

電気の知識を深めようシリーズ -5

電気を送る・配る



一般社団法人 電気学会

電気の知識を深めようシリーズ Vol.5

電気を送る・配る

一般社団法人 電気学会

まえがき

水道水が水道管を通して送られ、都市ガスがガス管を通して送られてくるように、電気は電線を通して送られてきます。では、100km、200km、500km離れたところに発電所があるとして、そこから電線を引いてくるだけで、必要な電気を確実に届けることができるのでしょうか。

実は、そう簡単ではありません。そこにはさまざまな工夫があって、初めて私たちは電気を安心して使うことができますのです。電気を起こし、送って、配って、使う、そのようなシステム全体を電力システムと呼ぶことにしましょう。「電力システムは人類が創造した最大級の複雑システム」という言い方もあります。送って配る部分はあまり目立ちませんが、そこには興味深い技術の工夫がたくさんあります。あなたはそれを知ってみたいと思いませんか。

目次

まえがき	ii
1 電力システム	1
電気を届ける仕組み	1
電気をもつ供給面の特徴とは	3
電気は最高レベルのエネルギー	3
電気の供給上の弱み～2つの泣き所～	4
電力システムの意義・役割とは	6
電力システムの意義	6
コラム：電力システム	
～それは20世紀最大の技術的偉業～	7
電力システムの役割	7
電力システムはどのように機能しているか	9
経済性の追求を目指して	10
信頼性の確保を目指して	11
電力システムがもつ特有の性質とは	12
取引商品としての電気に固有な特質	12
流通する電気に固有の物理的な特異性	13
電力システムの構成の様子	14
電力システムを構成する仲間たち	14
ハードウェア群とソフトウェア群の協調的共存	15
コラム：電力システムは巨大生物～まるでマンモス、 そして人類が創造した最大級の複雑システム～	16
電力システムの規模について調べる	16
地理的に広がった大きな構築物	16

連系グリッドのもつメリットとデメリット	17
日本の連系グリッド	17
周波数の異なる2大地域	19
大規模化に至るまでの小史	19
電力システムの形態について調べる	20
構造は電圧階級による多層構造	20
送電線路と配電線路の役目	21
形状はループ状と放射状に大別	22
形状選定の一般的傾向	23
コラム：私たちの国の配電電圧の昇圧問題	24
2 送電線と配電線	25
3本一組で電気を送る送電線	25
雷よけの架空地線	28
電力線の工夫	29
電気を通さないガイシで	
電力線は支えられている	29
地面の中でも電気は送られている	31
コラム：ガイシの個数で電圧が分かる	33
家庭に電気を配る配電線	34
コラム：柱上変圧器から家庭の単相3線式へ	36
電柱の無い街—どうやって電気は送られている？	38
もっと知りたいあなたに（その1）：	
＜単相交流と3相交流のちがい＞	40
もっと知りたいあなたに（その2）：	
＜送電線周囲の電界と磁界、それによるエネルギーの流れ＞	42

3 電気の配送センター	47
変電所とはどのような所でしょう？	47
変電所の構成と主要な設備	49
屋内の設備	53
変電所の立地と運転	54
変電所の役割	56
【役割その1】変圧機能	56
コラム：変圧器の原理	58
【役割その2】集配機能	58
【役割その3】保護・制御機能	58
電力システムの制御と保護	60
電力システムの保護(保護リレーって何？)	60
電力システムの監視と制御	61
変電所の同族	62
交直変換所と周波数変換所	62
開閉所	63
移動用変電所	63
将来の変電所	64
現状の変電所の問題点	64
変電所の将来に向けた方向性	64
もっと知りたいあなたに (その3) : <母線の役割>	66
もっと知りたいあなたに (その4) :	
<保護リレー技術で世界に貢献>	68
4 電気の性質をうまく使って届ける	73
交流の電気とは	74
交流の電気の発生	74

交流の電気は大きさが変化する	79
交流の電気は波のように変化する	80
発電機が2台のとき一緒に回っているか？	80
同期とは？	80
「同期」の概念をタンデム型の自転車だととる	82
チェーンがゴム紐の場合	82
二人が同じ力で漕ぐと	83
後ろの人が漕ぐのをやめると	85
発電機の場合には？	85
周波数との対応は？	85
漕ぐ力が突然変わったら？	85
上り坂にさしかかると？	86
発電機同士を伝わる力は？	86
ねじれが大きくなると	88
発電機の間働く力	89
発電機同士を伝わる力を大きくするには？	90
四つの方法	90
無効電力の働きとは	92
多数の発電機がつながれている場合は？	92
「同期」の働きと「自己制御性」	93
周波数が違う場合には？	93
直流でつなぐのはどのような場合？	93
雷が落ちると？	94
平穏な一日での電気の伝わり方	94
発電が足りない場合	95
落雷などで送電線が使えなくなる場合	95

電気の回り込み	95
雷が落ちなくても停電はおこる	96
雷が落ちなくても大きな停電は起こりえる	96
欧州での例	96
北米と日本での例	96
その背景には電気の「自己制御性」	97
もっと知りたいあなたに（その5）：＜交流の電力＞	98
もっと知りたいあなたに（その6）： ＜交流の電気は三角関数を使えば分かり やすくなる＞	108
本冊子の企画趣旨について	112
電気の知識を深めようシリーズ 刊行ワーキンググループメンバー	113

電気の知識を深めようシリーズについて

電気の知識を深めてもらうことを目的とした本シリーズには、以下の7つの小冊子が用意されています。併せて読むと「電気」がもっとおもしろくなりますので、是非お読み下さい。

- Vol. 1 電気とは何だろう
- Vol. 2 私たちの身近にある電気
- Vol. 3 電気の基本を考えてみよう
- Vol. 4 電気をつくる
- Vol. 5 電気を送る・配る
- Vol. 6 電気を貯める
- Vol. 7 スマートに安全・確実に電気を使う

1 電力システム

電気を届ける仕組み

電気は現代の人々のまわりのさまざまな分野に広く深く行き渡っています。実際に電気がどこで使われているか見てみましょう。身のまわりで最も近い場所は家庭ですが、図1に示すように、それ以外にも病院、自動車工場、コンビニ、遊園地など、仕事場から遊び場まで数多くの場所で使われています。余りにもたくさんあり過ぎて書ききれないくらいです。

ここで、図1の中央部にある各種の施設の集まりに目を転じ、それらの働きについて簡単に触れておきます。誰もが良く知っているように、電気は発電所でつくられ、送電線や配電線それぞれに変電所を通して私たちに届けられます。また、給電所や制御所と呼ばれる施設は、遠くから通信情報を介して、発電所・変電所・送電線・配電線などの運用管理を行う役目を持っています。そして、図1に示す周辺部と中央部を合わせた全体の集まりが本書で述べる「電力システム」に当たるのです。

また、電気がつくられてから使われるまでの具体的な道のを、私たちの家庭に至る場合について見てみると図2のようになります。つまり、電気は発電所から鉄塔を通り、変電所や電柱にある変圧器で電圧を変えながら私たちの家庭まで届けられることが分かります。

では、本題に入るまえに、このような長い道りを経て運ばれ、いつも私たちに便利に使われている電気の特徴～長所と短所～について、簡単に振り返っておきましょう。

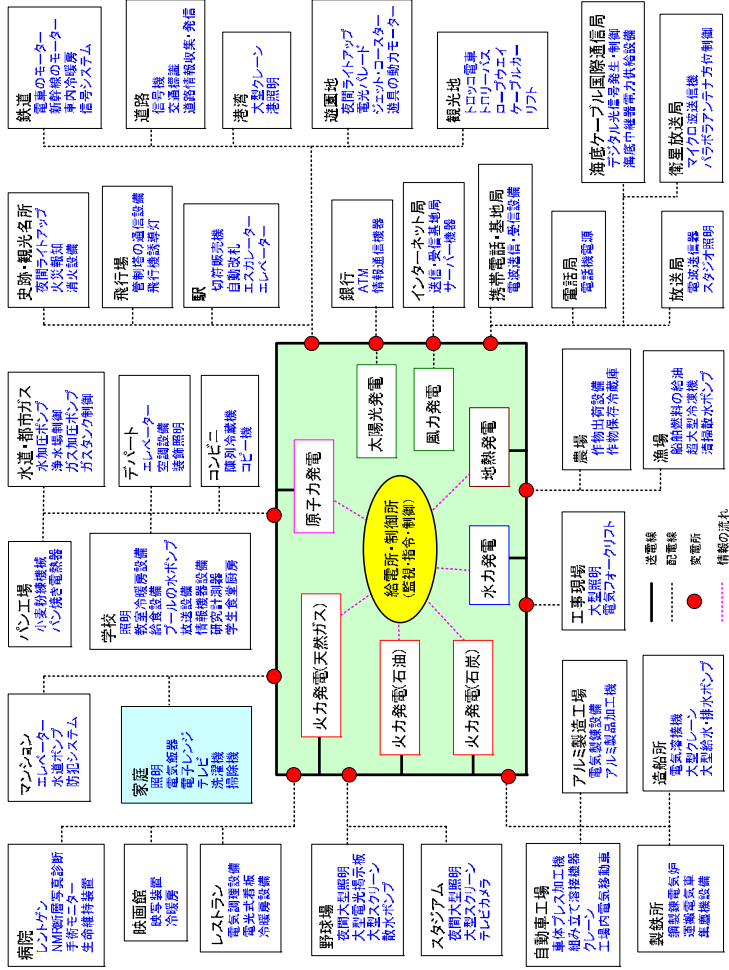


図 1 電気をつくり届け使う

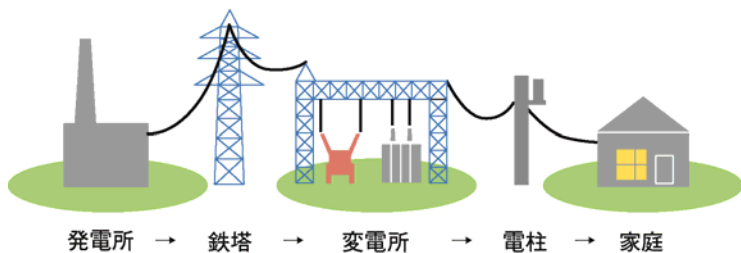


図2 発電所から家庭までの電気の道のり

電気がもつ供給面の特徴とは

電気は最高レベルのエネルギー

電気は用途が極めて多様であることが大きな長所です。つまり、電気は図1に示すようなさまざまな場所でどんな目的にも使える、万能なエネルギーなのです。また、私たち消費者の要求に応じて、欲しいだけの分量が場所・時刻を問わずスイッチひとつで即座に確実に届けられるので、実に便利なエネルギーです。さらに、使う際に周辺の環境を少しも汚さないのも、とてもクリーンなエネルギーなのです。

しかも、電気は眼に見えないものの、使い方を誤らない限りは全く安全です。そのうえ扱い易く、微妙なコントロールも容易なので、精密な作業を正確に成し遂げるには絶対に欠かせません。こうしてみると、電気の質的な価値（エネルギーとしての品質）は限りなく高いと考えられることから、「最高レベルのエネルギー」とみなすことができるでしょう。全エネルギー供給量に占める電気の割合（電力化率）が一国の文明度や先進度を測る物差しにされているのも、こうした背景があるからです。

電気の供給上の弱み ～2つの泣き所～

電気は使用面に関しては、とても貴重で優れたエネルギーです。完璧に近いと言っても構わないでしょう。ところが不幸なことに、電気には「大量貯蔵が困難」という致命的な弱点があります¹。さらに供給面から眺めると、ほかにも幾つかの弱みが見受けられます。以下に、どうしても無視できない電気の供給上の泣き所を2つ挙げておきましょう。

<その1> 決して小さくはない供給コスト

ひとつはガスや石油など他のエネルギーと比べると、必ずしも供給コストが小さくないことです。この理由は、電気のもつ価値の高さを考えれば当然のことですが、そもそも電気をつくるに当たって、原料となる資源が実に贅沢に使われることに大きく起因しているのです。例えば、燃料を原料とする場合、近年の変換技術に目覚ましい進歩が認められるにも関わらず、最新鋭機であっても燃料の6割程度、平均では何と半分未満のエネルギーしか電気に変換することができないのです²。

また、大量の電気を供給する場合には、用地の取得や施設の工事に莫大な資金と時間が費やされます。その際に地域の住民や周辺の自然界に対して、少なからぬ負荷を掛けていることも

¹ この弱点は見方によっては、もし電気を簡単に貯めることができるとしたら、場所を問わずコードレスの電気が自由に使える、といった素晴らしい利点が引出せることを示唆しています。それには数々の先端技術の開発が欠かせませんが、研究者・技術者には、大いに興味深い夢のある課題を提供してくれます。電気を蓄える技術の詳細については Vol. 6「電気を貯める」を参照。

² 熱エネルギーを経由したエネルギー変換には温度で制約される条件（熱力学の第二法則）があり、効率を高めるには温度を上げる必要があります。詳しくは Vol.4「電気をつくる」を参照。

忘れてはなりません。

言い換えるならば、電気は極限にまで凝縮された二次エネルギーであるが故に、それだけ割高な一次エネルギーからの変換コストが避けられないうえ、高めの輸送コストも併せて必要とすることは、至極当然のことになるのです³。

<その2> 秘められた甚大な社会リスク

もうひとつの供給面の欠点は、電気が余りにも有能であるため、それが逆に弱みとなって、自分の代理の役目を果たしてくれる友だちが何処にも居ないことに由来しています。実は、電気は代替性や融通性に乏しい孤独なエネルギーなのです。

従って、もし電気の供給が途絶えるようなことが起これば、一般の商品のような在庫による応急措置が困難であることとも重なって、人々の生活には不便や混乱を招き、社会や産業に対しては経済的な大打撃を与えるでしょう。場合によっては、人命や国家の危機に繋がる事態さえ引き起こしかねません⁴。

こうしてみると、まさに電気は「切れたら大ごと」、すなわち電気は大切なエネルギー源であることが理解されます。裏返

³ ここでの一次エネルギーとは、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料や、原子力・水力・地熱・太陽熱などのように、自然から取られたままの物質や能力を源とするエネルギーのことです。一方、二次エネルギーとは、電気をはじめ、都市ガス、石油製品などのように、一次エネルギーを使いやすい形に変換・加工したエネルギーのことを指しています。

⁴ 電気が掛け替えのないことは、図1に示したような様々な場所で、突然、電気の供給が停止してしまったような場面を想像してみれば直ちに納得できるでしょう。電灯もテレビもつかず、冷蔵庫も働かず、トイレも使えません。パソコンや電話も満足に機能しないので、肝心の緊急情報が入手できません。電車も信号機も止まったまま交通は大混乱に至ります。不便どころか身に危険な状況に陥ってしまうことにもなりかねないのです。

せば、電気の供給が万が一でも停止した途端、思いも寄らない大規模な被害を受けることもあり得ることから、電気には甚大な社会リスクが秘められており、そのリスク回避のために大きな努力が求められていると言えるのです。

電力システムの意義・役割とは

ここからの各項では、電力システムの全体像に関して、さまざまな側面から順次、説明していくことにします。最初に電力システムがもつ意義と役割について大まかに調べておくことにしましょう。

電力システムの意義

電気は一種の商品であり、通常の商品と同じように、方々の生産地から出荷され、ひとつの流通市場に一括して集荷され、そして個々の顧客の要求量に応じて配達・販売され、それぞれの利用に供されます。電力システムとは、直接的であれ間接的であれ、この際に電気の生産地から消費地に至るまでの、さまざまな仕事に携わる一連の要素の有機的な集まり（集合体）を指しています⁵。

現代社会における電力システムは、交通輸送網（道路・鉄道・空路・海路）や資源供給網（ガス配管・上水道）あるいは情報通信網（電話回線・無線通信ネットワーク）などと同じように、生活や産業に不可欠なシステムとなっています。換言すれば、電力システムは私たちの日々の暮らしから見ると、生活の基盤

⁵ この小冊子においては、このうちの流通関連（送配電・変電）の記述が主体であり、発電関連にはほとんど触れていません。発電関連に関する詳細は Vol.4 「電気をつくる」を参照。

を支えるライフラインであり、また社会や国家の視点から眺めると、産業や経済の活動に必須な原動力を提供する公益的インフラである、といった位置づけができることになります。

コラム：電力システム ～それは 20 世紀最大の技術的偉業～

21 世紀が始まって間もなくのことですが、アメリカ工学アカデミー (NAE <http://www.nae.edu/About.aspx>⁶) が行った興味深い調査があります。それは「20 世紀において人類が成し遂げた技術的な業績のなかで最大のものは何か」を問うた会員向けのアンケートでした。その回答の集計結果として最終的に選ばれたのは、何と「電力システム」だったのです。自動車や飛行機でもなく、人工衛星でもなく、またデジタル計算機でもなかったのです。電力システムなくしては、そうした革新的技術も易々とは誕生し得なかったとの判断からでしょう。20 世紀を象徴する堅実な電気の供給技術は、考案した T.エジソンや企業化した S.インサルの時代以来、世界の国々には目覚ましい繁栄を、人々には豊かな暮らしを絶えず産み出してきたのです。

電力システムの役割

電力システムに与えられた役割を一口で述べるならば、各地に所在する専用の製造工場（発電所）で生産された電気という商品を、複数の中継基地ないし配送センター（変電所）を経て、地理的に広がった配送ルート（送配電線路）を通し、何時でもどこでもすべての消費者の要求量に瞬時に応じて、「効率よく」

⁶ 厳密には以下を参照。

<http://books.nap.edu/catalog/10726/a-century-of-innovation-twenty-engineering-achievements-that-transformed-our>

かつ「確実に」届けることにあると言えます。以下、こうした点について、もう少し詳しく調べてみましょう。

<基本的には経済性と信頼性の2つ>

電力システムの役割を前述のような電気の供給上の2つの弱点と関連づけてみると、「効率よく」は「経済性」に、「確実に」は「信頼性」に、それぞれ対応づけられることが分かります。前者は電気が他に比べ供給コストが割高であることに、後者は電気が甚大な社会リスクを秘めていることに、それぞれ強く結びつくからです。つまり、電力システムは「経済性の追究」と「信頼性の確保」という2つの相反する使命をバランスよく両立させることを主柱にした役割を担っているのです。

<「3E」から「3E+S」へ>

こうした「経済性と信頼性のバランス」という理念は、そもそも電力政策における本来の基本原則でしたが、1990年代になると経済性・安定性・環境性を意味する「3E」で表される3つの要件も併せて求められるようになりました。さらに、2011年の3.11惨事以降になると図3に示すように「3E+S」と称して、「S」つまり安全安心の要件が加わえられたという経緯があります。

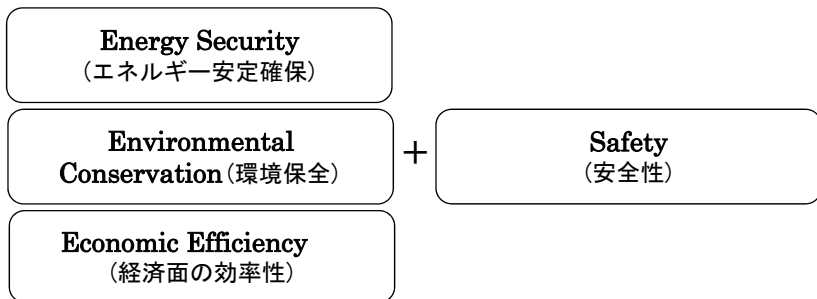


図3 電力政策の新視点「3E+S」

電力システムはどのように機能しているか

ここでは、「経済性の追求と信頼性の確保」⁷といった本来の使命を柔軟に達成するため、電力システムがどのように機能しているかについて、大まかに把握しておくことにします。

最初に触れておきたいことは、電力システムは極めて多くのさまざまな設備や装置を巧みに駆使しながら機能していることです。この際、発電所や変電所、それに送電線路や配電線路といった施設たちが主役となって見事な団結力を発揮し、華々しい活躍をしている様子が明白に見て取れます。しかしながら実のところ、これ以外にも数えきれないほどの高度で繊細な制御装置や情報機器、それに全体を円滑にまとめ上げる仕組み、知見、ルールなどが、表立って姿を見せることなく、主役たちの密接な結びつきを懸命に支えているのです。

もうひとつ、電力システムは課せられた任務を手際よく果たすために、入り組んだ多数の仕事を分業制にして処理しています。このため、電力システムには全系を絶えず監視しつつ指令を発するセンター機関（中央給電指令所：中給、図4を参照）がトップに位置しています。中給は人間で言えば頭脳にあたります。そして中給のほかにも、主要な地区には管轄区内の発電所や変電所などの施設を、もっと身近な場から監視・指令・制御・操作する多くの運用管理担当の拠点が配置されています。

こうした拠点にはさまざまな種類や役割があり、しかも呼称

⁷ ここに、以下のことを補足しておきます。一般の商品に求められるさまざまな要件は、原則的に「価格」と「品質」の2つに大別されますが、これを電気の場合に当てはめると、「経済性」が「価格」に対応することは当然なのですが、「信頼性」すなわち供給停止（停電）を防ぐことは「品質」の一部としてみなすことができます。

もまちまちですが、概して給電所、制御所などと呼ばれていません（図 1 を参照）。中給と地区に所在する拠点との間には、運用状況の情報連絡が密接に行われ、電力システムとしての全体機能に絶えず協調性が保たれるようになっています。



図 4 中央給電指令所の様子
（画像提供：東京電力株式会社）

経済性の追究を目指して

電力システムには、可能な限り電気の価格を低く抑える役目があります。このため、中給では翌日の需要予測に基づき、当日の最も安価な運用手順を組み上げ、それに合わせるために、全系の需給状態を集中的に監視しつつ、遙か遠方から運転指令を発信しているのです。つまり、時々刻々変動する消費量（需要）の総量を把握し、それに応じて各地の発電所の生産量（供給）が経済的に分配されるように、常に発電機の出力を遠隔調整しているのです。こうした機能を「経済運用」と呼んでいます⁸。

なお、この経済運用の働きを助けるために、需給のアンバランス量に含まれる大小の変動分を絶えず補正する機能が備えられています。このアンバランス量の補正は幾つかの担当の発

⁸ 具体的には、発電コストの小さい原子力や石炭などを原料とする電気は極力、長時間にわたって生産し、揚水発電（Vol.4 参照）や石油火力など発電コストの高い電気は真昼のピーク時に短時間だけ生産するようにしています。

