UDC 621.313.2.014.3-9: 621.335.4.024.1

論 文

53-B 41

直流電車主回路の橋絡渡り時の主電動機電流の急変現象の解明と防止法

正 員 益 富 文 男 (日 立)

1. ま え が き

主抵抗器と接触器を用いる直流電車の主回路接続方式では、起動時に直列に接続していた直巻電動機を直列制御の最終段まで加速すると、橋絡渡り方式を使って並列回路に接続変更し、直並列もしくは並列の最終段まで加速する方式とするのが一般的である。橋絡渡り方式は短絡渡り方式などと比べ、電車の乗り心地を改善した方式で⁽¹⁾⁽²⁾、我が国では昭和 12 年頃から実用されて今日に至っている⁽³⁾⁽⁴⁾。従来から電動車（以下 M と略）と付随車（以下 T と略）とを連結して一単位編成とした、例えば 2M1T 編成や 2M2T 編成電車などにおいて、主回路の橋絡渡り時に主電動機電流の急変が測定され、橋絡渡りにおける過渡現象のシミュレーションをし、空転や整流不具合の契機の一つである電流の急変を防止することが重要になっていた。しかしながら、接触器動作タイミングに従い回路網のモード変化を伴うほか、主電動機の電流に従って可変な主電動機枝路のインダクタンス（以下、枝路の可変インダクタンスと略、主電動機のインダクタンスと枝路に入れた直流リアクトルのインダクタンスの和をいう）および主電動機の磁気回路中に生ずるうず電流によって磁束が遅れるため、主電動機の電流の変化よりも 10~30ms 遅れて変化する主電動機の誘起起電力（回路網内の逆起電力要素になる）を含むブリッジ回路の計算は、容易でなく計算例がない。

本稿は、デジタル計算機を用いて、直流電車主回路の橋絡渡り時の過渡現象の数値計算に成功したもので、以下に計算の原理、計算例を述べ、過渡現象に係わる電流域で枝路の可変インダクタンスの値と電流値との積がほぼ一定となるように、枝路の可変インダクタンスを設定するなどの検討結果に基づく電流急変の防止法を述べる。

Elucidation and Prevention on the Sudden Change Phenomena for the Traction Motor Current at Bridge-Transition in the Main Circuit of a DC Electric Train. By Fumio Masutomi, Member (Mito Branch Lab., Hitachi Research Lab., Hitachi Ltd.)

益富文男：正員，日立製作所日立研究所水戸分室

2. 計算の原理

第 1 図は、橋絡渡り時の単位編成の直流電車的主回路の各モードごとの回路網を示す。き電変電所の直流起電力を $e_{s00}(t)$ 、き電線、電車線の抵抗およびパンタグラフの接触抵抗の和を R_{00} 、電流を $i_{03}(t)$ 、接続点の電位 $v_{00}(t)$ と $v_{01}(t)$ との間の枝路の電流を $i_{04}(t)$ 、

計算に用いたデータ： $e_{s00}(t) = \text{DC } 1,500 \text{ V}$ 、 $R_{00} = 0.01 \Omega$ 、 $R_{01} = R_{02} = 0.4036 \Omega$ 、 $R_{03} = 3.09 \Omega$ 、 $R_{04} = 2.53 \Omega$ 、 $R_{05} = 0.001 \Omega$ 、 L_{01} および L_{02} は第 2 図、 $e_{r01}(t)$ および $e_{r02}(t)$ は第 3 図による。

第 1 図 橋絡渡り時の直流電車の主回路のモード

Fig. 1. Modes for the main circuit between bridge-transition of a DC electric train.

抵抗値を R_{01} , 可変インダクタンスを L_{01} , 直巻電動機 1 台, 2 台, 4 台, などからなる逆起電力の和を $e_{r01}(t)$, 接続点の電位 $v_{02}(t)$ と接地 000 との間の枝路の電流を $i_{06}(t)$, 抵抗値を R_{02} , 可変インダクタンスを L_{02} , 直巻電動機 1 台, 2 台, 4 台などからなる逆起電力の和を $e_{r02}(t)$ とする。橋絡渡りに際して, 電位 $v_{00}(t)$ と $v_{02}(t)$ との間に接続する抵抗を R_{03} , 電流を $i_{07}(t)$, 電位 $v_{01}(t)$ と接地との間に接続する抵抗を R_{04} , 電流を $i_{08}(t)$ とする。橋絡渡りの最終段で分離される電位 $v_{01}(t)$ と $v_{02}(t)$ との間の抵抗を R_{05} , 電流を $i_{05}(t)$ とする。

