

鉄道における電気の流れ

奥井 明伸
電力技術研究部(き電) 研究室長



おくい あきのぶ

はじめに

電気鉄道の歴史は古く、1881年にはドイツにおいて直流き電方式による営業運転が、1898年にはスイスにおいて三相交流き電方式による営業運転が始まっています¹⁾。電気鉄道で電気を動かす電気には、直流と交流という性質の異なる2種類の電気が使われていることは一般に知られていることですが、交流には周波数や位相といった概念の他、無効電力や有効電力といったわかりにくい物理量も存在します。電気技術者は、最も効率的で経済的な電力の供給方法を模索してきましたが、歴史的な経緯も多々あり紆余曲折を経て今日に至っていることも事実です。本稿では、鉄道における電気について、電気の多様性、発電所から電気鉄道用変電所までの電気の流れ、そして電気鉄道用変電所から電気車までの電気の流れや電気鉄道で電気を使う場合の課題について概説します。

電気の種類と特徴

電気車の電動機を回転させたり、製鉄所の電気炉で鉄材を熔解したり、家庭の灯具を点灯したりする電気は、エネルギーの一形態と言えますが、このエネルギーは送電という形で長い距離を短時間で運ぶことが可能で、水の位置エネルギーや化石燃料を燃焼することで得られる熱エネルギーを発電機で電気エネルギーに変換することで、送電線や配電線を通して需要家のもとに送ることができるのです。しかしながら、電気エネルギーを作る、送る、消費するといったそれぞれの段階では、幾つかの性質や形を変えてやる必要があります。目的に応じた形、性質に整えることで、効率的に使うことができるようになるのです。本章では電気の多様性について概説します。

直流と交流

電気は、電池で使われる「直流」と一般家庭用電源としても使われる「交流」とに大別されます。前者は電圧・電流が時間的に不変な電気のこと、後者は、時間的に電圧・

電流が一定の周期で変動する電気と言えます。なお、交流の周波数については、一般に50Hzと60Hzの2種類が使われていますが、ドイツやオーストリアの電気鉄道では、16.7Hzの交流も使用されています。また、エジソンにより電灯用電力の供給が始まった黎明期は、110Vの直流が使用されていましたが、その後、電動機に交流が適していること、交流は変圧器により容易に昇圧・降圧が可能なることから、その後、交流による電力供給が一般的になりました。

ところで、図1に示すとおり、電気には、電圧、電流、周波数、位相といった物理的な違いが存在します。一般的な送電線の電圧は50万ボルトを超えるものもありますが、変圧器により適切な電圧に降圧(昇圧)され、需要家のもとに送られます。また、異なる周波数の電気が同一の送電線で送られることはなく、関東地方で発電された50Hzの電気を関西地方まで送電して直接使うこともありません。電気には、発電、送電、配電、消費といった目的に応じた適切な形態があるのです。

電圧降下と送電電力

直流、交流を問わず、電気を送電線や電力ケーブル等で送る場合、どうしても送電線の抵抗やインダクタンスにより送電端電圧に比べ受電端電圧が低下してしまいます(以下「電圧降下」と呼びます)。

比較的距離の短い送電線は一般に図2に示すような抵抗

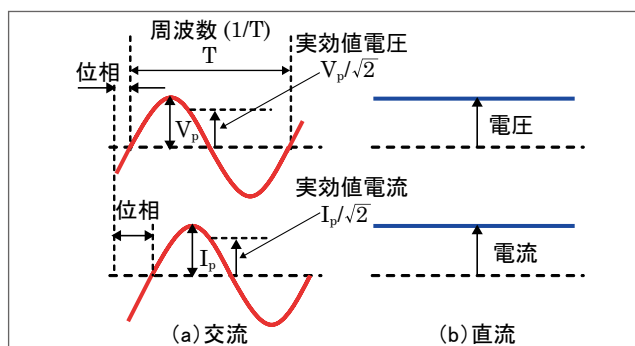


図1 直流と交流の違い

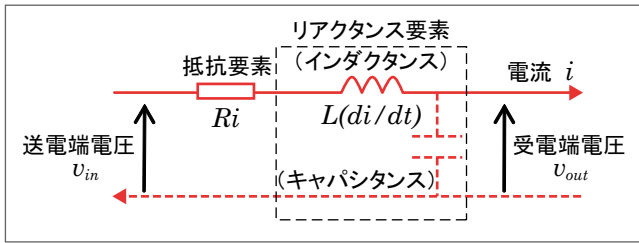


図2 抵抗とリアクタンスによる電圧降下

とインダクタンスで構成される集中定数回路で表すことができます。但し、送電距離が長くなるとインダクタンス要素に加えて並列のキャパシタンス要素を考慮する必要があるとともに、分布定数回路としての取り扱いが必要になります。

