

鉄道あれこれ10

鉄道の直流電化、交流電化で長年かけて培われた技術がなければ、最近急速に増えているEV、PHVの自動車は到底実現不可能であった。

～鉄道の直流、交流電化のために開発された技術は、太陽光発電、風力発電の導入にも役立っている。～

香川大学医師会 原 量 宏

随筆9で述べた様に、世界各国は100年以上をかけて、交流の技術的問題点を徐々に解決し、全国規模の電力網を作り上げ、さらに国境を越えた大規模な電力網が出来上がっています。そこに新たな問題として出てきたのが、直流で発電する太陽光発電と周波数が非常に不安定な交流の風力発電です。太陽光発電は、日中のしかも天候の良い時しか発電できず、風力発電は、風があれば昼夜関係なく発電できますが、電圧と周波数が非常に不安定です。そのため、直流と交流を自由自在に変換する技術が本質的に重要になります。

直流と交流の相互変換技術は、鉄道のVVVFインバータ制御と深く関係しており、さらに昔から鉄道で積極的に利用されている発電ブレーキ、回生ブレーキの技術と基本的には同じものです。また最近大変注目されている自動車のEV、PHVは、鉄道で開発された技術がほぼそのまま使われており、鉄道での技術開発がいかに役立っているかがわかります。

25. 交流の難しさ、理解の難しいのはどこからくるか

皆様、理科や物理の時間に、直流はオームの法則がわかれば簡単に理解できたのに、交流になったとたん一気に難しくなったことを覚えていると思います。なぜ難しいかと言うと、交流では1秒間に50回から60回、サインカーブの形でプラスになったりマイナスになったりするだけでなく、突然コイルとコンデンサがでてきて、コイルでは交流の場合電流が流れにくくなり、電圧の増加より電流の増加が遅れ、コンデンサでは電圧はまだ増加しないうちに電流が先に流れ始めて、コンデンサの中に電気(電荷)がたまるにつれて、電圧が増加します。要するにコイルでは電圧に較べて電流の変化(位相)が遅れて、コンデンサでは電圧より電流の変化(位相)が進むことになります。交流の場合、電力を考えるとさらにややこしくな

ります。電力は電圧×電流なので、電圧と電流の位相が異なると、電力の効率が悪くなり、力率(りきりつ)と言う概念が出てきますし、力率を改善するためのコンデンサの利用が出てきます。交流電化ではこういった技術を自由に使いこなす必要があるため、鉄道で培われた技術が現在の電力網だけでなく、社会のあらゆる分野に還元されています。

1) 電界と磁界の関係、宇宙は電界と磁界、そして電波(電磁波)に満ち満ちている。

そもそもなぜこんなに不思議な現象が起きてくるかですが、それは宇宙に電界と磁界が満ち満ちているからです。電界と磁界の相互の関係を理解すると、コンデンサとコイルの性質を理解でき、さらに交流に関して目からうろこの様に理解できます。

・コイル

電流(電子)が電線の中を直線状に動く時に、電線の周囲に同心円状に磁界が生じます。ただしその際、電流の強さが変化しようとする、それを変化させない様にする逆の磁力が生じ、その結果逆の電圧(逆起電力)が生じます。逆の電圧は、磁力の変化する速度(要するに微分の値、交流のサイン波であればコサイン波)に比例します。直線状の電線をコイル状に巻くと、電線の周囲の磁界が統合されて巻き数分の強い磁界になる(理科の実験で作った電磁石)わけです。コイルの中に鉄やコバルトなど磁石になる物質(強磁性体)を入れるとさらに強くなります。この性質から、電圧より電流が遅れる(電圧より電流の位相が遅れる)ことになります。

・コンデンサ

コンデンサは、例えば2枚の銀紙がごく近い距離で(絶縁物を通して)相互に面している簡単な構造です。コンデンサに電圧をかけると、プラスとマイナスで引き合っ、電気がたまります。交流の電圧をかけると、たとえ電圧が低くてもどん