モード a は, 橋絡渡り前の直列最終段の主回路を示す。接触器 (いずれも図示を省略した) の動作順序とタイミングは, 一般に動作時点で異なる。モード a からモード d へと場合もあるが, 通常はモード b に示すように R_{03} を先に接続した後モード d に至る場合, モード c に示すように, R_{04} を先に接続した後モード d に至る場合のいずれかになる。モード d では R_{03} , R_{04} を接続し, ホイートストンブリッジを形成する。抵抗 R_{05} を流れる電流 $i_{05}(t)$ の向きが車速度の大小で反転するように抵抗値 R_{03} と R_{04} を設定するのが一般的である。次いで, 抵抗 R_{05} の接触器を開き, モード e に示すとおり橋絡渡りの最終段に移る。モード e は直並列もしくは並列の初段であって, 以後の加速に際して抵抗 R_{03} および R_{04} を, 多数の接触器 (図示を省略した) を用いて順次短絡していく。

第 2 図は 2MIT 編成電車の起動加速時のオシログラムの一例であり, 直列制御の初段 S_1 から最終段 S_{12} を経て橋絡渡り方式を用い並列制御の初段 P_1 に進段している。測定した群の主電動機の電機子電流および界磁電流は S_{12} から橋絡渡りに移行した時点で急変現象を呈している。急変現象を示す電流の最大値は測定のつど異なり, 進段電流の最大値を越す場合もある。直列制御時および並列制御時の電流変化と比べ, 電流

主電動機: 140 kW, 375 V, 430 A, 1,650 rpm, 75% F, 一時間定格

第 2 図 直流電車の加速時のオシログラムの例

Fig. 2. Example of an oscillogram after start of a DC electric train.

変化が急しゅんになっている。第 2 図で SAP は電車へのブレーキ指令圧力を, BC 圧力はブレーキシリンダの圧力を示し電流変化とは関係しない。

モード a ~ e のそれぞれの回路網に対応した状態方程式を作成し, 変数 $v_{00}(t) \sim v_{02}(t)$, $i_{03}(t) \sim i_{08}(t)$ について回路網のパラメータの数値に即して, t 領域で関数表示された解を求め数値計算をすることができる。

第 1 図においてモード d は抵抗 R_{03} , R_{04} , R_{05} から成る枝路をすべて有している, 代表的に記す。第 1 図モード d の状態方程式は

$$\begin{aligned} R_{00} i_{03}(t) - e_{s00}(t) &= -v_{00}(t) \quad \dots\dots\dots (1) \\ L_{01} \frac{d i_{04}(t)}{dt} + R_{01} i_{04}(t) + e_{r01}(t) &= v_{00}(t) - v_{01}(t) \quad \dots\dots\dots (2) \\ L_{02} \frac{d i_{06}(t)}{dt} + R_{02} i_{06}(t) + e_{r02}(t) &= v_{02}(t) \quad \dots\dots\dots (3) \\ R_{03} i_{07}(t) &= v_{00}(t) - v_{02}(t) \quad \dots\dots\dots (4) \\ R_{04} i_{08}(t) &= v_{01}(t) \quad \dots\dots\dots (5) \\ R_{05} i_{05}(t) &= v_{01}(t) - v_{02}(t) \quad \dots\dots\dots (6) \\ i_{03}(t) &= i_{04}(t) + i_{07}(t) \quad \dots\dots\dots (7) \\ i_{04}(t) &= i_{05}(t) + i_{08}(t) \quad \dots\dots\dots (8) \\ i_{05}(t) + i_{07}(t) &= i_{06}(t) \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

