

北陸新幹線 50/60Hz き電両用区間対応 DS-ATC の開発

寺田 夏樹* 横田 倫一** 須貝 孝博**
葛西 隆也*** 武田 真吾***

Development of DS-ATC for Hokuriku-Shinkansen, Applicable to 50/60Hz Feeding

Natsuki TERADA Rinichi YOKOTA Takahiro SUGAI
Takaya KASAI Shingo TAKEDA

We developed DS-ATC (Digital Communication and Control for Shinkansen Automatic Train Control) for 60Hz feeding, applicable to Hokuriku Shinkansen extension project. There are three big challenges. First, the current DS-ATC system for 50Hz feeding is required to be arranged for 60Hz feeding. Second, the onboard system and the ground equipment are required to switch between signal for 50Hz feeding and that for 60Hz feeding at handover area. Third, in some areas the ground equipment is required to be compatible with both 50Hz and 60Hz feeding. We report how we overcame these challenges.

キーワード：新幹線，DS-ATC，60Hz き電，異周波電源突き合わせ，両用

1. はじめに

現在建設中の北陸新幹線（長野～金沢間）には、50Hz と 60Hz のき電区間が存在する。一方、新幹線の運行を支える ATC（Automatic Train Control system: 自動列車制御システム）はレールに信号を流すことで制御を行っており、電車電流の高調波による妨害に耐えられるよう、き電周波数が異なれば搬送周波数等を変えるのが一般的である。50Hz と 60Hz の両方のき電周波数に対応する ATC システムとしては、1997 年に開業した高崎・長野間において、全国新幹線網向けに策定された ATC-1D 方式に準ずるシステム（HS（Hokuriku Shinkansen）-ATC と称する）が既に導入されている。この方式はアナログ変調信号を用いた多段ブレーキ制御を行うシステムであるが、その後デジタル変調信号を用いて運転間隔や停車時の乗り心地特性のよい一段ブレーキ制御を実現した DS-ATC（Digital Communication and Control for Shinkansen ATC）システムが 2002 年開業の東北新幹線盛岡～八戸間向けに開発され、以後東北新幹線および上越新幹線の ATC 装置は DS-ATC に改良されている。ただし、現在の DS-ATC は 50Hz き電区間向けに開発されたものであり、60Hz き電区間には対応していない。そこで北陸新幹線長野～金沢間延伸にあたり、DS-ATC を新たに 60Hz に対応させるための技術開発を、鉄道・

運輸機構、JR 東日本、鉄道総研で行ったので報告する¹⁾。

2. 北陸新幹線向け DS-ATC の基本要件

2.1 北陸新幹線向け DS-ATC の前提条件

北陸新幹線向け DS-ATC の前提条件は以下の通りである。

- ① 50Hz および 60Hz き電に対応する。
- ② 変調方式（電源同期 MSK）・偏移周波数（ATC 信号：±16Hz，TD（Train Detection: 列車検知）信号 ±8Hz）・電文フォーマットは現行 DS-ATC を踏襲する。
- ③ 駅構内および異周波電源突き合わせ区間は有絶縁軌道回路、駅中間は非共振式無絶縁軌道回路を採用する。
- ④ 搬送周波数は 50/60Hz 両用を考慮し、50Hz 向け DS-ATC と同等（ATC 信号：下り 1500Hz，上り 1600Hz，TD 信号 1925～2175Hz）となるようにする。TD 信号は上下各 3 波以上必要である。
- ⑤ 軌道回路長は一般区間（漏れコンダクタンス最大 0.3S/km）で 1000m，散水区間（同 1.0S/km）で 500m とする。
- ⑥ 検討において、短絡感度は 0.3 Ω 以上，短絡電流は 300mA 以上を確保する。（車上装置における最小動作電流は 100mA 相当である）
- ⑦ 設計速度は少なくとも 320km/h 以上に対応し，車上無信号許容時間は現行の 50Hz DS-ATC と同様に，速度により 2500ms（30km/h 以下），1900ms（30km/h 超 70km/h 未満），1200ms（70km/h 以上）とする。
- ⑧ 無絶縁軌道回路の境界ずれは 100m 以内とする

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
** （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構
*** 東日本旅客鉄道㈱