どんプラスとマイナスで引き合って（電子が流れて）、2枚の電極の間に電子が多くたまるにつれて高い電圧をかけないと流れにくくなります。この性質から、電圧より電流が先行する（電圧より電流の位相が進む）こととなります。

・コイルとコンデンサ（と抵抗）は電子回路の基本的な素子

コイルとコンデンサを組み合わせると共振現象を利用して必要とする周波数の交流が得られるので、その微弱な電流を、増幅作用をもつ素子（昔は真空管、その後トランジスタ、現在は集積回路（IC））で増幅することにより、電波を発信する放送局、電波を受信する受信機、そしてオーディオアンプなどあらゆる機能を実現できます。さらに電流をオンオフ的に処理（デジタル処理）することによりコンピュータが実現し、大電力を扱えるパワー半導体の利用により、VVVFインバータ制御による在来線の電車や新幹線、そして最近のEV、PHVが実現しています。

・電波（電磁波）は電界と磁界の変化の繰り返し

交流の周波数がどんどん高くなって行くと、電流が変化するとその周りの磁界が変化し、磁界が変化するとその周りの電界が変化する、といったことを次々と繰り返し、空中にどんどん進む様になり、これが電波（電磁波）とよばれます。電波は真空中でも進むので、宇宙は電界と磁界、そして電波に満ち満ちていることとなります。

なお、電波があるはずと理論的に予言したのがイギリスのマクスウェル、電波の存在を実際に見つけたのがドイツのヘルツ、長距離の無線通信を実用化したのがイタリアのマルコーニです。

2) 交流を扱う上で最も重要なことは、電圧と周波数に加え位相を一致させること

・日本の電力網は、東日本の50ヘルツ、西日本の60ヘルツに大きく分かれている。

東日本の電力網は、北海道と東北・関東は津軽海峡があるために2つに分かれていて、両地域は高圧直流送電（HVDC）で接続されています。本州と九州、四国は1つの電力網として接続されています。

・四国と本州間の電力網の接続、交流の本四連系線と直流の阿南紀北直流幹線

西日本は、本州、九州、そして四国も完全に一体化されています。四国の電力網は北海道と同様に以前は本州と分離されていましたが、瀬戸大橋の完成（1988年4月）後、瀬戸大橋上に送電線（本四連系線、交流50万ボルト）が設置され、1994年7月に四国と本州の電力網が交流で接続されました。これにより必要に応じて四国側の電力と本州側の電力を双方向に送電することができるようになりました。接続する際には、四国側の電力網の交流の位相を本州側にぴったり一致させる作業が行われたと思いますが、その歴史的な瞬間を想像するだけでもわくわくします。

その後2000年6月に、四国（阿南変換所）と関西（紀北変換所）が海底ケーブルを用いた阿南紀北直流幹線（直流50万ボルト）で接続されました。

・交流の本四連系線と直流の阿南紀北直流幹線の違い

本四連系線は四国電力と中国電力の間、阿南紀北直流幹線は四国電力と関西電力の間での電力の融通が主な役割です。双方向の電力融通が可能ですが、伊方原発など大型の発電所や最近では太陽光発電が多い四国電力側から本州側に送電することが多いです。送電する電力量は、中国電力むけの本四連系線（交流）より、大電力を消費する関西電力向けの阿南紀北直流幹線の方が多様です。どの様にして一方から他方に電流を送るかに関係してですが、トランスを使って、送る側が送られる側の電圧より+5%から+10%程度高く設定します。

・交流の電力網をループ状接続することは技術的に難しいため、原則的に枝分かれ状になっている。

交流は、長距離の送電や途中で大電力を消費すると、送電線相互の末端で電圧の位相がずれてきます。そのため交流の電力網でループ状のネットワークを作ると、接続時に異常な電流が流れることがあるため、基本的には枝分かれの形状になっています。

どうしても交流電力網でループを作りたい場合には、一方を直流送電で接続をすることが行われています。四国電力と中国電力、および関西電力との相互の連携は、一方を交流（本四連系線）、他方を直流（阿南紀北直流幹線）にして、四国を中心として大きなループ接続の形になっています。

