響を軽減する方策をとる。

このような絶縁設計の考え方は架空送電線の長年の設計・運転経験から構築されてきたもので、1948（昭和23）年発刊の「送電系の絶縁」⁶⁾や1951（昭和26）年発刊の「絶縁と閃落防止」⁷⁾などにおいて既にこのような考え方が示されている。

その後、1958（昭和33）年には電気学会で「送電線路の絶縁設計標準推奨案」⁸⁾（以下S33推奨案という）がとりまとめられた。S33推奨案は1966（昭和41）年に技術報告「架空送電線路の絶縁設計要綱」⁹⁾（以下、S41要綱という）として見直しされ、さらに1986（昭和61）年にはS41要綱が改訂され¹⁰⁾（以下、改訂後をS61要綱という）、現在に至っている。

なお、これらの推奨案や要綱は、いわゆる最低基準を示したのではなく標準的な設計プロセスを示したものと位置づけられており、現在、電力各社はこれら

の要綱等を参考にして設計を実施している。

4.2. 開閉サージ

送電線に発生する様々な原因による内部過電圧のうち、絶縁設計上支配的なのは開閉サージである。開閉サージは数百マイクロオーダー秒の過電圧であり、その大きさは通常、線路の対地電圧の波高値（線間電圧 $\times\sqrt{2}/\sqrt{3}$ ）に対する倍数で表現される。これを開閉サージ倍数と呼ぶ。

架空送電線は大気およびがいで大地と絶縁しているので、開閉サージ倍数を大きく評価すれば、それに耐える絶縁間隔を確保するために電線・鉄塔間隔の拡大およびがいし個数の増加が必要となり、結果、鉄塔の大型化につながる。そのため開閉サージ倍数の設定は架空送電線の設計にとって重要である。

開閉サージ倍数は、線路の系統構成、亘長、遮断器の種類や中性点接地方式などにより変化するが、電気学会では公称電圧に応じた中性点接地方式とサージ抑制対策の有無で標準化を図っている。

表-1にS61要綱が推奨する開閉サージ倍数を示す。

表-1 開閉サージ倍数（S61要綱）

公称電圧 (kV)	中性点 接地方式	サージ抑制 対 策	開閉サージ倍数	
			対地	相間
66-154	抵抗リアクトル	—	3.3	5.3
187-275	有効接地	—	2.8	4.5
500	有効接地	遮断器抵抗投入	2.0	3.12

表-1における275kV以下の値は、既にS33推奨案で設定されていた値であり、諸外国の基準や検討例を参考にして定められたものである。この値はその後の送電線の良好な運転実績からS41要綱およびS61要綱に引き継がれ、現在も275kV以下の送電線の設計に用いられている。

500kV送電線に関する開閉サージ倍数の研究は、電力中央研究所の「送電機能研究委員会」^{11) 12)}（1962（昭和37）年5月送電系統機能研究会として設立、1965（昭和40）年10月改称。以下、送電機能委員会という）内で400～500kV級送電の技術的可能性を追求する中で行われた。

送電機能委員会では、国内外の実系統データの分析、モデル系統における種々の予測計算を実施し、結果、サージ抑制のための抵抗投入型遮断器の採用を前提に500kV送電線の開閉サージ倍数として1966（昭和41）

年9月に2.2倍（対地）を推奨した¹¹⁾。この値は当時の500kV送電線の設計に用いられている。さらに送電機能委員会では引き続き検討を進め、1969（昭和44）年3月には2.0倍を推奨した¹²⁾。以後、後者の値が500kV送電線の設計に用いられている。

なお、東京電力では1000kV送電線の設計にあたっては、高性能避雷器を設置して開閉サージ倍数を1.6倍まで抑制し、鉄塔のコンパクト化を図っている。

4.3. フラッシュオーバー特性と絶縁間隔

開閉サージ倍数から内部過電圧の大きさが定まると、それに耐える大気の間隙距離（気中ギャップ）やがいし個数を定める必要がある。ここでは気中ギャップのフラッシュオーバー特性とそれに基づく絶縁間隔の設定の考え方について概説する。

気中ギャップのフラッシュオーバー特性は、周囲物体の大きさや電極形状の影響を受ける。このため絶縁間隔はアークホーン間および電線・鉄塔間のフラッシュオーバー特性試験結果等に基づき設定される。例として導体一塔体間の開閉インパルス注水耐電圧特性¹⁰⁾を図-9に示す。