2.2 北陸新幹線向け DS-ATC における技術課題

北陸新幹線向けに開発するDS-ATCについては以下の3つの大きな技術課題がある。

(1) 60Hz向けの搬送周波数の選定

ATCでは、レールに情報を載せた電流を流すことで列車を制御する信号を伝送しているが、新幹線においては電源高調波が大きく、これを避けて信号を伝送することが必要とされる。既に開発された50Hz向けDS-ATCでは、搬送波を電源50Hzの偶数次高調波（下り1500Hz，上り1600Hz）とし、奇数次高調波と奇数次高調波の間100Hzの内の96Hz分を伝送帯域として使用している。

現在の搬送周波数では電源60Hzの高調波を避けることができないため、60Hzき電区間向けには、新たに偶数次高調波を搬送波として選定する必要がある。なお、伝送帯域については、奇数次高調波間の帯域は60Hzき電の場合の方が50Hzき電よりも広いため、そのままでも対応可能であることから、ATC電文フォーマットについても50Hz向けのものに準ずることとする。

また、2010年に開業した東北新幹線八戸～新青森間向けに、無絶縁軌道回路が開発されている²⁾。無絶縁軌道回路では列車検知のためのTD信号と車両を制御するためのATC信号が分離されるが、TD信号も電源高調波を避けて搬送波が選定される。北陸新幹線においてもレール絶縁やインピーダンスボンドを削減できる無絶縁軌道回路を全面的に採用する方針である。東北新幹線で採用された無絶縁軌道回路方式では3種類の列車検知波が必要となるため、上下各3波以上の搬送周波数を選定する必要がある。

(2) 異周波妨害対策

50Hzき電区間と60Hzき電区間の突き合わせ箇所となるき電区分所（SP: Sectioning Post）においては、中セクションに列車が進入すると、中セクションにき電する電源を50Hzから60Hz（あるいはその逆）に切り替える。これに合わせてATC信号も搬送周波数を切り替える必要がある。

さらにこの区間では電源高調波が互いに隣接線に誘導すると非同期妨害となりうる。そのため、この妨害を低減する対策が必要である。既に開業している北陸新幹線の新軽井沢SPにおいて妨害低減策は確立されており、HS-ATCについては問題ないとされているが³⁾、DS-ATCでは、搬送周波数、制御方法が異なるため、問題がないかどうかを確認する必要がある。

(3) 50/60Hzき電両用区間対応

北陸新幹線新高田SP～新上越SS（Substation:変電所）～新糸魚川SP間では東北電力による50Hzき電となるが、隣接区間は中部電力および関西電力による60Hzき電となる。仮に新上越SSが脱落した場合、隣接SSからの延長き電を実施することで運行に必要な電力を確保する計画である。このため、同区間では通常は50Hzき

電となるが、延長き電時においては60Hzき電となるため、ATCについては50/60Hzどちらにも対応する必要がある。

3. 60Hz 向け DS-ATC 信号の搬送周波数の選定

前章の前提条件の下、最初に60Hzき電区間向けDS-ATCの搬送周波数の選定を行った。2.1節の前提条件から、ATC信号については1440，1560，1680Hz，TD信号については1830～2250Hzを候補として検討した。

3.1 相互変調積計算

周波数選定にあたり、ATC信号およびTD信号、さらにはき電区分制御軌道回路信号の混変調により発生する信号が妨害信号にならないように検討を実施した。計算したのは

①DS-ATC信号とTD信号2波（無絶縁の場合）の間の相互変調積

②DS-ATC信号とHS-ATC信号の間の相互変調積

である。この計算において、DS-ATCの各信号波は偏移周波数分の広がり、HS-ATCは変調周波数分の広がりがあるものとしている。

計算した結果、①についてはほとんどの組み合わせで妨害にならないが、②についてはDS-ATC信号とHS-ATC信号との間で2次相互変調積の発生が予測された。ただし、50HzDS-ATC開発時においてもDS-ATC信号と既存のATC-ID信号との混変調が予測されたものの、実測の結果によって採用したという経緯があるため、最終的には試験を実施して判断することとした。

3.2 帰線電流の実測

搬送周波数を選定するにあたり、現行車両の帰線電流を測定して、電源高調波以外の成分がどの程度存在するかを調査した。

調査は北陸新幹線新坂城SS（高崎起点89k803m）において実施した。図1に示すように中セクションのZB（インピーダンスボンド）中性点から変電所AT（Auto Transformer:単巻変圧器）への吸上げ箇所に空芯コイルを設置する。コイルから柵外までケーブルを延長してデータレコーダに接続し、列車走行時の吸上げ電流を記録した。測定対象とした編成はE2系N編成（GTO（Gate Turn Off）およびIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）車両4種類、いずれも8両編成）、East-i（検測車）である。