図2に示す送電線の送電端電圧 v_{in} と受電端電圧 v_{out} の間には以下のような関係が成立します。

$$v_{out} = v_{in} - \left(Ri + L \frac{di}{dt} \right)$$

上式から、電流が時間的に不変である直流の場合には、電圧降下は抵抗による電圧降下分 Ri のみとなりますが、時間的に変動する交流の場合には、抵抗分による電圧降下とインダクタンスによる電圧降下がベクトル的に加わることとなります。電圧降下という観点から比較すると、交流より直流の方が効率的と言えます。

電圧 v と電流 i の積 vi を一般に「電力」といいますが、直流の場合には単位時間あたりに負荷に供給されるエネルギーを表し、単位はワット [W] または [J/s] を用います。交流の場合には、「皮相電力」と呼び、ワットを用いずボルトアンペア [VA] を用います。交流の電圧に対する電流の位相を θ とした場合、 $\cos\theta$ を「有効電力」と呼び、 $\sin\theta$ を「無効電力」と呼び、皮相電力はこれら二つを合わせたもので、有効電力は送電端から受電端に向かって供給される電力で単位は [W] で表され、無効電力はリアクタンスと電源との間でのエネルギーの授受を表すもので、エネルギーの消費はなく、単位はバル [var] で表されます。

同じ電力を送電する場合には、電圧を上げて電流を下げるとともに、無効電力を抑制することで、送電線での電圧降下や損失の低減が図れます。

三相交流と単相交流

一般の家庭用電源には、単相三線式の交流が使用されています。単相三線式とは、アース線（接地線）に対して $\pm 100V$ で電気を供給するもので、コンセントや灯具は $100V$ 、空調用等は $200V$ を選択使用しています。

送電線や配電線は、三本一組の電線で構成される三相交

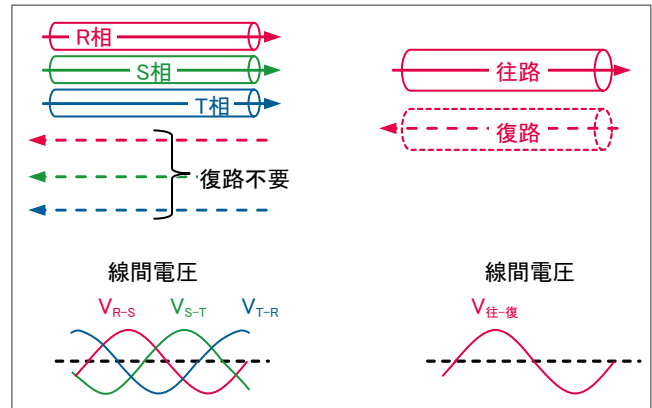


図3 三相交流と単相交流

流方式が採用されています。図3に単相交流方式と三相交流方式を示します。三相交流方式とは、三本の電線路に周波数が等しく位相が均等に 120° ずれた三相き電力を加えるもので、三相交流方式は単相交流方式に比べて同じ電力を送るのに送電線の断面積が小さくできるため送電線が節約できること、瞬時電力を脈動なく一定に保ちうること、電動機等を使用する上で回転磁界を作るのに都合が良いこと等から、大電力を扱うのに適した方式といえます。

電気鉄道における電気の流れ

発電所から電気鉄道用変電所までの電気の流れ

図4に、発電所から電気車までの電気の流れを示します。水力発電所や火力発電所の三相発電機で発電された電気は三相交流として送電線を通して需要家が集まる都市近傍まで送られます。発電機の電圧は $6.6kV \sim 22kV$ 程度ですが²⁾、送電用変圧器を用いて送電に適した電圧である $22kV$ から $275kV$ あるいは $500kV$ まで昇圧し、送電線網を通じて都市近傍や需要家近傍の送電用・配電用変電所まで送電します。送電用・配電用変電所では需要家が使用するのに適した電圧まで降圧し、さらに下位の配電用変電所や電気鉄道用変電所に送電します。