電所（発電機）に任されていますが、そこでは小さな変動分ならば、自らの判断によって自動的に制御され、大きな変動分については、中給からの指示により調整される仕組みが採られています。

信頼性の確保を目指して

上記のような働きとともに、電力システムは常に信頼性の高い供給にも努めています。具体的には、思いがけないトラブルによって引き起こされる停電の発生や影響を可能な限り抑える努力がなされています。このような異常時対応のための機能は「信頼度管理（信頼度制御）」と呼ばれており、①停電の発生を減らす、②停電の拡大を防ぐ、③停電の復旧を早める、という3つの面から、それぞれの目的が果たされています⁹。

具体的には、①落雷などにより自動的に切り離された線路を感知できないほど瞬時に元に戻して電気を流し、人々に気付かれるような停電の発生を抑える¹⁰（停電回数の低減）、②全系の電気の流れを常時監視し、どこかにトラブルが起こって連鎖的波及の恐れが予測される場合には、事前に余裕ある流し方に変更しておく（停電規模の抑制）、③それでも実際に停電が生じた場合は、いち早く異常事態の全貌を検知して、指定シーケンス¹¹に従った手早い復旧を図っていく（停電時間の短縮）、といった制御や操作が行われます。

⁹ 停電の影響を測るうえでの「回数」「規模」「時間」の3つの尺度のことを、一般に「停電の3要素」と呼んでいます。

¹⁰ 切り離すのに0.1秒程度以下、元に戻すのに1秒程度以下の時間をかけます。これを高速度再開路と言います。

¹¹ あらかじめ定められた順序や手続きに従って、制御や操作の各ステップを逐次進めていくといった仕組みのことを指します。

電力システムがもつ特有の性質とは

電力システムには一般の商品の取引市場には決して見当たらない特殊な性質が幾つかあります。この節では、電力システムに特有の性質に関して、取引商品としての電気に固有な性質（経済面）と流通する電気に潜む物理的な特異性（技術面）の2つの側面から、重要な点を概観しておきましょう。

取引商品としての電気に固有な特質

あらゆる商品に共通することですが、ひとつの流通市場においては常に変動する多数の需要と供給が広く混在し、しかもどこであれ何時であれ、両者が一致することはまずありません。つまり、空間のおよび時間的ギャップが必ず存在しますが、通常、空間的ギャップは輸送によって、時間的ギャップは貯蔵によってそれぞれ対処されます。

さて、電気の取引に携わる電力システムの場合ですが、どのように遠方であれ電気は極めて迅速に届けることが可能なことから、輸送の能力に関しては一般の商品と比べ格段に優れていることは確かです。その一方で貯蔵の能力となると、そもそも電気の致命的な弱点であり、電力貯蔵（蓄電）技術の現状レベルも十分ではないこともあって、著しく不得手であると言えます。

従って電気の取引においては、一般の商品の流通市場における在庫の働き（倉庫）を簡易な形で整備することは不可能です。このため、当初から貯蔵には深く関知することなく、もっぱら輸送の優位性を最大限に発揮させる、つまり、絶えず消費者のニーズに応じた分量だけを時々刻々生産し素早く配送すると

いった取引の仕方に徹するとの原則¹²が採られているのです。

流通する電気に固有の物理的な特異性

電力システムに特有の性質を理解するには、そこを行き交う電気の正体を知ることも重要です。電気に秘められたさまざまな物理的な特異性が、普通の商品取引には全く見掛けない奇妙な様相を、電気の流通に生み出しているからです。ここでは、代表的な特異事象を例示するに留めておきましょう。

最初に、電気の基本的な物理的特性を幾つか挙げてみます。さて、電力システムにおいては、広大な場所で巨額な電気という商品の取引が一瞬も途絶えることなく、しかも極めて迅速に行われています。しかしながら、そもそも商品自体が目に見えないことから、折角の市場の活気ある雰囲気が一向に感じ取れない点が固有な特性として挙げられます。現代社会では、電気は空気のようなもので、無くならないとその有難さが分からないと言ってもよいのかもしれませんが。

次いで、電気には一般の商品に共通して付随する「種類」という属性がないことです。この点は水道水に似ています。その結果、すべての生産地から送られる電気が瞬時に混ざり合い完全に均一になってしまうため、生産地が複数ある際には、個々の電気の生産先を特定する（区別する）ことができません。

このほか、やや専門的ですが、電力システムを流れる電気には電車や自動車のように自力で動ける能力がないこと¹³、発電

¹² この原則は、電力自由化市場における「同時同量のルール」、すなわち取引しあう消費者と発電所の間、絶えず変動する需要に見合うだけの発電量を調整して届ける、とのルールにつながります。

¹³ 電気の流れもガスや水道水と同じように、一種の圧力差によって生じると考えられます。

所から需要家へ配送できる限度は配送経路の容量だけでなく距離にも支配されること、外乱などで不具合が生じて、軽微なら自然に回復する力を備えていることなども指摘することができます¹⁴。

電力システムの構成の様子

ここでは、電力システムを構成する、多数の主役たちとさまざまな脇役たちとの係わりの様子について説明しておきましょう。

電力システムを構成する仲間たち

一般の電力システムは図 5 示すように、互いに結ばれた大勢の仲間から成り立っています。電力システムの構成要素のうちで主要な設備だけでも極めて多種多様なものがありますが、そ

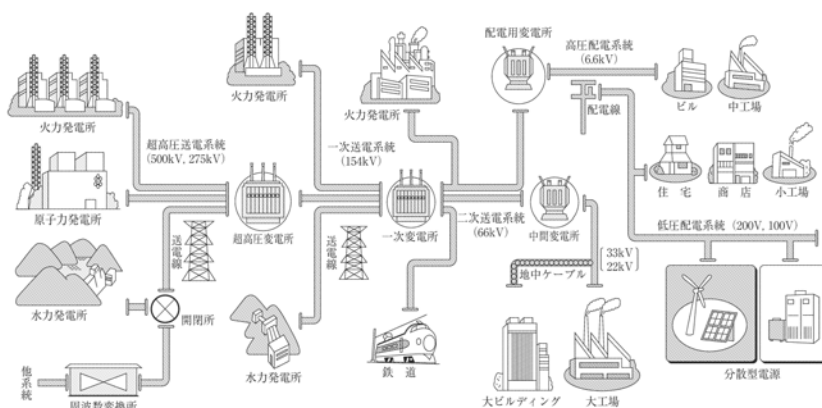


図 5 電力システムの構成

(出典: 高橋一弘 「エネルギーシステム工学概論」電気学会 2007)

¹⁴ 電気が流れる際に現れるもっと詳しい物理的な事柄については、4章「電気の性質をうまく使って届ける」(p.73)を参照。

れらは生産関連の施設（発電所）に属するものと、流通関連の施設（変電所・電線路）に属するものに大別されます¹⁵。

強調しておきたいことは、これらの施設に属する多くの設備や装置は自動化されていることです。流通関連の施設についても当然のこと、ほとんどは自動化済みであり、その日常の運転も大抵は無人化されています。定期的な点検・保守などの期間を除き、普段こうした施設で大勢の人影を見ることは滅多にありません。

ハードウェア群とソフトウェア群の協調的共存

電力システムには本来の役割に撤するたくさんの施設のほか、機器や装置も数多く組み込まれています。これらハード関連の仲間たちに加え、もっぱら情報処理の仕事を受けもつさまざまなセンサーや計測系、通信ネットワーク、それに知能的な仕事を担う業務用・制御用コンピューターや情報通信装置など大勢のソフト関連の仲間たちも一体となって働いています。

つまり外見上では、電力システムは頑健なハード群の大きなかたまりのように映るのですが、実際には繊細なソフト群も多種多数が裏舞台で仲良く力を合せ働いているのです。そうした巧みなコラボ（協同作業）の存在も決して見落としてはなりません。

¹⁵ 変電所については3章「電気の配送センター」（p.47）を、電線路については2章「送電線と配電線」（p.25）を参照。

コラム：電力システムは巨大生物 ～まるでマンモス、そして人類が創造した最大級の複雑システム～

電力システムは人類が創造した最大級の複雑システムです。極めて多数のハードウェアとソフトウェアが融合し合い、協調性に富む有機的な仕掛けが取り込まれています。生き物として見れば、ハード群は手足の骨格や筋肉に、ソフト群は手足の動きを司る頭脳や神経に、それぞれ相当していると考えられます。

電力システムが複雑な人工の構造物であるとは言え、まるで生き物のごとく振舞うため、巨大生物マンモスに例えられることがあります。その背景には両者に共通するキーワードとして、行動や成長といった動物学の術語のほか、巨大性・融合性・自律性などの用語も挙げられるからでしょう。

電力システムの規模について調べる

ここでは、現実の電力システムの規模に関する事項について調べてみます。また、特に私たちの国の電力システムを取り上げ、地理的・歴史的な側面からも眺めておきましょう。

地理的に広がった大きな構築物

実際の電力システムは広大な区域にわたる極めて大きな規模の構築物です。しかも、単一でもすでに十分に大きい地理的な広がりを用意していますが、隣接する電力システムが幾つかある場合には、通常は互いに結ばれているので、一段と大きな規模が形成されています。このように連結された組織体は、一般

に「連系¹⁶グリッド¹⁷ (パワープール)」と呼ばれます。

連系グリッドのもつメリットとデメリット

多数の電力システムを、相互に連系することによって得られる基本的なメリットとは、電気という商品を、常時・異常時を問わず、容易に融通し合えるようになるため、より安い電気を、より確実に消費者の手元に届けられることです¹⁸。つまり、経済面と信頼面で互いにメリットがある関係が成立することです。

半面、連系によるデメリットも避けられません。その代表的なものとしては、一部に起こったトラブルが些細なものであっても、それが次々に相手の電力システムに波及して、広域に及ぶ大停電を引き起こすといった危険性をはらむことです。

日本の連系グリッド

私たちの国では、現在、それぞれの電力会社が自社の電力システムを所有していますが、ほとんどは 図 6 のように相互に結ばれ、全国規模（本土・北海道・四国・九州の四島）の連系グリッドを形成しています。こうした電力システムの連結の様子は、鉄道や道路の場合と同じように、全国の施設が一体的に結ばれ、ひとつの広域的な集合体になって運営されていることに似ています。

16 電力システム同士を電氣的につなぐことを「連系」と言います。系統をつなぐので、「携」ではなく「系」を使います。

17 グリッドとは、電力網、送電網を表す用語です。ですから連系グリッドとは、複数の電力網が連系されている状態を示す言葉です。

18 具体例として、安価な余剰の電気があれば互いに譲り合える、ピーク時や渇水時のトラブルに備えた予備設備の容量が節減される、停電時などに供給力不足が生じても緊急の応援が期待される、などのほか、より大容量の電源を共同で導入できる、需給アンバランスによる周波数の乱れが抑制される、といった利点も挙げられます。

●全国基幹連系系統(2014年7月末現在)

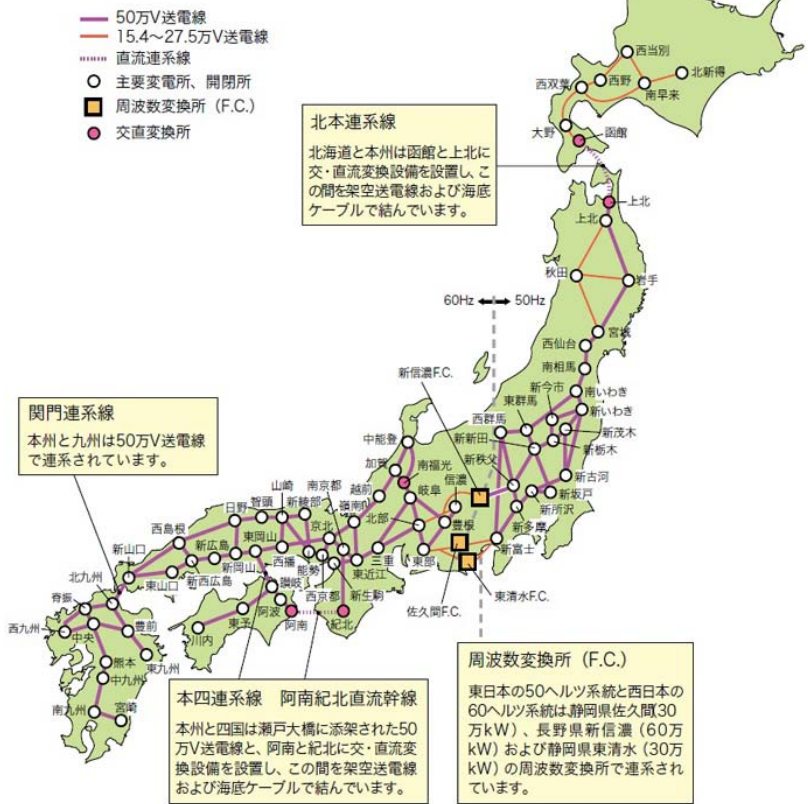


図6 日本の電力システム(連系グリッド)
 (出典: 電気事業連合会「INFO BASE2015」)

周波数の異なる 2 大地域

私たちの国の電力システムには、地理的にみて極めて特異な点があります。それは図 6 のように、全土四島を結ぶ連系グリッドが、50Hz（ヘルツ）と 60Hz の 2 大地域に分かれていることです。このような異なる周波数の連系グリッドをもつ先進国は日本のほかにありません¹⁹。

両者の間には通路（周波数変換所 p.62 を参照）が図 6 に示す通り 3 ケ所だけ存在しています。しかし、現在の両地域間の融通可能量は、合計しても大型の原子力発電機 1 基分に当たる 120 万 kW（キロワット）であり、容量的には極めて狭い関所となっています。そのため将来の本格的な電力自由化に備え、2020 年代には 2.5 倍の 300 万 kW に拡大する方針が打ち出されています。

大規模化に至るまでの小史

現在の電気事業の元となる体制が誕生したのは 1951 年のことでした。発足当時の 9 つの電力会社²⁰からなる電気事業は、大戦後の早期復興支援を皮切りに、以来一貫して人々の生活の向上や産業の発展に寄与してきました。こうした戦後以来の急

¹⁹ 一定の周波数をもつ電力システムの発電機（同期機）は全て仲良く同じ回転数で動いています。しかし、周波数が少しでも異なる電力システムどうしは本質的に不仲であり、両者を直接つなぐことは絶対に許されません。つないだ途端、個々の発電機の回転が狂い出し直ちに発電が止まり、一瞬にして全系が停電状態に陥ってしまうからです。また、商用周波数の全国統一は、確かに合理的な事業のように見え、技術的にも決して不可能ではないのですが、敢えて実施したとしても、期待されるほどのコストパフォーマンス（費用対効果）の得られないことが専門家の研究調査によって明らかにされています。

²⁰ 電力再編成に伴い、9 社（北海道、東北、東京、北陸、中部、関西、中国、四国、九州）に区分されました。

激な経済成長の歴史のなかで、特記すべき事項をいくつか挙げておきます。

まず、誕生から現在に至るまでの 60 年余りで、電力システムの規模（電気事業の販売電力量）は約 30 倍に伸びたことです。ちなみに、この間の人口増加は約 1.5 倍に過ぎません。特に大規模化が目覚ましく進展した期間は、日本の高度経済成長の発端となる神武景気が始まった 1955 年ごろから、バブル経済が崩壊した 1990 年ごろまでです。

また、現在の電気事業の元となる体制が発足した当時では、未だ個々の電力会社の電力システムは常時は連系運用されることなく、それぞれの供給区域を自らの施設で担っていました。その後、事業規模が拡大するに従って、1950 年代の中ごろから隣接する電力システムどうしが順々に連系し合うようになりました。

そして、50Hz 系統と 60Hz 系統が初めて結ばれたのは、静岡県浜松市にある佐久間周波数変換所（図 6 を参照）の運転開始によるものであり、それは 1965 年の出来事でした。さらに時が経ち 1979 年になって、北海道と本州が直流の海底ケーブルを通して連結され、ここによりやく全国連系が完成するに至ったのです。

電力システムの形態について調べる

ここでは電力システムの形態に係わる事項として、その構造と形状の 2 つの観点から調べてみることにしましょう。

構造は電圧階級による多層構造

電力システムを構造面から見た場合の顕著な特徴は、電圧階

級が「多層構造」になっている点です。つまり、通常の電力システムは数十万 V(ボルト)級の上位レベルの基幹系から、数百 V 級の下位レベルの末端系まで、数段にわたる電圧階級から成り立っています。基幹系と末端系の間層は、一次系・二次系などと呼ばれます。こうした多段構造は、道路網や鉄道網などの大規模ネットワークに共通して見られる特徴です²¹。

そして、大量の電気が基幹系（送電線路）を通して運ばれ、複数の変電所を経由して徐々に降圧されながら、次々と少量の電気に分割されて、末端系（配電線路）に接続している需要家に配られる仕組みになっています。この様子を道路網に当てはめてみると、基幹系は高速道路に、末端系は各種の一般道や路地などに相当します。また、人体に例えると、基幹系は大動脈に、末端系は毛細血管に当たると考えることができます。

送電線路と配電線路の役割

高い電圧ほど用地あたりの配送量が大きく、かつ配送量あたりの経費や損失が小さくなります。それ故、遠方の発電所から大量の電気を運ぶ送電線では、50 万 V といった高い電圧を使って、電気を効率よく運ぶようにしています²²。

しかし、実際に電気を使用するにあたり、低い電圧であるほ

²¹ 首都圏など大都市圏に広がる道路網や鉄道網は、概して圏内や周辺を取り巻く路線と地方や近郊に向かう路線から成り立っています。このように形態の面から眺めてみても、電力システムは交通網に酷似しています。なお、電力システムの場合は、圏内や周辺を取り巻く送電線（ほとんどが基幹系）は一般に外輪線と呼ばれています。

²² 電気を送る効率だけからいえば、電圧は高い程良いのですが、電圧を高くすると鉄塔なども大きくする必要があるので、建設コストなどを考えると高い電圧にすれば良いというものでもありません。現在、送電線の高電圧化の限界は 100 万 V 程度とされています。

ど多様な用途に応じ少しずつ分けて使うことが容易なうえ、感電などの危険も抑えることが可能です。つまり、低位の電圧階級である配電線路は、適当なレベルに電圧を下げて使い易くした電気を家庭や工場に届けるといった役目をもっています。

形状はループ状と放射状に大別

次いで、電力システムの形状について調べてみます。あらゆるネットワークがそうであるように、電力システムの形状に関しても、大別すると図7のように、ループ状のものと放射状のものがあります。言うまでもなく、前者は一部に迂回ルートを含み、後者は全く迂回ルートを含まない形をしています。

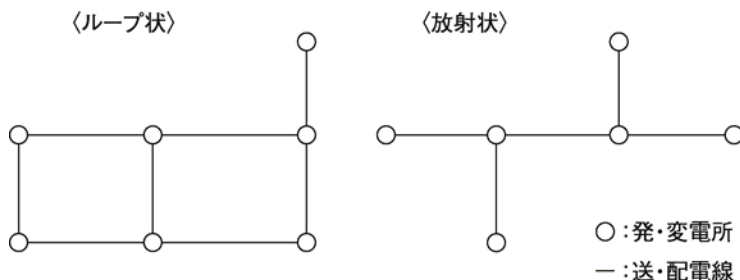


図7 ネットワークの形状

一般に、迂回ルートはトラブル発生時の混雑回避などに効力を発揮します。そのため、電力システムの場合もループ状のほうが、放射状よりも多量の電気を安心して（信頼して）流しておくことができます。半面、投資面・運用面においては、放射状よりも不利な点を含んでいることは否めません。

形状選定の一般的傾向

通常、上位の基幹系はループ状に、下位の末端系は放射状に、それぞれの流通施設が結ばれています。また、欧米の国々のように面的な広がりを持ち消費地が散在している地域では、ループ状の形状が多く採用されています。これに対して、私たちの国のように国土が狭い島国で、需要が密集している地域では、放射状の形状が選ばれる傾向があります。

しかし、こうした傾向は必ずしもすべて電力会社が実際に採択している形状の選定基準になっているわけではありません。現実の電力会社の選択は、上記のような地形などの地理的要因、需要密度などの経済的条件のほか、設計面・運用面・制御面における技術レベルなどにも支配されます。これ以外にも、供給の信頼性の在り方に対する各社独自の判断、各社が採ってきた経営理念や隣接する電力会社との関係などの歴史的な経緯にも左右されるのです。

コラム：私たちの国の配電電圧の昇圧問題

私たちの国の電力システムは、低圧レベルの配電系統に100Vの商用電圧が採用されていますが、これは先進諸国の中では最も低い電圧階級です。アメリカ（120V）を除く大抵の先進諸国では200V台の電圧が使用されています。

配電系統の昇圧化の問題は、これまで種々の角度から幾度も議論されてきました。しかしながら、全国に及ぶさまざまな消費者に莫大な費用負担を強いる、という社会的・経済的な障壁が最大の難関であることが分かり、総じて現実性と緊急性を欠くとの理由から、否定的な結論がほとんどを占めてきました。

しかし、配電電圧の昇圧化のメリットは電力損失の低減に留まらず、CO₂削減が可能になります。つまり、地球温暖化を防止するといった環境面の改善にもつながります。さらに、この国の社会や産業が本格的な成熟期を迎えつつあるなかで、電気の利便性を一段と高め、使用機器の性能向上を図ることが必要とされます。こうしたことから、将来的には全国での配電電圧の一律昇圧のみならず、スマートコミュニティ向けに、直流・400Hz・高中低品質といった多様な電気を一括して届ける革新的な給電システムの登場する日も間近かも知れません。

2 送電線と配電線

送電線や配電線はいろいろな部品からできています。以下では主要な部品のみを簡単に紹介しましょう。

3 本一組で電気を送る送電線

送電線は、発電所と変電所、変電所間を結んで、電気を送る役目をしています。鉄塔の高さは、図8に示すように送る電圧により違います。他にも送る電圧によりさまざまな工夫がされています。

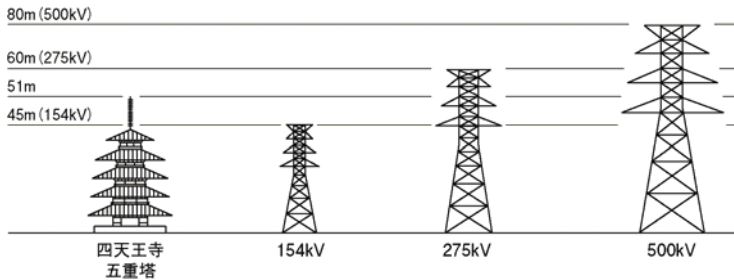


図8 送電鉄塔の高さ

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

では、実際にその送電線の仕組みをみていきましょう。

図9は実際の送電線の写真です。この写真では、鉄塔の右側に4本、左側に4本線があります。図10は送電線の構成を簡単に書いたものですが、一番上の2本は「架空地線」と呼ばれる線で、この線は電気を送ってはいません。その下に、右側に3本、左側に3本の線がありますが、これらの線が実際に電気を送っている線で、「電力線」と呼ばれます。

