

北陸新幹線 (長野・金沢間) 用 60HzDS-ATC の開発

横田 倫一* 須貝 孝博 小山 智之 (鉄道・運輸機構)
遠藤 博昭 葛西 隆也 武田 真吾 (JR 東日本)
寺田 夏樹 (鉄道総研) 宮本 真行 (日立製作所)

Development of DS-ATC(Digital communication & control for Shinkansen -ATC)
appropriate for a power supply frequency of 60Hz for Hokuriku Shinkansen

Rinichi Yokota*, Takahiro Sugai, Tomoyuki Koyama, (JR TT)
Hiroaki Endo, Takaya Kasai, Shingo Takeda, (JR East)
Natsuki Terada, (RTRI) Masayuki Miyamoto, (Hitachi)

We develop a new type of DS-ATC appropriate for a power supply frequency of 60Hz for Hokuriku Shinkansen. The present DS-ATC is only suitable for a power supply frequency of 50Hz because the previous power supply can only cope with the frequency of 50Hz due to the MSK method. Therefore the ATC・TD signal frequency in the 60Hz section was established based on evaluating the results of measuring the obstruction noise of the return current caused by the vehicle and calculating the intermodulation noise and the signal-noise ratio. The selected frequency was confirmed by running test trains on the existing Shinkansen site.

キーワード：新幹線, ATC 装置, ATC 軌道回路, 60Hz

(Keywords, SHINKANSEN, ATC device, ATC track circuit, 60Hz)

1. はじめに

現在建設中の北陸新幹線(長野・金沢間)には、中部電力(60Hz)、東北電力(50Hz)及び北陸電力(60Hz)の供給エリアが存在する。現行の DS-ATC(Digital communication & control for Shinkansen-ATC)は電源同期 MSK(Minimum Shift Keying)方式を採用し、電源周波数 50Hz の高調波に対応して自動列車制御装置(ATC: Automatic Train Control device)の搬送周波数を選定しているため、60Hz 区間ではそのまま使用できない。そのため、電源周波数 60Hz に対応する DS-ATC の開発に取り組んでいる。現在までに、車両による帰線電流の妨害ノイズを測定した結果を基に相互混変調積計算および S/N 評価を行い、新たに 60Hz 区間の ATC・TD(列車検知: Train Detection)信号周波数を決定した。その後、工場内試験、実新幹線設備を使用した走行試験を行った。本報告では、周波数選定手法と走行試験の結果について述べる。

2. 新幹線の ATC

新幹線では列車の安全を確保するために、列車間の間隔を確保する装置として ATC を使用している。最近では乗り心地の向上、運転密度の向上、高速化への柔軟な対応および到達時分の短縮を目的として、デジタル符号にて先行

列車までの距離・開通区間数などを車両に伝送し車上で車種毎にブレーキパターンを発生させる車上主体型 ATC が導入されている。平成 22 年 12 月開業予定の東北新幹線(八戸・新青森間)にも、無絶縁軌道回路方式を採用した車上主体型 DS-ATC を導入している。

3. 電源周波数

新幹線は高速で走行するため多大な電力が必要であり、その帰線電流が軌道回路に流れ込むので ATC に対して妨害電流(ノイズ)となる。DS-ATC では、このノイズに耐えられるように電源同期方式を採用している。電源同期方式は地上装置から送信する ATC 波をトロリ線の電源周波数と同期させて変調して送信し、車上では受信した ATC 波とトロリ線の電源周波数で復調するので、ノイズに対して強い耐性を持っている。現行の 50HzDS-ATC では、トロリ線の周波数と同期させるため 50Hz の偶数次整数倍で ATC 周波数を選定している。そのため 60Hz 区間においては、現行の 50HzDS-ATC と同一の周波数は使用できず、新たに 60Hz 区間の ATC・TD 信号周波数を選定する必要がある。

一方、北陸新幹線(高崎・長野間)では、東京電力(50Hz)と中部電力(60Hz)の両周波に対応したアナログ多段制御 ATC(HS-ATC: Hokuriku Shinkansen -ATC)を採用し、異周波

対策を実施している⁽¹⁾。なお、東海道新幹線(東京・新大阪間)においても、電力会社の送電周波数が 50Hz である区間が存在するが、周波数変換装置により変換して全区間の電源周波数を 60Hz に統一して運行することにより異周波の問題を解消している。

4. 開発経緯

〈4・1〉 前提条件 50HzDS-ATC は東北新幹線(盛岡・八戸間)で導入された後、随時更新が行われ、平成 22 年 12 月開業予定の東北新幹線(八戸・青森間)には ATC 無絶縁軌道回路を採用している⁽²⁾⁽³⁾。北陸新幹線(長野・金沢間)用 60HzDS-ATC のシステム基本は、現行 50HzDS-ATC 車上・地上装置の性能に準拠することとした。

