

長大軌道回路の耐ノイズ性能向上

信号通信技術研究部 信号
主任研究員 寺田 夏樹

1. はじめに

近年、車両機器においては、VVVF 装置や SIV（静止型インバータ）装置に代表されるパワーエレクトロニクス技術が導入されている。これら車上機器から発生する高調波電流に対して、軌道回路が誤動作しないために設定されている妨害許容値が小さく、最近の車両開発における重要課題となっている。特に長大軌道回路と呼ばれる種別の軌道回路において妨害許容値が非常に小さい。そこで長大軌道回路を対象に、現場機器を最大限利用しながら、送信信号を符号化し、受信時に検定を行うことで、危険側誤動作を防止し、妨害許容値を向上させる方策について検討を行った。そして試作装置により、所内及び沿線環境下での検証を実施した。

2. 長大軌道回路の妨害許容値

長大軌道回路は閑散線区等に使用されている軌道回路で電化区間では最大 5km の制御長をもつものである。商用周波数の 1/2 (25Hz もしくは 30Hz) を無変調で使用し、受信器においては LPF で処理した信号を整流して、そのレベルの大小により列車の在線を検知している。

軌道回路の妨害許容値には (1) 安定動作確保のための許容値（平常時 (10% 不平衡) において妨害により軌道回路が不正に落下しない）、(2) 危険側誤動作防止のための許容値（レール破断等の異常時 (100% 不平衡) において妨害により軌道回路が不正に動作しない）の 2 種類がある。これらは前提となる不平衡率の下で、最小動作電流等から求めるが、長大軌道回路の場合、危険側誤動作の許容値が 0.3A である。車上側でも対策を実施しているが、許容値が非常に小さいことから対応には限界があり、軌道回路としても対策が求められている。

3 妨害対策の検討

3. 1 対策の基本的な考え方

長大軌道回路でも他の軌道回路と同様に、安全性技術の採用によって危険側誤動作防止の許容値を廃止できれば、車両開発の負担を軽減できるとともに、信号設備における誤動作のリスクを低減できる。その考えの下、以下の方針で検討を行った（図 1 参照）。(a) 周波数については現行の長大軌道回路の周波数とし、伝送特性もそのまま利用する。(b) 機器の変更は最小限とする。特に現場機器についてはそのまま使用する。

(c) 信号に対して符号に従って変調を行い、信号波の有無だけでなく符号の照合により、軌道回路の在線判定を行う。(c) 符号化はノイズが擬似符号になる可能性を考慮に入れ、交番信号（0 と 1 の繰り返し）以外の符号化を行う。

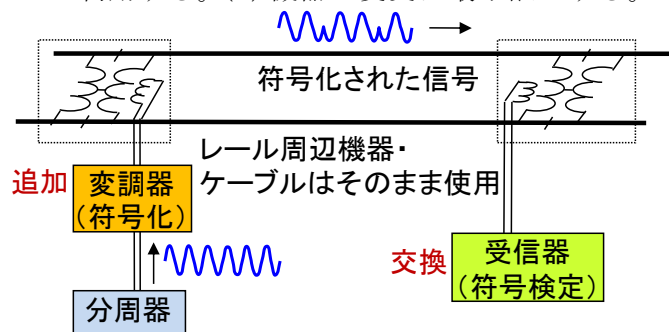


図 1 対策の基本的な考え方

3. 2 変調方式の検討

変調方式にはこれまで MSK 変調や断続変調の採用例があるが、今回は位相変調方式の 1 つである BPSK (Binary Phase Shift Keying) 変調を採用した。具体的には送信信号の極性を半導体スイッチ等により反転させることとし、その反転の有無に情報を割り当てる。これにより送信器として分周器をそのまま活用して符号化を実現できる。

