

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信 情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

信号・列車制御技術の変遷と動向

信号・列車制御技術に関して、高速・高密度運転線区での安全を確保するためのATS・ATCの導入および改良などの発展経緯や、ATCにおける電車電流の高次高調波ノイズに対する対策などについて紹介します。また、電気車の主回路から発生するノイズの信号設備への誘導障害評価や、それに関連して耐ノイズ性を改善した軌道回路の開発についても紹介します。



新井 英樹
Hideki Arai
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
室長
[専門分野] 信号システム



寺田 夏樹
Natsuki Terada
信号・情報技術研究部
信号システム研究室
主任研究員
[専門分野] 軌道回路、
ATC、信号システム

はじめに

鉄道の安全・安定輸送を担うものの1つに信号保安装置があります。これは列車を検知し、それに従い信号機や転てつ機を制御し、場合によっては列車を止めることで、列車同士の衝突や追突を防ぐように制御しているものです。

そのうち、列車速度を安全に制御するためのATS・ATCに着目し、信号・列車制御技術の変遷について紹介します。

ATSの導入

ATS (Automatic Train Stop : 自動列車停止) 装置が、列車間隔制御のために最初に導入されたのは、1927 (昭和2)年に開業した東京地下鉄銀座線浅草-上野間となります。打子式ATSと呼ばれるものです。これは信号機が停止現示の時に、レール脇に設置された打子が立ち上がり、列車に取り付けられているブレーキコックと接触させることにより、ブレーキを動作させる仕組みであり、機械式のATSです。1960年代までに建設された地下鉄には打子式ATSが導入されていきます。

一方、JRの前身である国鉄のATSは、1954 (昭和29)年に京浜東北線、

山手線で導入されたB形車内警報装置が最初となります。ただし、これは警報機能のみであり、自動列車停止機能は有していませんでした。その後、1962 (昭和37)年5月に発生した常磐線三河島駅での列車二重衝突事故を契機として、自動列車停止機能を有するATSの導入が始まります。これがATS-Sと呼ばれるもので、列車が停止現示 (赤信号) に接近した際、運転士が車内警報に対する確認扱いを行わなかった場合のみ非常ブレーキが動作するというシステムです。現在でも即時停止機能 (絶対に停止すべき場所では即座にブレーキがかかる) などを追加した改良型が使用されています。

東海道新幹線開業時のATCのしくみ

一方、ATC (Automatic Train Control : 自動列車制御) と呼ばれる装置が1961 (昭和36)年、地下鉄日比谷線に導入されます。このシステムは、ATSを発展させたものとして、地上信号機を見ながら運転するものの、許容速度を超過すると自動的にブレーキがかかるというシステムです。

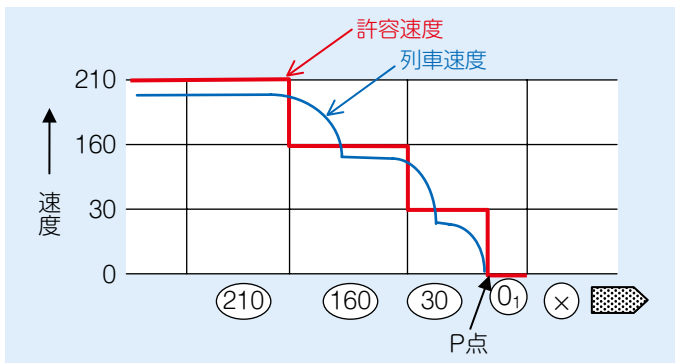


図1 新幹線のATCの仕組み

そして、1964（昭和39）年開業の東海道新幹線で車内信号式のATCが導入されます。車内信号というのは、運転台に許容速度が表示されるシステムであり、200km/hを超える列車速度では、運転士が地上信号機を見て運転することが困難と考えられたために導入されました。

図1に東海道新幹線開業当時のATCの概念を示します。先行列車の在線状況に応じて、おおよそ3kmの区間毎に許容される速度が示されます。許容速度とは、区間の終点までにその速度に減速しておけば、安全に停止できる速度、という意味になります。ATC信号には、210、160、110、70、30信号がありました。

許容速度を超過した場合には、自動的にブレーキがかかり、許容速度を下まわると緩解されます。ただし、30信号を受信している場合には、確認ボタンを押さないで自動で停止します。

30信号の区間に入っても先行列車がいるような場合には、P点と呼ばれる点を通じた場合に信号が01信号に変化します。この場合の許容速度は0km/hになるので停止します。