詳細を以下に示す。

- ① 車上無信号許容時間は時速により 2500ms(30km/h 以下), 1900ms(30km/h を超えて, 70km/h 未満), 1200ms(70km/h 以上)とする。
- ② 変調方式は MSK 方式, 電文構成は現行 50HzDS-ATC を踏襲するものとする。
- ③ 一般区間は軌道回路長 1000m(0.3S/km), 散水消雪区間は 500m(1.0S/km)に対応可能とする。
- ④ 設計最高速度を 320km/h とする。

また、システム基本を実現し、現行 DS-ATC を踏襲するための性能として以下を考慮した。

- ① 駅構内は軌道回路境界を明確にできる有絶縁方式とし ATC 信号(ATC/TD)を常時送信する。
- ② 駅中間軌道回路は保全に優れた無絶縁方式とし非共振式とする。
- ③ 無絶縁方式では ATC 波と TD 波を分離し ATC 信号波を踏込送信, TD 波を常時送信とする。
- ④ 無絶縁方式の TD 波は搬送周波数を上下線別各 3 波, 予備 1 波とし, 電源同期 MSK 方式とする。
- ⑤ TD 波の BER(ビットエラーレート) $\leq 1 \times 10^{-5}$ とし, 受信入力端で S/N=13dB 以上確保する。

〈4・2〉 周波数選定 北陸新幹線(長野・金沢間)では、新上越 SS(Substation:変電所)からは 50Hz で送電し、それ以外の SS からは 60Hz にて送電する計画である。通常、新高田 SP(Sectioning Post:き電区分所)および新糸魚川 SP で 50Hz と 60Hz を切替えるが、50Hz で送電する新上越 SS の故障時は、上記両 SP 間に 60Hz 電源にて救済電する計画である。したがって、両 SP 間の ATC には 50/60Hz 両周波数に対応する性能が要求されるが、50/60Hz それぞれの機器を設備すると、単純にコストが倍必要となる。そのため 50/60Hz 区間において、できる限り機器共用化を目指すこととし、BPF(Band-Pass Filter)などを共用するため、ATC・TD 共に既存の 50HzDS-ATC 周波数に近い帯域から選択することとした。

また、北陸新幹線(高崎・長野間)において、DS-ATC への更新が計画されていることから既設の HS-ATC、HS-き電区分との重畳が可能な構成とした。

ATC 周波数は、上下線別に配置するものとし合計 2 波必要となる。候補としては現行の 1500/1600Hz に近い周波数であること、かつ 60Hz 電源の偶数次高調波が条件であることから 1320/1440/1560/1680Hz があげられる。ただし、1320Hz は HS-ATC の副信号である 1200Hz に近接しているため除外し、1440/1560/1680Hz を候補とした。

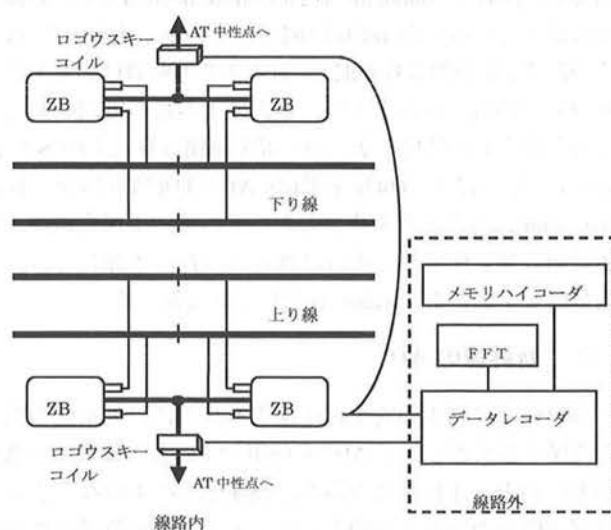
無絶縁軌道回路における TD 周波数は上下線別に計 6 波必要であり、予備 1 波を含め合計 7 波を確保する必要がある。候補としては電源高調波の狭間であり、かつ 50Hz 用無絶縁軌道回路 TD 波の周波数(1925~2175Hz)に近い 1830~2250Hz と考えた。

〈4・2・1〉 相互混変調積計算 選定される 60Hz 用の各 ATC・TD 周波数は、重畳する各周波数(HS-ATC、HS-き電区分、DS-き電区分)の相互混変調積により発生する周波数が妨害信号にならないように選択する必要がある。