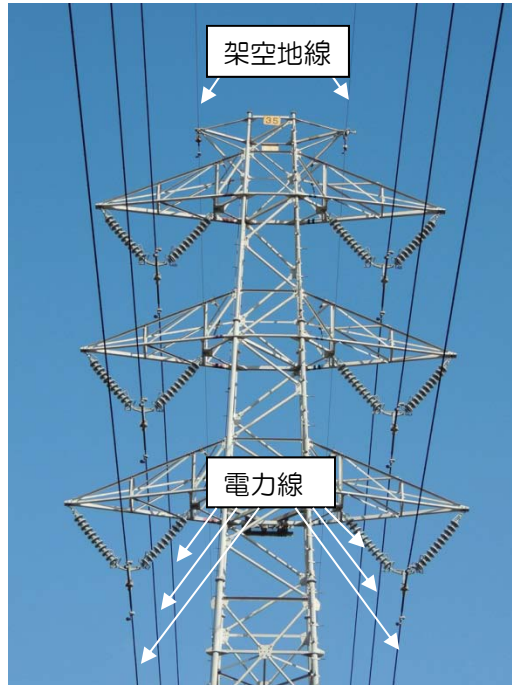
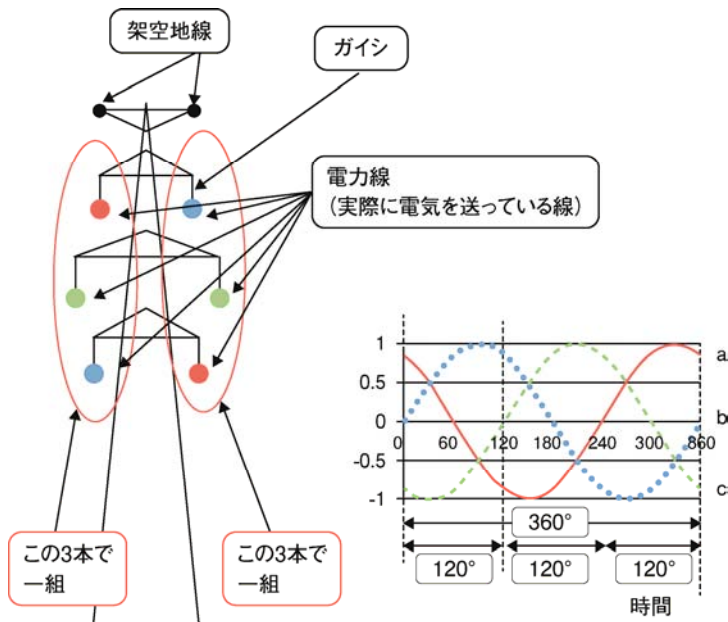


図9 実際の送電線の写真

この「電力線」は、鉄塔の右側と左側で、それぞれ3本で一組となって電気を送っています。送電線は交流で電気を送るのですが、このように3本一組で電気を送るため三相交流と呼ばれます。そもそも、広く使われている交流には単相と三相交流の2種類があります。単相交流は、電柱から引き込まれ家庭で使われるもの、三相交流は発電所から電柱までの間の送電線で使われ、単相交流を3つ組み合わせたものです。発電機や送電線のほとんどで、三相交流が用いられていて、大きな工場でも三相交流を使用しています。



東日本では周波数が 50Hz なので、一周期 (360°) が 20 ミリ秒 (0.02 秒) になる。一組になる 3 本の送電線で電圧が最大になるタイミングが少しずつずれている。西日本は 60Hz なので、一周期は 16.7 ミリ秒になる。

図 10 送電線構成の概略図

この電力線の 3 本一組の電線にはどれも交流の電圧がかかっているのですが、そのピークとなる時間は図 10 右の波形にあるように、それぞれ少しずつずれています。これはわざとずらしているわけではなく、交流発電機からの出力が、そもそもこのような形になっているのです。交流電圧を 120° ずつずらして等間隔で発生させて、3 本の線で送ります。三相交流は、3 組の送電線の戻りを 1 本にまとめると電流が流れなくなるので戻り線を省略できます。このため、3 本の電線だけで送電で

きるメリットがあるのです。三相交流を使用すると、大きな電力が送れるだけでなく、送電線の本数を半分に減らせる（もっと知りたいあなたに：その1 (p.40) を参照）という利点もあります。

雷よけの架空地線

図9の写真ではちょっと細くて見にくいですが、鉄塔の一番上にある架空地線は鉄塔に直接つながっており、さらに鉄塔を通じて大地にもつながっている、まるで空に架かった地面の線、言わば接地（アース）です。英語では **overhead ground wire** といいます。この架空地線は電気を送っていないと言いましたが、飾りでつけられているものではありません。これは何のためのものかと言えば、電気を送っている電力線に雷が落ちるのを防ぐためにつけられているものです。

普通の建物であれば、雷から建物を守るためには避雷針を立てるのですが、送電線は長く伸びているので、鉄塔に避雷針を立てただけでは鉄塔と鉄塔の間の部分の電力線を雷から防ぐのはかなり難しいのです。そのため、電力線の上に接地された線を張って、電力線への雷撃を防ぐという考えでつけられているもので、言ってみれば避雷針ならぬ「避雷線」です。

架空地線は、アルミ合金線でできていますが、ケーブルの中に光通信用のファイバを巻き込んだものも使用されています。これを OPGW (Optical fiber composite overhead ground wire) と呼びます。光ファイバを用いれば、雷の電磁界や送電線自身の交流電磁界などの影響を受けずに、通信することが可能です。図11にそれらの例を示します。



通常の架空地線



OPGW（中心が光ファイバ）

図 11 通常の架空地線と OPGW の例

（画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会）

なお、実際の送電線では、電力線も架空地線もかなりたるんでいるように見えますが、電線が重いので、あまり電線をピンと張ろうとすると鉄塔に力がかかりすぎて倒れてしまいます。実際には、夏と冬の温度差による電線の伸びや、風や雪などによる加重なども含め、総合的に考えて設計しています。

電力線の工夫

電気を通さないガイシで電力線は支えられている

鉄塔は金属ですので電気を通しますから、電気を送っている電力線を直接鉄塔につけては、電気がすべて鉄塔を通じて地面に流れてしまったり、送電線同士がショートしてしまい、電気を送ることはできません。そのため電力線は電気を通さない「ガイシ^{ガイシ}（碍子）」というもので、送電鉄塔から吊り下げられています。ガイシはガラスやプラスチックでできたものもありますが、日本では瀬戸物でできたものが良く使われています。今度送電線を見かけたら、よく見て下さい。いくつものガイシがつけられていて、その先に送電線を吊り下げているのが分かります。



図 12 ガイシ (画像提供：日本ガイシ株式会社)

ガイシは、天気がよく晴れている時はもちろん、雨に濡れても電気を通さないことが必要です。また、海岸近くでは海から飛んでくる塩水がガイシ表面にかかったりしますし、雪国では雪や氷がガイシを覆ったりすることもあります。このような場合でも電気を通さないために、ガイシの大きさや長さが決められています。以上のように、ガイシの数を見ると、送電電圧の見当が付きまますので、あなたも空を見上げる際にガイシも意識して見てはいかがでしょうか。

電気を送っている各相の電力線には、電気の流れやすい金属を使います。通常金属の中で一番電気の流れやすいのが銀で、それに続いて銅になります。しかし銀は高価ですので、硬銅を使ったり、電気の流れやすさは少し劣るのですが、同じ重さなら銅の約半分の価格の安価なアルミニウムを使ったりします。アルミニウムは銅より軽いのですが、柔らかく引っ張り力に弱いいため、中心に硬い鋼線を入れて力を持たせています。また、送電電圧が 27 万 5 千 kV(キロボルト)程度以上の高電圧になると、多導体方式と言って、図 13 のように複数の線を数十 cm

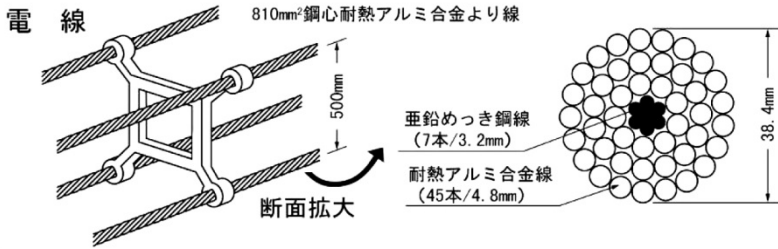


図 13 500kV 送電線の例

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

間隔で配置し、一つの電力線として使います。これは 50 万 V の送電線の例ですが、4 本の線で一つの相の電力線が作られています。

地面の中でも電気は送られている

送電線というと鉄塔というイメージが強いですが、都会部やその近郊など、用地事情や景観などの理由で架空送電が行にくい場所では、図 14 のように地面の中に張った電線で電気が送られることもあります。地面の中に電線を張って電気を送るといっても、金属の電線を地面にむき出しのまま埋めてしまえば、土の中に電気が流れ出してしまいます。そのため、電気を送る金属の電線を中心にして、電気を通さないプラスチックなどで電線の周囲を包んだ「ケーブル」というもので電気が送られています。図 15 にケーブルの例を示します。図にあるように、電気を送っている中心の金属線から外側までは、土との間の絶縁のため、また周りの土やそこに含まれる水分の影響でケーブルが劣化してしまうのを防ぐために、何重にもなっています。電圧の高いものほど、電気を通さないプラスチックの層（絶縁層）を厚くする必要がありますので、その分ケーブルも太

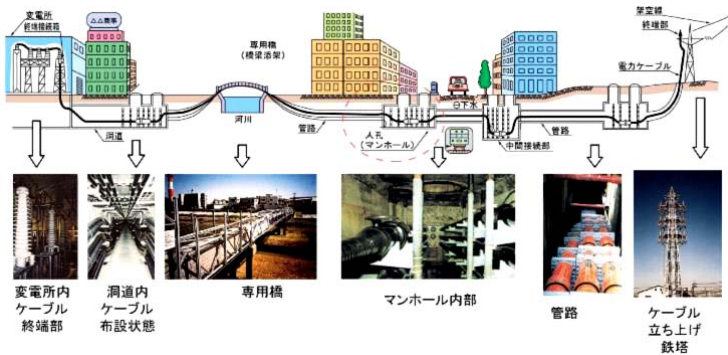


図 14 地中送電設備の例

(画像提供：電気学会保護リレーシステム技術委員会)

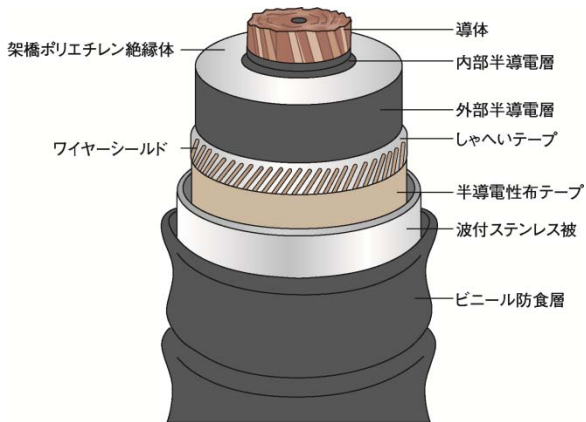


図 15 電力ケーブル

くなります。50 万 V のケーブルでは外径は 15cm 程度になります。

日本の地中送電電圧は、最初は 11～33kV が中心だったので、プラスチックの絶縁性能の向上により、現在 500kV の

ケーブルが作られており、東京の新豊洲変電所と千葉県の新千葉変電所の約 40km を結ぶ長距離地中送電線に使われています。

コラム：ガイシの個数で電圧が分かる

皆さんは送電線をご覧になって、何ボルトの電圧がかかっているか見分かりますか？

それは表に示すように、ガイシの数でおおよその電圧を見分けることがで

電圧	ガイシの個数
11～22kV	2～3
33kV	3
66～77kV	4～5
110～154kV	7～10
187kV	10～11
220kV	12～13
275kV	15～16
500kV	28～30

きます。一般に海岸に近いところでは、ガイシに塩水がついて放電しやすくなるので、これよりガイシの個数を多くする場合があります。表のガイシの個数は概略値です。

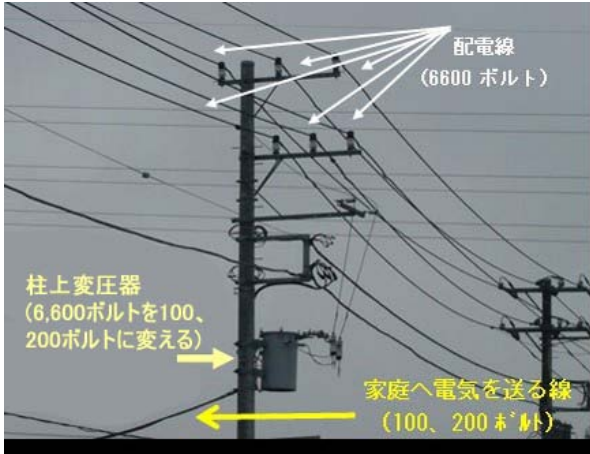
家庭に電気を配る配電線

私たちが町中で良く見る電柱の上に張ってあるのが配電線です。図 16 は配電線の例ですが、配電線は送電線よりかなり低い電圧で電気を送っています。送電線から配電線へは変電所（配電用変電所）で電圧を下げますが、変電所については、次の章で説明します。実際の配電線の電圧は通常数千 V であり、送電線よりは低いと言っても、一般の家庭で使うには実はまだ電圧が高すぎます。そのため、さらに電柱の上にある変圧器（柱上変圧器）で電圧を 100V や 200V に下げて家庭に送ります。送電線や配電線では 3 本一組（三相交流）で電気を送っていますが、柱上変圧器から家庭に電気を引き込む時には、家庭のコンセントに合わせて 2 本の電気を送る線およびアース線の 3 本を通常使います²³。

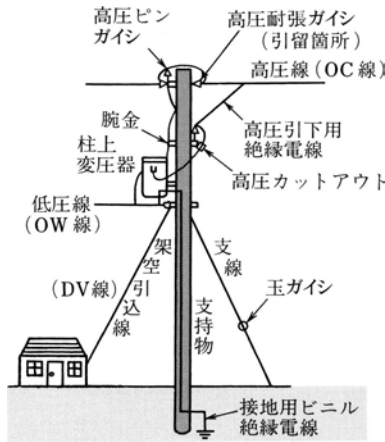
地中送電でケーブルを使うという話をしましたが、架空配電線でもケーブルが使われることがあります。通常の配電線では、ビニールで金属線を包んだだけの電線が使われるのですが、電線付近に建物が密集していたりして、十分な距離をとって電線を張るのが難しいところではケーブルを電線のように張った架空ケーブルが使われます。架空ケーブルの例を図 17 に示します。ケーブルは 3 本まとめてラッシングワイヤーというワイヤーでひとくくりになされ、メッセンジャワイヤーという鉄線で吊られています。電気を送っている線をひとくくりにはしているのですが、ケーブルは外側にシースというアースした金属があるので、3 本を近づけても問題はありません。

²³ Vol.3 「電気の基本を考えてみよう」の図 29 (p.44) と、Vol.5 コラム「柱上変圧器から家庭の単相 3 線式へ」(p.36) を参照。

電線に流す電流の大きさが大きくなると、中心部の導体も太くなり、そのため全体の外径も変わってきますが、通常、このような架空ケーブルの外径は数 cm 程度です。



(1) 配電線の例



(2) 配電線の構成

図 16 配電線

(出典：道上 勉「送電・配電 改訂版」電気学会 2001)

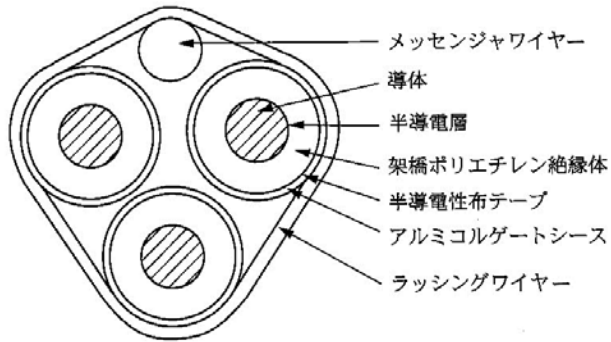


図 17 架空ケーブルの例

(出典：「電気工学ハンドブック第 6 版」電気学会 2001)

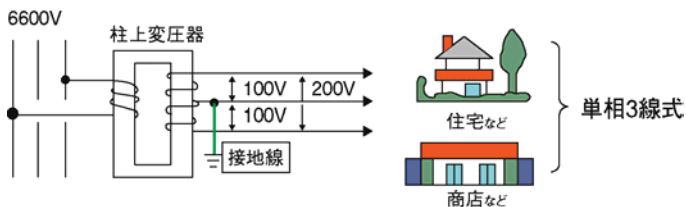
コラム：柱上変圧器から家庭の単相 3 線式へ

家庭で使用する電気は、柱上変圧器から配電線を通り写真に示すような家庭の外壁に設置されている電力量計に引き込まれ、そこからまた家庭に分配されます。ですので、電力量計から 2 本のパイプが出ていてそれぞれのパイプには 3 本の電線が入っています。

その際に使用する配電方式は、ほとんどの家庭で使用されている単相 3 線式です。皆さんの自宅の壁に設置された電力量計を見てみてください。パネルに交流単相 3 線式と書かれているのが確認できると思います。



その单相 3 線式は次のような仕組みになります。



上の図で左の 6600V の電線は、図 16(1)の電柱の上の方の 6 本の電線です。ここは三相交流²⁴なので、図 16(1)では 3 本一組の電線が二組張られています。このうちの 2 本の電線から柱上変圧器で電圧を上の方のように下げて 3 本の電線（3 本をまとめてあるので、一見すると一本に見えます）で家庭へ送っています。このように、6600V の線間電圧の一つからしかとっていないので、单相と言ひ、また 3 本の電線を使っているので、单相 3 線式と言ひます。3 本の電線の組み合わせで 100V や 200V の電圧が出せるようになっていす²⁵。

²⁴ もっと知りたいあなたに（その 1） p.40 を参照。

²⁵ Vol.3 「電気の基本を考えてみよう」の図 29（p.44）を参照。なお 100V や 200V は標準電圧で、電気事業者は電気を供給する場所において、それぞれ「101V の上下 6V を超えない値」「202V の上下 20V を超えない値」に維持するように努めなければならないことが定められています。

電柱の無い街—どうやって電気は送られている？

図 18(a)の写真はある街の写真です。街中では電柱が多く見られますが、これが駅の近くになると、図 18(b)のように電柱が全く見られない場所もあります。これは街の美観を高めるため、配電線をすべて地中に埋設したためです。このように電柱を使わず、地下からビルなどへ電気を送る場合も都会では多く見られます。この場合も地中送電線と同じく「ケーブル」で電気が送られています。ケーブルは地中に直接埋められる場合もありますが、金属やコンクリートの管の中に入れる場合も多く、また都心部では、大きなトンネルを作ってその中に何本ものケーブルを配置する場合もあります。



(a) 街中
(道の端に電柱が並んでいる)



(b) 駅の近く
(電柱は見あたらない)

図 18 ある街の風景

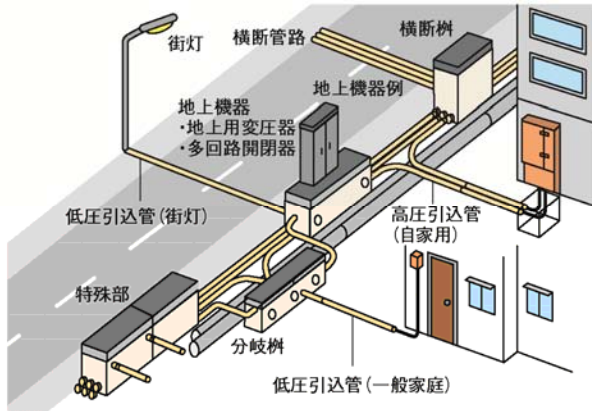


図 19 地中配電線のイメージ図

図 19 に示すような送電用ケーブルや配電用ケーブルを用いた地中送配電のメリットは、景観の改善のみでなく、地下にあるので暴風雨や落雷などの影響を受けにくく（事故が起きにくく）、また人などに触れないので安全性が高まります。一方、デメリットは、建設に時間がかかり、建設費が高くなること、事故復旧に長時間を要することです。

もっと知りたいあなたに（その1）

<単相交流と3相交流のちがい>

電気を使う時には、行きと帰りの2本の電線が必要です。この電球を光らせるひと組の電線を相と言いますが、3つの負荷に電気を供給するには、通常は図20のように6本の線が必要です。

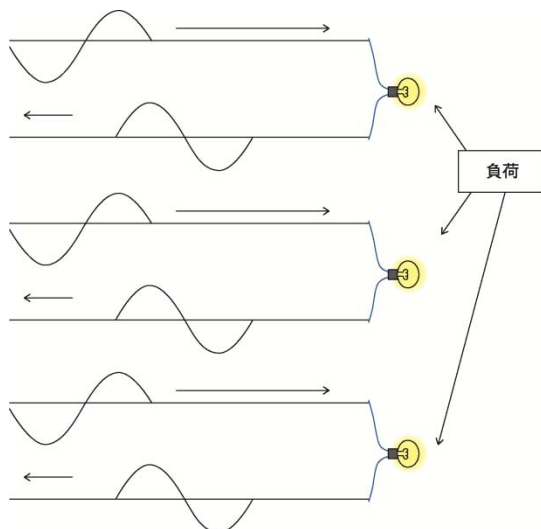


図20 線が6本の場合

ちなみに、図で負荷と表記した電球は、直流電流でも光りますが、図示するような交流電流でも光ります。小学校の理科の乾電池と豆電球の実験では、直流で光らせています。家庭の天井の電球は交流で光らせています。図の様な交流波形を正弦波（サイン・ウェーブ）と呼びます。

