

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

下の目次をクリックするとその回のページが表示されます。

目次

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第1回 電気の基本1 | P1 |
| 第2回 電気の基本2 | P7 |
| 第3回 電力系統の特徴 | P13 |
| 第4回 発電設備1 | P20 |
| 第5回 発電設備2 | P33 |
| 第6回 流通設備 | P44 |
| 第7回 地中送電設備 | P54 |
| 第8回 変電設備 | P60 |
| 第9回 配電設備 | P69 |
| 第10回 需要家設備 | P77 |
| 第11回 異常現象・守る仕組み | P86 |
| 第12回 電力自由化、他 | P94 |

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 1 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

今回から「やさしい電力系統のはなし」を 6~7 回程度に分けて進めていきたいと思います。電力系統は理解しにくいとの定評?がありますが、できるだけ平易に解説していきたいと思います。このため、技術的な厳密性にやや欠ける場合もありますが、「まず基本を理解していただく」ことを目標にしますのでよろしくお願いします。

今回 (第 1 回) は、電力系統を理解するために必要な「電気」の基本的な特徴をおはなしの前半です。

1. 電気のイメージ

○電気：水のイメージで理解する

山に雨が降ると水が流れ川となり海へと流れていきます。
(図 1)

人は、昔は水車、最近では水力発電でこの水のエネルギーを利用してきました。

高い山に降った雨は、低い山に降った雨と比較して大きいエネルギーを持っています。流れの量が多いと少ない場合に比べ大きいエネルギーを持っています。電気を水に例えると、この高さの違いを「電圧」(単位はボルト(V))、流れる量を「電流」(単位はアンペア(A))と呼びます。

山にダムがあるとします。そこに水が溜まるとその水は下流に流れるとエネルギーを生み出します。溜まった水はエネルギーを有している訳です。電気ではこのエネルギー量を電力量 (Wh) と言います。ダムの水が川に繋がっていると出口の水は高さで流れる量に比例した圧力を持ちます。これを電力(W)と言います。この圧力の水を 1 時間流すと溜まっていたエネルギーは減ってしまった水の分だけ減少します。 $W \times 1 \text{ 時間} = Wh$ (h はアワーと発音します。)

1 時間は英語で 1 hour (アワー)、1 を省略すると Wh = 電力量となります。



図 1 水の流れのイメージ

○電力と電力量

電気では、上記の 4 要素、電圧、電流、電力、電力量が非常に重要ですが、電力系統では、言葉の似ている「電力」と「電力量」の違いへの理解が大切ですので、ここで更に説明をします。

電力系統では、発電電力と需要電力のバランス、発電電力量と需要電力量のバランスが重要となります。それぞれの「バランスの特徴」をイメージしていただけると「電力系統の安定な運用」を理解していただき易くなります。

・電力のバランス：綱引きのイメージで

電力は「圧力」と言えますが、電力のバランスは「力がかかる」スポーツである綱引きをイメージしていただければと思います。両方で綱を引き合うと、綱に強い圧力がかかりますが、引き

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

合う力がバランスしていると、周りから綱を見ると何も起こっていない様に見えます。(少しは前後しているでしょうが――)

この時、片方の引き手の数人が綱をひくのを突然やめバランスが崩れると、あっと言う間に一方的に引っ張られていくでしょう。電力系統では、電気を作る側（発電）と電気を使う側（需要）が電力と言う綱を通して綱引きしているとイメージとしていただいても良いのですが、電力系統でもバランスが崩れると、「あっと言う間に一方的に動いてく」状況となります。発電と需要の電力バランスが取れず急速にバランスが崩れる状況を、「不安定な電力系統状況」と呼ばれます。電力系統が不安定になると、あっと言う間に電気エネルギーが望むように流れなくなり、バランスの回復も、綱引きの場合は綱を元の位置に戻し双方引き合い始めるのですが、容易ではありません。具体的な不安定の発生状況とそれを防ぐ対策は次回以降解説します。

・電力量のバランス：水を溜めるイメージ

電力量はエネルギー量です。このバランスを保つとは、発電側で溜めたエネルギー量と需要側で溜めたエネルギー量を等しくすることです。山に溜めたダムの水量とそれが下流に流れて町の近くの貯水池に溜めて使用される水量が同じであれば、バランスが取れている、とのイメージです。電力（圧力）のようにあっと言う間に崩れるイメージは基本的に有りません。

電力量のバランスが崩れると、例えば、ダムの水を使い切ると川は干上がり需要側の水もなくなり、双方ゼロとなってしまいます。電力量のバランスは、時間経過を追いながら確認ができますので、電力バランスと比較すると、予測が可能です。

ここでは、「電力」では時々刻々の発電と需要のバランス維持が重要、「電力量」では将来的な時間経過を想定したバランス維持が重要であることを理解していただければと思います。それぞれのバランス維持を図るため電力系統では種々の対策を講じますが、次回以降順次説明して行きます。

2. 交流と直流

電気の送り方（川の流れ方のイメージ）には、交流と直流があります。

交流は「川の流れ」では全く説明できない流れ方です。このため、直流より交流に重点を置いて説明します。

○直流：水が流れるイメージ

直流は、時々刻々の電圧、電流を一定にし、エネルギーを流す方法です。(図 2)

たとえば、電圧が一定の 10 V、電流が 10 A の電気が流れるとします。

圧力（電力）は電圧 × 電流 = 100 VA = 100 W となります。

「電力」は電圧が大きい程、電流が大きい程大きくなります。

これを 1 時間流したときに送れる（送電する）エネルギー量は、

$100 \times 1 \text{ (時間)} = 100 \text{ Wh}$ となります。

「電力量（エネルギー量）」は電圧が大きい程、電流が大きいほど、流す時間が長い程大きくなります。

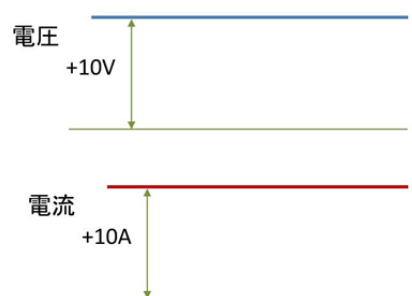


図 2 直流

「水の流れ」のイメージで理解していただければ幸いです？

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

○交流：電圧と電流があってもエネルギー量が送れない！？→無効電力問題

交流は、電気を波の形にし、送電する方法です。例えば、太陽光はエネルギーですが、波の形で地球に送られてきます。それを電気に応用していると考えましょう。交流は、直流と異なる独特の性質が有りますので以下説明します。

電圧、電流の波は、サインカーブと呼ばれる形で滑らかに上下変化します（上下 1 回を 1 周期と呼びます）。(図 3) 1 秒間に上下変動する回数を周波数 (Hz) と呼びます。日本では、西側地域は 60 Hz (ヘルツ)、東側地域は 50 Hz です。(図 4)

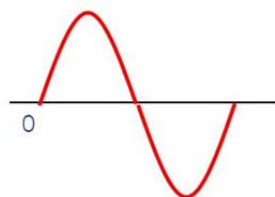


図 3 サインカーブ

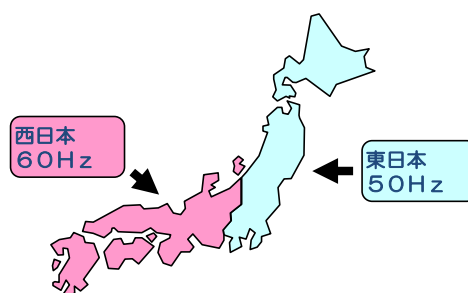


図 4 日本の電力系統周波数

サインカーブは、慣れないと判りにくい面がありますので、ここでは 1 周期の間、上下に一定な電圧・電流の波形で説明します。(図 5)

ここで、1 周期の電圧はプラスマイナス 10V、電流がプラスマイナス 10A とします。

圧力 (電圧×電流) は、最初の半分の間 (半周期と言います) は、

$$10V \times 10A = 100W$$

後半の半周期でも、

$$-10V \times (-10A) = 100W$$

結局、波形は変化しますが、1 周期の圧力は 100 W 一定で、結果的には直流と同じです。

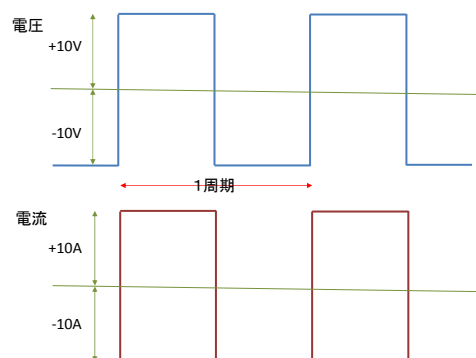


図 5 上下に変化する電圧・電流の特徴

ところが、交流では、電流と電圧の波形にずれ (位相差) が生じることがあります。ずれを生じる原因はいろいろありますが、ここでは、

交流では電圧と電流に「位相差が生じる！」と覚えて下さい。(暗記①)

下記のようなずれが生じた場合を考えます。(図 6)

圧力を図の①、②、③、④でそれぞれ計算します。

① : $10V \times 10A = 100W$

② : $10V \times -10A = -100W$

③ : $-10V \times -10A = 100W$

④ : $-10V \times 10A = -100W$

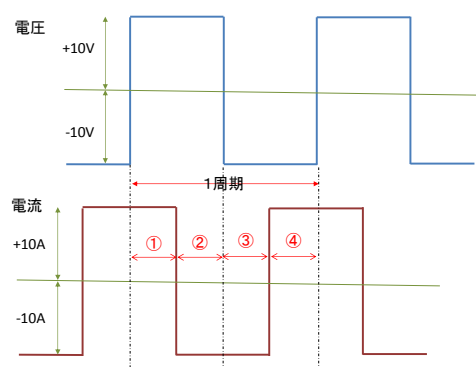


図 6 電圧と電流のずれが発生すると――

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

この例では、電力 (= 電圧 × 電流) は 1 周期中、プラスマイナスが 4 回変化します。とにかく、「電流と電圧にずれ (位相差) があると直流とは全く違う状況が生じる！」と覚えて下さい。(暗記②)

50 ヘルツの場合 1 秒間に 50 回この様な状況が発生します。1 時間の間には 50×60 (秒) $\times 60$ (秒) = 180000 回この様な変化が起こるのですが、この間に流れる (送電する) 1 時間の電力量は、

$$\begin{aligned} & \textcircled{1} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{2} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{3} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{4} \times 18 \text{ 万回} \\ & = (\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4}) \times 18 \text{ 万回} = 0 \times 18 \text{ 万回} = 0 \end{aligned}$$

となります。なんと 18 万回電気が上下 (プラスマイナス) に流れても、結局エネルギーは送れないのです。では、18 万回の間、何が流れているかと考えると、電流は流れていますので、技術者は「無効電力 (送電されないゼロエネルギー)」が流れていると「定義」しました。この部分は直感的になかなか飲み込めず、交流が主体の電力系統が理解しにくい「元凶」となっています。

実際には、ずれが生じて送電エネルギーがゼロとなるのは、位相差が一定の条件の時だけです。電気では、1 周期を 360 度 (円の 1 周の角度) とすると取扱いが便利なのですが、図 6 は、1 周期の $1/4$ 、360 度 $\times 1/4 = 90$ 度のずれがある時に送電エネルギー量はゼロになることを示しています。それ以外のずれの場合 (位相差: X 度)、波形がサインカーブの場合次式となります。

$$1 \text{ 時間の送電電力量} = \text{電圧} \times \text{電流} \times \cos * (X \text{ 度}) \times 1h (* \text{コサイン})$$

ちなみに $\cos 90 \text{ 度} = \text{ゼロ}$ ですから、90 度の時、送電電力量はゼロとなり、上記の説明と合います。なお、電圧 \times 電流 $\times \cos (X \text{ 度})$ を有効電力 (W) (エネルギーの送電に貢献する電力 (圧力)) と呼びます。

例として、ずれが 60 度の場合を考えてみましょう。

$$1 \text{ 時間の送電電力量} = \text{電圧} \times \text{電流} \times 1/2 \times 1h \text{ となります。}$$

直流と同じ電圧・電流とでエネルギーは半分 ($1/2$) しか送れません。直流と同じエネルギーを送るには、電圧か電流を 2 倍にする必要があります。この様なずれが電力系統でどのように生じるか、どの様に減少できるかは、交流送電の場合、非常に重要な検討要素となります。

電圧と電流があると送電エネルギーはゼロでも「圧力」が発生し、この圧力 = 電圧 \times 電流を皮相電力 (VA) と呼びます。特に、電気を流す機械を作る場合、電圧と電流に耐える必要がありますから、皮相電力に関する検討が重要です。

なお、無効電力は 電圧 \times 電流 $\times \sin * (X \text{ 度})$ で表されます。(*サイン)

ところで無効電力はエネルギーゼロですから、無効電力量は存在しません。

$\sin 90 \text{ 度} = 1$ ですから、皮相電力 = 無効電力、 $\cos 90 \text{ 度} = 0 \rightarrow$ 有効電力 0、すなわち、90 度の場合、1 時間送電しても送電エネルギーはゼロ、無効電力分の電流だけが流れるとの前記説明と合致します。

無効電力のコンセプトはイメージしにくく難解です。ここでは、とにかく、以下を覚えて (何となくでも理解して) いただければと思います。

I. 交流では、電圧と電流にずれが生じると無効電力が流れる

II. 無効電力が流れる状況 (ずれが発生する状況) では、送電エネルギー量は直流の電圧 \times 電流 \times 時間で計算される量を流せない、

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

なお、無効電力以外にも、交流と直流では「実効値」等の違いもありますが（前述の議論でも省いてます）、電力システムを理解する上で重要性が比較的低いので本稿では省略します。（教科書等ご参照下さい）

（余談）無効電力は誰にとっても難しい

無効電力は多くの電力関係者が「難しくてちょっと」と敬遠します。ですから、すっきり理解できなくてもがっかりしないで下さい。

実際の技術検討では、正しくデータを入れれば（これが結構大変ですが）、コンピュータが（技術者の思いにおかまいなく）無効電力や有効電力の正確な分析結果を示します。

なお、英語では、無効電力を **Reactive Power** と言いますが、日本語に約せば「反応電力？」でしょうか、「無効」も判りにくい表現ですが、「Reactive」も意味不明な気がします。このためかも知れませんが、海外でも、十分理解している電力関係者は少ない気がします。

○高電圧送電系統は 3 相交流

送電線鉄塔を見ると（図 7）、大抵の場合、左側、右側にそれぞれ 3 本ずつ、計 6 本の電線があります。送電鉄塔は高い電圧（数万ボルト以上）で電気を送る設備ですが、電気の電圧を 120 度ずつずらして送っています。120 度ずらすと、0 度の電圧、120 度ずれた電圧、240 度ずれた電圧、360 度ずれた電圧——、となりますが 360 度は丁度円を 1 周したことになり、ゼロ度と重なります。結局、0 度、120 度、240 度の 3 種類のずれた電圧（これを 3 相と呼びます）で送電しますが、この送電方式を 3 相交流と呼びます。送電線は右側で 3 相、左側でも 3 相、道路で言えば 2 車線として、3 相×2 車線=6 本の電線で送るのです（2 回線送電と呼びます）。なお、海外では、3 本での送電線（1 回線送電）も良く見られます。3 相交流は、電圧が高くなるとメリットが大きいのですが、電力システムの検討では、1 相として扱い（単相）で検討することため、今回のお話では深入りしないこととします。なお、低い電圧での送電では（例えば電柱での送電）、単相送電も行われています。また、6 相送電や 12 相送電なども研究されていますが、汎用化していません。

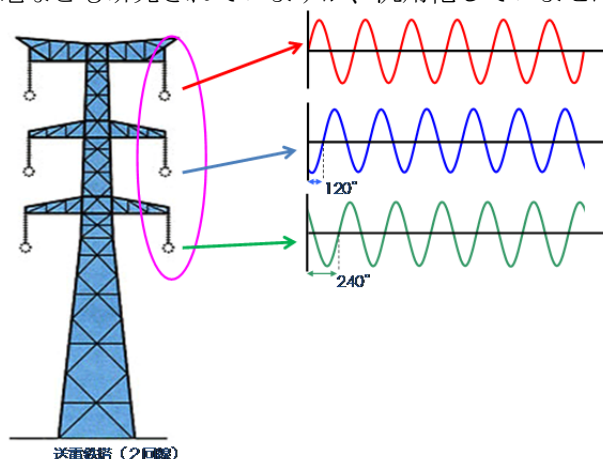


図 7 三相交流

○直流と交流：交流、直流どちらが良いのか

現在、電力システムは、主に交流で形成しています。前述した交流特有の無効電力問題も対応方法がありますので、致命的な差にはなっていません。

歴史的経緯も有り、世界の電力システムは主に交流で形成されていますが、交流、直流の電力技術は

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

着実に進歩していますから、両方の良いところを取り入れて適材適所に活用するのが良いでしょう。筆者自身は、既に交流で電力系統が存在する場合はきりだけ活用しつつ、交流より良い効率が効率的に得られる場合、直流を活用するのが良いと考えます。

○直流と交流：電力系統に異なる周波数があるのは問題か

日本では、東日本が 50 Hz、西日本が 60 Hz です。需要家に不便があるのは事実と思いますが、世界を見れば、アメリカは 60 Hz、欧州が 50 Hz ですから、グローバルに見ると 2 つの周波数の存在が技術的に致命的ではないと思います。(日本として、両周波数の技術を持つのも悪くない気がします)

数学的には直流は周波数ゼロの送電方式です。前述の様に直流と交流を適宜使用するとは、周波数を変える設備(周波数変換設備)を介して交流と直流をつなげていくことになります。このつなげていく技術は着実に進歩していますし、50 Hz 系統と 60 Hz 系統も周波数変換設備を介しつなげることですから、技術的に交流・直流を併用することと考え方は同じです。

直流と交流を適宜上手に利用する時代を迎えたと考え、「異なる周波数問題」はそれほど重要な課題でないと思われます。

なお、周波数が異なることよりも、50 Hz 系統と 60 Hz 系統をつなぐ「変換設備に至る部分の交流電力系統」の弱体性が重要な課題と思います。

(余談) 同じ周波数系統でも「わざわざ」違う周波数の様に扱う

米国や欧州では、同じ周波数にもかかわらず「わざと」周波数変換設備を介してつなげている場合があります。この場合、例えば 50 Hz 系統同士を、一旦直流に変換し、50 Hz へ再変換しつなげます。いわば、直流を仲立しつなげるのです。これは、電氣的なつながりを“わざと”薄めるためです(完全に縁を切る訳ではありません)。薄め方具合は、別の機会に説明する予定ですが、「なぜ薄めるか」については、政治的な面を含め複雑な経緯があることが多いです。なお、このような系統に係る技術者にこの理由を深く問いつめるとご機嫌が悪くなる場合ことがありますので注意が必要です。

今回は、少し長くなりましたのでここまでとします。

更に次回、引き続き電力系統を理解する上で知っていただきたい基礎的な事項の解説をします。

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 2 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

前回にひきつづき電気の基本的な特徴を解説します。

3. 電気とプール (貯水池) イメージ

さて、電力系統を理解するため再び水のイメージに戻ります。

有る貯水地に、A、B、C、D と 4 本の川が流れ込んでいるとします。さて、Y さんが、この貯水池から水を使用する時、A の水だけ買うことは可能でしょうか。(図-8) どう考えてもこの図の場合不可能です。このためには、A から直接、Y さんに水を引き込むことが必要で、理屈上可能ですが相当非効率になるでしょう。電気では、ABCD を発電所、貯水池を流通系統、Y さんは Y 需要家と考えると基本的なイメージが合います。この様に「個々の発電と個々の需要が直接結び付かない特徴」を電力系統のプールモデルと呼びます。

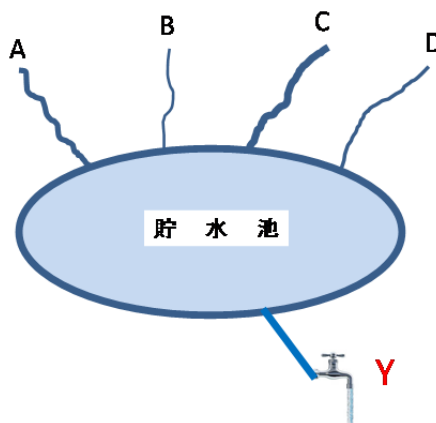


図 8 貯水池のイメージ

電力系統と良く比較される「通信系統」では、この様に送る側の要素が混じり合って受ける側に混じると混線になってしまいます。このため、送る側を決めてその情報だけを目指す相手に確実に送ることが重要になります。通信と電力の違いを理解する際には、この点が特に大切だと思います。

ただ、最近の電力系統の考え方であるスマートグリッドには、通信系統に近いコンセプト、すなわち、発電と需要を 1 対 1 に継ぎ合わせる形態があります。実現可能なアイデアですが広範な実用化には経済性等の課題がありそうです。

なお、水のプールでは流れ込んだ水が自由に混ざり合いますが、電気のプールでは送電線や変電所を通して混ざります。送電線や変電所は「川」に見立てることができますが、流せる量には限界がありプールのように完全自由に混ざり合うことはできません。川をどんどん造りつなげてゆけば自由に流れやすくなっていきますが、川を造るコストが増加しますし造る地域での「造ることへの了解」を得るのも難しくなってくるでしょう。このため、電気のプールは「自由さに限界のあるプール」と言えるでしょう。

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

(余談)「プールイメージ」の好き嫌い

日本には、「電気のプールイメージ」を好まない電力技術者がいます。

これは、「プール」と言うほど、電力流通系統で自由な混ざり合いが実現しないことを理解しているからだと思います。

この「プールとの違いへのこだわり」は正しいので、電気のプールの側面を議論する時は、考え方の前提等について意志疎通をじっくり図る必要があります。筆者の場合は相手のスタンスを確認しつつ、電力系統のプールの要素、非プールの要素を慎重に選びながら説明し、議論が不毛にならないように気をつけています。

なお、ヨーロッパ (EU) へ行くと、「欧州統合」のコンセプトを浸透させるためか?、(欧州) 電力系統のプールイメージが強調されます。要するにプールイメージ大好き!と感じます。ただ、欧州の系統運用者と(内輪の)議論をすると「欧州系統もプールと呼べるほど容易に運転できる電力系統ではない」とのつぶやきも聞こえてきます。(別項で欧州系統も説明します)

4. 電気とロス (損失)

このシリーズは、超電導 WEB 記事の一環ですので、ここからは、超電導でも良く話題になるロスについて解説します。

○まず、ロスを水のイメージで考える。→ 抵抗ロス、漏洩ロス

(抵抗ロス)

川に流れる水は、川底の石や砂の抵抗を受けます。「抵抗を受ける」と、そこでエネルギーを失うことになります。

(漏洩ロス)

川を流れる水は川底から一部水が漏れて行きます。このために水のエネルギーが一部失われます。

電気を流す場合も、同じ様に抵抗ロスと漏洩ロスが発生します。電力系統では、このうち、抵抗ロスが大きな部分を占めます。抵抗ロスは電流が大きくなると増加します。超電導では、電流が大きくなっても抵抗ロスをゼロにできるので注目されています。ただし、電気でも漏洩ロスがあり、電圧が高くなる程増加します。なお、超電導でも漏洩ロスは発生します。

このようなロスは交流・直流共に発生するのですが、交流では、更に無効電力を生み出す電流が漏洩する際にこの電流に併せて抵抗ロスが発生します。無効電力はエネルギーがゼロなのでその漏洩電流自体でロスは生じませんが、電流が流れる際に抵抗を受け抵抗ロスが発生します。(図-9) この無効電力漏洩電流と漏洩ロスは、特に地中ケーブル送電する際に比較的大きい影響を生じます。

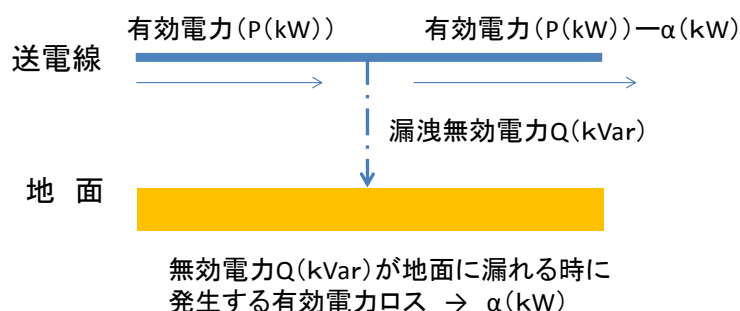


図 9 無効電力漏洩による送電ロス

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

○水のイメージでは捉えきれないロスが存在

- ・ 交流の電気は、変圧器を使用して電圧を高くしたり低くしたりします。この際にロス（励磁電流ロス）が発生します。
- ・ 周波数を変換するとき周波数変換ロスが発生します。なお、直流を交流に変換するのも周波数変換ですから変換ロスを生じます。
ところで、直流だけで設備を形成すると変圧器は使いませんが、電圧を高くしたり低くしたりする必要が有る場合、変換器を使用するので、やはり変換ロスが生じます。
- ・ 電気を流す設備でロスが発生すると大部分は熱に変わります。この熱で設備が過熱すると設備が傷みます。これを避けるため冷却設備が必要に応じ設置されその運転にエネルギーが消費されます。これも送電ロスにカウントされ冷却ロスと呼ばれます。超電導の場合、現状では、零下 170℃ 程度まで冷却する必要がありますので、冷却ロスが比較的大きくこの削減が重要な課題となります。

以上述べたロスは、電力エネルギーを発電から需要に送る際に発生しますので送電ロスと呼ばれます。（なお、冷却ロスが除外される場合もあります）なお、日本電力系統の送電ロスは使用電力量の 5~10 %です。送電ロス低減をどの様に考慮し電力系統を形成するかについては、別途説明します。

（余談） 発展途上国の送電ロスは 30 %!?

筆者が若かりし頃、発展途上国の送電ロス（30 %程度も「ざら」です）を下げるためにどうするか！との議論をフランスのベテラン技術者としました。彼は「まず、現地へ行き需要家メータを見なければ」と主張したのですが、恥ずかしながら、当時、彼の真意が全く理解できませんでした。

送電ロスは全発電電力量－（マイナス）全需要家使用電力量で計算されます。この際、「使用電力量」は需要家が電気料金を支払う電力量で計算されます。ところで、展途上国では、需要家の（不正な）努力？で使用電力量が過小になるようメータに細工がされることがあります（盗電とも呼ばれます）。更に、電力会社の都合で検針（需要家メータを見に行く）が大変なため、実際の使用量と異なる（通常は小さい側）電力量を「みなし使用電力量」とすることもあります。これらが使用電力量を歪め（小さくし）送電ロスが大きくなる原因となります。（図-10）

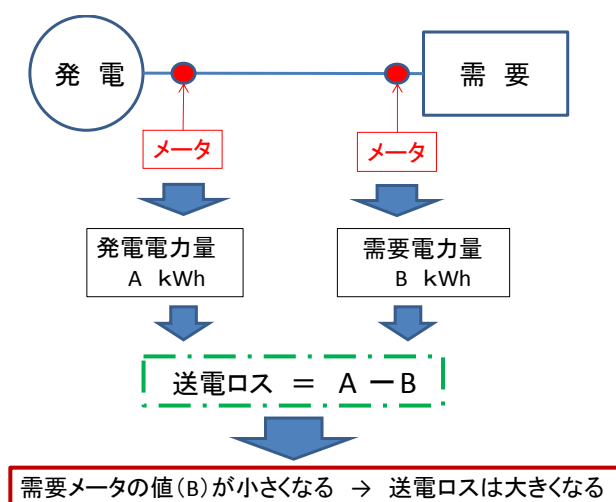


図 10 メータと送電ロス

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

個人的な経験では、送電ロスが 15 %を超える！場合、このように技術的には解決できないロス (Non-Technical Loss) が相当含まれる to 想定しています。

なお、発展途上国では、送電ロスが技術的に「やむなく」大きくなる場合もあります。一般的に発電力が不足気味ですので、対策として需要家への供給電圧を下げ需要を減らし発電能力に合わせます。欧米ではこれをブラウンアウト（電圧を下げた電灯を薄暗くするイメージで、ブラックアウト（停電）と対比し使用されます）と称して、系統運用者が緊急時の需要削減策として実施されますが、発展途上国では、日常的に電圧を下げて運用するので、電力系統に流れる電流が需要の減少による電流減少を上回って増えてしまい送電ロスが増加するのです。

この様に、送電ロスの大小を日本と比較する場合、ロスとは必ずしも直接関係しない電力事情をよく観察する必要があると思います。

〇ロス評価は、電力系統全体、更に社会全体を考えながら検討する

・発電設備への影響を考える

話を単純にするため、発電は全て風力（燃料費ゼロ）、蓄電池もあり需要に対し十分な供給力があるとしします。

この場合、送電ロスが大と小の場合で何が違って来るかを考えます。送電ロスが大きい場合と小さい場合と比較し風力設備の稼働率が変化します。ただし、風がエネルギー源ですと燃料費の増減は生じません。

では、この状況で送電ロスを減らすインセンティブがあるでしょうか。

結論的には、ロスが多くなっても需要に対する供給力が不足しない程度であれば社会全体で問題は生じず、ロス減少インセンティブは小さいと思います。（皆さんも考えてみて下さい）なお、燃料代ゼロは極端な例ですが、燃料代が安い場合も、送電ロスを減らすインセンティブは小さいと思います。

ところで、このように燃料代の安い発電力が余っている電力系統に対し、電力系統を繋げたいとのニーズが燃料代の高い電力系統から出てくる場合があります。この場合、電力系統が繋がると、安い燃料代の電力を燃料代の高い電力利用者にできるだけ多く供給し利益を得たいとのインセンティブが生じます。送電ロスを減らせばより多く利益がえられますから。

以上は単純化した例ですが、送電ロスを考える場合、その地域や連系する地域の電力系統の発電設備の状況が関係するとお考え下さい。

(余談) ノルウェーでは送電ロスへの関心が薄かった

若かりし頃、ノルウェーの系統技術者と意見交換したとき、送電ロスへの関心の薄いことが大変印象に残りました。ノルウェーは大水力発電国で電力は殆ど水力で賄っています。水力は燃料費がゼロです。前述の理論？を元に考えると「関心が薄くて当たりまえ」となりますから、後々自分なりに納得したものです。ただ、その後、電力自由化が進展し、電力輸出に熱心ですから、送電ロス低減に取り組んでいるかも知れません。

・発電設備、蓄電設備、エネルギー源を総合した効率を考える

①送電ロスが大きくても発電設備効率向上でおつりがくることもある

筆者の経験から、送電ロスは 5-10 %、大きくても 15 %程度ですから、極端な差は生じません。

（超長距離送電の場合はもっと大きな値になることがあります）一方、発電設備効率では、利用技術によって 10-20 %の差が生じます。トータルの燃料消費量（特に化石燃料の場合）を考

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

えると、送電ロスに要する燃料量が増えても高効率発電設備を導入して燃料量を減らす方が全体として効率性が向上する場合が想定されます。

②電気エネルギーにしてからエネルギーを溜めるとロスが大きい

一般的に、電気を貯めると、次に電気エネルギーとして取り出すときに相当量のエネルギー損が生じます。

揚水（電気エネルギーを水の位置エネルギーに変換して貯める「いわば」蓄電設備です）で 30 %程度、蓄電池（電気エネルギーを化学エネルギーに変換）で 20~30 %程度が失われます。（蓄電ロスの発生）

一方、貯蔵しないで、送電ロスが生じても遠方の電力系統に送電し使用すれば蓄電ロスがなくなり効率的な場合があります。

遠方でない場合でも、例えば、スマートグリッドで、グリッド内で発電と需要をマッチさせるため蓄電池を置くのではなく、送電ロスを負担しても他所で使う方が合理的な場合もあると想定されます。

③エネルギー利用の総合効率を考える

例えば、天然ガスをエネルギー源とする場合、「コジェネ」と「発電所から電気を通して」の 2 方法が考えられます。これについては、電力会社とガス会社間で論争されています。この際、電力での利用では、送電ロスがガスでは発生しない効率低下要因としてクローズアップされました。電力会社側は、ヒートポンプの成績計数（COP）は 1 を超える（1 の電気エネルギーで 1 以上の熱エネルギーを移動できる）等を例示し対抗しています。ガスコジェネも燃料を送付するので、保守を含めて関連するエネルギーが使われると思います。エネルギーの使われ方を含め総合的に見て、効率性が比較されればと思います。

（余談） 電力、ガスのどちらに軍配を上げるか

筆者は、冬場の就寝時湯たんぽを愛用しています。多分、電力会社、ガス会社双方にとってあまりおいしくない需要家ではと推察します。

このように、エネルギー利用は、理性的な判断だけでなく感性的に対応する部分がありますから、それにも訴えるメリットを打ち出しながら、健全な競争を通じて全体的な効率性（省エネを含む）が向上すればと願っています。

○エネルギーロスではないけれど―― → 交流特有の無効電力ロス

交流を送電線や変圧器に流すと、無効電力を流す作用が生じるため、電流と電圧とのずれが大きくなり送電できる有効電力（エネルギー）が減少します。

ずれが大きくなると、流す電流の無効電力分が大きくなるのですが、この「増えた」無効電力を無効電力ロスと呼びます。無効電力ロスが生じる場合には、対策を講じないと送電可能なエネルギーは減少しますが、エネルギー自体は消失しません。

この作用を引き起こす要素をリアクタンス（リアクティブパワー（無効電力）を引き起こす要素と言う意味）と呼び、直流では生じません。

直感的に理解しにくいのですがコンピュータで的確に解析でき、制御する技術もあります。ただし、制御する場合はコストを要しますので、直流の方がこの面で経済的に有利になります。次回以降、無効電力制御も説明します。

（余談） 長距離送電で直流が有利と言われるのは無効電力ロスのため？

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

交流の場合、送電線は距離が長くなる程リアクタンスが大きくなり、無効電力ロスが生じエネルギーが送りにくくなります。一方、直流は無効電力ロスが無いので送電が容易です。このため、長距離では直流が有利と言われます。

ただし、ヨーロッパでは、西のスペインから東欧まで交流で繋がり数千キロに亘り交流電力送電が可能です。これは途中で無効電力制御が行われるためです。ここでは触れませんが、無効電力制御と電圧制御は「一体の関係」にあり、電圧を制御すると無効電力も制御できます。ヨーロッパで長距離に亘り交流送電が可能なのは、途中のエリア毎に電圧が適切に制御されるためです。なお、欧州の系統運用者と話すと「制御の協調」が十分でなく、送電量を増やすのはなかなか容易でないようです。

なお、日本の有識者の中に「交流で長距離送電するとロスで送れない」とおっしゃられる方がおられますが正しくありません。直流でも同様にロスが発生しますから交流と直流を送電ロスで優劣を比較するのにあまり大きな意味はないと思います。

また、電力技術者の中で、交流系統では「相角度」が一定以上になると送電できないのに対し、直流系統では「相角度」は生じないので送電能力が交流を上回る、とする方がいます。交流系統では無効電力ロスが発生するために、電気を送ると電圧にずれが生じ、このずれを相角度と呼びますが、この相角度が大きくなると送電できないと言われます。実は、「無効電力を適切に制御できれば」相角度により送電ができなくなる状況は実際の交流系統では生じません。

ちなみに、大学の教科書では「無効電力が適切に制御できない」ことを前提に、相角度が 90 度以上で電力を送れないと教わります。私自身、少ない記憶容量の中でそれなりにしっかり暗記したのですが、電力会社入社後、相角度が 90 度以上でも（無効電力が制御されているために）送電できることを電力系統シミュレーションで確認した時は大いに感激したものです。

結局、「一般的に長距離送電で直流が有利！」との論調も、具体的な電力系統の条件を踏まえ比較・検討し確認することが大切だと思います。

（どの世界の話でも、「一般的には〇〇〇〇です」とする論調がありますが、ある程度眉につばをつけて、その論調が「正しいとする根拠」を確かめることが必要かと思います）

今回はロスの話を少し長めに解説し、更に無効電力ロスが交流系統に与える影響にも少し触れました。やや難しかったと思いますが、ロスは電力エネルギーシステムの特徴を良く現わしますので、少し詳しく解説しました。

次回以降も具体的な設備説明などで、折に触れてロスの説明を加えながら、電力系統の特徴を理解する手助けができればと考えています。

次回から、電力系統設備を解説してゆきます。その中で、適宜、今回ののはなしの深堀りや他の電力系統の技術的な特徴にも触れていきます。

まず、今回は電力系統全体の設備構成からはじめ、発電設備へと話を進めていきます。なお、ご要望に柔軟に対応し解説の構成も変えていきます。

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 3 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、今回からは電力系統を形作っている設備の解説をしていきます。
最初に電力系統設備を理解する上で重要な電力系統の特徴を解説し、イメージをある程度描いていただいた上でそれぞれの設備の特徴に入っていきたいと思います。

5. 「電力系統の周波数が同じである」のイメージ

○まず、水泳競技の「シンクロ」を思い浮かべて

さて、電力系統は主に交流電気の電力で形成されています。交流系統でつながっている場合、その中で周波数は同じです。例えば、西日本では静岡でも鹿児島でも発電機は同じ周波数 (60 Hz) で発電しています。東日本では、青森と沼津の発電機は 50 Hz で同じです。この同じ周波数で発電していることを工学的には「同期運転」(Synchronous Operation) しているといいます。Synchronous の動詞形は Synchronize なのですが、水泳競技にあるシンクロ (Synchronized swimming) の Synchronize と同じ意味です。シンクロでは音楽に合わせて (特に団体戦では) 皆が一致した動きで演技をしますが、同期運転では、同じ周波数に合わせて発電機が一致した動きをしている、との基本イメージを持っていただければ結構です。
シンクロの場合、猛練習を重ねて一致した動きができる訳ですけど、発電機も猛訓練が必要なのでしょうか？

○次に高校野球のスクラム応援を思い浮かべる

高校野球の応援では、応援歌に合わせて (Synchronize して) 肩を組んで応援します。(スクラムを組んでの応援) 肩を組むことで、少し不自由な感じになりますが、一方、各人の動きが少しぐらいずれても全体として統一した動きとなります。

発電機も一旦肩を組み合うと (同じ周波数で同期運転に加わると)、後は相互の発電機が影響を及ぼし合い、一致した動きが実現します。この様な影響を及ぼし合う力は同期化力と呼ばれ、交流系統独特の特徴を生み出します。同期化力があるため、発電機はシンクロのような猛練習の必要はありません。ところで、例えば、スクラムの真ん中に「お相撲さん」の様な力の強いメンバーいて勝手な動きをすると、スクラムができなくなるでしょう。同様に、同期化力もある程度以上の「無理がかかる」状況が生じると、限界に達して一致した動きができなくなります。一致した動きができなくなると発電機同士で周波数が維持できなくなり (同期運転できない)、結局、発電した電気が送れなくなり停電になってしまいます。

ここで言う「無理がかかる」状況にはいろいろな場合がありますので、別の項で解説していきます。ここではまず、発電機が「スクラム」を組んでいるイメージを覚えてください。

(余談) 「同期水泳」との言い方が広まっていれば良かったのですが？

「シンクロ」が注目され始めた頃、密かに、いずれ日本語訳がされて「同期水泳」との言葉が広まれば良いけれど、と密かに期待しました。と言うのも、電力系統の専門家が使う「同期」のイメージがなかなか理解されないからです。ただ、日本では、「同期」と言えば、入社や入学が「一致」

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

するだけで、後はばらばらに行動するイメージがあります。例えば同期会などに使われていて、シンクロがイメージする同期とは違い過ぎますから、日本語訳としては使いづらかったのではと推測します。(ちなみに英語では、同期会の「同期」は「same」や「contemporary」を使い、Synchronizeとは違う概念です)「同期」のイメージが広まる絶好の機会が失われたのは実に残念なのですがやむを得ない?

