

# 1808 車両の負荷パターンを考慮した ΔI 形故障選択装置(50F)の保護整定に関する検討

正 [電] ○赤木 雅陽 (鉄道総研) 正 [電] 森本 大観 (鉄道総研)

A study on the protection setting of the 50F relay in consideration of vehicle characteristics

Masataka Akagi, Member, Hiroaki MORIMOTO, Member (Railway Technical Research Institute)

D.C. railway power feeding system is protected from a short circuit fault by the D.C. high speed circuit-breaker and the fault current detection device called 50F. However, load currents increase in recent years, the setting of protection becomes difficult and the margin of the setting decreases. On the other hand, the fault current detection device of the old model might malfunction because load characteristics of recent inverter controlled electric vehicles are not considered. In this study, we clarify output characteristics of the fault current detection devices. In addition, we would like to report on notes in the setting of the fault current detection devices.

Keywords: D.C. railway power feeding system, load characteristics, fault current detection device, traction control

## 1. はじめに

直流き電回路では、通常き電用高速度遮断器(54F:HSCB)の目盛値による自己遮断機能とΔI形故障選択装置(50F)を組み合わせることで電車線での短絡故障の保護を行っている。しかし、近年負荷電流が増加したことで保護整定の余裕が減少しており、新型車両導入時には整定値の変更を余儀なくされることがある。一方、従来から用いられている電子形50Fは最近のインバータ制御車両の負荷特性を考慮した設計とはなっておらず、不要動作の懸念がある<sup>1,2,3)</sup>。本稿では、50Fにおける負荷電流に対する特性を明らかにすることで保護整定上の留意点を提示する。

## 2. 従来の50Fの整定の考え方

50Fはき電回路の故障を確実に検知するとともに負荷電流のΔI変化では不要動作しないことが求められる。そこで通常は以下のように整定値の検討が行われる<sup>4)</sup>。

(a)変電所から故障点までの各定数(回路定数、アーク電圧、故障点抵抗)を元に故障電流計算を行い、連絡遮断装置がある場合は自変電所から60%以上、ない場合は100%の区間を保護できるように設定する。

(b)上記の整定値ないしは回線電流最大値の1/2のいずれか小さい方の値で運用し、負荷電流のΔI変化では不要動作しないこと、50F整定値と負荷電流のΔIとの間に余裕があることを確認する。この余裕は近年ではΔIを抽出する機構を備えた装置<sup>5,6)</sup>を用いて実際に負荷電流とΔIを長期測定する手法により確認することが多い。

以前は、直流直巻電動機を主電動機とする抵抗制御車両が主流であったため、電動機を直列から並列接続につながる際に生じるΔI(一電動車あたり250A程度)から概ね負荷電流によりΔIの目安が検討できた。しかし、今日ではインバータ制御車をはじめさまざまな車両が運行していることから負荷電流によるΔIの目安を知ることが容易でない。また、長期測定によるΔI測定の問題点として、実際に測定を行いつつデータを解析するまで余裕の有無を判断し難いことが挙げられる。そこで、事

前に車両の仕様書から最大ΔIが計算できれば整定作業の迅速化を図ることができる。次節より電子型50Fの応答と車両の力行時における制御パターンに着目し、ΔIの検討を行う。

## 3. 電流波形に対する電子型50Fの応答

本節では、まず50Fの基本特性を明らかにする目的で、電子型50Fが故障電流や一般の負荷電流に対してどのようなΔIを出力するかを検討する。電子型50Fは「故障回路のR/L比(R, Lの単位は[Ω], [H])が50のときに継電器の整定値と動作電流が一致する」という特性を有しており、時定数750ms(カットオフ周波数0.212Hz)の1次ハイパスフィルタで模擬することができる<sup>5)</sup>。これを回路電流*i(t)*が電圧源*E(t)*により供給されるものとして模式図で表すと図1のようになり、伝達関数では式(1)に示すような特性を有している。