60Hz成分の実測例を図2に示す。ATき電区間では、列車から両側のATポストに向かって電流が分流するため、現場のZBで測定を実施した場合、変電所から列車が遠くなるほど測定電流は小さくなるが、測定した結果、

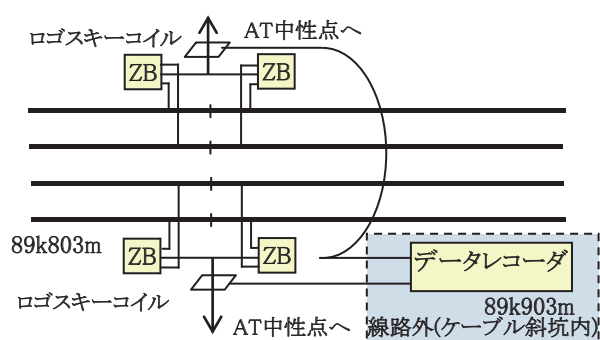


図1 帰線電流測定概略

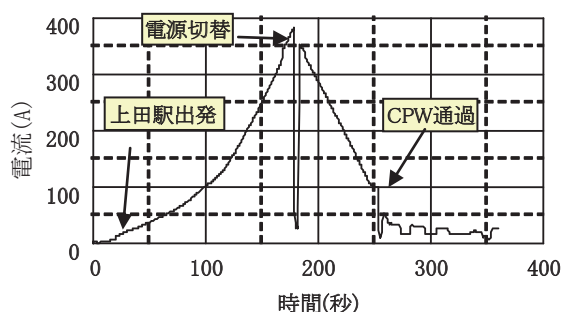


図2 帰線電流測定例（基本波）

上田駅（84k200m）出発から力行する車両の電流が新坂城SS直下において十分に確認できた。なお、測定区間は上田駅周辺の明かり区間を除くとほぼトンネル区間であり、トンネル内では保護線接続箇所（CPW）においてインピーダンスボンド中性点が上下共通の保護線へ接続されていることから、列車がCPWを通過すると、電流が上下線に分流して電流が小さくなることも分かる。

測定した電流は、ATC信号については不平衡率10%（車上受電器を含めた値である）として妨害電流として評価し、車上装置における最小動作電流100mAに対してS/Nを13dB確保した22.4mAと比較を行った。

TD信号については不平衡率を5%とし、シミュレーション上の最小電流130mAに対して補償量10.5dBと必要なS/N13dBの分だけ小さい8.7mAと比較を行った。

3.3 搬送周波数の決定

ATC信号の搬送周波数については、1440、1560、1680HzのいずれもS/Nに十分な余裕があり、2倍の安全率を確保できるという結論に至ったが、1440Hzについては、HS-ATCで使用している副信号の搬送周波数1200Hzに近く、車両において妨害対策上不利となるため、下り1560Hz、上り1680Hzを選択した。

無絶縁軌道回路のTD信号については、当初は高調波間のちょうど中央に搬送周波数を設定する考えであったが、実測では非同期成分が大きい列車があり、必要なS/Nを確保できないことが判明したため、周波数を再選定した。再選定にあたり、偏移周波数を東北新幹線八戸～

新青森間向けの $\pm 8\text{Hz}$ から $\pm 5\text{Hz}$ に変更することにより、占有帯域を小さくした。阻止域を偏移周波数の3倍と考えると占有帯域がこれまでの48Hzから30Hzとなり、2つの奇数次高調波の間の帯域（120Hz）で3波使用できる。

その結果、下りが1920、1958、2010Hz、上りが2040、2078、2118Hzの各3波、さらに共通予備として2148Hzを搬送周波数として決定した。

無絶縁軌道回路の狭帯域化に伴って、TD信号については電文フォーマットを変更した。東北新幹線向け無絶縁軌道回路では27bitの電文を32bps、1350ms周期で送信している。この場合1電文の時間は844msとなるが、これをそのまま偏移周波数 $\pm 5\text{Hz}$ として20bpsで送信すると、1電文の時間が1350msになってしまう。そこで電文を19bitと短くし、1電文の時間を950msとして対応した。

