

直流電車帰線電流の低周波成分予測手法の構築

廿日出 悟*

Development of the Estimating Method of Low-frequency Return-current of DC Electric Railcar

Satoru HATSUKADE

Estimation of the harmonic current of railcars is necessary for achieving electromagnetic compatibility (EMC) between train signaling systems and railcars. However, no estimation method had accounted for low-frequency return-current of DC electric railcars at a frequency less than the power converter's carrier frequency. This paper describes a new method estimating the spectrum of the low-frequency return-current of DC electric railcars. This method requires only characteristics of the DC electric railcars, such as train mass and acceleration. Measurement results in this report have indicated effectiveness of the developed estimation method clearly.

キーワード：EMC，直流電車，帰線電流，軌道回路，低周波成分

1. はじめに

電車の製作では完成時に各種の試験が実施される。完成試験の一つである誘導障害試験とは、車両から発生する雑音（電流や電磁波）が地上の鉄道施設（主に信号装置）に影響を与えないことを確認する試験である。近年、誘導障害試験の合格に時間がかかり、対策コストの上昇や新車投入工程の遅延がしばしば起きている。

誘導障害試験に合格できない根本的な理由は、車両が電磁ノイズを発生するパワーエレクトロニクス機器を使用していることであるが、パワーエレクトロニクス機器は消費電力低減や制御性能向上のために導入されていることから、それらを使用しない車両を製作することができない。その一方で、パワーエレクトロニクス機器から電磁ノイズ（電流や電磁波を指す）が理論上発生することは解析^{1), 2)}から明らかであり、これら機器からの電磁ノイズをゼロにすることは不可能である。

したがって、車両から発生する電磁ノイズをゼロにすることが不可能な状況では、信号装置の妨害耐量を向上することが車両担当者から望まれている。妨害耐量向上の目安を提示するためには、車両から発生する電磁ノイズの量を計算できる必要がある。しかしこれまでの理論解析において、原因が不明な周波数帯が多数存在するため、目安を提示できない状況である。

特に帰線電流の低周波（本報告では200Hz未満を指す）には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知られているが、この特徴を説明する理論がこれまで存在しないため、目安を

算出できなかった。これらの周波数成分は商用周波数軌道回路をはじめ多種の軌道回路に影響を与える。対象となる軌道回路の多くは非電化時代に開発されたものであり、機器更新も必要な時期になってきているので、その際の妨害耐量向上が強く望まれる。そのためにも帰線電流の低周波成分を予測する理論が必要である。

そこで今回、直流電車の帰線電流に含まれる低周波成分の要因を解き明かし、予測手法を構築したので報告する。本報告では、まず誘導障害試験の現状と解決の方向を考察し、帰線電流の低周波成分を予測することの重要性を述べる。次に直流電車の帰線電流の低周波成分に共通する傾向から仮説を立て、その仮説に基づき直流電車が理想的な状態で加速した場合の帰線電流低周波成分を数式で導出する。そして実車で試験した結果と導出した数式から得られる結果を比較し、本予測手法の妥当性を確認する。

2. 直流電車帰線電流の低周波成分の傾向とその要因についての仮説

直流電車の帰線電流解析結果の低周波成分には共通の傾向が存在する。本節ではこの傾向について考察することを通じて低周波成分の要因についての仮説を立てる。

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。低周波には振幅の大きい成分が観測され、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、インバータ

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

特集：車両技術

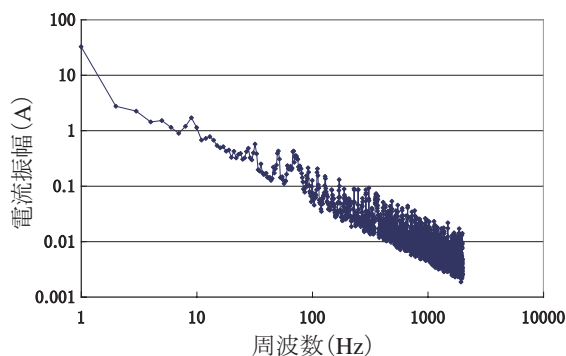


図1 直流電車の帰線電流解析例（空転等外乱なし）

から発生する高調波を解析できるスイッチング関数を使用した計算^{1, 2)}では説明できなかった。そのためこの要因は外乱（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のが誘導障害試験結果から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³⁾なども報告されている。