図-9 気中ギャップの開閉インパルスフラッシュオーバー特性

図-9に示すように一般にフラッシュオーバー電圧は50%値（ V_{50} ）で表現され、その変動係数は開閉インパルスの場合5%程度と評価されている。そのため絶縁設計にあたっては気中ギャップの耐電圧としては50%フラッシュオーバー値から電圧に応じて変動係数の2～3倍を差し引いた値（0.90～0.85の耐圧係数を乗じた値）で評価している。なお、耐電圧には標高を考慮した補正も行われる。

想定した内部過電圧（開閉サージ電圧）に対して電線・鉄塔間でフラッシュオーバーを起こさせない気中間隔を最小絶縁間隔という。

S61要綱が推奨する各電圧階級の最小絶縁間隔を表-2に示す。鉄塔装柱設計にあたっては、充電部・鉄塔間に最小絶縁間隔以上の離隔を確保することが必要になる。

表-2 最小絶縁間隔

公称電圧(kV)	66	154	275	500
最高許容電圧 (kV) *	72	168	300	550
開閉サージ倍数	3.3	3.3	2.8	2.0
開閉サージ波高値(kV)	194	452	686	898
最小絶縁間隔(m)	0.45	1.10	1.80	2.70

* 最高許容電圧：送電系統の運転電圧は負荷の大小や線路中位置によって異なるので設計にあたってはこれを考慮している。

最小絶縁間隔は内部過電圧に対して設定したものである。雷撃による外部過電圧に対してはフラッシュオーバーが発生する可能性がある。しかし雷によるフラッシュオーバーはできるだけ電線・鉄塔間での発生を避け、アークホーン間で起こさせる方がアークによる電線損傷等を防止できるので、保守上好ましいと言える。

この目的で定めたのが標準絶縁間隔である。雷撃によるフラッシュオーバーを確実にアークホーン間で発生させるには、標準絶縁間隔としてアークホーン間隔を10%程度以上割り増しした値を採用する必要があり、S61要綱では、以下の式で標準絶縁間隔を設定することを推奨している。

$$l = 1.115Z + 0.021 \quad \cdots (1)$$

ここに l ：標準絶縁間隔(m)

Z ：アークホーン間隔 (m)

当然のことながら、アークホーン間隔は想定開閉サージ電圧に対しフラッシュオーバーを起こさない間隔（最小アークホーン間隔）以上で設定される。

一般に500kV送電線などの重要基幹送電線の設計にあたっては落雷頻度マップ等から当該送電線の雷事故率の予測計算を行い、この結果も参考にしてアークホーン間隔が設定される。

以上の最小絶縁間隔、標準絶縁間隔の他にも常規商用周波電圧に対してフラッシュオーバーを起こさないための絶縁間隔も設計には用いられる。これを異常時絶縁間隔と呼ぶ。

5. 風による横振れと絶縁設計⁹⁾¹⁰⁾

5.1. 風速レベルと各絶縁間隔との組合せ

前章において標準絶縁間隔、最小絶縁間隔および異常時絶縁間隔の各絶縁間隔を定める考え方について述べた。

しかし懸垂がいし連やジャンパ装置は風によって動揺するので、これらがどのような横振れ状態にあるときにどの絶縁間隔を保持するのか決定しないと支持物との間の相互関係は決まらない。想定される最大風速に対し、がいし連の横振れと標準絶縁間隔を組み合わせれば、電線・鉄塔間でのフラッシュオーバーは起こり得ないが、これでは鉄塔の大型化を招き非常に不経済な設計となる。そこで、各絶縁間隔とこれらに対して起こりうる風速を適切に組み合わせ、装柱設計を行うことになる。

ここで問題となるのが、雷害が発生するときのどの程度の風速を想定するか、開閉サージが発生するときのどのような風速を想定するか、という点である。

このためには発雷時の風速データの分布や開閉サージ電圧やその発生頻度の分布を知ることが望ましいが、我が国では従来、経験的に次の値が用いられてきた。

風速 10m/s 以下 : 標準絶縁間隔

風速 20～25m/s 以下 : 最小絶縁間隔

風速 40m/s 以下 : 異常時絶縁間隔

各絶縁間隔に組み合わせる風速レベルが決定すれば、それに対応するがいし連やジャンパの横振れ角度の計算を行い、クリアランスを検討することになる。以下、懸垂鉄塔を例にして、この検討手順について述べる。

懸垂がいし連の横振れ角の検討に一般に用いられるのは次の簡便式である。

$$\tan \eta = \frac{W_w S_m \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2T \sin \frac{\theta}{2} + \frac{I_w}{2}}{W_c S_m + T \sum \tan \delta + \frac{I}{2}} \quad \dots(2)$$