いずれにしても同期を維持する(発電機間のスクラムを崩さない)ことが電力系統では非常に重要な考慮事項です。電力系統技術者は、常にこれを意識しながら電力系統の設備づくりや設備運用を行います。

なお、交流系統同士を直流系統でつなぐと同じ周波数であっても同期化力が生じません。つまり肩を組み合わせない状態で電気をやり取りすることになります。この場合でも、交流系統同士は直流設備を通じて影響を及ぼし合いますが、交流系統同士をつなげる(肩を組み合わせ)のに比べると、ドライな関係になります。(これも別項であらためて解説します。)

6. 電力系統の基本構成と特徴

電力系統の基本構成は図-11 のとおりです。発電設備、流通設備、需要で構成されます。バッテリーも電気を供給する時は発電設備、電気を貯める時は需要と考えれば良いでしょう。さて、図-12 の様に2つの電力系統が並んでいるとします。日本でも第二次世界大戦以前はこの様に電力系統がお互い無関係に並列していることが多くありました。

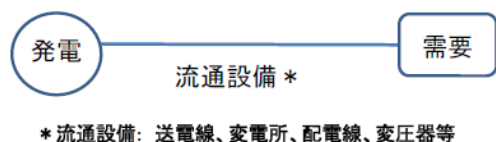


図 11 電力系統の基本構成

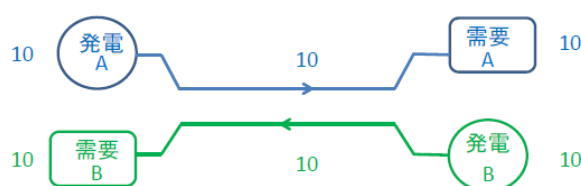


図 12 電力系統の初期(ばらばらに送り合っている)
(数字: 電力)

○電力系統の不思議 1: 連系の魔術

図-12 の2つの系統を繋ぎましょう。(図-13)電力用語ではこのことを「連系する(系統を連ねる)」と言います。なお、連「係」と違う字を使うことにご注意ください。さて、図-12 と図-13 を比べると電気の流れ方が違います。

図-13 で判るとおり、左側を地域 X と右側を地域 Y とするとその間を結ぶ流通設備に電気が流れません。これは、前回で述べた電気の混ざり合う性質(プールのな特徴)で図-12 の左向きと右向きの電気が混ざり合いゼロとなるためです。ところで、この場合、X と Y の間の流通設備は流れがゼロですから、技術的には「必要ない」と言えます。A 発電と A 需要、B 発電と B 需要は電気のやり取りをしているのですが、やり取りする者同士が繋がっていないのに電気取引ができることになります。不思議と言えば不思議です。

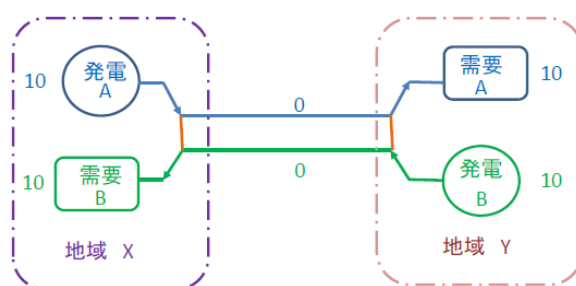


図 13 電力系統の進展(電力系統の連系化)

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

(余談) イギリスと日本で電力取引を！？

イギリスの電力取引所を訪問した時、先方の担当者から、日本とイギリスとの電力取引市場を検討しないかとの誘いがありました。図-13 の X 地域をイギリス、Y 地域を日本とすれば、「取引の結果、双方に流れる電力が最終的に丁度ゼロになること」をルールとして電力取引を行えば、取引の結果 X 地域と Y 地域の電気の流れはゼロとなるので繋がっていても取引は可能になります。つまり、このルールに基づく取引を行えば、イギリスと日本は電氣的に繋がっていても、両国間での電力取引市場が作れます。正直、何となく抵抗感はあるのですが、物を取引する場合にルールを設定し、そのルールを守って皆が参加すれば取引できるのです。後は、その様な取引を望む人がどれだけいるかの問題です。(今のところ実現したとは聞いていませんからニーズが少ないのでしょうか。)

○電力系統の不思議 2：お隣さんが重要

図-13 に戻ります。ここで、A 発電設備が、安い電気を送るため品質の悪い、例えば電圧が一定しない電気を発電するとします。この場合、安く買えるのは A 需要家です。ところで、電圧が一定しないと工場の生産等に影響を与える等の問題を生じることがあります。図-13 で見ると、この影響を受けそうなのは、A 発電設備に近い B 需要家と考えて良いでしょう。ところで、B 発電設備は若干値段が高いですが良い電気を作り電圧も一定しているとします。B 需要家はそのため高い料金を負担しますが、電圧一定の恩恵を受けるのは安い A 発電設備の電気を買っている A 需要家です。少し頭が痛くなってくるかも知れませんが、電力系統では、誰から電気を買っているかではなく自分に近いところで電気を売っている人の影響を受けるのです。すなわち「お隣さんが重要」となる訳です。

このことから電力系統での電力取引に関わる特殊な特徴が出てきます。すなわち、「電力品質」で競うのが難しいのです。なぜなら「安い電気を買うのだから品質は下がっても良い」と言うような「発電設備と需要家（買う人）の 1 対 1 の取引関係」ができないのです。これも電力のプールの性質のためです。

(余談) 新規事業者の発電品質が悪そうで買うのが不安だ！！

電力自由化が始まった頃、このような話が一部で聞かれました。電力系統のプールの性質を考えるとデマと考えて良いです。ただ、次のことが言えます。

質の悪い電気で安く販売して利益を上げる発電機が出てくると他の発電機も「競争上」質を下げる懸念がある。一部の発電機が下げただけなら影響も小さいが、多数の発電機が質の悪い電気を発電し出すと電力系統全体の質が低下し「需要家も発電機も含め全員」が迷惑する状況となってしまいます。

このような事態を避けるためには、発電機が一定の技術的な資格を満たすことが重要になってきます。この資格は「連系要件」と呼ばれますが、当然、従来の電力会社（一般電気事業者）も守る必要があります。また、要件を決めるときには、できるだけ競争を促しつつ電気の質の悪化を避ける資格条件を発電技術の発展なども反映しながら、設定・見直ししていく必要があるでしょう。更に、電力系統に参加した後も要件を引き続き守っているかチェックが必要です。諸外国でもこのような発電設備の品質を持続するのにいろいろ苦労している様です。

(余談) 発電機がインフルエンザに集団感染！？—カリフォルニアの教訓

発電設備の品質には、設備だけでなく運転する人間も大きく影響します。カリフォルニアで自由化が始まった頃、競争を活発にするため発電機は全て取引所で取引し、安く発電する発電機から運転させる仕組みが採用されました。しばらく平穏に推移したのですが、ある

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

時からばつばつと発電機が止まり始めたのです。当時のカリフォルニアは発電機が不足気味で、発電機が止まると不足状態が拡大し取引価格が上昇したのです。その上昇幅が大きいと、発電するよりも一部の発電を止めて価格の上がる方が儲かることが発電事業者に分かり止りだしたと推定されました。(後で現地調査が行われたのですが「意図的に止めた証拠」は結局見つかりませんでした。英語で **Withdrawal** (日本語では撤退?) 問題と言われています) 停止発電機がインフルエンザ感染の様に増加し、終に電力系統内の発電能力が需要を大幅に下回る事態となりました。このため、電力系統運用者はやむを得ず、日本でも「3.11」で悪名が高くなった輪番停電を大規模に実施したのです。これが今も「自由化による大停電」として知られるエピソードで、カリフォルニアでは電力自由化が実質的に中止されました。(ちなみに発電事業者は、その年、素晴らしい営業業績を上げました。)

私は電力自由化を進めるべきと考えていますが、進めるに当たっては、自由化の仕組みと競争参加者の質と言う「人間側の要素」を常に評価し、必要に応じ適宜見直すことが、電気品質を維持するために重要と思われます。

○電力系統の不思議 3：電力系統の信頼度は発電と流通が複雑にからみあう

停電のしにくさを信頼度と言います。基本的に発電が需要より少なくなならないほど(厳密には「少なくなる確率が小さい」ほど)、くわえて流通設備が原因で発電が需要に届かない状況が少ないほど(確率が小さいほど)信頼度が高い、となります。電力系統では、発電と流通の要素が複雑にからみ信頼度が決まります。

・発電設備量の低減

図-12 に戻ります。発電 A は点検や故障等で停止することがあるでしょう。このために発電設備を 10 増して(A')20 にすることが考えられます。(実際は、このような場合、需要を減らすことも検討される等複雑な様相となります、ここでは想定を簡単にします) 図では普段は発電しないと仮定しています。

発電 B も同様に考えて 10 増やして(B')20 にします。(図-14)

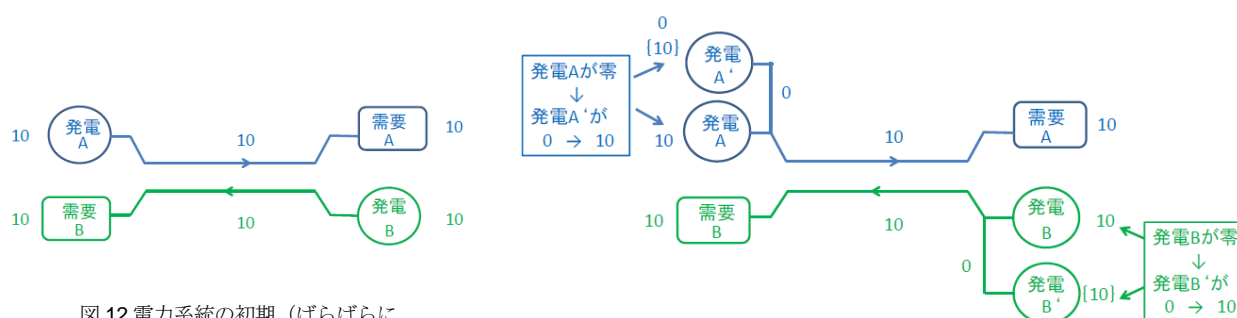


図 12 電力系統の初期 (ばらばらに送り合っている) (数字: 電力)

図 14 電力系統の信頼度確保 (連系なし)

さて、図-13 の系統構成でも発電設備の点検や停止を考えます。発電 A と発電 B が同時に止まることはめったにないと想定すると、発電設備 C を 10 置けば発電 A や発電設備 B の停止に対応できます。(図-15) この様に系統が連系されると発電設備を削減することが考えられるのです。ところで、不測の事態に対応する発電設備のことを予備力といいます。電力系統を連系することで予備力を共有し発電設備を減らせることになります。逆に言えば、同じ予備力でより多くの需要に

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

信頼度を下げることなく供給できるものとなるのですが、この効果は「連系線の予備力効果」と呼ばれます。

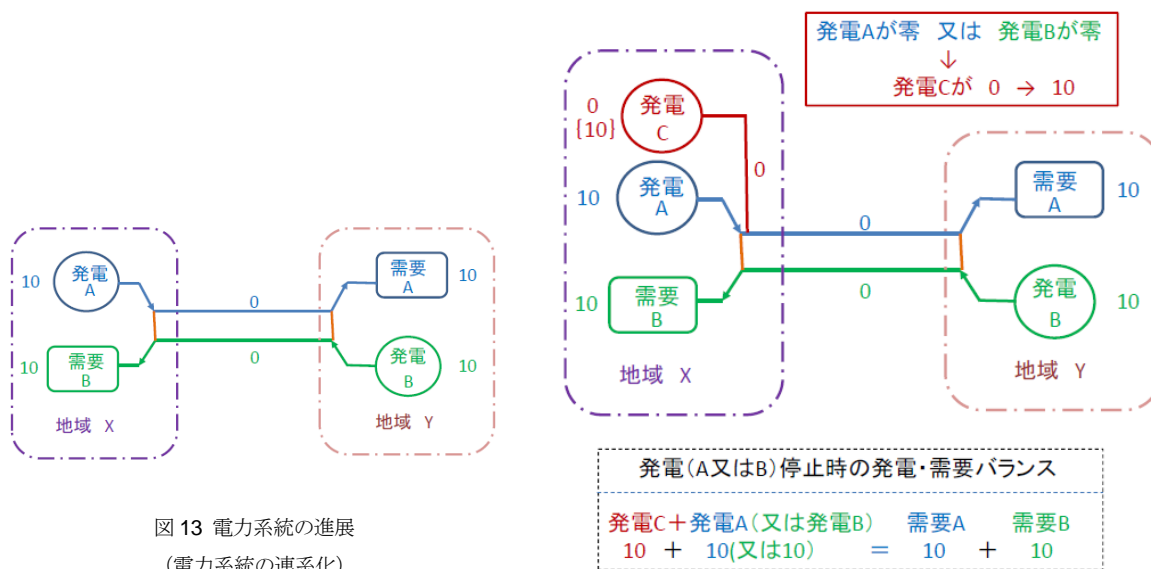
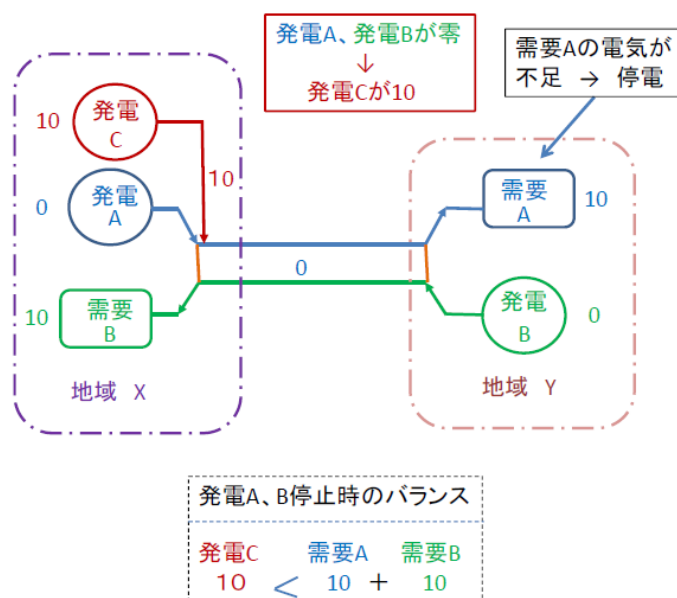


図 15 電力システムの信頼度確保 (連系あり)

ところで、電力システムが連系されても発電設備 A、B が同時に止まると需要の全てに供給できません。(図-16) この様に、連系すること (又は連系する流通設備容量を増やすこと) は発電設備を増設することと完全には一致しません。



また、例えば、連系する系統同士が遠方 (例えば前述の英国と日本) とすると、信頼度の維持方策としては、発電設備を増設の方が連系設備を設置より低コストとなります。

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

(余談) 連系線論議は本当に難しい

電力系統を連系するか否か、連系する場合どの程度の容量とするか、は連系線論議と呼ばれ、日本でも議論されていますが、世界的にも常に活発に議論されています。

電力系統の連系（連系の要否や強化の要否）を検討するには、そもそも電力系統の信頼性度をどうするかが検討のベースとして必要になります。例えば、前の文章で「めったにない」と書きましたが、工学的には確率論を用い数値化し、例えば、10 年に一度、100 年に一度と数値化します。しかし結局は、10 年に一度も起こっては困るが 100 年に一度なら「しょうがないと諦める」等を決める必要が生じます。その際、連系に要するコスト次第で、安くできるのなら 100 年に一度の状況にも対応して欲しい、となるかも知れません。ところが、この場合、「かかるコスト次第」のレベルを 100 万円とするか、1 億円か等を決めなければなりません。更に、新たな連系流通設備が、例えば、国立公園を通過するとなれば、その社会的な影響（これもお金で換算できないですが「コスト」と考えることができるでしょう）も考える必要があるかも知れません。実際の検討では、更に様々な要素を考慮する必要が出てきます。従来は、電力会社が「これらの要素を一括して検討」して来た面がありますが、電力会社の機能分離が行われる中、今後、誰が検討しても非常に難しい課題となるでしょう。

いづれにしても、ここでは、発電と流通設備は信頼度と言う、いわば繋ぎあった「ロープ」によって「強かつ複雑に」結びついていることを理解いただければと思います。

○電力系統の分類：放射状系統、ループ系統、くし型系統、メッシュ系統

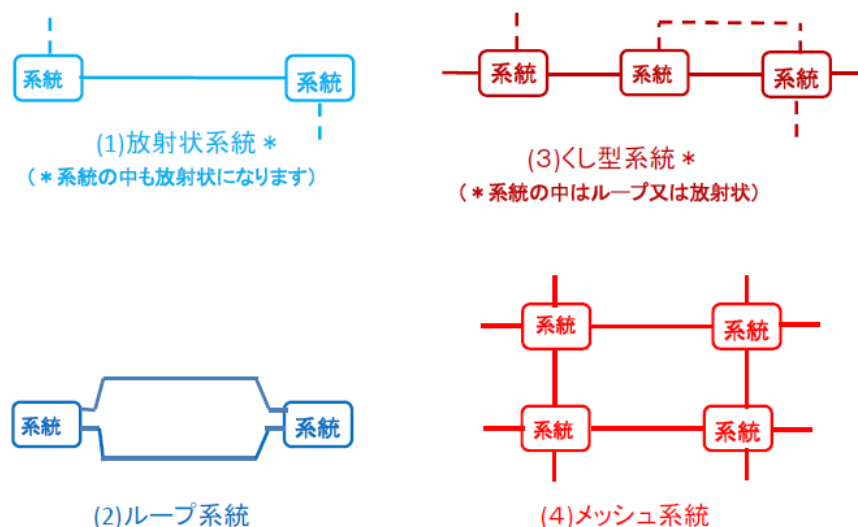


図 17 電力系統校正パターン

・放射状系統

図-11 で「発電」を「ひとつの電力系統」、「需要」も「ひとつの電力系統」と読み替えた系統構成は放射状系統と呼ばれます。(図-17-(1)) 放射状系統では、個々の系統の中も基本的に放射状になっています。

なお、連系する流通設備があっても普段は使用されない場合（図の点線）、放射状系統と呼ばれます。この構成は、何と言っても、「電気の流れがシンプル」です。日本の低い電圧の系統はこの構成が主流です。

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

・ループ系統

図-17-(2)の様に、流通系統で電気の流れに 2 つ道があること（数学的にはループがあること）構成はループ（輪型）系統と呼ばれます。一方の流れ道がなくても他方で電気が流せる（流せるだけの容量が必要ですが）などの特徴があります。なお、ループは「輪」ですが、直線の方が円より距離が短いので（建設コストが安くなります）、実際は「角ばる」ことが多いです。

・くし（串 or 櫛）型系統

図-17-(1)を横に並べて繋いで行きましょう。これが日本の電力系統の特徴と言われる「くし型系統」の基本構成です。（図-17-(3)）放射状系統のシンプルさ引き継いだ系統構成です。勿論、実際のくし型系統では需要や発電設備のつながり方は遥かに複雑になりますが基本的にこの構成となります。系統が比較的シンプルさを維持しつつ、「連系の基本的なメリット」も備えています。なお、図中の点線は普段使用されない連系設備（緊急時等に使用）を示しますが、この点線部分を直流設備で形成し常時使用する場合も、系統の特徴からくし型系統に分類されます。

・メッシュ型系統

図-17-(2)のループ系統を電力系統間でどんどん拡大していった構成がメッシュ（網型）系統と呼ばれます。（図-17-(4)）ループ系統の特徴を引き継ぎ発展させた系統構成で、ドイツの高電圧系統が典型で、米国東部の高電圧系統も概ね同様な構成です。一見、クモの巣的な構成となりますので、いかにも弾力性があり強い感じがしますが、複雑な構成となるので（実際の系統は綺麗な基盤の目になりませんし）運用にはそれなりの苦勞が必要です。

（余談）電力系統構成優劣論議があるのですが――

私は日本の高電圧系統に慣れ親しんできたので、くし型系統に愛着があります。一方、中国の華東地域（上海を最東端とする揚子江周辺地域）の電力系統に関するお手伝いをした際もくし型系統に近い形状、インドのお手伝いをした際はメッシュ系統、マレーシアのお手伝いをした際はくし型系統、と世界の様々な系統に触れるチャンスもありました。それぞれ、発電所の位置、需要の位置、それらの歴史的発展過程などから電力系統が形成されてきており、「日本型が良いからくし型に！」と言うのは無理な気がしました。一般的に、都市や州が均等ちらばっている場合はメッシュ系統（ドイツ、米国東部、インド）、需要や発電所が海岸線（日本、マレーシア）や大きな川（華東）沿いに分布している場合はくし型の傾向があるとの印象があります。結局、土地々で“慣れ親しんだ”電力系統構成を順次発展させていく方が、「もちろもち屋」の感覚から言っても、上手に形成・運用ができると思います。日本では、時々、どの系統構成が優れているかとの論争が行われますが、実り少ない気がします。

今回は電力系統の設備をマクロ的に捉えた解説を行いました。次回以降は、構成するそれぞれの設備の解説に入りたいと思います。まずは、発電設備から始めます。

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 4 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、今回は電力系統を形作る発電設備の解説をします。
最初に電力系統での発電設備の機能を解説し、電力系統に種々存在する設備の特徴を解説します。

6. 発電設備の機能

○基本機能の整理

発電設備には以下の基本機能があります。

- ①需要が求める電気エネルギーの供給
- ②需要とバランスする電力を発生
- ③電力を流通させるために必要な電圧を発生
- ④電力を流通させるために必要な無効電流を供給

電力系統に繋がる(「連系する」：前回解説した連系と同じ意味です) 発電設備は基本的に上記機能があります。なお、この機能は一体的に発揮されます。

ところで、機能を発揮するには、発電設備自身、電気エネルギーを消費し、所内電力と呼ばれます。

なお、ここでは、説明を簡単化するため送電ロスと所内電力は需要に含めます。また、電力系統内の電気エネルギー貯蔵機能も需要に含まれているとします。

○電気バランスの特徴 (①、②の説明)

第 3 回でも使用したシンプルな電力系統で解説します。(図-18)

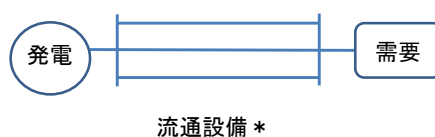


図 18 電気バランス検討のための電力系統

まず、1 日の需要 (エネルギー) が 24 kWh とします。1 kW の電力を 24 時間連続使用するとこの電力量 (電気エネルギー) になります。発電設備は 24 kWh のエネルギーを生み出せる能力があるとします。(図-19)

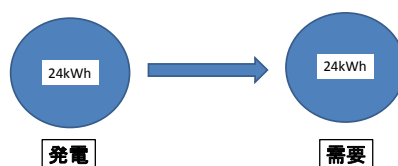


図 19 電気のバランス：1 日のエネルギーバランス (kWh)

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

電圧、無効電力等が適切に制御され、流通設備運用も問題ないとしても、この電力系統で需要にエネルギーを供給できるかはわかりません。

図-20 で、例えば、電源出力パターン-1 なら可、パターン-2 なら不可です。どちらのパターンも 24 kWh 発電していますが、発電設備と需要は綱引きしており（第 1 回解説）、バランスしないと電力系統は機能しないからです。常に需要電力＝発電電力となることが、電力系統が機能するための必須条件です。

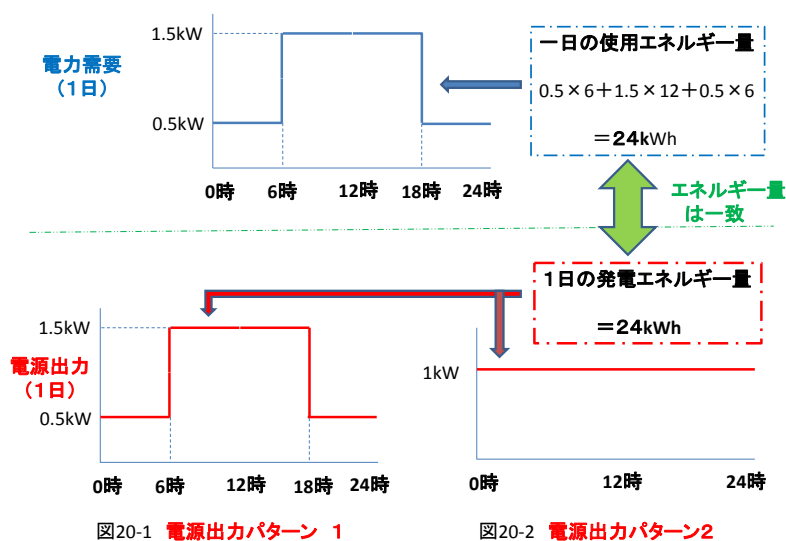


図 20 電気のバランス； 1 日の電力バランス (kW)

バランスしないと、交流系統では周波数が上昇・低下し発電設備の運転可能な限界を超え停止し電力系統が維持できません。直流系統では回転型の発電設備は同様に回転数の上昇・低下、非回転型発電設備（太陽光など）も電圧上昇・低下で運転できる範囲を超え電力系統が維持できません。（図-21：専門的には電圧安定性と同様の現象ですが、少し難しいので説明は省きます）

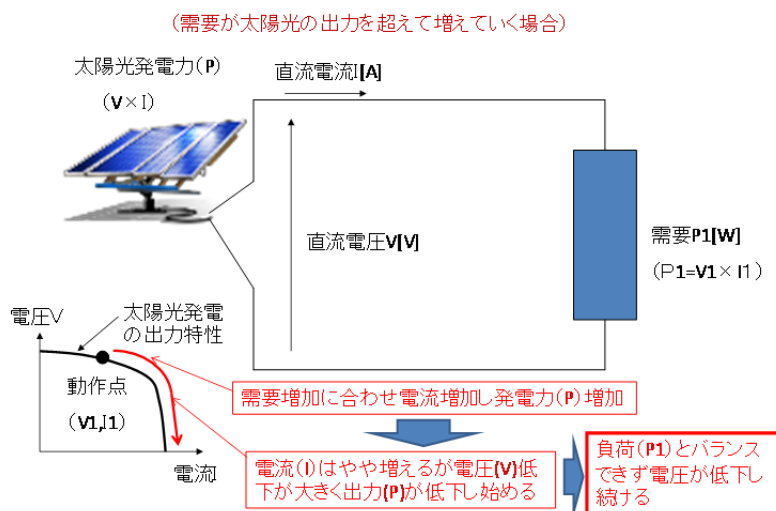


図-21 直流系統で電力バランスが維持できない場合の様相（例）

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

なお、出力パターン 2 は発電設備が需要に付き合わず悪意？を持っている様にも見えますが、通常、発電設備は最も高い効率の出力で一定運転するのが最経済的ですので、本来この出力パターンが望ましいのです。

繰り返しになりますが、電力系統では、①のエネルギーバランス維持 (kWh) とともに、電力 (kW) 維持も同等に必要、なのが重要なポイントです。

この様に電気のバランスには 2 つの要素がありますが、電力の関係者は、発電設備の電気エネルギーバランスへの寄与を「kWh 価値」、電力バランスへの寄与を「kW 価値」と分けて評価してきました。通常、価値は金額で評価されますが、簡便な評価として、kW 価値を固定費 (= 発電設備の運転状態に関わらず必要な費用)、kWh 価値を発電設備の可変費 (発電設備の出力に合わせ変化するコスト) が、主に電力自由化前 (発電設備の価値が頻繁に売買しない時代) に使用されていました。(安い方が良い → 価値が高くなります)。

なお、自由化後の世界で発電価値を二つに分ける是非、は論争されています。

(余談) 30 分同時同量？

図-20 の出力パターン 2 の横軸 (24 時間) を 30 分としても (図-22)、電力系統は運転できませんが、現行の電力自由化制度では、30 分間で発電電力量 (エネルギー) と需要量 (エネルギー) が一致すれば OK とする「30 分同時同量」が基本的な考え方となっています。「これで安定供給は大丈夫？」との指摘が自由化直後からされています。

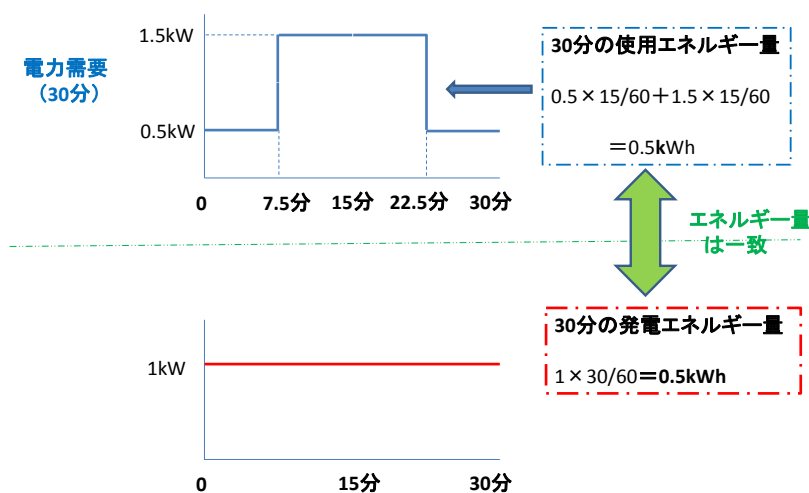


図20-2 電源出力パターン2 (30分)

図 22 電気のバランス ; 30 分間の電力バランス (kW)

「30 分同時同量」が実現するのは図-23 で、電力供給事業者が発電出力 (kW) を調整又は電力市場から調達し需要に合わせることを「促す」仕組みで、電力 (kW) バランス維持を求めています。発電と需要のずれ (図-23) は別の発電設備が調整する、のが前提です。30 分同時同量は電力系統維持に必要な瞬時瞬時の電力同量 (電力 (kW) バランス維持) とは別の意味があると考えた方が良いでしょう。(なお、この表現は日本独特で英語等へ翻訳できません。) 一方、諸外国では、負荷追随、すなわち、需要に対応した供給力を用意し電力のバランス維持に貢献させる仕組みがあるので、日本の考え方が「ガラパゴス」ではないと思います。ただ、電力 (kW) バランスを「促す」仕組みは種々考えられ、「30 分同時同量制度」に必要以上に拘ることは無いと思います。

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

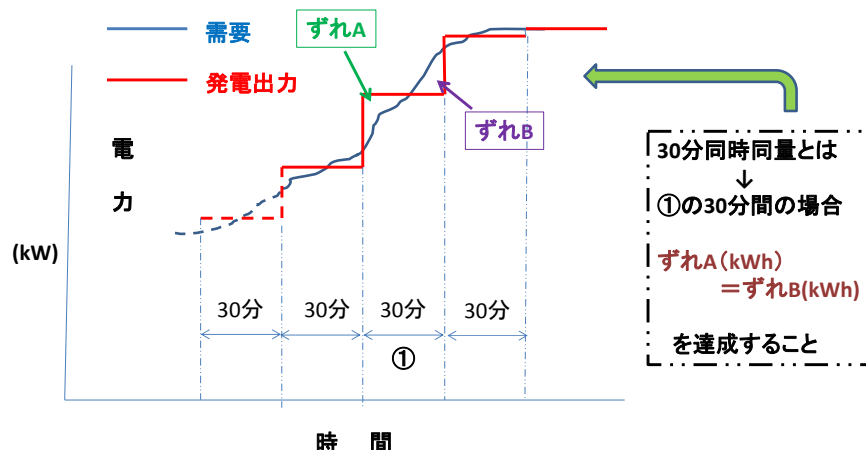


図 23 30 分同時同量の考え方 (→ 負荷追随)

・電気バランスの特性から得られる発電設備の特徴

簡単なモデルを用いながら、電気「二つバランス」がもたらす独特な様相と結果的に現れる発電設備の特徴を紹介します。4 発電機、4 需要家の電力系統ですが「一国」をイメージし、外部連系はないとします。(図-24) ここからは、数字が多くなりますが何とかイメージをつかんでいただければ一。

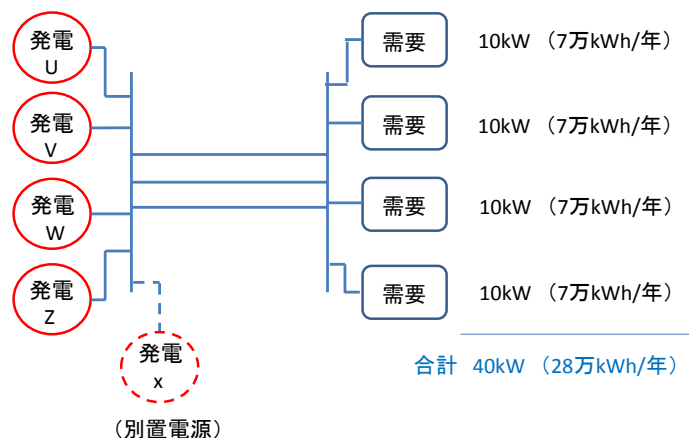


図 24 電気バランス検討用電力系統

【ケース 1：エネルギー源；均等にバランス、従来型電源構成】

「従来型電源で構成」とは、簡単に言えば再生可能エネルギーの様な「発電電力はお天気次第等」の発電設備がない場合です。

① エネルギー (kWh) バランス

さて各需要家は同じ最大電力 (10 kW)、使用電力量 (7 万 kWh) も同じとします。なお、最大電力と使用電力量から、負荷率が得られます。

$70000 / 10 \times 8760$ (24 時間 \times 365 日) $\times 100 = 80\%$ です。

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

世界的に見ると、負荷率は概ね 60～80 %です。(日本は 70 %強)

(なお、家庭では「電流」で契約されますが、電圧 100 ボルトの場合、契約電流×100[ボルト]/1000＝最大電力 (kW) と考えて良いでしょう)

さて、発電側は、4 エネルギー源が平等に (25 %づつ) 供給が「政策」になっているとします。 総需要エネルギー総量 28 万 kWh (7 万 kWh×4) を 4 エネルギー源で供給するので、各発電電力量は 7 万 kWh です。(図-25)

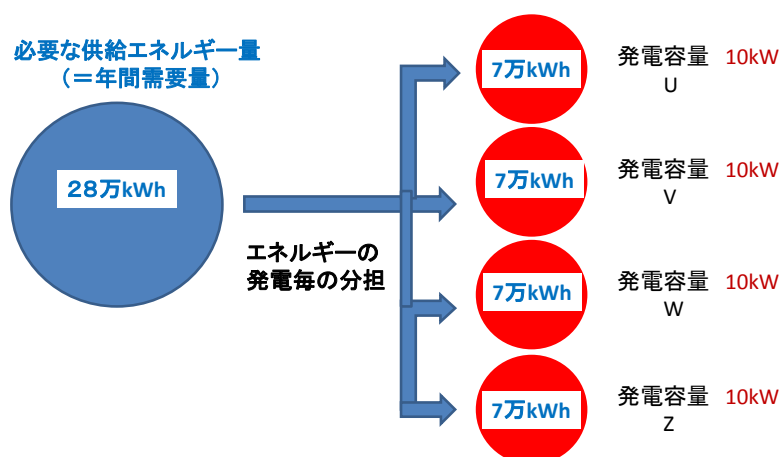


図 25 パターン 1 のエネルギーバランス

② 電力 (kW) バランス

○4 需要家の合計需要カーブ

ピーク期間：夏・冬 (半年→4380 時間とします) は 40 kW (昼も夜も一定)、残るオフピーク期間 (半年) は 24 kW (昼も夜も一定) とします。(図-26)

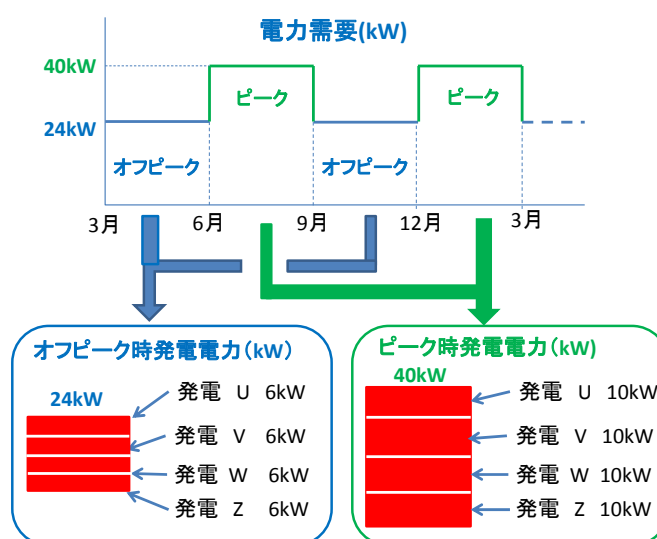


図 26 パターン 1 の電力バランス

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

$(40 \times 4380 + 24 \times 4380) / 40 \times 8760 \times 100 \rightarrow$ 負荷率 80 % となります。

電力バランス維持では、電力系統全体の時々刻々の電力需要（需要曲線＝ロードカーブ）が重要となります。（ここでは比較的シンプルな想定です）

○夏・冬の電力バランス（いわゆる需要ピーク時間の電力バランス）

発電設備各 10 kW とすると、フル出力（40 kW）で需要とバランスできます。しかしながら、通常、電力系統ではこれで良としません。発電機が故障などで停止すると直ちに電力不足となるので、安定供給上問題あり、となります。ここでは、1 箇所（10 kW とします）停止は対応する、とします。このためには 10 kW の発電設備が別に必要となります。ここでは「別置電源」と呼びます。

別置電源はケース 2、3 でも出てきますが、その特徴から、ピーク電源と呼ばれます。ピーク電源は、発電機故障時だけでなく、猛暑で需要が想定より高くなる、需要内の自家発が故障で止まる場合等、様々な場面で活用されます。電力系統ではこの様に「運転機会が一定せずたまに活躍する」発電設備が必要です。電力系統でのピーク電源はケース 1 のイメージより運転時間は長くなる傾向がありますが、運用の特徴は基本的に変わりません。

ここで、ピーク電源（別置電源）の望ましい特徴を列記します。

＝望ましい特徴 A（発電コスト面）

「普段は不要（殆ど使われない）」なので、建設コストは極力安い方が良く、使われない間の（維持）コストは安い方が良いでしょう。一方、燃料費は安いに越したことはないですが、運転時間が少ないのである程度高くても良いとも考えられます。

＝望ましい特徴 B（エネルギー源面）

運転がいつになるか分からないしどれだけ継続が必要か分からないため、エネルギー源（燃料等）が機動的に得られることが望ましいでしょう。一方、普段から貯蔵しておく場合、貯蔵コストが低い方が良いでしょう。

＝望ましい特徴 C（発電設備能力面）

（事故が起きた直後に）直ちに運転開始され必要な発電電力に達する必要があります。対応する故障発電機出力が一定しないものとにかく運転できる場合もありますから、発電電力を柔軟に変えられることが望まれます。

現状の電力系統では、ガス火力、石油火力、貯水式水力（揚水も含まれます）が概ねこの特徴を有します。なお、水力でも、貯水できないと（流れ込み式）、活躍して欲しい時に水がない可能性があるのでピーク電源と呼ばれません。

（余談）元氣な老人火力はピーク電源として余生をすごす

火力設備も年を経ると効率等が最新鋭と比較し見劣りしてきます。一方、建設するために借りたお金は返し終わり（減価償却終了と言います）、建設コストに相当する費用は零ですし、燃料貯蔵設備も通常利用でき、運転能力もそれなりです。つまり、特徴 A～C が備り、ピーク電源としてご活躍いただく可能性が有ります。3.11 の後、「老朽火力を保有している」との電力会社への批判がありましたが、「老人（火力）にも活躍の場がある」ことも分かっていたいただければと、「老化を実感する者」としてつぶやいています。

以上の電源構成で、年間を通じ各発電所が均等に発電し電力供給されれば、エネルギーバランス、電力バランスが維持されるでしょう。（図-26）

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

ところで、本電力系統では、需要電力 40 (kW) に対し電源設備が 50 kW となりますが、この電源設備量／最大需要電力の比を設備率と呼ばれます。本ケースでは、 $50/40=1.25$ です。電力系統によりますが、一般的に、設備率は 1.2~1.3 程度が適正レベルとされ、電力系統の信頼性を評価する重要な指標となります。ちなみに、ピーク時間帯にケース 1 では 2 発電所停止となれば停電が発生するので、「10 kW」で絶対大丈夫とは言えませんから、更に設備率を高めるオプションも有り得ます。

【ケース 2：一部エネルギー源重視の構成】

ケース 1 に対し、一つのエネルギー源（電源 U）のエネルギー供給比率を 40 %、他は 20 % づつ均等とし、需要は同一条件のケースを考えます。（図-27）

① エネルギー (kWh) バランス

各エネルギー源の発電量は、電源 U 11.2 kWh、他は 5.6 kWh (×3) です。（合計 28 万 kWh）（図-27）。

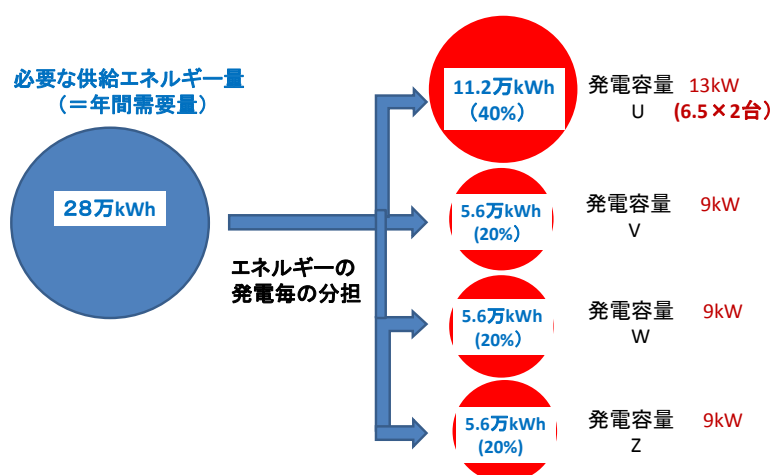


図 27 パターン 2 のエネルギーバランス

② 電力 (kW) バランス

電源 U が年間 11.2 万 kWh 発電するには、1 年中フル発電とすると、

必要発電力 (kW) = $112000/8760=12.8$ kW となります。

ここでは、電源 U の発電力を点検停止によるエネルギー供給力の低下を考慮してやや大きい 13 kW、これを 2 台で構成し運転するとします。(6.5×2 台)

ピーク需要 (40 kW) の電力に対応するには、 $40-13=27$ kW を V、W、Z 電源で供給する訳ですが、年間発電エネルギー量が同量なので、各電源設備量：9 kW (×3=合計 27 kW) とします。なお、実際には、各発電設備の建設コスト等を考慮し発電力が決まり同量とならない場合もあります。例えば、(発電効率等も考慮しつつ) 建設コストの安い電源容量を大きくする等も考えられます。これで、ピーク時の電力バランスがえられました。（図-28）

電源停止等に対応するピーク電源を、最大容量電源に見合う 9 kW とすると、合計発電容量は 49 kW(40+9) となり、設備率 1.225 の電源構成となります。

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

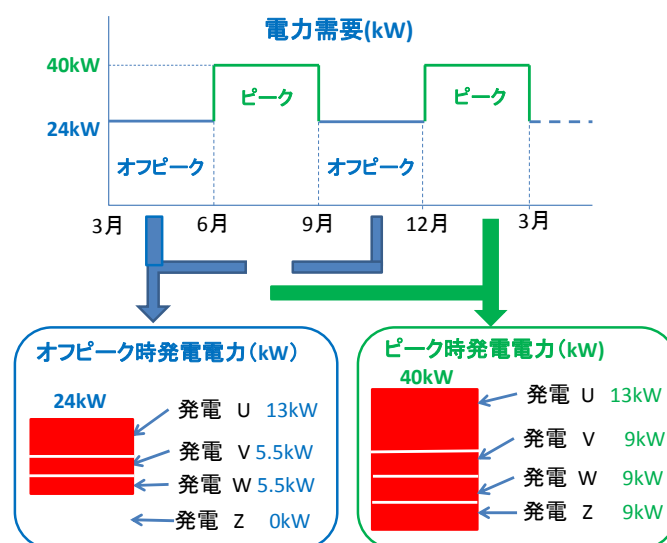


図 28 パターン 2 の電力バランス

（余談）電力系統の大きさに合った電源容量を決めるのは難しい――

電源 U の発電力 13 kW を「2 台構成」とすると、この電力系統の最大発電容量は 13 kW でなく 9 kW になります。9 kW に対応し別置（ピーク）電源を決めるとする場合、13 kW 1 台構成で 13 kW の別置電源より設備率は下がります。通常、発電設備は容量が大きい程経済的（1 kW 当たりのコストが下がる）ですが、一方、発電機停止の影響が大きくなり対応コストが増える可能性があります。このため、両方の考え方の得失を良く検討する必要があります。