しかし、外乱が発生しないときに図1のような低周波成分が発生する理由に、制御の過渡応答を挙げるのは妥当ではない。つまり、制御定数は車種毎に異なるので、制御の過渡応答が要因であるならば低周波成分においても周波数のピークが車種毎に異なるなど車種に依存した特徴が現れるはずである。ところが先に述べた低周波成分の特徴は、どの車種にも共通に現れることから制御の過渡応答が要因であるとは考えにくい。

さらに、組合せ試験（電車のぎ装前にインバータとモータだけで動作させる試験）における帰線電流解析結果も図1と同様の傾向にある。組合せ試験では実車とは異なり外乱が発生し得ないため、なおさら制御の過渡応答によるものであるとの考えには無理がある。

2.2 これまでの帰線電流解析手法

帰線電流を解析する手法の一つにスイッチング関数解析による手法^{1), 2)}が存在する。ここでいう解析手法とは帰線電流が数式で表現されるような手法を指す。

スイッチング関数解析はインバータのキャリア周波数の高調波とその側帯波を対象としている。この手法では本報告が対象とするキャリア周波数の半分にも満たない低周波成分は計算できない。

ちなみに、回路シミュレーションのような数値解析³⁾は低周波成分と車両の設計パラメータとの関係を明らかにすることが困難であるため、信号装置耐量の目安を提示しようとする、走行車種が限定できる線区には適用可能⁵⁾である。しかし多種多様の車両が走行する線区への適用はシミュレーション回数が膨大となり困難である。

2.3 低周波成分の要因についての仮説

したがって、帰線電流の低周波成分を予測するためにはこれまでとは別の要素を考える必要がある。その一つに車両が力行するときの帰線電流の時間変化が考えられる。電車は発車して力行すると架線電流が増加し、あるところで一定電流となり、高速域では架線電流が減少する設計となっている。したがって、帰線電流（架線電流と同じ値になる）は時間によって変化する。

そこで、この時間変化する帰線電流を周波数解析すれば図1のような傾向が現れるものと考えた⁶⁾。言い換えれば、「図1に見られるような周波数に対して負の相関をもつ要因は、車両が外乱無く加速した時の架線電流変化である」という仮説を立てた。

3. 帰線電流の低周波成分予測手法の構築

ここでは2.3節の仮説に基づき構築した、直流電車の帰線電流に含まれる低周波成分の予測方法について概説する。まず帰線電流はインバータ入力側電流に等しいと仮定し、その後インバータを電流源と見なして列車パワー（インバータ出力パワーと同義）と加速度との関係を明らかにする。その後、速度-引張力特性から帰線電流の時間変化を求め、フーリエ級数展開によって周波数スペクトル（電流の波高値）を求める。

3.1 帰線電流とインバータ入力側電流との関係

直流電車の主回路構成を図2に示す。鉄道車両の場合、インバータはその時点の速度とノッチ指令に従ったパワーをモータに供給しようと制御する。架線電圧が一定であるならばインバータはモータへの供給パワーに相当する帰線電流を発生する電流源と見なすことができる。

図2を見ると帰線電流とインバータ入力電流の間には、フィルタリアクトルとフィルタコンデンサからなるフィルタがある。このフィルタによって周波数特性が変化することが想定される。インバータを電流源と見なした場合、架線電流は文献⁶⁾のように、元のインバータ入力電流にフィルタによる共振が重畳するだけであるため、本予測においては帰線電流とインバータ入力電流は等しいと仮定した。また、厳密にはインバータや駆動装