である。(1) ~ (9) 式の変数パラメータを一定値とみなせる微小時間幅 Δt を扱うものとして, ラプラス変換を施す。起電力 $e_{s00}(t)$ のラプラス変換形を $E_{s00/s}$ で, 逆起電力 $e_{r01}(t)$ および $e_{r02}(t)$ のラプラス変換形を $E_{r01/s}$ および $E_{r02/s}$ で表わし, 整理すると

$$\begin{aligned} s \{ R_{00} i_{03}(s) + V_{00}(s) \} &= E_{s00} \quad \dots\dots\dots (10) \\ s \{ (L_{01} s + R_{01}) i_{04}(s) - V_{00}(s) + V_{01}(s) \} &= s L_{01} i_{04}(0+) - E_{r01} \quad \dots\dots\dots (11) \\ s \{ (L_{02} s + R_{02}) i_{06}(s) - V_{02}(s) \} &= s L_{02} i_{06}(0+) - E_{r02} \quad \dots\dots\dots (12) \\ R_{03} i_{07}(s) - V_{00}(s) + V_{02}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (13) \\ R_{04} i_{08}(s) - V_{01}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (14) \\ R_{05} i_{05}(s) - V_{01}(s) + V_{02}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (15) \\ I_{03}(s) - I_{04}(s) - I_{07}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (16) \\ I_{04}(s) - I_{05}(s) - I_{08}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (17) \\ I_{05}(s) + I_{07}(s) - I_{06}(s) &= 0 \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

となる。(10) ~ (18) 式をマトリクス形式で表わし, 行列式に関するクラメル公式を適用して各変数ごとの s 領域の有理式解を求め, 部分分数に分解し, ラプラス逆変換を施し, t 領域で関数表示された解を求め時間幅 Δt 後の数値計算をする。 Δt 後の電流 $i_{04}(t)$ および $i_{06}(t)$ の数値を求め (11) 式および (12) 式の i_{04}

(0+) および $i_{06}(0+)$ に代入する。また Δt 後の電流 $i_{04}(t)(0+)$ および $i_{06}(t)$ に対応したインダクタンス値の L_{01} および L_{02} を、第3図のような枝路の電流に対する枝路の可変インダクタンスの特性を索引して求め、(11)式および(12)式の L_{01} および L_{02} に代入する。

うず電流による磁束遅れ（一般に 10~30ms のむだ時間になる）を取扱うため、 Δt 後より数十ms 前の電流 $i_{04}(t)$ および $i_{06}(t)$ に対応した逆起電力の値 E_{r01} および E_{r02} を、第4図のような枝路の直巻電動機の逆起電力特性を索引して求め、(11)式および(12)式の E_{r01} および E_{r02} に代入する。再び(10)~(18)式をマトリクス形式で表わし、行列式に関するクラメル公式を適用して各変数ごとの s 領域の有理式解を求め、部分分数に分解し、ラプラス逆変換を施し t 領域で関数表示された解を求めて、時間幅 Δt 後の数値計算をする。

以上、述べた時間幅 Δt ごとの逐次繰返し計算を第1図の橋絡渡り時の単位編成の直流電車的主回路の初モード a から最終モード e にわたって行なう。種々の車速度について同様な計算を施す。ここで、モード d からモード e に移行する際は、実際には接触器を開いて磁気吹消し作用により R_{05} の値を無限大にするのであるが、本稿では、抵抗 R_{05} の初期値を一挙に 1,000 Ω に増加させ、時間幅 Δt 後には $i_{05}(t)$ をしゃ断できるものと仮定し、計算後求めたデータを検討する方法を用いた。

一般に逐次繰返し計算法では、計算に用いる時間幅 Δt の数値の選定が必要である。本稿では Δt 決定の指標として、第1図モード b の抵抗 R_{03} で短絡した主電動機回路の時定数 10ms 内外よりも小さく選んだ 5, 2, 1, 0.5ms などを与え事前に試行し、 Δt を 2ms 以上に選んだ場合には電位 $v_{01}(t)$, $v_{02}(t)$ などの計算結果に Δt 周期の振動を含み収束性が悪いこと、1ms および 0.5ms の数値計算結果は収束性が良く、かつ互いに合致することを知り、具体的な計算例はすべて時間幅 Δt を 1ms にして、精度良く計算することにした。

3. 具体的な数値計算例

上述した計算の原理に基づき、デジタル計算機を用い、主回路の橋絡渡り時の過渡現象の数値計算を行なった。第3図は計算に用いた枝路の電流に対する枝路の可変インダクタンスの特性であり、第4図は計算に用いた枝路の電流に対する枝路内の直巻電動機の逆起電力の和である。実測データを実験式にして計算機

第3図 枝路の電流に対する枝路の可変インダクタンスの特性の例

Fig. 3. Example of a characteristic curve for variable inductance for each branch.

