

直流電車帰線電流の低周波成分予測手法の構築と検証

車両制御技術研究部 駆動制御研究室
主任研究員 廿日出 悟

1. はじめに

鉄道分野における誘導障害試験とは、車両から発生する電流や電磁波が地上の鉄道信号に影響を与えないことを確認する試験である。誘導障害試験には帰線電流試験と直達ノイズ試験の2つがある。帰線電流は軌道回路に、直達ノイズは地上子に影響を与える。

もともと誘導障害という単語はトロリ線に流れる電流が沿線の電話通信線に雑音を誘導する通信誘導障害を指す言葉であった。後に車両から発生する電流や電磁波が鉄道信号に悪影響をおよぼすことがわかってからは、信号機器への影響も誘導障害と呼ぶようになった。

鉄道車両へのパワーエレクトロニクスの適用拡大によって、誘導障害試験の合格までに近年は時間がかかるようになった。誘導障害試験合格の困難さは地上装置種別の多さ、限度値の低さに加えて、車両が発生するノイズを定量的に予測することが難しいことにある。なかでも低周波軌道回路に対する帰線電流の影響はこれまでどのようなメカニズムで妨害が起きるか不明であった。

本発表では、直流電車の帰線電流の低周波成分を予測する手法を設計パラメータから理論的に導き、実車による試験によって妥当性を確認したのでその結果を述べる。

2. 直流電車帰線電流の低周波成分を推定する理論の構築

2.1. 測定結果例に対する考察

直流電車帰線電流の測定解析結果例を図1に示す。低周波に振幅の大きい成分が観測される、周波数が低いほど振幅が大きいといった特徴がある。これはインバータ直流電車であれば車種にかかわらず共通の傾向である。

これまで帰線電流の低周波成分の要因は外乱(離線や空転など)に対するインバータ内部の制御の過渡的な応答によるものではないかと考えられてきた。確かにこれら外乱発生時には、低周波成分が大きくなることが経験的にわかっている。また、このような考えから帰線電流の低周波成分を抑制する制御手法なども報告されている。

しかし、外乱が発生しないときにも図1のように低周波成分が発生することから、低周波成分はもっと根本的な理由があるのではないかと考えられる。

2.2. 直流電車帰線電流低周波成分の予測式

これまでの帰線電流解析はインバータ等電力変換装置の挙動にのみ着目してきた。なかでもスイッチング関数を用いて解析的に解く方法は多くの分野で高調波解析に利用され、またその妥当

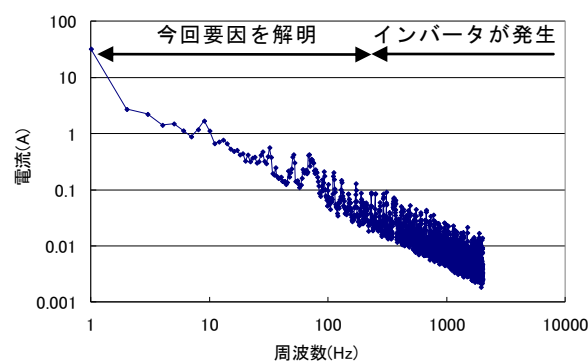


図1 直流電車の帰線電流解析例

性が実証されている。しかし、スイッチング関数を用いる方法ではインバータの周波数に関連する周波数成分のみが高調波として出現するため、図 1 のような低周波は出現しない。そのためインバータではない、別の要因を考慮する必要がある。

ここでは、列車のマクロな挙動に基づく帰線電流変化がどのようになるかを解析的に導出する。まず、列車質量 M と動輪周引張力 F 、列車加速度 α との関係は運動方程式から $F = M \alpha$ である。また、仕事率は定義から引張力 F に速度 v を乗じたものである。さらに仕事率は電力供給側から見ると架線電圧 E と帰線電流 I_s の積、列車パワーにほぼ等しく、整理すると(1)式のようになる。

$$EI_s = Fv = M\alpha v = Mv \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

最も大きな低周波成分を発生させる、定トルク領域では車両加速度 α_1 が一定なので、(1)式に $v = \alpha_1 t$ を代入すると帰線電流は(2)式

$$I_s = \frac{M\alpha_1^2}{\pi E} t \dots\dots\dots (2)$$

で表すことができる(定数は省略)。(2)式を区間 $[-\pi, \pi]$ で打ち切り、繰り返し波形とみなしてフーリエ級数展開すれば(3)式が得られる(直流成分は省略)。

$$I_s = \frac{2M\alpha_1^2}{E} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin nt}{n} \dots\dots\dots (3)$$