電気鉄道には「直流き電方式」と「交流き電方式」がありますが、直流き電方式では一般に $1500V$ （路面電車、一部の地下鉄等： $750V$ 、 $600V$ ）が、交流き電方式では $20kV$ または $25kV$ の電圧が標準電圧として使用されています。運転頻度の高い線区や地下鉄では電気車コストや絶縁隔離の面から直流き電方式が有利であり、新幹線や都市間輸送等では変電間隔が長く、大電力が供給できる交流き電方式が有利です。

直流き電方式の電気の流れ

直流き電方式は、一般的にき電電圧が低いため、電気車

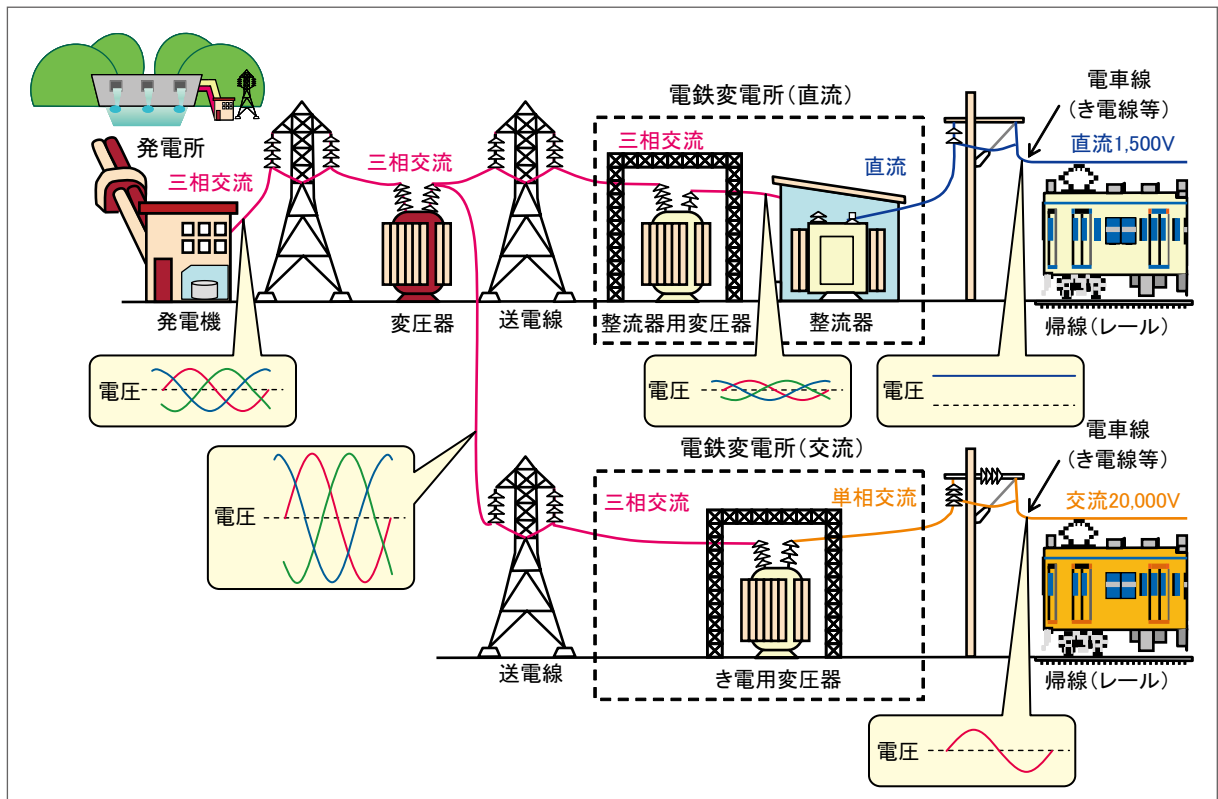


図4 発電所から電気車までの電気の流れ

の主電動機である直流直巻電動機が電車線電圧で使用でき、電気車の設備が簡単になるという利点がありました。

電車線の標準電圧を1500Vとする直流き電方式の場合、図5に示すように送電線・配電線(6.6kV～66kV)を經由して電気鉄道用変電所に送られてきた三相交流は整流器用変圧器で1200Vまで降圧され、三相全波整流回路であるシリコン整流器に供給されます。シリコン整流器は三相交流を電源周波数の6n倍の高調波成分を含む直流に変換することができます。シリコン整流器の出力は、図5に示すようにほぼ一定の直流電圧を維持しますが、整流器の等価内部抵抗により電気車電流が増加すると徐々に低下します。