同様に 1 発電所当たりの電源設備量を決める際も考慮が必要ですが、3.11 後、電力会社の 1 発電所の発電容量が「集中立地で大きすぎる」との批判がありました。一方、発展途上国では電力系統の拡大や地域間連系（連系すると系統規模が実質的に拡大するので大容量設備に対応しやすくなる）の見通し等も踏まえ最大電源設備容量や発電所容量を決める必要があります。いずれにしても、種々の要素を考慮したかなり難しい判断となります。

さて、ケース 2 では、オフピーク期間の様相がケース 1 と異なってきます。電源 U は 13 kW（フル出力）で（ほぼ）1 年中運転し、年間エネルギー量 11.2 万 kWh となります。このため、オフピークの需要 24 kW のうち、13 kW は電源 U で供給し、残る 11 kW を 3 エネルギー源で供給することになります。供給力は 27 万 kW ですから、3 エネルギー源から同出力で供給すると、供給力に対する出力の比率は（稼働率）、 $11/27 \times 100 = 40\%$ となります。

火力電源の場合、稼働率が 50 % を下回ると発電効率が低下する等デメリットが大きいのので、例えば、順番に止め対応等を行います。1 台ずつ止めて 2 台運転すると、稼働率は $11/18$ ($9 \text{ kW} \times 2$ 台) $= 60\%$ となり 50 % を超えます。（図-28）

ここでは、電源の運転パターンが以下の二種類に分かれることに注目下さい。

- ・ 1 年を通じフル運転する電源 → ベース（ロード）電源と呼ばれます。
- ・ オフピーク時に出力調整する（又は停止）電源 → ミドル電源

ベース電源の望ましい特徴

=望ましい特徴 A（発電コスト面）

ベース電源はいつもフル運転ですから、運転コスト（特に燃料費）ができるだけ安い方がよい

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

でしょう。一方、常時運転されますから運転されない間の維持コストの大小を気にする必要は小さいでしょう。一方、建設コストは安い方が良いですが、燃料費が安い分で賄えるならある程度高くても良いと考えられます。

=望ましい特徴 B (エネルギー源面)

ベース電源の燃料は、年中一定量必要ですから、長期・安定的に入手できることが望ましく、また、貯蔵方法も工夫が必要な場合があります。

=望ましい特徴 C (発電設備能力面)

できるだけ、運転が継続されるのが望ましいので、設備保守/点検期間は短く、軽微な故障では停めることなく対応できることが望まれます。例えば、重要な部分を二つ持つ (2 重化) こととし、運転しながら直す、直さなくても運転できる等の設備信頼性の向上策が必要に応じ講じられます。

(余談) 原子力電源は経済性追求で設備投資を怠った！？

原子力はベース電源で望ましい特徴 C がありますから、信頼性にお金をかけることが必須です。3.11 への批判として、原子力部門への信頼性向上投資が不足していたとされますが、長期間停止に至る事態を避ける投資がされなかったことが仮に事実とすると、そもそもベース電源の考え方が理解されていなかったのでは？ (設備投資をためらう理由が解らないですから) と、電力関係者として忸怩たる思いに駆られます。

ミドル電源の望ましい特徴

ピーク電源とベース電源の両方の望ましい特徴を兼ねるのが理想ですが、どちらかと言えば、ベース電源に近い特徴が好まれます。需要次第、例えばバブル景気で想定以上の需要レベルが長期継続する、などがあると運転パターンがベース電源に近づくことがあるためです。

ちなみに、原子力発電比率が高いフランスでは、日本ではベース電源の役割を担っている原子力がミドル電源の役割も務めています。(ミドル原子力電源は発電出力を需要に合わせ出力調整をします)

【ケース 3: ケース 1 で 1 つのエネルギー源を再生可能エネルギー (太陽光+風力) に置き換えられた構成】

① エネルギーバランス

ケース 1 で、4 つのエネルギー源のひとつ (年 7 万 kWh) が再生可能エネルギー (太陽光+風力) とします。(図-29)

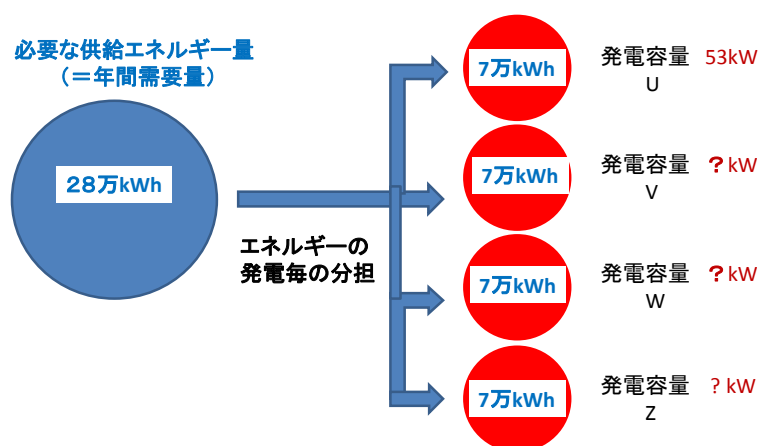


図 29 パターン 3 のエネルギーバランス

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

② 電力バランス

太陽光の設備利用率は 10 % 台前半、風力が 20 % 程度、両者を平均して設備利用率 15% と想定します。発電量と設備利用率から発電設備容量が決まります。

$$15\% (\text{設備利用率}) = \frac{7 \text{ 万 kWh (年間発電量)} \times 100}{\text{発電設備容量 (kW)} \times 8760 \text{ 時間}} \text{ です。}$$

本式から再生可能エネルギー発電設備容量=53 kW が得られます。

なお、再生可能エネルギー電源の設備利用率は技術進歩等で大きく変わりませんから、発電量 (kWh) に対する電源容量が他電源と比較して大きくなる傾向は変わらないでしょう。例えば、太陽光の場合、夜は発電しませんから、最大利用率は 50 %、雨や曇りで出力は必ず低下しますから、日本では 20 % 程度が最大利用率と思われます。さて、53 kW がフル発電するとピーク需要 (40 kW) を超えますが、このような状況が「実際」に起こると電力バランスは維持できません。53 kW は分散していると想定すると、一斉にフル出力にならない可能性が高いと考えられます。例えば、太陽光パネルは向きが違えば、最大発電力の発生時間帯が異なってきます。

全部フル発電の合計と実際発生する最大発電力 (kW) の比を不等率と定義します。(不等率は、本来、需要家個々の最大需要合計と実際発生する最大需要の比ですが、同じ言葉を使用します。)

不等率 0.7* とします。(※数値の決め方が今後の検討課題です)

再生可能エネルギーの最大発電力は $53 \text{ kW} \times 0.7 = 37 \text{ kW}$ となります。

残る 3 kW を 3 エネルギー源の (どれかで) 賄うことになります。(図-30 左)

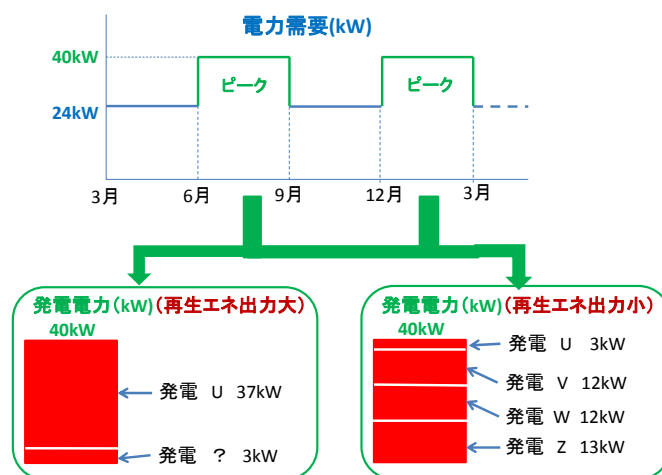


図 30 パターン 3 の電力バランス (ピーク時)

一方、再生可能エネルギー源の発電力が小さい状況の検討も必要です。夜間、太陽光発電出力は零、需要は昼・夜同じとの想定ですから、夜のピーク電力バランスが 3 エネルギー源の必要容量を決めるためには重要です。ここで、53 kW の内訳を、とりあえず太陽光: 28 kW、風力 25 kW と想定し、太陽光は夜間零、風力 25 kW の想定最低出力が必要となります。全部フル出力に対する最低発電力の比を最低不等率と定義し、最低不等率 0.12 (本値も検討課題) とし $25 \times 0.12 = 3 \text{ kW}$ を想定最低出力とします。この時 (夜間) 残る $40 \text{ kW} - 3 \text{ kW} = 37 \text{ kW}$ を 3 エネルギー電源で供給

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

する必要があります。同容量で供給する場合、 $37/3 \approx 12$ kW の電源容量がそれぞれ必要です。
(図-30 右)

12 kW の電源は、再生可能エネルギー源の出力変動が比較的早く発生すると想定すると、機動的な対応のため小容量電源とし小回りがきく様に対応するのが良いかも知れません。例えば 4 kW × 3 台、この様にすれば、(火力) 電源 1 台の最低出力 ($4 \times 0.5 = 2$ kW) を満たしながら機動的に対応できるでしょう。(図-31) なお、これらの電源は、ピーク電源の特徴を有するのが良いと思われます。以上の電源設備に 1 台停止 (4 kW) 対応のピーク電源を別置きすると、設備率は以下となります。

$$(53 + 36 + 4) / 40 = 2.33$$

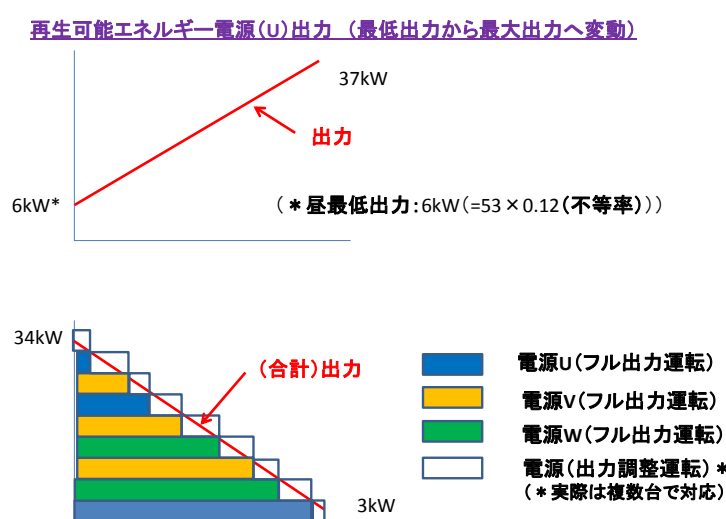


図 31 再生エネ出力変化と他電源の対応イメージ (昼間ピーク時)

オフピーク時 (今回ケースでは春・秋)、特に昼間の電力バランスは、今回の想定では、再生可能エネルギー発電力が、需要を相当上回り、このままでは電力系統が運転できません。(図-32)

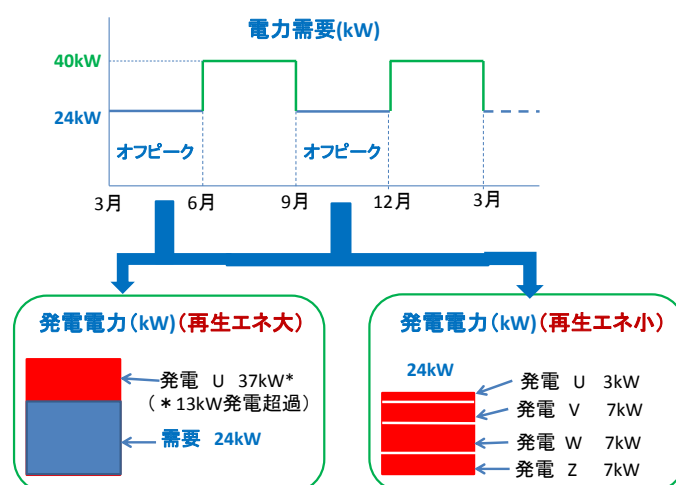


図 32 パターン 3 の電力バランス (昼間オフピーク時)

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

対応方法は今後の検討課題ですが、再生可能エネルギーの出力を絞ること（燃料費零ですから実害は小）、需要を増やすこと（再生可能エネルギーの出力が小さい時間帯の需要を移す → 負荷移行と言います）、超過分エネルギーを貯めるなど、対応策はありますから、経済性等も考慮しながら方向性を決めてゆく必要があると思われます。なお、ここでは他国（地域）と連系されていない前提で解説していますが、連系することが効果的な場合もあります。（今後、国際連系の項で説明します）

（余談）自然に従って暮らすー日本人的な生活観の復活？

「再生可能エネルギーの出力を絞る」のは「もったいない」、再生可能エネルギーに合わせ活動する（電気を使う）のは面倒だ、と思われるかも知れませんが、そもそも日本人は気候に合わせて上手に暮らすことをモットーとしてきましたし、また、必要以上のものは取らないし取ってしまったら返す気風がある様に思われます。再生可能エネルギーと上手に付き合うのは、そんな日本に戻るきっかけになるかも知れません。

さて、ケース 3 では設備率はケース 1、ケース 2 と全く異なります。すなわち、電力系統内の電源設備量は飛躍的に増加し、流通設備などにも様々な影響が出てきます。

ケース 3 から、再生可能エネルギー量の割合がある程度大きくなると、従来（ケース 1、ケース 2）とはかなり異なる電力系統様相（パラダイムシフト）が出現すると想定されます。私なりに（現実はどうなるか想定しづらい面はありますが）今回のケース 3 を総括すると以下のとおりです。

- ①設備率を見ただけでは電力（kW）バランスの評価ができなくなる
 - ②夜間の電力バランスに必要な供給力で必要発電設備量が決まる
 - ③昼間の電力バランスでは発電電力過剰が対応のポイントとなる
- ①、②、③の状況から多くの再生電源以外の電源はピーク型機能が必要となる。
- なお、②、③から「深夜電力は安い」との常識が覆る可能性も高く、再生可能エネルギーの発電に合わせて需要を移行させる仕組みが合理的と思われる。
- ところで、日本は（実質的に）蓄電機能を持つ揚水発電設備が相当量あるので（海外は少ないです）、その運用法等を見直してゆく必要もあると思われます。

（余談）現在の再生可能エネルギー比率の高い国の対応

ヨーロッパでは、再生可能エネルギーの割合がケース 3 に近い、あるいは超えている国も既にあります。でもこの様なパラダイムシフトの声は聞こえてきません。個人的にも興味が有りましたので、ヨーロッパの系統運用者と意見交換しましたが、どうやら、現段階では、各国との系統連系の中で「適当」に処理している様です。例えばドイツの風力電力は、「勝手に」ベルギーやオランダの電力系統を通過し全体の把握が十分されていないのですが、「一時的な現象」として、工夫しながら（対応する系統運用者はぶつぶつ言いますが）対応している様です。確かに、欧州全体で考えれば、再生可能エネルギー量比率（発電量を制御できる水力は除きます）はまだそれほど大きくありませんから対応可能と思われます。

なお、最近、ドイツではミドル電源に相当する火力が次々廃止されていますが、パラダイムシフトが現実化しつつある様にも思われます。

（余談）電力事業自由化が進むと「解説された状況」は変わるのでは！！？

本解説では、特定の間人（ここでは私）が発電設備構成を決めるような説明をしましたが、電力自由化が進めば競争原理で物事が決り、状況が違ってくるのではと思われるかも知れません。こ

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

の点、私なりに世界の電力自由化を俯瞰してきましたが、ある国（地域や州の場合もあり）のエネルギー政策に沿わない電力自由化はあり得ず、法制度や電力系統利用ルールがいわば「神の手」となり必要なコントロールがされると感じています。結局、自由化しても、「神の手」が発電設備のエネルギー源構成や設備量を「導いて」ゆくと思います。

次回も、引き続き発電設備の解説をしてゆきます。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 5 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、今回も発電設備の解説を続けます。

前回、電力系統での発電設備量の需要量に対する比率である設備率を紹介し、電力系統の信頼性を表す目安となることを説明しましたが、もう一つの信頼度目安である（供給）予備率について、まず解説します。

○予備率（力）とは？

予備率（力）＝（供給可能発電力（kW）／最大需要（kW）－1）×100

設備率が比較的長期（年）のトレンド（いわば基礎体力）を表すのに対し、予備率はその時々比較的短期的にみた電力系統の信頼性（いわば瞬発力）を表す指標です。例えば、設備率は、発電設備が定期検査で止っても発電設備量にカウントしますが、予備率ではカウントしません。このため、例えば、需要が想定より増加し定期検査時期をずらすと、最大需要が増えても供給可能発電力も増え予備率が大きくなることもあります。一方、設備率は小さくなります。

一方、設備率は、長期停止し設備を大幅修理する場合は発電設備量に含めないなど電力系統の基礎体力を表わす工夫がされます。

一般的に予備率は 7-10 % が適正、最低 3 % 必要等と言われますが、どの程度の信頼性を電力供給に求めるかで数字は異なってきます。また、同じ信頼度を目指す場合も、需要規模が大きいほど予備率を下げられる可能性があるなど、あまり固定的に考えない方が良いでしょう。

○「毎年の予備率」、「明日の予備率」、「当日の予備率」の算定条件の違い

「毎年の予備率」を算出する時点では、日々の状況が確定していないところがありますから、平均的よりやや厳しめの数値に基づき算定します。例えば、水力の発電力は過去実績に基づき小さめの発電力を選びます。また、発電設備を点検停止する場合、例えば、発電力 1 kW を月の途中、中日の 15 日に停止する場合、その月の発電力を $1 \text{ kW} \times 15/30 = 0.5 \text{ kW}$ とします。実際の可能発電力は 1 kW 又は 0 kW ですが、いわば一ヶ月を平均化した数字 (0.5 kW) を使います。「明日の予備率」では、この部分は実際の数字を使います。

「明日の予備率」と「当日の予備率」でも、算定条件が変わってきます。例えば、ガスタービン発電設備は、気温次第で発電可能出力が増減しますが、例えば気温が上がる程、出力が低下するのですが、直近の気温想定に合わせて算定されます。

(余談) 頭の痛い「揚水発電供給力の評価方法」

3.11 直後、電力会社の供給力の説明の中で揚水発電供給力の予備率への織り込み方がマスコミを賑わせました。(その頃、私はいわき(東北電力管内)で津波復旧、食料確保に専念中) 揚水発電力で予備率が数%変わりますから、厳しい需給状況では注目されます。極端な場合、需要が一定(フラット)、揚水発電以外に余分発電能力がないと、水をくみ上げる余力がありませんから揚水発電力は零になります。(図-33) これほど極端でなくても、需要が一定に近づくにつれ揚水発電力が目減りする、「発電力の潜在化」(潜って発電力がなくなるイメージ)が発生します。

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

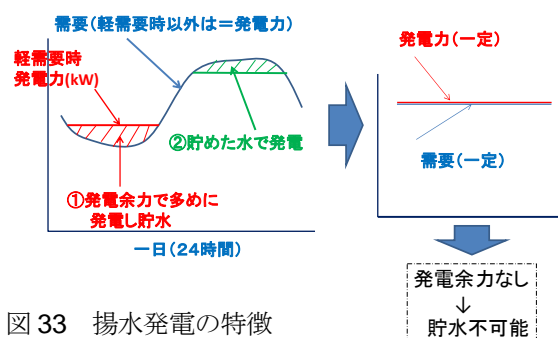


図 33 揚水発電の特徴

このような状況を単純化モデルで示しますので(図-34、図-35)、お時間があるようでしたら読者もチェックいただければ――。

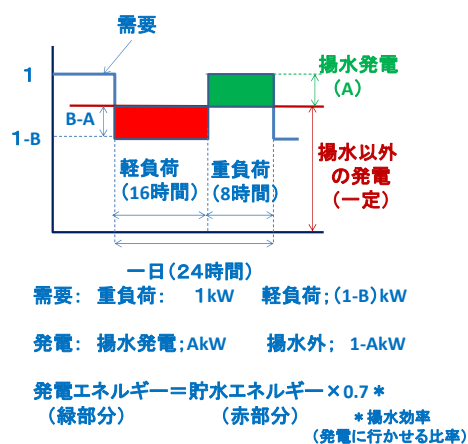


図 34 需要曲線と揚水発電力の関係 (単純モデル)

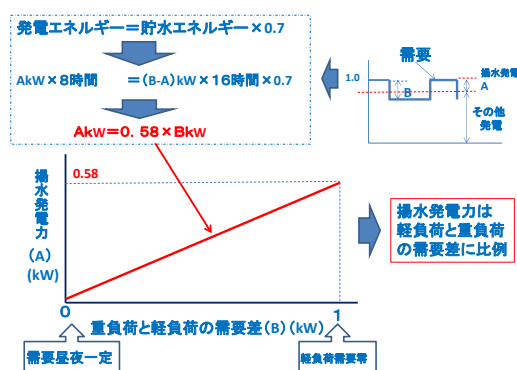


図 35 重負荷と軽負荷と揚水発電力の関係 (単純モデル)

3.11 直後は輪番停電や夜間の電力利用などで、需要カーブが通常と比べ大小の差が小さくなり揚水発電力が相当潜在化したと想定されます。更に、休日(日曜日)の需要低下時に余裕発電力で水を汲み上げ、平日に少しずつ分けて発電されますが(図-36)、週末(金曜日頃)には、それ以前の(需要の予想以上の増加等で)水を使い尽くすことも想定されます。これに伴い週末の供給力が厳しくなる場合があります。いづれにしても揚水供給力は評価が難しいです。(なお、図-34 で揚水効率(貯蔵ロス等による効率低下)を説明していますが、蓄電池等も貯蔵に伴いロスが発生します。)

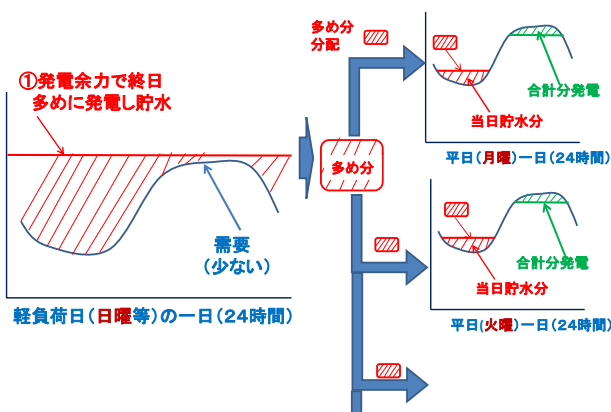


図 36 軽負荷時貯水による揚水発電力の週間運用 (イメージ)

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

○発電と需要のずれを小さくするための対応

前回述べた程度の電力 (kW) バランス維持では、発電と需要の間のずれはなくなり、電力系統維持には、以下の様な更なる対応が必要です。

① 需要の動向を予測した発電調整 (図-37)

「ずれを小さくする」には発電出力を需要に合わせて比較的短期間に変化する必要があります。このため、前回述べたミドル電源とピーク電源から系統運用者が時々刻々事前に出力を指定し発電出力を指示します。(運転指示用コンピュータ入力での対応もあります) 発電設備は指示を受けてから実際に出力が変わるまでに時間がかかりますから、運用者は需要の動きを事前に予測し指示します。通常、専用通信設備で発電設備と運用者が直結されます。なお、指示は、通常、燃料費の安い電源から優先して指示が出されますから経済負荷運用と呼ばれます。

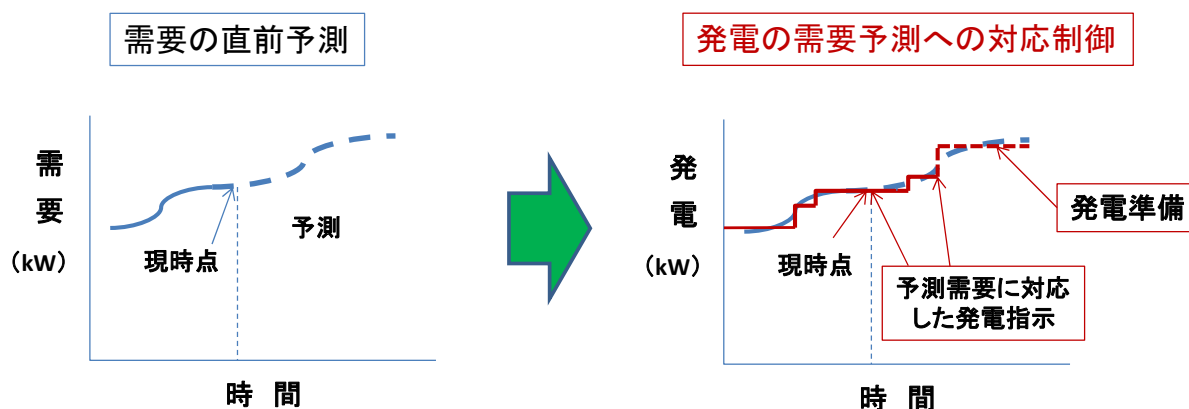


図 37 発電と需要のずれを小さくする：①予測制御運用

② 周波数変化を抑制する発電調整 (図-38)

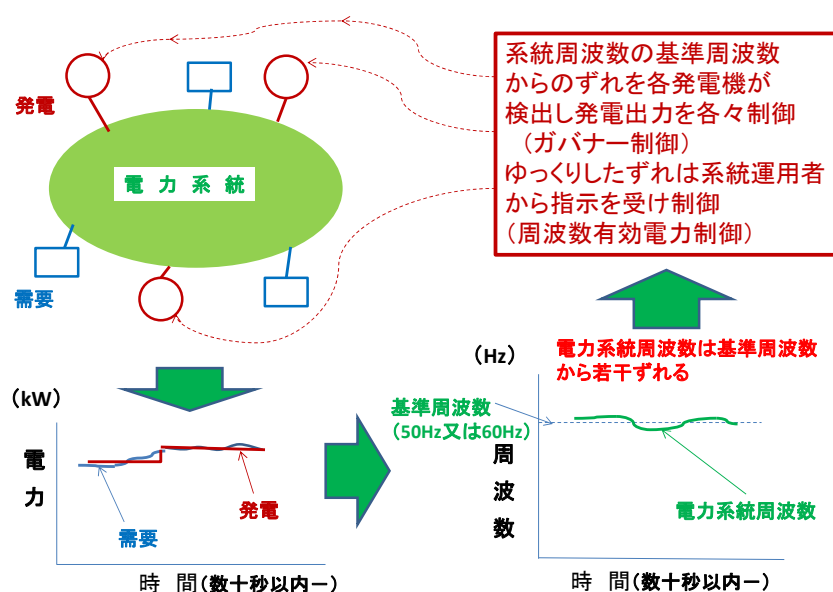


図 38 発電と需要のずれを小さくする：②周波数調整制御

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

①の発電電力調整は予測に基づくため「ずれ」は残ります。このずれにより電力系統では周波数が 50 Hz 又は 60 Hz 近辺で若干変動します。この変動を検知し解消するため発電出力を変化させ周波数変動を改善する制御が行われます。この役割は、発電設備に付属する周波数変化を検出し発電機出力を変化させる装置、ガバナー（調速機）が荷います。ガバナーは通常どの発電機にも設置され、本来、周波数変化が発電機に悪影響を生じさせないように発電機を守る（「保護する」）ための装置です。この機能が働くことで電力系統の周波数維持に良い効果を与えます。なお、この機能を止め（ガバナーロック）運転される場合もありますので確認が必要です。なお、ガバナー使用時も（ガバナーフリー）、一定の変化限度（出力の数%）を設け設備に過度なストレスをかけない様にします。出力の変化範囲は小さいですが変化は比較的速いので「小まわりのきく出力調整」ができます。また、比較的ゆっくりした成分のずれに対し、①で述べた運用者との専用通信設備を利用して周波数有効電力制御が行われます。

①周波数の急激又は大幅な変化を解消する緊急対応（図-39）

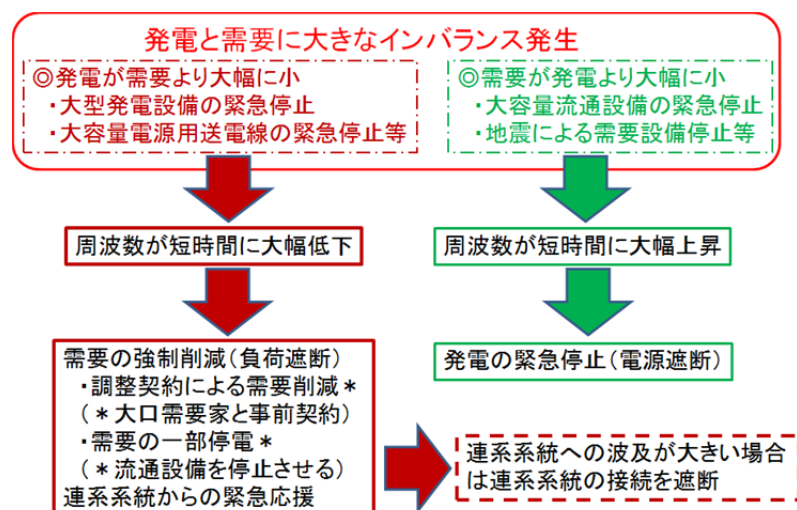


図 39 周波数維持のための緊急対応

①や②の対応では間に合わないときやずれが非常に大きいとき、

- ・発電力が需要より相当大きく周波数が大きく上昇する場合、発電機を自動的に停止させます（電源遮断）
- ・需要が発電力より相当大きく周波数が大きく低下する場合、需要を自動的に電力系統から切り離します。（負荷遮断）なお、この場合、停電が発生しますが、電力系統全体の停電を回避するため停電させます。
- ・バランス維持できそうにない電力系統とバランス維持ができそうな電力系統に分けます。（系統分離）（図-40） 流通設備の決められた点で遮断器（ブレーカー）を自動的又は手動で開きます。この場合、「バランス維持できそうにない電力系統」は全部停電やむなしとし、残る電力系統を救います。

（余談）電力系統は「非情な世界」

イタリア全土停電の場合（2003 年）。イタリアで電力バランスが維持できない（発電力が需要に対し不足）と判断された時点でフランス等から切り離されました。もともとフランスから電力融通を受けていましたので、切り離された瞬間一挙に発電不足が深刻化しイタリア全土の停電に

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

なりました。(図-40 の A がフランス、B がイタリアです) フランスにすれば「イタリアの影響を受けず無事で良かった」ですが、イタリアは一国が「犠牲」になる非情な対応となりました。

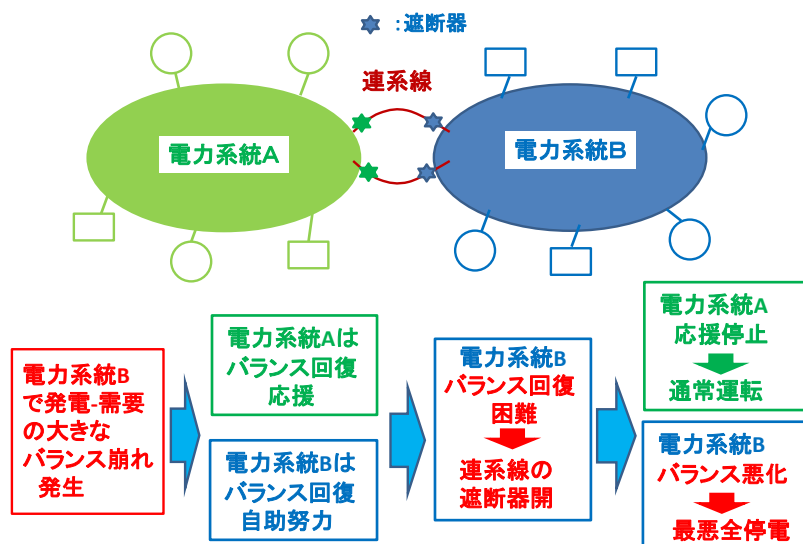


図 40 電力系統分離（分割）

ずれを解消するための準備・実施には費用（コスト）がかかります。電力会社が電力供給を独占的に対応していた自由化前は、個々の発電設備の役割に応じたコスト区分けは細かくしていませんでした。電力自由化が進むと、これらの役割はアンシラリー（補助的）サービスと定義され、必要量の確認やコスト分類を明確化する必要があります。なお、アンシラリーは「補助的」と訳せますが、このサービスがないと電力系統運用不能ですから、「補助的」なものではありません。（元々の英語表現が良くない珍しい?例と思います。）

なお、費用算定はなかなか難しく、例えば機能①は、需要増加が予想される時に発電設備の供給能力を一部使わず出力増加準備する必要があり、本来、能力を使って最適運転すれば販売できたはずの電力販売を犠牲にしたと考え算定されるのが諸外国では一般的です。これは経済学の機会費用（オポチュニティーコスト）に該当しますが、実際の算定方法は種々考えられます。

アンシラリーサービスは、範囲が広く複雑ですので、「自由化」の項であらためて総合的に解説します。

○再生可能エネルギー電源の拡大と発電・需用のずれへの対応

気候次第で発電力が変動する再生可能エネルギー（以下再生発電力）の比重が拡大すると発電と需用のずれの様相が変わります。まず、再生発電力は、かなり大幅な出力変化を生じる可能性があります。次に再生発電力を完全に予測することは不可能ですから、需要予測の予測との違いと合わせてずれの発生が拡大すると予想されます。(図-41) 以下では、需要から再生発電力を引いた残りを「修正需要」と呼ぶこととします。

発電機能への影響を考えるには、まず、修正

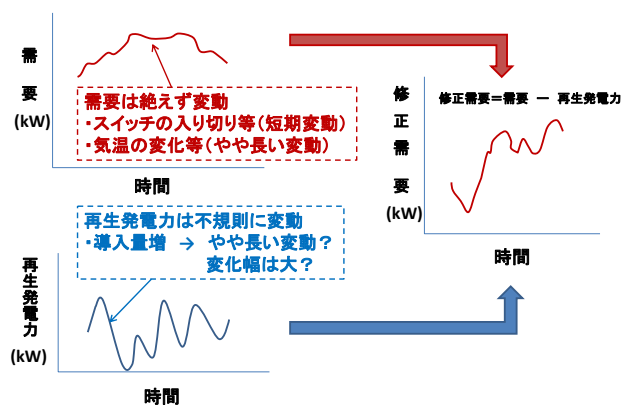


図 41 再生発電力と修正需要

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

需要の的確な予測ができる必要があります。需要側での蓄電システム等も含め想定手法を常に向上していく必要があるでしょう。

(余談) 気象予測精度向上にも期待！！

的確な予測に関しては、気象予測の精度向上も期待したいです。例えば、今の予報の台風暴風雨圏、円内は同じ暴風が吹き大雨が降るとされますが、風速 25 m 以上では風力発電停止、大雨なら太陽光出力ほぼ零となり、大型台風が接近する場合、再生発電力が広い範囲で一気に零との予測になります。一方、台風銀座の和歌山で育った経験から、暴風圏内全域が全てその様な状況になることはない！です（「目」以外でも風が弱く日が照る場合もあります。）から、暴風雨圏に代わる適切な台風影響予測の開発が望まれます。これらを含め再生発電力の特性に対応する気象状況の予測精度向上が期待されます。

修正需要の予測向上が図られたとしても、調整力①、②が現在以上に必要と思われます。一方、修正需要は、本来需要よりも需要レベルは小さくなるので、ベース電源の出力変動対応も必要になる可能性があります。なお、水力発電（特に水を貯められる貯水式）は、再生発電力への調整力として有効活用が期待されますが、揚水発電の場合、水をくみ上げる際に（通常、夜間や週末）出力調整できない設備が多いため、変化可能な設備への改造が必要と思います。

また、蓄電設備による変動吸収が考えられますが、近場の変動対策だけでなく電力系統全体での吸収も望まれますから、総合的なコントロール方法が重要となると思います。

なお、電力系統間の連系を図り（強化し）、対応するのも一つの対策です。簡単な例でイメージを説明します。図-42 の系統 A、B は単独では発電電力と需要がバランスしていないので運転できません。両系統を連系すると発電と需要はバランスし運転可能となります。これは非現実的な例ですが、再生発電力は連系し広域化するほど全体として平均化する効果が期待できると考えられます。ただし、この際、系統 A、B 間連系線に不規則な電力を流せるのが前提となります。この場合、「理論的には」発電と需要バランスで決まるままとするのが良いですが、欧州では（勝手な）「まま」に流れることが電力系統にとり重荷となっています。（前回参照） このため、再生発電力が増え影響が大きくなるとバランス維持のために、系統連系について必要量や運転方法が重要な課題となります。なお、再生電力の配置に系統間アンバランスが大きい場合、例えば図 42 の A で再生電力が多く B で少ない場合、①②の余力がある電力系統（通常は B）の力を借りる方策が検討されます。

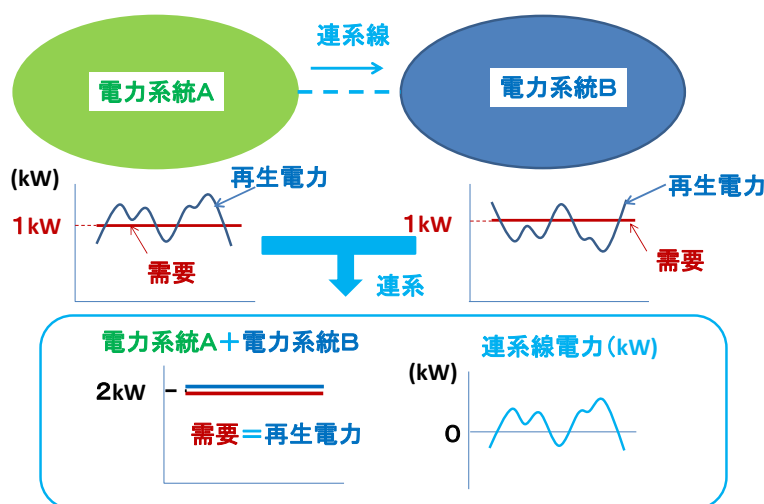


図 42 再生電力と連系効果

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

(余談) 周波数変動は本当に怖い！？

発電と需要にずれがあると周波数が変動する訳ですが、周波数は、変動が数% (通常、3 %程度) を超えると需要家や発電設備への影響が顕著化すると言われています。発電側では、ガスタービンなどは周波数変動に敏感で数%の変動で影響が出てくる場合があります。この点は設備導入時に設備の特徴を確認しておくとい良いでしょう。過去にマレーシアで周波数変動が原因でガスタービンが大量に停止し大停電となった例がありました。

なお、ゆっくり変動するなら変動幅がもう少し大きくても大丈夫な気がします。発展途上国では、意図的に周波数を下げ運転する場合があります。周波数を下げると需要が減る (電車のスピードが落ちて使用エネルギーが減るイメージ) ことを活用し?、不足気味の発電力で系統運用する「生活の知恵」として周波数低下をさせている様です。私の見るところ、ピーク需要時間帯に“安定的”に周波数を下げ運転しても (5 %程度)、余り問題ないように見えました。

ところで、インバータを使用した需要 (最近のエアコンなど) は、周波数が下がっても一定出力が確保でき需要家にとって優れもののなのですが、「周波数を低下させ需要削減」する立場からは「伝家の宝刀が使えない嫌な需要」になるかも知れません。今後は発展途上国を含め増加してゆくと思います。

○電力バランス維持機能以外の基本機能

・電力流通に必要な電圧維持機能

電力=電圧×電流ですから、電力を流通設備へ送り出すには電圧を適切なレベルに維持できることが大切です。一般的に発電設備電圧は比較的低く設定し発電設備を小型にし、変圧器を通して高い電圧に変換 (変圧) し流通設備で電力送電するのに適した電圧とします。(図-43) なお、発電機は、通常、設備内の電気磁石用の電流制御 (励磁装置) で電圧を調整しますので、この仕様設定が大切です。電圧維持に必要な設備仕様、特に大容量発電設備の場合は、電力系統シミュレーションで検討し決定する必要があります。

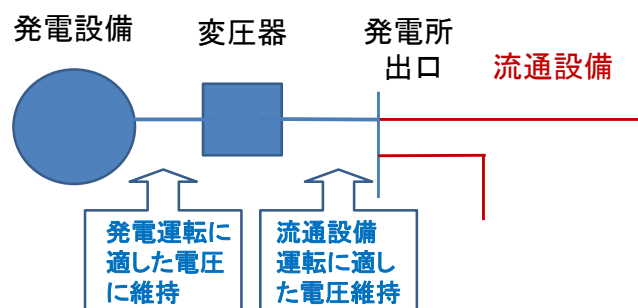


図 43 発電設備の電圧維持イメージ

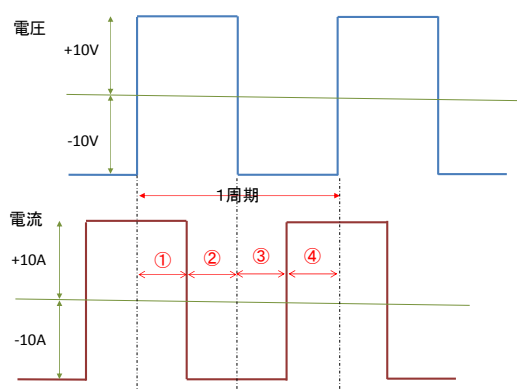
・電力流通に必要な無効電流供給機能

発電設備を電力系統と交流連系すると無効電流のやりとりが生じます。

発電設備は優れた無効電力調整 (やりとり) 機能を発揮しますので解説します。以前、電流位相が 90 度ずれた電流は電力を運ばないことを説明しましたが (第 1 回の図-6)、実は 90 度のずれ方は二種類 (パターン) あります。(図-43) この 2 パターンの電流、図 A と B は同時に流すと打ち消されます。発電機は励磁装置の制御で電流 A、B どちらも流せます。(詳細は専門書参照) 電力系統では、A や B の無効電流を打ち消し適正に運用されるのですが、発電機は打ち消し効果を上手に働かせます。(説明は次回以降の流通設備編を参照下さい)

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



第 1 回の図-6

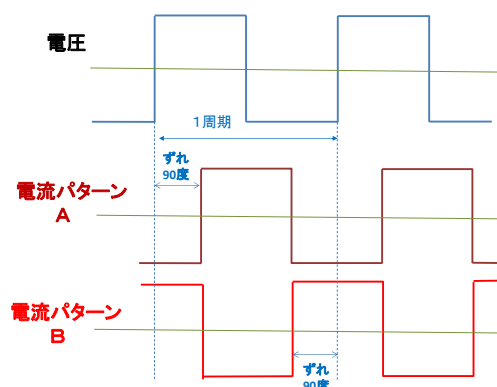


図 44 2 種類の無効電流イメージ

ただし、能力発揮には、発電機容量に無効電力電流分を見込む必要があり、具体的には、発電機容量 (kVA) > 発電機出力 (kW) となります (2-10 % 大となる)。また、高電圧に変換する変圧器設備容量 (kVA) 電圧変換比率も機能発揮に見合わせる必要があります。特に大容量発電設備の場合、電力系統シミュレーションで仕様を決めるのが良いと思います。

(余談) 無効電力関連の用語補足

電力系統で、A パターン、B パターン電流を適宜打ち消す制御を調相、その機能がある設備を調相設備と言います。発電機はこの面で、調相設備と呼ばれます。A 電流、B 電流を区別する場合、進相無効電流、遅相無効電流と呼びます。なぜ調相と言うのか、なぜ進み、遅れと言うか未だにすっきり頭に入りません。多分、電力技術者以外の方にとっては更に高い知的障壁と思います。「無効電力関連」は電力技術説明の鬼門と思います。

・その他

ー同期化力強化機能

第 3 回で交流電源の間には同期化力 (発電機間でスクラムを組むイメージ) が働いて相互に一体となり運転されていることを解説しました。このスクラム力を強めるために交流発電機の機能を指定する場合があります。

* 励磁装置のグレードアップ

励磁装置の動作を速くするとともに、スクラム (同期化力) が崩れかける時に強くする能力を持たせることができます。なお、励磁装置をグレードアップすると発電機の絶縁等の強化も必要です。特に大型発電機の場合、電力系統シミュレーションでのグレードアップの是非を決定する必要があります。

* 発電機リアクタンスの低減

発電機にはリアクタンス (無効電流を発生させる要素) があるのですが、これを低減すると発電機間のスクラムが組みやすくなります。(同期化力向上) この活用効果が大きい時、低リアクタンスとする設計とします。

その他に、発電設備機能の検討対象として、蒸気を使用する発電設備 (火力や原子力発電) のタービンバイパス容量 (緊急に蒸気を制御し発電設備の緊急運転性能を高める) の設定等があります。専門的なので説明は割愛します。なお、以上の様な機能向上には設備建設コスト増加が伴

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

うので必要性は良く見当する必要があります。

○電源コストの考え方

発電設備を建設、維持、廃止するには、電源コストを算定し経済性を評価する必要があります。電源コストは、マスコミ等でも報じられますから、簡単に考え方を説明します。

基本的には、各発電設備の利用率（稼働率）に基づき、燃料費、設備維持費、投資回収等を織り込み kWh 当たりの発電費用（円）を算定します。

利用率は、ベース電源 70-80 %、ミドル電源 50 %、ピーク電源 10-20 % が通常想定されます。

燃料費など発電量（kWh）に応じて発生する費用は可変費と呼ばれます。この場合 1 kWh 発電に要する費用（単価）は一定と想定されます。一方、設備維持費や投資回収は発電量に拘わらず一定みなされ、固定費と呼ばれます。

以下、例を用いながら説明しますのでイメージをつかんでみてください。

1 kW の電源に設置・維持・運転するのに下記コストが必要とします。

| | 可変費単価(kWh) | 固定費（年間） | 利用率 |
|-------|------------|---------|------|
| ピーク電源 | 15 円 | 1 万円 | 10 % |
| ミドル電源 | 5 円 | 3 万円 | 50 % |
| ベース電源 | 2 円 | 5 万円 | 80 % |

可変費は概ね燃料費.....

