

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 11 回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回は電力系統に発生するさまざまな現象（異常現象）とそれらから電力系統を守る考え方や仕組みの概要を紹介します。

なお、全体的な説明をするため、過去の解説とやや重複しているところがあります。

○電力系統を守るとは

「守る」イメージはいろいろあると思いますが、ここでは、電力系統に発生する様々な現象に対し、①電力系統の電力供給機能を維持する、②設備を損壊させない、③設備損壊の影響をある程度以下に留める、としています。

・電力系統が遭遇するさまざまな現象 (図 11 回-1)

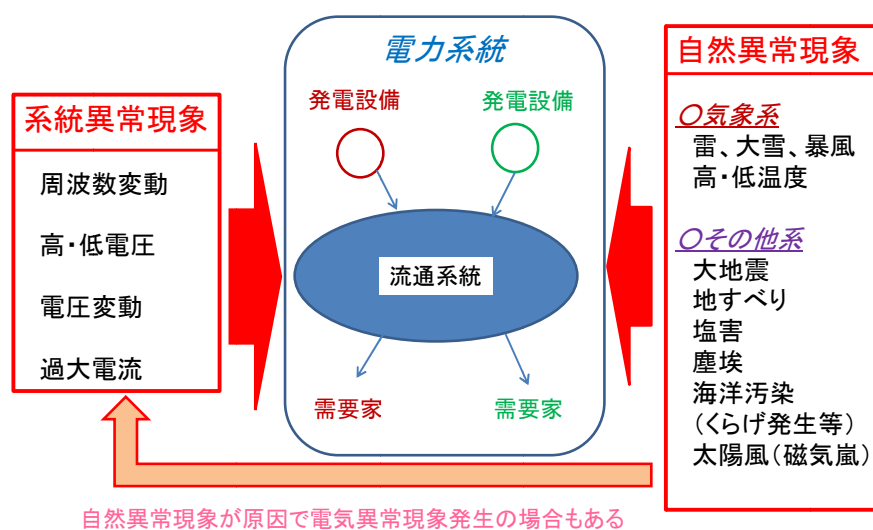


図 11 回-1 電力系統が遭遇する異常現象

電力設備は常に自然現象に晒されています。気象で言えば、落雷、高温、低温、大雪、大雨、強風（これらは複合することもあります）、その他の自然現象では、大地震、津波、地すべり、塩害、塵埃汚染（大気汚染を含む）、海洋汚染（くらのげの大量発生等）、太陽風等が異常を及ぼす現象です。以下ではこれらを自然異常現象と呼びます。

一方、電力系統運転中に電力系統内では様々な電気現象が発生します。周波数変動、高電圧、低電圧、過大電流などがあり、電圧・電流現象には、商用周波数（50 Hz、60 Hz）、それより高い周波数、低周波数（周波数領域と言います）での現象が発生します。（電圧変動は第 10 回参照）

以下ではこれらを系統異常現象と呼びます。

(1) 電力系統の守り方：設備が壊れる場合の対応 (図 11 回-2)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

電力系統では、自然異常現象に対し、ある程度設備が壊れる（機能が停止する）を前提に電力系統全体の機能を維持するとの考え方です。自然＝神様と考えると、そもそも人間の力で（必ず）自然がもたらす現象に全て打ち勝つのは困難、がベースにあります。この考え方から電源設備では一定の電源予備力確保（第6回解説）、流通設備ではN-1基準適用（第8回解説）が図られます。なお、流通設備でも、配電系統等では通常N-1基準は適用しませんが、電源車（臨時に電気供給を行う移動発電設備）配置等、N-1基準に準じて対応されます。

この考え方を適用しても、設備が多数・同時に壊れると「停電（＝機能低下）」しますから、設備を有る程度「頑丈」にすることも必要です。普通、設備を頑丈にするほどコストは増えますから、異常現象の発生確率と壊れる確率を総合的に評価し頑丈さが決められます。一方、異常現象が多く設備で同時に起こらないよう設備の分散化等の設備配置（分散配置等）の工夫もされます。