新幹線における高調波妨害対策

このATCを実現するために鍵となる技術が、AF軌道回路と呼ばれる装

置です。軌道回路とは、レールに信号電流を流して、列車の有無により電流の流れ方が変わることを用いて列車を検知する装置です。その軌道回路の電流にAF（Audio Frequency：可聴周波数域、おおよそ数百Hz～数kHz帯）の信号を使っています。AF信号をレールに流し、それを受電器と呼ばれる車両先頭の床下にあるアンテナを使って受信することにしたのです。

しかし、AF軌道回路にもさまざまな課題がありました。その1つに新幹線のレールには、電車電流の高調波が多く流れているということが挙げられます。東海道新幹線では、60Hzの電気が供給されていますが、この場合、レールには60Hzの電流だけではなく、180、300、・・・という60Hzの奇数倍の高調波電流が流れます。新幹線のATC信号には、720～1,020HzのAF信号を使いましたが、この帯域での高調波電流は10A以上とされていました。AF信号電流は、1A以下で考えられていたので、大きな違いがあります。

また、電源周波数は電力会社が管理していますが、この周波数が少しずれても高調波の周波数は大きくずれてしまうのです。例えば、60Hzの電源が1%、つまり0.6Hzずれたとしましょう。この15次高調波である900Hzは $0.6 \times 15 = 9$ Hzずれて

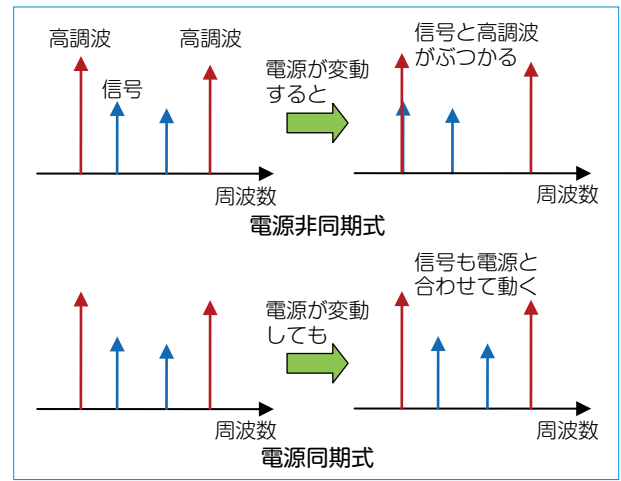


図2 電源同期式信号

しまうのです。そうすると891Hzや909Hzを信号周波数とした場合には妨害を受けることになります。

そこで電源高調波そのものを信号の仕組みに取り入れることにしました。具体的には高調波からの周波数の差に応じて信号周波数となるようにしました。電源に同期して信号周波数が決まることから、電源同期式と呼びます（図2）。これにより20Aの妨害にも耐えられるようになりました。

ATSのその後の展開

公民鉄におけるATSについては、1967（昭和42）年に車上速度照査機能を有するATSの整備が義務づけられたため、主要な公民鉄では国鉄のATSより機能の高い速度照査機能を有するATSが導入されていくことになります。

その後、国鉄のATSも改良が行われました。前述したようなATS-Sの改良もありましたが、トランスポンダと呼ばれるデジタル伝送装置を導入することにより保安度を大幅に向上させたATS-Pと呼ばれるシステムが導入されます。

このシステムでは、地上子と呼ばれる地上装置から車上装置に停止位置までの距離が伝達されます。それにより車上でブレーキパターン（位置と速度の関係を示したもの）が作成され、

これを超過する速度になるとブレーキがかかるようになっていきます。最初の導入はJRに移行する直前の1987(昭和62)年3月ですが、JRへの移行後、首都圏や関西圏に導入されていきます。

最近では曲線や下り勾配といった線路条件に応じた速度制限機能がATSに求められるようになり、公民鉄のATSについても、それに合わせて改良が進められています。JRに関しては、JR東海でATS-PTが導入され、JR九州および北海道では既存のATS-S機能にATS-Pと同様のデジタル伝送機能を付加したATS-DKおよびDNの導入が進められています。

ATCのその後の展開

東海道新幹線開業後、車内信号式のATCは地下鉄や高密度線区に導入されていきます。このような路線は基本的に直流電化区間です。この場合、電源の奇数倍ではなく、6倍(50Hz電源の地域では300Hz、60Hzでは360Hz)の高調波が大きくなりますが、新幹線ほど高調波の制約が大きくなかったので、情報を多くすることができ、ATC信号を細かく設定することができました。