4. 伝送確認試験

選定した搬送周波数で軌道回路が構成できるかをシミュレーション上で確認し、装置を試作した。試作した装置を用いて軌道回路が実際に構成可能であることを確認し、その上で地上から車上へ信号が正常に伝送できるかを確認するための伝送確認試験を佐久平機器室集中範囲で実施した。

試験では、佐久平機器室に上下各5軌道回路、計10軌道回路（図3の太線部）のATC/TD送受信器を仮設し、図4に示すような形で現用設備であるHS-ATC信号にDS-ATC信号を重畳してモニタランを行った。なお、前章での周波数選定は無絶縁軌道回路を含めて実施しているが、HS-ATCが有絶縁軌道回路で構成されているため、試験は有絶縁軌道回路構成のみで実施した。

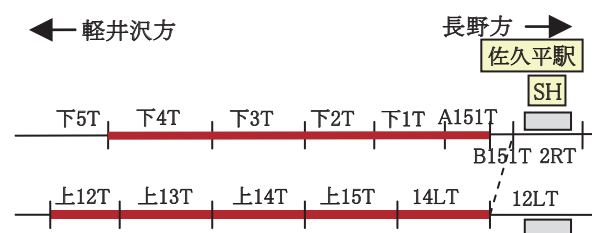


図3 伝送確認試験区間概略

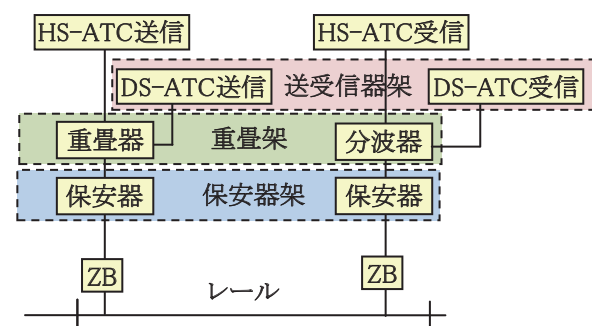


図4 試験機器構成

4.1 軌道回路の確認

軌道回路各部の電流および電圧を測定し、すでに実施したシミュレーションと突き合わせて、妥当であるかどうかを確認した。図5に測定例を示す。概ね妥当な結果が得られた。また、当初懸念された混変調についても問題がないことが確認された。

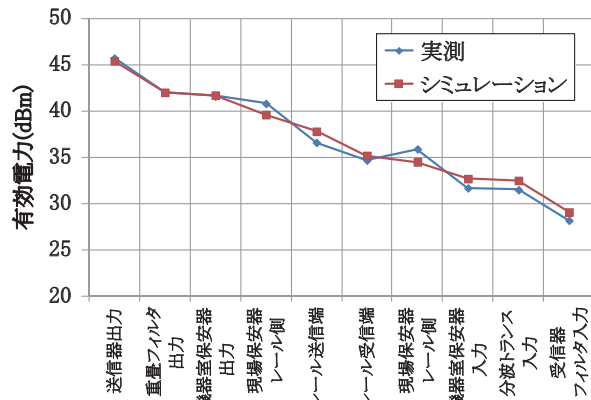


図5 レベルダイアグラムの比較

4.2 短絡感度・短絡電流の確認

0.3Ωでの軌道短絡に対する短絡減衰量は20dB以上あり、補償量が10dB以上確保できることから問題ないことを確認した。短絡電流についても450mA以上あり、問題はなかった。

4.3 実車走行試験

地上設備について列車が存在しない状態にて、問題がないことの確認が終了した後、HS-ATCとDS-ATCを重畳した状態で実車を走行させた。

走行時においてHS-ATCに対する影響がないことの確認はJR東日本にて実施し、これにより昼間に重畳構成で装置を稼働させても問題がないと判断された。

DS-ATCについては、軌道回路が順序良く落下することを確認した。また、短絡減衰量は40dB以上であり、列車検知に問題ないことを確認した。また、車上については、受信レベルが十分であることを確認した。車上無信号についても特に発生しなかった。

4.4 モニタラン試験

実車走行試験において、HS-ATCとDS-ATCとを重畳した状態で、HS-ATCによる列車制御に問題がないことが確認されたため、重畳構成でDS-ATC装置を終日稼働させ、約2カ月間にわたり、モニタランを実施した。

地上側では軌道回路受信器におけるビット誤り率を調べるとともに、受信レベルの長期変化を調査した。受信レベルに関しては、特に問題は見られなかった。また、ビット誤り率は 2.83×10^{-9} であり、危険側誤り見逃し率を $1 \times 10^{-10}/h$ 以下とするためのビット誤り率の目安 1×10^{-5} を十分に満たしていた。