帰りの線を一本にまとめることもできますが、3本分の電気が流れるため、一本の線だけでは不十分で、結局3本分の線が必要になります。

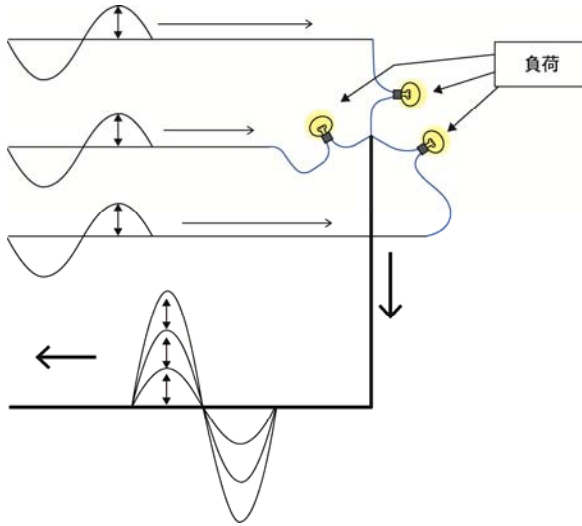


図 21 線が 3 本の場合

しかし 3 相交流では、電線は 6 本必要ありません。それは、3 相の各相の正弦波状の電圧や電流のピークが少しずつずれているため、各相の電圧や電流を足すと常に 0 になります。その

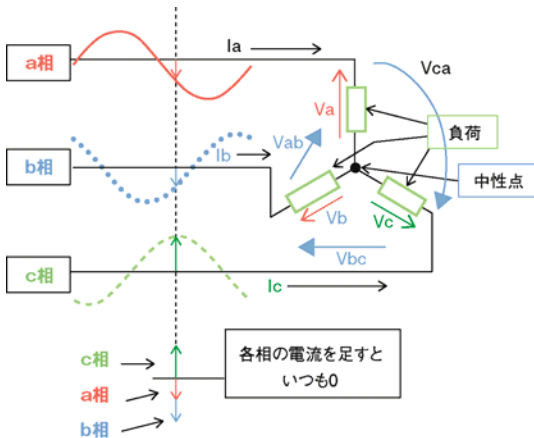


図 22 帰りの線が必要ない場合

ため、帰りの線がなくとも構わないのです。つまり三相を組み合わせることにより、各相が独立していた場合に 6 本必要だった電線が、3 本で済むようになる

のです。

このとき、各相の電流（図 22 の Ia、Ib、Ic）を線電流と言
い、電球のそれぞれにかかっている電圧を相電圧（Va、Vb、
Vc）と言います。また、電線の間にかかっている電圧を線間電
圧（Vab、Vbc、Vca）と言います。

もっと知りたいあなたに（その 2）

<送電線周囲の電界と磁界、それによるエネルギーの流れ>

図 9 に示す様な巨大な送電線では、地面（アース）に対して
交流で約 30 万 V（50 万 V/ $\sqrt{3}$ ）²⁶もの電圧がかかっています。
交流ですから瞬間的にはその約 1.4 倍²⁷の約 40 万 V もの電圧
がかかります。一方、1 本の電線（導体）に流れる電流は 3 千
A 程度です。ということは、空中の電線と大地を一对の電線と
して考えてみると、30 万 V×3 千 A（アンペア）=0.9GW²⁷
（ギガワット）すなわち約 90 万 kW の電力が送られています。
電力は 3 相交流で送られ、通常は左右合計 2 系統の送電線が張
られていますので、それぞれの鉄塔に張られた電線全体では、
上で計算した 1 本の場合の 6 倍の電力、すなわち約 540 万 kW
の電力が送られていることになります。

送電線に電力を送り出す大規模な発電所は、電力の消費地で

²⁶ 三相交流は 3 本の線に位相の異なる 3 つの交流電源を接続したも
のです（もっと知りたいあなたに（その 1）を参照）。3 本の相電圧を
みてもみると、60Hz 系の場合、ある相がピーク電圧に達した 1/180 秒
後に次の相がピークに達し、また 1/180 秒後に次の相がピークに達し、
結果 1/60 秒間で一巡する（1 回転する。4 章の「電気の性質をうまく
使って届ける」図 42 を参照）。三相交流電源に接続される 3 つの負荷
が等しい場合、電力は線電流×相電圧×3、あるいは、線電流×線間
電圧× $\sqrt{3}$ で求められます。

²⁷ もっと知りたいあなたに（その 5）<交流の電力>p.98 を参照。

ある都市部近郊に設置される火力発電所を除くと、都市部から遠く離れて立地されている場合が多く、その場合、発電所から電力を送り届けるにはこのような巨大な送電線を利用する必要があります。

通常、一つの発電所には発電機が何機もあって、数百万キロワットの電気を送り出しています。この膨大な電力は、50万Vの送電電圧を利用すれば、一本の鉄塔に張られた一連の送電線で送ることが可能となります。私たちの国では、用地事情の制約が厳しく鉄塔を並べて設置する余裕はありません。多くの送電線は左右2回線を備えています。一方、多くの諸外国では用地に余裕がありますので、鉄塔倒壊のリスクを考えて、二本以上の独立の鉄塔にそれぞれ1回線ずつ3相電線を設置することがよくあります。この場合は、鉄塔一本が倒壊しても残りの鉄塔の電線で電力を送り続けることができます。

さて、送電線を見上げた時に、電気エネルギーが流れている様子を想像できますか？ 皆さんが川の流れをご覧になれば、流れのエネルギーは水によって担われていることが容易に想像できるでしょう。では、送電線を眺める場合ではいかがですか。送電線、もっと一般には電線をみて、どこを電気のエネルギーが流れているのか想像できますか。もし、電気エネルギーが電線の中に閉じ込められて電線の中を送られている、と思われたら、その考えは修正していただく必要があります。実は電気エネルギーは電線の周囲の空間全体を通して電線に沿って、電線の張られている方向に流れているのです。この電気エネルギーの流れは、物理的には「ポインティングベクトル」として

表現できます²⁸。ポインティングは、この電気エネルギーの流れを解明したイギリス人の名前です。

ポインティングベクトルといっても馴染みの無い読者が多いと思いますので概要を以下に述べておきます。ポインティングベクトルは電界と磁界との積で表されます²⁹。空間内の電界は電線の電圧によって作られ、磁界は電線を通る電流によって作られますが、それら電界と磁界の様子を表すものが電気力線と磁力線です。

図 23 は送電線周りの電気力線と磁力線の大まかな様子を描いたもので、実線が電気力線、点線が磁力線です。ここで、注

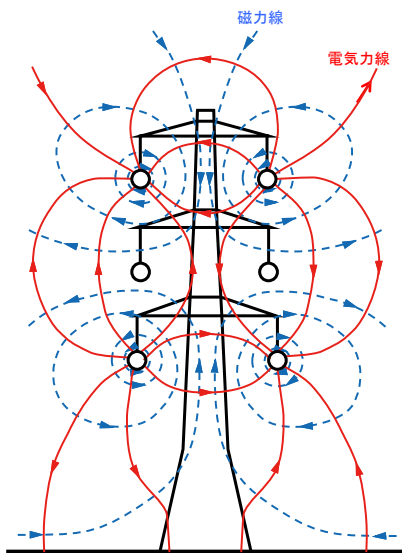


図 23 送電線周りの電気力線と磁力線

意すべきは送電線で送られているのは交流ですから、周期的に電圧、電流は変化するので、図 23 に描いた電気力線も磁力線も周期的にそのパターンが時々刻々と変化します。それを動画で示せば面白いのですが、ここでそれをお見せする事ができないの

²⁸ ポインティングベクトルについては Vol.3 (p21, p52, p58) を参照。

²⁹ 厳密には電界と磁界のベクトルとの外積(ベクトル積)のことです。

が残念です。

図 23 に描いたような電気力線と磁力線が、送電線を通る三相交流電流の時間変化に応じて空間内につくられ、それらの力線（言い換えれば、空間の電界と磁界ということですが）によって、送電線周りの空間に作られるポインティングベクトルが、電気エネルギーを輸送しているということが出来ます。このような知識をもつと、送電線を眺めたり、写真を撮ったりする時の見方が少し変わるのではないのでしょうか。

最後に一言、もし、この送電線に雷が落ちたら、その場所の電圧、電流はその瞬間に大きく乱され、その乱れは波及して行きます。その乱れはどの程度の速さで送電線を伝わって行くのでしょうか。もし、電気エネルギーが電線の中を伝わっているのであれば、それは電線内の電子によって^{にな}担われていますから、電子の速度で伝わることとなります。しかし、その速度は亀の歩みより遅いので³⁰、この考えはとても現実的とは思えません。では実際はどのようなのでしょうか。電磁波の速度は光の速度と同じで、約 30 万 km/秒です。ある地点で落雷が起きたときには、その周囲空間を満たしている電界、磁界は大きく乱され、その乱れは、電磁波となって光速で電線方向に沿って両側に伝わるのです。周囲の電界、磁界が乱れば、電線間の電圧と電線内の電流もそれに依りて乱れて、それも光速で伝わります。

落雷によって電圧、電流が乱れるから電界、磁界も乱れるが、その乱れは電線内の電子によって伝わって行く。そのように考

³⁰ 電子の速度は電流÷(電子のもつ電荷×金属中の電子の密度×電線の断面積)で与えられ、直径 1mm の電線に 1A の電流を流した場合の電線中の電子の速さを計算すると 0.1mm/秒程度となります。

えてしまうと、落雷による乱れが光速で伝わる原理が解らなくなってしまいますので、注意してください。

落雷によって乱された電界、磁界は電線の電圧、電流を同時に乱して、両者ともが光速で電線にそって遠方まで伝わっていくので、途中で接続された装置を破壊してしまう恐れがあります。そこで、すぐに保護リレーという装置³¹で送電線のスイッチ³²を動作させて、その伝わりを阻止することが大切です。と言っても光速以上の速さであらかじめ乱れを予測することは不可能です。実際には落雷の検出からスイッチを切るまで、交流の3周期から5周期程度（0.1秒以下）で対応するように出来ています。

³¹ 3章の電力システムの保護「保護リレーって何？」(p.60)を参照。

³² このスイッチは、正式には遮断器と言います。送電線両端の変電所内に設置されています。「3 電気の配送センター」(p.47)の章を見てください。

3 電気の配送センター

電力システムには変電所と呼ばれる、たいへん重要な役割を果たしているところ（施設）があります。これを宅配便に例えて考えてみると、宅配便では受け付けた荷物を近隣の配送センターに集めて、同じ方面へ送る荷物のある程度まとめて送り先の最寄りの配送センターに送ります。そこに送られてきた荷物は、分けられて、送り先へ届けられます。

電気の場合も発電所で作られた電気は、変電所に集められて送電線につながり、何か所かの変電所を経由して私たちの使うところに（需要家のもと）に届きます。宅配便とよく似ていますが、違うのは電気には宛先がつけられないことです。

このように、物流における配送センターの役割を担うのが、変電所です。一般の人からは目立ちませんが、たいへん重要な役割を担っています。変電所は、その名前の通り、電気を変えるところです。まず、電圧を変えます。また、電気の通り道も変えることができます³³。変電所の役割とそれを実現するための設備などについて見ていきましょう。

変電所とはどのような所でしょう？

電気は電圧が高いほど送電するときの電力損失（ロス）³⁴が

³³ 電圧を変えずに通り道だけを変える場所もあります。それは開閉所と呼ばれます。

³⁴ 損失は、電線路がもつ抵抗によって電気エネルギーが、熱エネルギーに変換され、空気中に捨てられることによって発生します。その大きさは流れる電流の二乗に比例し、抵抗値に比例します。電気エネルギーを送るとき、電圧を2倍にすれば電流は1/2で済みます。電流が1/2で済めば、損失は $(1/2)^2=1/4$ で済みます。

少なく、電線も細いもので済むため、図 24 に示すように、発電所で作られた電気³⁵は電圧を高くして消費地の近くまで送電し、そこで電圧を下げるようになっていきます³⁶。

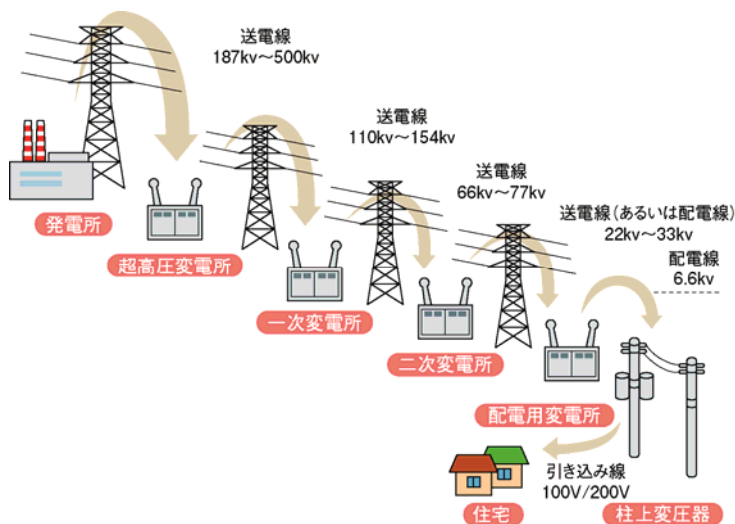


図 24 変電所の種類

また、電気の流れを集中・分配することで、落雷などで部分的に電気の流れが途絶えても広い範囲で停電することがないようにになっています。変電所は、電気の流れを効率的に送る中核となる施設であり、電力の流通網（配送網）における中継基地となっています。

³⁵ 大きな発電機の出力電圧は数千 V から 3 万 V ぐらいで、これを 27 万 5,000V や 50 万 V まで電圧をあげて送電します。

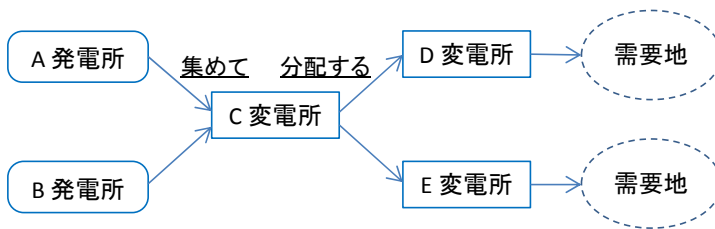
³⁶ 電圧を高くすることを「昇圧」、低くすることを「降圧」と言います。

つまり、変電所とは、効率よく送電するために電圧を高くしたり低くしたりする、使いやすい電圧の電気にする、電気を集め、必要な個所に分配するといった役割をもった所と言えます。外観を図 25 に示しま



図 25 1973 年に日本で初めて 500kV 送電が始められた時の変電所の写真 (画像提供：東京電力パワーグリッド株式会社)

す。また、変電所が担う役割を単純化して示したものが、図 26 です。この図を元にして、あとでもっと詳細な図に展開して、詳しく説明することにします。



A、B 発電所で起こした電気を、送電線経由で C 変電所に集めます。C 変電所ではそれを D、E 変電所へ向けて送り出します。

図 26 変電所が担う役割

変電所の構成と主要な設備

変電所の構成の概要を図 27 に示します。これは屋外に設置された変電所で、比較的敷地に余裕がある場合の例です。

高い電圧で送られてきた電気 (図では左の方の送電線から)

は、遮断器や断路器を通過して、「母線³⁷」に集められます。母線は、電気をいったん集め分配するための変電所内の電線のことです。

遮断器 (CB)³⁸は大きなスイッチで、雷などで送電線がショートして大きな電流が流れても電気を切ることができます。大きな遮断器では、電圧が 50 万 V (500kV) 用で電流が 6 万 3 千 A までの電流を、切り離せとの命令が来てから 0.04 秒程度³⁹でスイッチを開いて大きな電流を切ることができます。なるべく大きな電流をどうやったら速く確実に切る (遮断する) ことができるか、装置をいかにコンパクトにしかも安価にできるかなどで、絶え間なく研究開発が行われています。

一方、断路器も大きなスイッチですが、遮断器のような大きな電流を切ることはできません。通常使っている電流を切り離

³⁷ 母線は、いろいろな変電所からくる送電線や配電線を一か所に集め、また別の変電所へ効率よく送るための設備です。また、母線には、変電所の重要度、電圧階級、接続される回線数などに応じて、さまざまな構成のものが採用されています。「もっと知りたいあなたに (その 3) <母線の役割>」(p.65)を参照。

単母線構成は母線事故時にはその変電所全体の電気が停まる (全停となる) ため、引き出し送電線数が少ない変電所に適用されています。また、基幹系統の変電所では二重母線と呼ばれる構成のものが多く使われており、2 つの母線のうち片側の母線で事故が発生した場合にも、もう一方の母線は使えるため、信頼度が高い構成となっています。

³⁸ 遮断器は結合部分を機械的に開いて、大きな電流を切ることができます。英語では、Circuit Breaker と言うので、CB と略されます。

³⁹ 50Hz 系統の場合で、1 サイクル (1 周期) は 0.02 秒 (周期÷周波数: $1 \div 50 = 0.02$) だから、2 サイクル程度 (2 周期分の時間)。60Hz 系統では 0.0167 秒 ($50 \div 60 =$ 約 0.83 倍) です。実際には、電流がゼロ付近になったところで切れます。これは 50 万 V で高速度再開路用として適用されている CB の例です。

すことはできます⁴⁰ので、電気の通り道を変える時に使います。

電圧の大きさや電流の大きさを計るための計器もあります。

変電所にあるいろいろな機器のうちで、最も重い機器が変圧器です。変圧器で必要な電圧に変えます⁴¹。

また、雷の侵入を防止するため、避雷器⁴²も設置されています。

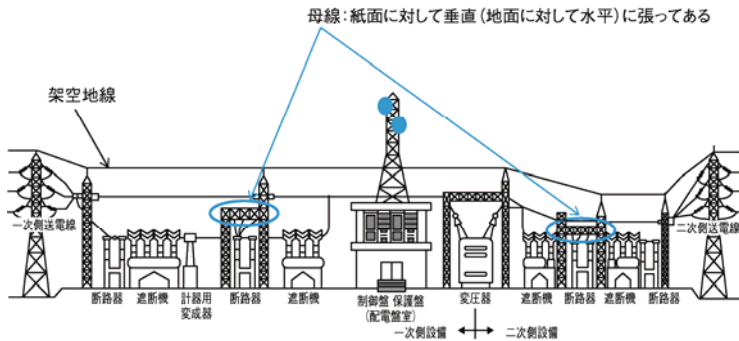


図 27 変電所の構成

変電所の機能を機器との関係で理解するために、変圧器、遮断器、母線だけに単純化して、その構成を図 28 に示します。図 27 と比べつつ見てみましょう。

A、B 発電所から送電線を介して送られてきた電気は、遮断器 (CB11、CB12) を介して左側の母線に接続されています。ですから発電所の片方が停止しても、左側の母線には電気が来ます。それはまた別の遮断器 (CB21) を介して変圧器 (TR :

40 電流を切ることのできない断路器もあります。その場合には遮断器で先に電流を流れないようにしてから、断路器の入り切りを行います。

41 コラム「変圧器の原理」(p.58)を参照。

42 Vol.7の「避雷器」を参照。

transformer) に送られ、変圧器で電圧を上げ下げして、遮断器 (CB22) を介して、右側の母線に接続されます。右側の母線からは、遮断器 (CB31、CB32) を介して、D、E 変電所へ向かう送電線に電気が送り出されます。このようにして、電気の集配機能、変圧機能が実現されています。

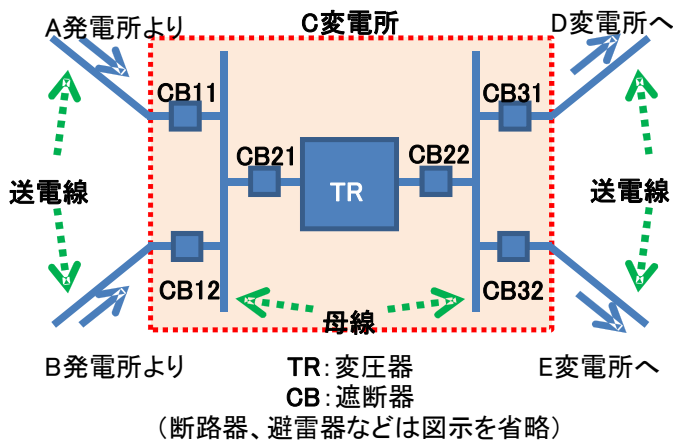


図 28 変電所の構成例

ここで皆さんは不思議に思うかも知れませんね。例えば、A 変電所からの送電線が 1 本の線で描かれていますが、三相交流なのだから 3 本の線があるのではないのだろうか。郊外の送電線の鉄塔を見ると、両側に 3 本ずつ、合計 6 本の送電線があるのではないかと。それらは図 28 には表現されていないが、どうなっているのだろうか。

そのような疑問はとても自然なものだと思います。図において、1 本の線で示された部分は、実際には三相交流の 3 本だったり、三相交流の二つ分、つまり二回線の 6 本だったりしてい

ます⁴³。しかし、変電所の集配機能や変圧機能を理解するためには、1本の線で済みます。このような1本の線で図示して機能を理解する図を、単線結線図と呼び、しばしば使われます。

屋内の設備

変電所には、図 26 には示されていない機器もいろいろあります。変電所の建物の中に配置されている保護リレーや通信設備などは、図示されていませんが、大事なものです。

保護リレーは後ろで詳しく紹介するとして、まず、通信設備です。変電所で計測された電圧、電流や潮流^{ちようりゅう}⁴⁴、遮断器の情報、保護リレーの動作情報を制御所や給電所、あるいは別の変電所に送る装置です。変電所の運転に必要な外部からの情報も受けます。これらの情報は、基幹系統ではマイクロ波や光ファイバを用いて送られています。

また、近年では変電所構内の情報をデジタル情報に変換したり、集約したりするために、光 LAN (Local Area Network) が敷設してある変電所も多くなっています。

変電所に置かれている保護・制御機器などを動かすためには所内電源が必要です。これら機器の電源には直流が使われています。このための電気は常時は電力系統からもらってきて直流に直して使いますが、停電時など電源が供給されない場合に備えて、蓄電池や非常用発電機なども置かれています。

⁴³ 2章「送電線と配電線」の「3本一組で電気を送る送電線」(p25)を参照。

⁴⁴ 潮流とは、交流の電気の流れ、通常は、有効電力と無効電力の流れを言います。もっと知りたいあなたに(その5)〈交流の電力〉(p.98)を参照。

変電所の立地と運転

変電所はどのような場所につくられているのでしょうか。農村地帯や都市郊外のような広い土地が確保しやすいところでは、屋外に建設します。高い送電線からの電線が引き込まれている施設を、皆さんも見たことがあるでしょう。あれが屋外式の変電所です。