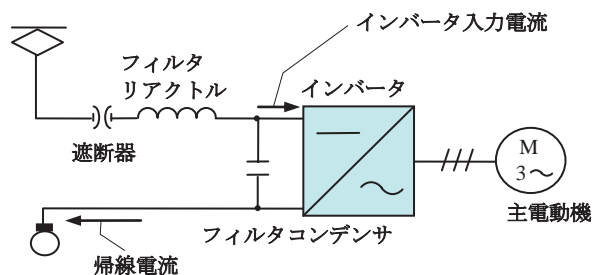


図2 直流電車の主回路構成

置などの損失を考慮する必要があるが、ここでは架線から列車の運動エネルギーへの変換効率を100%とした。

3.2 列車加速度と帰線電流の関係

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 の積すなわち列車パワーに等しいから、整理すると(1)式のようになる。

$$E \cdot I_s = F \cdot v = M \cdot \alpha \cdot v = M \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v \quad (1)$$

3.3 電車の各制御モードにおける帰線電流スペクトル

直流電車はインバータをあらかじめ設定した、速度－引張力特性(図3)に従って制御している(図3は引張力と等価な加速度で表している)。速度－引張力特性はトルク一定の定トルク領域、パワー一定の定電力領域、トルクが速度の2乗に反比例する特性領域の3つの領域からなる。インバータは速度と指令を読み込んで、図3で示されるトルクまたは電流を目標値として制御する。したがって、ノッチが一定であるならばある速度における列車加速度は一意に決定する。これらが分かれば(1)式から帰線電流の時間変化を求めることができる。

以下に各領域におけるインバータ入力側電流に含まれる低周波成分を計算した。

(1) 定トルク域

定トルク領域とは車両が発生するトルクが一定である速度領域である。定トルク領域では車両加速度は α_1 一定のため、(1)式に $v = \alpha_1 t$ を代入すると帰線電流は(2)式

$$I_s = \frac{M \cdot \alpha_1^2}{E} t \quad (2)$$

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)。

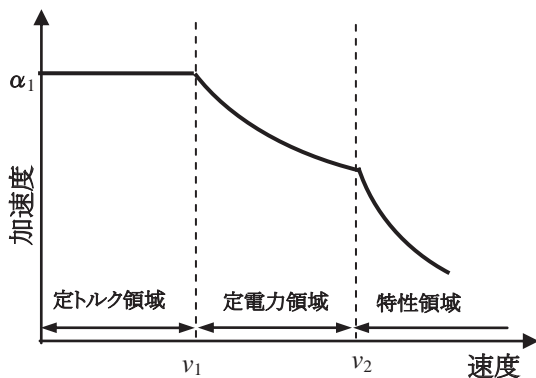


図3 速度－加速度曲線

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

区間を $[-\pi, \pi]$ としたので n の単位は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 $n = 2\pi f$ を代入すると(4)式となる。

$$I_s = \frac{M \cdot \alpha_1^2}{\pi E} \sum_{2\pi f=1}^{\infty} (-1)^{2\pi f-1} \frac{\sin 2\pi ft}{f} \quad (4)$$

(4)式において f は対応する n と同じく1以上の整数、すなわち自然数である。しかし、(3)式導入のために設定した $[-\pi, \pi]$ の区間を広げるにつれて f の離散間隔は限りなく小さくなる。こうすると f は実質的に連続変数となる。つまり、定トルク領域の帰線電流の低周波成分スペクトル(振幅)は周波数に反比例する連続スペクトルとなること、加速度(起動加速度)の2乗に比例することがわかる。

(2) 定電力領域

定電力領域では列車パワーが定トルク領域の終端速度におけるパワーのまま一定となるため、帰線電流は(5)式となり、そのフーリエ変換は直流成分のみとなる。

$$I_s = \frac{M \cdot \alpha_1 \cdot v_1}{E} = \text{const} \quad (5)$$

(3) 特性領域

特性領域では速度が高いため走行抵抗(速度の2次式で表される)が大きくなり、車両が得られる加速度は大幅に小さくなる。また、周波数解析のためには測定時間は有限であり、数秒程度の短い時間幅である。特性領域では短時間の電流変化は1次式で近似可能である。したがって、帰線電流の低周波成分の解析解は(4)式と同じような周波数に反比例するスペクトルとみなせる。ただし、車両の加速度は定トルク領域よりも小さいことから、低周波成分の振幅も定トルク領域より小さくなる。