車上においても60Hz対応の試作車上装置を搭載した編成において、同区間を通過した時のビット誤り率を測定したが、これについても 1.06×10^{-6} であり、 1×10^{-5} を十分に下回っていると判断された。

これらの試験結果から、下り1560Hz、上り1680Hzを60Hz向けDS-ATCのATC信号の搬送周波数として使用することとした。

5. 異周波電源突き合わせ区間における切替機能試験

佐久平での試験を経て、60Hz向けDS-ATCのATC信号搬送周波数が決定されたが、異周波電源突き合わせ箇所において地上および車上のATC信号切替が正常に行えることを確認するための試験を実施した。試験は現在唯一の異周波電源突き合わせ箇所である新軽井沢SPおよび、同区間に対応する軽井沢機器室にて実施した。

5.1 切替方式の検討

試験に先立ち、地上ATC装置における搬送周波数の切替方式について次の2種類を検討した。

(1) リレー切替方式

50Hz対応の軌道回路送受信器と60Hz対応の軌道回路送受信器を別々に動作させ、中セクションをいずれの周波数のき電にしているかの情報に基づいて、レールに接続する送受信器をリレーにより切り替える。なお、現在のHS-ATCでは、この方式により搬送周波数切替を実施している。

(2) 両用送受信器方式

50Hzと60Hzの両方を送受信できる装置を用意する。送受信する信号の搬送周波数は、入力するパイロット信号を中セクションの在線状況により切替し、それに同期した搬送波に切り替えることにより実現する。(1)に比べて送受信器を削減でき、コスト削減となる。

パイロット信号とは、架線電圧を変圧器を通じて受信し、フィルタによりノイズ除去したものであり、これを搬送波生成のための同期信号として利用している。すなわちパイロット信号とは架線に流れる電源周波数の信号であり、搬送波を生成する元となるものである。ただし、パイロット信号として使用するのは中セクションに流れている電流そのものではなく、突き合わせ区間を挟んだ両側の50Hz電源と60Hz電源の両方を受信したものであり、在線情報に従ってこれをリレーで切り替える。

事前の検討ではコスト上有利な(2)の両用送受信器方式でも実現可能と判断されたが、実際の試験にあたっては(2)の実現性に問題があった場合でも実績のある(1)の方式が採用できるように、両方の方式を試験した。試験は(1)のリレー切替方式を2晩、(2)の両用送受信器方式を3晩実施した。

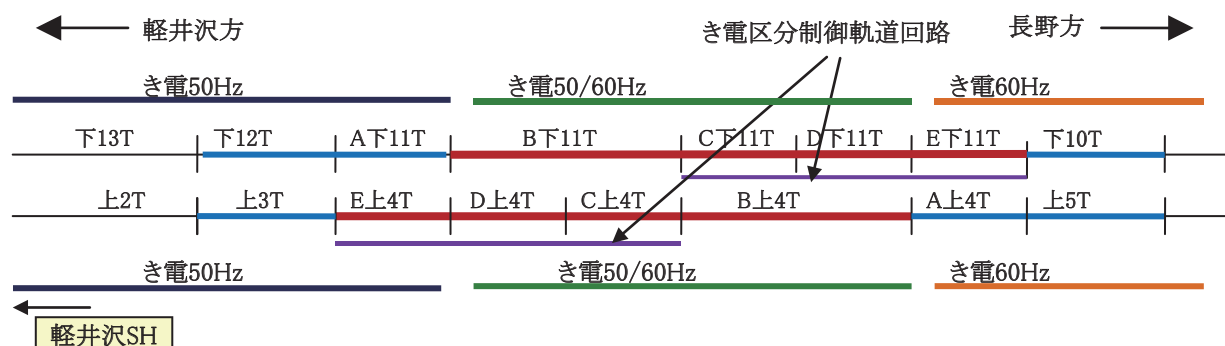


図6 異周波切替機能確認試験区間概略

5.2 試験概要

図6に示す新軽井沢SP周辺の上下各7軌道回路の送受信器を軽井沢機器室に仮設した。このうち、上下線のBT, CT, DTが中セクションに対応した箇所、CT, DT, ETに設備されたき電区分制御軌道回路で列車が検知されると、き電周波数が切り替わるとともに、その条件により前述した2種類の方法で軌道回路送信信号が切り替わる。