しかし、東京や大阪のような大都市では、変電所はどのようになっているのでしょうか。大都市は大きな電力を必要としています。しかし高い建物もあるし地価も高く、架空送電線を敷設しにくいし、屋外式変電所も建設困難です。ですから、この前の章の「2. 送電線と配電線」で述べたように地下に埋設した送電線、地下ケーブルにより都市部に電力を供給します。そして変電所も地下に建設されるのです。地下式の変電所、いわゆる地下変です。この様子を図 29 に示します。

地下変は屋外式に比べて、新しい技術です。最大の問題は、狭いスペースに作るために電気絶縁が難しくなることです。屋外式であれば、空気の絶縁耐力に依存した気中絶縁方式が採用できますが、地下式ではそれが難しくなります。絶縁する力が空気より高いガス⁴⁵を封じ込めた容器の中に電力機器を配置するガス絶縁式の技術開発がなされ、地下式変電所の建設が比較的容易になりました。

⁴⁵ 窒素と酸素の混合物である通常の空気より絶縁耐力が高い SF₆(六フッ化硫黄) というガスを使っています。



図 29 屋外式変電所と地下式変電所

ガス絶縁式の電力機器はコンパクトですから、屋外式変電所であっても大都市近郊のスペースや景観上の制約が厳しいところでも使われるようになりました。中近東の砂漠地帯のような、空気中の砂塵による悪影響が懸念されるようなところでも使われます。

変電所の運転や保守のために、以前は構内に係員が 24 時間体制（1 日 3 交代体制）で常駐していました。その後、監視・制御技術や通信技術の発達により、現在では制御所などが同一の敷地にある場合などを除いて、ほとんどが無人で運転されています。

ただし、我が国の最上位電圧である 50 万 V（500kV）変電所ではその重要度などから、有人で運転されている変電所もあります。なお、77kV 以下の変電所は、配電用変電所を含めてすべて無人化されています。

変電所の役割

変電所の役割には大きく分けると以下の 3 つの役割があります。

【役割その 1】変圧機能（電圧を変える）

【役割その 2】集配機能（電気の流れを集中・分配する）

【役割その 3】保護・制御機能（電力系統の安定運転を支える）

電力システムの運転は、1 章「電力システム」内の「電力システムはどのように機能しているか」（p.6～）で述べているように、中央給電指令所（中給）を中心にした給電所や制御所で、電力システム全体を見ながらなされています。しかし、給電所や制御所には実際の機器があるわけではないので、変電所にある機器を制御して運転し、また情報も変電所から取り込んでいます。つまり、変電所のもっている機能は、給電所や制御所からの指令によってなされています。

もちろん、変電所にある機器そのものを直接保護している場合や、近くの変電所の情報だけから判断できる保護や制御は、変電所だけでなされています。

【役割その 1】変圧機能

効率的な電気の流れを作るために電圧を変える役割で、変圧器で行います。変圧器は、配送された電気の電圧を変える役目をもつ設備で、電磁誘導を利用して交流電圧を変換します。変電所では通常は 3 相交流を扱うため、3 相用のものを 1 台、あるいは単相用のものを 3 台接続して、3 相交流用として使っています。

変電所には引き出される送配電線の数や系統の信頼度、保守

停止時の停電の影響などを考慮して変圧器の台数が決定されます。

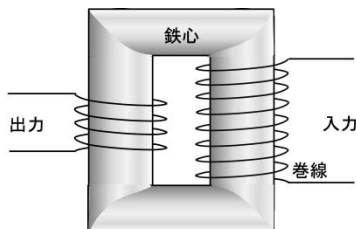
変圧器は変電所以外でも活躍しています。発電所の発電機の出口に備えられている専用の昇圧変圧器や、需要家の近くの電柱上に設けられて、電圧を家庭に届ける 100V や 200V に下げる降圧変圧器（柱上変圧器）もあります。

また、変圧器には、タップ切替え装置が付属される場合があります。これは、使う電力が多くなると一般に電圧が下がりますので、巻線の途中にタップを設けて巻き数比（変圧比）を調整して、電力を使う側（需要側）の電圧を一定に保つものです。さらに、変圧器の巻線の一部を接地（アース）⁴⁶して、事故が発生した場合の異常電圧を抑制するようにしてあるところもあります。

⁴⁶ 変圧器の接地は、1) 電力系統に事故が発生した場合に発生する異常電圧を抑制し、電力機器の絶縁を低減する、2) 系統事故時に発生する零相電流（三相各相の電流の和で常時はゼロ）による通信線への誘導を軽減する、3) 系統事故時に保護リレーで確実に事故を検出するのに必要な電氣量を得るなどの目的で設けられ、直接接地、抵抗接地、非接地などの種類があります。

コラム：変圧器の原理

変圧器は鉄でできた鉄心に銅でできた巻線が巻いてあります。入力側と出力側では巻線の巻き数が異なっています。この巻き数の比率により、交流の電圧を変えることができます。例えば、出力側の巻き数が入力側の巻き数の半分であれば、交流電圧を半分下げることができます。



【役割その2】集配機能

発電所で作られた電気や他の変電所から送られてきた電気をいったん集め、消費地や別の変電所などに電気を配る役割です。発電所で作られた電気をそのまま消費地に送ることを考えると、その途中に落雷などがあると電気の流れが途絶え、消費地に電気が届かなくなります。このために、電気を母線という設備に集め、そこから電圧を下げる変圧器や別の送電線に電気を配ることにより、事故が発生した場合でも停電範囲を広げないような構成となっています⁴⁷。

【役割その3】保護・制御機能

電力システムの安定な運転を支える機能です。安定な運転とは、停電することなく、良質な電気（あらかじめ定められた範囲で

⁴⁷ もっと知りたいあなたに(その3) <母線の役割> (p.65) を参照。

一定の電圧と周波数の電気)を消費地まで途絶えることなく送ることができる状態をいいます。変電所にはその役割を担うための機能と設備があります。

その機能とは、保護機能、監視・制御機能、計測機能になります。これらの各々について述べていきます。

まず、保護機能とは、電力系統を構成する設備に発生する事故や故障⁴⁸に対し、他の健全な設備から遮断器によって電氣的に切り離すことです。切り離すことで、健全な設備を安定に保ち、また、事故や故障の継続による人々への被害を最小限にします。このための役割をもった装置が保護リレーです。保護リレーについては、次項「電力システムの制御と保護」で詳しく紹介します。

次に、監視・制御機能です。これは、変電所で計測した電圧や電流などを用いて、主に給電所でどのように制御するかを判断し、変電所に指令する機能です。詳しくは次項「電力システムの監視と保護」を参照ください。

最後に、電圧や電流、電力などを計測する機能があります。計測量は、電力系統の制御や保護のために使用したり、安定であることの確認あるいは運転記録や、翌日などこれからの運転計画作成のために使われます。この計測には電圧変成器 (VT : Voltage Transformer)、電流変成器 (CT : Current Transformer)⁴⁹などによって、非常に高い電圧や大きな電流を計測に適し

⁴⁸ 事故と故障については、p.60 脚注を参照。

⁴⁹ 送電線や配電線、母線、変圧器などの機器の電圧や電流を保護リレーや制御機器に取り込むための機器です。ここから得られた電気量は、伝送装置を介して、制御所や給電所などに送られ、電力系統の運転状態の把握などにも使われます。

た大きさに変換して、継続的あるいは定期的に計測しています。これらの情報は、計測された変電所で利用されるとともに、給電所へ送られて給電所での制御にも使われます。

電力システムの制御と保護

電力システムの保護（保護リレーって何？）

電力システムの保護とは、故障や事故⁵⁰にあった機器を電気的に切り離し、その機器のダメージを小さくするとともに、停電範囲がなるべく狭くなるように、また故障の影響が健全な範囲に拡大しないように、健全な部分から切り離すことです。この保護は、保護リレーが故障や事故であると判断して遮断器に指令を出して遮断器で切り離すことによって行われています。

保護リレーには大きく分けて、事故除去リレーと事故波及防止リレーの2種類があります。

事故除去リレーは、送電線や配電線、母線、変圧器など機器ごとに取り付けられています。そして、電圧変成器や電流変成器あるいは別の変電所の電圧や電流などもいっしょに使って、常に、これらの機器に落雷や絶縁劣化などによって事故が発生していないかを判定しています。事故が発生したと判断すれば、直ちに、遮断器を開いて事故の箇所を切り離すように信号を出します。電圧階級が高い変電所などにある重要な機器では、事故判定がうまくいかなかったときのため、リレーが二重化されたり、バックアップのためのリレーが備えられたりしています。

⁵⁰ 故障は機器の不具合（異常）で、事故は停電が発生することと区別されることもありますが、一般にはあまり厳密には区別されずに使われます。

事故除去リレーの中で、私たちの国の電圧の高い変電所で主となって使用されているリレーの原理は、「もっと知りたいあなたに（その4）＜保護リレー技術で世界に貢献＞p.68」を参照ください。

この事故除去リレーには、油やガスが使われている変圧器やガス絶縁機器などでは、電気量だけでなく、その圧力や温度などの異常を検出するリレーもあります。

事故波及防止リレーは、事故が除去されても潮流（電気の流れ）の変化などが大きくなって電力系統の一部あるいは全体が不安定になる異常現象が発生しそうな場合や発生した場合に働きます。このリレーにより、発電機や負荷を適切に制御したり、あるいは異常がある系統と健全な系統とを切り離すことによって系統を安定化させます。このリレーは、非常に高い電圧を扱う変電所や制御所に設置されています。

電力システムの監視と制御

変電所で計測した電圧や電流などの各種電気量が、電力系統の安定運用あるいは法律上の規定値に収まっているかどうかを判断する機能が監視機能です。各種電気量が規定値から外れている場合に規定値内に収めるように機器や系統を操作し、あるいは事故時に電力系統を早期に安定側に回復させるために行われる操作などが制御機能です。すなわち電気の流れをコントロールする機能です。

制御については、電力系統を安定に保つための常時制御と、事故時の緊急対応のための事故時制御があります。

常時制御では、変電所で得られる各種電気量から、電圧や潮流（電気の流れ）が適正な値の範囲に収まっていることを監視

し、電圧に対しては最終的には各家庭での電圧が 95～107V、182～222V の範囲に収まるように、変圧器のタップの上げ下げや調相設備⁵¹の入り切りを行います。

潮流（電気の流れ）の常時制御は、潮流が安定な運転ができる限度を逸脱することが予想される場合などに行います。この制御では、変電所で計測し給電所などに集めた電圧や潮流、遮断器の開閉状態情報から、発電機の出力を指定したり、調相設備の入り切りや系統構成を変更したりします。

事故時制御では、事故があった系統を使わなくて済むように、変電所の母線の接続をあらかじめ決められたように変更することなどの制御が行われます。

変電所の同族

交直変換所と周波数変換所

変電所に似た働きをする施設の一族として、交直変換所と周波数変換所があります。両者とも電圧を上げたり下げたりすることが直接の目的ではなく、交流と直流との間の変換（交直変換）あるいは異なる周波数の交流相互の変換（周波数変換）を対象にした仕事を担っています⁵²。変換所の主役となる設備は

⁵¹ 近傍の電圧を一定範囲に保持するため、コンデンサーやリアクトルと呼ばれる電圧調整用の機器です。この機器は無効電力を調整することで力率を改善し受電側での電圧制御を行うものです。もし、電圧が高くなればリアクトルを、電圧が低くなればコンデンサーを給電所からの指令あるいはスケジュールに基づいて自動的に、あるいは変電所に運転員が出向き現地制御盤で入れたりはずしたりします。

⁵² 東日本の 50Hz 系統と西日本の 60Hz 系統をつないでいるのが、周波数変換所です。北海道と本州をつなぐには、途中に津軽海峡があるので、交流をコンバーターでいったん直流にして直流ケーブルで海峡を横断し、直流をインバーターで交流に戻して電氣的につないでいま

交直変換器です。交直変換器はもっぱら交流と直流との相互の変換を行う働きをしています。

開閉所

これら変電所や変換所のほかに、開閉所と呼ばれる同族もあります。開閉所には、変圧器や変換器は設置されていません。変電所・変換所と開閉所とは、高速道路のインターチェンジとジャンクション⁵³の関係に似ています。つまり、開閉所はさまざまな方面から集まる電気の行き先の中継ぎと、配送網における電気の円滑な配送到に必要な電圧を保持する役目をもっているのです。このほか、開閉所が長距離の配送経路の中間に設けられている場合には、そのルートの配送能力を強化する役目を果たすこともできます。

移動用変電所

変電所が災害にあったり、機器更新などのために設備の運用を一時的に停止したりするときに、現地に仮設して変電所の容量を補う役割を果たします。移動用変電所はトレーラーや鉄道車両に変圧器などを設置して移動可能としたものです。主に電鉄用の変電所に用いられています。

す。

詳しくは、「4. 電気の性質をうまく使って届ける」の p.93「直流でつなぐのはどのような場合？」(p.93)を参照。

⁵³ インターチェンジとは複数の道路が交差する、または近接する箇所において、その道路の相互を連結するランプを設けて、これらの道路を立体的に接続する構造の施設です。ジャンクションとは、道路において、異なる方向に進もうとする複数の車両を中心とした交通を制御し、交通事故を最小限にするために設けられた施設です。ジャンクションはインターチェンジの一種でもあります。一般には、インターチェンジは高速道路と一般道との接続点で、ジャンクションは高速道路同士との接続点との意味で使われることが多い。

将来の変電所

現状の変電所の問題点

現状の変電所には、導入時点の違い、製造メーカーの違いなどにより、さまざまな種類の変電機器が存在します。さらに、制御装置や保護リレーについても同様に多くの種類が存在します。このような状態では設備の維持が難しくなり、特殊な機器を購入する必要性を生じるため、運転・維持に多額のコストが発生する可能性があります。

また、制御ケーブルが膨大であり、万一機器のいずれかに不具合や故障が発生した場合にはその取り換えは容易ではなく、既設ケーブルの上に配線が行われてしまうようなこととなります。

そのため、標準化、保守の容易性、さらに一部機器の高度化などに取り組む必要がある一方、運転・保守のコストダウンの要請があります。このように、信頼性向上とコストダウンといった相反する要請に応じていく技術として注目されているのがデジタル化技術です。

変電所にある保護制御機器のデジタル化、構内通信の LAN 化、他電気所間との通信技術の高度化によりどんどんデジタル化してきています。

変電所の将来に向けた方向性

国際的な通信プロトコルの規格を取り込み、保護・制御機器の情報をステーションバスと呼ばれる LAN を介してやり取りし、情報の共有化やより高度な機能の実現が図られています。このことは、構成機器の標準化に向かう仕組みの構築にもつながります。さらに、計器用変成器 (CT/VT) の近くで電流・電

圧信号をデジタル化し、その信号を LAN と呼ばれる光ケーブルの回線に変電所の保護、制御、監視機器で共有することにより、制御ケーブルを削減するとともに情報の共有化を目指す仕組みも検討されています。このように将来は全デジタル変電所が出現する、あるいは移行していくと考えられています。

もっと知りたいあなたに（その3）

<母線の役割>

変電所には変圧器や遮断器などの他に、必ず母線という設備があります。多くの人が変圧器などは知っていても、母線を知る人は数少ないのです。でも、母線はとても大切。その役割を説明します。

図 30 を見てください。A 発電所で起こした電気を、D 変電所経由で需要地に送っています。同じように B 発電所で起こした電気を、E 変電所経由で需要地に送っています。もし、A 発電所が止まったら、上側の需要地は停電です。B 発電所が止まったら、下側の需要地が停電です。

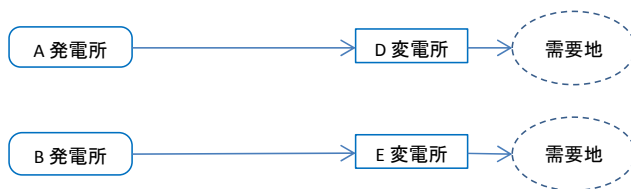


図 30 電気を需要地に送る

上側の需要地で電力需要が増えて、A 発電所だけで賄いきれなくなったらどうでしょう。A 発電所の能力に合わせ、部分的に停電させればよいのでしょうか。でもそのときに B 発電所の能力に余裕があったら、もったいない話ですね。それを融

通すれば、上側の需要地に停電なく電気を届けられるのに。そもそも、これでは発電所の設備の定期点検もできませんね。定期点検のために発電所を止めたら、停電するというのでは、話になりません。

そのための工夫が、図 31 です。A、B 発電所から遠くないところに C 変電所を作り、そこに二つの発電所の電気を集めて、その上で D、E 変電所に集めた電気を分配するのです。このようにすれば、どちらの発電所が停まっても、需要量が残った発電所の能力を超えない限り、停電を引き起こさずに済みます。

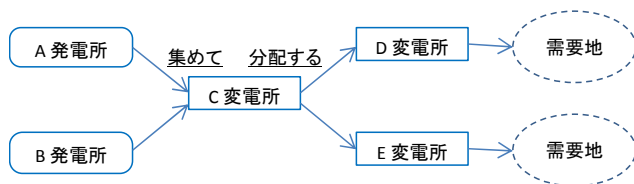


図 31 電気を集めて分配する

そのために、C 変電所では具体的にどのような工夫をするのでしょうか。それを示したのが、図 32 です。A、B 発電所から送電線を介して送られてきた電気は、遮断器 (CB) を介して母線と呼ばれる左側の線に接続されます。そして、変圧器 (TR) を通って右側の母線に接続され、そこから D、E 変電所に送り出されていきます。そうすれば A、B どちらの発電所で起こした電気も、D、E 変電所を介して二つの需要地に送ることができます。電力の供給信頼度が上がります。

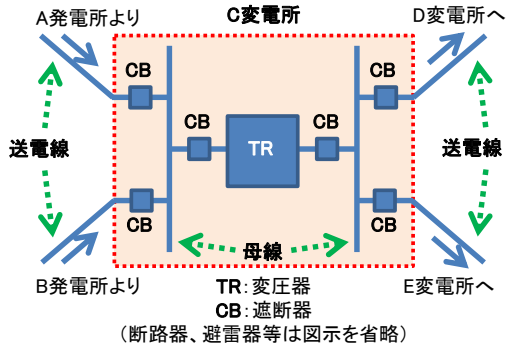


図 32 集めて分配するための母線

でも、ここで考えましょう。発電機が停まることさえ考えておけばよいのか。いえいえ、送電線だって落雷で使えなくなることがあります。遮断器も変圧器も故障することがあります。さらに母線も使えなくなることがあります。そのために、電力技術者はさまざまな工夫を実際に行っています。その代表例を、図 33 に示します。キーワードは二重化です。送電線も二重化、遮断器も二重化、母線も二重化、変圧器も二重化、そして二重化した母線間での電気のやり取りを可能にするために、図のよ

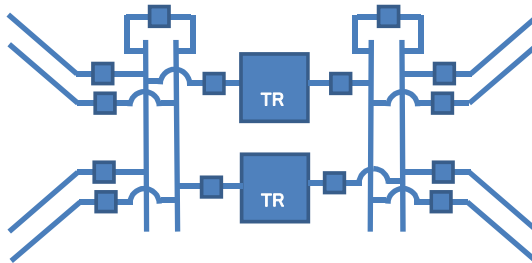


図 33 二重化による信頼性向上

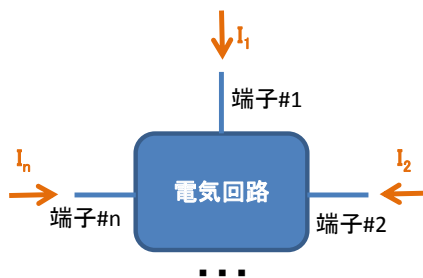
うに遮断器で母線間を接続してあります⁵⁴。

この図で、A、B 発電所などは図示してありませんが、初めの図と同一です。ですからこの図には、例えば A 発電所からの線が 2 本描かれています。実際にはこの線は三相交流の二回線送電線、すなわち $3 \times 2 = 6$ 本です。送電線の鉄塔の両側に 3 本ずつあったあの線が、このように変電所に入ってくるのです。

もっと知りたいあなたに（その 4）

<保護リレー技術で世界に貢献>

日本は第二次世界大戦に敗北した後、たいへんな努力をして世界に例を見ない戦後復興を成し遂げました。復興の過程で経済が急速に成長し、電力需要も急増しました。需要の急増に対応するためには、それに見合うだけの発電所を作り、送電線を張って、電気を需要地まで運んでこなければなりません。でもそれらの電力設備を一朝一夕に作ることはできません。費用も時間もかかるからです。それで電力システムの技術者は、不足気味の発電所や送電線を何とかやりくりして、



$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$$

図 34 キルヒホッフの電流法則

⁵⁴ このように二重化した母線構成を二重母線構成と言います。これに対し、母線が一組しかない場合を単母線構成と言います。

なるべく停電を起こさないようにするための技術開発を懸命にやりました。その代表格が保護リレー技術です。

いろいろな保護リレー技術がありますが、ここでは日本が世界に先駆けて開発し実用化した、デジタル技術による送電線電流差動保護方式について紹介してみましょう。デジタル電流差動方式です。ここでは、差動であって作動や茶道ではありません。電流差動方式とは、ある電気設備に流入した電流は、その設備が正常である限りすべて流出するという原理を使っています。厳密に言えば、設備内で生じる電氣的な損失とか電流の計測誤差などはありますが、ここでは単純化して、入った電流はすべて出ると表現してあります。

この原理は、電気回路理論にあるキルヒホッフ (Kirchhoff) の電流法則と呼ばれる法則を使っています。図 34 において、電気回路に n 個の入出力口 (端子) があったとして、そこに入り出す電流を、流入する方向をプラス (正)、流出する方向をマイナス (負) として、すべて足し合わせると合計はゼロになるという法則です。

図 34 の「電気回路」が、変電所に設置された変圧器だったとします。変圧器の入口と出口の電流を、変圧器に流れ込む電流を正 (プラス)、流れ出す方向をマイナス (負) として足し合わせれば、変圧器が正常である限り、加算結果はゼロになるはずですが、しかし、もし変圧器の内部で、絶縁不良などの不具合が起きて流入した電流がその不具合点からどこかに漏れ出たとすると、入口と出口の電流を足し合わせた結果はゼロにはならず、漏れ出した電流の大きさに相当する値になります。従って、不具合の有無を正確に判定できることになります。これが