新幹線のATCについては、東海道新幹線のシステムの後、2つの大きな改良が行われました。

1つ目は1982(昭和57)年の東北・上越新幹線から導入されたATC-1Dと呼ばれるシステムです。このシステムには、以下の改良点があります。

まず、東海道・山陽新幹線の60Hzだけでなく、東北・上越新幹線の50Hzに対応させました。そして、それまでの問題点を改善したり、将来の高速化に対応させたりするため、ATC信号の情報を増やすことにし、2つ目の信号を合わせて流すことにしました。これを2周波組み合わせ式と呼んでいます。それまでは、信号がなけ

れば停止ということだったのですが、妨害信号があった場合には停止できなくなります。そこで、O2Eと呼ばれる速度0km/hの信号を設けたりしています。

2つ目はATS-Pで使用されているようなデジタル情報を、レールに流すことを取り入れました。デジタル情報を元にATS-Pと同じようなブレーキパターンを車上で作るので、車上主体形ATCと呼ばれます。

2002(平成14)年の東北新幹線盛岡～八戸間開業

に際して導入が始まり、現在では山陽新幹線を除く新幹線のほぼ全線に導入されています。JR東日本のシステムはDS-ATC、JR東海のシステムはATC-NSと呼ばれます。ATS-Pでは地上子から停止信号機までの距離が明確であるので、距離そのものを送れますが、車上主体形ATCでは、車両の位置は区間単位でしか決まらないため、車両の方で、自分の位置を常に把握するための機能を備えるようにしています。

一方、都市近郊の高密度線区では一段ブレーキATCというシステムが1991(平成3)年に東急電鉄田園都市線に導入されています。これは、表示する許容速度の刻みを細かくすることで、制御を効率化させようとするものです。東急電鉄のほか、地下鉄などにも導入されています。

車両制御システムのパワーエレクトロニクス化に伴う信号設備への影響

東海道新幹線が開業する1960年代は、車両の制御は直流モーターを使う

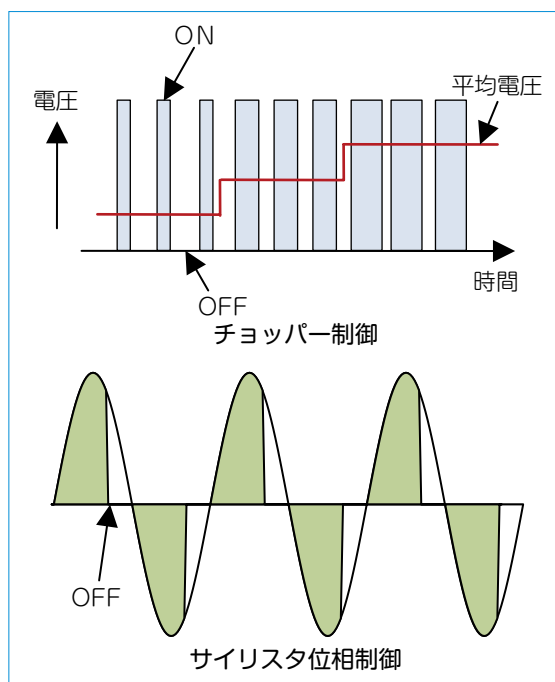


図3 チョッパー制御とサイリスタ位相制御

抵抗制御と呼ばれる方式でした。これは、モーターにかかる電圧を抵抗素子やモーター同士のつなぎ方を変えることにより行っていました。つなぎかえの時に過渡的なノイズがでますが、それを除けば、車両の主回路が高調波を発生することは多くありません。

その後、パワーエレクトロニクスで制御する方式として1970年代にチョッパー制御やサイリスタ位相制御という方式が現れます。

チョッパー制御は、直流電車で採用された方式で、モーターに流す電流を高速でON-OFFすることで、モーターにかかる電圧を制御します(図3上)。

また、サイリスタ位相制御は交流電車で採用された方式で、交流波形をサイリスタと呼ばれる素子を使って適当なタイミングでOFFすることにより電圧を調節します(図3下)。波形が0Vを横切ると再びONになります。

これらの方式により省電力や保守の低減が期待されましたが、一方で、これらの方式ではノイズが発生するという問題を抱えています。例えば、

チョッパー制御では、電源をON-OFFする周期に応じて高調波が発生します。300HzでON-OFFすると、300、600、900Hzという高調波ノイズが出てきます。また、サイリスタ位相制御でも、50または60Hzの高調波が出てきます。これらのノイズは、先に述べたAF軌道回路に影響を与えることになります。