結論として、直流電車帰線電流の低周波成分は定トルク領域の(4)式によって予測可能であると言える。この(4)式は架線電圧と起動加速度、列車質量から求められる式であることから車両設計段階で使用できる式である。

4. 実車による検証

3章の予測方法について実車を用いた試験によって検証を行う。

4.1 供試車両

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4に示す。

特集：車両技術

4.2 試験・解析方法

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5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関与する可能性を排除するためである。

分析にあたり、周波数分解能を高めるため試験結果を周波数分析して各周波数における波高値が得られるソフト

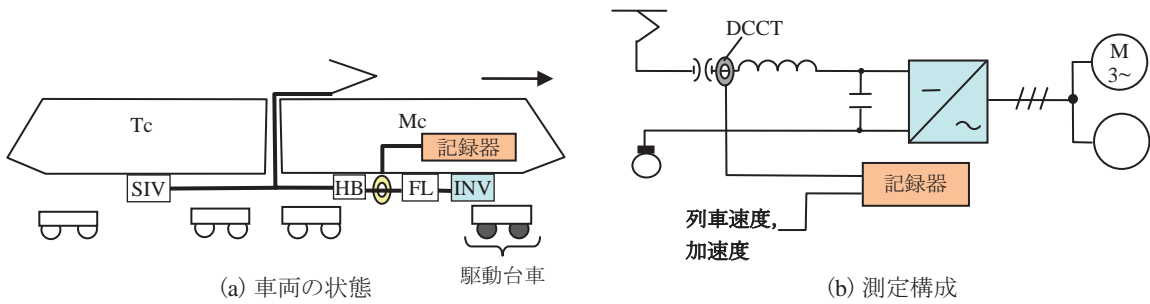
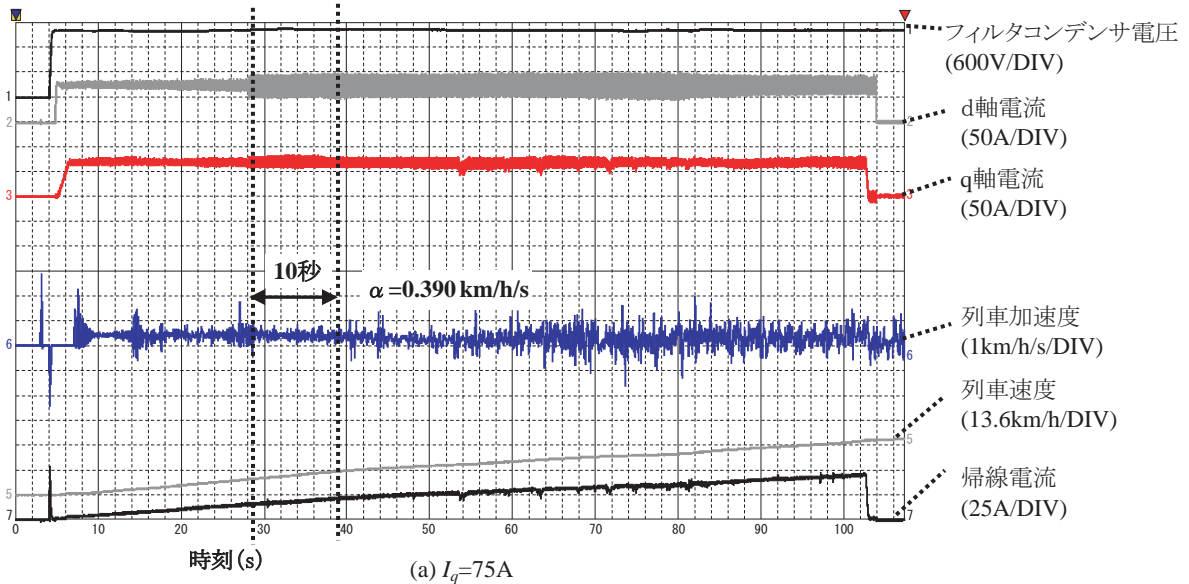
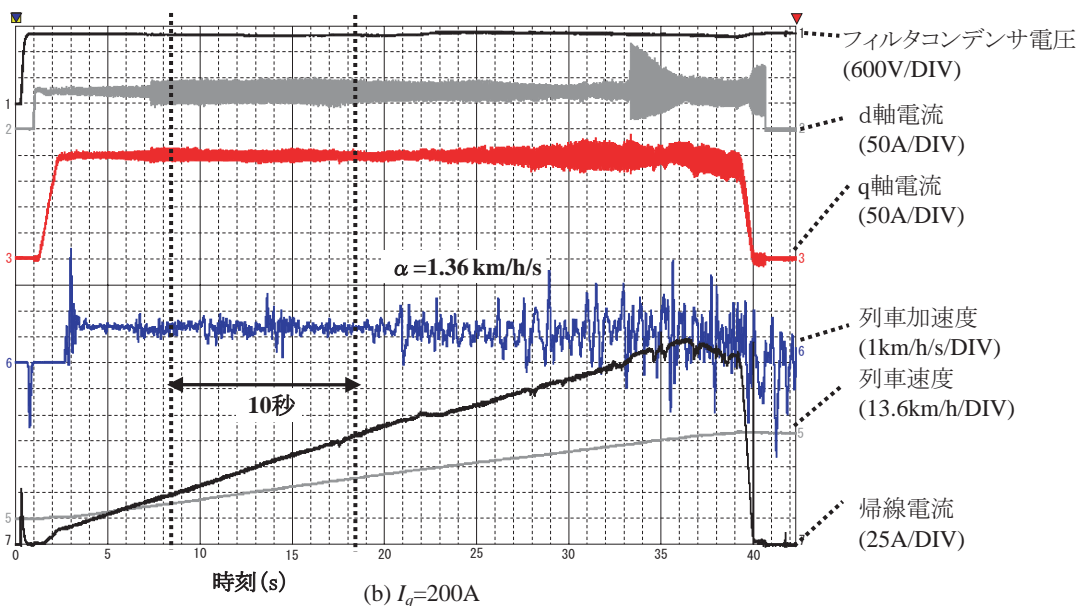