2024年11月9日に四国側に発生した大停電は、保

守工事で一旦遮断していた本四連系線を再接続する際に、周波数と位相がなかなか合わないうち（接続できないうち）に、阿南紀北直流幹線に大電流が流れて、四国側の電力が足らなくなってしまう、その結果周波数が異常に低下して、緊急に一部の四国地域の電力が遮断されてブラックアウトになりました。ループ接続では予期せぬ電流が流れることがあり、維持管理は難しいことがわかります。

ここで鉄道と関係しますが、ブラックアウトの数時間後の翌日（2024年11月10日）に、瀬戸大橋上で起きた架線の溶断が、このブラックアウトと関係があるかどうかが大変注目されました。公式には架線への電力供給とは一応関係ないとされていますが、あまりにも発生時間が近く興味深い所です。

・関西電力、中部電力、北陸電力のループ接続、関西電力を中心とする8の字の電力網

以前、中部電力と北陸電力は、間に関西電力網を介して間接的に接続していましたが、1999年に中部電力と北陸電力は南福光連系所（富山県、直流で稼働）を介して交流の位相差を考えずに済む直流送電で接続する様になりました。これにより、関西・中部・北陸の3エリアがひとつの巨大なループ状のネットワークで稼働する様になりました。非常に安定して電力を供給できるようになりました。四国の電力網は中国電力と関西電力とループ状に結ばれており、さらにこの電力網は関西電力網を介して、中部電力、北陸電力と8の字の電力網を形成していることとなります。

なお最近では、直流を介せずに位相を調整（合わせながら）する技術が進み、南福光連系所も交流での接続に変更になる予定です。そうすると、異なる交流の送電網の相互の接続も容易になって行くと思われます。

3) 太陽光発電、風力発電の電力をいかにして、従来の送電網に接続するか

・VVVFインバータの機能を実現するための基本的な技術PWM（パルス幅変調）

電車、電気機関車の三相交流モーターはVVVFインバータから得られる電気で動くことは以前お話ししましたが、VVVFインバータの機能はPWMの基本的技術で実現しています。PWMの技術を用いると、交流から直流、あるいは直流から交流

へ、しかも電流を送り込む相手側の交流の波形になぞる様に完全にあわせて変換できる驚くほど優れた機能を持っています。VVVFインバータ制御、あるいはこのPWMの技術がなければ、太陽光発電も風力発電も実用化されなかったと思われます。

・PWM変調の技術により、最近の充電器は大変小型化されている。

従来の充電器は、トランス（50/60ヘルツ用）を用いて、100ボルトから低圧（5から10ボルト）に変換した後に直流に変換していました。最近では50/60ヘルツの交流をPWMで数メガヘルツの高周波に変換して、超小型の高周波用トランスで低圧に変換した後に直流にしています。周波数が高いとトランスを大幅に小型にできるため、最近の充電器は劇的に小型化されています。

・太陽光発電で得られた直流をいかにして家庭用電力線にもどすか

太陽光パネル1枚の電圧はメーカーにより異なり17V~50V程度です。そのパネルを直列に複数枚接続し、直流200~400V前後の電圧にして、PWM（パワーコンディショナー）により家庭用の電力線（100V/200V）の交流の周波数と位相に完全に一致させ、しかも電圧を少し高め（101V±6Vや202V±20V）にして電力線に送り込みます。

・風力発電で得られた不安定な交流をいかにして電力網にもどすか

風力発電の電力は周波数と電圧が非常に不安定なため、PWMで交流から一旦直流に整流して、さらにPWMで高い周波数（数kHz~数百kHz）に変換して、小型の高周波用のトランスで電圧を上げたのちに、PWMで50/60ヘルツに変換した後高圧（2万2000~3万3000V）の送電線網に送り込まれます。

（周波数をあげることにより、50/60ヘルツの通常のトランスに比べて、高周波用トランスは体積・重量を数十分の1から100分の1以下にすることが可能になる。）

この様に現代社会では、鉄道で培われたPWM、VVVFインバータ制御の技術が、電力網に限らず、スマートフォン用の充電器まで、あらゆるところで利用されています。

（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。）