

耐ノイズ性の高い低周波軌道回路の開発

信号通信技術研究部 信号研究室

室長 福田光芳

1. はじめに

軌道回路は、適用される線区の条件に対応するために、様々な方式が開発されてきた。軌道回路の保守・工事の細かい知識・技術は、その種別毎に異なる部分も多く、また、予備品の共通化ができないため、軌道回路方式の種別が多くなると効率的な管理が難しくなる。個々の軌道回路方式について考えると当該線区の条件に適合した設備といえるが、全体を考えた場合、軌道回路方式の種別が多いことは保守・工事の効率化の面で不利になる。

また、新型車両が開発された場合、車両からの帰線電流に含まれるノイズが既存軌道回路に影響を与えないことを、その都度、試験によって確認している。しかし、車両から発生する帰線電流のノイズの影響を受けやすい軌道回路方式があること、対象とすべき軌道回路方式が多いため、的を絞った対策が施しにくいことなどから新型車両の開発の負担となっている。

そこで、耐ノイズ性が高く、かつ線区の条件に依らず導入することのできる駅中間用の低周波軌道回路の開発を行った。ここでは、新しく開発を行った軌道回路の仕様の検討結果及び試作装置を用いた営業線における検証試験結果について報告する。

2. 軌道回路要件の整理

新しい軌道回路を線区条件に依存せずに適用可能とするためには、少なくとも①列車検知性能、②環境による特性変動、③制御可能な軌道回路長、④耐ノイズ性について、他の軌道回路と同等以上の性能が確保できることが必要となる。また、当然ではあるが、安全性、信頼性、コストも重要である。在来線の地上信号機で制御される駅中間に適用することを対象とし、電化方式や近接設備（新幹線等）、列車密度などに関わらず適用可能な軌道回路の要件について、検討した結果を表1に整理した。ただし、全ての線区条件を満足することは不可能であるので、長大軌道回路の区間、漏水や結露の激しいトンネル内など特殊な環境については、軌道回路長に制約を設けて分割するなどの対策が必要である。

耐ノイズ性について、表1では考え方を示しているが、具体的には帰線電流に対する許容値を

表1 軌道回路要件の整理結果

| 項目 | 性能 |
|---------|------------------------------------------------------------|
| 短絡感度 | 他軌道回路と同等以上の短絡感度 乾燥時1Vで列車検知 |
| 環境条件 | 漏れコンダクタンス0.5S/km以下 |
| 軌道回路長 | 1.5km～2.0km |
| 耐ノイズ性 | 50Hz及び60Hzの倍数を避ける インバータノイズに対してはS/Nを確保 瞬時発生ノイズを時素等で許容 |
| 情報伝送 | 5現示の制御に対応 |
| レール絶縁不良 | 絶縁不良により不正扛上（動作）しない |
| 電源設備の条件 | 同期電源（信号高圧）が不要 |

定めることになる。通常の状態では列車が在線していない時に誤って在線と判定しないための「安定動作確保の許容値」と、レール破断時に誤って非在線と判定しないための「危険側誤動作防止の許容値」の2種類の許容値が軌道回路方式毎に設定される。帰線電流のノイズ成分が軌道回路の受信器に流入する大きさは、帰線電流の不均衡率に比例する。通常の状態を不均衡率10%

程度とすると、レール破断時は不平衡率 100%になるので、レール破断時は通常の 10 倍のノイズが流入することになる。通常、危険側誤動作防止の許容値は、不平衡率 100%の時に軌道回路の受信器に流入するノイズ成分の大きさが列車非在線のしきい値を超過しないように定める。しかし、しきい値を超過するノイズが流入しても、ノイズによって列車非在線と判定することを防止できる場合は、危険側誤動作防止のモードを考慮しなくて良いため、安定動作確保の許容値だけを設定すれば良くなり、結果として耐ノイズ性が上がることになる¹⁾。

3. 仕様の検討

軌道回路要件の整理結果を満たす新しい設備として、低周波 MSK 軌道回路の開発を次のように進めた。

まず、1.5km~2.0km 程度の距離で漏れコンダクタンスが乾燥状態の 0.01S/km 程度から 0.5S/km まで無調整で制御する必要があることなどから 200Hz 以下の低い周波数帯域を使用することとした。

また、耐ノイズ性を大きくするために、レールに流す軌道回路電流をデジタル符号化し、受信器で符号照合を行うことによって列車在線の判定を行う方式を適用することとした。これにより、100%不平衡の状態でも危険側誤動作するモードを排除できるので、安定動作確保のための許容値だけを設定すればよく、結果として耐ノイズ性が向上する。また、変調方式はデジタル ATC など実績のある MSK 変調方式とした。

さらに、50Hz 地域と 60Hz 地域で同じ仕様（同じ周波数）とすることとした。これは、共通化によってコスト低減が期待できることに加え、50Hz 地域と 60Hz 地域の境界などで異電源が隣接する箇所においても、隣接線の妨害の影響を受けにくい利点を考えたためである。使用する周波数は、電源高調波及び直流電化区間で影響を受けやすい 50Hz 以下の帯域を避けることを考慮し、83Hz 帯、135Hz 帯、165Hz 帯とした（図 1）。