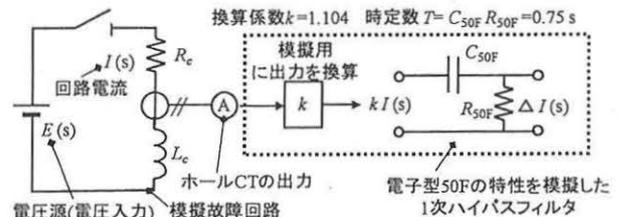


図1 電子型50Fと回路電流の模式図

Fig.1 Schematic diagram of 50F (FE Type)

$$\Delta I(s) = 1.104 \cdot \frac{s}{s + (1/0.75)} I(s) \quad \dots (1)$$

時刻  $t=0$  での電流が0として、模擬故障回路にRとLの成分が含まれる場合、 $\Delta I(s)$ は電圧入力を*E(s)*とすると、次の式(2),(3)のように表すことができる。

ここで電圧がステップ入力であるとする式(4)と表すことができるため、 $\Delta I_{stop}(t)$ は式(5)となる。

$$I(s) = E(s) \cdot \frac{(1/L)}{s + (R/L)} \quad \dots (2)$$

$$\Delta I(s) = 1.104 \cdot \frac{as}{R_c(s+a)(s+b)} E(s) \quad \dots (3)$$

ただし  $a = \frac{R_c}{L_c}$   $b = 1/0.75$

$$E_{step}(s) = 1/s \quad \dots (4)$$

$$\Delta I_{step}(t) = \frac{1.104a}{(b-a)R_c} (e^{-at} - e^{-bt}) \quad \dots (5)$$

次に電圧が負荷電流のように徐々に増加する場合を考える。電圧入力を部分的にランプ関数として振る舞う図2のような入力として近似した場合、 $B(s)$ は(6)式、 $\Delta I(s)$ は(7)式になる。ここで  $F(s)$ という関数を(8)式のように定義する。(8)式をラプラス逆変換すると(9)式のようになる。上記の関数はラプラス変換の公式に従えば、(10)、(11)式のような関係が成り立っている。これらをまとめると、 $\Delta I_{ramp}(t)$ の出力は  $0 < t < T_{ramp}$  においては(12)式、 $t > T_{ramp}$  においては(13)式のように表すことができる。

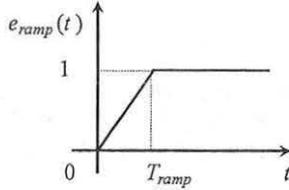


図2 部分的にランプ関数として振る舞う入力  
Fig.2 Input characteristic (ramp function)

$$E_{ramp}(s) = \frac{(1 - e^{-T_{ramp}s})}{T_{ramp}s^2} \quad \dots (6)$$

$$\Delta I_{ramp}(s) = 1.104 \cdot \frac{a(1 - e^{-T_{ramp}s})}{R_c T_{ramp} s(s+a)(s+b)} \quad \dots (7)$$

ただし  $a = \frac{R_c}{L_c}$   $b = 1/0.75$

$$F(s) = 1.104 \cdot \frac{a}{R_c T_{ramp} s(s+a)(s+b)} \quad \dots (8)$$

$$L^{-1}\{F(s)\} = A[(a-b) + be^{-at} - ae^{-bt}] \quad \dots (9)$$

ただし  $A = \frac{1.104}{b(a-b)R_c T_{ramp}}$

$$L^{-1}\{F(s)\} = f(t) \quad \dots (10)$$

$$L^{-1}\{F(s)e^{-Ts}\} = f(t-T) \quad \dots (11)$$

$$\Delta I_{ramp}(t) = f(t) \quad \dots (12)$$

$$\Delta I_{ramp}(t) = f(t) - f(t-T_{ramp}) \quad \dots (13)$$

最後に、電圧入力が図3のような半波の正弦波状の入力の場合を考える。

電圧入力  $B(s)$ が通常の正弦波である場合、 $\Delta I_{sin}(s)$ は角周波数を  $\omega$  [rad/s]とすると(14)式になり、ラプラス逆変換すると(15)式になる。 $t > T_{halfwave}/2$ 以降の電圧入力は半周期シフトした電圧入力により相殺されるものとする、 $\Delta I_{halfwave}(t)$ の出力は  $0 < t < T_{halfwave}/2$  においては(16)式、 $t > T_{halfwave}/2$  においては(17)式のように表すことができる。