ここに η : 懸垂がいし連の横振れ角 (°), W_w : 電線の単位長風圧(kgf/m), W_c : 電線の単位長重量 (kgf/m), S_m : 荷重径間 = $(S_1 + S_2)/2$ (m), θ : 水平角 (°), T : 風速 V 時の電線張力(kgf), I_w : がいし連の風圧(kgf), I : がいし連重量 (kgf), $\sum \tan \delta$: 電線垂直角 ($=h_1/S_1 + h_2/S_2$), S_1, S_2 : 両側径間の径間長 (m), h_1, h_2 : 両側径間の高低差(m)

(2)式の上辺は電線およびがいし連への風圧と水平角度による張力の水平分力の和でがいし連を横振れさ

せようとする力、下辺は電線およびがいし連の重量と張力の垂直分力の和で、がいし連に加わる垂直方向の成分である。

電線やがいしの単位面積あたり風圧値の算出にあたっては、(3)式によって静的に計算したものをを用いている。この際、一般に抗力係数としては単導体 : 1.0, 多導体 : 0.9, がいし : 1.4 が用いられる。

$$q = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 \quad \dots(3)$$

ここに q : 単位面積あたりの風圧 (kgf/m²)

C_d : 抗力係数, ρ : 標準大気密度 (kg・s²/m³)

V : 風速 (m/s)

(2)式から判るように、懸垂がいし連の横振れ角は、径間長や水平角度、前後径間の支持点高低差の影響を受けるために、風速が同じであったとしても、横振れ角は同じにはならない。個々の鉄塔を最もコンパクトにするためには、鉄塔毎に横振れ角に対して必要なクリアランスを確保すれば良いが、それでは、鉄塔設計および製作が非常に煩雑になり、線路全体としての経済性および美観が損なわれる。

そこで通常はあらかじめ、適当にがいし連の横振れ角を定めてクリアランスダイアグラムを作成して鉄塔形状を定め、次に各鉄塔の懸垂がいし連の横振れ角が作成したクリアランスダイアグラムの範囲内にあるかチェックする手順が採られる。範囲内にあれば、この懸垂鉄塔を使用しうるし、範囲外であれば他の懸垂鉄塔か耐張鉄塔を用いることになる。

5.2. クリアランスダイアグラムの作成方法

クリアランスダイアグラムの作成方法として、ここでは懸垂鉄塔を例にS41要綱およびS61要綱に示された方法を紹介する。両者の主な違いは風速レベルと絶縁間隔の組合せ方法にある。電力各社はこれらのいずれかを用いるか、あるいは両手法を適宜組み合わせたクリアランスダイアグラムを作成して設計を行っている。

図・10、図・11にS41要綱およびS61要綱が推奨する懸垂鉄塔のクリアランスダイアグラムをそれぞれ示す。S41要綱は標準絶縁間隔と最小絶縁間隔に基づいてクリアランスダイアグラムを作成することを推奨しており、異常時絶縁間隔については「40m/sの風は発生頻度が少ないし、風の規模効果を考えると一般には異常時による制限は考えなくて良い」としている。

一方、S61 要綱ではクリアランスダイアグラムに最小絶縁間隔を考慮することを省略し、標準絶縁間隔と異常時絶縁間隔によりクリアランスを検討する手法を推奨している。異常時絶縁間隔に対応させる風速レベルとしては、従来設計プラクティス通り、風速 40m/s と考える場合と「送電用支持物設計標準 (JEC127-1979)」¹³⁾の地域別速度圧をベースに上空通増とガストファクタを考慮する手法の両方を提案している。

S61 要綱におけるクリアランスダイアグラムの見直しは、1981 (昭和 56) 年 4 月に設立された架空送電線路絶縁設計調査専門委員会 (以下絶縁調査委員会という) の研究報告¹⁴⁾の成果を取り入れたものである。

絶縁調査委員会では開閉サージ電圧や風による横振れおよびフラッシュオーバー特性等を確率分布ととらえて、500kV 送電線をモデルに開閉サージによるフラッシュオーバー確率計算を試みた。その結果、開閉サージによるフラッシュオーバー発生の許容レベルを 1 回/50 年程度とするのであれば、従来のクリアランス決定手法は開閉サージに対して十分余裕があることを見いだした。

これを受け S61 要綱では、絶縁調査委員会と同様の手法で各電圧階級の開閉サージフラッシュオーバー確率計算を実施、風速 20m/s 程度の横振れ角と最小絶縁間隔との組み合わせを省略しても開閉サージフラッシュオーバー確率は前述の許容レベルをかなり下回ることを確認し、新たなクリアランスダイアグラムを提案したのである。