図4 実車試験における車両の構成



(a) $I_q=75A$



(b) $I_q=200A$

図5 実車による帰線電流測定結果

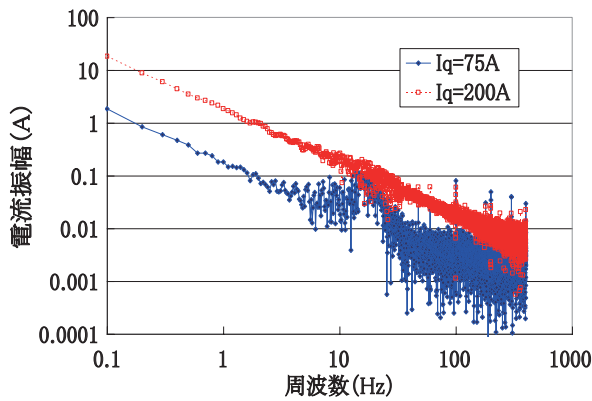


図6 帰線電流の周波数分析結果

ソフトウェアを製作した。一般的にFFTは定数係数を省略した計算を行う場合が多く、その場合の振幅やパワースペクトルの結果は相対的に成り立つものである（例えば、Microsoft EXCELの分析ツールにあるフーリエ解析）。今回の解析は予測式である(4)式と対照することが目的であるため振幅(波高値)を正確に把握する必要がある。そのため、あらかじめ振幅と周波数が異なる2つの正弦波を合成したデータを別途作成し、このデータを本ソフトウェアで処理した結果が元のデータに入力した周波数と波高値に一致することを確認している。

図5の試験結果で得られた帰線電流を作成したソフトウェアで周波数分析した結果が図6であり、1Hz～500Hz間の電流波高値スペクトルを周波数分解能0.1Hzにて得た。