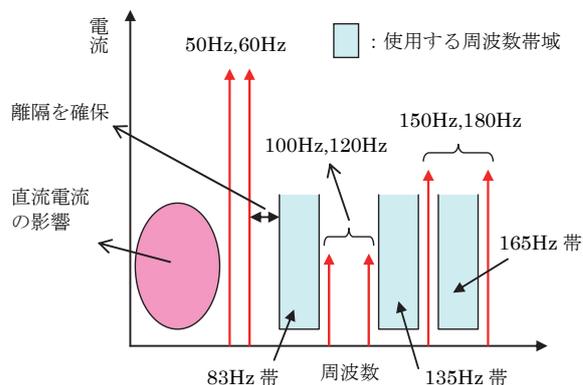


図 1 電源高調波ノイズと使用帯域

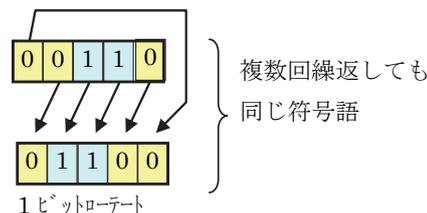


図 2 巡回符号のイメージ

帯域内の妨害耐量は、現在の車両や今後開発される車両のノイズに対して十分な余裕を考慮し、それぞれの帯域で 1.5A, 1.2A, 1.0A とした。

デジタル符号の検定については、なるべく多くのビットを所定の時間内に受信・検定する必要があるが、今回検討している軌道回路方式では伝送速度が低いため、効率的に受信・検定するため「巡回符号方式」を採用した²⁾。

通常、レールを用いたデジタル符号伝送では、フレームの先頭位置を見つけるための「ヘッダ部」と必要なデータと誤り検定符号などからなる「データ部」からフレームが構成されている。中間軌道回路では、送信側と受信側が非同期で

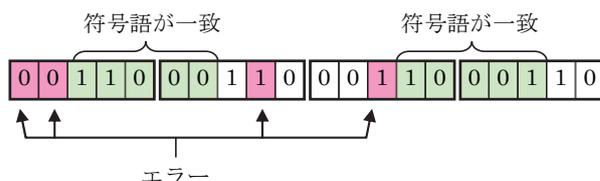


図 3 任意フレーム検定の例

動作するので、「ヘッダ部」の 2 ビット目から受信した場合を考えると、1 フレーム分の間、受信データを有効に活用できない。

巡回符号方式は、特定のビット列を符号語とした場合に、そのビット列を巡回（ローテート）させたビット列も同じ符号語として扱うものである（図 2）。よって、どの位置から受信しても符号語を確定することが可能になる。

さらに、受信したビットを有効に利用して検定を行う方法として任意フレーム検定を考案した³⁾。これは、巡回符号方式を対象とした検定方式であり、フレーム長 f 、受信フレーム数 m とした場合、 $f \times m$ ビットの中で長さ f のビット列を重ねないように n 個抽出し、抽出したビット列に対して ${}_m C_n$ 相当の検定を行う（ m フレーム中 n フレームが合格・一致すれば採用）。巡回符号では、符号語の中のスタート位置が異なっても照合（同じ符号語であることの確認）は可能である。 n 個のビット列がそれぞれ同じ符号語に一致することを確認する場合に、受信した情報を正しい符号語として受理する。図 3 は"00110"という 5 ビットのフレームを 4 フレーム受信した場合の例を示している。ピンク色の部分でビットエラーが発生すると、最後のフレームは正しく受信できるが、他の 3 つのフレームはエラーとなるため、 ${}_4 C_2$ の検定は不合格となる。一方、任意フレーム検定では、図 3 の緑色で示したビット列のようにエラー箇所を避けることにより、正しい符号語と一致するように 2 つのビット列を抽出することができる。4 フレーム分のビット列から 2 フレーム相当の符号語の一致を確認できたので、 ${}_4 C_2$ 相当の検定に合格したことになる。これより、ランダムなビットエラーによって検定不合格が発生し、動作時間が不要に延長することを防ぐことができる。

搬送波を 3 種類設けて隣接軌道回路の信号を区別することに加え、軌道回路毎に ID を設定し、同じ搬送波を持つ別の軌道回路の信号も区別できるようにした。情報数は 5 現示を実現するための 5 情報に予備として 1 情報を加え、6 情報（符号語 5 種類と無信号による列車在線検知で 6 情報）とした。予備の 1 情報は、有信号による停止現示や車上への緊急停止情報の伝送などに応用できる。符号語長を 11 ビットとし、8 種類の ID に対応した符号語の集合を選定した。