1 kWh 当りの発電コスト（発電原価）（円）は次のとおりです。

ピーク電源=15 円+10000 円 / (1kW×8760×0.1) =21.47 円

ミドル電源= 5 円+30000 円 / (1kW×8760×0.5) =11.85 円

ベース電源= 2 円+50000 円 / (1kW×8760×0.8) = 9.13 円

この値がマスコミ等で良く報道されます。.....

これだけ見るとピーク電源は随分高いですが、なぜ使われるかを年間に要するコスト（1 kW の電源）で説明します。

ピーク電源= 1×8760×0.1×15 円+10000 円=23140 円

ミドル電源= 1×8760×0.5× 5 円+30000 円=51900 円

ベース電源= 1×8760×0.8× 2 円+50000 円=64016 円

年間コストは、ピーク電源が圧倒的に安いので活用されます。.....

ここで横軸を利用率、縦軸を発電原価としてグラフ化してみると（図-45）、

ベース電源は利用率が下がると、発電原価は高くなり、ピーク電源より劣ることが判ります。一方、縦軸を年間コストとすると（図-46）、ピーク電源は利用率が上がると年間コストが急激に上昇します。ピーク電源は高い利用率の運転に向かないのです。

3.11 以降、本来のピーク電源の利用率が高くなり、年間全発電コストが大きく上昇しました。本来の低い利用率なら、電源全体の年間コスト削減に役立つピーク電源を、経済性を犠牲にして無理に運用したためと考えられます。

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

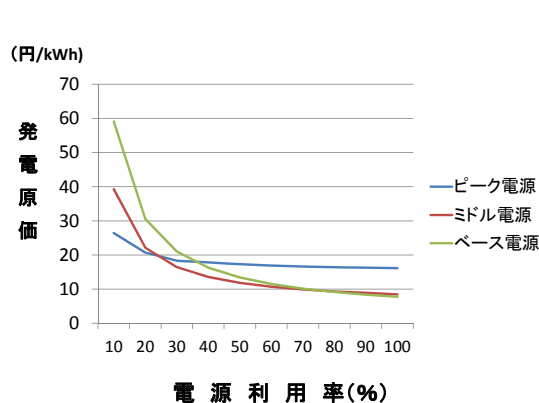


図 45 電源利用率と発電原価

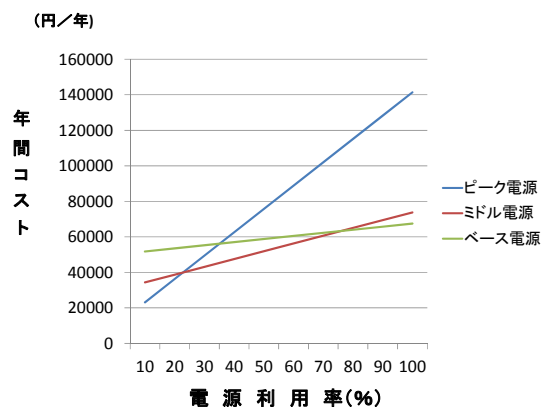


図 46 電源利用率と電源 (1kW) 年間コスト

なお、前回、ピーク電源は「元気な老人火力が良い」と言いましたが、「元気」とは維持費が比較的小さく（病院のお世話にならない）固定費低、「老人」とは古いがたまに活躍する、すなわち利用率低、のためです。

なお、大きな電源、例えば、100 万 kW 電源でも固定費を 100 万で割り kW 当たりのコストを求めれば検討方法は同じです。

実際の電源コストは、コストを長期に亘り想定し、年間の kWh 当りの平均固定費や可変費を求め算出します。この場合、将来の物価上昇や燃料費傾向なども考慮されます。また、将来コストは割引率を用いて現在価値で評価します。(図-47) なお、割引率は将来の金利動向なども考慮する必要があります設定は難しいです。

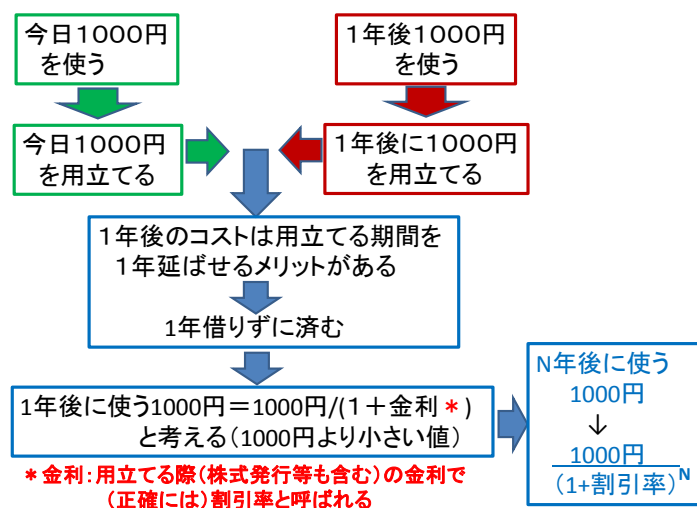


図 47 将来コストを現在のコストに見直す考え方

いづれにしても、発電コスト (原価) は、算定条件を良く理解する必要がありますし、条件次第で相当変動するので注意が必要です。

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

(余談)「報酬率」の悲劇

将来要する費用を現在の価値に見直す際「割引率」を使います。これは、説明を省きますが、お金を用立てる（借入、社債発行、株式発行等）際のいわば平均金利です。ところで、電力料金算定の際、設備投資用資金の平均金利は報酬率と呼ばれますが、考え方は割引率と同じです。3.11 以降、この「報酬」との言葉のため、不当又は安易に利益分を料金に上乗せして料金を計算している！との論調が一時盛んになりました。資金をただで提供する人はいませんから、資金を用立てる際には割引率に相当する費用は必ず必要になります。結局、「報酬」との「言葉」が引き起こした（悲しい）悲劇と感じました。

電源設備はこの程度とし、次回から流通設備の解説に入ります。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 6 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、今回から電力系統の流通設備の解説をします。
流通設備は通常、送電設備、変電設備、配電設備に分類されます。まず全体イメージを説明します。

○流通設備の基本構成

流通設備では「電圧」が設備の特徴を示すポイントとなります。このため、以下では電圧に焦点を絞り説明します。

一般家庭が電圧 100 V、契約電流 40 A (私の契約) で使う場合の電力 (kW) は、最大 $100 \times 40 = 4000$ W (ワット) → 4 kW 程度となります。

4 軒集まると 16 kW、この規模を短い距離なら 20 kW 発電機 1 台で送電する場合、電圧 100 V の電線 1 本の流通設備で十分でしょう。(図-48)

さて、1 万軒集まると 40 万 A、4 万 kW (実際は不等率のため少なくなる：第 4 回参照)、発電設備は 4 万 kW 1 台 (日本でよく使用されている大型発電機 100 万 kW 程度に比べれば小さい発電機)、4 軒で 1 本の電線として合計 2500 本を 1 台の発電機へ結べば、図-48 の系統を拡大した形となります。(図-49) 単純ですが、発電所の周りの 100 V 線設備の設置場所確保、発電所から離れた需要との送電ロスなど種々の課題が生じます。そこで、ある地点で 100 V 線をまとめ電圧 1 万 V に変換し (電圧 100 倍、電流 1/100)、100 V・2500 本の線を 1 万 V・25 本にまとめ更に途中で 1 万 V 送電線のある程度まとめて発電所周りの電線を減らします。(図-50) 実際、この形態の流通設備は離島等で見られます。さて、25 本を減らすため電圧を途中で 5 万 V に変換し (電圧 5 倍、電流 1/5) に変換し線を 5 本にまとめるとすっきりします。(図-51) 「すっきり感じる」のは合理的なためですが、個人的な趣味でない証拠に、世界中の流通

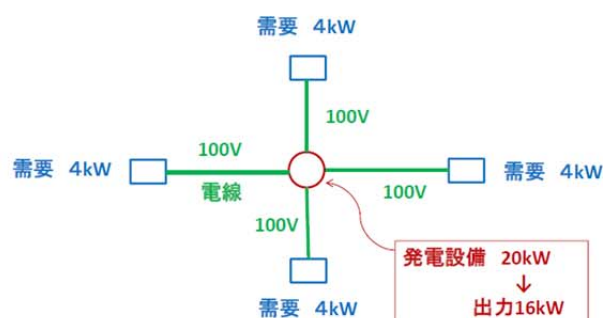


図 48 小さな電力系統

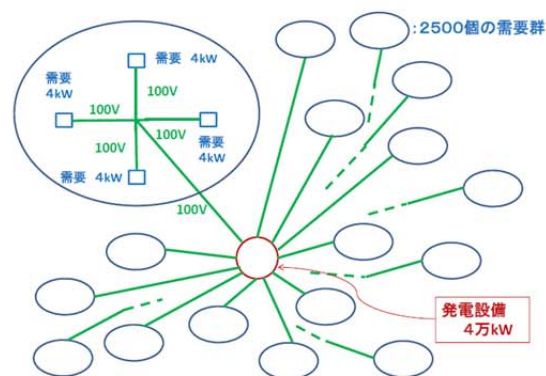


図 49 小さな電力系統をそのまま拡大した系統

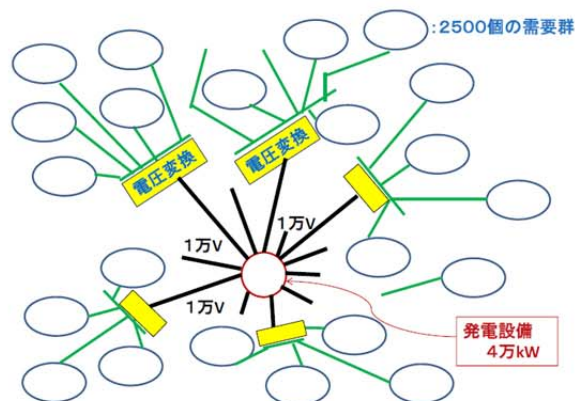


図 50 高い電圧 (1 万 V) を活用した電力系統イメージ

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

設備の基本はこの形です。電圧が 1000 V 以下のレベルでは電圧変換率は数十倍、数万 V 程度での変換は 5 から 10 倍程度、更に高い電圧レベルでは 2—3 倍程度が採用されます。変換率は、需要家の契約電流や電力、需要家電圧 (100 V、200 V、400 V、更に高い場合もあります)、ひとまとまりの需要の大きさ、電源の大きさ等で変わります。使用電圧は概ね国毎に決まっていますが、古い線の電圧は、「技術的にこれ以上高い電圧技術がなかった」等で決められたなど、例外的に異なる電圧が使用されている場合があります。

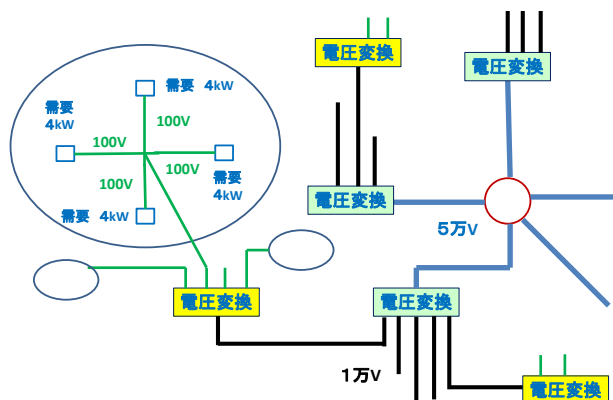


図 51 電力流通設備の基本モデル

(世界中の) 電力技術者は図-51 の電力系統構成が「心地良く」感じるのですが、その理由は次のとおりです。

- ・ 小規模の需要 (家庭など) に対し、低い電圧レベルを採用し、いろいろ状況変化 (引越しや新築等) に対し簡単・効率的に変更できる。
- ・ 発電所周辺が電線のクモの巣状態にならず、例えば、発電電力増強が計画された場合、電線を新たに作る余地を確保できる。
- ・ 設備数を減らせるので保守・点検が容易で効率的に行える。

実際の電力系統では数百万軒以上の大小需要家に電気が供給されますから、更に高い電圧を使いまとめます。ちなみに、交流の世界最高電圧は 100 万 V で日本がその分野で高い技術力を持っています。

(余談) あらかじめお詫びしておきますが――

以上の説明では、交流電圧の单相、3 相を区別していません (第 1 回参照)。このため、技術者の方から「ご指摘」があると想定します。個人的には、電力流通設備のイメージの説明としては「悪くない」し、厳密にすると複雑になりますから、申し訳ありませんが、(今後も含め) この様な「説明の単純化」をしたいと思います。ちなみに、私が電気の授業で試験問題を作るなら「前の説明の誤りを指摘し正しく直せ」とします。お時間のある方は是非チャレンジ下さい！

需要家と直接繋げる電力系統設備を配電設備、高い電圧で電気をまとめて送るとともに (大型) 発電設備をつなげる設備を送電設備、電圧を変換する設備は変電設備と呼ばれます。なお、変電設備のうち低電圧変換を担う小容量変圧器は電柱などに設置されるので配電設備に含まれます。高電圧変換は広い場所が必要なため、そのエリアを変電所と呼びます。なお、発電所で電圧も変換しますが通常発電所の一部とします。なお、配電設備に分散型発電設備 (再生可能エネルギーや自家発電設備など) が繋がりますが、配電設備の項で解説します。

では、流通設備の中から、まず、送電設備の解説を始めます。

○送電設備の機能と役割

送電設備は配電設備と比較して高い電圧の設備です。この「高い」電圧のレベルは、国により異なりますが、概ね、5 万 V 以上と考えて良いでしょう。

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

送電設備は、発電設備と需要を高電圧で結びつけるのが基本的な役割ですが、発電設備の位置や出力、需要の位置や量、必要な信頼性が重要要素となります。送電設備は通過する地域住民にとり迷惑設備（NIMBY (Not In My Back Yard → 私の近所は困る！設備と呼ばれます) と一般的に見られますので、設備作りの調査開始から完成までに長時間を要します。（10 年以上かかる場合もあります） また、一旦作ると変更が難しいことも多いため、完成後の長期的な見通し（数十年）のもと機能発揮することを目指して設置されます。

機能のイメージ説明のため、具体例、発電設備 50 万 kW（10 万 kW×5 台）、需要は 40 万 kW を想定し（設備率：50/40=1.25）で解説します。

ここでは、交流流通設備を念頭に考えます。

需要が発電から 50 km 程度離れた所に集中し長期に亘り殆ど増加しない見通しを前提とした送電設備例を図-52-1 に示します。一方、需要が同じ場所で相当急速に 2 倍程度に増加するのに対応した送電設備例を図-52-2 に示しますが、需要増に対応するため高い電圧（30 万 V）設備を最初から作っています。なお、高電圧（30 万 V）化が可能な設備とし、最初は低い電圧（15 万 V）で運転、必要時期に変圧器を置き高電圧化（図-52-2）する場合があります。発電と需要間の送電距離が 400 km の例を図-52-3 に示します。同じ需要量、発電力でも安定性確保や送電ロス削減のため送電電圧を高く（50 万 V）します。なお、送電設備での信頼性を維持するため、一送電設備停止（1 回線停止）で停電とならない 2 回線としました。

これだけなら設備形成検討は簡単ですが、実際には、発電設備の位置、需要の位置、それらの間の距離、その増加具合は種々想定されますし、更に他電力系統との連系の進み方等が複雑にからんできます。主な想定要素を図-53 に示しますが、想定次第で送電設備構成が大きく変わる場合もあります。これらの要素は時間の経過と共に変化していきますし、結局、全てを網羅した検討は不可能です。図-53 の 19 要素を前提に、仮に各要素 4 パターンに限定しても、組み合わせは、 4^{19} ＝約 2700 億パターンとなってしまいます。この

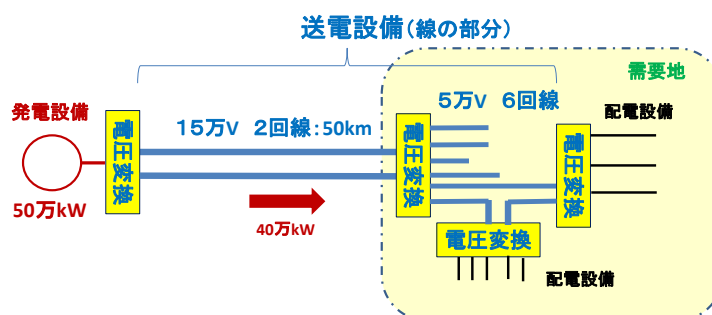


図 52-1 こじんまりした送電設備系統（需要増加が少）

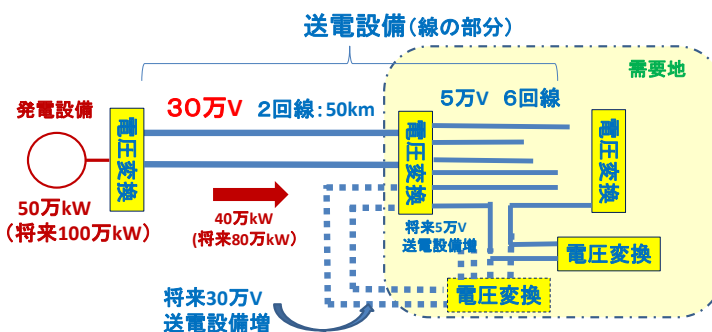


図 52-2 こじんまりした送電設備系統（同じ地域で需要急大增）

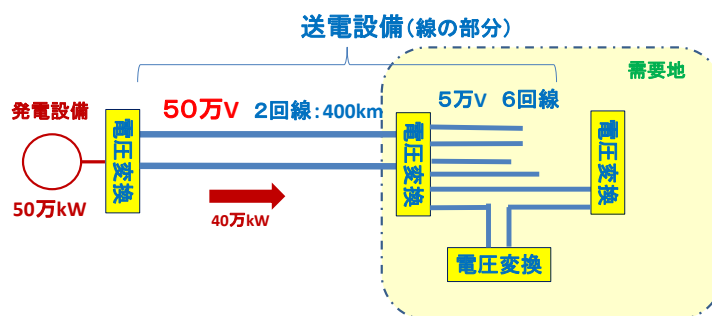


図 52-3 発電と需要が離れている送電設備系統

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

ため、代表パターンを決め、3~4 の特徴的な送電系統構成を設定し、それらに対し要素を様々に変えて検討・経済性の評価等を行います。なお、経済性評価は、時間をかけて送電設備投資は行われていきますから、現在価値換算評価（第 5 回参照）を行います。この様な検討プロセスを辿っても、全てを網羅できなません。このため、完全な正解は得られていないと認識し常に見直しを加えていきます。(Rolling Planning と呼ばれます)。この様な課題では、そもそも検討要素が常に変動するので、例え大型計算機を使っても正解は得られず、最終的には、熟練技術者が経験とセンスに基づき「良さそうな設備形成」を絞り込んでいきます。(別回で説明)

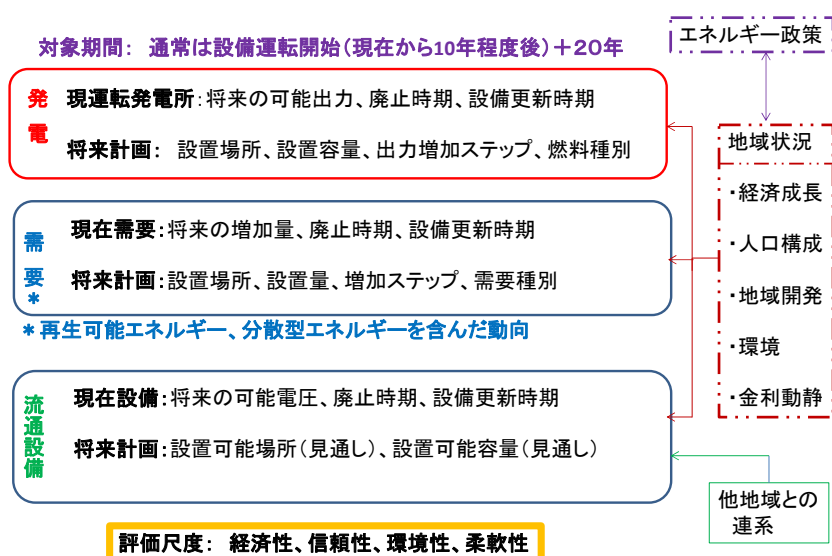


図 53 送電設備計画の検討要素

(余談) 正解がない問題に答えを出すのは難しい

この業務に携わった時、「一人前になるには 10 年かかる」と言われました。実際経験から、その程度の期間は必要な(熟練)技術と感じます。将来想定には、常に不確実な部分がありますが、どの程度の変化にまで対応力を持たせるかは非常に難しい判断です。海外技術者と「不確実な将来に対しより良い電力系統を構築する方法はないか?」が話題となったのですが、「そんなものはない!」が結論でした。なお、議論の中で Minimum Regret 法: 想定と違った場合に Regret (後悔) が最小 (Minimum) となる案を選ぶ方法が“それなりに使えるのでは?”とされました。ただ、この手法、例えば、趣旨は違いますが「今の家内を選んだ結婚人生は Minimum Regret か」と考えてみると、そもそも何を Regret とするかで評価が相当違う!との結論に至りました。読者の皆様も自分の人生を振り返り評価してみてはいかがでしょうか。

○基幹流通設備(系統)と地方供給設備(系統)

送電設備は、一度設置すると数十年使用され、その間にも使用法は変化します。設備変更は簡単ではないので、ある程度、様々な状況に対応可能な構成を目指す場合、電力系統の一部送電電圧を高めに設定し電気を安定的に流れやすくしておく、道路で言えば車線の多い高速道路を作っておくとの考え方があります。(図-54) ここで「高い電圧」は電力系統規模(電源や需要量(kW))で決まりますが、一般的に 30 万 V 程度(日本では 27 万 5 千 V)以上です。また、使用電線もロスが少なく大電流を流せる比較的太いものとします。この様な設備は、基幹送電設備(系統)(Bulk Power Transmission system)と呼ばれ世界的な用いられているコンセプトです。こぢんまりした電力系統

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

で長く対応できる場合は不要ですが、電力系統の規模があるエリア内で 100 万 kW を超えての成長が想定される場合、基幹流通設備形成を考慮すべきと思います。

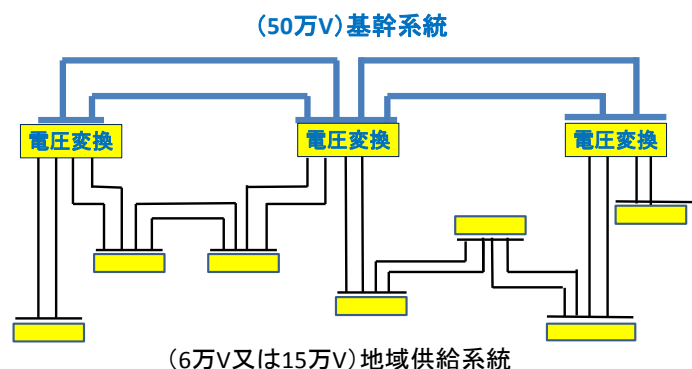


図 54 基幹系統と地域供給系統

ところで、基幹流通系統と配電設備系統間の送電電圧設備は地方供給設備（系統）と呼ばれます。なお、「地方供給」と言うと、狭い範囲の供給イメージを持たれるかも知れませんが、欧米では数百 km 以上に亘る場合もあります。

なお、大容量電源（数十万 kW 以上が目安）を長距離（数百 km 程度以上が目安）送電する場合、高電圧送電が必要な場合がありますが、同じ高電圧でも基幹流通設備と役割が違うため、電源流通設備（系統）と呼ばれる場合があります。この点で、前の図-52-3 の 50 万 V 設備は電源系統と呼ばれます。

○送電設備の信頼度：N-1 基準の考え方

流通設備の信頼性をチェックする際、N-1 基準と呼ばれる考え方が用いられます。例えば、設備形成を検討する際、送電線 1 設備が停止した場合に電気が問題なく送られるかを（総）チェックします。（図-55） この場合、マイナス 1 とは、一設備が突然停止することを意味します。

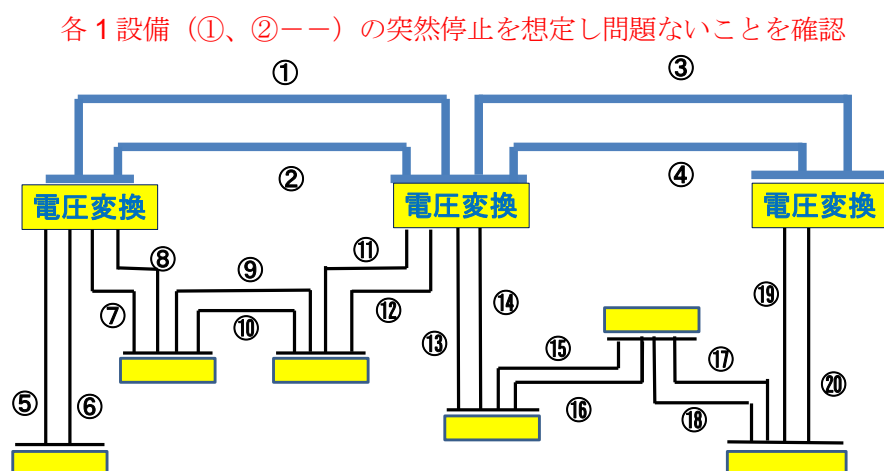


図 55 N-1 基準

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

(余談) N-1 基準と冗長性基準 (N+1、N+2 基準) の違い！？

N-1 基準と別に「最低限必要な設備に対し、その設備が止まった時を考え 1 設備余分に置く (2 設備余分の場合もあります)」との考え方があります。これは「冗長性を確保する」との考え方です。この場合、1 設備余分にすることを N+1、2 設備は N+2 等と呼ばれます。この考え方は、かなり一般的で、電力設備の N-1 基準を最初に聞いた時は違う呼び方なので奇異に感じました。電力設備は、冗長性検討の前提となる最低限必要な設備が、検討要素が多すぎてそもそも分からないとの実態を踏まえた N-1 基準は、冗長性と考え方が違うと実務経験を通じ次第に納得していきました。

さて、チェックして「問題あり」となるのは以下の場合です。

- ①発電設備の電力を全て送ると、電流が容量を超えたり電圧が大幅に低下
 - ②需要へ電力を全て送ると、電流が容量を越えたり電圧が大幅に低下
 - ③電力系統が部分的または全体的に不安定となり、電力系統維持が不可能となる可能性発生
- 勿論、想定した条件の中で、送電設備が全て稼働中 (N-0 と呼ばれる場合もあります) も当然①~③を満たす必要があります。

専門的には、①、②はアデカシー (Adequacy)、③はセキュリティー (Security) チェック条件と呼ばれます。

仮に問題ありとなれば設備設定を改善します。

ところで、日本の送電線は、3 相送電線 2 線路 (回線) を 1 本の鉄塔で送りますが (第 1 回解説)、「1 設備停止」を「送電線 1 回線停止」とするか、鉄塔を 1 設備と考え「2 回線停止」を 1 設備停止とすることで「問題のあり・なし」が変わります。日本では、1 回線停止を 1 設備停止としますが、2 回線停止も「ルート断停止」と定義し、「1 設備停止に順ずる扱い」とされています。特に停止した場合の影響が大きい基幹送電線でチェックされます。信頼度は地域実態の差により国毎に違います。(日本については電力系統利用協議会 (ESCS) ルール参照)

(余談) N-1 基準は地域実態で異なる

米国では、山火事が多い地帯で、〇〇km 以内に設置される送電線は 1 設備とする、との定義が採用されます。例えば、「3 km 以内」となれば、3 km 内に送電線が 3 回線あれば、3 回線停止=1 設備停止です。この考え方に「なるほど」とは思いましたが、日本は米国ほど山火事が少なく状況が違っても感じました。ただ、今後、日本が乾燥化すればこの考え方が必要かも知れません。(日本で山火事のニュースがあると気になります。) また、国によっては、2 回線送電線ルート断を 1 設備停止と考えた方が良い送電システムもあります。(別途説明予定) ちなみに、発展途上国の技術者から「電力系統の信頼性の考え方を教えて欲しい」と要望されたときは、「日本に沿った考え方で、機械的に貴国に当てはめるのは危険」と前置きし紹介しました。日本国内でも、北方と南方では、例えば、雪による送電設備停止に関する基準が異なります。この様に信頼度は地域性を考える必要があり、安易な標準化することは危険です。

信頼度の考え方は、他設備を含めて別途あらためて説明しますので、ここでは特に N-1 基準 (の言葉) を覚えて下さい。

○送電設備の特徴

以下では送電線設備の特徴を紹介します。

○交流架空送電設備 (Alternate Current Over-Head Line)

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

日本で良くみかけるのは、第 1 回でも紹介した 2 回線送電線です。なお、比較的低い電圧（6 万 V）では同じ電圧の回線が更に多く（3 回線以上）同じ鉄塔で送られる場合もあります。（多回線鉄塔）以下では、送電線の設備概要を説明します。

— 架空地線（図-56-①）

一番上に 2 本の線があり架空地線と呼ばれ、地面と同じ電圧（零）となっていて雷を引き寄せる効果があり、送電線へ雷が直撃するのを減らします。ただし鉄塔へ直撃するのは減らせません。

— 碍子（図-56-②）

鉄塔と電気が通る線は碍子を通して連結されます。碍子には例えば、50 万 V 送電線であれば $50 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \rightarrow 50 \times 0.8 = 40$ 万 V の電圧がかかります。（ $\sqrt{2}$ 等の説明省略 $\rightarrow 0.8$ を覚えて下さい）高電圧になるほど碍子の個数を増やして高い電圧に耐える様にします。碍子が 10 個以上つながっていれば前述の基幹送電線と考えて下さい。

— 電線（図-56-③）

電線は、重さに耐える部分（電線の中側）と電気を流す部分（表面側）に分かれます。電気を流す部分、流し易いアルミや銅が使われ、中側は強い力に耐える鋼などが使われます。

なお、交流電気は、電線の表面の方が流れ易いので、中側を電気の通しにくい鋼としても送電ロスが増えません。

ところで、ロスが増えると送電線での発熱が増え、電線の温度が上昇し電線の金属特性が維持できなくなります。この限界が熱（で決まる）容量と呼ばれ、太い電線ほど表面側の面積が増え、熱容量が増加します。

送電線の電線を見ると高電圧送電線（碍子の数が多い）は、線が 2 本以上となっています。電線の電圧が高くなると電線表面から空間へ向けて電流が流れ易くなり、送電ロスや（じりじり言う）雑音が増加するのですが、線を増すと減らせるためこの様な線（複導体と呼ばれます）とします。

（余談）某国の送電線は電線で大胆なコストダウンをしたが——

相当過去に遡りますが、某国で非常に高い電圧の送電線の電線線種を細く、また数を減らした（多分、相当コストダウンになったでしょう）のですが、いざ運転を始めたら、送電ロスが大きくなったため電圧を下げて送電能力を低下させ運転したとのことです。「安物買いの銭失い」との警句がありますが、コストダウンも安易に行くと火傷します。

— 鉄塔（図-56-④）

鉄塔は、日本では 2 回線鉄塔が比較的多いですが、世界を見れば 1 回線鉄塔が概ね標準的です。（図-57）日本は用地確保が困難、急峻な山地が多い（高い鉄塔として

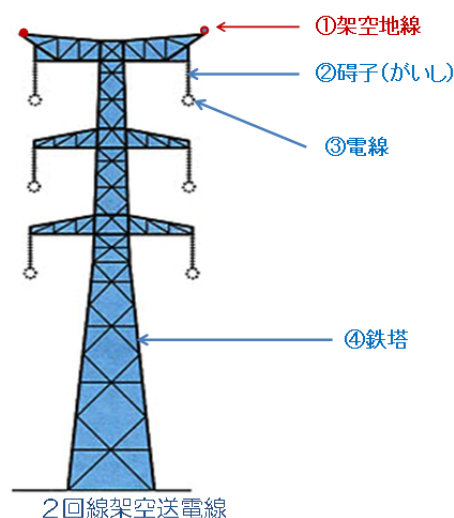


図 56 交流架空送電設備の特徴

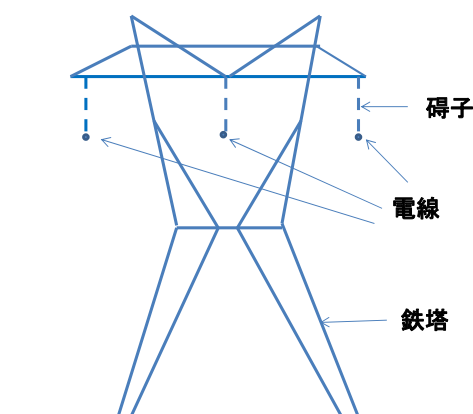


図 57 1 回線送電線概形

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

谷超える) ためです。なお、海外でも河川を高い鉄塔で横断する場合等には 2 回線鉄塔が使われます。海外の場合、1 回線鉄塔は相当低く建設し、電線下の木も伐採している場合が多いようです。欧米上空の飛行機から下を見ると、道ではない長く白い線（大抵直線で、木を伐採しているので白く見えます）が見えますが、高電圧送電線が通っていると思ってください。

(余談) 1 回線鉄塔 vs 2 回線鉄塔 !