混変調計算の結果、ほとんどの組み合わせで問題はなかったが、駅構内などで使用する有絶縁軌道回路の 60HzDS-ATC 周波数と HS-ATC 主信号搬送周波数において 2 次混変調が発生したため、今後の実機における実測により使用の可否を判断することとした。

〈4・2・2〉 帰線電流測定 ATC 装置の情報伝送には、レールを伝送路として使用しているため、電車電流に含まれる電源周波数の高調波に対して十分な妨害耐量を確保させる必要がある。そのため、北陸新幹線(長野・金沢間)で走行する可能性がある E2 系の主回路が異なる GTO(Gate turn-off thyristor)、PWM(Pulse wide modulation)などの 4 編成と East-i(ユニットカット)において、候補となっている ATC・TD 周波数帯域の高調波電流を測定した。

〈4・2・2・1〉 測定方法 北陸新幹線(高崎・長野間)の新坂城 SS(89k803m)にて電車電流測定試験を行った。測定回路図を図-1 に示す。測定方法は、新坂城 SS の中セクションの



ZB: Impedance Bond, AT: Auto-Transformer,

FFT: Fast Fourier Transform

図-1 電車電流測定回路

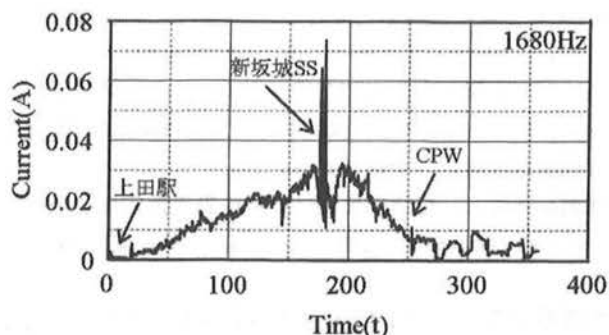


図-2 帰線電流測定結果

ZB 中性点から吸い上げ箇所交流電流センサ(ログウスキーコイル)を接続し、列車走行時においてデータレコーダにて吸上げ電流を測定、記録する。

〈4・2・2・2〉 測定結果 図-2 に E2 系走行時の 1680Hz 成分の時間変化(上田駅出発から新坂城 SS 通過後 3 分)を示す。列車は上田駅を出発後、力行を開始する。力行による電車電流の増加および測定箇所である新坂城 SS までの距離の減少に伴い、吸上げ量が増加し SS での電源切替直前に最大となった。

電源切替後は SS から遠ざかるに従い吸上げ電流が減少する。その後、CPW 通過に伴い減少し、ノッチオフとなりさらに電流が減少した。他周波数や他編成も同様の傾向となった。

測定の結果、ATC 周波数帯域での最大帰線電流は 157mA であった。なお、車上装置の最小動作電流 100mA に対し S/N を 13dB 確保すると妨害許容電流は 22.4mA であり、車上装置における 10% 不平衡、安全係数を 2 とすると、許容できる妨害電流(最大帰線電流)は 224mA となり、157mA に対して十分余裕がある。同様に TD 周波数帯域での測定を行ったところ、PWM 編成 2070Hz の 333mA を最大として、基準となる 200mA 以上の妨害電流が実測された。その結果、現状