区間を $[-\pi, \pi]$ としたので n の単位は角周波数(rad/s)に相当する。そこで周波数(Hz)表記に変更するため(3)式に $n = 2\pi f$ を代入し、振幅だけに着目すると(4)式となる。

$$I_s = \frac{M\alpha_1^2}{\pi E f} \dots\dots\dots (4)$$

(4)式が低周波成分の予測式である。計算に必要なパラメータは起動加速度 α_1 、列車質量 M 、架線電圧 E および周波数 f のみである。

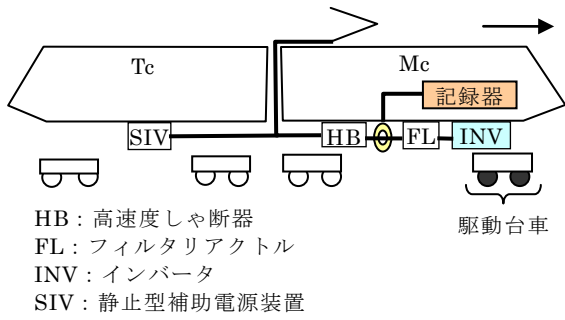
3. 構築した予測式の検証

2 節に述べた予測式について実車を用いた試験によって検証を行った。試験車両として鉄道総研所有の R291 試験電車 2 両編成を用いた。この電車は 8 軸中 2 軸のみを 1 台のインバータで駆動しており、MT 比では電動車 1 両に対して付随車 3 両である 1M3T に相当する。試験車両の概要と測定構成を図 2 に示す。

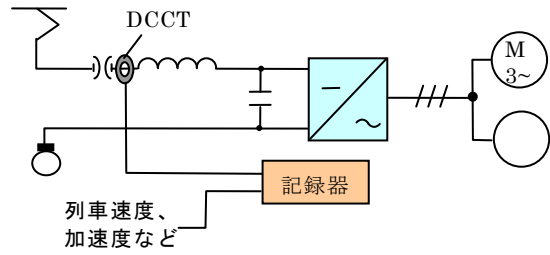
鉄道総研内のループ線にて走行を行い、フィルタリアクトルの架線側の電流を測定した。車両はループ線端点から一定の加速指令(起動時のトルク電流 $I_q = 75A$ または $I_q = 200A$ に相当するノッチ指令)で加速した。試験結果を図 3 に示す。周波数解析に使用するデータには定トルク領域で単一の制御モード(非同期モード)、かつ空転が発生していない 10 秒間を解析用として用いた。理由はこれまで低周波成分の要因と考えられてきた制御の過渡応答が本結果に關与する可能性を排除するためである。

解析には窓関数を用いないフーリエ変換を適用した。窓関数を用いない理由は、元波形が単調増加の波形であり、窓関数によって波形が変形することを防止することが主な理由である。