4.3 周波数分析結果と予測との比較

本節では試験結果から得られた周波数分析結果と3章に述べた予測手法との比較を行う。

まず、予測のためには加速度と車両質量が必要である。加速度は速度発電機から得られたパルスを加速度計(アイドニック社製 速度加減速度計 FV21B 相当品)で電圧に変換して測定記録し、10秒間のデータを平均して平均加速度とした(図5中に記載)。列車質量は簡易輪重測定装置で測定した2両16輪の合計72.205tを用いた。これらのデータを用いて(4)式を用いて予測値を計算した。

図7は予測式である(4)式と0～200Hz中の代表周波数における測定結果との比較である。表1は図7を数値で比較したものである。外乱の影響を避けるため、代表周波数は電力線の誘導周波数(50Hzの整数倍)や車上電源用のインバータ(SIV)出力周波数(50または60Hz)などを除いた周波数から平均的に選定した。

測定値と予測式を比較すると、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 $I_q=75A$ 、 $I_q=200A$ どちらの場合も良く一致している。

$I_q=75A$ において20Hzの値が予測値より10倍程度大きくなっているが、図6には大きく共振のようなものが見える。これは架線側から見た車両の負荷インピーダン

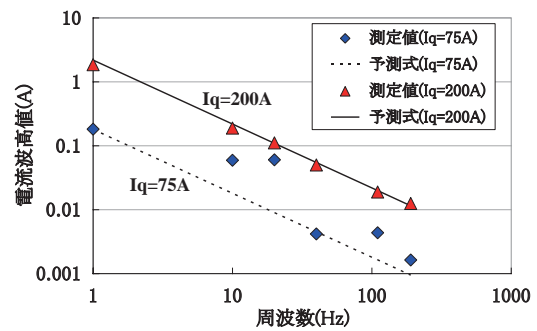


図7 周波数分析結果と予測式との比較

表1 帰線電流の周波数分析結果と予測値との比較

周波数 (Hz)	$I_q = 75A$		$I_q = 200A$	
	測定値 (A)	予測値 (A)	測定値 (A)	予測値 (A)
1	0.182	0.180	1.852	2.19
10	0.0593	0.0180	0.189	0.219
20	0.06023	0.00899	0.111	0.109
40	0.00418	0.00450	0.0500	0.0547
110	0.00435	0.00164	0.0189	0.0199
190	0.001635	0.000946	0.01251	0.0115

スの周波数特性に共振が見られることが要因である⁷⁾。この共振は加速度が高いほど、つまり帰線電流の時間変化が大きいほど抑制されるため、本報告の目的である最大値の予測には支障がない。

5. 予測式の意味とその適用について

4章で得られた結果は「インバータ駆動誘導電動機を用いた直流電車帰線電流の定トルク領域における低周波成分は(4)式、すなわち列車質量と速度-引張力特性から予測可能である」ということである。

試験では定トルク領域のみの検証であった。しかし3章で展開した議論のように、電車の3つの制御領域における最大値は定トルク領域であることから、定トルク域のみ検証すれば最大値が求められる。車両から発生する電磁ノイズは最大値がわかれば充分であるため、他の制御領域は考慮する必要はない。したがって「インバータ駆動誘導電動機を用いた直流電車帰線電流の力行時における低周波成分は列車質量と速度-引張力特性から予測可能である」ということが言える。

また、回生ブレーキは力行とは速度-引張力特性が異なるものの、低周波成分の本質は力行と同じである。回生ブレーキにおける定トルク領域の加速度から低周波成分を予測することが可能である。ただし、この場合架線電圧が力行よりも高くなることには注意が必要である。

よって、本結果により「インバータ駆動誘導電動機を用いた直流電車帰線電流の低周波成分の『最大値』は列

特集：車両技術

車質量と速度－引張力特性から予測可能である」との結論に達する。

ここでいう『最大値』とは、列車が外乱無く走行した場合における最大値である。したがって、この最大値を下回するためには列車質量や加速度に何らかの制限を加える必要があることを意味する。信号装置設計の観点から見た場合は「低周波軌道回路の妨害耐量の最小理論限界（これを下回ると、理論的に車両と両立できない）は列車質量と速度－引張力特性から一意に決まる」と言える。

