

鉄道あれこれ9

世界の電力網(交流の周波数)は、レールの幅と同じ様に帝国主義の時代を深く反映している。
～道路は左側通行から右側通行に変更できるが、交流の周波数は変えられない～

香川大学医師会 原 量 宏

鉄道は大電力を使うため、その国の電力供給体制に関しての理解が重要です。そこで世界の電力網をみると、大きくユーラシア大陸の50ヘルツと南北アメリカ大陸の60ヘルツにわかれており、さらに同じ50ヘルツでも欧州とロシア・中国では電力網が完全に分断されており、その成立の歴史的背景を考えると大変興味深いです。中でも、同じ50ヘルツ同士ですが、バルト3国はEUへの加盟(2004年)を契機に、ほぼ10年の準備期間をかけて2025年に、ウクライナは戦争をきっかけに全く準備なしに、2022年に一気にロシアの電力網から欧州の電力網に切り替えたことは、世界の歴史にも残る大きな出来事と思われます。

24. 世界の電力供給網と交流の周波数

これまでは、いかにして電気機関車、電車にスムーズに電力を供給するか、さらに直流電化から交流電化への流れに関して、技術的な観点から書いてきましたが、今回は鉄道関連と少し話題が離れますが、電力供給に関する技術的問題点、さらにどの様にして国全体を統一する電力網が出来上がったかに関して、歴史的、政治的な観点から考えてみたいと思います。

電力の供給法には直流での送電と交流での送電がありますが、歴史的には、あの発明家で超有名なエジソンまでが関係していたことは大変興味深いです。

子供の頃学校で習ったボルタの電池は当然直流ですし、また最近の太陽光発電も直流ですが、風力発電は周波数が大幅に変化する交流です。皆様は直流の方が直感的に理解しやすいと思います。しかし現在世界中の電力網は交流になっていますので、なぜ理解しにくい交流送電が主流になったのかを考えてみたいと思います。

1) 直流送電と交流送電

・エジソンが推進した直流配電システム

発明家で有名なエジソンは、1879年に白熱電球

を開発して、ニューヨークの街路灯と家庭の電灯に電力供給を始めました。ただしその際、白熱電球に使いやすい低い電圧(110ボルト)の直流であったため、短距離でも電圧降下が生じてしまい、発電所から送る距離は長くても数キロメートルに限界で、そのため発電所を市の中心部に作る必要がありました。

・テスラが開発した交流配電システム

一方1880年代後半には、テスラは交流による配電システムを開発しました。交流は変圧器で容易に電圧を上下に変化させることができるため、高電圧での長距離送電(電流が少なくよいため、長距離でも電圧降下が少ない)を可能にし、発電所を郊外に置くことができるなど長所が多く、直流送電システムを完全に駆逐して現在まで続いています。

・なぜ高圧での送電が有利か

ここでおさらいになりますが、中学校で電気の電力(パワー)は電圧×電流($W = E \times I$)、電圧は電流×抵抗($E = I \times R$)と習ったと思います。同じ電力であれば電圧が高いほど電流は少なくて済みます。送電線の抵抗(R)が同じであれば、電圧降下は電流が少ないほど小さくなるため、長距離の送電では高圧が望ましいわけです。現在日本では電力網の基本部分は50万ボルト(海外では100万ボルトも有)の高圧を用いています。実にエジソンが用いた約100ボルトの5,000倍の電圧です。

・そもそも発電機で発電される電気は発電機の構造から必然的に交流

発電機では基本的に磁石をコイルの間で回転させて電流を得るため、そのままでは必然的に交流となります。エジソンが用いた直流発電機で得られる電流は、一定の電圧の直流ではなく、実際には交流発電機で得られた交流を整流して得られた脈流だったのです。

(脈流とは、交流のサイン波のマイナス側をプラス側に反転したもので、電池で得られる様な一定の電圧ではなく、脈拍の様に上下に変動する波

のことです。脈流を完全な直流にするには、コンデンサやコイルを用いた平滑回路が必要ですが、エジソンの時代には、効率よい平滑回路がありませんでした。)