異常現象に対し全体機能を維持できる「度合い」を信頼性と言いますが、電力系統の信頼性は、電力系統の作り方（分散配置等）、運用の仕方（N-1基準等）と設備個々の信頼性（頑丈さ）が合わり決まる訳です。家庭で言えば、地震の起きにくい（とされる場所）に家を建てるのが「電力系統の作り方」、家の構造を頑丈にするのが「個々の設備の信頼性」、寝床に背の高い家具を置かない、が「運用の仕方」で、総合してその「家」の地震に対する安心さ（信頼性）が決まるイメージです。信頼性の高低で電力系統に必要な費用が変わり電気料金に影響します。ちなみに電気料金を下げるには「信頼性低下」が手っ取り早い？のですが、「信頼性の安易な低下」へ誘惑されない注意が電力技術者に必要と思います。電力系統の信頼性は判りにくい面がありますが、電気料金や停電のし易さ等生活に直結しますので、時には関心を持っていただければと思います。

(2) 電力系統の守り方：設備が壊れない場合の対応

電力系統では、設備が壊れなくても供給機能停止（＝停電）が発生します。発端は、主に周波数、電圧、電流に関する系統異常現象です。

・系統異常現象への対応：周波数（図11回-3, 4）

周波数が同じ交流電力系統で、周波数がある程度上昇又は低下すると（通常3%程度以上）、系統全体が停止する場合があります。周波数は、発電と需要がインバランスになると変動しますが、まず、発電設備の出力（kW）制御でバランス維持を図ります。（第5回参照）周波数が異なる地域が周波数変換設備などで連系される場合も、連系設備を緊急制御し異なる地域間の発電設備が協力します。

周波数低下の場合（需要＞発電）、発電電力が増加されますが、それでも不足する場合や増加速度が十分でない場合、需要遮断制御（強制停電）をします。

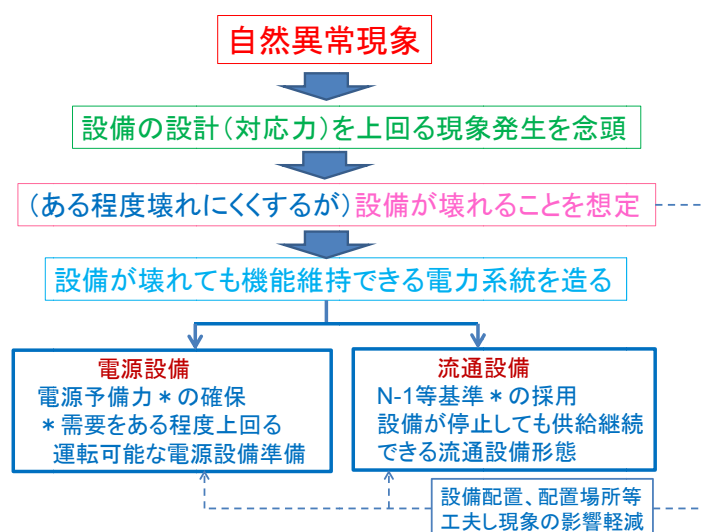


図11回-2 電力系統の守り方：

(1) 電力設備が壊れる前提の設備作り

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

どの程度の需要遮断を準備するか「定説」はありませんが、ある国の電力システムアドバイスをした際、先方要望は全需要の80%遮断でした。「80%も停電させて電力システムを守っていると言える？」と疑問かも知れませんが、20%でも需要供給が続けられると、電力システムをゼロから回復させるのに比べ復旧スピードなどに大差が出ます。これは、例えば、火力発電設備は止める時間が長くなる程設備が冷えてしまい再発電までに(暖める等)長時間を要するなど復旧が遅れる要因が増すため、低出力でも運転を続けることが重要となります。一方、流通設備では、変圧器の場合、一旦、停まると再使用の際、過渡的に大きな電流が流れる現象(励磁突入電流：インラッシュ電流)が生じるため種々の対策をしてから再使用する必要があり、少しの需要でも変圧器の運転継続が望ましいです。更に、電力システムでゼロから供給を開始する際、広範囲システムから開始するのは電圧維持等が難しく、小範囲システムから徐々に拡大する必要があり、このための時間が必要になります。このため、20%でも電力供給が維持されている方がゼロから開始するより遥かに供給回復が容易となります。