第4図 枝路の直巻電動機の逆起電力特性の例

Fig. 4. Example of a characteristic curve for variable counter EMF of series wound traction motors for each branch.

計算に用いたデータ：車速度=1.0U、誘起起電力の時間遅れ=30ms、時間幅 $\Delta t=1$ ms、特性は第3図、第4図による。

第5図 $\Delta L/\Delta i$ が大きい場合の橋絡渡り時の電圧、電流の計算結果

Fig. 5. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a large value of $\Delta L/\Delta i$.

計算に用いたデータ：車速度=1.0U，誘起起電力の時間遅れ=30ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第6図 $\Delta L/\Delta i$ が大きい場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 6. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a large value of $\Delta L/\Delta i$.

計算に用いたデータ：車速度=0.8U，誘起起電力の時間遅れ=30ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第7図 $\Delta L/\Delta i$ が中の場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 7. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a middle value of $\Delta L/\Delta i$.

に記憶させ，その内容を自動製図機によって描いた図を示す。第3図のインダクタンスは320A以上では一定値となっている。第4図の逆起電力の特性は320A以上では漸増する直線となっている。一般に，個々の電機仕様に伴って逆起電力の特性が定まるが，電流に対する可変インダクタンスの特性はかなり自由に設定されていると考えられる。しかしながら，直巻電動機

(a) 第5図の計算過程で与えた初期値を記録したもの
(b) 第6図の計算過程で与えた初期値を記録したもの

第8図 $\Delta L/\Delta i$ が大中の場合の橋絡渡りの数値計算過程で与えた初期値のデータの例

Fig. 8. Example of initial values at a calculating process between bridge transition in the case of a large and middle value of $\Delta L/\Delta i$.

計算に用いたデータ：車速度=0.65U，誘起起電力の時間遅れ=30ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第9図 $\Delta L/\Delta i$ が小さい場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 9. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a small value of $\Delta L/\Delta i$.

を用いる場合は可変インダクタンスの特性も類似な傾向となる。そこで，第3図の電流に対するインダクタンスの変化率 $\Delta L/\Delta i$ の大 ($-340\mu\text{H/A}$)，中 ($-170\mu\text{H/A}$)，小 ($-34\mu\text{H/A}$) およびインダクタンス L 一定な場合 (20.7mH) について数値計算を行なった。

第5図は，速度1.0U， $\Delta L/\Delta i$ が大，誘起起電力の時間遅れ30ms，橋絡渡り時の主回路のモード変化 a, b, d, e の順序に対する計算結果を示す。第6図は，橋絡渡り時の主回路のモード変化の順序 a, c, d, e に対する計算結果を示す。

第7図は，速度0.8U， $\Delta L/\Delta i$ が中，誘起起電力の時間遅れ30ms，橋絡渡り時のモード変化の順序 a, b, d, e に対する計算結果を示す。

第1図の主回路モード変化の順序

計算に用いたデータ：車速度=0.65 U，誘起起電力の時間遅れ=10 ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第10図 $\Delta L/di$ が小さい場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 10. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a small value of $\Delta L/di$.

第1図の主回路モード変化の順序

(a) 第9図の計算過程で与えた初期値を記録したもの
(b) 第10図の計算過程で与えた初期値を記録したもの

第11図 $\Delta L/di$ が小さい場合の橋絡渡りの数値計算過程で与えた初期値のデータの例

Fig. 11. Example of initial values at a calculating process between bridge-transition in the case of a small value of $\Delta L/di$.

第8図は， $\Delta L/di$ が大中の場合の橋絡渡りの数値計算過程で(11)，(12)式に与えた初期値を記録したものである。

第9図は，速度 0.65 U， $\Delta L/di$ が小，誘起起電力の時間遅れ 30 ms，橋絡渡り時の主回路のモード変化の順序 a, c, d, e に対する計算結果を示す。第10図は誘起起電力の時間遅れ 10 ms に対する計算結果を示す。第11図は， $\Delta L/di$ が小の場合の橋絡渡りの数値計算過程で(11)，(12)式に与えた初期値を記録したものである。

第12図は，速度 0.605 U， $\Delta L/di$ が一定，誘起起電力の時間遅れ 30 ms，橋絡渡り時の主回路のモード

第1図の主回路モード変化の順序

計算に用いたデータ：車速度=0.605 U，誘起起電力の時間遅れ=30 ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第12図 $\Delta L/di$ が一定の場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 12. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a constant value of $\Delta L/di$.