電流差動保護方式です。ここでは保護対象を変圧器としているので、変圧器電流差動保護方式と呼ばれますが、対象

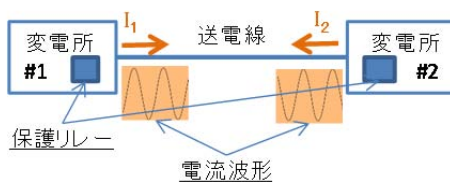


図 35 送電線の電流差動保護

を発電機にすれば、発電機電流差動保護方式になります。

では、保護の対象を図 35 のような送電線にしたらどうなるでしょうか。すなわち送電線電流差動保護方式を実現しようとしたら、どうなるのでしょうか。その場合でも、原理は同じで、送電線の両端で、送電線に流れ込む電流と、送電線から変電所などに流れ出す電流を、上のように方向を考えて足し合わせればゼロになるはずですが、もし落雷などで送電線のどこかに事故が起こり、ショートしたりして、電流が別の場所に流れ出していれば、送電線両端の電流を足し合わせてもゼロにはなりませんので、事故が起こっていることが分かるわけです。ただ、送電線では、変圧器や発電機にはなかった問題があります。

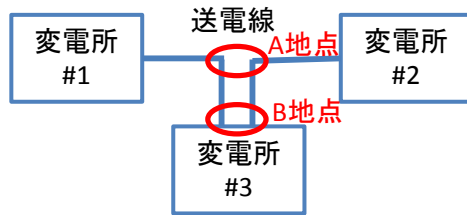
変圧器や発電機であれば、電流の出入り口（端子）はすべて一か所、すなわち変電所とか発電所の中にあります。その電流信号を集めてくるのは容易です。

でも送電線だと、両端の変電所の間には数 10 キロから 100 キロメートル、場合によるともっと遠い距離があります。そのように遠く離れた送電線両端の端子の電流信号を伝送して一か所に集めた上で電流差動演算する必要があります。電流信号は時々刻々その値が変化する交流波形です。その波形の信号伝

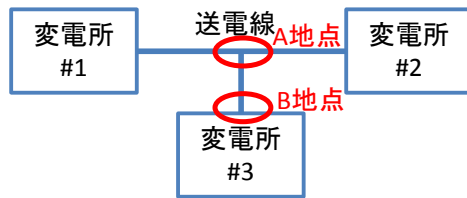
送が必要になります。

そのためには、遠く離れた点であっても同じ時刻の電流を測る必要があります。また、計測した量をデジタル化するためや信号伝送にも時間的な遅れが存在します⁵⁵。また、電流の波形を十分に元に戻せるだけのサンプリング間隔⁵⁶を確保しなければなりません。日本の保護リレー技術者は、これらの要件を満たすように、10年以上の研究開発の結果、1980年に世界で初めて実用化に成功

しました。それがデジタル方式による送電線電流差動保護方式です。これにより、送電線事故の検出能力が飛躍的に高まりました。例えば、送電線の下の木が成長して、わずかに送電線に接触し、小さな電流がそこから漏れ出てしま



(a) 2端子送電線の組み合わせ



(b) 3端子送電線

図 36 変電所間の送電線

⁵⁵ これらの時間遅れの合計が $20\mu\text{秒}$ (0.00002 秒) 以下であれば、同時とみなされます。

⁵⁶ 電流の1サイクルの波形を最低でも12分割してデジタル化します。50Hzで12分割する場合には、 $20\text{m秒}/12$ (0.0017 秒) ごとに電流波形をサンプリングして、アナログ・デジタル変換器でデジタル信号に符号化することになります。

うような、従来方式では検出が難しかった事故も、高感度で検出できるようになりました⁵⁷。

図 35 では、送電線は 2 端子で表示されていますが、原理的に 3 端子以上になっても問題なく高い正確さで送電線の異常（事故）を検出できます。これは従来の保護方式では実現できなかった特徴です。3 か所の変電所を送電線で結ぶ必要があるときに、図 36(a)図のような 2 端子送電線の組み合わせではなく、(b)図のような 3 端子送電線で結べるのですから、建設費は大幅に安くなりました。つまり、3 端子送電線にすることで、図 36 中の A B 地点間の送電線の組数が半分になります。また変電所#3 での遮断器などの機器の数も半分になりますので、建設費の削減となるわけです。

この保護リレー方式は、今では国内外で広く用いられるようになっており、日本のメーカーだけでなく海外のメーカーも装置を製作するようになっていきます。

⁵⁷ 送電線の電流差動保護は、デジタル方式に先駆けて、アナログ方式が実用化されています。いわゆる FM 電流差動保護リレーです。これも日本が世界に先駆けて実用化しました。しかし、多様な保護ニーズへの対応や、装置が自分で自分が健全な状態にあるかを監視点検する機能実現の優位性などのため、現在ではデジタル方式一本になっています。

4 電気の性質をうまく使って届ける

これまでの各章で、電気は発電所で作られ、送電線や配電線を通して、変圧器で電圧を上げたり下げたりして、電気が使われるところへ届けられることが紹介されました。ここでは、電気を届けるために、電気の性質をうまく使っていることを紹介します。

発電所で回っている発電機により作られる電気は交流の電気ですが、太陽光発電では直流で発電されます。しかし電気をたくさんのところへ配るには交流が適しているため、直流を交流に変えて配られているわけです。送るのに交流が適している理由は、効率面から考えると電力損失⁵⁸の理由もあげられます。送電の際、電気の一部は熱になって失われてしまうので、電流を減らして送る必要があります。つまり、少ない電流で効率的に送るには電圧を高くする必要があります。直流だと変圧器を使えませんが、交流だと変圧器を用いて比較的容易に電圧を上げ下げできます。この事情は、世界のどこでも同じです。このため、多数派である、交流で直接、発電する発電機の特性について紹介します。

この発電機にも 2 種類の方式がありますが、「同期発電機」という発電機を使って発電された電気について紹介します。もう一つの発電機の種類は「誘導発電機」と言いますが、数百 kW 以下の小さな発電機に使われて、全体の 1%程度以下の発

⁵⁸ 抵抗に電流が流れると、電流の二乗に比例した損失が発生します。電力は電圧と電流の掛け算になりますので、同じ電力を送るには電圧を高くして電流を小さくするのが損失を減らすのに有効です。脚注 34 (p.47) および、Vol.1 の「電気を送る」(p.12) を参照。

電しかしていませんので、ここでは省略します。ただ、電気になってしまうと、どのようにして発電されたかは関係がなくなります。しかし、これから紹介する電気の性質をうまく説明するには、同期発電機との関係で説明するのが分かりやすくなります。

交流の電気とは

交流の電気の性質を考える前に、交流の電気はどのようなものかを復習しましょう。

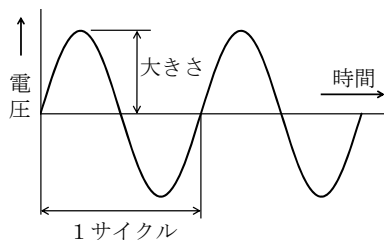


図 37 正弦波になる交流電圧波形

交流の電気の発生

日本の電力は、交流で送られています。電力システムの電圧は 1 秒間に東日本で 50 回、西日本で 60 回、上昇と下降を繰り返します。これを、電力システムは周波数 50Hz、60Hz の交流で動いていると言います。電力システムに組み込まれている発電機も交流モーターも同じ周波数で回って（動いて）いるのです。発電機の例を図 38 から図 40 に示します。発電機には、毎分 1,500 回転から 3,600 回転する高速回転のタービン⁵⁹発電

⁵⁹ タービン（英語：turbine）とは、流体が持っているエネルギーを有用な機械的動力に変換する回転式の原動機の総称です。蒸気や水な

機と、回転数がこれより低い水車発電機があります。発電機はこれらの図にあるように、大きく言えば、電気を発生する静止部にある固定子（静止部分）と、電磁石の回転子（回転する部分）から構成されています。

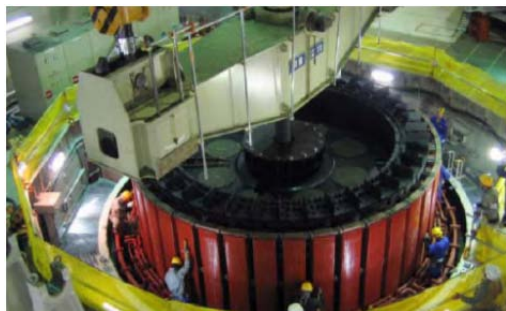


図 38 水車発電機の例

〔固定子（電気を発生する静止している部分）の中に回転子（電磁石）が挿入されているところ〕

（出典：中部電力株式会社 HP「でんきのあした 03」）



図 39 タービン発電機の例

〔手前がタービン発電機で、奥の上にパイプが乗っているのがタービン〕

（画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社）

どの各種の流体を回転体のまわりに備え付けた数枚ないし数十枚の羽根や翼に当てて高速回転させるものです。



図 40 タービン発電機の回転子例

〔電磁石になる部分。回転数が高いので直径に比べて長さが長い〕

(画像提供：三菱日立パワーシステムズ株式会社)

電力システムの重要な特徴の一つに、電力の需要量が増えたら（減ったら）、そのとき同時に発電力をそれに見合せて増やす（減らす）必要があることが挙げられます。いわゆる「需給バランス⁶⁰」をとることです。このため、電力需要の急増が見込まれるので、止まっていた発電機を回してそれを電力システムにつなぎこむことにしたとしましょう（これを「発電機を系

⁶⁰ 電力の意味では、電力システムも電気回路なので、電氣的損失を無視すれば全体の発電電力と消費電力（需要）は常に同じになっています。発電機を回す力（これをここでは「発電力」と言っています）が発電電力より小さければ、回転エネルギーを放出して回転数が減少し、周波数が下がっていきます。ただし、部分系統で考えると、その部分系統の消費電力が増加した分は、部分系統内の発電機からも供給されますが、部分系統の外の系統からも供給されます。このため、部分系統の中だけでの発電電力と消費電力のバランスを見ると、発電電力が不足しています。部分系統の「需給バランス」とは、部分系統の中だけで発電電力と消費電力のバランスをとることを言います。これがいわゆる「同時同量」という概念につながることにあります。なお、太陽光発電など回転体のない発電システムでは、消費電力が増加しても発電電力は増加しません。

統に併入する」と言います)。

電力システムの周波数は 50Hz (60Hz) ですので発電機を 50Hz (60Hz) に相当する回転数で回して電圧の周波数を 50Hz (60Hz) にします⁶¹。さらに、発電機の出口の電圧の大きさを電力システム側と同じにして、その間のスイッチ (遮断器) を閉じて、併入すればよいのでしょうか。いや、ちょっと待ってください。電力システム側の電圧も発電機側の電圧も交流ですので、上昇と下降を繰り返しています。電力システム側の電圧がプラスの最高値にあって、発電機側の電圧がマイナスの最高値にあるときに、遮断器を閉じたらどうなるでしょう……。周波数と電圧の大きさを揃えるだけでなく、電圧波形のずれがないようにして (「電圧の位相を合わせて」と言います)、発電機を系統に併入する必要があります。

実際には、50Hz (60Hz) の電力システムに対して、併入しようとする発電機の電圧の周波数を 50.05Hz (60.05Hz) 程度で回します。両方の電圧の位相の差⁶²を検出する回転式のメーターを用意しておくと、システム側と発電機側には 0.05Hz の差がありますから、メーターの針は 1 秒間に 0.05 回転、すなわち 20 秒間で 1 回転します。その針がゼロになる (両者の電圧位相がそろ) タイミングを見計らって、遮断器を閉じ、発電

61 発電機の N 極と S 極の数は 1 対とは限らず、多数の対になっていることがあります。対の数が多くなれば、回転数は低くてもよくなりますが、対の数に反比例した回転数にする必要があります。図 38 の水車発電機の回転子では、少し出っ張っている部分が磁石の N 極あるいは S 極になりますので対の数がたくさんあることがわかります。

62 電圧が一番大きくなる山と山、小さくなる谷と谷の時間的な差のことです。

機を系統に併入⁶³するのです。

併入前の発電機は、システム側の周波数よりわずかに速い周波数（回転スピード）で回っていましたが、併入後にはシステム側の動きに引きずられて、全く同じ周波数で回るようになります。これを同期化力が働いて、同じスピードで回るようになると言います。むかし、電力会社に勤めた技術者の中には、新人研修の一環でこの発電機併入操作を実際に発電所で実習する人もいました。タイミングを間違えると、大きくて重い、そしてたいへん高価な発電機を壊してしまう操作ですから、緊張して足が震えたそうです。いまは自動制御技術の進歩で、ほとんどの発電機では機械が自動的に系統併入操作を行います。

では、実際に発電機の動きについてみていきましょう。交流の電気は、図 41 に示すような（同期）発電機で作られます。赤で示した導体（通常は銅線を束ねて数 cm×数 cm の角材のようにしたもの）が埋め込まれた円筒（固定子）の中を磁石（回転子）が回転します。この磁石の回転軸は、蒸気や水の力で回されるタービンにつながれていて、同じように回転しています。磁石が回転すると、固定子の導体に電圧が図のように発生して、電気を取り出すことができます。発電機は、コイルの中で磁石を出し入れすると電気が発生する、電磁誘導⁶⁴という現象を利用しています。

63 発電機の系統への併入時には、周波数差、電圧の大きさの差、電圧の位相の差が小さくなっている必要があります。

64 イギリスの物理学者マイケル・ファラデーによって発見されました。

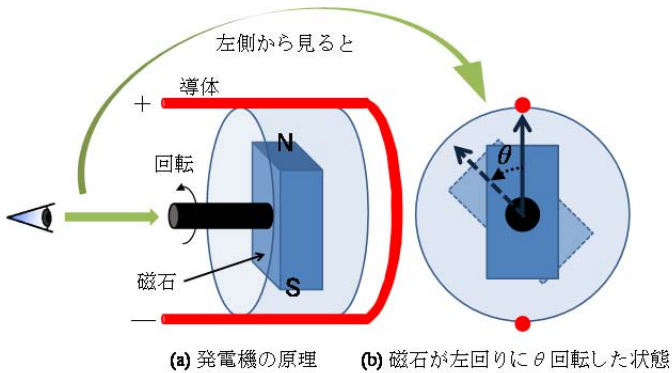
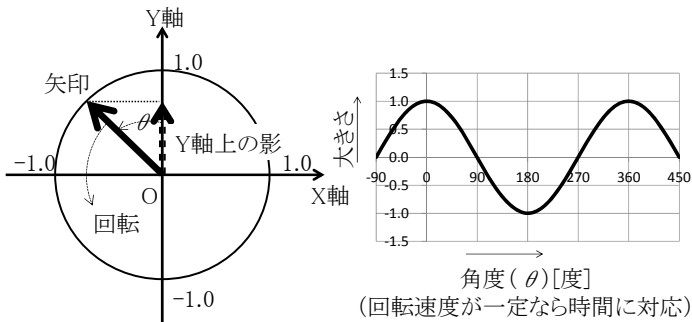


図 41 発電機（同期発電機）の簡単な原理

交流の電気は大きさが変化する

この磁石が図 41(b)のように回轉し、ある角度 θ になったときのことを考えます。すると、発生する電圧の大きさはその角度に応じて小さくなります。これを図 42 で示しますと、磁石が図 42(a)の、実線の矢印のように回轉していると考えます。



(a) 矢印が左回りに回轉 (b) Y軸上の影の角度による変化

図 42 交流の電気とは

磁石の N 極が上を向いたときが、矢印が上を向いたときに相当して、電圧が最も大きくなります。この矢印がさらに回転して、例えば角度 θ が 45 度になると、その時の電圧は、矢印が図 42(a)の Y 軸に写る影（左あるいは右から X 軸に平行な光をあてて、Y 軸に写る影）の大きさになります。

交流の電気は波のように変化する

この変化の動きは、横軸に角度をとって Y 軸に写る影の大きさを描くと、図 42(b)のようになります。プラスから同じ大きさのマイナスまで波のように周期的に変化しています。この横軸は、矢印の回転速度が一定ならば、時間と考えることができます。波の一番高い時間から次の波の一番高い時間までを一周期と言います⁶⁵。また、この波が 1 秒間に何回あるかが周波数で、その単位は Hz です。例えば、日本の東日本の電気の周波数は 50Hz です。周期は $1 \text{ (秒)} \div 50 = 0.02 \text{ 秒}$ になります。

以上のように、交流の波形は波のような動きになります。

発電機が 2 台のとき一緒に回っているか？

同期とは？

これまでは、発電機が一台の場合を示してきましたが、実際には多くの（同期）発電機が電線でつながれていると、同じように回って発電しています。このときの発電機の動きを説明するのに、発電機の種類を表す名前にある「同期」の概念が重要になります。この「同期」とは英語では、synchronous（同期

⁶⁵ 同じ波形が繰り返しているので、周期を見る点は必ずしも最高点でなくても構いません。例えば、横軸（時間軸）をマイナスからプラスによぎる交点に着目してもよいのです。

の、同期している)、synchronize (同期する)と言います。水泳のシンクロナイズドスイミング (Synchronized swimming) では、音楽に合わせて (音楽に同期して) 泳ぐことを言いますが、同期の意味は共通です。また、図 43 のように大縄跳びをしているときを考えると、みんながタイミングを合わせて跳ばないと大縄跳びは続きません。同期が重要なことの一例です。このとき、掛け声や跳んでいる隣の人の様子を見たり感じたりして、タイミングを合わせて跳ぶことが可能になります。

発電機の場合の同期とは、お互いの発電機の回転に合わせてお互いが回転していることを言います。タイミングを合わせるには、音楽や掛け声ではなく、つながれている電線を伝わる電氣的な力によります。この力は同期化力とよばれ、発電する電気の角度の差が大きくなるとこの力も大きくなってお互いを引き戻すことによって同期が保たれています。この同期の概念について、もう少し詳しくこれから紹介していきます。



図 43 大縄跳びでの同期の例

「同期」の概念をタンデム型の自転車でたとえる

この「同期」の概念についてたとえを交えて紹介しましょう。まず、図 44 に示すような 2 人乗りのタンデム型の自転車を、頭の中で思い浮かべてください。

チェーンがゴム紐の場合

実際の自転車ではチェーンホイール間はチェーンで繋がれていますが、ここでは「ゴム紐」で繋がれているとします。「ゴム紐」を考えるのは、先に紹介した同期化力とある程度似た性質を表すことができるためです。

そうしますと、前の人も後ろの人も同じ力で漕いでいるときに比べて、前の人が一瞬懸命にペダルを漕ぐと、この上側のゴム紐は伸びる（逆に下側のゴム紐は縮まる）ことになります。

これによって、
図 45 のように、
前の人 crankshaft (ペダルから力をチェーンホイールへ伝える棒) が、
後ろの crankshaft に比べて角度が進むこと
になります。

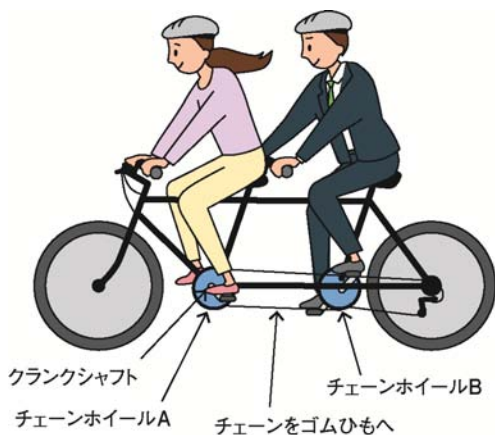
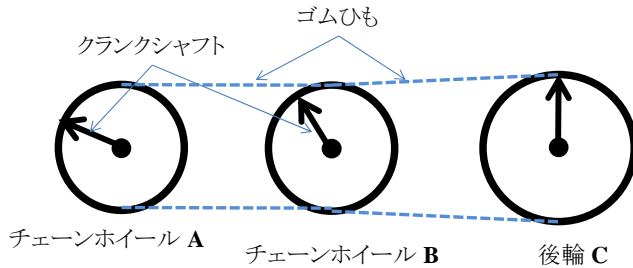


図 44 発電機（同期発電機）の簡単な原理
(タンデム自転車によるたとえ)



前の人(A)と後ろの人(B)が同じ力で自転車を漕げば、上側のゴム紐が伸びて、AのクラックシャフトはBより角度が進む

図 45 タンデム自転車のチェーンホイールと後輪の図

二人が同じ力で漕ぐと

このチェーンホイール A と B、実際に自転車を動かしている後輪の中心を合わせて描くと、図 46 のようになります。ここで、止まっているときに真上を向いている後輪のスポークにしるしを付け、またその時に A と B のクラックシャフトも真上を向いているように調整しておきます。その後、自転車を A と B の二人ともに同じ力で漕いで走っている状態を考えます。後輪のしるしを付けたスポークが真上を向いた瞬間の A と B のクラックシャフトの位置は、図 46 のようになっています。これをもう少し詳しく説明します。

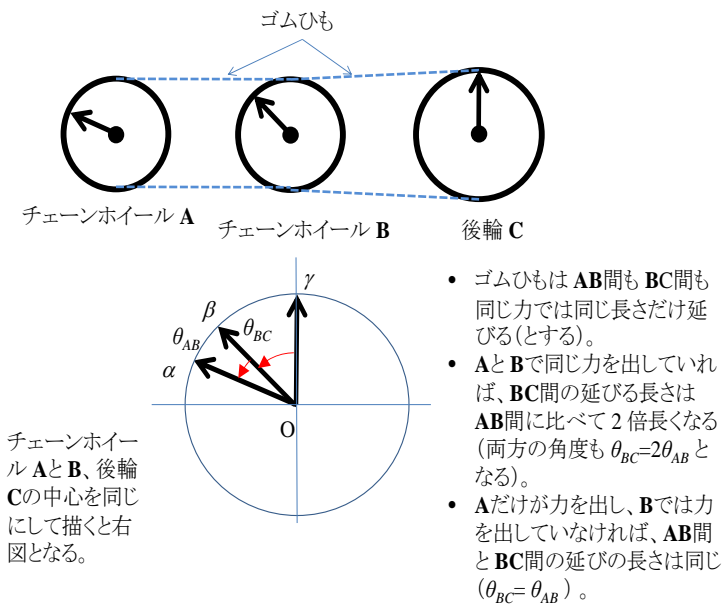


図 46 チェーンホイールと後輪の中心を同じにして描くと

まず、チェーンホイール A、B と後輪のしるしのついたスポークを表す、それぞれの矢印の先端を、 α 、 β 、 γ とします。A の人は力を出していますので、その力に応じてチェーンホイール A、B 間の上側のゴム紐が伸びます。その伸びに対応した角度 (α と β の間の角度) を θ_{AB} とします。B の人も A と同じだけの力で漕いでいれば、後輪 (C) を動かす力は 2 倍になりますので、チェーンホイール B と後輪間の上側のゴム紐は 2 倍だけ伸びます。このため、 β と γ 間の角度 θ_{BC} は θ_{AB} の 2 倍となります。このように、二人が同じ力でペダルを漕ぐと、後ろの人のチェーンホイールは後輪よりも少しだけ進んだ角度で、前の人のチェーンホイールはさらに進んだ角度で回っています。