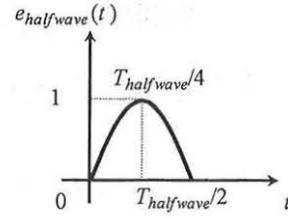


図3 半波の正弦波状の入力  
Fig.3 Input characteristic (half wave)

$$\Delta I_{sin}(s) = \frac{c\omega s}{(s^2 + \omega^2)(s+a)(s+b)} \quad \dots (14)$$

$$L^{-1}\{\Delta I_{sin}(s)\} = B \sin(\omega t - \phi) + Ce^{-at} + De^{-bt} \quad \dots (15)$$

ただし  $c = \frac{1.104\sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2}}{L_c}$   $\phi = \tan^{-1} \frac{(\omega^2 - ab)}{\omega(a+b)}$

$$B = c\omega \frac{\sqrt{(\omega^2 - ab)^2 + \omega^2(a+b)^2}}{(\omega^2 - ab)^2 + \omega^2(a+b)^2}$$

$$C = \frac{c\omega a}{(a^2 + \omega^2)(a-b)} \quad D = \frac{c\omega b}{(a^2 + \omega^2)(b-a)}$$

$$\Delta I_{halfwave}(t) = \Delta I_{sin}(t) \quad \dots (16)$$

$$\Delta I_{halfwave}(t) = \Delta I_{sin}(t) - \Delta I_{sin}(t - T_{halfwave}/2) \quad \dots (17)$$

#### 4. 50F の応答特性比較

前節の結果を用いて各 50F の応答特性を実際に算出した。なお、計算においては図1に示す模擬故障回路の抵抗  $R_c$  は  $1[\Omega]$ とし、MEF型 50F については、電子型 50F の応答の瞬時値と 100[ms]遅延した値との差を応答と模擬し、ウインド型 50F については模擬故障回路の電流値の瞬時値と 40[ms]遅延した値との差を応答と模擬している。

表1に部分的にランプ関数として振る舞う電圧入力に対する 50F の応答結果を、電圧入力最大値に対する  $\Delta I$  の応答の割合として示す。また図4に  $T_{ramp}=1[s]$  における応答特性 ( $R/L=50$ ) を示す。

表1 部分的にランプ関数として振る舞う電圧入力に対する 50F の応答結果

Table1 Output characteristics of 50F (at ramp function)

電圧入力 が立ち上がり 始めてから 最大になる までの時間 $T_{ramp}$ (s)	電子型 $\Delta I$ _最大値 ( $R/L=50$ ) (%)	電子型 $\Delta I$ _最大値 ( $R/L=25$ ) (%)	MEF型 $\Delta I$ _最大値 ( $R/L=50$ ) (%)	MEF型 $\Delta I$ _最大値 ( $R/L=25$ ) (%)	ウインド 型 $\Delta I$ 最 大値 ( $R/L=50$ ) (%)	ウインド 型 $\Delta I$ 最 大値 ( $R/L=25$ ) (%)
0.025	99.8	93.5	99.8	90.6	76.8	55.7
0.050	99.3	93.3	99.2	87.4	63.1	48.0
0.100	97.6	92.4	88.9	75.8	39.2	34.7
0.200	93.1	89.3	48.8	46.2	20.0	19.8
0.400	83.5	81.4	24.4	23.1	10.0	10.0
0.500	79.0	77.4	19.5	18.5	8.0	8.0
0.667	72.1	71.0	14.6	13.8	6.0	6.0
0.800	67.1	66.3	12.2	11.5	5.0	5.0
1.000	60.5	59.9	9.8	9.2	4.0	4.0
2.000	38.4	38.4	4.9	4.6	2.0	2.0