符号語については巡回符号を採用する。これは符号をビットシフトしたものを同一の符号語として扱うものである。この巡回符号を連続して切れ目なく流し続けることにより、受信側では読み始めた箇所から符号語として扱うことが可能となる。今回は軌道回路毎に固定符号とした。0 が長く連続する符号、1 だけの符号や、0 と 1 の交番信号を避けることから、6bit 符号の場合は 010011 と 001011、7bit 符号の場合は 0001011、0100111、0100011、0010111 を使用することとした。

伝送速度については、入力フィルタの帯域を搬送波±5Hz 程度の範囲に収める方針としたため、10bps 程度が限界となる。実装の容易さから 1bit の時間は搬送波周期の整数倍とする必要があり、帯域 10Hz 以内で極力速い速度として、搬送波が 25Hz の場合では 8.33bps (3 波長)、30Hz の場合では 7.5bps (4 波長) とした。

3. 3 検定方式の検討

軌道回路の落下扛上を判定する検定方式の検討を行った。

落下している状態から扛上する場合の検定については、(1)列車進出から扛上に至る時間は 2～3 秒程度、(2)100%不平衡時においてノイズにより誤動作する確率は $1 \times 10^{-9} \sim 10^{-10}/h$ 程度 (10～100 万年に 1 回)、(3)平常時に誤って扛上しない確率は 100 年、100 軌道回路で 1 回程度、という方針で検討した。その結果 4 符号中 2 符号合格で扛上判定とすればよいという結論となった。ただし、危険側誤動作の確率はこれだけでは十分に小さくできないため、1bit に対して 3 倍のオーバーサンプリングをするという手法を採用する。一方、安全側誤動作の確率は信号と雑音との C/N で決まるが、C/N=9dB (10%不平衡時の妨害電流 1.8A 相当) の時の理論的な誤り率に対して、上記の範囲に収まる。

扛上している状態からノイズにより落下と判定する検定についても、安全側誤動作の確率を 100 年、100 軌道回路で 1 回程度という方針で検討し、その結果 4 符号中 2 符号合格しなければ落下とすればよいという結論となった。

なお、落下判定に関してはレベル判定結果が優先する。従って短絡により受信レベルが所定の値以下となれば符号判定の結果に関わらず軌道回路が落下となる。

4. 試作装置による所内評価

試作装置として変調器および受信器を試作し (図 2、3)、誤り率、送受信特性等の各種測定を行った。

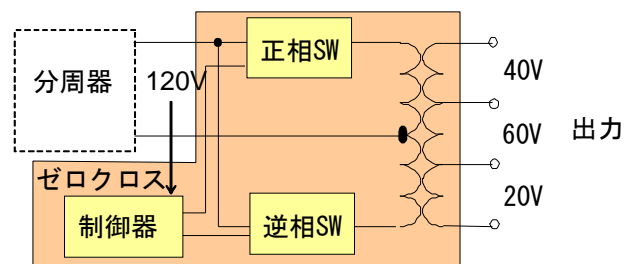


図2 変調器の構成

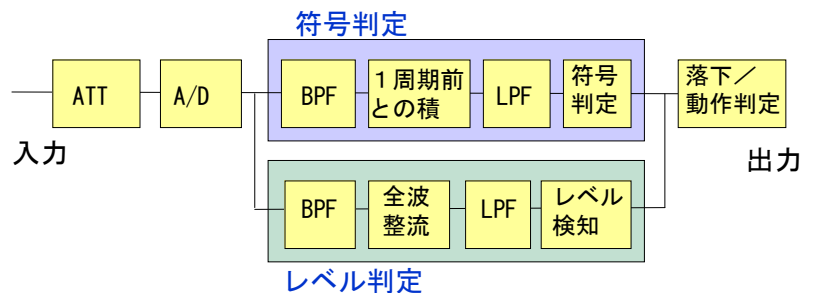


図3 受信器の構成

切替器は分周器と送端の間に挿入する形となるが、分周器と切替器の間、切替器と送信側のインピーダンスボンドとの間にそれぞれ軌道抵抗子を挿入する必要がある。

以下の検証結果から検討内容に問題がないことを確認した。

4. 1 送受信特性

図4に分周器の送信電圧を120Vとして、擬似軌道回路における漏れコンダクタンス、距離の違いによる受信レベルの測定結果を示す。

0.5S/km、5kmにおいても最小動作レベル3Vの倍の6Vが確保できていることを確認した。短絡減衰量についても調査した。図5に軌道回路長5kmの例を示す。補償量を6dBとすれば短絡感度 0.2Ω であり、現行と同等以上の性能を確保できることを確認した。