表-1 60Hz 無絶縁対応 DS-ATC 周波数

	ATC	TD
周波数	1560Hz, 1680Hz	1920Hz, 1958Hz, 2010Hz, 2040Hz, 2078Hz, 2118Hz, 2148Hz

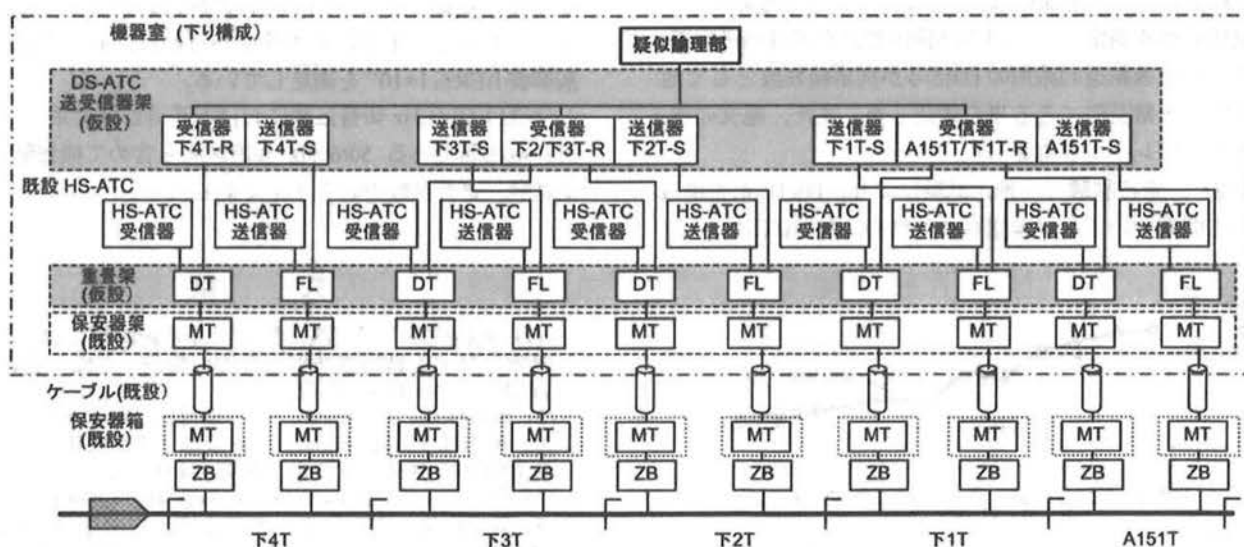
の周波数では実現不可能となり、電文構成を含めた再選定が必要となった。

そこで TD 波 1 波の帯域を $\pm 24\text{Hz}$ から $\pm 15\text{Hz}$ に狭めることで、TD 信号を 7 波確保することとした。MSK 変調においては、1 信号の周波数帯域(阻止帯域)を $\pm 15\text{Hz}$ にすると伝送レートが 20bps となる。伝送レートが小さくなると、TD 電文周期およびデジタルフィルタの遅延が増加することから、TD 電文フォーマットと TD 送信周期、落下判定時間と扛上判定時間、ATC 踏込み送信時間について検証を行った。50HzDS-ATC の TD 電文は 27bit で構成されており、32bps で送信しているため、1 電文の送信時間は 844ms である。今回、TD 電文を 20 bps で送信すると 1 電文の送信時間が 1350ms となり構成できない。そのため、将来対応として確保している 6bit を削除し、TD 電文を 21bit、送信時間を 1050ms とした。表-1 に選定された 60Hz 無絶縁対応 DS-ATC の周波数を示す。

5. 現地試験

周波数選定後、60HzDS-ATC 試験装置を製作し、工場内試験にて仕様や性能に問題がない事を確認した。しかし、シミュレーションおよび工場内での擬似軌道回路装置による試験では、レールを含む電回路などでの実設備による電磁気的特性などを完全には再現出来ない要素がある。特定周波数における軌道回路の異常共振の有無なども、実際の線路上で確認すべき事項である。

そのため、北陸新幹線佐久平駅近傍の上下各 5 軌道回路



S:Server, R:Receiver, FL:Filter Reactor, DT: Divided Transformer, MT:Matching Transformer, ZB:Impedance Bond

図-3 試験構成図 (下り線)

(有絶縁軌道回路)を試験区間として試験装置を既設設備に重畳して設備し、地上試験と実走行試験を行った。重畳フィルタにより HS-ATC 波と DS-ATC 波を重畳し、分波トランスにより、HS-ATC 受信器と DS-ATC 受信器に受信波を分配する構成とした。図-3 に下り線の試験構成図を示す。

〈5・1〉 試験項目と試験結果

〈5・1・1〉 地上試験

①分布定数測定 今回、周波数選定時に使用した軌道回路分布定数(R:レール抵抗, L:レールインダクタンス, G:漏れコンダクタンス, C:静電容量)をバラスト区間, スラブ区間で実測した。その後、測定した分布定数を用いたシミュレーション値と実測値の比較を行った。図-4 に実効電力の実測値とシミュレーションの比較図を示す。図-4 より、実行電力とシミュレーションがほぼ一致しているため、定数の妥当性が確認できた。

②レベルダイヤグラム 有絶縁軌道回路における列車非在線時の TD・ATC 波の実効電力、インピーダンス、位相を各機器の入力端、出力端で測定した。図 4 より、シミュレーションと同等の特性が得られていることを確認した。

③軌道回路の確認 モニタラン試験及び実走行試験を行うために、DS-ATC 単独時及び DS/HS 重畳時の軌道回路の送受信タップの調整を行った。その結果、短絡電流(450mA 以上)、短絡減衰量(0.1Ω 短絡で 26dB 以上)、短絡感度(0.3Ω 以上)などの基準値⁽²⁾が確保でき、軌道回路性能を満足することを確認した。