海外技術者と議論すると、2 回線鉄塔は信頼度面で脆弱だ! との意見が出ます。日本と外国と比較して、1 回線を平行して 2 回線建設するのが主の海外と日本の 2 回線主体の送電系統で信頼度に差が出ていませんから、これも「慣れ」の問題だと思います。

ただし、2 回線鉄塔でもルート断停止にいたる事故の頻度を減らすことで信頼度が落ちない様配慮した事故除去用制御システム（保護リレーシステム）等が日本では用いられていますから、それらを含めた評価が必要なことは承知しておく必要があります。（これらは別の回で紹介します）

架空送電設備と雷

架空送電設備は常に雷に晒されますが、雷には非常に大きなエネルギーのものがあ、送電設備へ落ちると非常に高い電圧を発生させます。これに耐える設備とすると鉄塔が巨大化しますし、そもそも雷エネルギーの最大レベルがどの程度か分からないので巨大化の効果も分かりません。このため、雷に対しては次の考え方で送電設備を作ります。(耐雷設計と言います)

雷エネルギーの最大値は分かりませんが、いろいろな雷エネルギーの大きさの確率的な分布はある程度分かります。このため、ある程度以上の強い雷で高い電圧が発生した場合、設備はショートする（事故になる）が、頻繁にショートが発生しない（数学的には期待値（ある雷電流でショートする確率×その雷電流が発生する確率）を一定以下とする）設備を作ります。

電線への雷除けに架空地線が張られますが、雷による送電設備で

ショートする様相には 2 種類あり、鉄塔に雷が落ちたほんの瞬間の高電圧でショートする「逆フラッシュオーバー」は架空地線で除けられません。(図-58) 雷は、1000 分の 1 秒位の短い現象ですが（冬の雷は長く続く傾向 → 冬の雷と夏の雷は特徴が違います）雷で一旦ショートすると、その後は発電機から供給されるエネルギーで大きな電流が流れ続けます。これが事故電流と呼ばれ、雷電流の数分の一以下の大きさですが、普段の電流より遥かに大きく、流れ続けると設備が壊れます。このため、ブレーカー（遮断器）を動作させ事故電流を止めます。なお、遮断までの 0.1 秒程度電力系統電圧が大幅に低下し、(雷事故による) 瞬時電圧低下と呼ばれます。(図-59) 事故電流は殆ど無効電力成分ですが電力系統の有効電力の流れを普段とは大きく変え様々な影響が出ます。

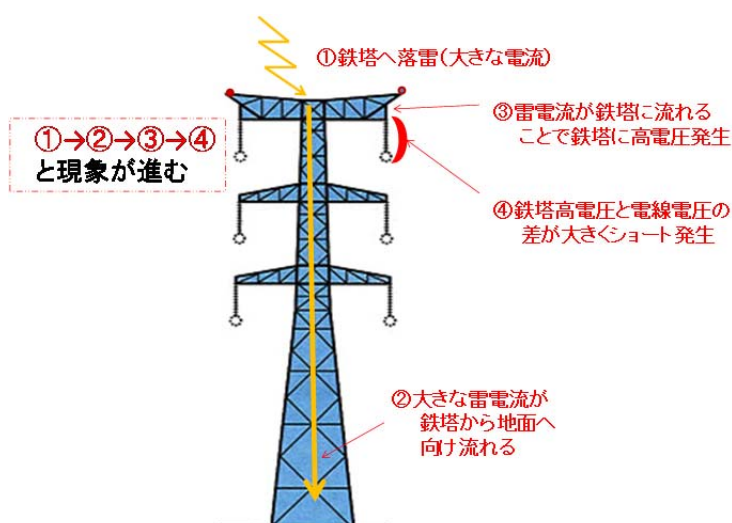


図 58 雷による送電鉄塔での逆フラッシュオーバー

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

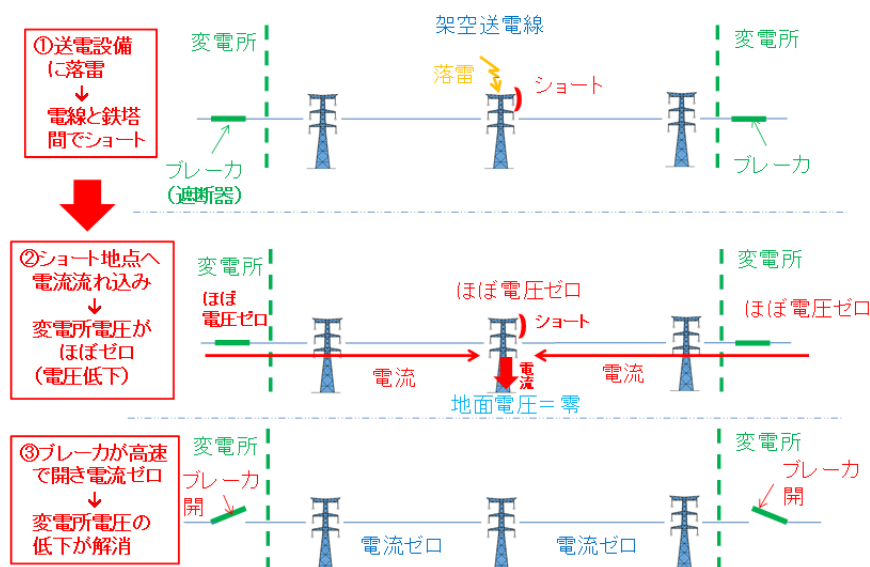


図 59 雷事故による瞬時電圧低下の発生様相

ところで、雷でショートし事故電流が一時的に流れても、架空送電設備は壊れない設計となっています。すなわち、送電設備は「事故は起きる（のはやむなしとする）が直ぐまた使える能力を持たせる」との思想で設計されています。

（余談）電力技術者は大きな自然の力には逆らわない

自然の力（ここでは雷）はすごいので「敢然と立ち向かう」のではなく、上手にやりすごす、が雷に対する架空送電設備の世界共通の設計思想です。自然の力に敬意を払う日本人にはしっくりくる考え方と思っています。最近、巨大津波への対応が話題となりますが、「立ち向かう」ことにむやみに力を注ぐのではなく、「上手にやり過ごす知恵」を出せば、と感じます。

○直流架空送電設備

直流の送電設備は基本的には交流送電設備と同じ構成となります。

ただし、直流はプラス（又はマイナス）電圧と零電圧があれば良く、零電圧は地面を使うと考えれば、1本の電線だけで構成できます。ただ、この場合、地面に電流が流れるため、地域の設備（例えば水道管）に影響が出るため、零電圧でも電流を流す線を設ける場合があります。

一方、線を二本使う場合、プラスマイナスの電圧をかけると2倍の電力を送ることができます。この場合、プラスマイナス両電圧を使っていれば地面に電流が流れないのですが、一方を止めると地面に流れてしまうため、プラスマイナス2線に加えて、地面に流さないための電線を付け加える（帰路線）場合があります。

直流設備の電流の流れ方を図-60に示しますので、ご参考にして下さい。なお、交流は3相送電では、電流が3相合わせてゼロとなるため帰路は不要です。

基幹流通設備ではこの形態が多いです。（図-61）なお、地面に電流が流れても影響がない地域では帰路線は不要ですが、架空地線（雷対策）と兼ねて設置する場合も多いようです。

直流送電線はこれで1セットですから、鉄塔構成はシンプルです。このため、同じ電力を流す機能で比較すると直流送電設備は交流送電設備より通常安価となります。ただし、流通設備全体としての経済性は直流変換設備等を含め考える必要があります。なお、例えば、50万V直流電圧設備

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

では、碍子にかかる電圧は 50 万 V で、交流 50 万 V の $\sqrt{2}/\sqrt{3} \times 50$ 万 V とは違いますし、直流は電線内部も流れやすいなど、幾つか交流と違う特徴があります。

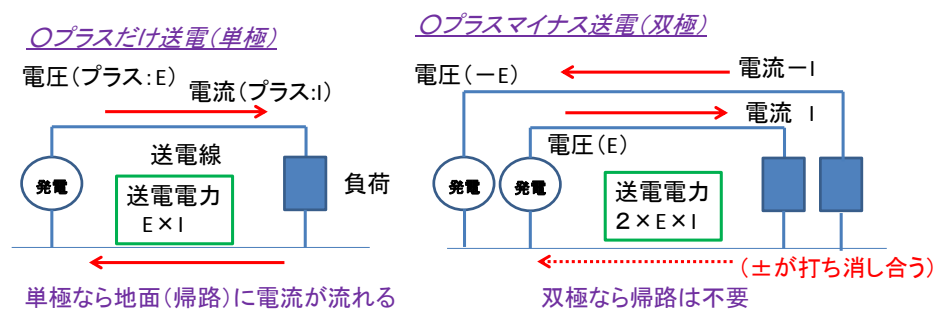


図 60 直流送電設備の電流の流れ方

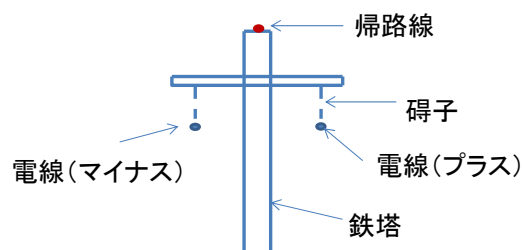


図 61 直流送電設備(双極(±))

今回はここまでとし、次回は送電設備のうち地中送電設備を説明し、その後、変電設備への解説を進めていきます。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 7 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、今回は電力系統流通設備のうち地中送電設備の解説をします。
夏休み？につきやや短めの解説とさせていただきます。

○地中送電設備の基本構造

・ケーブル

ケーブルは主に、電気を流す導体、導体の電圧と地面電圧間の絶縁を維持する絶縁体、ケーブルの表面を守るシースから構成されます。(図-62)

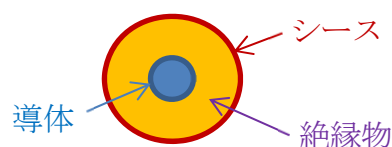


図 62 ケーブルの基本構造 (単相型)

なお、絶縁体は、送電設備に使われるような比較高い電圧レベルでは、紙、油、(架橋) ポリエチレン等です。

交流ケーブルでは 3 相まとめた構造とする場合と、1 相 (単相) ずつの構造とする場合があります。

・ケーブル設置設備

ケーブルは相当な重量物となるため、地中敷設が一般的です。
諸外国では、特に設置するための設備は設けずそのまま埋める (直接埋設) ことも多いですが、日本では何らかの入れ物に入れるのが通常です。高電圧の場合 (10 万 V 以上のイメージ)、設置設備又はスペースを専用に設けます。この設備が管の場合は管路、トンネルは洞道と呼ばれます。(図-63)
なお、洞道は、上下水道等と併せて施工されるタイプ (共同溝) もあります。

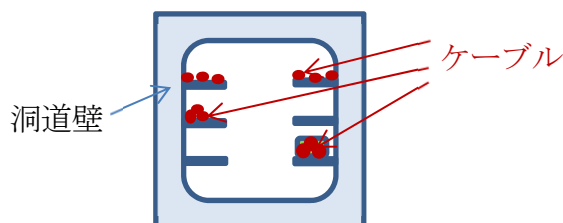


図 63 ケーブル設置設備：洞道

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

ケーブルは、ある長さ毎（長さは電圧等より異なる）に接続してゆきます。ケーブルの引き入れ・引き抜き、接続の作業スペースや接続設備スペース、通電時のケーブルの伸縮を吸収するスペースを確保した設備をマンホールと呼びます。道路表面をよく見ると「マンホールの蓋」が見えます、地中のマンホールは「蓋」より遥かに大きなスペースを占め、建設コストも相応に要します。

（余談）直埋は工事費が安いけれど

発展途上国の大都市に行くと道路掘削工事現場でケーブルが掘り出されているのを見かけることがあります。系統運用者に聞くと、道路工事で誤ってケーブルを切断し停電発生、が良くあるとのことでした。直接埋設（直埋）は工事費が相当安いですが、信頼性や安全面から現状の技術レベルではさすがにお勧めできません。となると、地中送電設備の工事費は高い！とのジレンマに陥りますが、是非一層の現場技術開発を期待したいものです。

・ケーブル冷却設備

地中送電で送電容量を確保するため、ケーブルを冷却させる場合があります。冷却方法として、絶縁に使用している油を循環させる、水冷管をケーブルに沿わせる等があり、循環ポンプ等の冷却用付属設備がケーブル設備沿いに一定間隔毎で必要となります。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：メリット

①送電面積が小さい

架空送電線は絶縁に空気を利用するのに対し、地中送電線は絶縁物を使うため電気を送るのに必要な面積は遥かに小さくなります。このため、送電設備ルートを比較的自由に設定することが可能です。

②電界・磁界の影響が小さい

ケーブルは、電気が周辺に及ぼす影響、すなわち、ケーブル周辺の電界や磁界を小さくする様に作られます。（専門的になりますので具体的な説明は省きます）

③雷の影響を受けない

架空送電線設備の様に雷事故は（殆ど）発生しません。

・地中送電の（架空送電と比較して）主な特徴：デメリット

④送電容量が小さい

架空送電線と同じ材質・太さの電線でケーブルを作っても、送電できる電力（送電容量）は小さく、凡そ、 $1/2$ から $1/3$ となります。この理由は、ケーブルは電線が絶縁体に覆われているため架空線と比較し熱が逃げにくく、電流を増やすと温度が上昇しケーブルが壊れるためです。このため、ケーブルを冷却する設備を設け送電容量を増やす場合もあります。

⑤事故が自然回復しない

架空送電設備での主な事故原因である雷事故では、空気の絶縁能力は自然に回復して再び使用できる様になりますが、地中送電設備で絶縁物に事故が発生するとその部分の絶縁能力は永久に失われます。その事故部分を取り替えるまでは壊れたままで使えません。

⑥交流送電の場合、無効電力発生量が大きい

特に地中送電設備が長い距離となると（50 km 程度以上）地中送電設備で発生する無効電力発生量（充電電流）が大きくなり、有効電力（kW）の流す能力を阻害します。

なお、交流送電する架空送電設備でも無効電力は発生しますが、同じ電圧で送電する場合、地中送電の数分の 1 以下と小さくなります。

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

・充電電流の特徴

交流地中送電設備での充電電流は、電力送電の際に非常に重要な要素となります。このため、以下で少し具体イメージを解説します。

ケーブルは図-64 のとおり電線と地面と同じ電圧のシース間を距離の小さい絶縁物で挟んだ構造となっています。この様な構造に高い交流電圧をかけると、絶縁物の特性によりますが、ケーブルに使用される絶縁物の場合、無効電力が発生する、すなわち、無効電力電流（充電電流と呼ばれます）が流れます。送電距離が長くなるほど無効電力量は大きくなります。(図-65) 結局、交流送電では、絶縁物であっても大きな交流電流が流れるのです。これが直流送電との重要な違いです。

基幹送電電圧（30 万 V 程度）50 km 程度以上になると、この電流値は、流したい有効電力量に近い値となります。「充電電流」が最終的には有効電力の流せる量を低下させてしまいます。

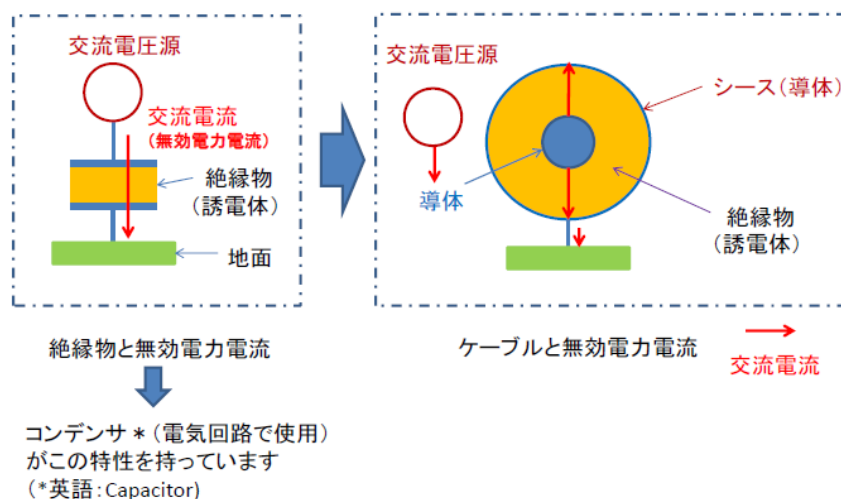


図 64 ケーブルの無効電力電流（充電電流）

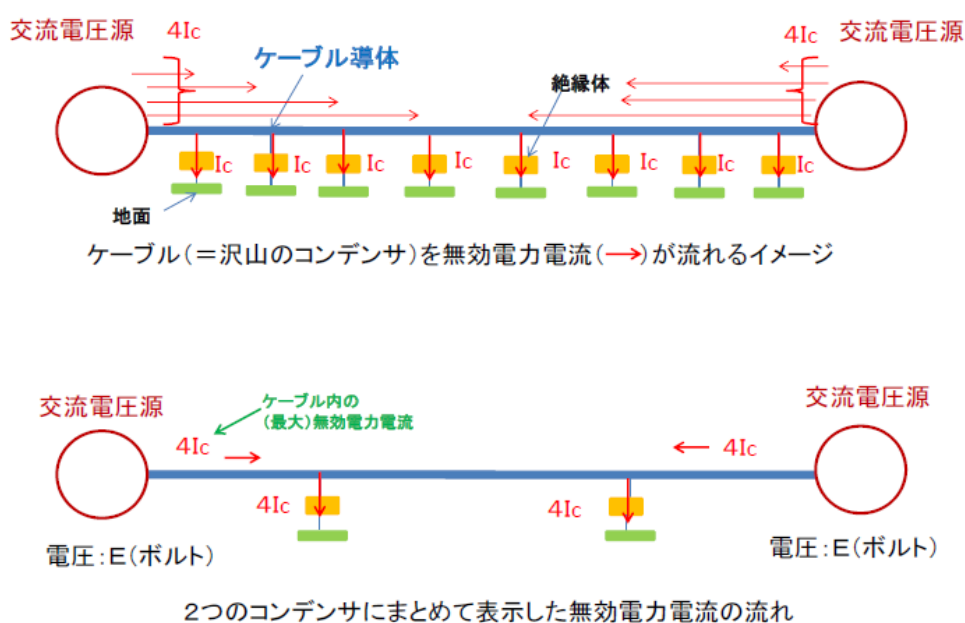


図 65 長距離ケーブルの無効電力の流れ（両端が同電圧の場合）

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

・充電電流をコントロールする方法

充電電流が発生させる無効電力は、反対位相の電流が発生させれば打ち消すことができます。反対位相が発生させる設備をリアクトルと呼び、図-65 の中間点（中間点 X 点）にケーブルで発生する無効電力電流の半量分のリアクトルを置いた場合を図-66-1 に示します。この場合、ケーブルの無効電力電流とリアクトルの無効電力電流が打ち消し合うため、ケーブルを流れる無効電力電流が減少します。（図-65； $4I_c \rightarrow$ 図-66-1； $2I_c$ ）

ところで、リアクトルを真ん中ではなく両端（A、B 点）に置くと（図-66-2）、無効電力は交流電源端から見ると完全に打ち消されますが（図で零となっています）、ケーブル内の無効電力電流はリアクトルを設置しない場合（図-65）と同じ $4I_c$ となり、ケーブルを流れる最大無効電力電流は変わりません。この様に無効電力電流を制御し送電容量を確保するにはリアクトルの位置と容量の設定が重要となります。



図 66-1 リアクトルによる無効電力制御（中間点設置）

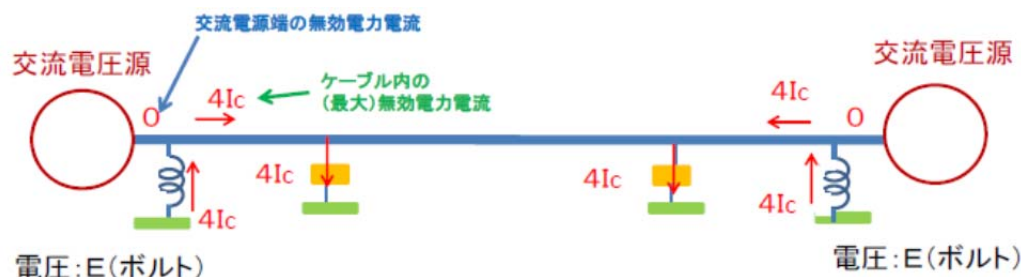


図 66-2 リアクトルによる無効電力制御（両端設置）

（余談）過ぎたるは及ばざるがごとし

さて、図-66-1 から更にリアクトル量を増やし、例えば図-66-3 の様に交流電源端から見て零となる量とすると、電流面でもっと良くなる気がするかも知れません。実際は、同図のとおりリアクトルにつながるケーブル部分に $4I_c$ が流れ、（最大）無効電力電流は図-65 と同じ値になります。電力系統ではこの様に状況改善方法を一方的にどんどん増やしていくと、かえって状況が悪化する場合があります。電力系統にとどまらず、「極端に偏らずほどほどが良い」との教訓？が結構あてはまる気がします。

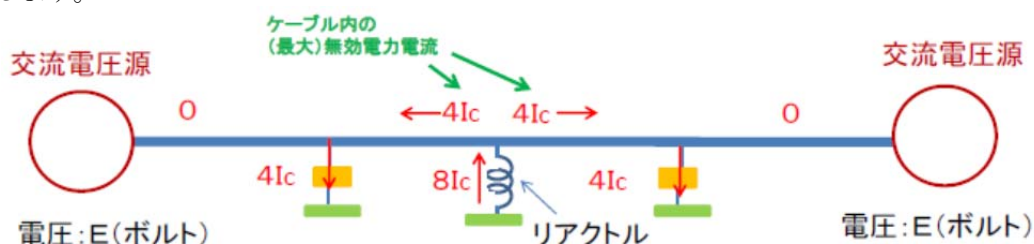


図 66-3 リアクトルによる無効電力制御（中間点大容量設置）

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-66-1 の様に中間点（ぴったり中間でなくても良いですが）にリアクトルのためだけに設備を設置するのは“もったいない”面があります。このため、同様の効果が得られる地点の変電所にリアクトルを設置し、地域への電力供給機能と無効電力制御機能の両方を変電所に持たせる、のが一般的です。なお、技術的には、電圧を制御しても無効電力を制御できるため、それらを含め総合的な無効電力調整が変電所で行われます。これらについては、次回、変電設備で解説します。

・海底ケーブルは充電電流をコントロールできない

さて、海底ケーブルで交流長距離送電する場合、リアクトルを置くとすると中間点は海底になりますが、余程浅い海でない限りリアクトル設置は非現実的です。（保守等が困難です）このため、送電容量確保のための無効電力制御は実質的に不可能です。「長距離」の目安は 50 km 以上、この場合、電力を交流海底送電することは不可能です。なお、将来、充電電流（無効電力電流）を発生しにくい絶縁物が実用化されれば可能となるかも知れません。

・長距離海底ケーブルは直流送電の独断場

直流送電は無効電力を発生しないため、交流送電に伴う充電電流問題がありません。このため、長距離海底送電は直流を使用します。

・現在の超電導送電は地中送電技術

現在の超電導送電は、マイナス 200 度程度以下に冷却する必要があります。このため、基本的な設備構造は導体（超電導）、絶縁体、それを囲む冷却媒体、外部の熱が内部に入らないための熱シールド体の構成となります。この基本的な構造は地中ケーブルと同じになります。

なお、地中送電線は電気を流すと導体で熱が発生し、冷却をかけて送電容量を増加させる場合がありますが、超電導送電では外部から熱が電気の流れに関係なく入ってくるため（侵入熱）、冷却が必須です。

冷却するとエネルギーを消費しますから、超電導送電でも送電（するための）エネルギー損失が発生することになります。ケーブルに電流を流すとエネルギー損失が発生しますから、結局、超電導送電は地中送電技術として技術評価や経済性評価を行うのが妥当と思います。

なお、超電導送電は冷却が必須なため、海底に冷却設備を確保するのは困難ですから（リアクトルと同じ理由）で長距離海底送電には適しません。

一方、超電導送電は地中送電の“仲間”ですが、送電損失が冷却エネルギーだけで電流の大きさに関係しない特長がありますから、大電流を流せる超電導線ならば、低電圧で大電力送電が可能となります。従来の電力送電では、電流を大きくすると、エネルギー損失が大きくなるとともに電線の加熱への対応が困難となるため、大電力を送電する場合、高電圧として必要な電流を減らしました。この面では、同じ地中送電でも異なる発想での活用が考えられます。なお、交流低電圧送電は、交流高電圧送電と比較して充電電流の影響が小さくなり有効電力を送りやすくなる効果もあります。この様に、超電導の特長を踏まえて、総合的な視点から導入検討を進めていくのが良いと思います。

なお、以上は「現在の」超電導送電技術に対する評価ですが、将来、常温で超電導となる材料が発見され送電技術が確立されれば、冷却が不要となり全く違う活用の仕方が出てくるでしょう。

（余談）技術者は夢をどう実現させる？

超電導は「夢の技術」と言われてきました。ただ、送電分野では、現状、冷却が必須ですので数々の技術的な制約が生じます。その様な制約を前提とし現実的な「夢を語るか」、あくまで「常温（室温）超電導と言う究極を追いかけるか」が技術者として思案のしどころとなります。近い将来の実用化を考える「工学的な」技術者は、現代社会への適用を前提に夢を追いかけるので、前者の考え

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

に立つと思いますが、その分、夢のスケールが小さくなるジレンマがあるでしょう。どのような分野でも、工学技術者は「大きな夢」と「現実的な夢」の狭間で悩むと思います。

・地中送電設備により電力系統増強を進める場合の注意点

地中送電設備は、通常、道路下に（占有し）敷設しますから、道路計画との調整が重要になります。需要密度が高くなることが予想されるエリア（いわゆる都市化地域）では、都市計画、その中では当然、道路整備計画も含まれますが、と整合をとりながら管路や洞道の整備を進めるのが合理的です。

ただ、都市計画も適宜見直されますから、送電設備の整備に際しては、柔軟性を持たせておく必要があります。一方、柔軟性を持たせると「種々な対応をとれるための「余力」を持たせることとなり、建設コストは増加する可能性があります。このため、ある程度経済性を踏まえた割り切りも必要となります。なお、道路は整備されるとしばらくの間（5 年程度）、再掘削できなくなりますから、これを踏まえ先行投資的な判断も（どうしても）必要となります。これらを総合判断するには相当の実務経験が必須です。

（余談）地中送電設備と架空送電設備はどちらが経済的？

配電設備では、架空設備（電柱を経由した配電）が地中設備より建設コストは安価になりますが、送電設備では、架空 vs 地中について単純に言い切れないと思います。特に都市化が想定されるエリアでは、架空送電と地中送電の双方のメリットを総合的に比較検討する必要があります。

例えば、架空送電設備は、用地確保面等から建設可能な場所が限られますから、ルート近辺で変電所設置を想定すると変電所から需要地帯までの流通設備コストが大きくなり、地中線設備で需要地帯に中心へ送電し、線路近傍に変電所を設ける方が総合的に見た経済性が勝る場合も有ります。

（図-67 のイメージ）特に、発展途上国での大都市電力送電は都市化がどんどん進んでいきますから、ダイナミックな発想が必要です。

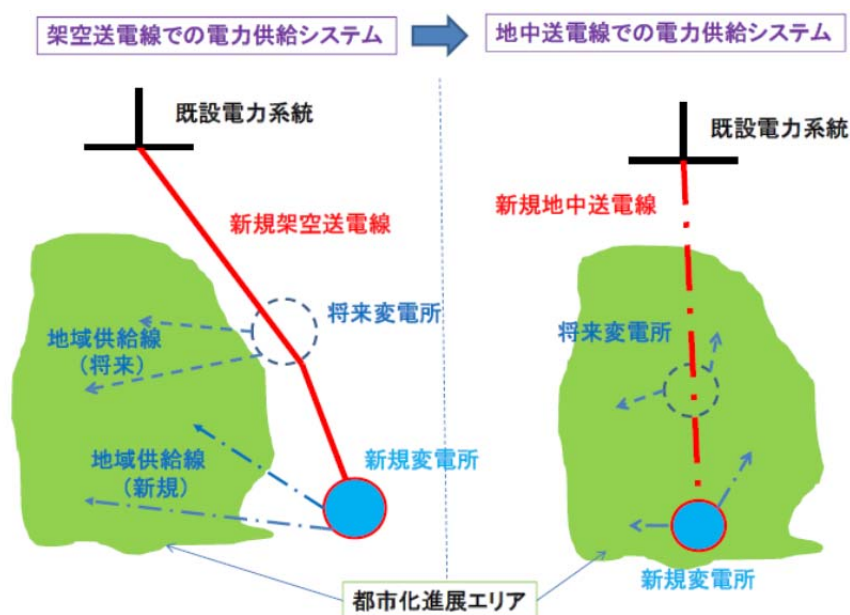


図 67 地中線設備が経済的に合理的な例（イメージ）

今回はここまでとし、次回、変電設備について解説します。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 8 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、今回は電力系統流通設備のうち変電設備の解説をします。
なお、変電設備は電圧を変換する設備を指し、発電所、配電設備、需要家設備にもありますが、ここでは変電所について解説します。

○変電所の基本機能

変電所には次の様な機能があります。

①電力系統電圧の変換、②電力系統の運用変更 → 有効電力調整、③無効電力電流の調整、④電力系統設備事故の除去、⑤電力系統状況の把握 (計測設備の設置) 以下に各機能のポイントを説明します。

①電力系統での電圧変換

電気を発電設備から需要へ送る際その量や用途に応じた電圧レベルがあります (第 6 回解説)。変電所は、それらの電圧に変換する設備 (変圧器) を置き適正な電圧を発生させます。交流の場合、電流を巻き線に通し磁界を発生させ、違う巻き線にその磁界を作用させると巻き線の巻数比に応じ電圧が発生し電力を流せる不思議な現象があり (図-68)、変圧器はこの現象を効率的に行われる様設計されます。

(余談) 電磁界の不思議

磁界は真空でも生じ、「全く何もなくても」大きな電気エネルギー伝わせます。なぜ「何もないところを伝わるのか」不思議に思うのですが、「場」と呼ばれるイメージしにくい理論で電気に関する様々な理論が導かれ、様々な技術へ応用されています。「そもそもの大本は良く理解できない」のに、それを前提として「ものごと」が進む状況が世の中には結構あります。

なお、直流の電圧変換は、特に高電圧の場合は変換ロスが大きいため、交流のように何回にも分けて行いません。一般的に交流高電圧に変換し直流化・送電・交流高電圧に変換し交流側で高電圧を低電圧に変換します。(図-69)

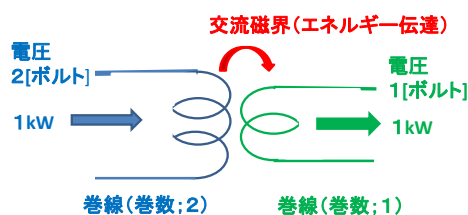


図 68 変圧器による電圧変換
の基本イメージ

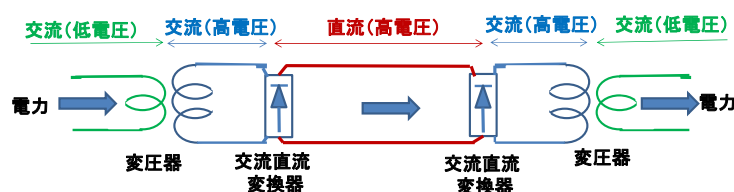


図 69 直流設備と交流電圧変換の組み合わせイメージ

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

②電力系統での運用変更

変電所は、電力が変圧器や送電線へ流れるいわば交差点となります。また、各送電線、変圧器にブレーカー（Circuit-Breaker：以下 CB）が設置され電力を流したり止めたりします。（図-70-(a)）ここで変電所の中心点が使えなくなると全ての送電線、変圧器は機能停止するので（図-70-(b)）、母線（英語 Bus-bar：バスバー）を設けます。母線の形（方式）は種々ありますが、取り敢えず個人的に慣れ親しんでいる 4 母線 4 バスタイ CB 方式（図-71）（*日本では一般的に「ブス」となまり？ます）方式で電力の流れを調整する運用変更機能を説明します。

母線を設けると機能停止しにくくなることを、図-72 で確認していただければと思います。

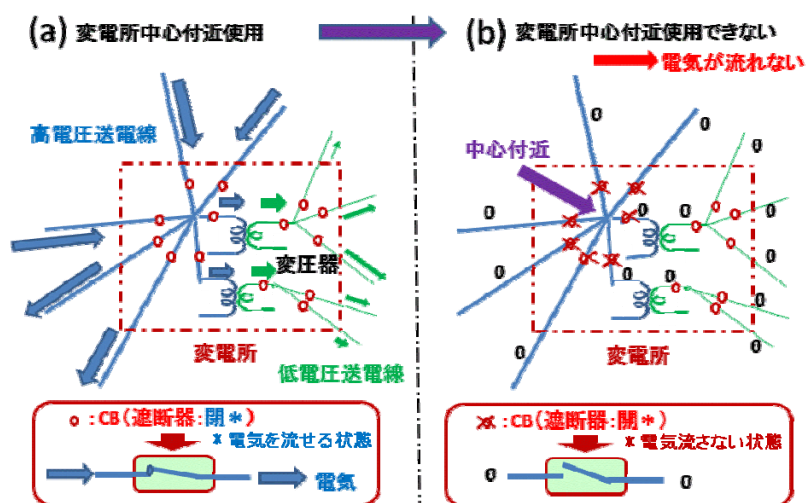


図 70 変電所を巡る電力の流れと母線の必要性

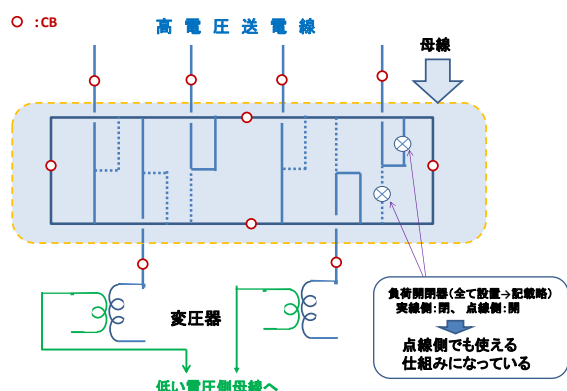


図 71 母線例：2 重主母線 4 バスタイ CB 方式

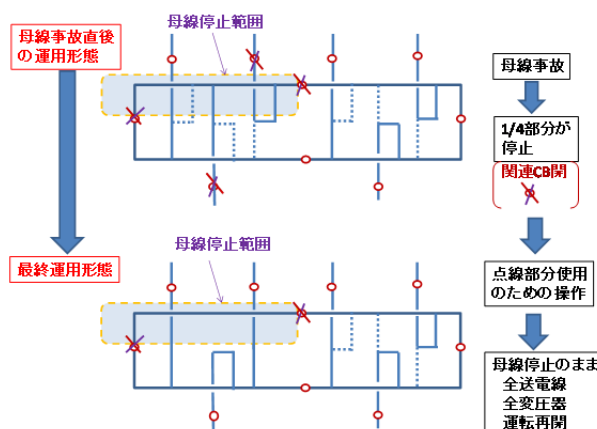


図 72 母線設置による全設備停止回避イメージ

さて、A,B,C3 変電所の高電圧側が 4 母線 4 バスタイ CB 方式とし（図-73-1）、変電所の運用変更機能を説明します。なお、CB 等の情報をいちいち図示すると目が疲れるので、割愛した「電力潮流図」も使われますのでご覧ください。（図-73-2）使いなれると全体状況が分かり易く把握できます。

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

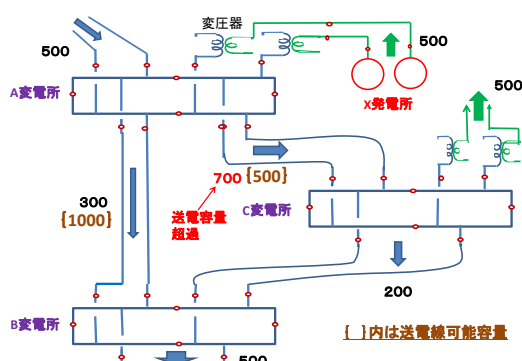


図 73-1.3 変電所系統での母線を通した電力の流れ(例)

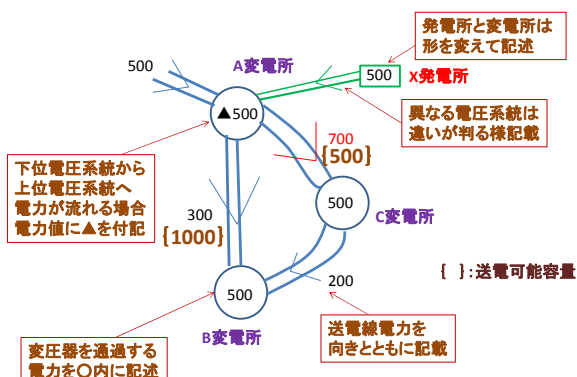


図 73-2 電力潮流図

図-73-1,2 の系統運用では A 変電所と C 変電所間の送電線の有効電力が送電可能容量を超過しているとして、ここで、CB を開き「超過」解消する方法を示します。図-74-1、74-2 では、送電線の CB を開放し解消されます。図-74-3 は A 変電所を変圧器に繋がる部分と変圧器のない部分に分け運用する方法です。図-74-4 は C 変電所をいわば 2 つの変電所に分けて運用する方法です。この場合、種々の制約条件があり、検討には相当な専門性が必要となります。

なお、これ以外の運用方法も有り得ますが（ここでは省略）、どれを採用するかは電力の流れの状況や電力系統全体の信頼性への影響等を総合的に検討し（相当量のコンピュータシミュレーションが必要）、日々や異常発生時の運用容易性等に関する系統運転者の意見も考慮し決められます。

ここでは、CB 操作で、電力系統の電力の流れ（潮流）を種々調整できることをご理解下さい。なお、母線運用による対応が長期的に効果ある場合、その運用形態での信頼性を維持や運用容易性を向上するため送電線や変圧器の母線への接続位置を変更することもあります。（引き出し口変更→興味深い分野ですが解説は省略）

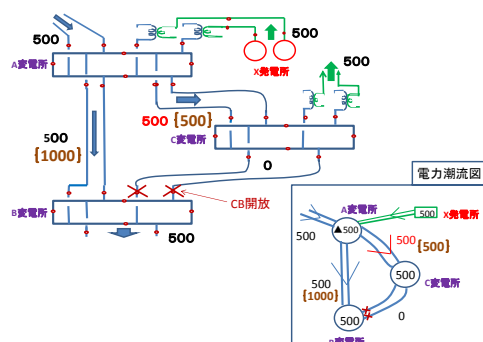


図 74-1 CB 開放による電力潮流調整 (例 1)

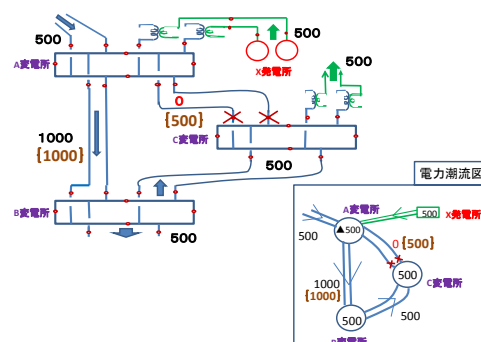


図 74-2 CB 開放による電力潮流調整 (例 2)

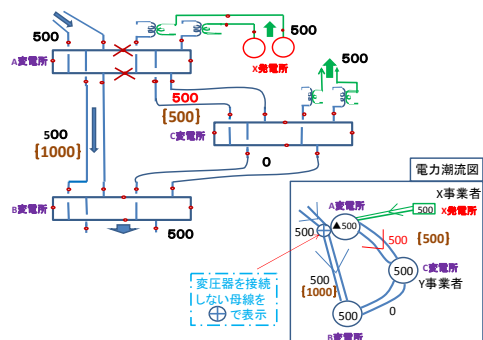


図 74-3 CB 開放による電力潮流調整 (例 3)

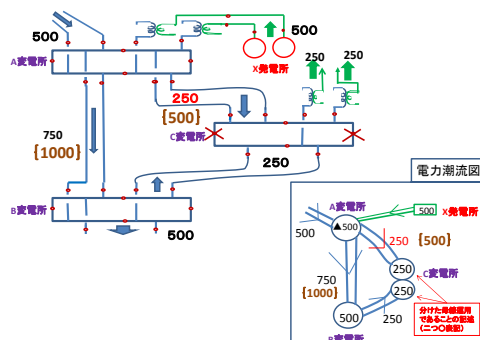


図 74-4 CB 開放による電力潮流調整 (例 4)

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

(余談) 電力系統は技術的には「送電協力」

さて、図-74-3 の運用に際し「X 発電所は X 事業者、C 変電所の需要家はライバル関係にある Y 事業者と契約している」とします。(図-74-3 電力系統図) この系統運用では流通設備の容量超過解消のため、「X 事業者から Y 事業者へ A 変電所を通し電気を供給する」形態となっています。X 事業者は、安定運用のため、ライバルの Y 事業者（の需要家）に対し「ひと肌」脱ぐ形です。

「送電一体」の定義は今ひとつ不明確ですが、「発電・送電が協力し合理的な電力系統運用を実現すること」を含むのなら、「電力自由化後」もここで示したような送電一体運用は必要と思います。

発・送がそれぞれ自分の都合を優先し運用すると不合理が生じ、結局需要家のためにならないでしょう。

なお、協力するのに「資本関係の一体性が必要」(一企業として一体性)とは思いません。(一企業である方がやり易いのは事実ですが)

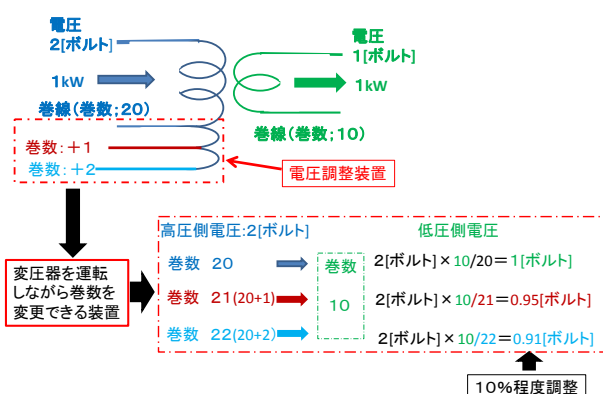


図 75 変圧器付設の電圧調整装置の基本イメージ

③電圧・無効電力電流の調整

次に電圧・無効電力調整を説明します。

なお、電圧調整は変圧器の電圧変換と比較すると、幅が相当小さいと考えて下さい。(数%程度)

電圧調整のため、通常、変電所変圧器には電圧調整装置が付設され巻き線比をある程度変更し電圧を調整します。(図-75) 一方、無効電力電流によっても電力系統電圧は変化するため(図-76)、変電所に無効電力発生設備(調相設備)(リアクトル又はコンデンサ(capacitor))を設置し、その開閉により電圧を調整します。なお、無効電力発生設備は、通常、変電所母線や変圧器3次回路(変電所内で使用する電力を取り出す低い電圧巻線)に接続されます。なお、無効電力発生設備のうちケーブル送電容量確保にも使われるリアクトル(第7回解説)や長距離架空送電線で無効電力発生が大きい場合、送電線と直接接続する形態で設置し無効電力を調整する場合があります。(図-77)

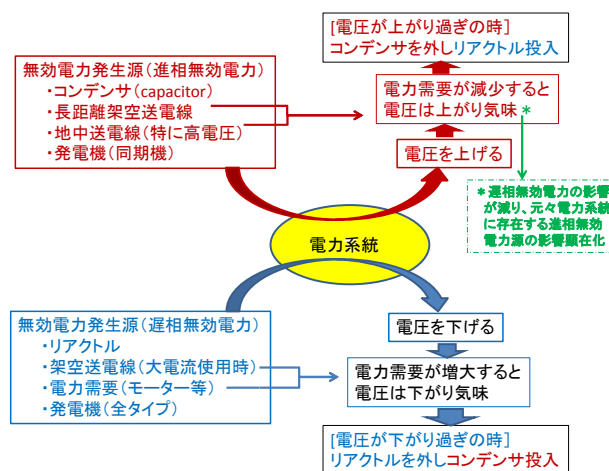


図 76 無効電力発生源と電力系統電圧の関係

電力系統電圧が高くなり過ぎると設備が壊れますし、低すぎると電力が送れなくなる(電力=電圧×電流→電圧下がると大きな電流が必要→設備に流せる電流限界値を超過)、また、送電ロス増加等の支障が出ます。特に、低くなり過ぎると電圧安定性と呼ばれる電力系統不安定現象を誘発する

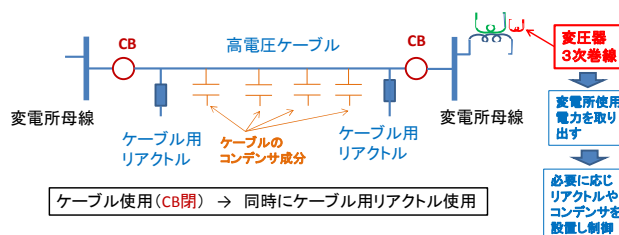


図 77 高電圧ケーブル発生無効電力補償用リアクトル設置例

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

危険があるため避ける注意があります。また、無効電力電流自体もケーブル容量や発電機運転制限（無効電流制限や運転電圧制限等）等に影響しますから必要に応じ制御が必要です。なお、無効電力電流は需要の大小の影響も大きい（図-76）、発電から需要を含めた総合的な検討が重要になります。

変電所での無効電力・電圧制御は、事前に設定された日時に対し特定のパターンで運転、加えて状況に応じ運転員が追加の対応をするのが一般的です。また、電圧運用や無効電力制御が複雑化する場合、電圧・電流等値に応じ自動制御運転される場合もあります。なお、発電設備も電圧調整し電力系統電圧と無効電力を調整できるため、変電所と合わせ「発・送一体」での総合的な制御が行われます。（電圧・無効電力調整分野も、「發送一体」です。）

ところで、発展途上国では（先進国でも時々みかけますが）、電圧・無効電力面への注意が不十分になりがちで実運用に障害が発生を生じている場合がありますので、適切なアドバイスが大切です。

④ 電力系統設備事故の除去

変電所には多くのブレーカー（CB）が設置され、設備事故が発生すると速やかに事故除去される様、高速（通常、0.1 秒以下）動作します。事故は電圧・電流の変化を事故判断システムで検出されどの CB を動作させるか高速に自動判断します。