・当初発電機を回すエネルギーは火力で、その後水力が使われるようになった。

本来発電機を回すエネルギーは水車でもよいはずですが、直流発電では距離の関係で市内に作る必要があり、蒸気機関で得られる水蒸気を用いてタービンを回す方式、要するに火力発電でした。しかし交流で高圧の送電が可能になると、ナイアガラに水力発電所が作られ、遠隔地へ大電力を送れる様になり、世界中に水力発電所が作られました。

その後時代の変遷により、水力発電から火力発電、さらに原子力発電に主力が移り、最近では太陽光発電、風力発電に力がそそがれています。

・エジソンは物理が不得意で交流の利点を理解できなかった？

発明に関しては天才的なエジソンが、なぜ直流送電に強くこだわったかに関しては諸説ありますが、エジソンは物理学が不得意で、交流の電磁気学的理論を十分理解していなかったためともいわれています。また交流の高電圧は危険と考えていた様です。

2) 世界の交流の周波数

・交流の周波数は50ヘルツと60ヘルツになぜ決まったか。

交流が使われ始めた初期には、25ヘルツから133ヘルツまで多数(約8種類も)ありましたが、高い周波数では変圧器や誘導モーターを作りにくいこと、また長距離の送電が難しくなることから、中間的な周波数に落ち着き、ドイツでは50ヘルツ、最終的に米国では60ヘルツが選ばれました。現在ユーラシア大陸の50ヘルツと南北アメリカ大陸の60ヘルツに大きく分かれています。

・日本は先進国としては珍しく50ヘルツと60ヘルツの両方を使っている稀有な国。

日本は世界でも珍しく、東日本が50ヘルツ、西日本が60ヘルツに分かれています。その理由は、明治時代に東京はドイツから、大阪は米国から発電機を導入したため、当時のお役人の電気の知識が足らなかったためとされています。

東日本でも佐渡島は60ヘルツとなっていますが、金山開発のための発電機が60ヘルツだったためです。随筆2で書きましたが、日本では異なる周波数を自由自在に使いこなす技術が進み、家電製品はもちろん発電機など工業製品の輸出力が付きました。

・朝鮮半島(韓国、北朝鮮)と台湾は60ヘルツ。

欧州諸国を含めて、ユーラシア大陸の中国とロシアは50ヘルツですが、なぜか北朝鮮と韓国は60ヘルツです。その原因は、日本の統治時代に、朝鮮半島は西日本に近いので60ヘルツの発電機を導入したことが始まりとされ歴史を感じます。ちなみに同様の経緯で台湾も60ヘルツです。

日本が戦前に鴨緑江に作った水豊ダム(当時東洋一)では、朝鮮半島向けに60ヘルツ、旧満州向けに50ヘルツで発電していて、その状況は現在まで続いています。

北朝鮮は中国、ロシアと周波数が異なるため電力の供給を受けにくく、電力供給体制が大変厳しい状況にある様です。

以上のことから一旦導入された交流の周波数は、道路の右側・左側通行と異なり変更しにくいことがわかります。

(朝鮮半島、台湾、沖縄では、第2次世界大戦後に日本の左側通行から右側通行に変更し、沖縄ではさらにもう一度右側通行から左側通行に戻した経緯がある。)

3) 交流発電機相互の連携と全国規模・国際規模の電力網の構築

・複数の交流発電機を並列に接続することは技術的に大変難しい。

交流での送電網が大規模になると、複数の異なる発電所の発電機を並列に接続する必要があります。乾電池や蓄電池の様に、電圧の変動がほとんどない直流では、簡単に並列に接続できますが、交流の場合、電圧と周波数はもちろん、サイン波の位相まで完全に一致させる(同期させる)必要があります、技術的に大変難しいとされます。