④レール破断試験 レール破断が検知できることを確認するため、インピーダンスボンドの接続を外すことにより、模擬的にレール破断状態をつくり試験した。その結果、最低でも 19dB の短絡減衰量が確保できた。この場合、DS-ATC の在線判定レベル 10.5dB の短絡減衰量を十分確保しているため、在線状態となり破断を検知できる。

⑤ノイズ測定 DS-ATC 単独時及び DS/HS 重畳時において、ホワイトノイズを測定し S/N を計算した。その結果、S/N の基準値である 13dB を確保していることを確認した。

⑥TD受信レベル測定 今回の試験区間是有絶縁軌道回路のため、無絶縁軌道回路用のTD信号が列車検知波として地上で長時間正常受信できる事を確認した。また、電文の復調確率や受信レベルを確認した。

〈5・1・2〉 走行試験 地上試験により、DS/HS重畳構成について問題ないことが確認されたため、HS-ATCに

DS-ATCを重畳し試験走行を行った。ただし、制御はHS-ATCにて行い、DS-ATCは各種モニタにおいて確認している。その後、ビット誤り率および受信レベルの変動を確認するため約2ヶ月間のモニタラン試験を行った。DS-ATC制御での走行試験は今後行う予定である。

①受信レベル 受信器における最小動作電圧10mVrms(レール電流90.9 mA相当)に対して、実測した最小値は60mVrmsであった。

②無信号時間 無信号時間の超過により、緊急停止制御になることもなく、問題はなかった。しかし、今回は有絶縁軌道回路で試験したため、無絶縁軌道回路による踏込送信制御⁽²⁾⁽³⁾で再確認する必要がある。

③ビット誤り率 走行試験およびモニタラン試験において、電文誤り発生状況を調査したところ、総受信電文25168電文に対しエラー電文は2電文であり、BERは 1.06×10^{-6} となり、基準値である 1×10^{-5} を満足している。

④受信レベル変動 2dB以上の受信レベル変動はなく、問題ないことを確認した。

6. まとめ

北陸新幹線(長野・金沢間)に設備予定の 60Hz 対応 DS-ATC の開発を行っている。60Hz 用の ATC・TD 周波数を相互混変調積計算、帰線電流測定により選定したが、TD の周波数において S/N が確保できないことが判明した。そこで、TD 電文構成を見直し TD 電文長を 21bit、送信時間を 1050ms とすることで S/N を確保した。その後、選択した周波数を、シミュレーションおよび工場内による模擬装置において確認した。

シミュレーションや工場内試験では、レールやケーブルなどの条件を反映できない可能性があるため、地上装置を北陸新幹線(高崎・長野間)佐久平駅近傍の上下各 5 軌道回路に仮設・重畳し試験を行った。その結果、短絡電流 450mA 以上、短絡感度 0.3Ω 以上を確保でき軌道回路として成立することが確認できた。列車走行試験においても不正落下することなく、正常に列車検知が行われ、ビット誤り率の基準値 $BER \leq 1 \times 10^{-5}$ を満足している。

今後は 50/60Hz 切替区間における誘導妨害対策を行い、救済区間である 50/60Hz 共用区間も含めて機器製作と地上試験、走行試験を行う予定である。

文 献

- (1) 奥谷民雄, 犀川潤, 館裕: 北陸新幹線における ATC 装置に対する異周波妨害対策法の開発, 電気学会論文誌, Vol.121-D No.1 pp. 31-42
- (2) 奥谷民雄, 中村信幸, 五十嵐得郎, 松木孝仁, 福田光芳, 渡辺郁夫, 網谷憲晴, 大沼晴彦: 新幹線用無絶縁 ATC 軌道回路の開発, 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道・ITS 合同研究会 TER-06-89/ITS-06-46, (2006)
- (3) 奥谷民雄, 中村信幸, 須貝孝博, 仁分康雄, 大内透, 松木孝仁, 福田光芳, 本戸慎治, 大沼晴彦: 新幹線用無絶縁 ATC 軌道回路の開発 (試験報告), 電気学会研究会資料 交通・電気鉄道研究会 TER-07-37, (2007)

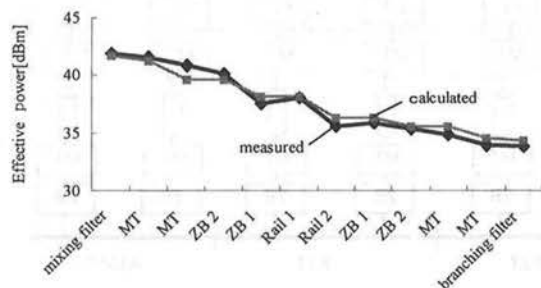


図-4 レベルダイヤグラム (下 2T)