第1図の主回路モード変化の順序

計算に用いたデータ：車速度=0.605 U，誘起起電力の時間遅れ=30 ms，時間幅 $\Delta t=1$ ms，特性は第3図，第4図による。

第13図 $\Delta L/di$ が一定の場合の橋絡渡り時の電圧，電流の計算結果

Fig. 13. Calculated result for the potentials and currents between bridge-transition in the case of a constant value of $\Delta L/di$.

変化 a, b, d, e の順序に対する計算結果を示す。

第13図は，第12図の主回路のモードをずらした一例で，モード b を小さくして主回路のモード変化の順序が a, d, e になった計算結果を示す。

4. 検討結果

検討した事項を(1)～(4)に述べる。

(1) 第5図～第7図は，第3図の $\Delta L/di$ が大および中の場合に対する計算結果であり，次モードへ移

ると直ちに次モードの最終値になるから、接触器動作のタイミングの大小にかかわってモードの継続時間が変化しただけである。モード a～e にわたって、主電動機の枝路の電流 $i_{04}(t)$ および $i_{06}(t)$ の値は一定値のままである。すなわち、第 5 図および第 6 図では 130 A のまま、第 7 図では 190 A のままである。従って枝路の可変インダクタンスおよび枝路の逆起電力は一定値を持続する。第 5 図および第 7 図のモード b において、抵抗 R_{03} を接続した結果、 $v_{01}(t)$ および $v_{02}(t)$ の電位はほぼ $v_{00}(t)$ の電位になり、 R_{03} を流れる電流 $i_{07}(t)$ はゼロに近い値になる。抵抗 R_{03} よりも先に R_{04} を接続した場合には、第 6 図のモード c に示すように $v_{01}(t)$ および $v_{02}(t)$ はほぼ接地電位になり、 R_{04} を流れる電流 $i_{08}(t)$ はゼロに近い値になる。

この現象を第 5 図のモード b、第 6 図のモード c において (2)、(3) 式について見れば、第 1 図のデータから R_{01} および R_{02} の電圧降下はそれぞれ約 50 V であり、逆起電力 $e_{r01}(t)$ と $e_{r02}(t)$ はそれぞれ約 700 V、それにほぼ等しいリアクタンス電圧 $L_{01}di_{04}(t)/dt$ と $L_{02}di_{06}(t)/dt$ を生じ 30 ms 間も一定であることを示す。電流 130 A の場合 L_{01} と L_{02} は 42.2 mH で主電動機枝路の時定数は約 4 秒と長く、抵抗 R_{03} や R_{04} を閉じた場合の主電動機回路の時定数は約 10 ms と短いから、状態方程式の計算結果が 30 ms 間も変化しない現象を上記の時定数で簡単に説明することはできない。そこで筆者は、方程式の計算値が変化しない理由を状態方程式において、特に (11)、(12) 式の右辺にかかわると推測した。

第 8 図は、第 5 図および第 6 図の橋絡渡りの数値計算過程で、状態方程式を解いて時間幅 $\Delta t=1$ ms 後の $i_{04}(0+)$ 、 $i_{06}(0+)$ を求め、第 3 図を索引して L_{01} 、 L_{02} を求め、誘起起電力の時間遅れを考慮して第 4 図を索引し $E_{r01}(t)$ および $E_{r02}(t)$ を求め、状態方程式の (11)、(12) 式の次の計算のために与えた初期値を記録したものである。主回路のモード変化 a～e にわたって、枝路の逆起電力 $E_{r01}(t)$ 、 $E_{r02}(t)$ の変化は少なく、可変インダクタンス L_{01} および L_{02} はモード a と比べ 14% 変化するが、第 3 図から電流を求め、 $L_{01}i_{04}(0+)$ および $L_{02}i_{06}(0+)$ を計算してみると、モード a の値 5.44 AH との差は 0.04 AH で 0.36% と少ない。(11) 式は左辺に可変パラメータ L_{01} を含むが、右辺はほぼ一定で変化をさまたげる作用をする。同様に (12) 式は、左辺に可変パラメータ L_{02} を含むが右辺はほぼ一定で変化をさまたげる作用をする。状態方程式 (10)～(18) 式の中では抵抗値 $R_{01} \sim R_{04}$ に比べ L_{01} 、 L_{02} の値の 14% 程度の変化は解に影響を与えない