変電所内設備と変電所につながる送電線事故に対し変電所 CB を動作させるのが基本ですが（主保護 図-78-1）、他変電所で事故が検出できない場合や動作すべき CB が不調（CB 事故など）な場合は応援する形で離れた事故に対して CB 動作する場合があります。

（リモート後備保護）（図-78-2）

（なお、拠点変電所では不調対応として変電所内で別対応する場合も有りますが（ローカル後備保護）、説明は略します）事故除去の際、余計な CB 動作で不要な電氣的ショックや停電地域拡大が起きないように（保護協調）、動作手順等を綿密に検討し判断条件等を設定します。ちなみに、図-78 の簡単な電力系統で CB 数は約 30、CB には開放・投入の 2 状態がありますから、この電力系統で想定される

CB 状況数は 2 の 30 乗＝約 10 億通りあります。この様な膨大なケースを念頭に検討する必要があります。そのため、技術素養と経験に基づく適切な判断が必要となります。

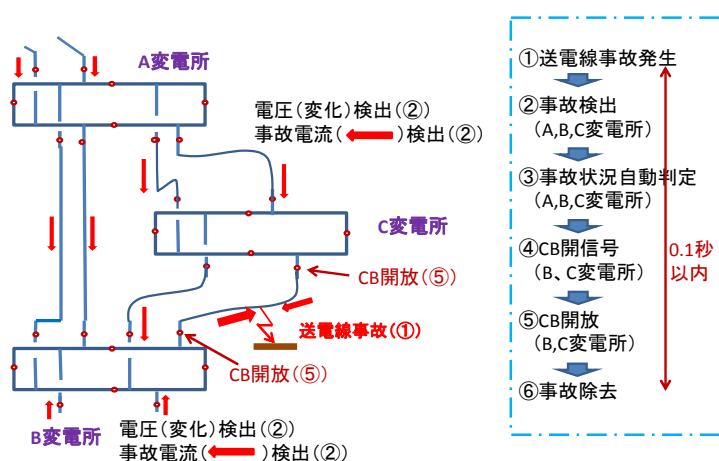
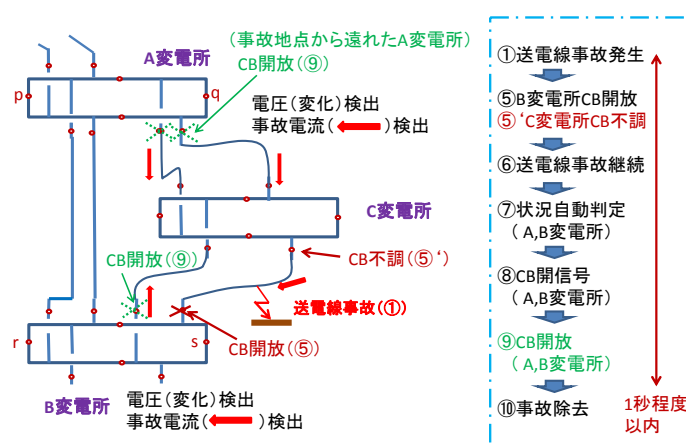


図 78-1 電力系統事故時の事故除去イメージ（主保護）



（実際は母線分離保護等が動作し更に複雑なCB（p,q,r,s等）開放が行われる）

図 78-2 電力系統事故時の事故除去イメージ（後備保護）

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

(余談) 電力系統技術は職人芸が生きる

ここで述べた②、③、④に関する技術は、それぞれの電力系統で一品料理的な面があり、検討の「プロ」になるのに 10 年以上を要し、かつその知識を標準化しづらい面があります。(刻々に検討条件は変わりますので)、この様な電力系統の日々の変化に対する確にに対応する(ミスは停電(下手をすると大停電)に直結)経験を有した優良な人材確保は不可欠だと思います。3.11 以降、電力会社員の「高給」が問題視されましたが、個々の業務内容を見て職人芸育成には配慮をお願いできればと思います。

⑤電力系統状況把握用の計測

送電設備は高電圧で運転されるため計測設備は大型となります。このため、変電所にスペースを確保し計測設備を設置します。主要計測要素は電圧、電流で、瞬時値、平均値等を用途に応じそれぞれ計測します。また、電流は電力系統では小電流から大電流まで流れますが、精度よく測定するため大電流と小電流を分けて計測する場合もあります。なお、この他に、必要に応じ、周波数計測装置も設置されます。これらの計測装置は①で述べた変電所の運用変更がされても必要な系統データの計測漏れが生じないように配置されます。このため、相当数が設置(送電線、変圧器、母線毎)されることになります。電流計器は CT (Current Transformer) 電圧計器は VT (Voltage Transformer)、PD (Potential Divider) と呼ばれます。計測値は系統運用や、電力系統設備事故検出(④項参照)に使用されます。

⑥その他設備

①～⑤以外に、送電線有効電力調整設備(位相調整器)、直列コンデンサ(送電線リアクタンス補償設備)、系統安定化設備(電力貯蔵システム、制動抵抗など)が必要に応じ設置される場合があります。なお、③で述べた電圧・無効電力調整設備にサイリスタ等も併せて設置し、制御速度高速化や滑らかな出力制御をし、系統安定に役立てる場合もありますが(FACS (Flexible AC Transmission Systems) 機器と呼ばれます)、別の回で解説します。

○変電設備の信頼度

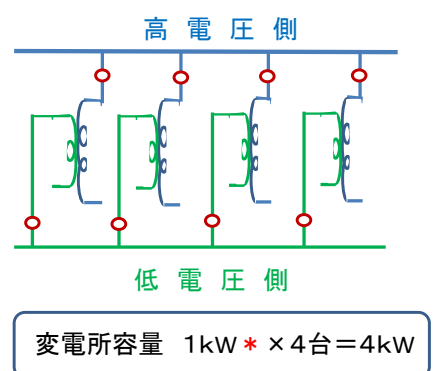
送電設備の信頼度について N-1 基準の考え方を紹介しました。(第 6 回)

全設備運転状況に対し、「1 設備を停止した場合、支障なく電力送電ができること」が基本的な考え方です。変電設備の場合も N-1 基準を適用されますが、設備構成や送電能力の特徴を考慮し検討されます。

変電所が変圧器容量 1kW・4 台で構成されている例で解説します。(図-79) なお、実検討では無効電力電流の影響も考慮しますが、ここでは有効電力のみで説明します。(専門的には、力率: 1 想定)

変圧器容量の電力を流した状況で、変圧器 1 台の突然停止を想定します。(N-1) (この場合、N=4) ここで、対象変圧器は過負荷(容量を上回る電流で運転)とその継続時間に図-80-1 の特性があるとします。この変圧器は普段から油冷却しているため、ある程度の過負荷となっても油を含めた設備の温度上昇が比較的緩やかで短時間なら変圧器設備にダメージなく過負荷運転可能なためこの様な特性が得られます。

(なお、厳密には変圧器毎にこの特性は異なります。) 一方、変圧器の通過電力は、ロードカーブ(変



* 厳密には容量はkVA * で表示される
(* 無効電力電流分考慮)

図 79 変圧器 4 台の変電所

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

電所が供給する需要の需要曲線) に沿い変化するとします。(図-80-1)

朝 10 時に変圧器が 1 台事故停止を想定した場合、午後 6 時まで 8 時間、4kW、すなわち、定格容量の 1.25 倍の電力が通過します。一方、図-80-2 から 8 時間の場合、1.2 倍 ($3\text{kW} \times 1.2 = 3.6\text{kW}$) の過負荷が精一杯です。4kW は 3.6kW を超えていますから、「N-1 基準で問題あり」となります。

さて、更に電力系統の状況に踏み込んだ検討を説明します。事故を想定した変電所 (A 変電所) と B、C 変電所が低電圧側で送電線により連系しているとします。(図-80-3) さて、A 変電所で変圧器 1 台が停止した後、2 時間内に、A 変電所から供給している需要 (0.4kW) を B、C 変電所から送電する系統操作 (系統切り替え) できると、A 変電所の変圧器通過電力は 3.6kW (変圧器容量の 120%) となり 8 時間供給可能となります。この場合、N-1 基準上問題ないとなります。なお、A 変電所と C 変電所間の系統操作は異電圧ループ切り替えと呼ばれ、慎重な検討が必要です(図-80-4)。異電圧ループ切り替え可能な場合、変圧器停止後、停電なく電力供給を継続でき N-1 基準上問題なしと判断されます。

なお、系統条件でループ切り替えできなくても、図-80-4 の場合で言えば、一旦、A、C 両変電所の X 送電線用 CB を開放し、X 送電線の需要家を停電させての切り替えをすることは可能です。これは「停電切り替え」と呼ばれる切り替え方法ですが、切り替え中 X 送電線から供給される需要は停電します。(通常は短時間) このため、停電切り替えについては N-1 基準を満たさないとする場合と、満たすとする場合があります。読者の皆様はどう判断するでしょうか？

(余談) 変電所の N-1 基準は奥が深いのでー

N-1 基準は、特に変電所の場合、細かい定義が可能です、柔軟な系統運用・系統設備形成が可能になりますが、一方、細かく定義する程、電力系統運転者は想定される対応を適切に行わなければなりませんから、ある意味、負担が生じます。実際の運転条件では系統操作が時間内に行えないこともあり得ますから、「絵に書いた餅」とならない様実態を踏まえる必要があります。

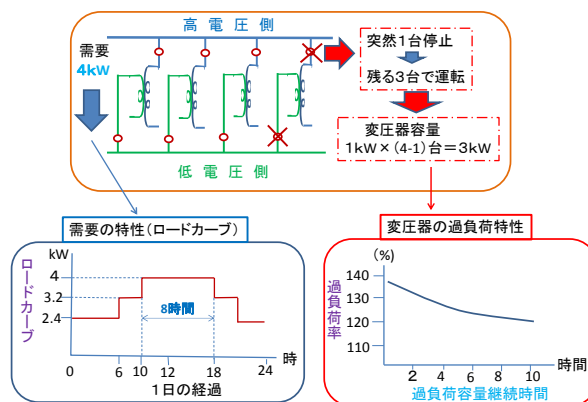


図 80-1 変電所での N-1 基準検討イメージ (検討要素確認)

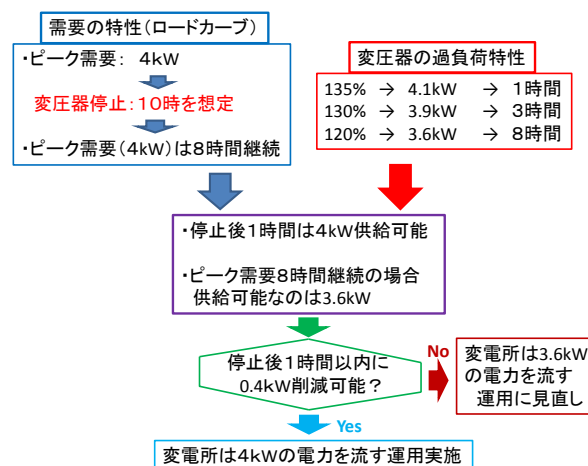


図 80-2 変電所での N-1 基準検討イメージ (検討ステップ)

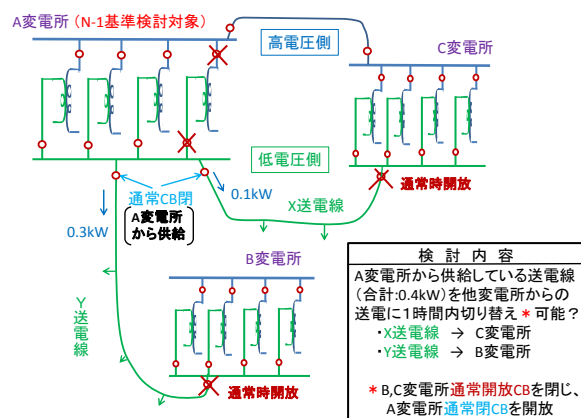


図 80-3 変電所での N-1 基準検討イメージ (通過電力削減)

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

発展途上国の技術者と議論すると、「このような系統操作を N-1 基準に織り込むのは不可能」と主張される場合もあります。この場合、系統信頼度をチェックする部門と流通設備運用部門が協働して検討する体制となっていない場合があります。一方、運用部門の現場の対応能力が一定レベルに達していない場合もあります。このため、実態をよく確認し協議する必要があります。

変電設備関連の信頼度チェックは奥が深く、他にも種々考慮すべき事項がありますが、「わかりやすい」の趣旨を超えるためこの程度に止めます。

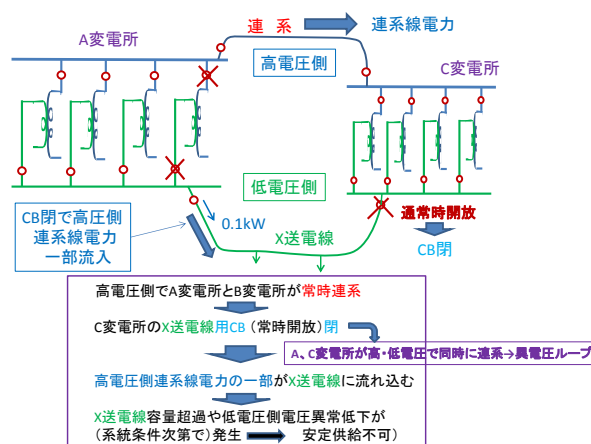


図 80-4 補足：異電圧ループ切り替えの説明

ところで、前記の N-1 基準の解説で、変圧器通過電力を減らす方法を示しましたが、今後、スマートメータの導入・活用が進むと「需要制御（デマンドコントロール）」で通過電力を減らす（→通過電流を減らす）ことが適用可能なオプションになるかも知れません。

一方、再生可能エネルギー導入が進むと、そもそも通過電力が一定しないので「N-1 基準の考え方は有効か？」との議論が出てくるかも知れません。

ところで、例えば、直流変換器は変圧器の様な過負荷運転はできない等、変圧器とは異なる過負荷特性の設備も種々あるので注意が必要です。

○変電所トータルの信頼性評価と設備規模の標準化

変電所を構成する変圧器等個々の設備信頼度チェックで問題ない場合も、変電所自体が全停止した場合の影響度チェックも併せて必要です。これにより変電所 1 箇所集中の「弊害」を避けるため 2 箇所に分割する場合もあります。2 箇所にすると通常投資額は増しますが、例えばステップバイステップの拡充等を考えると現在価値換算額は返って小さくなる場合もあります。2 箇所化が信頼度的に望ましい場合、現在価値や総投資額をいかに小さくし 1 箇所集中と同等なし以下とするかが電力技術者の「腕のみせどころ」です。図-81 に 1 箇所集中配置と 2 箇所化のイメージを示したので、微妙な「工夫」を比較下さい。

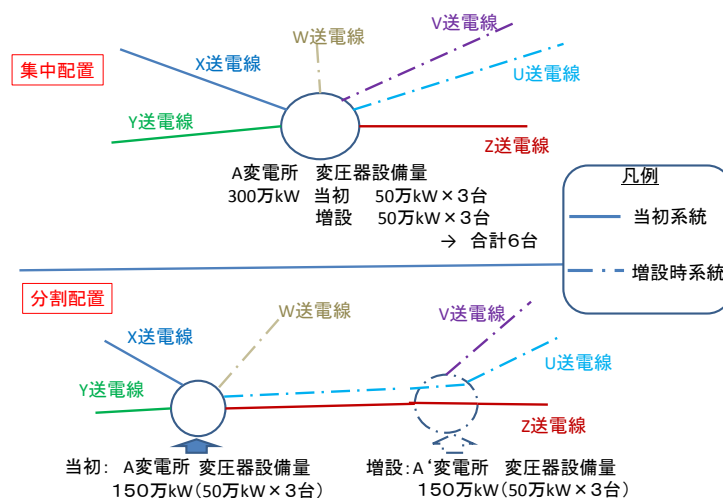


図 81 変電所の集中配置と分割配置の比較イメージ

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

なお、この様な比較を一々せず、「変電所の規模（変圧器の容量と設置台数等）を標準化し、その規模を上回る設備が必要な場合は、新しい変電所を設置する」として対応（ルール化）する場合があります。なお、この様な場合、ルール設定時以降に前提条件が変化し、見直す必要がある場合も出てきますから、適宜ルールの妥当性をチェックすることが望ましいと思います。

変電所の解説はこの程度とし、次回は配電系統を解説します。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 9 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、今回は電力系統流通設備のうち配電設備の解説をします。

なお、配電設備 (Distribution System) は需要家と送電設備を仲立ちする設備ですが、機能的には送電設備や変電設備の特徴も有しています。世界的に見ても明確な定義はありませんが、総じて「多数の需要家に直結する比較的低電圧 (5 万 kV 程度以下) の送変電設備」と言えます。

○配電設備が必要な機能

配電設備は需要家と直結する設備であるため以下がポイントです。

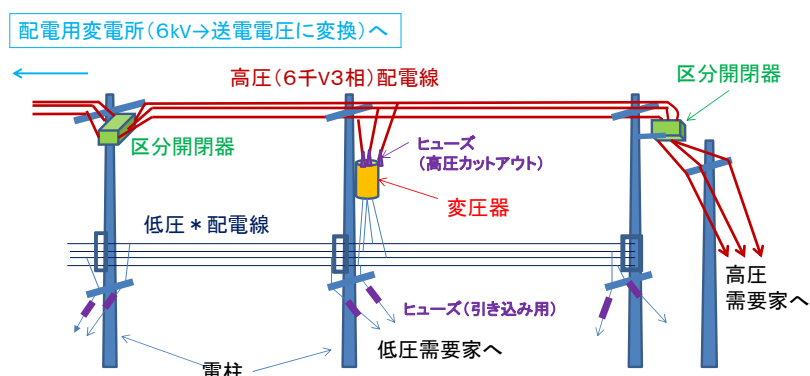
- ①多数ある需要家の種々の変化 (供給、廃止、増設等) への機動的対応
- ②配電設備トラブル (雷事故等) の需要家への影響を限定化
- ③需要家の設備トラブル (設備損壊等) の影響を系統へ極力波及させない
- ④膨大な数の設備を標準化し合理的な保守・運転を実現

①機動的な対応：配電設備の基本構成 (図-82)

需要家のうち、数的に多い家庭や小店舗などの使用電力は数十 kW 以下が圧倒的多数です。この規模に対し低電圧で電気を送っても電流は比較的小さく、また、送電距離も一般的に短いので、送電ロスや電圧低下も小さくなります。具体的には、100～数百 V の低電圧配電供給が行われます。なお、3 相送電すると単相 (1 相) の 1.7 倍の電力が同じ電流・電圧で供給できるため、需要家近傍まで単相・3 相の両電圧が使用可能な設備となっています。

その上位電圧、具体的には数千 V から 2 万 V 程度の高電圧でほぼ電圧設備に並行して高電圧配電設備が設置されます。日本の場合、高電圧配電として 6 千ボルトが広く使われています。比較的大容量の需要家 (50kW～2000kW が主) が高電圧供給され、また低電圧配電系統に対し、(送電系統での) 基幹系統の役割も担います。高電圧配電設備も起動的対応が可能な様、需要家近傍まで設備が設置されています。

架空配電の場合、通常、一番高い場所に、6 千ボルト、その下に 200 ボルト 3 相や 100 ボルト (単相) の電線が電柱を使用して敷設されます。(図-82) なお、雷対策として最上部に架空地線が設置される場合もあります。



* 100/200V3相4線式(両電圧が取り出せる)のイメージ(電線4本)

図 82 配電設備の基本構成イメージ：架空配電の例

なお、海外の架空配電も基本形態は同じで、例えば、2 万 V 電線を最上部、その下に 4 百ボルト

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

(3 相)、2 百ボルト（単相や 3 相）が敷設されます。

地中配電では、高電圧と低電圧ケーブルが歩道下や道路下の管路内等に敷設されます。ケーブル構造は送電ケーブルと基本的には同じです。

低電圧側は変圧器を通して高電圧側と適宜連系されます。この変圧器は、容量が変電所変圧器と比較し小さいため電柱（架空配電）や歩道脇・道路地下等のボックス内（地中配電）に設置されます。なお、地中配電では後述する区分開閉器も併せてボックス内に設置されますが、歩道脇にボックスがあっても気付かない方が多いと思います。

配電系統では機動的に供給しつつ適正な電圧維持することが、需要家電圧を保つ上で重要です。配電系統の電圧調整は、変電所変圧器電圧調整装置による高電圧配電線送り出し電圧調整、配電系統内変圧器電圧調整タップの切り替えて調整されます（ただし、変圧器を停止してタップを切り替えます）。更に、小容量の無効電力調整装置（コンデンサ）や電圧調整装置（Step Voltage Regulator 運転中の調整も可）が必要に応じ電柱等に設置されます。（図-83）

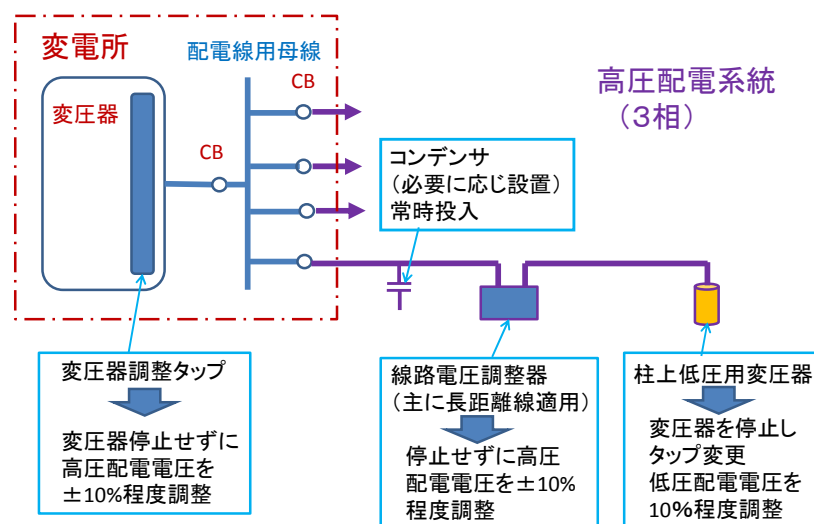


図 83 配電系統の電圧調整

（余談）配電設備は一般的な解説が難しい

ここまでの解説でも、配電専門家の方から「それは違う！」とのお叱りが出てくるかも知れません。配電設備は、世界的に見ても、例えば同じ国の中でも都市毎に配電会社がありそれぞれの配電方式が異なる等相当個性的？です。日本はその点、各地域比較的似ているとされますが、以下の解説に関しても「そこは違う！」点があるかも知れません。

・需要家接続要望への対応義務と供給義務

全面（100%）自由化しても、需要家が電力系統への接続を望んだ場合に接続する義務は配電（設備所有）事業者に残ります。このため、今後も配電系統では、接続要望に対し機動的に対応する努力が求められます。

ただし、配電事業者に供給義務はありませんので、接続されても需要家が望む電力を受電できない可能性が有るのが 100%自由化の「世界」となります。

②配電設備トラブルの需要家への影響の限定化

配電設備でトラブルが発生した場合、その影響（停電等）範囲を一定区域に限定するシステムと

超電導 Web21

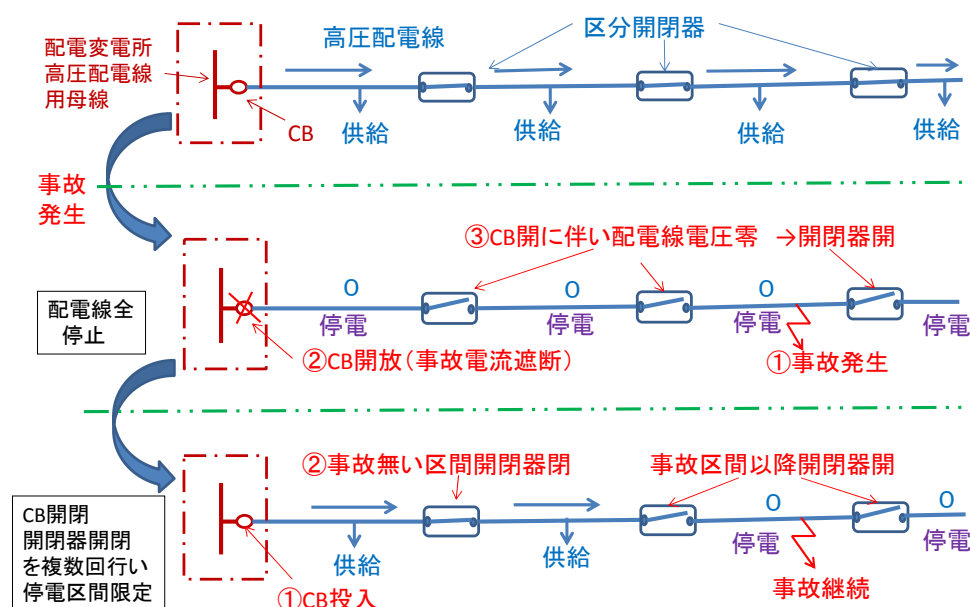
(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なっています。

高電圧配電線では一定区間毎に区分別開器が設置されます。架空配電の場合、開閉器は電柱の頂上付近（高電圧線近傍）に配置されています。(図-82) 区分別開器操作が自動化されている場合、配電線事故時に配電線の無電圧時間検出等を条件に動作し停電区間を限定化させます。(図-84-(1)) また、高電圧配電線同士が区分別開器を連系し（通常運用時：開放）、停電復旧中に閉じ停電範囲を限定化する構成も適宜採用されています。(図 84-(2)) なお、将来的には、開閉器に電圧・電流センサを内蔵し（センサ内蔵開閉器）、事故区間を瞬時に判断して切り替えが自動的に行われるシステムの導入も検討されています。

低電圧配電設備トラブル時（短絡事故等）、変圧器高電圧側にヒューズが動作し高電圧側に事故は波及しません。また、配電変圧器内部事故時は高圧側ヒューズが動作し事故除去されます。(図-82)

84-(1) 故障区間分離方式



84-(2) 高電圧配電線間連系： → (1) と比較し供給区間限定

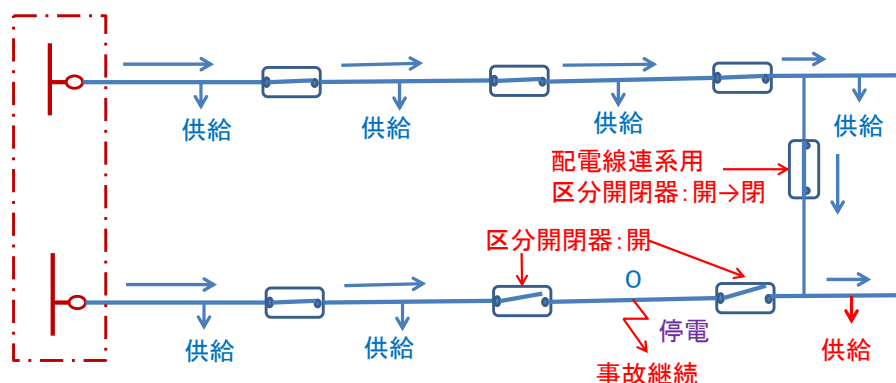


図 84 高電圧配電設備での停電エリア限定化例

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

・配電系統の信頼度の考え方

配電設備ではトラブル（事故等）が発生後、復旧までの間、ある程度停電することは止むを得ない、が信頼度についての基本的な考え方です。

配電設備は流通設備の一部ですが、送電設備や変電所の N-1 基準（1 設備が停止しても供給確保）と異なる訳です。これは、例えば、配電系統から供給する需要家が小規模低圧の一軒等、需要家側の供給条件がさまざまであったり、例えば、地域状況から電柱が 1 ルートしか確保できない等、配電設備の立地条件の制約があったりと、単純に N-1 基準を適用するのはコストがかかり過ぎ妥当でないためです。また、一般的に、設備の保守・点検、事故復旧も送変電設備と比較し規模が小さいこともあり容易です。

配電設備では、需要密度等を反映しエリアを区分し、そのエリアに対し平均停電時間/軒等に関する指標を設定し実績も評価しながら、設定値を満たすべく必要な場合信頼度対策を実施します。

③需要家での設備トラブルの影響を需要家外に波及させない対応

需要家には、自設備のトラブル（設備事故など）が発生した場合、自設備に設置した CB（高圧需要家の場合）やブレーカー（低圧需要家の場合）が動作し配電系統側に事故波及しない構成となっています。（なお、高圧需要家の CB より電源側の引き込みケーブルの事故対応として需要家側で地絡継電装置付高圧気中負荷開閉器や地中線用負荷開閉器の設置が推奨されています。（詳細説明は略））配電設備側でも、高圧需要家近傍では事故電力遮断能力を有する区分開閉器、変圧器低圧側にヒューズを設置し事故が波及しない構成となっています。（図-82）

④膨大な数の設備を標準化し保守・運転の標準化

需要家の数（契約口数）は概算で人口×（0.7～0.8）程度ですから、これらに供給する配電設備も膨大な数になります。この場合、個別設備の最適化も念頭に入れつつ標準化を図ることが、設備形成が効率的です。設備復旧や不良取替え等が円滑に行え、信頼性維持、保守・運転の面でもメリットが得られます。

主に大都市の高需要密度エリアに限られますが、ネットワーク方式と呼ばれる供給方式で配電設備が標準化される場合もあり、需要家はその方式に合わせ受電することになります。（図-85）需要家全体では標準化により経済性等の全体的なメリットを得ますが、個々の需要家にとると希望する配電方式を選べないなど、デメリットを受ける場合もあります。従来、これらのメリット・デメリット評価は、電力会社内で行われていました。同じエリアに複数の配電方式が混在すると、コストが増加し、かつ保守・運用が煩雑化するため、今後も標準化は必要と思いますが、自由化の進展に伴い社会に対し丁寧に説明する責任が増すと思われます。

需要家は常時3回線受電：1線路が事故停止しても2回線で供給継続な設備形成

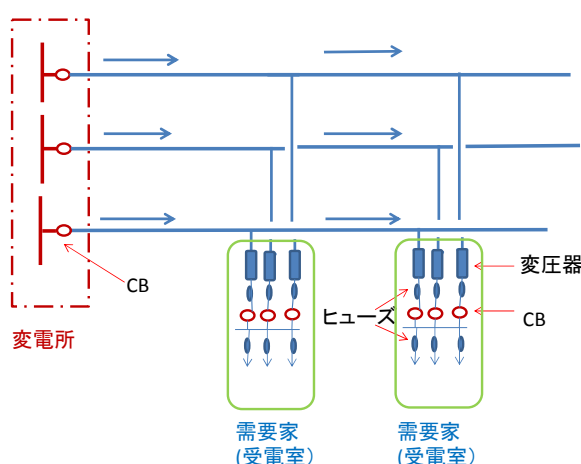


図 85 ネットワーク送電方式の例：スポットネットワーク

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

・配電系統と特別高圧（特高）

配電系統はどの電圧まで含まれる？ 供給契約等で設定される特別高圧との関係は？ と聞かれることがあります。電気設備の技術基準（電気事業法に基づく基準）は 7 千 V を境に高圧と特別高圧を分け、一般的に 2 万 V 以上で受電する大規模需要家は特別高圧需要家と呼ばれます。規模の大きな需要家は相当高い電圧、例えば、6 万 V（～7 万 V）系統に多く接続されます。6 万 V 以上の電力系統は地域供給用変電所が接続されるなど送電系統と考えられます。一方、2 万 V 系統は、日本では大都市部のネットワーク系統など比較的大規模な需要家が集中したエリアの供給系統として形成されるなど配電系統の特徴が濃厚です。なお、欧州都市の 2 万 V 系統では地域供給用変電所が接続されるなど送電系統の特徴が強い場合もあります。結論的には、2 万 V 前後が送電系統と配電系統の電圧的な「ボーダーライン」と思います。

・配電系統とスマートグリッド

スマートグリッドは、もともと、米国において地域間連系や信頼度レベルの向上を目指し提唱された電力系統全体のスマート化（インフラコストを抑え極力頭脳を活用）を指したものです。日本なら「送電線増強などのコストを極力抑え高効率な全国運用を実現する高度な電力系統システム」と思います。

一方、日本では、自律分散、特に再生可能エネルギーを含んだ発電源と需要を効率的に制御し独立的に運用する電力システム、一般的にマイクログリッドと呼ばれるシステムが、スマートグリッドの主要分野とされているように思われます。マイクログリッドの場合、比較的狭いエリアが想定され、配電電圧で発電から需要に至る電力系統を構成するイメージとなります。（図-86-1）

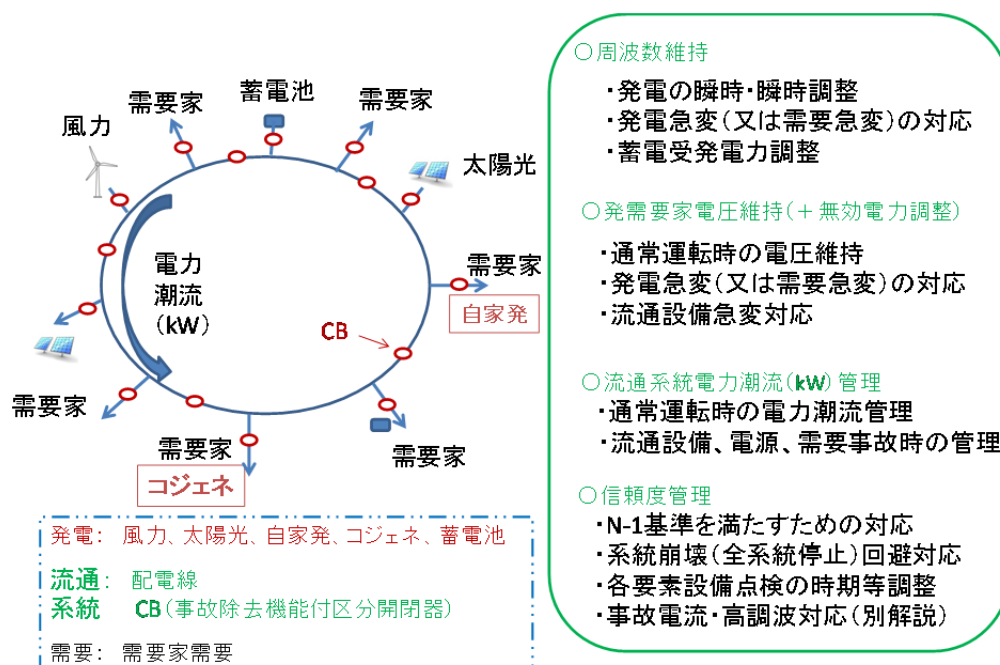


図 86-1 スマートグリッド（マイクログリッド）の系統運用

「配電電圧で電力系統を構成する」と「配電系統（設備）の考え方で電力系統を構成する」は異なります。電力系統では周波数制御、電圧制御、供給信頼度維持等が電源、流通設備、需要が一体となり行われますが、配電系統では、その相当部分を基幹電源や送電系統が分担しているため、電

圧制御、供給信頼度維持等の一部を担っています。(第1回～今回の説明参照)(図-86-2)なお、図-86では違いを実感いただくため、やや極端に比較しています。

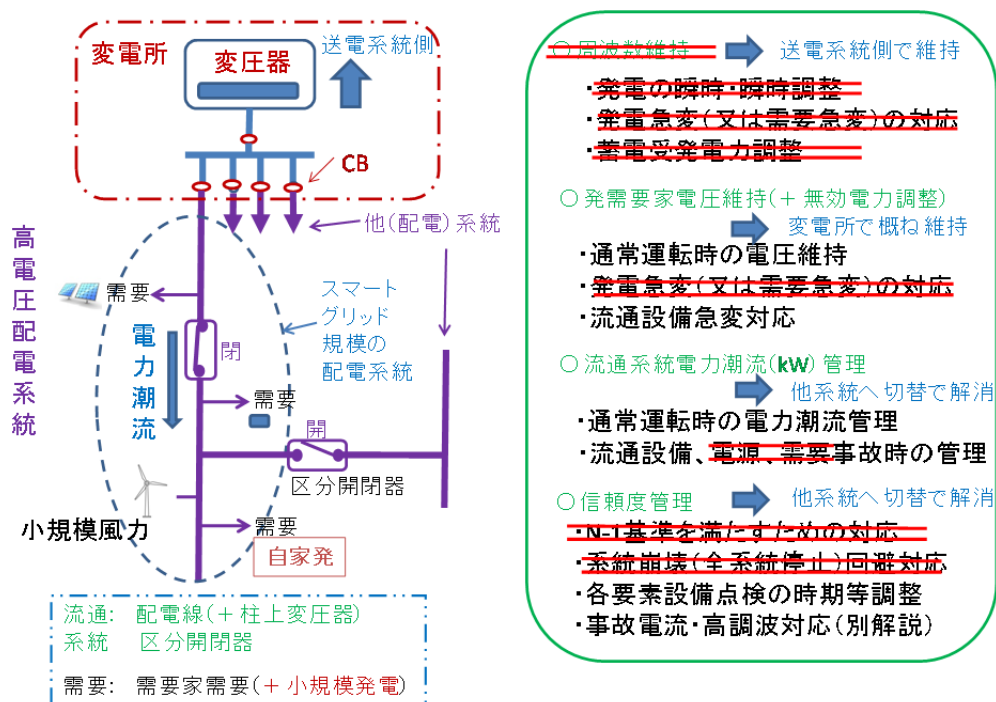


図 86-2 配電系統（設備）の運用（分散電源が比較的少の場合）

マイクログリッドは、電力系統を低電圧かつ送電距離を短く構成できる、コンパクトな制御し易いなどが有利ですが、規模の優位性（ある程度、設備を大型化した方が、単位コスト（kW コストや kWh コスト）が小さくなる）や最適点への電源配置等による総合効率性発揮等は従来系統の方が実現し易い等の不利な面もあると想定されます。いづれにしても、スマートグリッド技術が進歩することで、従来の電力系統構成の考え方が融合した、より合理的で競争力のある電力系統コンセプトの実現が望まれます。

- ・配電系統とスマートメータ

スマートメータが導入されると、低圧需要家を含め個々需要家の使用電力量、電圧、電流データが把握できます。これらのデータの適切な活用で、膨大な配電設備状況が相対的に把握されることが期待されます。従来、需要家（特に低圧需要家）の使用電力量を月毎の検針結果で把握したのに比べ大きな進歩で、例えば、次のような波及効果が期待されます。

- ・配電系統の電力流通状況（電圧を含む）の把握
- ・停電状況（停電状況、停電範囲、復旧状況等）の把握
- ・雷圧維持等についての必要対応策のタイムリーな検討

なお、活用可能なデータは多数の需要家の時々刻々の数値ですから膨大ですから、所謂「ビッグデータ」処理技術の活用を含めチャレンジングな技術開発が必要になると思います。

・配電系統と再生可能エネルギー

発電量が変動する再生可能エネルギーが配電系統に大量に設置されると、消費量が変動する需要

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

と合わせり独特の変動を生み出し、配電系統へ、ひいては他の需要家へ影響を与えます。従来も自家発電等の電源が配電系統に存在しましたが、「自分の需要を賄う発電をする」がメインでした。このため、通常、電力の流れは高い電圧の送電系統から受けた電力を、配電系統を通し需要家に配るとの配電系統の機能は電源がない場合と概ね共通していました。一方、再生可能エネルギーが配電系統へ多数（大量に）導入されると基本的な機能を含め影響が生じてきます。

・配電系統のパラダイムシフト：送電系統化

電源から電力を需要地域に送るのは送電系統の重要な役割ですが、再生可能エネルギーの設置量が増えると、（基幹）送電系統の枠割を配電系統が担うようになると想定されます。送電系統では、電力の流れは発電と需要の地域毎のバランスで決まりかなり複雑な様相となりますが、配電系統でも同様に複雑化すると想定されます。（図-87）

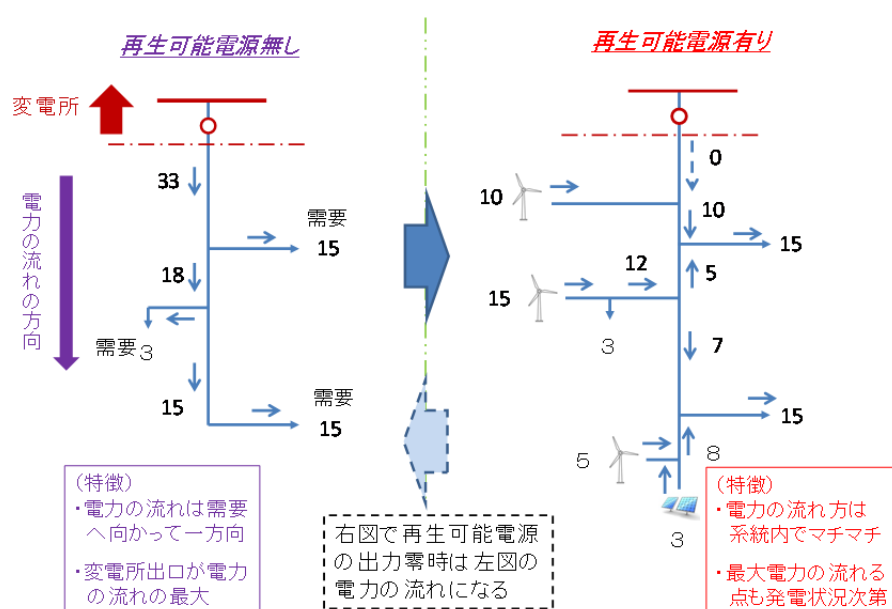


図 87 再生可能電源増加と配電系統電力（kW）の流れの特徴

・配電機能の充実：送電系統機能の充実、ただし低コスト・標準化が必要

送電系統化に伴い、配電系統でも電気の流れや電圧の状況を細密に把握・推定する必要性が高くなると想定されます。この点、センサ内蔵開閉器やスマートメータの設置は朗報です。送電系統での変電所の役割（刻々の状況計測）がある程度できますから、送電系統同様、配電系統での電力の流れ（潮流）等を踏まえた配電系統運用が行えると想定されます。なお、潮流状況に応じ現在よりきめ細かい電圧調整も必要になると想定されます。