これらの検討をもとに表 2 に示す低周波 MSK 軌道回路の仕様を作成した。

表 2 低周波 MSK 軌道回路の主な仕様

| 項目 | 性能 |
|--------|------------------------------------------------|
| 変調方式 | MSK変調 |
| 搬送波周波数 | 83Hz, 135Hz, 165Hz |
| 伝送速度 | 20bps |
| 符号方式 | 巡回符号方式, 11bit |
| 情報数 | 1軌道回路あたり5情報 |
| 扛上判定 | 最小動作レベル以上, かつ, ${}_4 C_3$ 相当成立 |
| 落下判定 | 落下レベル以下, または, ${}_6 C_2$ 相当不成立 |
| 許容値 | 1.5A (83Hz帯) 1.2A (135Hz帯) 1.0A (165Hz帯) |

4. 試作装置による現地試験

送信器、受信器、整合変成器（MT）、50Hz の交流成分除去用のリジェクタ、及び受信状態記録用のモニタ装置の試作を行った。実際の使用環境下において、試作装置の機能を検証するため、営業線を用いた検証試験を実施した。試作装置の軌道回路電流を既設の軌道回路に重畳し、列車検知が安定して行われること、MSK 変調を用いたデジタル符号伝送が安定して行われることを確認した。また、既設の軌道回路に重畳するために、2 つの軌道回路電流を混合・分配するためのフィルタを内蔵した重畳器を試作した。

検証試験は、AF3 位 2 重系用 ZB を用いた約 1.4km の軌道回路を用い、約 1 ヶ月実施した。83Hz、135Hz、165Hz のそれぞれの搬送波に切替えて、既設軌道回路に影響がないことを確認し、試作装置の各部の電圧・電流を測定し、適切な伝送特性が得られていることを確認した上でモニタ装

置を用いた無人測定を行った（図4）。

伝送品質の確認結果を表3に示す。83Hzと165Hzでエラービットが11ビットとなっているが、いずれも軌道回路進入直後、または、進出時の過渡的に受信電圧が変化する状態で、1フレームがエラーとなった事象であり、平常状態では伝送エラーは発生しなかった。ビットエラー率はいずれも 10^{-6} 未満であり、実際のノイズ環境下で十分な伝送品質が得られた。なお、135Hzについては、ビットエラーが発生しなかったため、1ビットのエラーが発生したと仮定してビットエラー率を算出した。

試験期間中の列車検知状態を集計した結果を表4に示す。試作装置が検知した列車数は、既設軌道回路の検知結果を同じであった。また、期間中、列車通過以外で列車検知する事象や列車通過中に不正に列車非在線と判定する事象は発生せず、安定して列車検知が行われた。

5. まとめ

耐ノイズ性が高く、電化方式など線区の条件に依らずに適用可能な中間軌道回路の仕様を作成した。また、仕様に基づいて装置を試作し、実際の営業線において、安定して動作

することを確認した。これまでの検討及び試験によって、機能仕様の検討及び検証は完了したといえる。今後は、必要に応じて実用化の際の機器仕様の整理等の支援を行ってきたい。

最後に、本研究開発を進める上で多大な協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 寺田夏樹, 福田光芳: 簡易な符号伝送による低周波軌道回路の耐ノイズ性能向上, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.11-16, 2010
- 2) 新井英樹, 渡辺郁夫, 高重哲夫, 犀川潤, 奥谷民雄: 低周波デジタルコード式軌道回路の開発, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.21-26, 1999
- 3) 福田光芳, 寺田夏樹, 北野公一, 遠山喬: 耐ノイズ性を向上した中間軌道回路の開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.5, pp.17-22, 2011

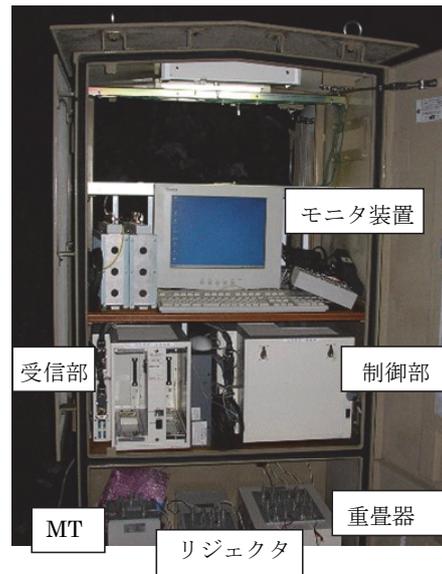


図4 仮設した試作装置の外観

表3 伝送品質の確認結果

| 搬送波 | 総受信ビット | エラービット | ビットエラー率 |
|-------|------------|--------|----------------------|
| 83Hz | 20,520,250 | 11 | 5.4×10^{-7} |
| 135Hz | 4,964,053 | 0 | 2.0×10^{-7} |
| 165Hz | 34,090,548 | 11 | 3.2×10^{-7} |

表4 検知列車数の比較

| 搬送波 | 試作装置 | 既設軌道回路 |
|-------|------|--------|
| 83Hz | 777 | 777 |
| 135Hz | 187 | 187 |
| 165Hz | 1260 | 1260 |