その後、踏切制御子と呼ばれる踏切用の列車検知装置に対する影響が問題になりました。この装置は、14kHzや20kHz付近の信号を使うのですが、車両からレールに流れる電流だけではなく、車上機器から直接放射されるノイズが影響することが分かってきました。また、民鉄などで用いられているAF軌道回路にも影響を与えることが分かってきました。

この頃から、車両から発生するノイズが信号設備に与える影響の評価が行われるようになります。

車両の制御に関しては、その後VVVF (Variable Voltage Variable Frequency：可変電圧可変周波数) 制御が導入されます。VVVFインバーターはチョッパーと同じようにスイッチの入切によりモーターの電圧を制御しますが、同時に駆動周波数を変えることにより、交流モーターを制御する装置です。交流電化区間では、一度コンバーターと呼ばれる装置で交流を直流に変換して、インバーターに入力します。交流モーターは保守性に優れているということで、現在では新規に製造される車両のほとんどがVVVFインバーターの車両です。

VVVFインバーターからは、電源の整数倍以外の高調波ノイズも出てきます。これを非同期成分と言いますが、その成分も信号設備に影響を与えないことを確認する必要も出てきました。

交流電化区間では、VVVF制御はサイリスタ位相制御と比べると、概ね

電源高調波は少なくなっています。しかし、スイッチング周波数の整数倍付近の高調波では高調波電流が大きい状況ですし、サイリスタ位相制御の影響のない高い周波数では影響が大きくなっています。

現在では、車両からの軌道回路への影響、ATS地上子への影響、踏切制御子への影響の調査を誘導障害試験と称して実施しています。

軌道回路については、車両から発生するノイズを車両やレール付近に取り付けた電流センサーで測ることで評価を行っています。

また、ATS地上子については、地上子をレール間に設置し、車両を走らせてノイズを測ります。

踏切制御子については、実物を模擬したものをレールに取り付け、車両を走らせてノイズを測ります。

このような測定で車両に問題がないことを確認した上で、営業運転を行っています。

車両からのノイズを考慮した軌道回路の開発

これまでは、新しい車両が製作された場合には、既存の信号設備に適合することを確認するための誘導障害試験を行い、逆に新しい信号設備が導入される場合には既存の車両に適合するように、設計されてきました。

信号設備を車両からのノイズに対応させるには、車両から発生するノイズを小さくするほかに、耐ノイズ性が高い信号装置を開発することも解決策となります。以降では、その方針で開発された2つの事例を紹介します。

1つめは、低周波MSK軌道回路と呼ばれる汎用の軌道回路です。これはこれまでさまざまな線区に合わせて開発された軌道回路を統一することを目指したものです。

まず、直流、交流50Hz、60Hzのいずれの電化区間でも利用できるように、使用する周波数は、83、135、165Hzとしました。

そして、車両からのノイズと軌道回路の電流を区別できるように、軌道回路の信号をデジタル符号化して符号検定できるようにしました。これにより車両のノイズにより誤動作することがなくなったため、耐ノイズ性が高くなっています。

この軌道回路で使ったデジタル符号化技術は、MSK (Minimum Shift Keying) と呼ばれる変調方式です。この方式は、DS-ATC、ATC-NSなどの車上主体形ATCにも使われている実績のある方式です。

もう1つは長大軌道回路と呼ばれる軌道回路の改良です。長大軌道回路とはコストを下げるため、最大5km (非電化区間では6km) の範囲で列車の在線を検知するものです。長い区間にわたり列車検知ができる代わりに、軌道回路受信器で受信する信号電流が小さいため、妨害電流許容値が0.3Aと小さいです。

この改良では、既存の軌道回路送信器を活用するためにPSK (Phase Shift Keying) という変調方式を採用してデジタル符号化を行いました。符号検定をすることで誤動作をしないようにするという発想は、低周波MSK軌道回路と同じであり、これにより耐ノイズ性を高くすることができました。4kmまでの範囲で利用を限定することで、従来の妨害電流許容値が0.3Aであったのに対し、1.4Aに改善しています。

いずれの軌道回路も、開発後に車両部署との合意を経て導入が開始されています。このように信号部署と車両部署との協調による信号設備の開発が、今後増えていくものと考えられます。

RRR