各ノッチについて解析を行った結果を図 4 に、図 5 のうち外乱の可能性を少ない周波数について幾つかプロットして予測式と比較したものが図 5 である。

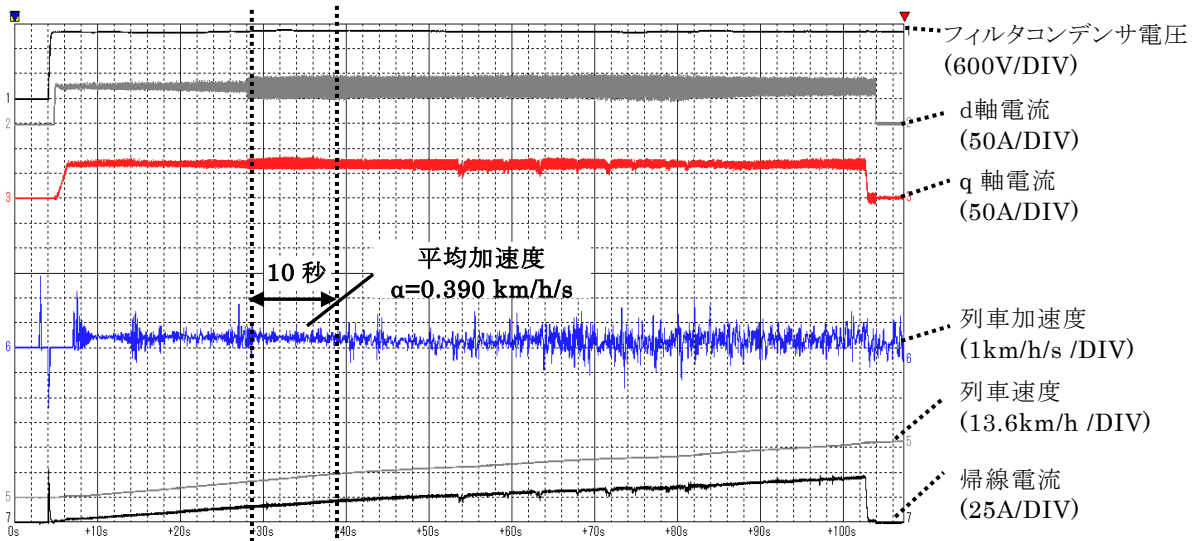


(a) 車両の状態

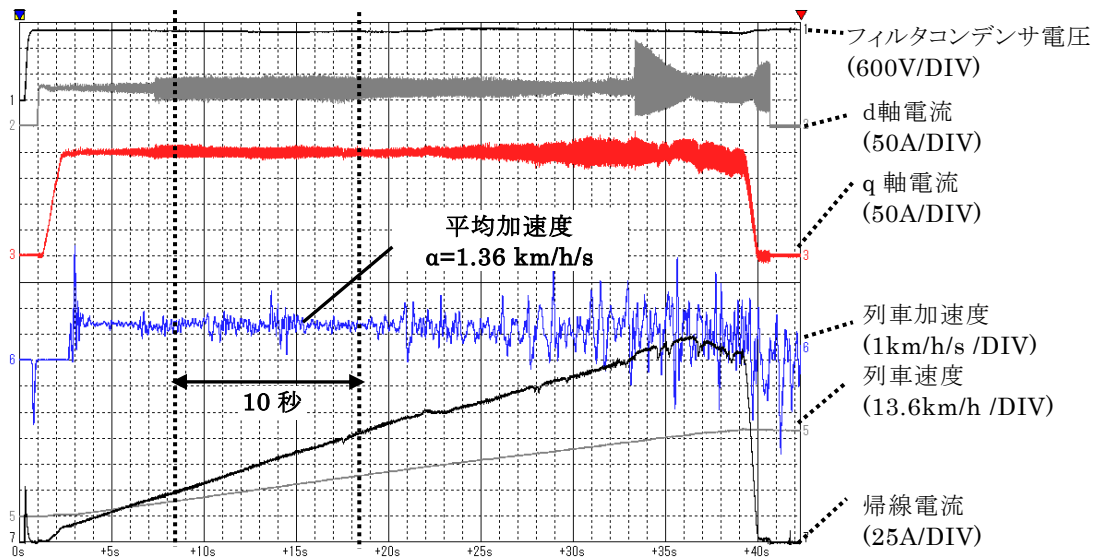


(b) 測定構成

図2 実車試験における車両の構成



(a) $I_q=75A$



(b) $I_q=200A$

図3 実車による帰線電流測定結果

測定値と予測式から得られた値を比較すると、スペクトルが周波数に反比例する傾向や、代表周波数における値が $I_q = 75 \text{ A}$ 、 $I_q = 200 \text{ A}$ どちらの場合も良く一致している。なお、 $I_q = 75 \text{ A}$ の $10 \sim 30 \text{ Hz}$ において予測式と著しく乖離しているが、これは車両の LC フィルタの影響である。LC フィルタの影響はインバータの等価内部抵抗が小さくなるほど、つまり帰線電流が多いほど小さくなる。誘導障害試験では最大ノッチで試験するため $I_q = 200 \text{ A}$ において全周波数域で良い一致を見たことの意義のほうが大きい。

4. まとめ

本発表ではこれまで未知であった直流電車の帰線電流に含まれる低周波成分の要因が、車両のマクロな挙動に基づく帰線電流変化であるという仮説に基づき予測手法を構築し、実車試験によって証明した。

この結果は直流電車の速度－引張力特性（さらに限定すれば起動加速度）を決定することで帰線電流の低周波成分が一意に決定することを意味する。また、低周波成分は加速度の 2 乗に比例するなど車両の設計パラメータとの関係を明らかにすることができた。

車両から発生する電磁ノイズの理論解析はまだ始まったばかりである。本報告は理想的な加速時のみの解析であるが、外乱発生時のノイズなども理論的に明らかにすることによって、信号装置と車両（さらにはき電システム）との協調の仕組み作りに大いに役立てればと考えている。

文献

- 1) 廿日出: 車両を取り巻く技術の動向(14)EMC(電磁環境両立性), R&M, Vol. 16, No. 8, pp. 46-49, 2008.
- 2) 伊藤, 道場: 鉄道車両側から見た信号設備との EMC, 平成 17 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, No. III 9-12, 2005

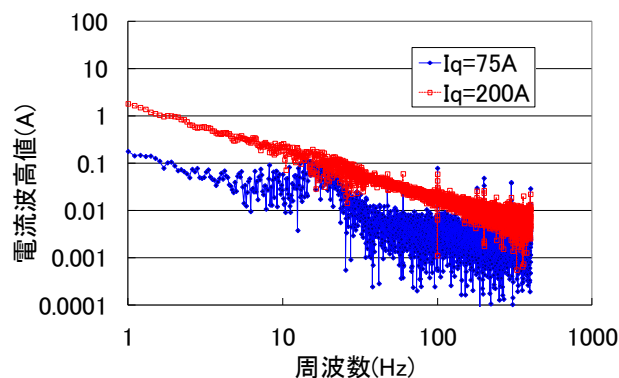


図4 帰線電流の周波数分析結果

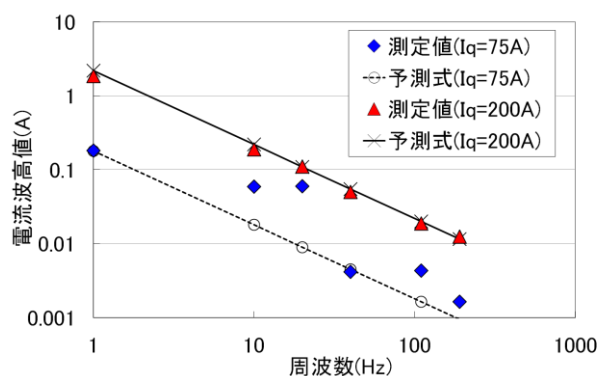


図5 代表周波数における予測との比較