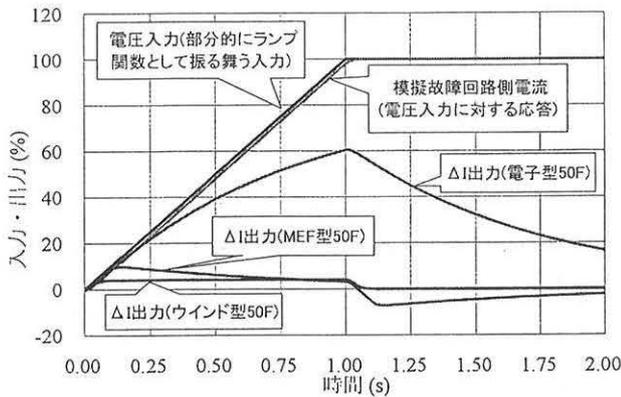


図4  $T_{ramp}=1[s]$ における応答特性  
Fig.4 Output characteristics of 50F (at ramp function)

表1より、電子型50FとMEF型50Fについては急峻な立ち上がりに対しては電圧入力最大値にはほぼ一致する応答を示していることが分かる(R/L比=50、 $T_{ramp}=0[s]$ の場合完全に一致する)。それに対して、ウインド型50Fでは応答が電子型50Fの応答を下回っており、特にR/L比が小さい場合(き電線を増強している場合等に該当)に顕著である。これは模擬故障回路の電流が最大値に達する前に故障電流の判定を開始することに起因する。このため、電子型50Fをウインド型50Fに交換した場合は整定値をやや低めに見直すことも必要と考えられる。一方、図4に示すように立ち上がりが緩やかな場合、MEF型50Fやウインド型50Fでは $\Delta I$ の応答は小さな値であるのに対し、電子型50Fでは過大な応答を示しており、応答が減衰するのにも長時間を要していることが分かる。次節で述べるが、1秒程度で変化する入力は車両の再力行時によく見られる特性であることから、電子型50Fは他の50Fに比べ故障電流と負荷電流を区別する能力がやや低いといえる。

次に、表2に半波の正弦波状の電圧入力に対する応答結果を回路電流最大値に対する $\Delta I$ の応答の割合として示す。また図5に $T_{halfwave}=1[s]$ における応答特性(R/L=50)を示す。

この場合は先程のランプ状の急峻な立ち上がりの場合と異なりウインド型50Fが100%の応答を示していることが分かる。また、周期が長く立ち上がりが緩やかな場合は、先程と同様に電子型50Fで過大な応答を示している。いずれにしても電子型50Fでは故障電流以外の応答が他の50Fに比べ大きく、保護整定上の余裕を減少させる要因となっている。

表2 半波の正弦波状の電圧入力に対する50Fの応答結果

Table2 Output characteristics of 50F (at half wave)

半波の正弦波の周期 $T_{halfwave}$ (s)	電子型	電子型	MEF型	MEF型	ウインド	ウインド	回路電	回路電
	$\Delta I$ 最大値 (R/L=50) (%)	$\Delta I$ 最大値 (R/L=25) (%)	$\Delta I$ 最大値 (R/L=50) (%)	$\Delta I$ 最大値 (R/L=25) (%)	$\Delta I$ 最大値 (R/L=50) (%)	$\Delta I$ 最大値 (R/L=25) (%)	流最大値対 入力電圧最大 値 (R/L=50) (%)	流最大値対 入力電圧最大 値 (R/L=25) (%)
0.050	40.2	21.2	40.2	21.2	100.0	100.0	48.7	30.3
0.100	67.0	39.7	67.0	39.7	100.0	99.7	69.4	48.7
0.200	89.2	65.3	89.2	65.3	79.7	72.9	86.2	69.4
0.400	96.8	85.4	94.8	79.9	49.4	44.2	95.5	86.2
0.500	96.6	88.4	87.7	75.0	41.4	37.2	97.0	90.1
1.000	90.4	88.0	55.1	49.4	23.0	21.2	99.2	97.0

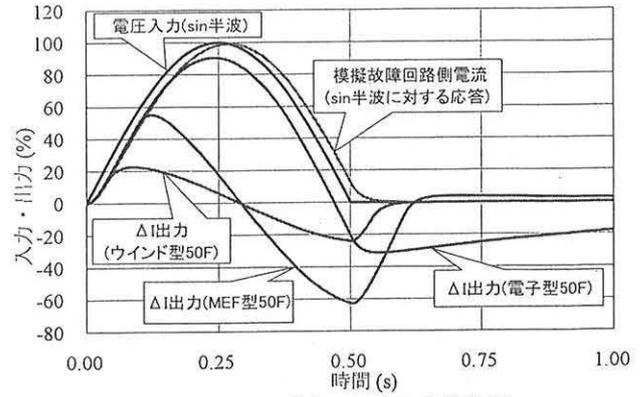


図5  $T_{halfwave}=1[s]$ における応答特性  
Fig.5 Output characteristics of 50F (at half wave)