後ろの人が漕ぐのをやめると

もし後ろの人 B がペダルを漕ぐのを全くやめてしまうと、チェーンホイール B からは力が加わりませんので、チェーンホイール A と B 間、チェーンホイール B と後輪間でのゴム紐で引っ張る力は同じになって、 θ_{AB} と θ_{BC} は同じとなります。つまり、前の人と後ろの人のチェーンホイールの角度は同じで回っています。このように、前の人と後ろの人の漕ぐ力が違っていても、力の大きさに応じてゴム紐の長さが自動的に変わって、チェーンホイール A と B の間の角度が調節されて、自転車を進めるのに協力し合っていることとなります。

発電機の場合には？

発電機の場合も同じで、発電機を回す力（水や蒸気でタービンを回す力）に応じて、ゴム紐に対応した送電線に流れる電気の大きさで、発電機同士が自動的に協力し合って発電しています。

周波数との対応は？

また、タンデム自転車の例では、チェーンホイールの回転速度（これは自転車のスピードに比例しています）が周波数に対応します。要するに、1 分間や 1 秒間に何回回転しているかが周波数ということになります。この周波数の考え方から、発電機同士の回転速度もほとんど同じになっていることが、お分かりいただけたでしょうか？

漕ぐ力が突然変わったら？

もちろん、自転車からも分かることですが、例えば前の人 A が突然一生懸命に漕ぎだして大きな力を出すと、ゴム紐が伸びるのでチェーンホイール A の回転速度が一時的に速くなった

りしますが、しばらく経つと A と B の回転速度も同じになります。これと同様に、ある発電機を回す力が大きくなると一時的にその回転速度はわずかに速くなりますが、すぐに（数秒たつと）同じ回転速度になります。ただ、ゴム紐と同じような性質をもっていますので、同じ回転速度になるまでに振動を繰り返すこともあります⁶⁶。

上り坂にさしかかると？

自転車が上り坂にさしかかると、同じ力で漕いでいるとスピードが落ちてしまいます。スピードを同じに保つには、漕ぐ力を増やす必要があります。発電機の場合には、私たちが電気をたくさん使くと、坂道を上ると同じようなことになるので、タービンを回す力が同じでは回転速度が遅くなってしまいます。つまり、周波数が低下してしまいます。このようなときには、水力発電では水の使用量を増やし、火力発電では燃料をたくさん燃やして蒸気をたくさん作り、タービンを回す力を大きくして、回転速度が一定になるようにします。

発電機同士を伝える力は？

ここまでは、タンデム自転車を例に、そのチェーンをゴム紐に代えて、発電機同士の結びつき方について紹介してきました。この場合、ゴム紐の性質として、引っ張る力が強くなるとそれに比例して伸びの長さも長くなります。その力がさらに大きくなるとゴム紐は切れてしまいます。

しかし、交流の電気で繋がっている発電機同士では、その間

⁶⁶ このため、交流でつながれていても場所ごとに周波数はわずかに違っていることがあります。p.92、93の脚注 69、70 も参照。

を繋ぐ力はもっとややこしくなっています。ここではまず、発電機が2台ある場合について、自転車のたとえを続けます。そのため、タンデム自転車ではなく、図47のような、エクササイズ用自転車の並列運転を考えてみましょう。ただ、この自転車ではBの車輪にだけ負荷装置が取り付けられており、回すのに力が必要になっています（負荷装置の値段が高いのでひとつしかない？）。自転車Aでもこの負荷装置が使えるように、車輪Aと車輪Bが連結されていますが、この連結に図48に示すように、何本かのゴム紐が使われているとします。

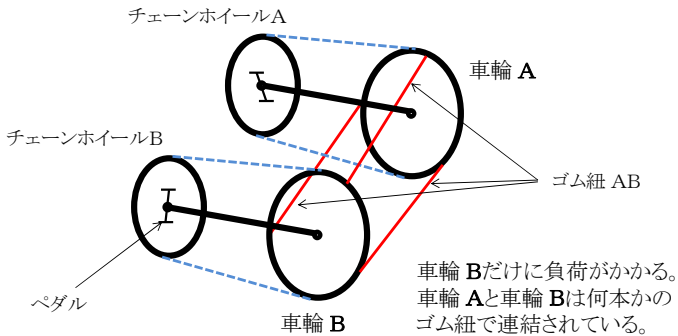


図47 エクササイズ自転車の並列運転

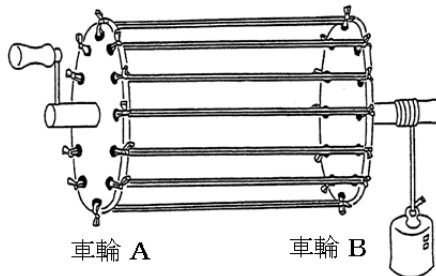


図48 車輪Aと車輪Bをつなぐゴム紐のイメージ
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

ねじれが大きくなると

自転車 A と B にそれぞれ人が乗ってペダルを漕ぐと、自転車 A の人が漕ぐ力は、車輪 A が車輪 B に対して少しねじれることで伝わります。このねじれと伝わる力の関係は図 49 のように、ねじれがあるところまでは、ねじれが大きくなるにつれて大きくなります。しかし、ねじれの大きさがあるところを超えると、伝わる力は段々と小さくなり、最後はほとんど伝わらなくなってしまいます。

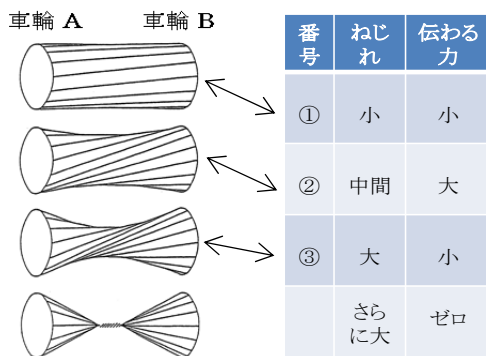


図 49 車輪 A と車輪 B 間のねじれと伝わる力の関係
(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

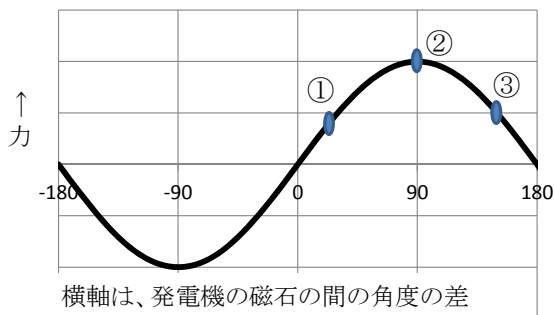


図 50 発電機の間伝わる力

発電機の間働く力

実際に発電機の間働く力は、これより少し複雑で、2台の発電機の磁石(図41)の間の角度の差が変わると、図50のように変化します。図50には、図49のねじれの大きさに対応した大まかな場所を、番号①、②、③として示しています。

図49の発電機の間伝わる力の関係は、図42(b)の交流の波の形と同じです。実は、ゴム紐のねじれと伝わる力の関係は、角度が0度から180度までの間でも、発電機の場合よりもさらに複雑になっていますが、あるところまでのねじれまでは、ねじれるほど伝わる力が大きくなり、それよりもねじれが大きくなると伝わる力が小さくなるという性質は同じです。発電機間の場合、電気だから、この関係が比較的きれいな形になっているとも言えます⁶⁷。

このように、横軸と縦軸の量との関係が、素直な比例関係になっていないことを非線形な関係と言います。これに対し、発電機同士に働く力やタンデム自転車の例であっても、角度の差が小さい場合には、伝わる力の大きさとお互いの角度の差は比例関係になっています。これを線形の関係と言います。非線形の関係の場合には、どのように動くかなどの予測や計算が難しくなります。

⁶⁷ ゴム紐のねじれと力の関係は、図50より複雑です。ここでは、大体の対応関係を示しています。また、ゴム紐のねじれが大きくなりすぎると力は伝わらなくなりますが、発電機間では、図50のように反発の力が働きます。もう少し厳密に書きますと、力は $\sin \theta$ と正弦波関数で表現されますので、 $360 \times n + 180 < \theta < 360 \times (n+1)$ (n は整数)の間は反発力が働きます。

なお、ここでの θ は電氣的な角度のことですので、送電線が機械的にねじれるわけではありません。

発電機同士を伝える力を大きくするには？

発電機の間には伝わる力は、図 50 のようにあるところ(90度)で最大になります。この力をさらに大きくするにはどうしたらよいでしょうか？ それには四つの方法があります。

四つの方法

図 47 のエクササイズ自転車の並列運転でのゴム紐でつないで力を伝えている場合を考えると、

- ① ゴム紐の数を増やす
- ② ゴム紐を強くする、太くする
- ③ 二つの車輪の間の長さを縮める
(ゴム紐の長さも短くする)
- ④ 車輪(直径)を大きくする

の方法があると推測されます。それぞれについて詳しく説明していきましょう。

- ① ゴム紐の数を増やす

電線を増やすことに対応して、最大の力を大きくします。

- ② ゴム紐を太くする

送電線の太さを太くすることに対応しますが、実は交流の電気の場合はほとんど影響がありません。この最大の力が電気抵抗で決まっていれば、電線を太くすれば抵抗も減りますので、力は大きくできます。しかし、交流の電気の場合は、最大の力は電線の抵抗ではなく、インダクタンスで決まっています。インダクタンスというのは、電線をコイルのように巻くと、電気の変化を妨げるような性質を持ちますが、その性質の強さを言います。電線の場合、その距離も長くなりますので、コイルのように

巻かれているわけではありませんが、このインダクタンスの性質が強まっているのです。

③ ゴム紐を短くする

図 51 のように、二つの車輪の間の長さを縮めれば、確かに伝えることのできる最大の力を、大きくすることができます。これは、電気の場合も同じです。しかし、地理上の距離を変えるわけにはいきませんので、この方法を採用することは不可能です。

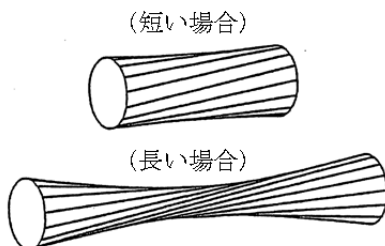


図 51 車輪 A と車輪 B 間の長さが変わる場合

(画像提供：一般財団法人電力中央研究所)

④ 車輪（直径）を大きくする

車輪の直径を片方だけでも大きくすれば、伝える力を大きくできます。この方法は電気の場合にも採用できます。それは、電圧の大きさを高くすることです。電圧の大きさを大きく変えるには、変圧器を使います。遠くの発電所から電気を送る場合に、変圧器を使って、数万 V の電圧を数十万 V の電圧まで高くして送るのは、このためです。また、車輪を大きくする他の方法は、発電機の磁石の強さを強くすることです。変圧器のように大幅に電圧を変えることはできませんが、少しは調節することができます。発電機の磁石は、普通は永久磁石ではなく電磁石なので、電磁石に流す電流を強くすれば、電磁石の強さも

強くなり、発電機で発電する電圧も高くなります。

無効電力⁶⁸の働きとは

この電圧を高くする能力をもった電力を「無効電力」と言います。無駄な電気という意味ではなく、このように大切な能力をもっています。これに対し、ゴム紐を通して伝える力に相当する電力を「有効電力」と言います。実際に仕事をするのは「有効電力」ですが、「無効電力」はスムーズに仕事をさせるのにどうしても必要となってくる電力です。

有効電力の単位は W(ワット)、無効電力の単位は var(ヴァール)と言いますが、日常的には W だけが使われています。この有効電力を何時間分使ったかを表すのが、Wh(ワットアワー)で、電気料金算定の基礎になります。

多数の発電機がつながれている場合は？

日本や海外でも、たいいていのところには電気が通じています。この電気は多数の発電機で発電され、お互いが電線でつながりあっています。このつながり方は、一か所から一か所を見れば、これまで紹介したような、発電機同士を結び付けている交流の電気の力で結びついているわけです。

このようなわけで、交流の電気でつながっているところでは、周波数はほとんど同じになっています⁶⁹。

⁶⁸ もっと知りたいあなたに(その5) <交流の電力> (p.98) を参照。

⁶⁹ 「漕ぐ力が突然変わったら？」 (p.85) でタンデム自転車の例で示したように、ある発電機の発電する力が突然増加すると、その発電機はちょっと速く回りだします。そうするとほかの発電機に対する角度が大きくなってきますので、電気出力も大きくなって回転速度が落ちてきます。このようにして振動しながらだんだんと新しい角度に落ち着きます。周波数は近くの発電機の回転数で大体は決まるので、周波

「同期」の働きと「自己制御性」

また、「発電機が2台のとき一緒に回っているか？」で説明したように、周波数が下がったので、どこかの発電機の燃料を増やして出力を増やしたとすると、交流の電気の「同期」という性質から、自動的に発電機同士で調整し合い、新しい状態に落ち着きます。これを「自己制御性」があると言います。

周波数が違う場合は？

日本の場合、東日本と西日本では周波数が違い50Hzと60Hzになっています。このように周波数が違う場合には、発電機同士が一緒に回ることができません（同期がとれません）。このため、いったん片方の交流を直流にして、その直流を他方の周波数に合う交流にしてつなぐ必要があります。

直流でつなぐのはどのような場合？

このように周波数が異なれば、いったん直流にしてつなぐ必要がありますが、このほかにも同じ周波数同士でも直流の利点をいかしてつなぐ場合もあります。例えば、北海道と本州の場合には、津軽海峡がありますので、海底ケーブルの連系線を使って、直流の電気をつないでいます。このため、北海道と本州では連系線の直流の電気を制御して50Hzの周波数にしようとしています⁷⁰。日本では他にも、四国と本州をつなぐ二ルートの送電

数も場所によって少しだけ異なってきます。ただし、数十秒間の平均をとれば、電線で交流でつながっている限り同じ周波数となります。
70 ここで周波数が異なっているというのは、前のページで、交流でつながっている場合に場所によってわずかに周波数が異なっていることがあるのとは意味が違います。直流だけでつながっている場合には、両方の系統の周波数を同じにしようとして直流の電気を制御しても、いろいろな制約から常に一緒にすることは難しいためです。

線の片方のルートや、北陸と中部をつなぐところにも使われています。基本は交流ですが、直流には交流では得られない利点があり、これを上手く利用しているわけです⁷¹。

雷が落ちると？

平穏な一日と、雷などによって停電が起こるような場合の、電気の伝わり方の違いについて紹介します。

平穏な一日での電気の伝わり方

平穏な一日では、使う電気の量が時間によって増えたり減ったりしますが、大きく変わりそうな場合には、発電する発電機の数を増やしたり減らしたりします。これは、運転員が電気の使用量の予測をして、調整しているわけです。さらに、自動的な制御で周波数を一定にするようにもしています。個々の発電機では、自分の周波数を見ながら、周波数が下がればたくさん発電するようにしています。

このように、つねに発電機の発電量や、電気の流れ方は変わっていますが、上の「同期」の働きによる「自己制御性」によって、勝手に新しいバランスをとっています。

⁷¹ 直流でつなぐ主な利点は次の通りです。まず、長い海峡があると送電鉄塔を建てられないので海底ケーブルを使います。ケーブルでは、交流の電気の場合、余計な電流（充電電流と言います）がたくさん流れますが、直流では流れません。次に、直流ですと、交流のような「同期」による「自己制御性」が働きません。これは交流の利点の一つでもあります。系統が複雑になると電気の流れが複雑になってしまいます。直流の場合は、制御で電気の流れを決められるので、単純になります。また、両方の系統の周波数が異なっても直流を介すれば電気をつなぐことができます。最後に、絶縁がちょっと楽になります。直流の短所は、両側に直流と交流の変換装置が必要になってコストがかかることや変圧器を使えないこと、直流を遮断できる遮断器がないことなどです。

発電が足りない場合

しかし、発電機の数や燃料が足りなくて、発電できる電気の量が不足しますと、周波数が低下してしまいますので、発電機が運転できなくなり停電となってしまいます。このようなことを防ぐためには、東日本大震災の後にしばらく実行された計画（輪番）停電が必要になります。また、このような状態には、送電線が使えなくなり、ある部分が切り離されてしまった場合にも発生することがあります。

落雷などで送電線が使えなくなる場合

発電機の数や燃料が十分であっても、途中の送電線などで送ることのできる電気の量が制限される場合にも停電が発生することがあります。例えば、送電線に雷などが落ちると、ショートして

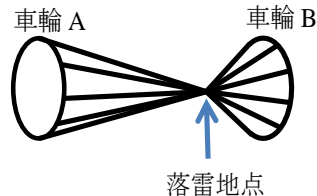


図 52 線路の途中に落雷があつてショートした状態

しまいます。これはちょうど図 52 のようにゴム紐の途中を突然ギュッと縮めてしまうことに相当します。このような状態をいつまでも続けておくことはできませんので、落雷があつた送電線はスイッチ（送電線両端にある遮断器）で電氣的に切り離します。そうするとその送電線は使えなくなります。

電気の回り込み

このような場合、使えなくなった送電線を通っていた電気が、別の送電線を通して流れるようになります。これは、電気のもつ「自己制御性」によって自動的になされます。自動的に回り込んだ電気の量が多いと、回り込まれた通り道も将棋倒しのよ

うに使えなくなっていき、最後は全く電気の通り道がなくなっ
てしまい、大きな停電になることがあります。この状況は、道
路での車の通行状況にも似ています。

雷が落ちなくても停電はおこる

雷が落ちなくても大きな停電は起こりえる

落雷をきっかけにした、その後の発電機の動きや電気の通り
方、停電の発生原因について説明してきました。しかし、落雷
がなくても、大きな停電になることがあります。もちろん、東
日本大震災の時のように大きな地震や、大雪などの自然災害に
よっても停電になることはあります。しかし、そのような徴候
が何もないような時にも、大きな停電になってしまったことも
何回かありました。

欧州での例

例えば、2006年の欧州の大規模停電では、一部区域ごとで
はありますが、欧州の西半分のあちこちでの停電になってしま
いました。このきっかけは、運転員にとっては日常的に行って
いる、ある送電線の停止でした。その後、電気の回り込みによ
って大きな停電へと拡大していきました。

北米と日本での例

2003年の北米北東部の停電や、私たちの国での1987年の関
東地域の停電⁷²では、明確なきっかけとなった事故や徴候はな

⁷² 北米北東部での停電は、要因の一つずつを取り出せば何の問題に
もならないような複数の要因が重なって、最終的には6,000万kW(東
京電力の最大電力とほぼ同じ)にも及ぶ大きな停電となりました。ま
た、1987年7月の関東地域の停電では280万戸にも及ぶ停電とな
りました。これらの停電では、明確なきっかけとなった事故や徴候はな

かったのですが、大きな停電になってしまいました。この2件の停電では、電圧が大幅に低下してしまい、電気の通り道としての性能が大幅に低下したことも主要な原因として挙げられています。

その背景には電気の「自己制御性」

大きな停電になってしまう背景には、広い意味では電気のもつ「自己制御性」と非線形な特性があります。これらの特性は、電気のもつ物理法則に支配されていますので、人間が思うように動かすことはできません。

このように、電気の特性は非常に有用な性質ではありますが、いったん、ある範囲を超えた大きなショックに発展しますと、人間の手をつけられないような状況になり、大きな停電を引き起こしてしまうこともあるわけです。

かったのですが、猛暑のため、昼休み後に急速に電力需要が伸びていったのが理由とも考えられています。停電の要因や進展状況、対策などについて、ここで紹介するには長くなりすぎますので省略しますが、Web や文献で調べることができます。

もっと知りたいあなたに（その5）

<交流の電力>

交流の電力には、3種類があって、中には胡散臭^{うさんくさ}そうな名前の電力があります。実際に仕事をする電力は有効電力と言いますが、無効電力と皮相電力という一見訳のわからない電力もあります。これは中国語でも同じで、それぞれ、有功功率（有効な電力）、无功功率（無効な電力）、視在功率（見かけの電力）と呼んでいます（括弧内はそれぞれの簡単な意味です）。これらは英語やラテン語圏では、**active power**（活発な電力）、**reactive power**（反動電力あるいは、反応電力）、**apparent power**（見かけの電力）となっていて、**reactive power**には日本語や中国語の無効な電力という意味はありません。

ここでは、この3種類の電力の役割について、ちょっと調べてみましょう。

(1) 有効電力と電圧や電流の実効値～抵抗の場合

直流では、電力は一種類しかありません。電圧と電流を掛け合わせたのが電力となります。この電力は、(力) 仕事をしたり、物を温めたりします。

交流でも、この考え方は同じで、電圧と電流を瞬時瞬時に掛け合わせて、それらを足し合わせて有効電力とします。図 53 に交流の電圧を抵抗にかけたときの電流と電力を示します（電力は上の図の実線です）。交流での有効電力は、このように大きくなったり小さくなったりと脈打っています⁷³。この回数は電圧や電流の周波数の2倍の周波数になります。そこで、交流

⁷³ 三相交流（「3本一組で電気を送る送電線」(p.25)）の場合には、この脈打ちは無くなって、直流の場合のように一定になります。

の有効電力は、この脈打っている電力の平均をとることになっています。平均をとることを厳密に言いますと、抵抗をつないだときと同じ発熱量になることを言います。図 53 では、電力の色づけ部分の面積になります。

例えば、直流の場合には、オームの法則により 2Ω (オーム) の抵抗に $4V$ (ボルト) の直流電圧を加えると $2A$ (アンペア) の電流が流れるので、抵抗が消費する (有効) 電力は $8W$ (ワット) になります⁷⁴。