図6にき電回路の一例を示します。変電所の整流器の出力は、故障電流の遮断やき電区分を行うために設けられた遮断器を介してき電線に接続されています。

き電線はさらに隣接の変電所の整流器と接続されており、変電所の整流器がき電線を介して並列に接続されたかたちになっています。これを「並列き電方式」と呼びます。並列き電方式では、一編成の電気車に対して複数の変電所から電力が供給されることになります。一方、き電線とトロリ線は、一定長さごとに(JRの場合には一般的に250m)電氣的に接続されています(き電分岐装置)。き電線から供給される電力は、き電分岐装置を通してトロリ線に供給され、電気車はこれをパンタグラフで集電します。一方、帰線路は、一般的にレールが併用され、電気は電気車の車

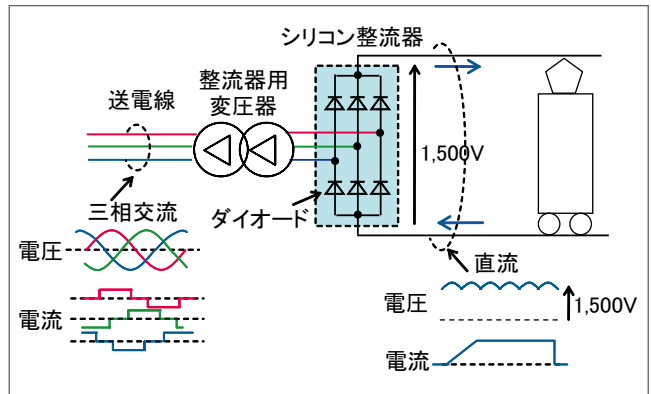


図5 直流き電方式による電力供給

輪からレールを通して変電所に戻ります。

図5に示すように、シリコン整流器の交流側である送電線には多くの高調波成分を含む矩形波電流が流れます。こうした高調波電流は、発電機や他の需要家に影響するため、今日では、30度位相の異なる整流器用変圧器に接続された2台のシリコン整流器を直並列接続することで高調波の低減が図られています。

交流き電方式の電気の流れ

交流き電方式には幾つかの方式がありますが、我が国では、一般に図7に示すように送電線・配電線網(66kV～275kV)を經由して電気鉄道用変電所に送られてきた三相交流はき電用変圧器でき電回路に適した電圧に降圧