5.3. フラッシュオーバー確率計算方法の概要¹⁴⁾

開閉サージの大きさは遮断器投入時の電圧位相や開閉線路の残留電圧などの可変的要因に左右されるので、遮断器の開閉操作毎に値が異なり、本質的に確率的性質を持つ。一方、がいし連やジャンパの横振れも風により引き起こされる現象であるので、風速分布の影響を受ける。またフラッシュオーバー特性も先述の通り 5% 程度の変動係数を有するものである。フラッシュオーバー確率を算出するためには、これらの確率密度関数を設定することが必要になる。

絶縁調査委員会では、開閉サージフラッシュオーバー確率の算出にあたり、国内外の開閉サージ実測データや送電機能委員会の解析データなどを整理し、正規分布を仮定して一般的条件の送電線に適用できる開閉サージ倍数分布を提案した。提案された分布は $\mu + 3\sigma$

(μ : 平均値, σ : 標準偏差) が従来から用いている開閉サージ倍数と等しくなるよう設定されている。

一方、風速分布については菱田厚氏氏が提案する次式を用いた。この際、全国 83 箇所の気象官署の風速分布を調べ、菱田氏が十分実用できるものと判断している。

$$P(>V) = (1 + \alpha \cdot V) \exp(-\alpha V) \cdots (4)$$

ここに $P(>V)$: 風速 V 以上が発生する確率

$\alpha = 2/\bar{V}$, $\bar{V}$: 長期の平均風速 (m/s)

この菱田式は長期間の平均風速が知れば、風速分布が定まる簡便な式であり、1964 (昭和 39) 年の電気協同研究 (以下、電協研という) 第 20 巻 3 号「塩害と気象」¹⁵⁾で引用されて以来、電力分野では比較的良好に利用されている。

絶縁調査委員会では菱田式で設定した風速分布を 5.1 節の(2)式によって懸垂がいし連の横振れ変動分布

L_g : がいし連長 b : $(a+c)/2$
 a : 標準絶縁間隔 c : 最小絶縁間隔

図・10 S41 要綱のクリアランスダイアグラム

L_g : がいし連長, a : 標準絶縁間隔, b : 異常時絶縁間隔

図・11 S61 要綱のクリアランスダイアグラム

の絶縁間隔を保つようにする手法が用いられている(図・13)。nの値は通常、2~3が採られる。

図-13 電線配置の検討方法

5.4.3. 吉岡、松林らの相対的横振れ検討手法¹⁸⁾

図-13 の電線配置決定手法は、電線 1,2 の横振れ変動が完全逆相関であることを仮定したものであり、実際の離隔は図-13 の評価値よりも大きいと考えられる。

吉岡，松林らはこのことに注目し，同一径間の 2 条の電線(電線 1,2)に作用する風の相関性を表す指数として，(6)式の低減係数を定義した。相対変動の標準偏差はこの低減係数を電線 1,2 の横振れ変動の標準偏差の 2 乗和平方根に乗じて求める。

$$\text{低減係数} = \sqrt{1 - \exp \left\{ - \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{L_s} \right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{L_s} \right)^2} \right\}} \cdots (6)$$

ここに Δx : 電線 1, 2 の平均水平距離, Δz : 電線 1, 2 の平均垂直距離, L_x : 風向方向の乱れのスケール (m), L_z : 鉛直方向の乱れのスケール(m)

吉岡，松林らは数賀試験線での観測で $L_x=90\sim 120$ mとした場合の相対横振れ角の計算結果が実測と比較的よく一致することを報告している¹⁸⁾。

図・12 水平線間距離の検討方法

6. 塩害汚損に対する絶縁設計

架空送電線のがいしが海塩などで汚損されると耐電圧が大幅に低下する。例えば 250mm 懸垂がいし 1 個の耐電圧は乾燥時 80kV であるが、 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ の塩分が付着し、それが十分湿潤した時は、10kV 程度になる。したがって設計にあたっては当該地域の塩分付着量を適切に想定する必要がある。本章では架空送電線の塩害対策ならびに海塩汚損の特徴を簡単に紹介する。

6.1. 塩害に対する取り組み

我が国では古くから塩害事故がしばしば発生し、対策が検討されてきたが、1961（昭和 36）年に第二室戸台風により空前の大塩害事故が発生したため、電協研により対策検討が行われ、1964（昭和 39）年に「送