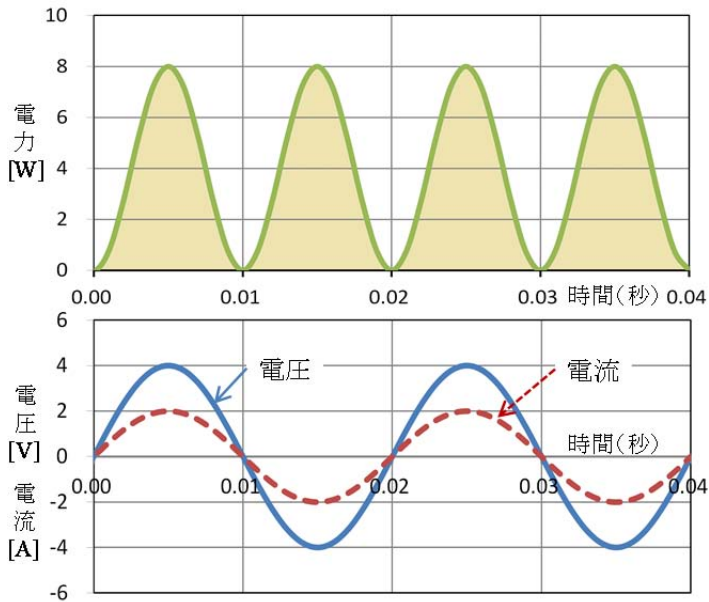


図 53 抵抗で消費される交流の電力

これと同じように、 50Hz の交流の電圧 (最大電圧が $4V$) を同じ抵抗に加えると、最大の電流は $2A$ で、電力は図 53 のようになります。この電力の平均を見ますと $8W$ ではなく、その

⁷⁴ 直流では、電力 = 電圧 × 電流になります。 $8[W] = 4[V] \times 2[A]$

半分の $4W$ になっています。このように最大の電圧や電流の大きさを直流と同じ感覚で使ってしまうと、有効電力が 2 倍になってしまいます。このため、交流の最大電圧や最大電流の大きさを、ルート 2 (二乗すると 2 になる数字; $\sqrt{2}=1.414\cdots$) で割って、直流の電圧と電流のように扱います。これを電圧や電流の実効値と呼びます。家庭での電圧が $100V$ や $200V$ という場合には、この実効値電圧で表現していることとなります。このため、交流で $100V$ と言った時には、その最大値は $141V$ になっています。この実効値電圧や実効値電流を使うことで、電圧と電流を掛け算して電力にすることができることになりました。

(2) 無効電力～コイルの場合

図 53 では、抵抗に交流電圧がかかった場合の話をしてきましたが、コイルにかかった場合はどうなるのでしょうか？ コイルの電流は、電圧がかかっても抵抗の時のようにはすぐには追いつけません。電流の変化をさまたげる作用があるためです⁷⁵。

このため、抵抗の場合と同じく、 4Ω (オーム⁷⁶) のコイルに、最大電圧が $4V$ の $50Hz$ の交流の電圧をかけた場合のコイルに流れる電流を図 54 に示します。図(a)には、時間が 0 のとき ($t=0$) にスイッチが入った直後付近の電圧と電流、瞬間瞬間の電圧と電流を掛け算した抵抗での有効電力に対応した量の動きを示しています。電流は電圧がかかると、それに対応して大

⁷⁵ レンツの法則 (Lenz's Law)

⁷⁶ 交流の場合にも、オームの法則(電圧を電流で割ると一定値になる)が成り立ちます。電圧と電流の大きさの関係が直流の場合と同じになる量をリアクタンスと言います(単位は Ω)。ただ、このリアクタンスは周波数によって変化し、コイルでは周波数に比例します。

きくなろうとしますが、時間的に遅れて大きくなります。結局電圧にやや遅れた形で電流が変化することになります。

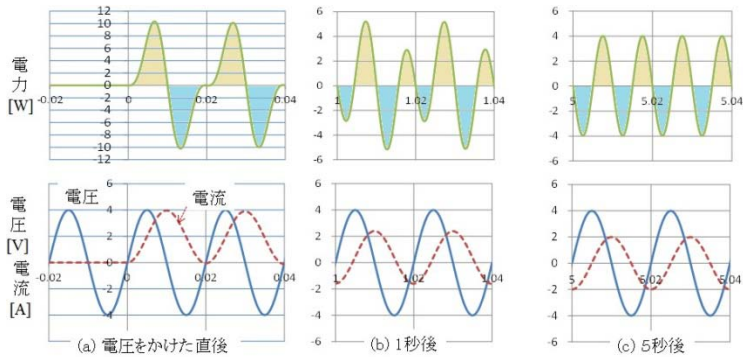
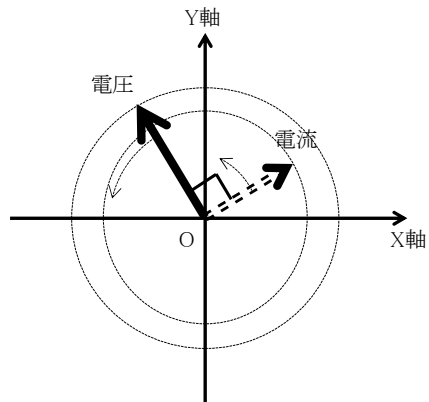


図 54 コイルに交流の電圧をかけた時の電圧、電流、電力の関係

図 54 の(a)の電圧と電流の図を見てください。電圧をかけた直後のこの時間あたりでは、電流はほぼ正の値になっています(縦軸の2[A]を中心にして上下に振動しています)。このコイルの例では、ごく小さな抵抗を考えていますので、電流の平均値はだんだんとゼロになっていきます(縦軸の0[A]を中心にした振動に近づいていきます)。その途中を示したのが、図 54(b)になります。さらに時



電流が電圧より90度遅れて回転

図 55 コイルにかかる電圧と流れる電流との関係

さらに時

間が経過すると、図 54(c)のように、電流はゼロ[A]を中心に変動していて、平均はゼロになっています。しかし、その最大となる点は、電圧に比べて遅れています。この例では、5.005 秒で電圧が最大になっているのに対し、電流の最大点は 5.01 秒になっています。この遅れは、1 サイクルを 360 度としますと、図 55 に示すように 90 度になります。(時間と角度の関係については、「交流の電気は波のように変化する」(p.80)を参照してください)。

では、電力の波形はどのようになっているのでしょうか？ それを図 54 の上側の図に示しました。図 54(a)の電圧がかかった直後や、電流の平均がまだゼロになっていない時(図 54(b))には、電力の最大値も大きくなったり小さくなったりしています。しかし、電流の平均がゼロになった図 54(c)では、最大値は一定になっていますが、抵抗の場合と同じく 2 倍の周波数で脈打っています。ただ、その平均(中心)がゼロになっていることが大きく異なります。このため、コイルで消費している有効電力はゼロということになります。

しかし、電圧がかかっていて電流も流れていますので、何らかの電力として定義しておく必要があります。エネルギーとしてみると、消費と発生を交互に繰り返していますので、reactive power (反応電力)が適当と思いますが、日本語や中国語では、仕事としては何もしていない(エネルギーがゼロ)ということで無効電力と名付けられています。

この無効電力は、コイルの場合には、電圧(実効値)と電流(実効値)の掛け算で与えられ、単位は var (ヴァール)と言います。図 54(c)の例では、電圧が $4/\sqrt{2}$ [V] で電流が $2/\sqrt{2}$ [A] な

ので、 $4[\text{var}]$ となります。

(3) 電流の足し算

抵抗を2本並列につないだ、図56(a)で、それぞれの抵抗に流れる電流を $3[\text{A}]$ と $4[\text{A}]$ としますと、この合計の電流は $7[\text{A}]$ になります。

2本の抵抗の内、 $4[\text{A}]$ の電流が流れている抵抗を同じ大きさの電流が流れるコイルに取り換えると(図56(b))、合計の電流はどうなるでしょうか？電流を足したグラフを図57(a)に示します。このグラフで、抵抗に流れる $3[\text{A}]$ は実効値ですので、最大値はその1.41倍の $4.24[\text{A}]$ になっています。コイルの電流は、実効値が $4[\text{A}]$ で、最大値が $5.66[\text{A}]$ になっています。電流を足し合わせることは、瞬間瞬間ごとに足し合わせるようになります。抵抗とコイルに流れる電流の最大になる瞬間は違いますので、合計電流の最大値は両方の最大値どうしを足し合わせた値より小さくなります。この場合には、最大値では $9.90[\text{A}]$ (実効値は $7[\text{A}]$)ではなく $7.07[\text{A}]$ (実効値は $5[\text{A}]$)になっています。

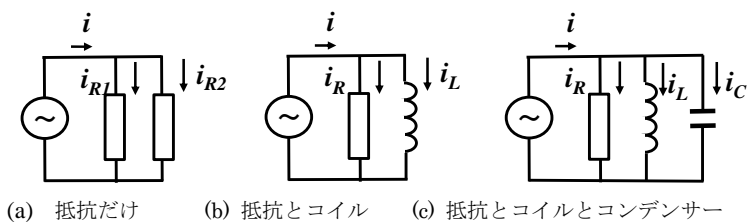
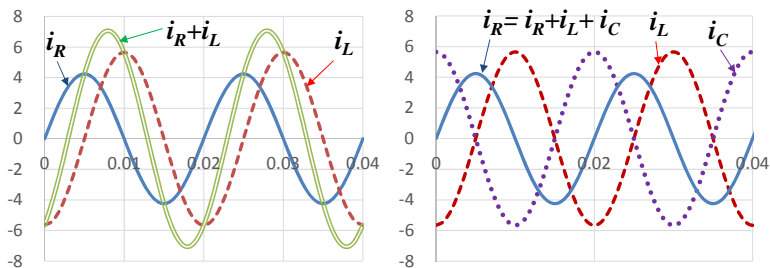


図56 電流の足し算はどうなるでしょう



(a) 抵抗とコイルの場合 (b) 抵抗とコイルとコンデンサーの場合

図 57 電流の足し算

(4) コンデンサーとの組み合わせ

次に、図 56(b)に並列にコイルと同じ大きさの電流が流れるコンデンサーを付け加えた図 56(c)の場合はどうなるでしょうか？コンデンサーは、コイルの電圧と電流を入れ替えた特性になります。ということは、同じ電圧をかけると、電流は反対の動きをすることになります。このため、図 57(b)に示すように、コイルに流れる電流とコンデンサーに流れる電流は打ち消し合ってしまう、その合計はゼロになってしまいます。つまり、抵抗とコイルとコンデンサーに流れる電流の和は、抵抗だけがつながれている場合と同じになります。

(5) 交流電流の足し算～まとめ

このように、電流の足し算は、同じ種類（抵抗、コイル、コンデンサー）同士の場合には普通の足し算で良いのですが、種類が違う場合には、普通の足し算の結果よりは小さくなります。この電流どうしの合計は、図 58 のように次の三平方の定理（ピタゴラスの定理）の関係で表されます。

$$\begin{aligned}
 (\text{合計の電流の大きさ})^2 &= (\text{抵抗に流れる電流})^2 + \\
 &\quad (\text{コイルに流れる電流} - \text{コンデンサーに流れる電流})^2
 \end{aligned}$$

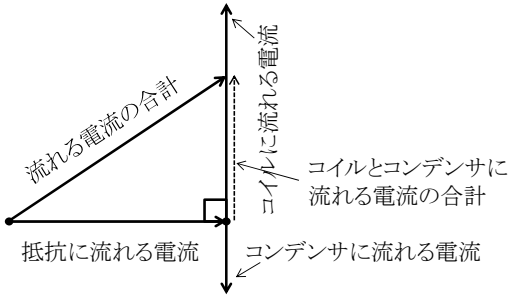


図 58 交流の電流の足し算

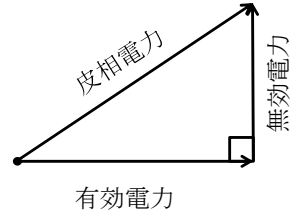


図 59 交流の電力の関係

ところで、図 57(a)で示した電流の合計で分かるように、普通の場合、電流は抵抗だけやコイルだけの電流とは異なり、きちんと電圧の波形と同じであったり、90 度遅れているわけではありません。そのような場合には、図 56(a)のように、電圧と同じ成分と 90 度遅れた成分に分解することができます。このように分解することで、電力も以下のように分けることができるわけです。

有効電力 = 電圧 ×

{電圧と同じ電流成分 (抵抗に流れる電流成分)}

無効電力 = 電圧 ×

{電圧に 90 度遅れた電流成分 (コイルやコンデンサーに流れる電流成分)}

なお、コンデンサーで消費する無効電力はコイルと逆に、符号がマイナスになります。これは無効電力を発生していることを意味します。無効電力を発生するのは、コンデンサーのほか、(同期) 発電機や、特別に作られたパワーエレクトロニク

ス装置があります⁷⁷。

(6) 皮相電力と力率

電圧の大きさと流れている電流の大きさを分解しないでそのまま掛けあわせた電力を皮相電力と言います。これは、単純に電圧の大きさと電流の大きさを掛けただけですので、文字通り「うわべの電力」「表面的な電力」ということになります。この単位は VA（ボルトアンペアまたはヴァイエイ）です。

また、有効電力と皮相電力の比（＝有効電力÷皮相電力）を、皮相電力の中で仕事をする電力の割合という意味から、力率と定義されています⁷⁸。

(7) 交流の電力の間の関係

これら 3 種類の交流の電力は、電流の場合と同じように、図 59 の関係になっており、以下のように三平方の定理の関係が成り立っています⁷⁹。

(皮相電力)²＝

(有効電力)²＋(コイルの無効電力－コンデンサーの

無効電力)²

電流の足し算の最後に、家庭での契約電流以上の電流を使用

⁷⁷ 同期発電機は無効電力の発生と消費の両方ができます。誘導発電機は無効電力を消費するだけです。太陽光発電や風力発電でも発生と消費の両方ができるものがあります。無効電力の発生と消費の専用装置としては、SVC (Static var Compensator) や STATCOM (Static Synchronous Compensator) などが 있습니다。

⁷⁸ コイルの電流成分が強い場合を遅れ力率、コンデンサーの成分が強い場合を進み力率と言います。

⁷⁹ もっと知りたいあなたに(その 6)「交流の電気は三角関数を使えば分かりやすくなる」(p.108)を参照。

した場合に電気を止めるアンペアブレーカー⁸⁰について、補足しておきます。家庭で使用する電気機器のほとんどは、無効電力を消費する機器です。このため、皮相電力から定まる電流の和が契約電流以下になるようにしておく必要があります⁸¹。また機種によっては、起動時などの短時間は大きな電流が流れることがありますので、これらも考慮しておく必要があります⁸²。

(8) 無効電力の働き

無効電力の意味は上に述べたとおりですが、その働きについて簡単に述べておきます。

コイルがあると無効電力を消費します。モーターにはコイルが使われていますので、無効電力を消費しています。この無効電力は、磁界を作ることで、モーターを回す力の元になっています。

次に、TV やパソコンなど交流を直流にしてから電気を使っている機器では、直流にするのにやはり無効電力が必要になります。

さらに、積極的に無効電力を使う場合があります。それは、次のような場合です。まず、電気を使う機器のほぼすべて⁸³が無効電力を消費します（コイルと同じ性質）ので、電流の大き

⁸⁰ アンペアブレーカーをつける電力会社とつけない会社があります。ここでは付ける場合について記します。

⁸¹ 200V 機器の場合は電流を 2 倍に換算して足します。あるいは、100V 機器でも 200V 機器でも、その皮相電力を足し算して、100V×契約電流よりも小さくするようにします。

⁸² 詳しくは

<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/basic/ampere/ampere01-j.html>

⁸³ オイルヒーターのように、電気を直接熱として利用する場合は、有効電力だけを使っています。

さが有効電力だけを使う場合より大きくなります。電流が大きくなると、電圧が下がります。電流の大きさは小さいほど良いわけです。そこで、無効電力を補償するように、無効電力を発生するコンデンサーを使います。これで、電流の大きさが有効電力だけの電流の大きさに近づいて小さくなりますので、電圧の低下も小さくなるわけです。

このようにして、交流の送電・配電では、電圧をどんなところでもほとんど同じ大きさにできることとなります⁸⁴。家庭の電圧がほぼ 100[V]⁸⁵になるように調整されているのも、このような無効電力の働きによるものです。

もっと知りたいあなたに（その6）

<交流の電気は三角関数を使えば分かりやすくなる>

交流の電気は、高校で学習する三角関数をつかえば、より分かりやすくなります。

例えば、抵抗に流れる電流とコイルやコンデンサーに流れる電流の合計と有効電力や無効電力との関係は、以下のようにまとめられます。

⁸⁴ 送電線や配電線には、抵抗とコイル成分とコンデンサー成分があります。架空線（空中に張られている線）では、コンデンサー成分よりコイル成分が大きいので、架空線では無効電力が消費されています。このため、コンデンサーを使ってこの消費分を補償できるわけです。地中線ではコンデンサー成分が相対的に大きくなりますので、逆に夜間などで電気の消費が少ないときに電圧が上がりすぎる場合があります。また、昼間の力率を大きくするために工場などではコンデンサーで補償することがありますが、夜間に電力消費が少なくなってもそのままになっている場合があります。そのような場合には、無効電力を消費するコイルを使って電圧を下げるようになります。

⁸⁵ 我が国では、100[V]では 95～107[V]の範囲、200[V]では 182～222[V]の範囲にするよう、法律で決まっています。

以下では、抵抗とコイルが並列に接続されている場合を想定します。

まず、電圧を $\sqrt{2}v\sin(\omega t)$ とすれば、抵抗に流れる電流は電圧と同相になるので $\sqrt{2}i_R\sin(\omega t)$ 、コイルに流れる電流は 90° 遅れるので $\sqrt{2}i_L\sin(\omega t - 90^\circ)$ と表されます。ただし、ここで、 v や i_R 、 i_L は実効値であり、 ω は交流の角周波数 ($\omega = 2\pi f\alpha$ 、 f は周波数[Hz]、 α は度への換算係数= $180/\pi$)、 t は時間[秒]です。

したがって、抵抗とコイルに流れる電流の合計は、

$$\sqrt{2}i_R\sin(\omega t) + \sqrt{2}i_L\sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2}\sqrt{i_R^2 + i_L^2}\sin(\omega t - \varphi)$$

(ただし、 $\tan \varphi = i_L / i_R$)

有効電力 P は電圧と抵抗に流れる電流の大きさの掛け算、無効電力 Q は電圧とコイルに流れる電流の大きさの掛け算、皮相電力 S は電圧と合計電流の大きさの掛け算なので、以下のようになります。

$$P = vi_R, \quad Q = vi_L, \quad S = v\sqrt{i_R^2 + i_L^2}$$

以上より、抵抗に流れる電流とコイルに流れる電流とこれらの合計電流との間、また、有効電力と無効電力と皮相電力との間に三平方の定理が成り立つことが示されました。

今度は逆に、ある機器にかかる実効値電圧の大きさが v で、流れている電流はその大きさが i (実効値) で位相が φ ^{ファイ} だけ遅れている場合の、機器が消費している有効電力と無効電力を求めてみましょう。

電圧を $\sqrt{2}v\sin(\omega t)$ とすれば、電流は $\sqrt{2}i\sin(\omega t - \varphi)$ となるので、これを以下のように分解します。

$$\begin{aligned}\sqrt{2}i \sin (\omega t - \varphi) &= \sqrt{2}i\{\sin (\omega t) \cos \varphi - \cos (\omega t) \sin \varphi\} \\ &= \sqrt{2}i\{\sin (\omega t) \cos \varphi + \sin (\omega t - 90^\circ) \sin \varphi\}\end{aligned}$$

そうすると、右辺の第1項が抵抗成分に流れる電流で、第2項がコイル成分に流れる電流に相当します。それぞれの実効値の大きさは、 $i \cos \varphi$ と $i \sin \varphi$ になるので、消費している有効電力 P と無効電力 Q は次のようになります。

$$P = vi \cos \varphi, \quad Q = vi \sin \varphi$$

なお、無効電力は位相が進んでいる場合 ($-180^\circ < \varphi < 0^\circ$) には負になります。これはコンデンサー成分が強いことを表しています。

また、皮相電力 S は、電圧と電流の大きさを掛けたただけなので以下ようになります。

$$S = vi = vi \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

本冊子の企画趣旨について

2011年3月11日に発生した東日本大震災で、多くの発電所や変電所の運転が止まり、電気が供給されなくなる事態が発生しました。電気は、スイッチを入れればいつでも、どこでも、欲しいだけ使える状態が当たり前になっていましたので、市民生活にも社会活動にも大きく影響しましたが、その一方で人々の電気に対する関心が高まりました。

電気は便利なものですが、エネルギー資源が有限であるという制約の中で、正しく、賢く使うべきものでもあります。電気学会は、電気に対する理解を広く一般の皆様に深めていただくことが、重要で有用なことと考えます。この「電気の知識を深めようシリーズ」は、電気をやさしく、かつ正しい内容で理解いただき、電気に対する知識を深め、親しみをさらに増していただくために発行するものです。

2016年8月

電気の知識を深めようシリーズ刊行ワーキンググループ

電気の知識を深めようシリーズ

刊行ワーキンググループメンバー

主査 石井 彰三

副主査 大来 雄二 ※

副主査 新藤 孝敏 ※

委員 伊与田 功 委員 白田 誠次郎

委員 桂井 誠 ※ 委員 亀田 秀之 ※

委員 神津 薫 ※ 委員 酒井 祐之

委員 佐藤 之彦 委員 塩原 亮一

委員 高田 達雄 ※ 委員 高橋 一弘 ※

委員 谷口 元 委員 谷口 治人 ※

委員 長谷川 有貴 委員 前島 正裕

委員 雪田 和人

(名前の後の※は本冊子担当者を示す)

電気の知識を深めようシリーズ Vol.5

電気を送る・配る

2016年9月30日 初版発行

非売品

編集者	一般社団法人 電気学会 電気の知識を深めようシリーズ 刊行ワーキンググループ
発行者	一般社団法人 電気学会 代表者 酒井祐之 〒102-0076 東京都千代田区五番町 6-2 Tel 03-3221-7312 Fax 03-3221-3704 http://www.iee.jp
印刷所	株式会社 太平印刷社

落丁・乱丁はお取替いたします。

©2016 Japan by Denki-gakkai

Printed in Japan



一般社団法人 電気学会