4. 2 入力立ち上がり特性と動作時間

受信信号および検波信号の立ち上がり特性を調べた。検波出力が使用できるのは450ms以降であることがわかった。この結果2~3符号で動作する場合、2.17~3.0秒で動作することとなる。この値は長大軌道回路の受信器の動作時間0.5~1.5秒に時素2秒を加えた2.5~3.5秒と同程度となる。

4. 3 安定動作に関する誤り特性

軌道回路信号に加え、一定振幅の正弦波を妨害として与えた場合の符号誤りについては、妨害がしきい値を超えると誤りが急激に増大する。そのしきい値は最大で受信信号の-9dBであった。また白色雑音についてC/Nに対するビット誤り率を測定した(図6)。理論値ではC/N=9dBまで許容されるが、試作機ではC/N=13dBという結果となった。

許容値については妨害を単一波として考えてC/N=9dBとすると、相当する妨害電流が1.8Aであるため、0.9Aを許容値とすればよいこととなる。

4. 4 危険側動作に関する誤り特性

危険側誤り見逃しの発生について検証した。正弦波妨害に対して誤り見逃しが発生しないことを確認した。白色雑音については雑音のレベルが小さく動作に至らなかったが、符号判定のみを行うと、符号が一致している例が1時間に数百回発生した。これに対して3倍のオーバーサンプ

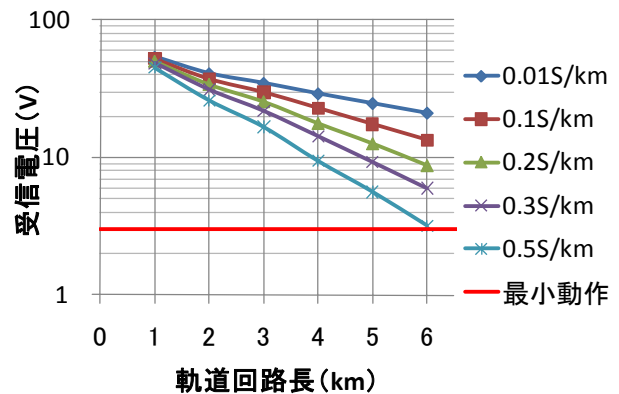


図4 受信電圧(30Hz, 商用 ZB, 共振 C 43 μ F)

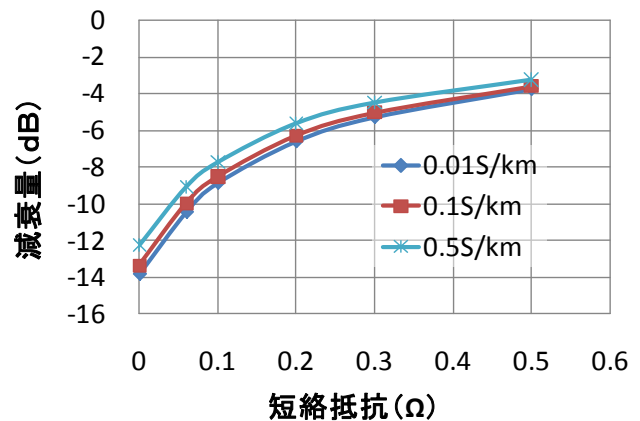


図5 送端短絡時の短絡減衰量(軌道回路長5km)