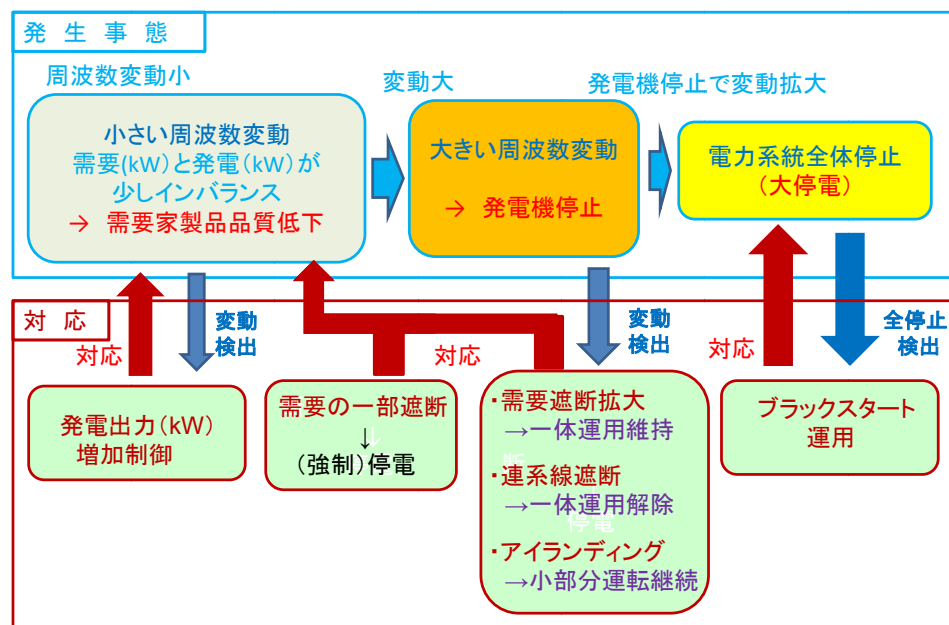


図 11 回-3 周波数変動への対応イメージ (周波数低下対応)

ちなみに、ゼロスタートから電力システムの供給を拡大してゆくプロセスは、ブラックスタートと呼ばれ、たいがい高度なノウハウが必要になります。(図 11 回-4)

以上のように、需要の80%を停電しても系統運用者は「電力システムを守れた！」と感じるのですが、社会的な反応(マスコミ等?)は「大停電を起こした！」方に目が向き厳しいものになると思います。

なお、同一周波数の電力システムであっても、全体へ異常が波及し全停止となるリスクを減らすため電力システムを部分的(部分と言っても複数国からなる系統ではそのうちの1国全部を停止させる場合もある(第5回参照))に停止する対応もされます。これも「電力システムを守る」重要な手段です。

また、積極的にある地域だけ電源と見合う需要で孤立させてそこだけ供給を続ける場合があります。(アイランディング制御：アイランドとは島の意味ですが、文字通り電力システムに「八丈島?」を作りそこだけは電気供給を維持するイメージです)(図 11 回-5)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

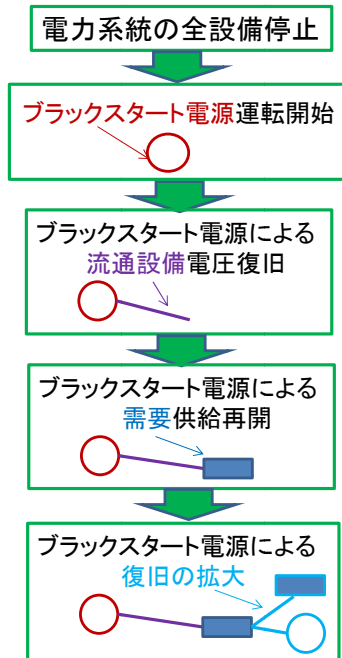
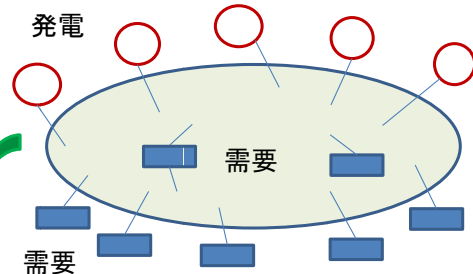