更に、配電系統運用時に、送電系統と同様、適宜電源の協力も図る必要があると思います。（送電系統で必要な発送一体運用です（第8回参照））なお、需要家等に設置が想定される蓄電池は、基本的に送電系統の揚水発電と同じ機能ですから、揚水発電運用技術を生かした運用が行われればと思います。

以上のイメージを図-88 に示します。これらを総合的に運用するためには、自動的に判断・操作するシステムも必要でしょう。

この課題を、既存の膨大な配電設備の形態や運用方法を基本的に踏襲しつつ解決する訳ですが、送電・配電技術者の一致協力で実現したいと思います。

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

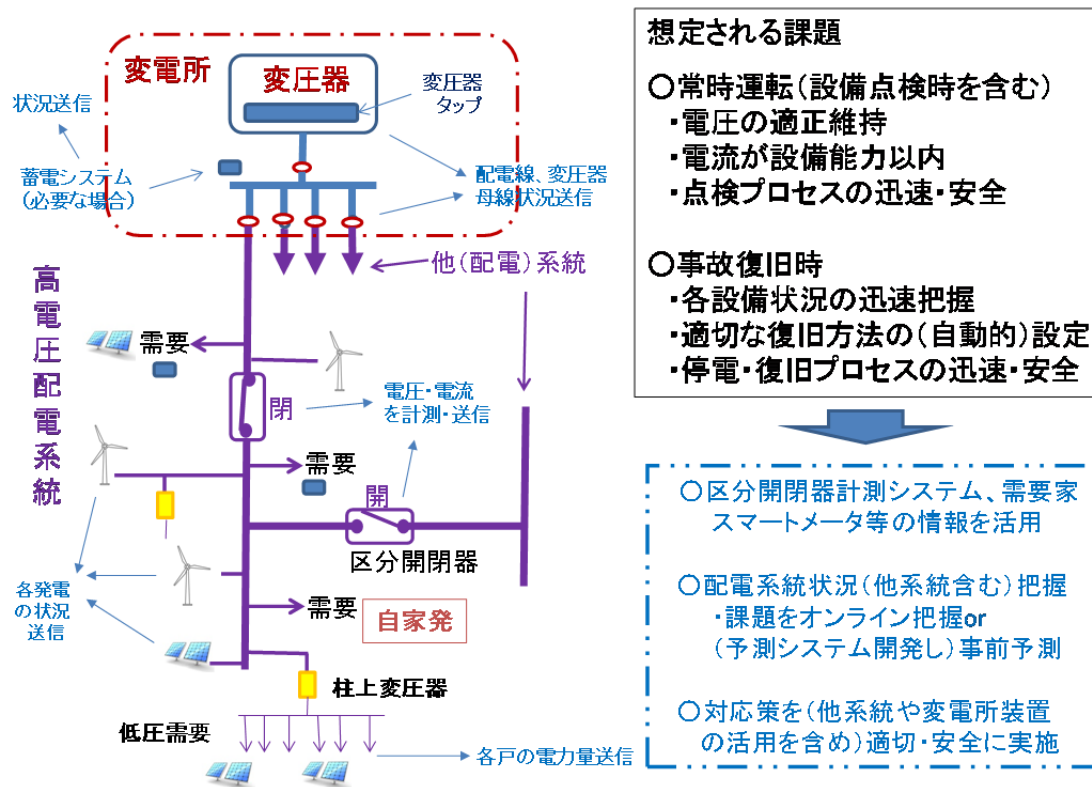


図 88 再生可能電源増加に対応する配電システムのイメージ

配電設備の解説は以上とします。

次回は需要家設備を電力系統との関連を中心に解説します。

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 10 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、今回は需要家設備の解説をします。

電力系統はそもそも需要家が電気を使うために使用される設備ですが、需要家設備は電力系統の一部でもあります。今回は、電力系統との関連を中心に需要家電設備と合わせて関連する事項も解説します。

○需要家設備の基本構成 (図-89)

低電圧 (100~400V) で電力を受ける需要家の場合、需要端に電力量計を設置し、次に分電盤が置かれアンペアブレーカー (もしくは幹線ブレーカー) + 漏電遮断器 + 配線用ブレーカーで需要家内を保護するのが一般的だと思います。ちなみに、分電盤は、変電所の母線 (第 8 回) の様に電気の交差点となっています。

高電圧 (6 千 V) や特別高圧 (7000 V 以上) の需要家の場合、遮断器 (CB) (負荷開閉器の場合も)、取引用計量装置 (Voltage Current Transformer) が設置され、それから先の設備はそれぞれの必要性に沿った形態となります。変圧器を設置し設備に適した電圧に変換し、母線を設けて (6 千 V 等では VCT 以下の設備がキュービクルと呼ばれるボックスに一括設置) 構内に配電するのが一般的な構成です。なお、受電電圧や変圧器台数により、図-89-(2)とは構成が幾分違う場合もあります。

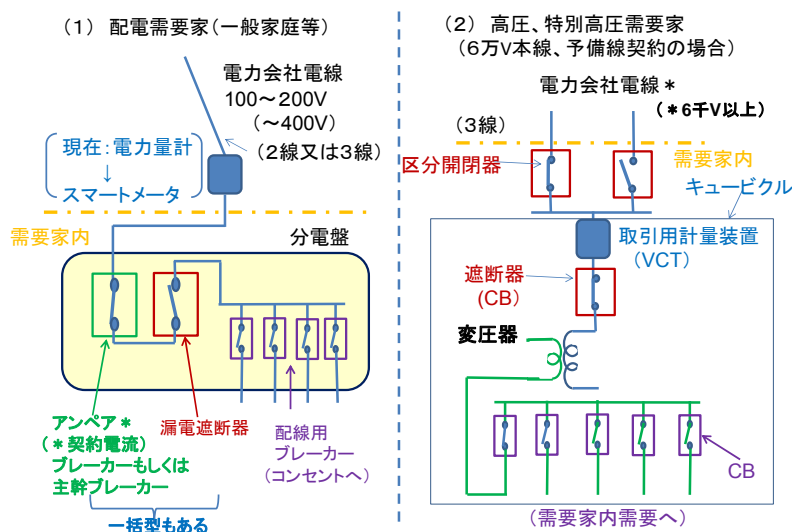


図 89 需要家電力系統関連設備の基本構成

○需要家設備の必要な機能

電力系統では、系統に繋がるとお互いに影響を及ぼし合い、特にお隣さん同士の影響は強くなります (第 3 回参照)。このため、需要家も電力系統に繋がり電気を使用する時に配慮が必要となります。この点は同じネットワークシステムでも通信系統とは異なります。

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

①自設備事故で他人に迷惑をかけないための機能

需要家内でのトラブルが起きると電力系統に種々の影響をもたらします。(図-90)。このため、需要家で系統に影響を与えるトラブル（事故）が発生したら速やかに電力系統から切り離される必要があります。このため、電力系統との接続にブレーカーを設置し需要家構内事故時には電力系統側の保護装置が動作する前に高速開放させます。なお、事故で大電流が流れる際の状況は、送電線雷事故での瞬時電圧低下発生時と同じです。(第6回解説参照)

— 6万V系統短絡(A-B-C相接触)の場合 —

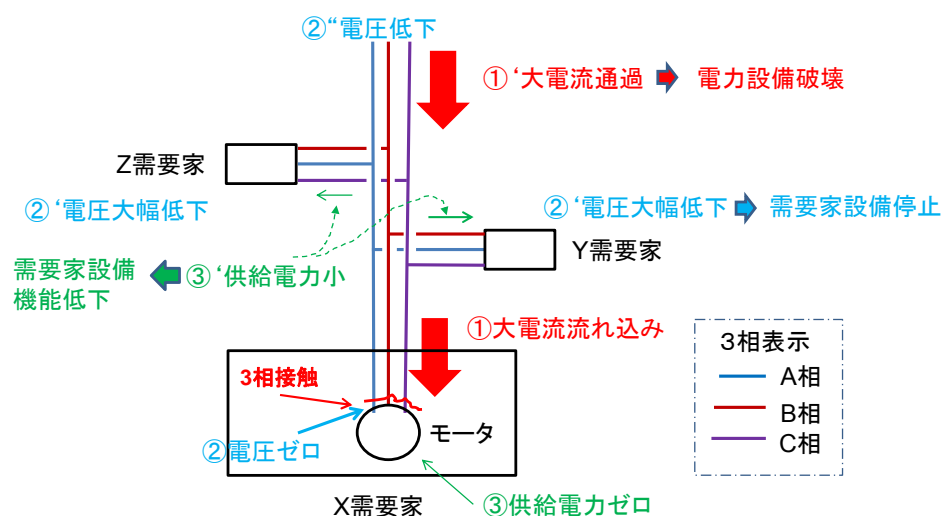


図 90 需要家内トラブルの電力系統への影響イメージ

低電圧需要家（一般家庭など）では契約電流を超えると動作するアンペアブレーカーと漏電などの小さな事故電流でも持続的に流れて火災や人災に至らない様動作させる漏電遮断器で一般的に対応します。需要家内の一部の電気回路で大電流が流れると配線用ブレーカーが動作します。(図-89-(1))

一方、高電圧以上の需要家内トラブルには遮断器（CB）が動作します。(図-89-(2)) なお、高压需要家ではCBの代わりにヒューズの場合もあります。

ブレーカー（又はCB）が動作すると電力系統から電気が来ませんからトラブルを継続させるエネルギーもなくなり、通常は需要家内の影響拡大も防げます。ただし、電気事故で火災が発生した場合、ブレーカーが動作しエネルギー供給がなくなっても火は消えない場合もあります。

なお、一般家庭で、地震で家が損壊した場合等の時、電力系統側の原因で停電し設備復旧後の再供給時に建物内で起因する火災の可能性が皆無ではありませんから、避難する場合は念のためブレーカー開放することをお勧めします。

②普段の電気使用で他人に迷惑をかけないために

需要家電圧が電気の使い方でも異常に変動する場合、近傍の系統電圧も変動し、お隣さんや更に「ご近所さん」影響が広がり電気が使いづらくなります（ひどい場合は使えなくなる）。いわば、電気の「雑音」です。このような電圧変動には、商用周波数（50 又は 60 Hz）電圧がゆっくり（周期が数秒以上）変動する場合と更に短い周期で電圧変動する場合があります。短い周期の変動でも、数秒以内の比較的高い周波数（10 Hz 程度以下）は電圧フリッカーと呼ばれ照明のちらつきなどの影響を及ぼします。商用周波数以上の非常に短い電圧変動は高調波電圧（発生原因から通常、商用周波

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

数の整数倍) と呼ばれます。(図-91) これらの電圧発生が大きい場合は、抑制装置の需要家設置が必要です。

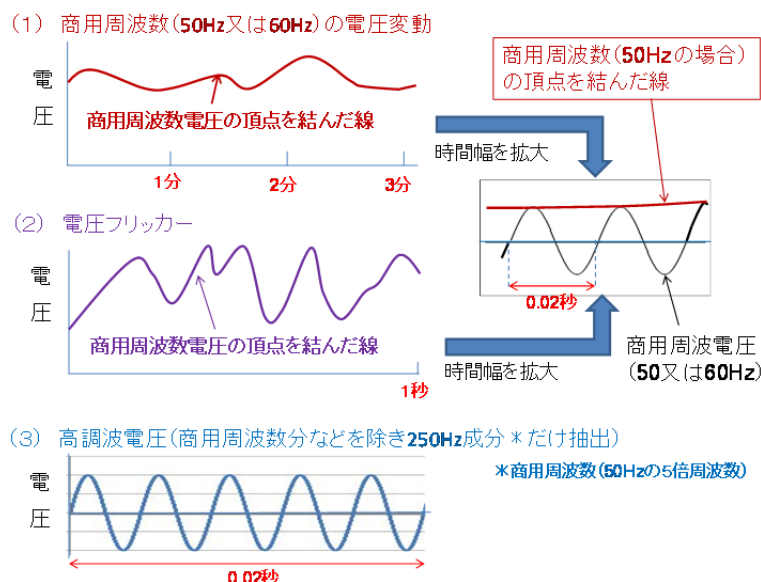


図 91 電圧変動のイメージ

なお、高調波電圧は、インバータを使用する機器(高調波抑制対策をしていない場合)が増える増加するため、高調波抑制対策付きインバータ機器の設置が望まれます。なお、高圧以上の比較的大規模な需要家は「高調波抑制対策ガイドライン」(経済産業省制定)に沿い必要な場合に対策を講じます。(専門的になるため解説は省きます。なお、高調波電圧は、通常、「電圧変動」に含みませんが今回は説明の都合上含めました。)

(余談) 高調波現象は難しい

電力系統での高調波現象を検討する時は、高調波発生原因設備を高調波発生電流源(いわば高調波発生発電機)として解析します。需要設備を発電機と考えるのは、直感的にしっくりしないのですが良く解析できます。(ただし、対策はなかなか難しいのですが。)一方、送電線などは高調波に対する電気特性が商用周波数での特性と違うため、模擬の仕方が変わります。結果として得られる高調波電圧・電流の様相は商用周波数とは全く異なります。このため、検討は結果が妥当かどうかの確認を含め大変です。(検討が不要な)高調波の少ない電力系統になればと願います。

電力系統解析では、商用周波数(50又は60Hz)、高調波(250~300Hz以上)でシミュレーション方法を変えますが、このように物理現象では周波数領域の設定が大切な場合があります。いくら詳細に模擬しても解析する現象の周波数領域に合った模擬でないと高性能コンピュータを駆使しても正しい答が出ません。ちなみに、地震や津波現象も広い周波数領域、ゆっくりした揺れから細かい揺れまで含んでいることを(3.11以降いわきで)実感しましたがー？

③発電機を運転する需要家の機能

需要家が発電設備を運転すると、自分の需要を賄うだけでも外部の電力系統に影響を与えます。(図-92) このため、発電機の電圧・無効電力維持力や事故対応機能等の条件を満たす必要があり、「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」(経済産業省制定)が定められています。(解説は省略)

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

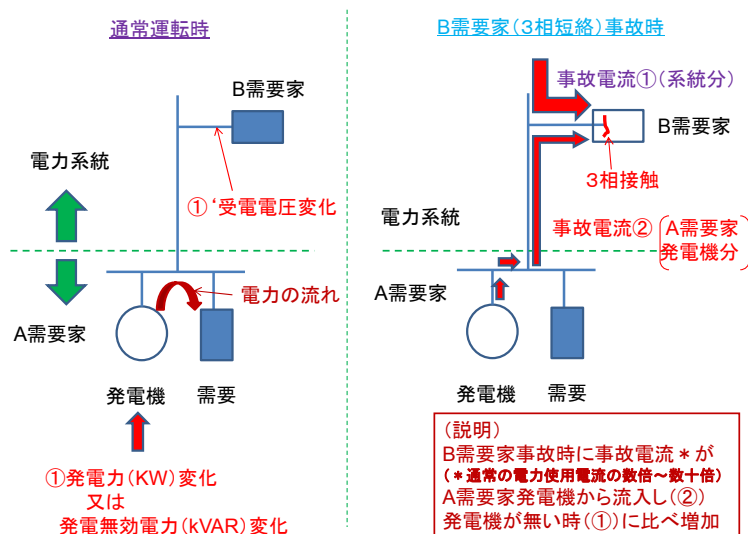


図 92 需要家発電機の電力系統への影響例

○需要家の供給契約と電力系統運用

需要家は電力会社や他の事業者と供給契約（電気を購入する契約）を結びます。通常、契約電力（kW）内で電気を使えば問題無い訳ですが、その契約内容の一部分、特に、需要規模が大きい需要家の場合、電力系統運用へ影響を与えます。（以下の④、⑤、⑥）

④（随時）需給調整契約

電力系統では、需給（kW）バランスが崩れ周波数が維持されないと電力供給全体が停止します。（第1回解説参照）このため、発電増余力がなく、需要が上回り周波数低下が大きくなる（と想定される）場合、需要が削減されます。発展途上国では、（日本でも3.11で悪名が定着した）輪番停電等で強制的に削減されることも多いですが、先進国等では、極力、需要家と事前に需要削減契約を結び、周波数低下時（又は低下が想定される時）に需要が削減されます。日本では需要を削減する契約は需給調整契約と呼ばれますが、時間を予め指定せず緊急事態に対応できる契約は「随時需給調整契約」と呼ばれます。

従来、契約による需要削減策はDSM（Demand Side Management）と呼ばれ、需給バランス維持手段であるとともに、将来の電力需要増加を抑制し電源新設量を減らすことにも使われました。電力自由化の進展とともに、電源設備量や需要量は「基本的に市場で決まる」とされ、一方、随時調整契約など緊急対応可能な需要削減策が、系統運用者の緊急的な停電回避対策とされつつあります。この様なコンセプトの変化もあるのでしょうか、最近ではDSMにかわりDR（Demand Response）と呼ばれます。

（余談）随時調整契約量の確保と市場原理

系統全体の悪影響が及ぶ周波数低下原因は、発電設備の大規模停止、送電設備の大規模停止、需要の異常増加（猛暑等）等種々あります。一方、随時調整契約は需要削減時間や削減回数が見定められ、更に実際需要削減されるとその後契約解除が生じるなど（→いざ、削減すると需要家への影響が想定以上に大きく契約を解消）、自由に契約実施できません。このため、電力系統運用者とすれば契約量は多いほど安心です。一方、契約を増すには金銭的な魅力（インセンティブ）を増す必要があります。このように調整契約量には「需要と供給」の関係があり、市場原理で決定されるべき

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

との意見もあります。

ところで、電力系統運用者は払うお金がありませんから、電力系統運用者は電力系統利用者に「つけ」を回し調整契約を買いいます。この際、量と値段を気にせずに買うと、後々に「余計なものを買った、私は払わない!」と言われる可能性があります。(系統運用者のジレンマ→図-93) このため、単純に市場原理だけでうまく「おさまる」(需要と供給が均衡する)のは難しいと思います。

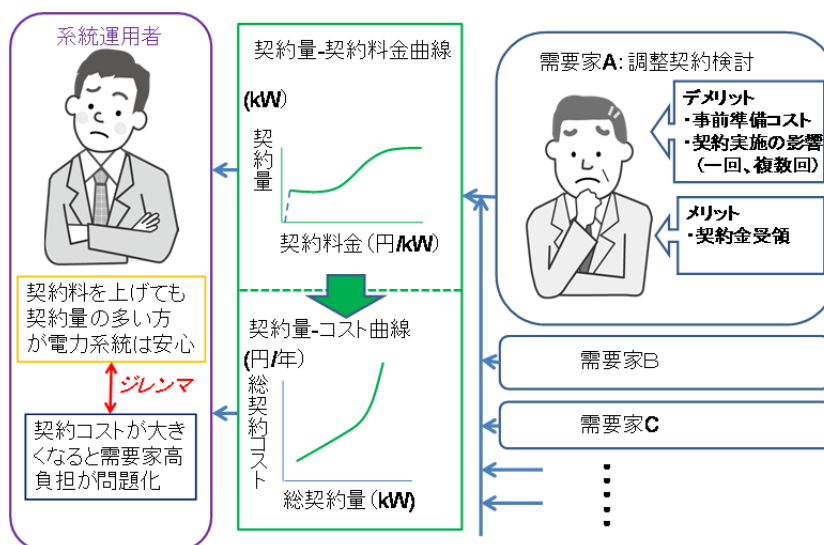


図 93 (随時) 需給調整契約量と契約コストのジレンマ (葛藤)

つけを回される電力系統利用者は、一般的に全需要家ですが、調整契約量をどの程度確保しそのコストを負担するかについて、需要家全員で「その程度ならいいよ」と言う必要があります。これは「国の防衛負担」、(国全体が脅かされる) 緊急事態に備えるコストを(国民全員が負担する)税金でどの程度使うかを国民が決めると似ています。ちなみに、電力系統ではこの様な緊急時に対しどう備えるか、はセキュリティー (Security) の課題と呼ばれますが(第 6 回の流通設備のセキュリティーと同じ考え方)、セキュリティーは安全保障と訳せ、防衛 (National Security) と考え方が通じる面があります。

防衛(設備量と負担費用)レベルは市場原理で決まりませんが、同様に調整契約量も市場原理だけでは決まらないと思います。

今後はスマートメータ(後述)等の活用も考慮し、より多くの需要家を対象に社会全体が参加する随時需給調整契約の仕組みをつくりつつ、必要契約量と負担限度について(防衛費と同様)広く需要家の合意形成ができればと思います。(ただ、日本人は防衛問題を含め安全保障議論を敬遠しがちですが――)

⑤本線・予備線契約

送電系統(日本では 6 万 V 以上)は信頼性として N-1 基準が採用され、通常、送電線 1 回線停止でも送電は継続されます。(第 7,8 回) 送電系統に接続する大規模需要家は、本線・予備線契約すると送電系統の信頼性が活用できますし、系統運用者等から見ると流通設備の点検等が容易になります。(図-94)

このため、本線・予備線契約は比較的安価な契約料金が設定され、推奨されています。一方、需要家の受電 CB (又は開閉器) が 2 台必要となるなどコストが増加するため、契約しない需要家も

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

いますが、できれば本線・予備線契約していただければと思います。

なお、配電系統は、N-1 基準（設備が 1 停止となっても供給継続できるシステム）に必ずしも対応していませんが（ネットワーク方式は除きます：第 9 回参照）、高圧（6 kV）配電系統などでは、電線設備を二重化している場合があり、配電系統点検等の容易化などから高圧需要家等に本線・予備線契約を推奨する場合があります。

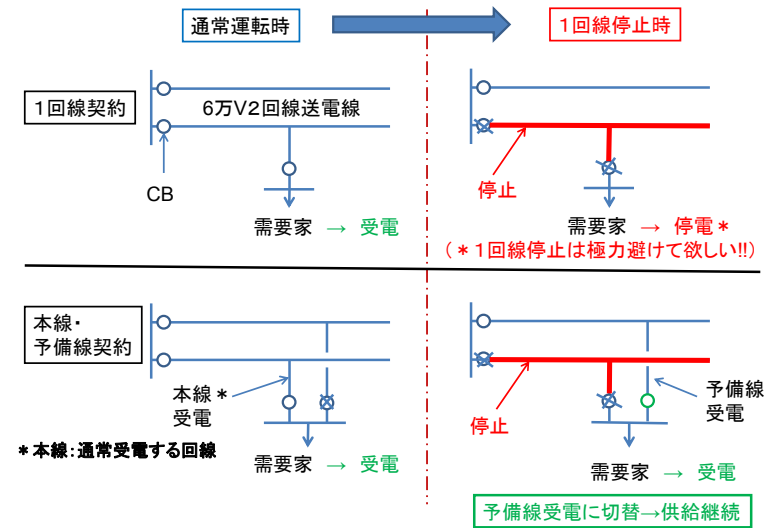


図 94 本線・予備線契約と系統運用例 (→1 回線停止時に受電可能)

⑥力率割引・割り増し

比較的規模の大きい需要家の供給契約では、需要の力率に応じて基本料金（毎月定額支払料金）が割り増し・割引されます。力率が小さいと電力設備に流れる無効電力成分が大きくなるので一般的に好ましくないことを反映した仕組みです。しかしながら、無効電力は 2 種類（進相、遅相）あり、発生要因や発生量はいろいろで、電力系統ではそのバランス維持が重要です（図-95）。このため、この仕組みの妥当性を（そろそろ）検証しても良いと思います。

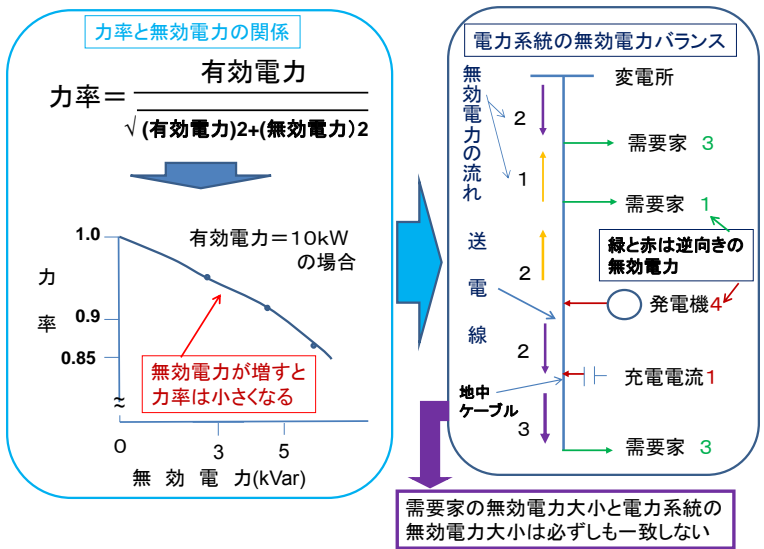


図 95 需要家力率と電力系統の無効電力バランス

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

需要家と電力系統と関連が深い部分を解説しました。他にも種々ありますが電気工事店や専門家（大規模需要家は、電気主任技術者がいます）にお任せするのが無難です。

(余談) 家庭用コンセントはなぜいろいろある

国による家庭用電気コンセントの違いがときたま話題になりますが、基本的に（技術的には全く無関係とも言えませんが）電力系統と無関係に決まっています。海外の電力系統関係者と話しても（特にヨーロッパでの違いが大きいですが）、「理由は良くわからない」との答が返ってきます。

○これからの需要家： スマートメータと需要家設置再生可能エネルギー電源

日本ではスマートメータがこれから全家庭に設置されますし、分散電源の導入も太陽光発電等が更に拡大すると思われます。これに伴い、需要家と電力系統の関係が従来と変わると想定されます。

・スマートメータ

スマートメータは、電気計量業務を効率化することが主要な役割の一つですが、電力系統運用面から見ると、導入に伴い需要家と系統運用者が双方向で電力使用量等の情報のやりとりが可能となるのが大きな変化です。（図-96）需要家が系統運用者から情報を受けても、需要家（人間）が常に（＋すぐに）対応するのは難しいと思います。このため、受けた情報を「上手に扱う機能」が必須ですが、家庭なら HEMS (Home Energy Management System)、商業系は B (Business) EMS、工場は F (Factory) EMS が担うと考えられます。（以下、EMS と総称）

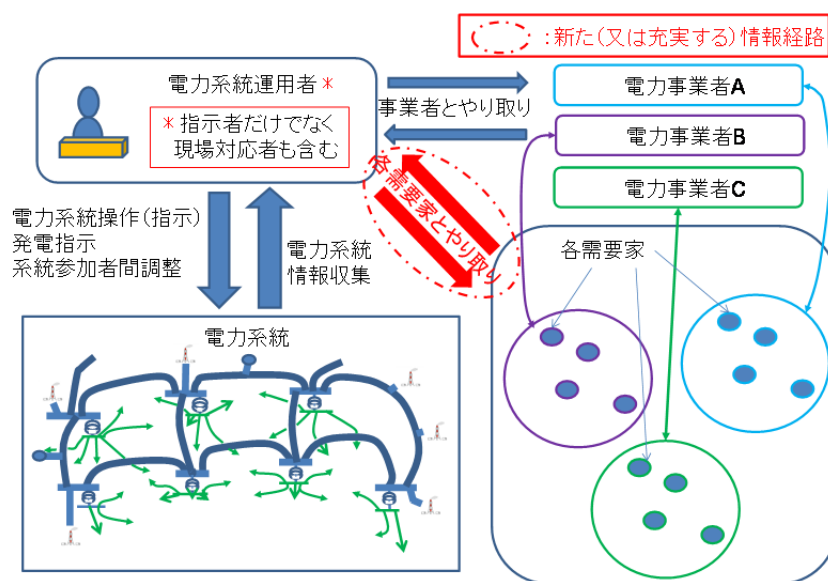


図 96 電力系統運用者と需要家間の情報双方向化イメージ

EMS は既に製品化され今後も進化するでしょう。系統運用者からの情報に「上手に対応する機能」が充実すれば、電力系統セキュリティ向上や電力系統運用効率化が図れると思います。特に、電力分野が 100 % 自由化すると「供給責任を最終的に担う者」はいなくなりますから（系統運用者に努力義務は課せられますが；今後の回で説明）、電力系統につながる需要家も安定供給を維持する役目を分担するのが合理的だと思います。（図-97）この分野は、各方面で種々の研究・開発が進められていますので、関心を持っていただければと思います。

EMS とスマートメータで上手な電力系統運用実現を期待します。

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

なお、特に家庭では、HEMS が発展し分電盤が「家庭の変電所」(変電所の機能は第 8 回参照)になれば面白いでしょう。

—従来は系統運用者(電力会社)が「安定供給維持のため」概ね一方的に実施—

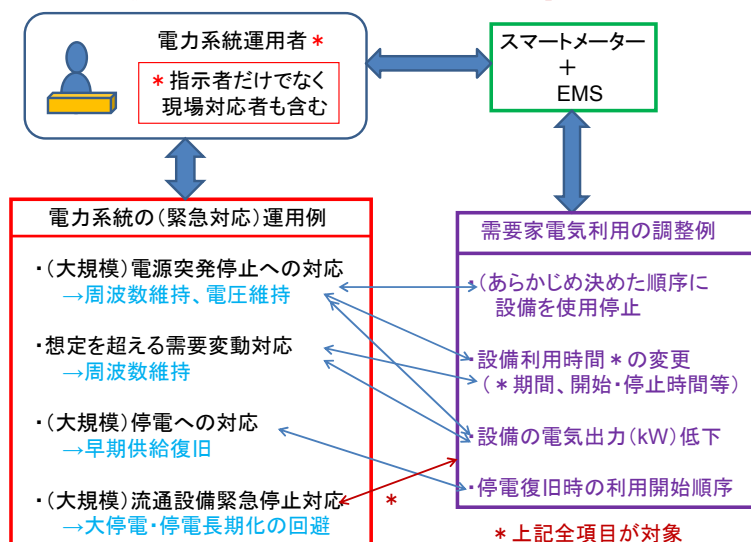


図 97 スマートメータを活用した電力系統（双方向）運用イメージ

（余談）電気使用状況は個人情報！？→スマートメータ情報の取り扱い

電気の使用状況は個人情報とされるようです。系統運用者にとり、需要家個々の電気使用量は本来不要ですが、個々の需要家需要が系統運用者の情報（+電力市場情報等も含む）にどう反応し電力系統へどの程度影響するかが知りたい点です。このニーズをうまく解決できる技術手段が望まれますが、例えば、需要家 EMS が需要中身を明示せず電気利用トータルの反応量（又は推定値）を通知するなどが、個人的には思い浮かびます。

この程度でも個人情報保護面で問題かも知れませんが、個人情報保護と個人情報から得られる社会的メリットのバランス維持が折り合えればと思います。

・需要家の再生可能エネルギー電源

電源は発電するとともに電力系統を維持し、一方、需要家はその恩恵を受け対価を電源に払うのが従来の基本的な電力システムの考え方です。（多数の）需要家にある程度の容量の電源が設置される場合、「電力系統を維持することに貢献」するなら電源と見るのが良いと思います。

この点、出力調整ができない再生可能エネルギーの場合、電源容量が大きくても需要（電気を生み出すマイナス需要）と見るのが良い、が私の整理です。メガソーラーも需要と考えた方が良いでしょう。例えば、太陽光の場合、冬のピーク需要は夕刻ですが電源として機能しませんし。

（図-98）

（なお、この考え方は第 5 回の「修正需要」の項参照）

再生可能エネルギー電源を「マイナス需要」と考えると、需要家へ設置すると、需要の変動が拡大（マイナスからプラスまで変動）することになり、系統運用者にとっては扱いにくさが増すことになります。

これへの対応としては、蓄電池等での貯蔵で変動を減らすことが一案ですが、前述の EMS を活用し修正需要として平坦化するように制御し、それでも電力系統での対応が難しい場合、出力(kW)抑制が合理的だと思います。再生可能エネルギー電源は元来利用率が低いですから（15～30%）程度、

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

一時的に抑制しても発電エネルギー量 (kWh) への影響は小さいと想定されますし、例えば、スマートメータを活用し輪番に抑制する等し、個々の発電設備の抑制量 (kWh) が偏らない様にする工夫ことも考えられます。

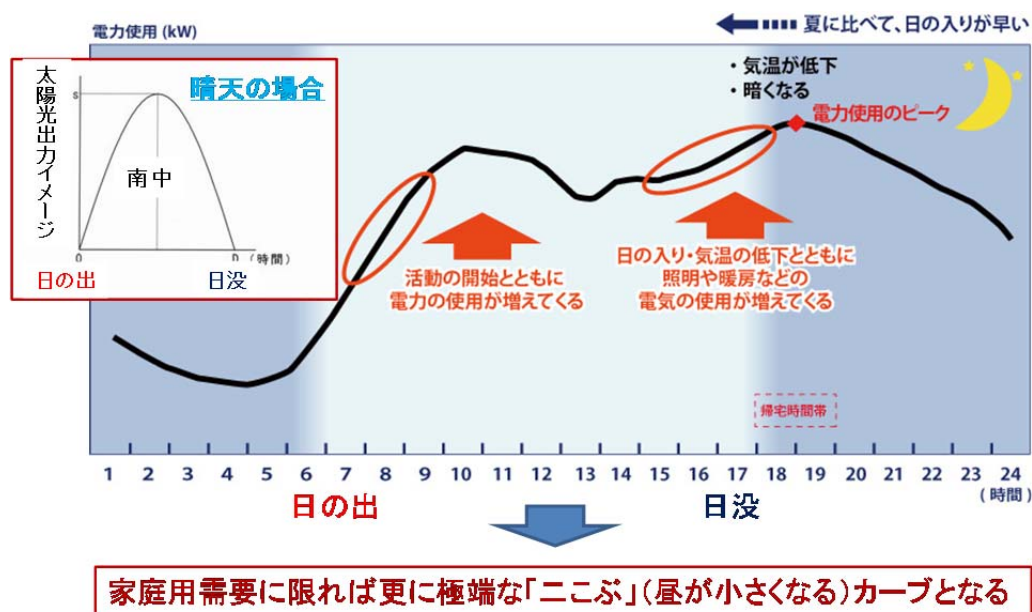


図 98 冬の電力需要変化 (東京電力ホームページから)

なお、電圧維持や無効電力制御も発電設備の重要な系統維持機能ですから、スマートメータと連動しつつ家庭設置電源でも適切な制御を実施されることが必要と思います。これらを含めて発電制御装置、EMS、スマートメータ (系統運用者からの要請) を一元制御する技術開発が望まれます。

(余談) 太陽光発電と (もともとの) 家庭需要は相性が良くないけれど

家庭用需要 (kW) が最大となるのは年間を通じて夕刻ですから、お昼付近に最大出力となる太陽光発電との相性はあまり良く有りません。特に冬の寒い日で雪が降る場合は太陽光発電が全く期待できず最悪です。(最近は、夏冬の最大電力に余り差がありませんから、冬の最大需要対応が課題です) 逆に春・秋のそもそも需要が小さい時に空が綺麗に晴れて出力最大になり発電が多すぎることも有ります。と言う訳で太陽光と家庭需要の間の相性はあまり良くない、と感じます。

ところで、世の中の夫婦を見ると、どう見ても相性はあまり良くなさそうに見えても結構仲良く長続きされている場合がある様に思います。夫婦それぞれ秘訣はあると思いますが (個人的にも知りたいところです)、結局、ここぞと言う時に相手と上手に妥協しているのではと想像します。

今の世の中、太陽光発電の「わがまま」を精一杯聞くのが前提との雰囲気が強い気がしますが、良い関係が長続きするには、「上手な妥協点を探す」のが秘訣だと思います。このため、例えば、太陽光発電が大きすぎる時は出力を抑制すべき (→太陽光発電が少し妥協する) と考える訳です。

次回は、電力系統設備とその運用を壊さないための仕組みを紹介します。

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

【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)

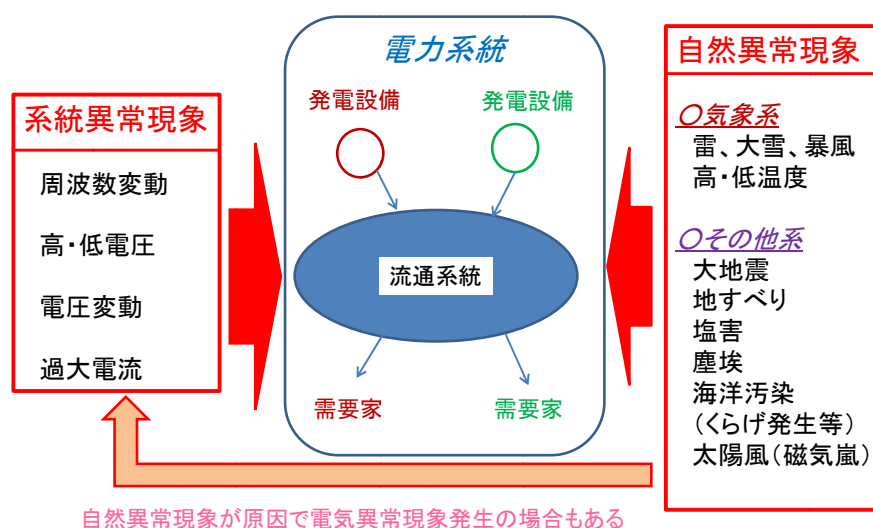


図 11 回-1 電力系統が遭遇する異常現象

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）が合わさる訳です。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。

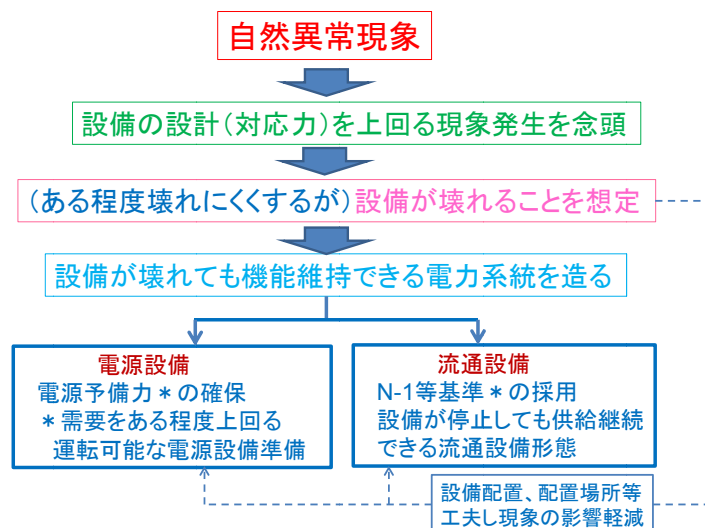


図 11 回-2 電力系統の守り方：

(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。

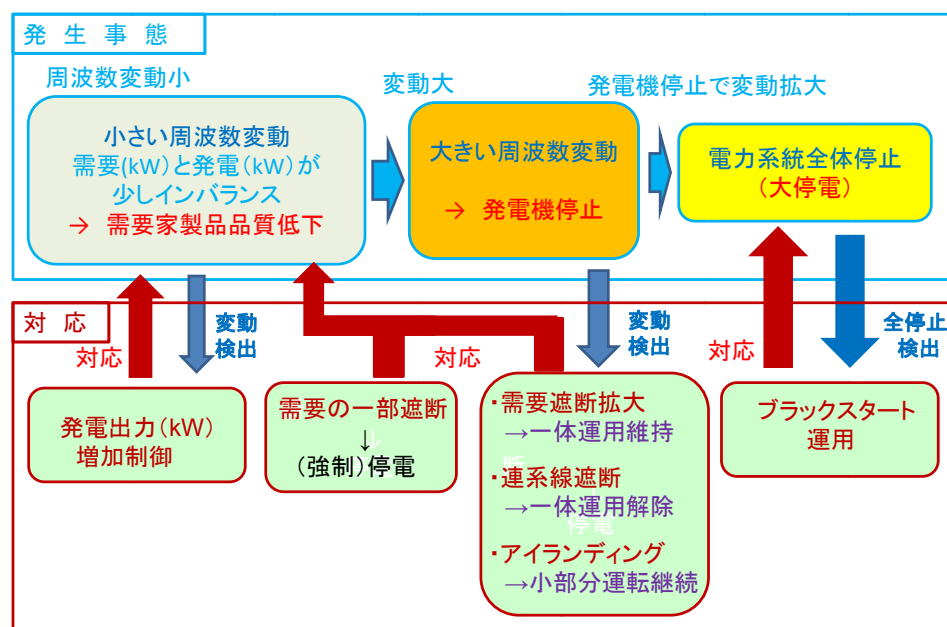


図 11 回-3 周波数変動への対応イメージ (周波数低下対応)

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、たいいてい高度なノウハウが必要になります。(図 11 回-4)

以上の様に、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

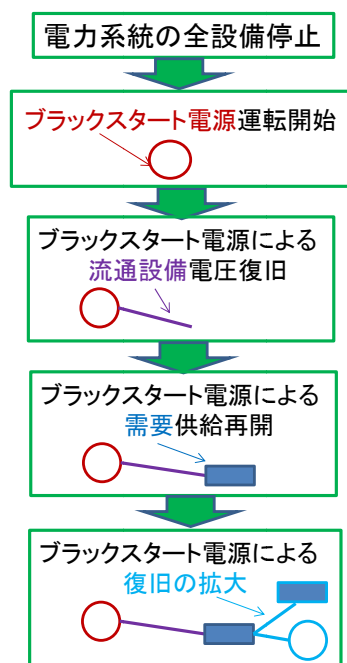


図 11 回-4 ブラックスタート

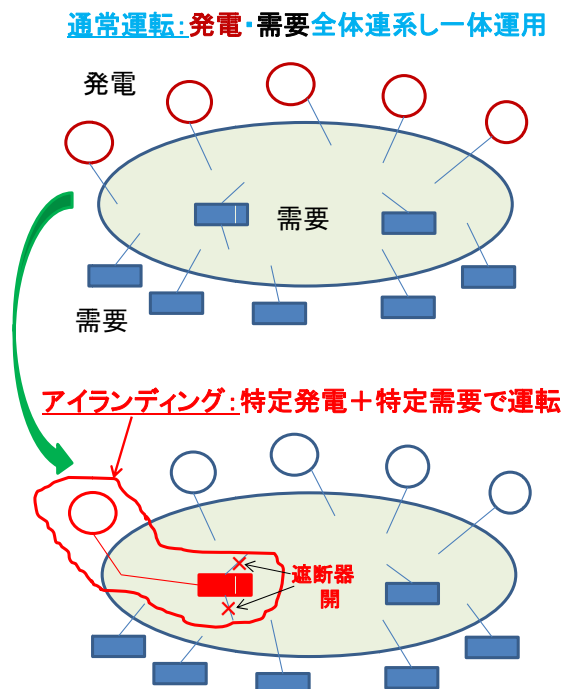


図 11 回-5 アイランディング制御

・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）が流れる場合があります。（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。