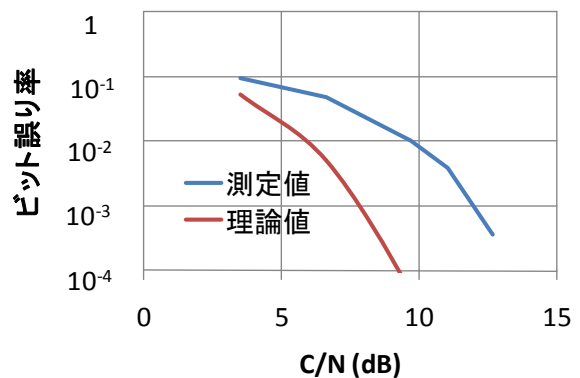


図6 ビット誤り率の測定結果

リングを行うと符号の一致例はなく、危険側誤りをほぼなくすることが可能であることを確認した。

4. 5 帰線電流による評価

測定した帰線電流データを再生して妨害として与えたときの動作について調査した。危険側誤動作についてはレベルが小さく動作は見られなかった。安定動作に関してノッチ入切等において bit が誤ることが確認されたが、軌道回路復旧には至らなかった。ノッチ入切等による電流変化以外での問題はなかった。これらの結果から検討している検定方式により軌道回路が帰線電流により誤動作せず、また安定的に動作することが確認できた。

5. 実地試験による評価

試作装置を現地に仮設して、符号の送信が実際に可能か、列車検知に問題がないか、また列車が進出した際に軌道回路がどの程度の時間で扛上するか検証を行った。駅間に軌道回路が設備されていない特殊自動閉そく区間の中から 6km の区間を選定して約 1 カ月間試験を実施した。以下の検証結果から軌道回路として十分に機能することを確認できた。

5. 1 送信レベルと短絡減衰量

送信 80V に対し、受信 20V であり、室内試験時と比べると 3.5dB ほど受信レベルが大きい結果となった。短絡減衰量については補償量を 6dB とすると 0.5Ω 、9dB とすると 0.3Ω の短絡感度が得られていることが分かった (図 7)。

一方、列車通過時における受信レベルは通常はほぼ 0V となったが、時々レベルの上昇がみられた。但し、短絡減衰量としては 10dB 以下となっており、補償量 6dB で十分列車検知が可能と考えられる。

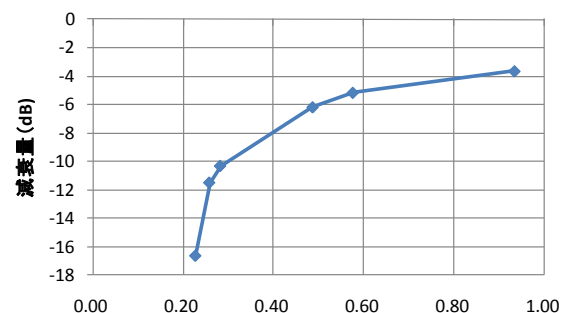


図 7 短絡減衰量 (送端短絡)

5. 2 符号誤りの状況

扛上から落下に至る場合、および落下から扛上に至る場合を除いて符号誤りを調べたところ、20 日間で 3bit の符号誤りが見られ、ビットエラーレートは 2.77×10^{-7} であった。これは検討の前提とした 2.27×10^{-5} より小さかったが、実際のノイズが少なかったためと考えられる。

5. 3 動作時間の検証

符号判定をレベル判定と独立して行った場合、受信レベルが扛上判定レベルに達するとすぐ動作する事例がほとんどであった。実際には受信レベルが扛上判定レベルに達した時点から符号判定を行うこととなるが、その場合でも符号判定開始から 2 秒で扛上判定することが可能であることが分かった。

6. まとめ

長大軌道回路の耐ノイズ性能向上策について所内および実地試験により検討した方式の有効性を確認した。検討の結果、現在の危険側誤動作防止の許容値 0.3A に対し、安定動作確保の許容値 0.9A を満たせばよいこととなり、許容値が 3 倍となる。また軌道回路特性としては現状と同等以上のものが得られることも確認した。今後は実用化を支援していく考えである。