また、走行試験は夜間にのみ行うものとして、BT, CT, DTの信号については夜間にのみ装置の切替を行いDS-ATC信号のみを送信することとしたが、現用設備では区間前後を含めてHS-ATCで列車を制御しているため、試験区間の前後でDS-ATCとHS-ATCの制御を車上で切り替えるための軌道回路を区間前2軌道回路、区間後1軌道回路分用意した。これらの軌道回路では、佐久平で実施したようにHS-ATCとDS-ATCの両方の信号を重畳する。重畳構成への変更についても夜間にのみ実施した。

なお、試験装置は佐久平で使用した機器を一部流用して実施した。

5.3 走行試験

走行試験に先立ち、軌道回路調整を行い、受信レベルや列車検知性能に問題がないことを確認した。

走行試験の評価は、軌道回路の動作状況に問題はないか、また車上の無信号時間が許容時間である1200msを満足できるかという観点で実施した。

評価のための走行試験は前述の通り、リレー切替方式で2晩、両用送受信器方式で3晩実施した。

地上側では、いずれの方式においても、軌道回路の落下の順序や軌道回路の短絡減衰量で問題は発生せず、異常も見られなかった。

車上においては、無信号時間はリレー切替方式では720ms～920ms、両用送受信器方式では550ms～740msであり、どちらも目安となる1200ms以内であることから問題はないと判断された。なお、無信号時間だけから判断すると、両用送受信器方式の方が動作時間が早いように見えるが、同方式においては、一旦信号が回復した後、再び短時間の無信号となる状況であっ

た。これは無信号と判定する条件が複数あることによるもので、最初の無信号は受信レベルが低い、もしくは電源が同期しなくなったという理由、2回目の無信号は地上信号と車上の搬送波が不一致であるという理由で無信号と判定された。しかしながら、2つの無信号時間の間の回復時間を無信号時間に含めても、理論的な無信号時間は1200ms以内であり、実測においても無信号時間が1200ms以内であったことから、いずれの方式においても問題がないという結論が得られた。実際の設備では、両用送受信器方式で実装される予定である。

6. 異周波妨害の確認

新軽井沢SPにおける妨害対策については、HS-ATCについては、北陸新幹線長野開業時において問題がないことを確認しているが、DS-ATCについても問題がないか、ノイズの測定を実施した。妨害を測定により評価するために、き電回路が定まっていることは重要であるが、軌道回路に接続されているATC送受信器がどのような機器であっても、レールから機器を見たインピーダンスが定まっていればよい。機器の見かけ上のインピーダンスについてはDS-ATCで変更はしないため、ATC装置については通常のHS-ATCの構成で実施した。

6.1 地上測定

上り線中セクションを力行もしくは回生にて列車が走行する際の、下り線レールへの誘導を測定した。新軽井沢SPにて中セクション吸上げ電流を測定するとともに、C下11T, D下11Tの受端電流とレール間電圧を測定した。

起誘導電流10Aに直した場合、レール間電圧が最大192mV、誘導電流が37～48mAとなった。差電流に関しては前述した8.7mAを大きく超過しているが、当該箇所では信号電流を大きくすることとしており、SNの観点でも問題はない。

6.2 車上測定

車両を2編成使用してATC受電器への誘導を測定した。被誘導編成を中セクション（具体的にはCTの内方50m）

に停止させ、起誘導編成を反対側の線路を走行させた場合に、被誘導編成のATC受電器への直達磁界による妨害を測定した。同時に地上（SP）および車上において帰線電流の測定を行った。測定は起誘導編成が下り線、上り線を走行する両方の場合について実施した。

なお、被誘導列車を中セクションに在線させると、き電区分制御軌道回路で在線が検知され、その結果き電周波数が進出側に切り替わるが、この状態では起誘導側と被誘導側とでき電周波数が同じとなり、妨害が同期妨害となる上、き電回路上也非同期妨害を模擬できない。そのため、変電所で条件を切り替えて被誘導側についてはき電周波数を進入側の周波数に戻して測定を実施した。

測定の結果は起誘導電流の妨害を10Aとすると40mA相当との評価となった。最小動作から求めた許容値は前述の22.4mAであり、測定結果ではこれを超過しているが、当該箇所では信号電流を大きくするため、問題はないと判断された。