図 11 回-4 ブラックスタート

通常運転: 発電・需要全体連系し一体運用



アイランディング: 特定発電+特定需要で運転

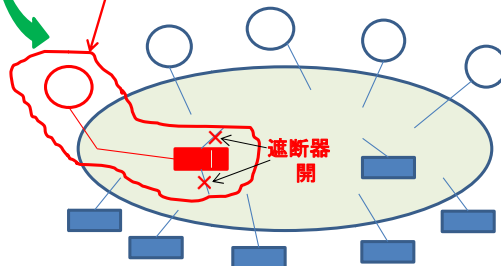


図 11 回-5 アイランディング制御

・系統異常現象への対応：電圧

電圧に関する異常現象は、通常、狭い範囲で生じ、その近辺で対応すれば異常は解消します。ところが条件が重なると大規模異常現象へ発展します。

電圧が低下すると、同じ電力 (kW) を送るのに電流が増えます。このため電圧／電流の比が小さくなりますが、電気事故（通常電圧が下がり、大きな電流が流れる）に近い比率になると電気事故除去システム（距離リレー）が動作し設備を停止させます。このような設備停止が生じると電圧低下の影響が更に拡大し結局大規模な停電へ発展する場合があります。海外の大停電も往々にしてこのような過程から発生しています。

一方、電圧が上昇しそれぞれの設備が壊れる危険レベルに近くなると各設備の保護システム（過電圧リレー）が動作し設備を停止します。この時、例えば、発電設備が停止すると、需給バランスが崩れて周波数異常現象（低下）へと発展し大停電となる場合があります。

電圧に関する系統異常現象対策として、電圧低下、上昇を抑制する無効電力発生設備（リアクトル、コンデンサ、同期調相機）が設置されます。また、その動作を高速化に行う機器（FACTS 機器：Flexible AC-Transmission System 機器）が設置される場合もあります。更に、需要遮断制御（停電になりますが）や電源遮断制御で電圧を維持する場合があります。

・系統異常現象への対応：電流

電気が使われ過ぎたり設備停止で電気が偏って流れたりする等で電流が異常に大きくなる場合があります。また、設備事故や雷で普段の数倍以上の電流（事故電流）が流れる場合もあります。（第7回参照）

設備には電流の流せる限度と時間（通常、熱容量と呼ばれます）があり、それを超えると壊れま

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

す。設備を壊さないため熱容量超過前に各設備の保護システム（過電流リレー）が動作し停止します。保護システムでは、大きな電流では早めに、小さい電流では遅めに動作します。（反限時特性と呼ばれる）なお、ヒューズも大電流から設備を守るシステムですが、瞬時に動作し限時特性は殆ど有りません。結局、設備は壊れなくても「壊れるのを防ぐため」設備の機能は停止します。なお、熱容量超過のストレスが比較的ゆっくり大きくなる場合、保護システムではなく系統運用者の判断で停止される場合もあります。ループ系統やメッシュ系統（第3回参照）では、過電流対策としてある設備を停止させるとその点の大電流はなくなりますが、他の部分を通して電流が流れ、大電流箇所が拡大する場合があります。これに伴い、過電流対応で更に設備停止が停止し（CASCADING現象：将棋倒しのイメージです）、対応を誤ると大停電となる場合があります。（図11回-6）この現象でも各国で大停電が発生しています。対応するため必要に応じ需要遮断制御や電源遮断制御が行われます。