### 5. 車両の力行回生時における制御パターンと各50Fの応答

一般に、最近のインバータ制御車両では起動、ノッチオフ、ブレーキ、再力行時における乗り心地を考慮してジャーク(加加速度:加・減速度の時間変化率)を一定にし、ないしはある時定数を持たせた緩和パターンでトルクを立ち上げる制御を行っている<sup>7,8)</sup>。各パターンの詳細は参考文献に譲るが、それらは1秒~2秒程度で変化するランプ関数とみなすことができる。一方、車輪が空転し、その後空転再粘着制御が行われた場合については、三角波パルスや正弦波パルスが数秒毎に繰り返される、のこぎり状のトルク分電流指令値が報告されている<sup>9)</sup>。そこで、本節では制御パターンの例として部分的にランプ関数として振る舞う引張特性、並びに半波の正弦波の引張特性を組み合わせた場合における各50Fの応答を検討する。

車両走行時の負荷電流は車両の速度-引張特性から求まる引張力を変換することで算出できる。まず車両の運動方程式は式(1)で示される<sup>10)</sup>。

$$F_d = 277.8 \times (1 + 0.05) \times W \times A \quad \dots(1)$$

ただし走行抵抗は無視しており、 $F_d$ : 引張力(N)、 $W$ : 車両重量(t)、 $A$ : 加速度(km/h/s)である。等価慣性係数は0.05とした。次に $\eta$ : 電動機や歯車などの効率の積、 $P_i$ : 電動機入力(kW)、 $v$ : 車両の速度(km/h)、 $V_{car}$ : 車両のパンタ点電圧(V)とすると式(2),(3)になる。

$$P_i = F_d \times v / (3600 \times \eta) \quad \dots(2)$$

$$I_{car} = P_i / V_{car} \quad \dots(3)$$

ここでは一般的な10両編成の通勤電車を想定し、 $F_d$ 最高値=200(kN)、 $W=500(t)$ 、 $\eta=0.8$ 、初速度 $v=40(km/h)$ 、 $V_{car}=1350(V)$ 、 $A$ 最高値=1.37(km/h/s)とした。導出した電流値を先の電圧入力に換算して各50Fの応答を計算した結果を図6に示す。

図より、引張力と各50Fの応答との対応関係、並びに前節同様電子型50Fでは他の50Fに比べ応答が大きいことがわかる。本検討では周期1秒の正弦波パルスと0.5秒後に最大最小値になるランプ関数を例に取ったが、引張力パターン毎の応答も表計算ソフト上で各定数を変更するだけで得られるため、上記の式を用いることで新型車両導入時には試運転前に事前に最大 $\Delta I$ の目安を容易に把握することが可能となる。なお、本来この応答は電圧源である変電所と電流源の車両負荷電流を組み合わせ

た形で計算すべき問題であるが、今後の課題としたい。

## 6. まとめ

本稿では、現行の各 50F の電流変化に対する出力特性を示すとともに、電子型 50F は VVVF インバータ車の再力行に相当するような負荷電流変化に対してやや過大な応答を示すことを解析的に明らかにした。大容量負荷車両はさらに増加することが見込まれる他、輸送力増強で R/L 比=50 前後の線区が以前に比べ減少していることから、今後 50F のパラメータや故障判定手法を見直す必要もあると考える。