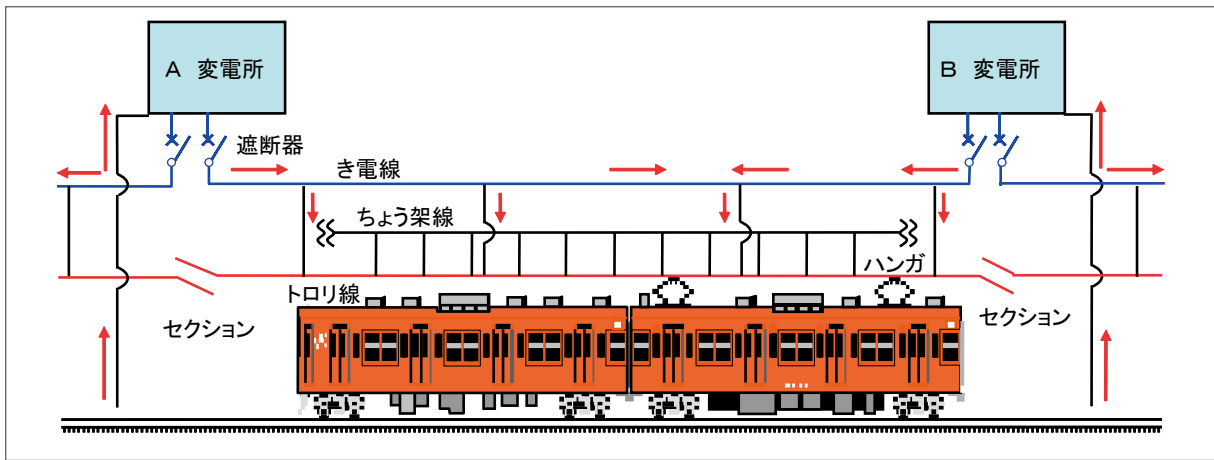


図6 直流き電方式のき電回路

(40kV, 50kV) されるとともに、位相が 90° 異なる2つの単相交流に変換されます。これは、三相交流から直接単相の電力をとった場合、三相側に逆相電流が流れて不平衡が生じるため、スコット結線変圧器等を使用することで不平衡を生じにくくしています。

一方、き電回路は一般的にはATき電回路またはBTき電回路と呼ばれる方式が使われます。図7には、便宜的にATき電回路とBTき電回路が混在する例を示します。これらのき電方式では、電気はトロリ線とレールの他、き電線または負き電線の三線路で供給されます。両方式とも通信線路に対する誘導障害を軽減する目的で、単巻変圧器(AT)や吸上変圧器(BT)を用いてレールに流れる電流の区間を限定し、大地に漏洩する電流を低減しています。さらにATき電回路はトロリ線電圧の2倍の電圧で電気が送れるため大電力を供給するのに適しています。

図7に示すとおり、電気は、主にトロリ線とき電線、またはトロリ線と負き電線で送電されます。電気車で集電された電気は、車輪を介していったんレールに戻りますが、近傍のATまたはBTで吸上げられて、き電線または負き電線を介して変電所に戻ります。

一方、先に示したとおり、交流には有効電力と無効電力が存在しますが、電気車力行時に電流の位相が電圧に対して遅れた場合には遅相の無効電力が発生し、き電電圧が低下します。逆に電気車回生時に電流の位相が電圧に対して進んだ場合には、進相の無効電力が発生し、電圧が上昇します。こうした無効電力の増加はき電回路の電圧変動を伴うのみならず、受電電圧も変動させるため、無効電力を補償する静止形無効電力補償装置(SVC)等の調相設備が必要になる場合があります。近年、自励式整流器を搭載した車両の導入により無効電力の発生が抑制できるようになったため、調相設備はなくなりつつあります。

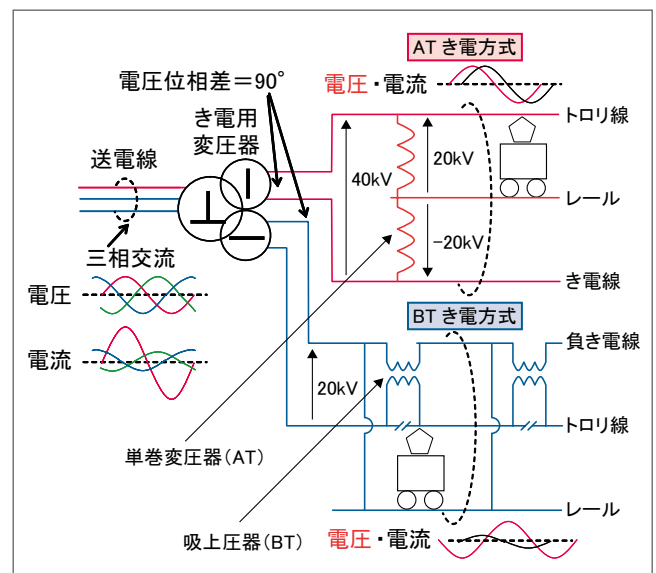


図7 交流き電方式による電力供給

まとめ

鉄道における電気の流れについて、電気の多様性を交えながら概説しました。バッテリーや燃料電池で駆動する電気車の開発も進む昨今、将来、き電回路を必要としない電気鉄道が現れる日が来るかもしれませんが、その一方で、電車線とパンタグラフによる電力供給手段は非常に効率の良い方法でもあります。当分は、損失やコストの低減を図りながら、さらなる高速化を目標に技術開発が進むものと考えます。[RRR]

文献

- 1) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007
- 2) 電気学会：電気工学ハンドブック，1988