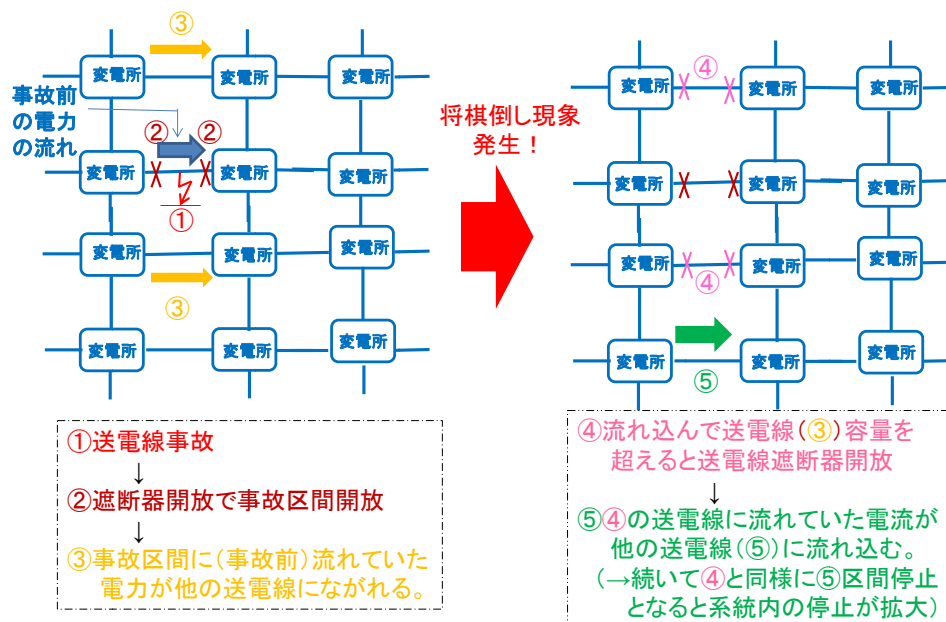


図 11 回-6 電力系統での将棋倒し（CASCADING）現象

・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です）

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）

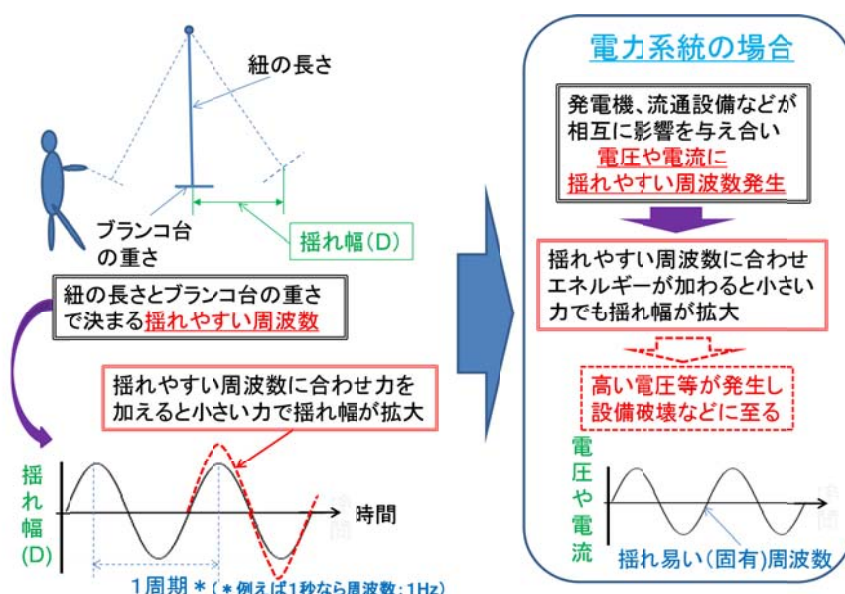


図 11 回-7 共振現象のイメージ

(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し、丁度うまく？重なり有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も大丈夫」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）

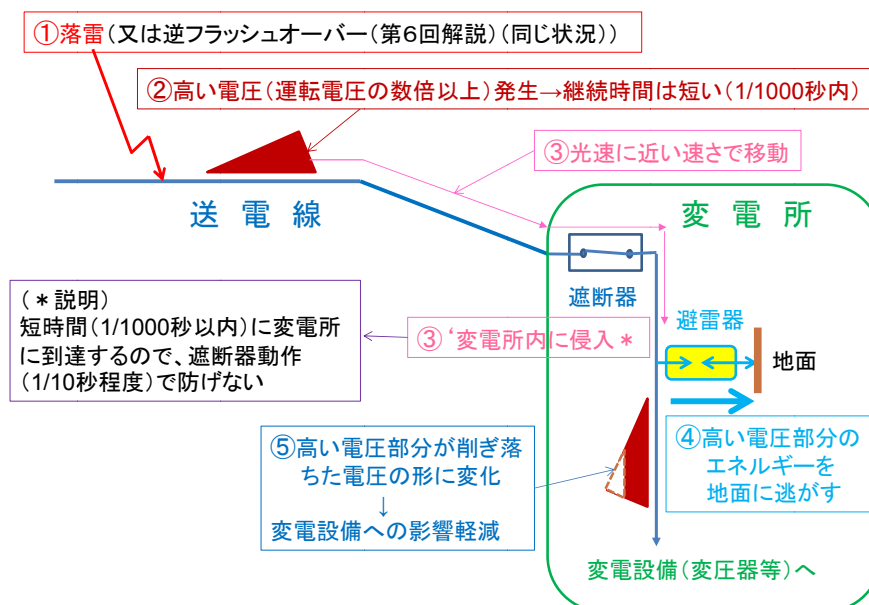


図 11 回-8 避雷器の役割

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です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。

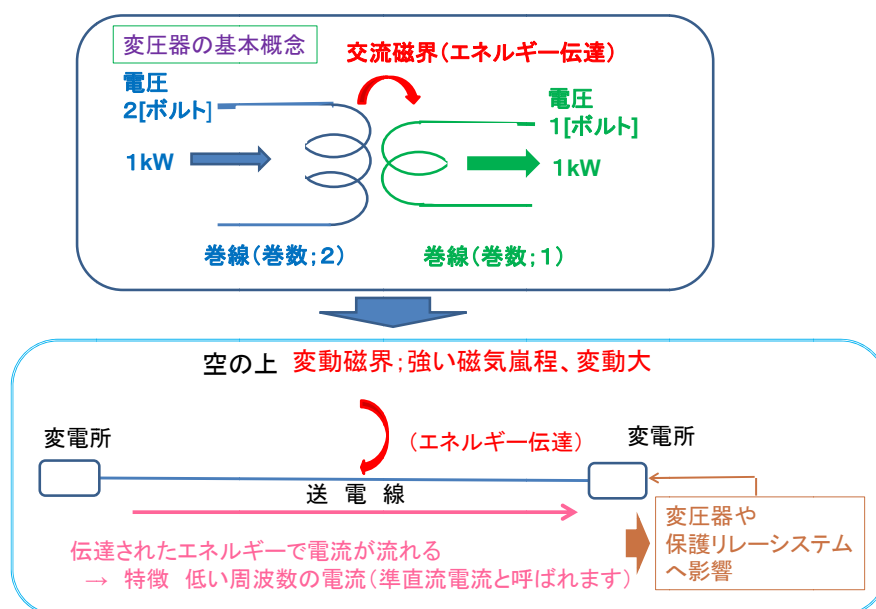


図 11 回-9 磁気嵐のイメージ

次回は、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](#)

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 12 回-最終回)

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、これまで電力系統の特徴、構成する設備、発生・直面するさまざまな様相と対応する考え方や仕組みの概要を 1 年にわたり紹介してきました。

今回、最終回として電力系統全体の俯瞰していただくため、「電力全面自由化と電力系統」、「日本と国際連系」について解説します。今回も従前の解説とやや重複しますがご容赦下さい。

○電力全面自由化と電力系統

・全面自由化のイメージ

国の方針によると 2016 年に全面自由化 (全需要家対象) を予定しています。「全面自由化」では、全ての需要家 (一般家庭も含む) が日本国内の電力事業者を選べます。ただし、電力事業者も需要家を「選ぶ」自由がありますから両者が言わば「交渉・合意」し契約を結びます。これが、市場原理に基づく「自由化の説明」ですが、電力系統では需要家数が膨大なため一々交渉せず、各電力事業者のメニュー (電力商品) を見て需要家が申し込む、その際、電力「商品」が売り切れなら「ご容赦」(お断り) になることもあると思います。(欧米の例)

・電力系統のプールのな特徴と全面自由化

電力系統での発電と需要の関係は (水の) プールから水を出し入れするイメージです (第 2 回)、この際、プールの水面は常に一定に維持する必要があり (周波数維持の必要性)、水の出し入れを時々刻々一致させる必要があります。(kW バランスの維持 (第 1 回)) これを念頭に以下の解説をお読み下さい。

・影響は「騒ぐほどのことは無い」とも言える

さて、需要家 2 軒 (A,B)、供給事業者 (発電設備所有者とします) 2 軒 (X,Y) の単純な電力系統を考えます。(図-99) さて、A は X から供給を受け、B は Y から供給を受けていましたが (図-99-(1))、競争の結果、B も X から受けることとなりました。(図-99-(2)) なお、X はこの際、供給力として Y から電力を買うとします。(この様な取引を卸電力取引と言います)

さて、X と Y の競争で電力系統は何か変わるでしょうか、答えは「何も変わらない」です。なお、不思議に思うかも知れませんが、電力では卸取引をしても電気の流れは電力取引で決まる流れ (Contract Path) と一致しません。

(余談) 自由化しても何も変わらないの!?

前記は極端な例ですが、日本に先んじて全面自由化された欧州の系統運用者と意見交換した際、全面自由化しても系統状況は大して変わらないと述べていたのが印象的でした。前記のとおり需要家が電力事業者を変えても卸電力取引が「活発!」であれば、発電設備の運転状況は大きく変化しないと実感していたためと思われます。ちなみに、Contract path ですが、自由化当初は「契約したとおりに電気が流れないのはおかしい!と真剣に怒っていた方がいたのを思い出します。」「市場の原理」より「物理法則」の方が強い! のです)

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

なお、更に、発電設備の運転が大きく変わって流通設備に悪影響を与えないため、「マストラン (Must-run) 電源*」制度が、通常導入されます。(*電力系統の安定運用維持のため系統運用者が指示した出力を維持し運転する電源を設定すること)

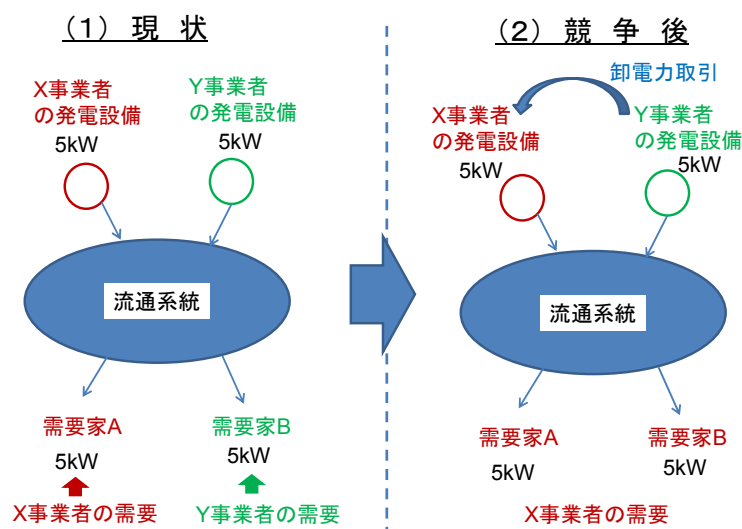


図 99 単純化した電力系統での「競争」例： 事業者間競争

・しかし電源の発電の仕方が多様となり系統運用に影響を与える

実際には、電力系統も新しい電源ができたり、需要が増減したり変化しますから、「何も変わらない」とはなりません。簡単な例で見てみます。(図-100)

前記系統で Z という電源が新規参入しました。ここで読者の方は神様なので「Z 電源は X,Y より燃料費が安い」ことを知っている、とします。(実際は「市場」ですから、「手の内 (電力商品の価格等)」は事業者本人しか分かりません。)

Z 電源は競争力があるので卸電力市場で、X,Y 事業者に半量ずつ供給する場合 (図 100-(1)) と X 事業者との競争に打ち勝った場合 (図 100-(2)) を考えます。両ケース共 Z 電源出力は同じですが、電源 X、Y の出力は異なります。

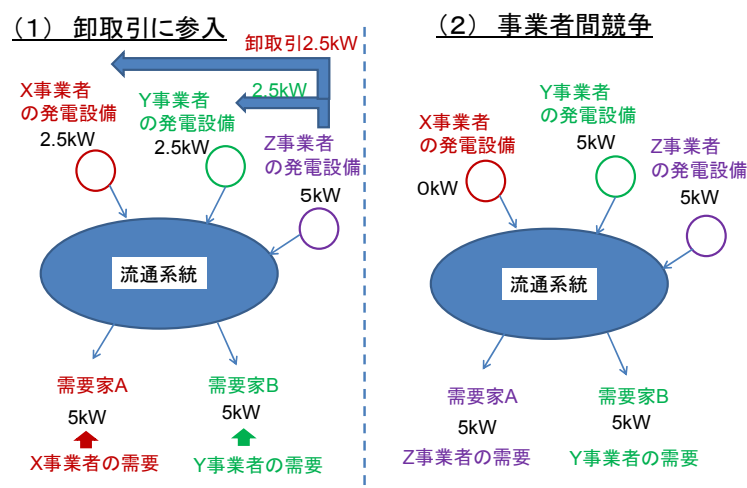


図 100 単純化した電力系統での「競争」： 新規電源参入

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

一方、Z 電源の燃料費が高騰すると、Z 電源の出力ゼロや半量となる場合も有り得ます。これに伴い X、Y 電源の出力が変わります。なお、他の商品と同様、燃料費（＝原料費）が高騰しても（コストダウン努力などでのし）直ぐに販売価格を上げないかも知れませんが、Z 電源出力については、Z 電源事業者の経営判断次第の面が有ると思います。需要が同じでも電源の運転出力の分布（X、Y、Z の割合）が異なると電力系統の（技術的な）様相が変わります。結局、系統運用者は、どの様に電源が運転されるか事前に想定することが難しい中で対応することになります。余りに振れると困るので、前述のマスター電源を設定し出力を系統運用者側にとって好ましい出力に設定させる場合があります。

なお、日本の場合、発電出力計画を 1 年前等から系統運用者に提出するルールとなっていますが、競争に負ければいつでも発電出力は変更されますのでこのルールによって状況が改善する訳では有りません。

なお、気づかれたかも知れませんが、自由化範囲の拡大は、見かけ上「需要家側の変化」ですが、電力系統面から見ると「（範囲の拡大に伴う）電源側の変化（ここでは運転の仕方）」の影響が課題になります。（なお、自由化で需要の形態が変わる！と言われますが、欧米の状況を見ると実感しません。）

・更に流通系統を考慮すると発電の仕方が多様となる

①自由化時の電源運用方式に二種類ありそれが流通系統へ影響する

さて、流通系統（送変電配電系統）を考慮すると、電源 X、Y、Z の「位置」が重要となってきます。X と Z が近傍にあるとします。（図-101） そのまま X と Z がフル発電すると送電線（C）の容量を超えます。ところで、X,Y,Z がフルに発電する（15 kW）と需要（10 kW）を上回り周波数が維持できませんから全てフルで発電することは有りません。

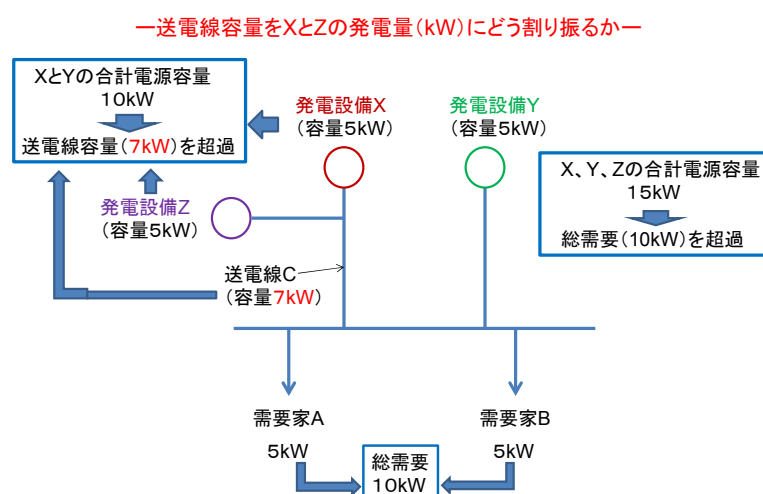


図 101 流通系統が関係する「競争」：送電線容量確保

さて、3 電源の中では Z 電源が強い競争力があると仮定します。Z 電源はフル発電することになり（5 kW）残る X と Y の合計で 5 kW 送電すると需要（10 kW）とバランスします。X が Y より競争力があるとします。すると Z がフル発電ですから、送電容量の限界まで X が発電します（2 kW）。残る分（3 kW）を Y が発電することになります。（図-102）これが「競争力のあるものから発電と

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

送電容量を割り当てていく」やり方で、自由化前の電力会社が基本的に採用していた方式（その際は競争力＝燃料費）ですが、多分、電力会社内の人間も「方式」と言うほど意識していなかったと思います。なお、このやり方を「メリット・オーダー」と言う場合があります。

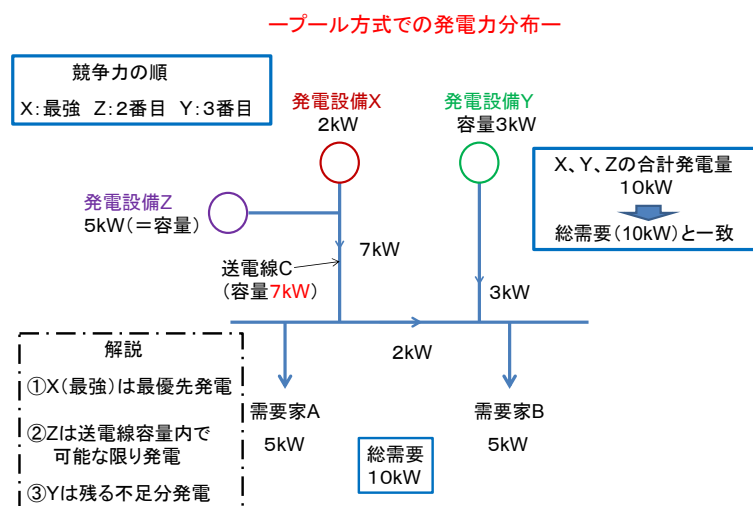


図 102 流通系統が関係する「競争」：送電線容量確保

さて、自由化後は、そもそもの「競争力」が、各事業者の事情により複雑となります。例えば、X 電源は A 需要家が出資している電源で X 電源を運転することが X 事業者から購入する前提とすると、逆に X 電源で発電すれば必ず A に売れることになるので（燃料費に関わらず）競争力が強いとも言えます。

・電源運用決定方式Ⅰ：プール方式

それらも反映し電源運用を自由化前の電力会社が採用していた安価な順に割り当てる方式（プール方式）があります。この場合、先ほど述べた X 電源は、発電費ゼロで系統運用者に申告し、「安い」ことを証明？し発電する権利を得るとともに流通設備の使用権も得ます。なお、実際に X 電源と需要家 (A) が売買する発電単価はゼロ円ではなく別に定められています。（この様な発電と需要の結びつきは CFD (Contract for Difference: 差額契約) とよばれる契約で担保します。）この方式では、X 事業者の電源から需要へ電源を送っているとの考え方ではなく、X 事業者と契約している需要が存在する電源から（実質的に）優先的に発電させると言う考え方です。

・電源運用決定方式Ⅱ：バランシンググループ方式

もうひとつの電源運用の考え方は、発電 X は需要 A に電気を送っている、発電 Y は需要 B に送っている、発電 Z が入ってきて発電 X が送電容量を譲る（＝出力を減らす）と発電 X は需要 A に対し発電力が足らなくなる、新事業者 (Z) あくまでも既存事業者(X,Y)の事業継続を脅かさない範囲で参入すべきである、との考え方です。この場合、Z は 2kW までの電源を設置するのは OK ですが、それ以上の容量の電源を設置したいのなら、送電線を増強すべきとなります。（図-103）この方式は、自由化前の電力会社間の連系統運用に採用されていました。

なお、「発電 X は需要 Y に送っている」との考え方はバランシンググループ方式（昔は TPA (Third Party Access) 方式）と呼ばれます。

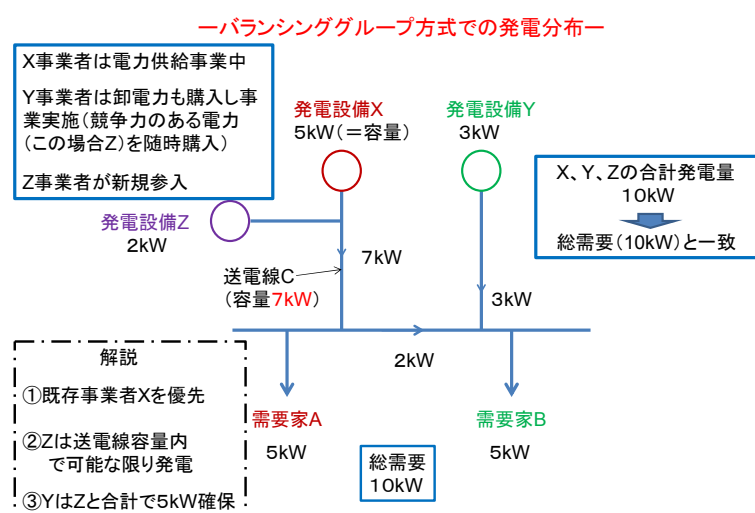
ところで、新規参入者 (Z) が発電できる 2 kW（＝送電容量—使用することが決まっている容量）

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

を空き容量 (Available Transmission Capacity) と呼びます。なお、「使用することが決まっている容量」には非常時に使うための非常時使用容量等が含まれます。(説明は専門的になるため省略)

空き容量の考え方では、例えば、Z 電源の競争力が X 電源より遥かに上回っていても送電線増強までは実質的に参入できないことが問題だと思います。発電容量が 5 kW なら競争力が有っても、2 kW に減らすと競争力が無くなることは十分考えられます。X 電源が退場すれば送電線増強を待たずに 5 kW で参入できるのですが……。日本の自由化制度はバランシンググループの考え方が基本ですが、この様に幾つかの課題がありますから不断に検証すべきだと思います。(なお、種々の代案が提案されていますが、「帯に短し、たすきに長し」の感がありますので、「斬新なアイデア」が出てくればと思います。)



両方式で発電出力の様相が異なることを確認いただければと思います。(図-102 と図-103) この様に自由化に伴う電源運用方式と流通システムの運用は密接にかかわることになります。

(余談) 新陳代謝をどう図るかが難しい

自由化してもプール方式では自由化前に発電事業者と長期契約を結んでいると CFD 契約条項を付加すれば強い「競争力」を得ます。バランシンググループ方式でも自由化前から送電線を利用していた事業者が優先使用权を得ます。(First-Come—First-Served 要は「早い者勝ち」) 結局、既事業者に有利な傾向となります。逆に言えば新規参入事業者には厳しい方式となります。両方式に致命的な欠点はありませんが、既存事業者を優遇し過ぎると、電力産業の新陳代謝を阻み、結局、電力事業全体の老朽化・斜陽化へ進むのが心配です。一方、既存事業者には「しっかり供給面で対応してもらいたい」のも人情？です。

ただし、以前、元気な老人は使い道があると紹介しましたが (第 4 回)、元気があっても老人がいつまでものさばる (=若者が台頭しない) のは問題、なのは確かです。なかなか悩ましいところと感じます。

②混雑 (Congestion) 管理の導入

さて、X、Y 電力事業者が参入している流通系統で設備点検があり送電容量 (14 kW) が半分 (7 kW) に減ったとします。(図-104) さて、この場合、X 電源、Y 電源の出力を減らす必要があります。この場合 X と Y の減らし方が課題となります。(課題①)、次に出力減らすと (この場合合計 3 kW)、

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

発電力合計 (7 kW) が需要 (10 kW) より小さくなります。これには予備発電力 (第 3 回) を起動し対応できますが、例えば、予備発電コストが高い場合発電コストが増えます。この増分を誰が負担するかが問題となります (課題②) この例で、この二つの問題を解決することを混雑管理と呼びます。(実電力系統では相当複雑な例が出てきます) 電車のラッシュアワー時、アルバイトが尻押しして混雑解消に活躍？するのは違います。自由化前、この調整を「電源の持ち替え」と呼んでいましたが (全国共通ではないかも?)、「混雑管理」との呼び変えにはしっくりしないものがありました。

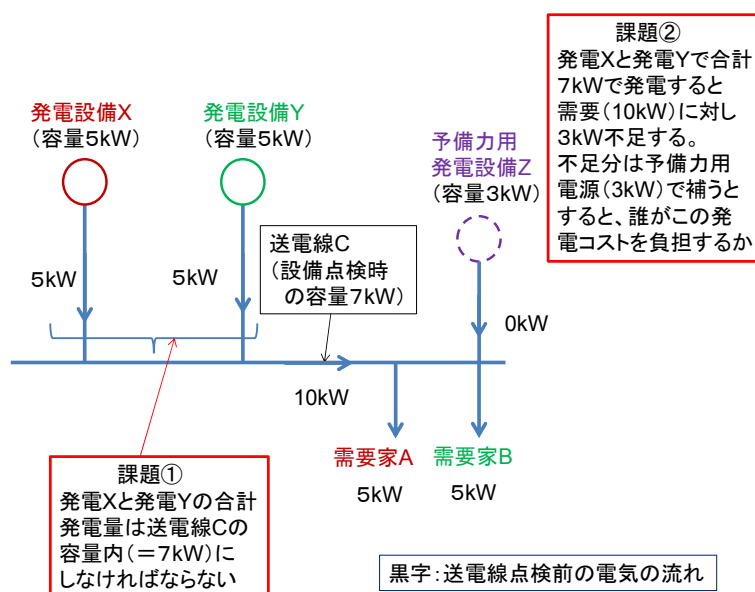


図 104 混雑管理の課題

電力系統の混雑管理は、それぞれの事業者の利害がからむため透明性が重要となり、系統運用者や発電事業者が守るべき電力系統ルールが定められます。(日本の場合、電力系統利用協議会 (ESCJ) が関連ルールを管理しており、27 年 4 月以降、広域的運用推進機関が引き継ぐ) ただし、実電力系統での複雑な状況に対応するため、系統運用者や流通設備管理者へ実務的な負担が増えます。なお、混雑管理関連を詳細に紹介すると 1 冊の本になりますから、ご興味のある方は独自に調査いただき、ここでは課題イメージだけを紹介します。

以上の他にも全面自由化に伴う課題はあり全面自由化への慎重意見は出てくるのですが、全面自由化を否定する論拠にはならないと思います。

○全面自由化と発送分離 (発電部門—流通部門分離) 問題

・「発送分離が電力系統を不安定にする」は間違い

3 つの発送電一体会社 (X、Y、Z) が連系されているとします。(図-105) ここで X と Z が Y との競争に勝ち X と Z から Y 地域の需要家に電力が送られることになったとします。(図-106) Y 地域は実質的に流通部門だけの会社になります。安定供給のために発送一体が必要条件ならば、「Y の流通部門は X 又は Z と会社合併しなければ安定供給できない！」となります。が、技術的には証明できません。ただし「安定供給を維持するには適切な対応を取るのが前提」なのは確かです。

図-105 では、Y 地域は Y の発送一体会社で周波数一定制御していた筈ですが、Y に電源がなくな

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

っても周波数が維持できるように、X や Z で周波数制御する形態に移行すると想定されます。(図-107) すなわち Y 地域以外を含めた一体的な周波数制御が必須と想定されます。(周波数については第 1 回参照) 実際、米国の一部地域では、自由化後、周波数制御地域が見直されました。(PJM 系統)

実際はこの様な状況が一足飛びに移行しませんから、Y と X、Z 間連系線の運用方式変更から進められると思います。ちなみに、この様な状況に応じ円滑に連系線運用方式を見直すのも広域的運用推進機関の役割になると思います。

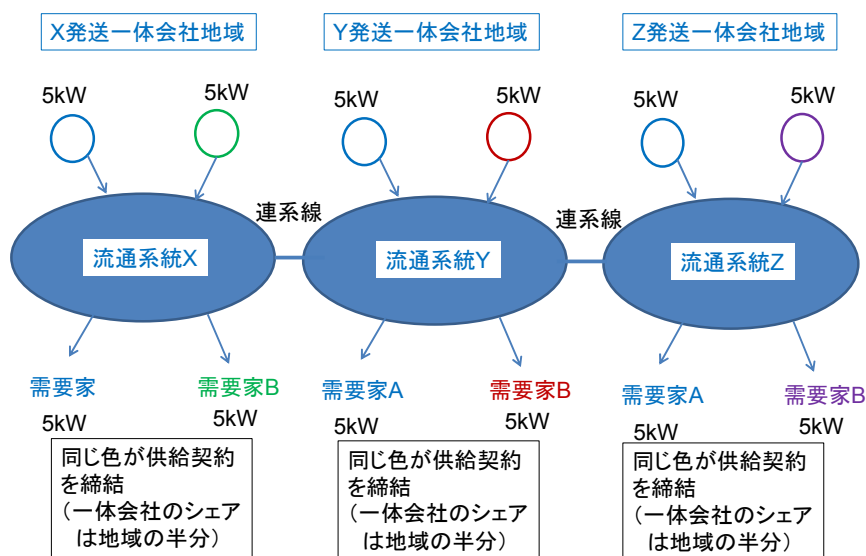


図 105 3つの発送一體會社の連系系統

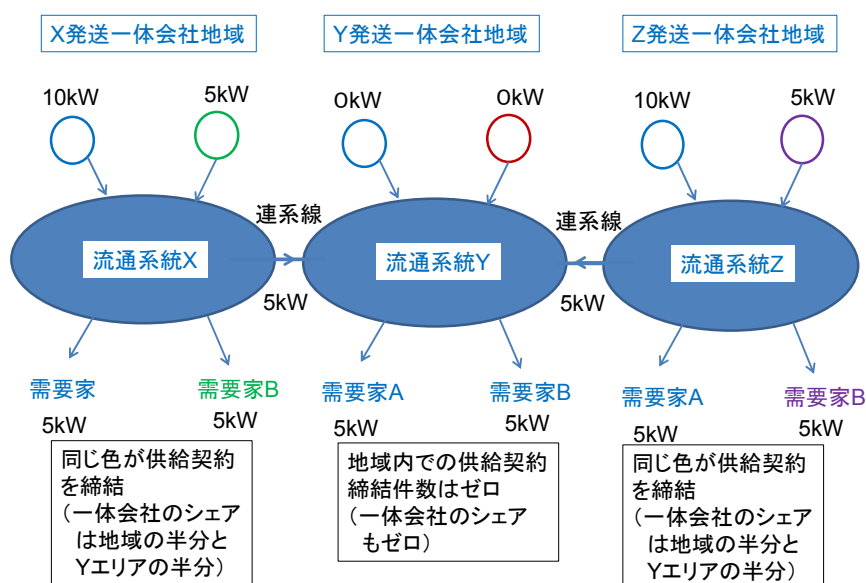


図 106 3つの発送一體會社の連系系統：Y系統発電ゼロ

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

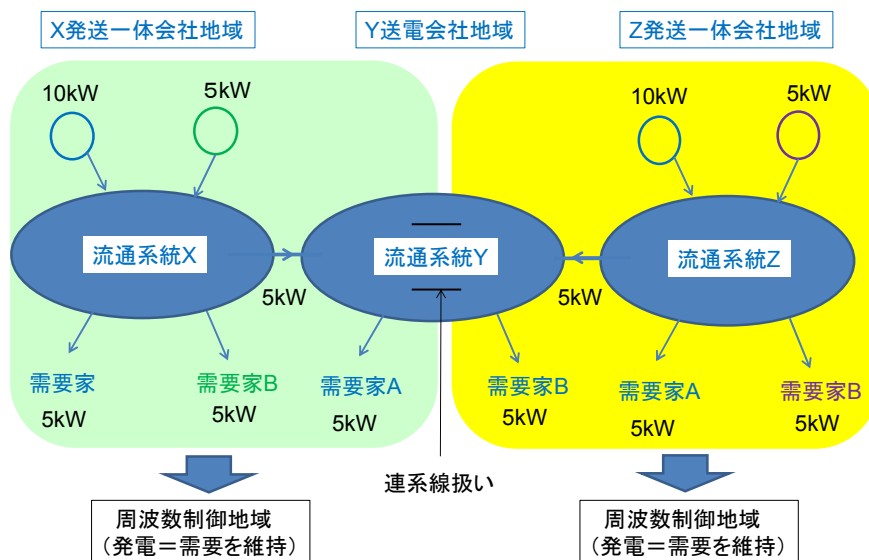


図 107 図 106 系統の周波数運用例：

- 緑色エリア、黄色エリアで周波数を制御（Y 送電会社のエリアと不一致） -

・「発送一体運用がなくなると電力系統が安定運用に懸念」は正しい

さて、最初の単純モデルに戻ります。(図-99(1)) ここで X 事業者は十分利益も出たので事業をやめることにし、発電設備 X は解体し良品部分を海外に輸出すると決定しました、と想定します。この電力系統では、予備力を需要の 30 %有していたとします。これらを全て活用しても需要(10 kW)に対し発電力(8 kW)ですから周波数は維持できませんから、需要抑制が必要です。この様な際、需要抑制を円滑にするためにスマートメータを活用し不便さをできるだけ少なくして対応する、が一つの考え方です。つまり、供給が足りなければ需要を減らせば良いとの市場原理を貫く考え方です。(この主張も「根強い」です)

ところで、「事業をやめる」ことを事前に系統運用者に知らせれば、例えば、Y 事業者が発電機の出力を増大する運転の相談等ができるでしょう。ただし日本の場合、燃料確保の問題がありますからかなり事前の相談が必要です。当然、Y 事業者は「X 事業者が止めると言う重要情報」を相対事前知ることになります。更に、どうしても供給力確保が難しい時は、X の解体を待たせしばらく運転してもらうことも相談事項となると思います。この相談も海外輸出業者との関係、X 事業者の新たな燃料調達などかなり事前に相談する必要があります。

私の「発送一体運用」は、この様に電力事業者は、(需要家に電気を安定的に送るよう努力する責務を持つ) 流通部門とよく整合をとり、電力系統安定供給の一旦を担っていると考えて行動する(発電する)ことを指します。

第3回にカリフォルニアの「発電機インフルエンザ集団感染事件?」を紹介しましたが、これなどは発送一体運用がなされなかった悪例だと思います。電力事業は、全面自由化されても発送一体運用、すなわち、電力事業の公益性を踏まえた相互協力は不可欠と考えます。

これを実現するには、電力系統に関連する各部門、各企業間の適切な情報共有や連携組織の役割が重要だと思います。(広域的運用推進機関がこの役割を積極的に果たすことを期待しています)

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

(余談) 発電一体イメージは東京の地下鉄運用

東京周辺をご存知の方は、郊外から JR や私鉄が都心の地下鉄に乗り入れ、また違う私鉄や JR で郊外に出ていく運用が「見事に」なされているのに気づくと思います。基本的に各鉄道事業に資本関係はありませんし、場合によっては競合関係でもありますが、一体運用のメリット（お客様を目的地に運ぶ利便性など公益性の実現のための協力）を実現していると感じます。

電力系統も、エネルギーを発電設備、流通設備を通して需要家に運ぶのが事業の基本目的ですから、一体運用で合理的に目的が実現されるのが良いと思います。私鉄や JR で問題が起きると地下鉄運用が影響する様に、発電で問題が起きると流通系統へ影響を与えます。どちらも密接な連携が不可欠だと思います。（鉄道と電気では話が違う！と言う方もおられるでしょうが――。）

なお、個人的には、全面自由化より（発電出力が需要と整合しにくい種類の）再生エネルギー大量導入の方が、電力系統技術者にとってチャレンジングな課題と思います。（他の回をご参照下さい）

○日本の国際連系

国際連系とは、国同士が流通設備系統で繋がり電気のやりとりができる状況にすることです。

国際連系の基本原則は以下にまとめられるでしょう。

- ①連系した場合でも、自国の安定運用を優先する
- ②連系に要する建設コスト分担は、連系する部分は半々それ以外の部分は各国で負担する（図-108）
- ③連系で得られるメリットを相手国に請求しない
- ①～③はなかなか超えるのが難しいハードルで、実際は以下の要素が加わることが多いように思います。
- ④政治的判断で連系すると決めたら「つべこべ言わず」連系する
- ④' 政治的判断で連系しないと決めたら「どんなにメリットがあっても」連系しない。

なお、④の場合でも、検討の結果、所要コストが大きすぎるとして中止する（or たなざらしにする）場合もあります。

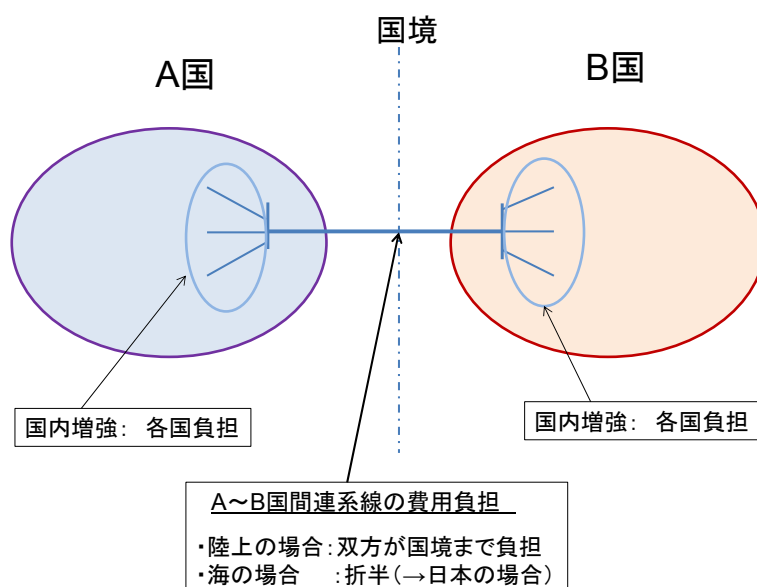


図 108 国際連系線の費用分担イメージ

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

日本の場合、①～③から連系先は韓国ないしロシアが現実的だと思います。中国は海底送電距離が長すぎメリットは得られないでしょう。(北朝鮮、韓国を通して間接的に連系するのが現実的) なお、韓国、ロシアについては、④' が結構障害になる気がしますが、ここでは考えないことにします。以下で国際連係を具体的に考える際の小生なりのポイントを紹介します。

・国民への納得性

連系には数千億円は要しますから経済的な納得性が重要となります。たとえば、CO₂削減に貢献するためとしてもその経済的な評価が必要になるでしょう。

(いろいろな機関で出される「連系構想の提言」はこの評価面の検討が弱い or 甘いと感じます)

・地域住民への納得性

国際連系する場合、日本の電力系統規模(2 億 kW 程度)を考えると、ある程度の大容量(日本では百万 kW(原発 1 基分のイメージ)以上)で連系することになると思います。そうすると連系線以外の国内電力系統増強が必要となる可能性が高くなります。この際、例えば、新送電線が必要となると設置地域の了解が必要です。この場合、国の方針(国際連系)と地域の意思との調和が相当難しい課題と想定されます。(防衛問題(基地)と似た構図)欧州ではこの部分が(国内連系を含め)容易に解決できない課題となっています。日本でも、例えば、ロシアから北海道北端方面で国際連系しても、需要地帯は関東方面でそこまで送電すると考えるとこの問題は相当大変と思われる。

・電気料金(託送料金)への反映

国際連系によって利益を得るのは一般的に需要家(消費者)です。日本では、消費が集中する大都市地域が主に恩恵を受けると思います。一方、国際連系に伴う流通設備増強分の送電料金(託送料金)増は、通常、全国民が負担します。これについて納得を得るのは一仕事でしょうし、場合によっては所要コストの分担の工夫?の議論も想定されます。その際は、広域的運用推進機関が全国的な視点から技術的に評価するのが良いと思います。

全体的に日本の国際連系について否定的なトーンに読めるかも知れませんが、世界では「日常的」に検討されており毛嫌いしなくてもよいと思います。

(余談) ソビエト崩壊と欧州の国際連系

1990 年代初頭に東欧でソビエト支配が崩壊したのに伴い東欧・西欧間電力系統の交流連系実現機運が盛り上がりました。ソビエト時代から直流設備で連系されており、「直流設備増強でも良いのでは?」と思ったのですが、欧州の電力系統技術者によれば「これは政治的な意思だ!」とのことで 1990 年代後半に実現させました。(どの程度メリットがあったのか良く判りませんが)

その頃、個人的に国際大電力システム会議(CIGRE)に関与しており、それらの動きを目の当たりにしたのですが、殆ど「熱に浮かされていた」のが印象的でした。一方、国ではありませんが(日本より大きい)米国テキサス州は、「頑なに」他州との交流系統連系を拒んでいます。(直流連系のみ)

これらは、上記④、④' の具体例だと思います。

以上で 1 年間の連載を終了致します。稚拙な文章で「わかりにくい電力系統のはなし」となったところも多かったと思いますが、電力系統理解に少しでもお役に立てれば幸いです。

お読みいただきましたこと感謝申し上げます。

超電導 Web21 トップページ