本予測手法の構築に関しては、インバータ駆動誘導電動機を用いた直流電車を対象としているが、他の方式の直流電車も本予測手法を適用可能である。適用可能条件は定トルク領域が車両の最大加速度であること、パンタグラフでの電力と列車パワーがほぼ等しいことである。したがって、電機子チョップ車や4象限チョップ車、インバータ駆動同期電動機車両には適用可能である。反面、抵抗制御車、添加励磁制御車、界磁チョップ制御は主抵抗器による損失があるためパンタグラフ点の電力と列車パワーがほぼ等しいという条件が満たせず本予測手法は適用できない。

本予測手法の拡張性について以下に述べる。(2)式は架線電流が時間の1次関数に従って変化することを意味し、そのフーリエ級数展開が(4)式である。したがって架線電流の時間変化が1次関数で近似できるならば、低周波成分は予測可能である。本報告では外乱無く理想的な加速における予測のみ検証したが、文献⁶⁾は空転発生時の予測についても言及しており、測定結果と予測に良い一致を見ている。

本予測手法はインバータを電流源と見なし、その電流源が時間変化することが、原因となって発生する周波数成分を解析した。したがって、インバータ以外に要因がある場合、例えば離線などは解析できない。離線は架線電圧が急変した場合ととらえられ、それによるフィルタリアクトル、フィルタコンデンサの共振現象やフィルタコンデンサ電圧が低下することによるインバータの制御動作などが帰線電流に関与すると考えられる。これらは別途予測手法を構築する必要がある。

6. まとめ

本報告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は、車両が理想的に加速した場合における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。

つまり、まずこれまでの解析結果の傾向から、低周波成分の要因は力行に伴う架線電流変動が要因であるとの

仮説を立てた。さらに列車速度が与えられると速度－引張力曲線によってその速度での加速度が求められること、インバータ電車では機械パワーと電気パワーがほぼ等しいという性質に着目し、力行時の帰線電流の時間変化を導いた。これをフーリエ級数展開することで帰線電流に含まれる低周波成分の予測式を構築した。構築した予測式は起動加速度と列車質量、架線電圧の3つのパラメータだけで構成される簡易な式である。そして実車試験を行い本予測手法が実車の周波数分析結果に対してスペクトルの傾向、代表周波数での波高値ともに良く一致した。

本報告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）を決定すると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、外乱発生時の電磁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）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) 曾根悟, 堀洋一:「車両駆動用インバータの高調波制御法」, 電気学会論文誌 B, vol.100-B, No.8, pp.477-484, 1980
- 2) 小川知行, 若尾真治, Jat Taufiq, 近藤圭一郎, 寺内伸雄:「鉄道車両駆動用インバータにおける直流側電流の側帯高調波の理論解析」, 電気学会論文誌 D, vol. 126-D, No.7, pp.1049-1057, 2006
- 3) 東聖, 山崎尚徳, 伊藤大介, 丸山高央:“エネルギー補償形アクティブ制御による電気車インバータの帰線電流ノイズ低減”, 電気学会論文誌D, Vol. 126, No. 10, pp.1392-1398, 2006
- 4) 電気学会 電気鉄道の電磁環境に関する共同研究委員会:「鉄道とEMC」, pp.24-29, オーム社, 2008
- 5) 奥谷民雄, 中村信幸, 荒木尚人, 入江章二, 長 宏樹, 佐野 実, 池田圭吾, 小澤寛之:「高速・高密度・通勤線区用ATC装置の開発」, 電気学会論文誌 D, vol. 127-D, No.10, pp.1033-1042, 2007
- 6) 廿日出悟:「鉄道車両が力行時に発生する低周波電流についての考察」, 平成21年 電気学会 全国大会講演論文集, 5-097, 2009
- 7) 廿日出悟:「直流電車帰線電流の低周波成分推定手法」, 電気学会論文誌 D, vol. 131-D, No.2, pp.187-193, 2011