## 参考文献

- 1) 谷, 真部, 金崎:「VVVF 制御車負荷における電線故障選択装置の特性について」, 鉄道と電気技術, 1994 年 4 月号, pp40-45, 日本鉄道電気技術協会
- 2) 伊藤:「鉄道と電気技術」直流き電回路保護方式(4)」, 鉄道と電気技術, 1994 年 4 月号, pp82-84, 日本鉄道電気技術協会
- 3) 内田, 伊東, 谷:「パソコンによる直流  $\Delta$  I 形故障選択装置のシミュレーション」, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-93-33, pp11-20, 1993 年 12 月
- 4) 島田:「直流き電区間における HSCB と  $\Delta$ I の整定値(目盛)について」, 電気鉄道, 1981 年 1 月号, pp42-43, 鉄道電化協会
- 5) 森本, 長谷, 川原:「直流き電用  $\Delta$  I 演算模擬回路」, 平成 15 年電気学会全国大会, 5-234, 2003 年
- 6) <http://www.eiraku.com/products/denryoku/keisoku/pdf/2-3.pdf> 永楽電気:直流き電電流分析装置
- 7) 飯田, 加賀:「インバータ制御電車概論」, 電気車研究会, pp84-85, 2003 年 10 月
- 8) 岡田, 古関:「直流電気鉄道における回生制動有効活用のための車両および電気システム」, 電気学会交通・電気鉄道リアドライブ合同研究会 TER-04-39/LD-04-60, pp47-52, 2004 年 7 月
- 9) 山下, 大江, 添田:「空転誘発を抑制する電気機関車制御の現車試験結果」, 平成 21 年電気学会全国大会, 5-092, 2009 年
- 10) 持永:「電気鉄道技術入門」, オーム社, pp93-94, 2008 年

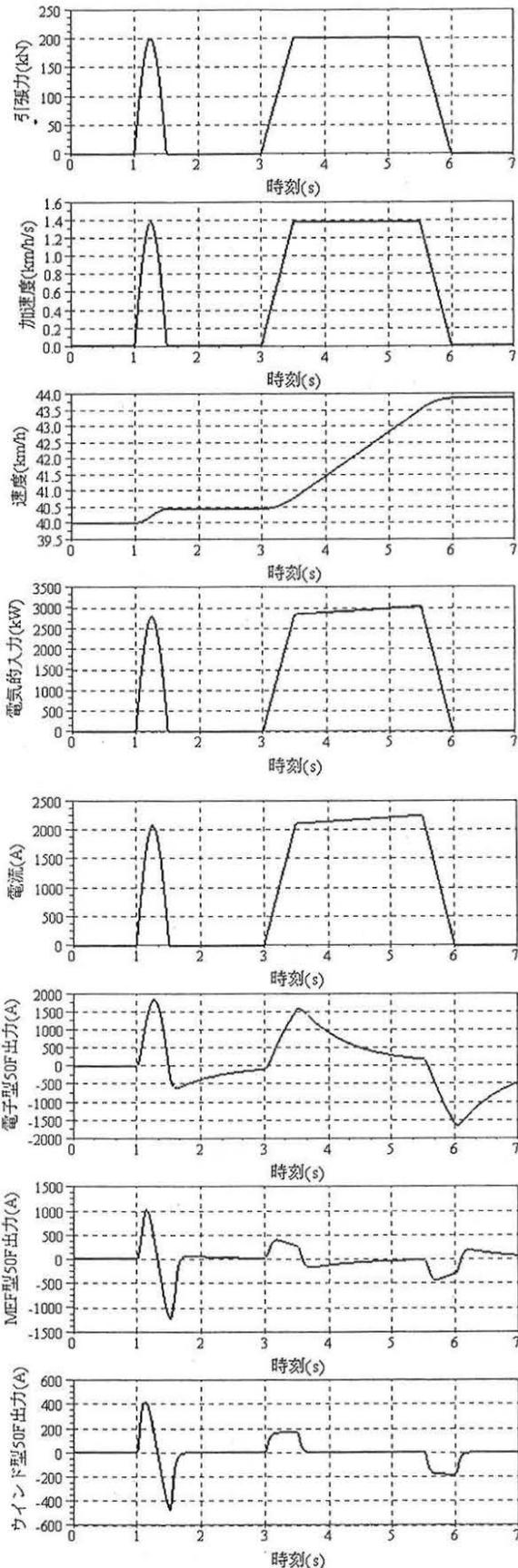


図 6 引張力変化と各 50F の応答結果

Fig.6 Relationship between tractive force and responses of 50F