7. 50/60Hz き電両用対応について

新高田 SP～新糸魚川 SP における、ATC 装置のき電周波数 50Hz および 60Hz への両用対応については、瞬時（車上無信号時間 1200ms 以内）の ATC 信号の切替を要求される異電源突き合わせ箇所において問題がなかったことから、それ以外の両用区間についても両用送受信器方式を採用することとしている。ただし、パイロット信号の受信系について、ノイズ除去を行うパイロットフィルタを 50/60Hz 独立のものから 50/60Hz 両用とすることで、架線のき電周波数が 50/60Hz のいずれであっても、同一回路にて架線から直接いずれかのパイロット信号を取得でき、それによりき電側の条件を受け取らなくても架線の状況に応じて搬送波の切替が可能なのを目指している。

また、駅構内で進路が両方向にある軌道回路については、ATC 信号を両方向に送信する必要がある。両方向送信箇所においては通常は下り受信器における上り送信信号、上り受信器における下り送信信号をフィルタで阻止するが、このような箇所については、60Hz き電時における下り線向けの 1560Hz と 50Hz き電時における上り線向けの 1600Hz が近接しているため、受信器においてフィルタによる分離ができない。そのため、き電周波数によってフィルタを切り替える必要が出てくる。

そこで、両方向送信箇所については ATC 信号による列車検知を行わず、別の TD 信号（周波数については無絶縁軌道回路用 TD 周波数を使用）を用いて列車検知を行うこととした。

軌道回路の搬送波の切替時間については、一旦列車を停止した上で救済き電を実施することとするため、多少時間が経過しても問題ないと整理した。ただし、切替に伴うレベル変動は考慮する必要がある。無絶縁軌道回路の各周波数についてレベル差については系切替に伴う

2dB 以内に収まることを計算では確認済みである。ただし 60Hz 向け DS-ATC 無絶縁軌道回路の予備信号 2148Hz については、50Hz 向け DS-ATC 無絶縁軌道回路信号によっては差が大きく、切替時に 3dB 以上の変化が生じうるが、これにより軌道回路が不正落下、不正扛上する範囲には無いことから問題ないと判断された。

これらの両用に関する特性については、机上検討のみを実施した。最終的には開業前に実機が設備されてから、確認する予定である。

8. まとめ

本報告では、北陸新幹線向け DS-ATC の開発について技術課題とその解決について報告した。60Hz 向け信号の搬送周波数の策定、試作機による伝送の確認、異周波突き合わせ区間における信号切替等、北陸新幹線向け DS-ATC に関する基本的な開発については既に終了しており、現在実機の製作中である。

ただし、無絶縁軌道回路において偏移周波数を $\pm 8\text{Hz}$ から $\pm 5\text{Hz}$ に変更することに伴い、フィルタ処理時間、1 電文あたりの時間の延長により、軌道回路の落下判定処理時間が伸びる見込みである。無絶縁軌道回路においては TD によって列車を検知した後に ATC を送信する踏込送信処理を行っており、処理が伸びると無信号時間が伸びる可能性がある。これが 1200ms を超えると車上無信号と判定され、非常停止となるため、補償量を小さくし、列車検知を早くすることで全体として影響が出ないようにする計画である。

フィールド試験についてはこれまでは有絶縁軌道回路でのみ実施しているため、北陸新幹線の金沢開業にあたっては、無絶縁軌道回路における踏込送信時の無信号時間や 50/60Hz 両用対応の確認を行う予定である。

また、新高田 SP および新糸魚川 SP での異周波妨害の実測による評価についても、新軽井沢 SP と土木構造物や詳細のき電回路が異なることから、評価結果も異なることが想定されるため、別途実施する予定である。

文 献

- 1) 横田倫一、須貝孝博、小山智之、遠藤博昭、葛西隆也、武田真吾、寺田夏樹、宮本真行：北陸新幹線（高崎・金沢間）60Hz き電区間対応 DS-ATC の開発、電気学会論文集 D, Vol.132, No.2, pp.1-10, 2012
- 2) 福田光芳、古川伸幸、寺田夏樹、須貝孝博：無絶縁軌道回路に対応した新幹線用デジタル ATC の開発、鉄道総研報告, Vol.21, No.11, pp.11-16, 2007
- 3) 小澤吉樹、渡辺郁夫、奥谷民雄、犀川潤：北陸新幹線異周波電源突き合わせ区間の誘導障害試験、鉄道総研報告, Vol.12, No.2, pp.17-22, 1998