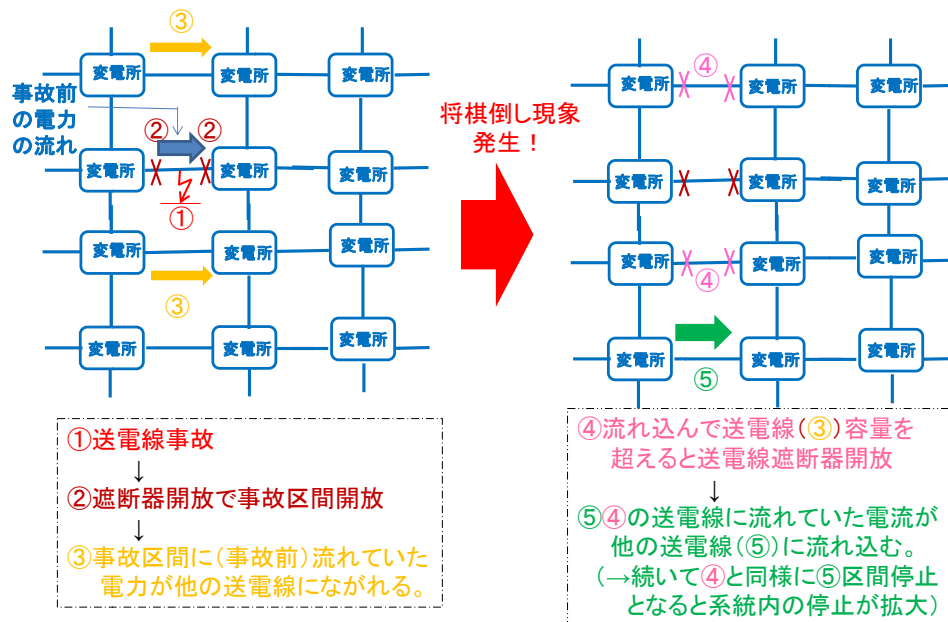


図11回-6 電力系統での将棋倒し（CASCADING）現象

・系統異常現象への対応：安定性

電力系統は、需要設備、発電設備、流通設備がそれぞれの役割やニーズを適切に果たすため制御されています。電力系統内での何かのきっかけで（例えば雷事故）、それらの制御がうまく折り合わなくなると（いわば喧嘩するイメージ）、電圧、電流、発電出力が変動、更にその変動が拡大し、場合によっては、電力系統の大きな部分（最悪、電力系統全体）が停止します。この現象は、電力系統が複雑なシステムであるため理論的な分析が難しく、計算機で模擬シミュレーションし発生の可能性や対応策等を検討する必要があります。電力技術に関する書籍では簡単モデルでの安定性が説明されますが、実際の電力系統は遥かに複雑ですので、経験を積みながらノウハウを学ぶ必要があります。安定性で問題がある場合の解消方法や影響削減対策は豊富！にあります。適切に適用するには、やはりノウハウが必要です。

・系統異常現象への対応：共振（図11回-7）

ブランコを少しずつ漕いでゆくと、それ程力を入れなくてもだんだん揺れが大きくなります。これは、ブランコにはある周波数（力を加える時間間隔のイメージ）で揺れやすい特徴があり（固有

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

周波数と言います)、それに合わせて力を加えるとどんどん揺れが大きくなるためです。この現象を共振といいます。

電力系統では、電氣的に「揺れやすい性質」が種々あり、例えば、1万分の1秒以下で振れる周波数に対応する固有周波数で電圧が揺れる特性を持つ変電設備、発電機同士で数秒の固有周波数で出力が変動する特性が生じる場合等があります。「揺れ」が止まらず更に拡大するのが共振(現象)です。この際、拡大した段階で高電圧や大電流が発生したり、前述の安定性問題へ発展したりして、電力設備・系統運用や設備耐力を脅かす場合があります。なお、高調波(第10回解説)でも共振現象が発生する場合があります。この現象自体で大停電になることは少ないと思いますが、引き金になる場合があります。(共振が発生していても、いろいろな周波数(揺れ)が混じりなかなか判りにくい)

電力系統で共振現象を事前に想定することは難しく、前兆現象や一部の設備が壊れる等を経て確認できることが多いです。このため過去の経験を蓄積しつつこの可能性を念頭における、いわば「感度の高い」技術者を育成することが大切です。

対応策としては、固有周波数を変化させる(ブランコでは、ひもの長さを変えると変えられます)、共振作用を減じる成分(制動分)を増す(ブレーキを付けるイメージ)のが効果的で、種々具体策はありますが、電力系統は複雑ですのでなかなか理論どおりの効果が発揮されない場合もあります。(これも1冊の本ができますし、常に課題が出てきますが専門的過ぎますので省略します)