い小さい値である。

以上は時間幅 Δt を 1 ms とおいた場合を述べたが、 $\Delta t=0.5$ ms と小さくおいた場合の第 8 図の L_{01} 、 L_{02} の値の変化は 7% 程度と小さくなって、モード a の場合の値である 42.2 mH に近付くことを知った。以上、第 8 図を用いて、第 5 図～第 7 図の過渡現象が、特に (11)、(12) 式の右辺にかかわることを述べた。

(2) 第 9 図、第 10 図は、第 3 図の $\Delta L/di$ が小さい場合に対する計算結果であり、主電動機の誘起起電力の時間遅れ 30 ms と 10 ms とを比較したものである。両者のデータの差異はほとんど認められない。主回路のモード a から、例えばモード c に移ると過渡現象は 30 ms かかり、モード c からモード a に移ると過渡現象は 10 ms かかっている。モード c やモード a の継続時間を短縮すれば、主電動機の電流 $i_{04}(t)$ および $i_{06}(t)$ などの過渡現象は異なる。すなわち、枝路の可変インダクタンスの値の変化が小さくなり一定に近付くと、接触器の動作タイミングの影響を受けるようになる。

第 11 図は、第 9 図および第 10 図の橋絡渡りの数値計算過程で、第 8 図を得た場合と同様の方法により状態方程式の次の計算のために与えた初期値を記録したものである。 $L_{01}i_{04}(0+)$ および $L_{02}i_{06}(0+)$ の値は、第 3 図の電流 280 A 付近ではインダクタンスの値の変化が小さいために電流 $i_{04}(0+)$ および $i_{06}(0+)$ の増減に正比例的に増減し、状態方程式において (11)、(12) 式の右辺の $E_{r01}(t)$ および $E_{r02}(t)$ と共に電位、電流の過渡現象を抑制する作用をするもの主電動機電流の変化を防ぐことができなくなる。主回路のモード変化の順序を a, b, d, e とした場合も同様である。

第 12 図は、第 3 図の可変インダクタンスが一定で第 4 図の逆起電力の変化が小さい 325 A において橋絡渡りの数値計算をした例であり、第 9 図、第 10 図と比べ 2 群の主電動機電流 $i_{04}(t)$ と $i_{06}(t)$ の差異が大きくなることを示す。例えばモード b の過渡現象の継続時間は 30 ms であるが、2 群の主電動機電流の差異が約 5 ms で最終値に近い値に達することは第 9 図、第 10 図に示した例と同様である。第 2 図に掲げたオシログラムにおいて、直列制御段および並列制御段の各進段電流は回路の時定数によって丸味を帯びているが、橋絡渡り時の主電動機電流の急変現象は主電動機回路の時定数では説明できない急しゅんな変化で、今回の数値計算によって第 9 図～第 12 図で述べた結果に類似することを知った。

2 M 1 T 編成電車の一例を掲げたが、1 M 1 T 編成や 2 M 2 T 編成電車の場合も、第 2 図および第 9 図～

第 12 図と類似な主電動機電流の急変現象が実測されている。

(3) 第 13 図に示すように、例えば第 12 図の主回路のモード b を微小にして主回路のモード変化の順序が a, d, e になった場合には、2 群の主電動機電流 $i_{04}(t)$ と $i_{06}(t)$ の差異は小さくなり、電流急変の発生を避けることができる。第 12 図および第 13 図は、橋絡渡りの過渡現象が接触器の動作タイミングの影響を受けることを示している。

(4) 第 3 図の枝路的可変インダクタンスの値と電流値との積の数値について検討してみると、150 A では 5.37 AH, 200 A では 5.20 AH, 250 A では 5.61 AH と一定値に近いが、300 A では 6.25 AH, 350 A では 7.25 AH, 400 A では 8.28 AH, 450 A では 9.32 AH と電流値に比例して増加している。電流値 100 A から 450 A にわたって、枝路的可変インダクタンスの値との積の数値が 9 AH である場合に対してシミュレーションした結果は、第 9 図～第 12 図がいずれも第 5 図～第 8 図に掲げたようになって、橋絡渡り時の主電動機電流の変化を全く生じないようになることを知った。