変電設備の塩害対策¹⁹⁾が纏められた。また送電機能委員会では 500kV 送変電設備の耐塩害設計確立のための調査研究を実施し、1969 (昭和 44) 年に研究報告その 6「500kV 送変電設備の耐塩害設計」²⁰⁾を取りまとめた。これらの研究で海塩汚損の特徴やがいしの汚損耐電圧特性が明らかにされ、電力各社はこれらを参考にして送電線の塩害対策設計を進め、結果、近年の塩害事故は激減している。

6.2. 海塩汚損の特徴

台風や季節風に運ばれて海塩粒子が飛来し、短時間にがいしが汚損される現象を急速汚損と称している。

降雨のない時の急速汚損時の塩分付着密度は、海風平均風速の 3 乗の時間積分値との間に強い相関性があることが認められている²¹⁾。また海岸からの距離が大きくなれば、付着密度は小さくなることが知られている¹⁹⁾。

電協研では塩害事故実績および各地での汚損実測結果より塩分付着密度と海岸からの距離の関係を求め、汚損区分の概略値¹⁹⁾を示しているが、塩分の付着は気象、地形の影響を大きく受けるので、実際の設計にあたっては、各電力毎に事故実績や観測データ等に基づく汚損区分を設けて設計を実施している。

関東地方における塩害汚損区分図を図-14 に示す。

図-14 汚損区分図

7. むすび

以上、架空送電線の絶縁設計における対風設計について電線やがいし連の挙動および塩害汚損の観点から紹介した。

架空送電線は様々な地形や粗度の箇所を越えて長距離に亘って構築されるものであり、その設計法は極力簡便であることが望まれる。現在の絶縁設計手法はシンプルかつ長期間の運転実績の裏付けがある信頼性の高い手法であるが、今後ともこの信頼性を維持・向上しつつ、最新技術を導入して、一層の合理化を実現していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 電気事業連合会ホームページ <http://www.fepc.or.jp>
- 2) 送電工学改訂版, 電気学会
- 3) 今川三郎, 宮地巖, 平野忠男: 改訂送配電工学 7, コロナ社
- 4) 電気設備技術基準
- 5) 赤木他, 電線から発生する風音及びコロナ騒音対策技術, CIGRE SC22 仙台会議コロキウム論文集, 平成 9 年 10 月
- 6) 西健: 送電系の絶縁, 電気学会編, 工学館発行, 昭和 23 年 10 月
- 7) 法貴四郎, 三田昇: 絶縁と閃絡防止, オーム社, 昭和 26 年
- 8) 送電専門委員会: 送電線の絶縁設計標準推奨案, 昭和 33 年
- 9) 送電専門委員会, 送電線絶縁設計分科会: 架空送電線の絶縁設計要綱, 電気学会技術報告 (I 部), 第 76 号, 昭和 41 年 10 月
- 10) 送電線絶縁設計要綱調査専門委員会: 架空送電線の絶縁設計要綱, 電気学会技術報告 (II 部), 第 220 号, 昭和 61 年 5 月
- 11) (財)電力中央研究所 送電機能研究委員会: 里側 500kV 送電, 500kV 送電に関する研究報告その 1, 昭和 41 年 9 月
- 12) (財)電力中央研究所 送電機能研究委員会: 500kV 系統の運転電圧ならびに開閉サージ, 500kV 送電に関する研究報告その 4, 昭和 44 年 3 月
- 13) 電気学会 電気規格調査会: 送電用支持物設計標準 JEC-127-1979, 電気書院
- 14) 架空送電線絶縁設計調査専門委員会: 開閉サージフラッシュオーバー確率計算手法ならびに関連する諸問題, 電気学会技術報告 (II 部), 第 176 号, 昭和 59 年 10 月
- 15) 塩害対策専門委員会気象小委員会: 塩害と気象, 電気協同研究, 第 20 巻第 3 号, 昭和 39 年 4 月
- 16) 大月: 架空送電線の風圧と運動の研究, 藤倉電線技報, No.26 (昭和 39 年 4 月)
- 17) 大月: 架空送電線の風圧と運動の研究 (第 2 報), 藤倉電線技報, No.31 (昭和 40 年 8 月)
- 18) 吉岡他: 送電線の装柱設計に関する研究, 住友電気, 第 120 号 (昭和 57 年 3 月)
- 19) 塩害対策専門委員会送変電分科会: 送変電設備の塩害対策, 電気協同研究, 第 20 巻第 2 号, 昭和 39 年 4 月
- 20) (財)電力中央研究所 送電機能研究委員会: 500kV 送変電設備の耐塩害設計, 500kV 送電に関する研究報告その 6, 昭和 44 年 3 月
- 21) 変電設備耐塩設計専門委員会: 変電設備の耐塩設計, 電気協同研究, 第 35 巻第 3 号, 昭和 54 年 9 月