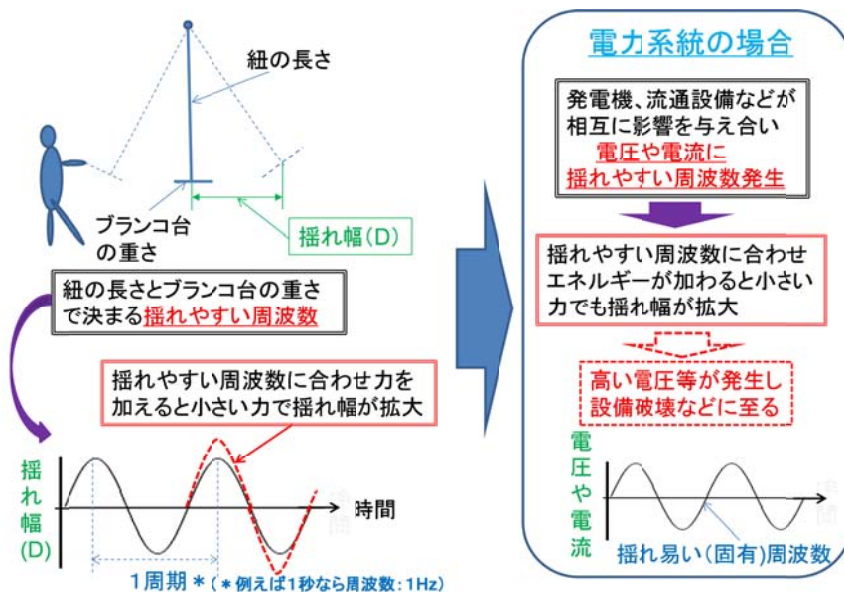


図 11 回-7 共振現象のイメージ

(余談) 津波と共振

津波はゆっくりした満ち引きと、比較的短い時間の満ち引きが組み合わされて大きな波が最初の波の襲来後にくる場合があります。(いわきで経験しました)これは、例えば、地震発生点と陸の間(多分、ゆっくり)、湾の中の陸と陸の間(多分、早い)で、ある時間間隔(固有周波数)で波の行き来を繰り返す、丁度うまく重なった時に大きな波が発生する、いわば共振現象の一種と感じました。いづれにしても固有周波数はいろいろなところにあります。例えば、経済で有名な「景気に関するコンドラチェフの波」(50年周期)も解析すれば、固有周波数の考え方を適用できるのではと期待?しています。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・「壊れ易さ」をどの程度のレベルとする？

自然異常現象に対し、ある程度までは設備を壊さない作り（設計）としますが、逆に言えば上回る現象では設備は壊れます。電力系統では「設計の想定を上回る現象はある」が前提ですから、「想定外」はないとも言えます。設計する際の異常現象の発生想定は、数十年に一度が一般的と思いますが、原子力設備は数万年（または以上）に一度です。想定を上回る現象の発生は前提ですから、上回った場合どうするかが電力系統システムとの課題となります。この際、結局、「対応にお金がかかり過ぎるのでシステムとして何もしない」との判断もありえます。ただし、その場合でも壊れても安全を維持できるか、壊れた際の早期復旧をどう図るかの検討が必要となります。

（余談）万が一の事態でも大丈夫?! にどう答える

前記の考え方は、基本的に欧米流と思います。設備が壊れる状況（通常、リスクと呼ぶ）は必ずあり、そのリスクをどの程度に「収めるか」かは、影響度も考えながら社会（会社なら経営陣）が判断するとの考え方です。電力系統関連技術は欧米で発展し日本に取り入れられた経緯があり、個人的には、日本的な感覚には合いませんが、「なるほど」とは感じました。

一方、日本では、「万が一」の言葉が広く使われ「万一に備える」等といわれますが、これは「数学的な1万回に1回」の事態に備えるのではなく、なんとなく「まずあり得ないことが起きて大丈夫」の意味で使われます。この場合、「まずあり得ないこと」が一体どの（確率的）レベルか曖昧で、「万が一の事態でも大丈夫か」と問われると技術的には答え様がないので、「適当？」に答えざるを得ません。西欧的な何でも数字化した評価は疑問ですが、「万が一」については、思考様式のある程度の欧米化も必要では？と思います。（第3回余談（連系線論議）もご参考して下さい）