大勢でおみこしを担ぐ場合に、掛け声をかけて全員の担ぐタイミングを一致させることに似ています。

・交流発電機は一端接続されると、すべてが同じ

周波数で発電する様になる。

ここで大変興味深いことは、交流発電機は相互に接続する時は難しいのですが、一旦接続されると、相互に同じ周波数の電気を発電（発電機に同期化力が作用する）する様になります。それで、一定の地域の多数の発電機が相互に接続されると、あたかも1つの巨大な発電機が回っている状況になります。

・地域の発電所相互の連携から国全体、そして複数の国の大規模な連携へ

初めは近隣の発電所相互の連携でしたが、徐々に1つの国全体の発電所が一体化され、さらに時代の進行とともに、複数の国の大規模な連携が実現しています。

現在はロシアを除く欧州のすべての国（正確には、海で隔てられているイギリスと北欧諸国は別）が交流の位相まで同期して接続されています。まさに国全体が、同じリズムで息遣いをしている様で感慨深いです。

その意味で、先進国で2つの周波数を用いている日本は、大変珍しい国と言えます。

・石油やLNGは備蓄ができるが、電力は備蓄できないため、瞬時に切断され得る。

エネルギー確保は国の安全保障の根幹です。石油やLNGはタンカーやパイプラインで送ることができ、ある程度備蓄が可能です。しかし電力は保存が不可能で、しかも瞬時に切断できるため、政治理念が完全に一致する国同士でないと安心して接続はできません。

すでに述べましたが、国の安全保障のため、バルト3国とウクライナがロシアの電力系統から欧州の電力系統に切り替えたことは、世界の文明史に残る大きな出来事と思われま

・どの様に交流の周波数を調節しているか。

ところで、交流の周波数をどの様にコントロールしているかに関してです。まず消費地での使用電力が増えると、その分発電機を回すために必要な力（トルク）が増大するため、そのままでは回転数が下がり電圧と周波数が下がってきます。電力会社は数分単位、あるいは30分単位で周波数の変動をみながら、水力発電所の水量を、あるいは火力発電所の燃料の供給を増やします。自動車のアクセルでエンジンの回転数を調整することと一

緒です。1つの発電機での説明をしましたが、実際には接続しているすべての発電機が連携していますので、どの発電機をどの様にコントロールするかは、厳密なシミュレーションの元に行われています。簡単に言えば、細かい変動には水力発電の水量の調整、ゆっくりでよい場合には火力発電のバルブ調整、あまり変動しない電力消費の基本的部分は大型の火力発電所や原子力発電が担います。

4) 直流送電、高電圧直流送電（HVDC、25～50万ボルト）の復活

これまで交流送電の利点ばかりを説明してきましたが、交流送電にも弱点があります。随筆3で書きました様に、VVVFインバータ制御に代表されるパワー半導体の開発により、交流と直流の間を自由自在に変換できる時代になり、超高压の直流送電（HVDC）が可能となり、海底での送電や、周波数の異なる地域間の送電に利用される様になっています。

・海底ケーブルを使う場合には、直流でないとも効率よく電力を送れない。

交流送電では、原則三相交流を使うため3本の送電線が必要であること、かつ3本の送電線が相互に近づく（擦り合わす）と、電線相互の間に静電容量（コンデンサの作用）が生じて、交流では電流がその間を流れてしまっ、長距離では送電効率が大幅に落ちてしまいます。特に海中の送電用ケーブルでは、電線相互の距離が近いと静電容量が大変大きくなってしまい、送電時の損失が大変大きくなります。その点高電圧の直流送電では、電線は2本でよく、しかも損失が少ないため、交流に代わって復活しています。

・海を隔てた国・地域、あるいは周波数の異なる地域間は高電圧直流送電で連携される。

欧州諸国（大陸側）とイギリス、北欧諸国の間は、高電圧直流送電で連携しています。

日本国内でも本州と北海道は高電圧直流送電で連携しており、さらに周波数の異なる50ヘルツ、60ヘルツの地域間も直流送電で連携しています。日本国内の電力系統に関しては、次回で触れたいと思います。

（次回も思いつくまま鉄道のテーマに関して書きたいと思いますのでご期待ください。）