第 14 図は、橋絡渡りにかかわる電流域でインダクタンスの値と電流値との積の数値 $L_{01}i_{04}(0+)$ および $L_{02}i_{06}(0+)$ をほぼ一定に設計した、主電動機を搭載した 2M2T 編成電車の起動加速時のオシログラムの一例であり、直列制御の最終段 S_{14} から橋絡渡りのモード b および d を経て、並列制御の初段 P_1 に進段する際に測定した 2 群の主電動機電流は、モード b の間 100 ms 以上もほぼ等しくなっていることを示す。モード d 以降は抵抗 $R_{00} \sim R_{05}$ で定まる電流に近付くこと

を示す。電位 $v_{00}(t)$ が電流の増すモード d になった以降では若干低下しており、電源電圧の変動の影響を受けることを示す。

5. 主電動機電流の急変現象の防止法

以上の検討結果から、直流電車主回路の橋絡渡り時の主電動機電流の急変現象を防止するには以下の方法が有効である。

(1) 橋絡渡りにかかわる電流域、すなわち主電動機の一時間定格電流の 0.8 倍から 2 倍の電流域において、主電動機のインダクタンスの値と電流値との積の数値をほぼ一定、すなわち最大値と最小値との差異を 20% 以下の範囲の特性とする。

(2) 橋絡渡りにかかわる電流域において、枝路の可変インダクタンスの値と電流値との積の数値をほぼ一定の特性とするために、直流リアクトル（電流が増せばインダクタンスが減少する特性の鉄心付きインダクタンスをいう）を回路要素の一部に含む主回路方式とする。

(3) 第 13 図のように主回路のモード b の時間を短縮するため、サイリスタを用いホイトストンブリッジを形成する抵抗 R_{03} および R_{04} の接続を同期させる。

(4) 主電動機回路の電流を検出する継電器の主電流コイルのほかに、直列最終段においてのみ和動に励磁される調整コイルを設けるなどの方法により、進段電流の 90% 程度に橋絡渡り開始電流を低減する。

6. む す び

接触器動作に従い回路網のモード変化を伴うほか、

インダクタンスや直巻電動機の逆起電力のような非線形性の極めて強い要素のある直流電車主回路の橋絡渡り時の過渡現象の数値計算を行ない、新規な知識を得ることができた。すなわち、主電動機を含む枝路の可変インダクタンスの値と電流値との積の数値がほぼ一定な電流域において橋絡渡りを行なう場合には、主電動機電流は接触器の動作タイミングに無関係に一定値を保つが、積の数値が電流に比例的に増減するような電流域において橋絡渡りを行なうと、主電動機電流に急変現象を生じ数 ms で最終値に近い値になり、一枝路の主電動機電流と他枝路の主電動機電流とに差異を生じる。これらはラプラス変換した状態方程式および逐次繰返し計算のつど、計算機が状態方程式の初期値として与えたイン

主電動機：315 kW, 1,500 V, 230 A, 1,020 rpm, 一時間定格

第 14 図 インダクタンスの値と電流値との積が一定の場合の直流電車の加速時のオシログラムの例

Fig. 14. Example of an oscillogram after start of a Dc electric train in the case of constant product-value for the inductance and its current.

ダクタンスと逆起電力のデータによってその理由を説明できることを述べた。

今回、MT 編成のように加速電流が大きい場合に、車輪とレールとの粘着限界の近くまで加速度を高くしかつ電車の乗心地を良好に保つために、直流電車の主回路が具備すべき条件の一つを示すことができた。

終りにのぞみ、本研究に貴重な御指導を頂いた名古屋大学 雨宮好文教授、水戸工場 古山義雄 副技師長はじめ各位に厚く謝意を表す。本稿の数値計算は、可変パラメータを含む線形回路網の定式化およびラプラ

ス変換法を記憶したディジタル計算機 HIDIC-500 を用いて行なったことを付記しておく。

(昭和 51 年 12 月 1 日受付)

文 献

- (1) 例えば, K. Sachs: Elektrische Triebfahrzeuge II, 75 (1953) Huber & Co.
- (2) 内藤: 日立評論 15, 757 (昭 7-12)
- (3) 平田: 同上 20, 761 (昭 12-12)
- (4) 平田: 同上 22, 423 (昭 14-7)