・電力設備を雷から守る：避雷器（図11回-8）

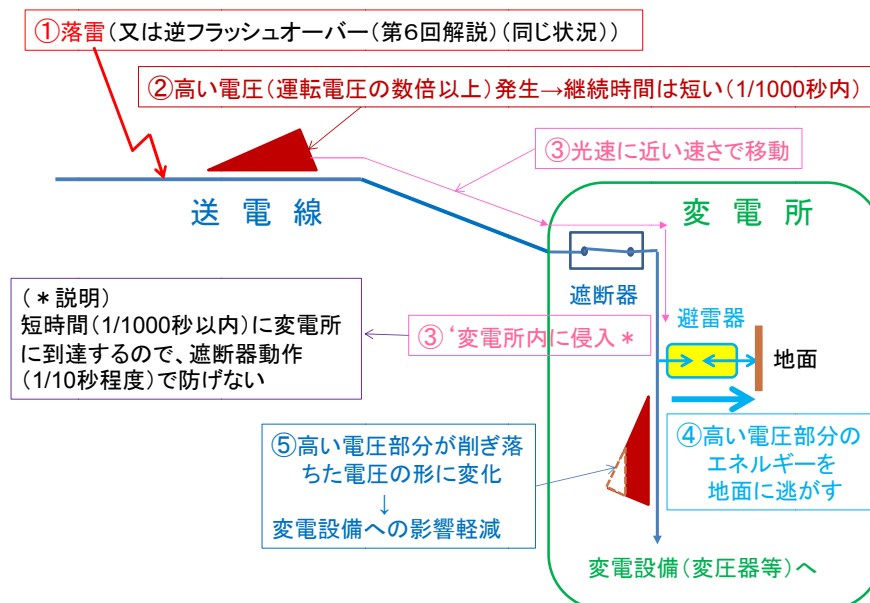


図11回-8 避雷器の役割

雷は昔から電力設備にとって大敵でしたが、近年はそれなりの対応が可能となってきました。大きく貢献しているのは避雷器（Arrestor）の高性能化です。避雷器は、雷によって電力系統内に高電圧が発生すると自動的にエネルギーを地面に流す仕組みとなっていますが、性能が非常に良くな

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ってきました。避雷器を適切な場所に設置することで(計算機で解析し決めます)、雷で設備が壊れる可能性が格段に低下します。なお、Arrestor は「捕まえる機器」と訳せられますから、「捕雷器」が正しいと思いますし、わざわざ雷エネルギーを請け負うので、イメージと合うのですが、「雷を呼び寄せるようなイメージ」を嫌ったのでしょうか「捕まえる」ではなく「避ける」の字が日本では使われます。ちなみに避雷針も捕雷針の方が正しい訳と思っています。

・磁気嵐：高緯度では怖い現象(図11回-9)

磁界が変化するとコイルには、電気が発生します。空の磁界が磁気嵐(原因は太陽の黒点活動)で変化すると地上の電線がコイルの役目を果たし電気を発生します。ちょうど、空と地上で巨大な「変圧器」ができるイメージです。(第8回変電設備参照) 低い周波数(数秒以上)変化で電気が発生すると、特に変圧器に異常を生じる可能性があり、過去に磁気嵐が原因の大停電がカナダで発生しました。緯度が高くなると(北半球では北)磁気嵐の影響が大きいので注意が必要です。対策については、専門的となるためここでは省略します。

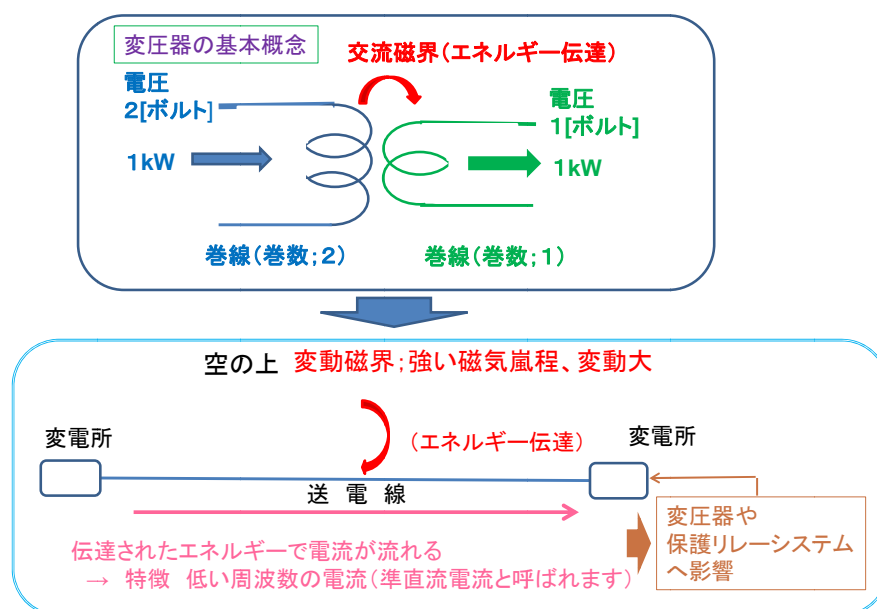


図11回-9 磁気嵐のイメージ

今回は、最終回、トピックとして電力自由化と電力系統、海外との電力系統連系について解説したいと思います。

[超電導 Web21 トップページ](#)