

VVVF 制御車に適した直流変電所保護手法の基礎検討

小西 武史* 伊東 和彦* 今村 英樹**

Fundamental Study of Protection Method for DC Substation
with due Consideration on the Characteristics of VVVF

Takeshi KONISHI Kazuhiko ITO Hideki IMAMURA

Protection equipment for DC electrified railway substations breaks fault current within short time by detecting large current. The equipment must distinguish fault current from load one based on the appropriate criteria establishment. Recently, variable-frequency drive (VVVF) has been used for a new-type electric rolling stock, instead of conventional resistance control drive. The fluctuation range of load current of VVVF drive is different from that of the conventional drive. Therefore, we have investigated feeding current fluctuation range at several substations and studied appropriate protection method taking account of the characteristics of VVVF.

キーワード：直流変電所，VVVF 制御車，抵抗制御車，再着線

1. はじめに

直流電気鉄道におけるき電回路の事故電流検出は、主に回線電流の立ち上がり特性 (ΔI 電流や di/dt) の監視により行ってきた。近年の電車の主流である VVVF 制御車は、従来の抵抗制御車とは負荷電流特性が大きく異なる。したがって全車両が VVVF 制御車に置き換えられた場合を想定し、VVVF 制御車に適した事故電流との判別方法を確立することができれば、保護継電器の事故検出能力が高くなることが期待される。そこで、VVVF 制御車と抵抗制御車の双方の負荷が大きい複数の線区の直流変電所において、回線電流ならびに ΔI 電流の測定、分析を行うことで、VVVF 制御車に適した保護継電器の整定手法を検討したので報告する。

2. 直流変電所のき電回路用故障選択装置

直流変電所においては、ある回線に故障が発生した場合に大きな「回線電流」が流れ、図 1 に示すように計器用変流器から ΔI (電流増加分) 形き電回路用故障選択装置 (以下 50F と表記) へ情報が発信される¹⁾。50F はき電電流の増加量を判定し、その値が整定値を超える場合、該当する回線の遮断器にトリップ信号を出力する。 ΔI 整定値を下げることであれば故障の見逃しを減少させることができるため、き電回路の信頼度向上につながるが、電気車の電流変化による不要動作が生じないよ

うに設定する必要がある。そこで、50F は正常な電気車の起動電流あるいはノッチ刻みによる電流変化と、事故電流による電流変化の性質が異なることを利用して、負荷電流と事故電流を判別する。

従来から使用されている電子形 50F の基本的な検出原理を図 2 (a) に示す²⁾。き電線を一次側貫通巻線とするギャップ鉄心の変成器 (故障検出用変成器 FD) を用い、二次巻線に発生するき電線電流の微分量 V_1 を積分 (不完全積分) することによって、過渡時の一次電流にほぼ相似する ΔI 出力波形 V_2 を得る。積分時定数 750ms 程度を設計値とし、 V_2 が整定値を超えた時に故障と判別する。

上記の ΔI 出力波形 V_2 を得るために、本テーマでは ΔI 演算模擬回路²⁾ を用いた計測を適用した。図 2 (b) に等価な 50F の出力回路を示す。変電所の回線電流を電流源とすると、インダクタンスと並列構成した微分回路により V_1 を得ることができる。さらに、抵抗とコンデンサによる不完全積分回路により、 V_2 を得ることができる。以降、

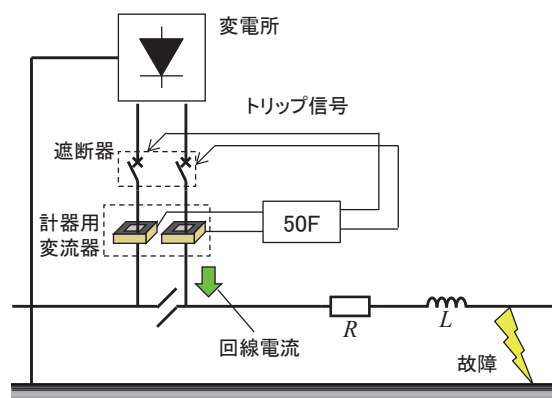


図 1 50F による変電所故障検出

* 電力技術研究部 き電研究室

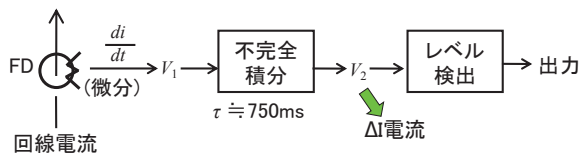
** 電力技術研究部 き電研究室 (現 西日本旅客鉄道株式会社)

特集：電力技術

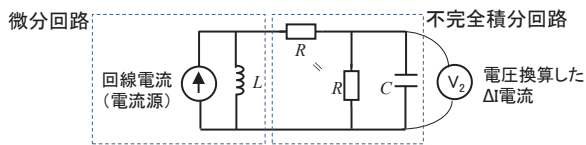
「 ΔI 電流」はこの ΔI 演算模擬回路の電圧 V_2 を指す。

図 2 の原理に基づいて、回線電流が 100ms ~ 1500ms の間に 0A から 2000A まで立ち上がる際の ΔI 電流の計算結果を図 3 に示す。100ms の立ち上がり ($di/dt = 20\text{kA/s}$) ならば、計算した ΔI 電流 (V_2) の最大値は 1954A となり、回線電流の最大値に近い値となる。1500ms の立ち上がり ($di/dt = 1.3\text{ kA/s}$) では ΔI 電流最大値は 916A となり、回線電流最大値の半分を下回る。

なお近年はウインド形 50F が採用される事例も多い³⁾。これはサンプリング間隔 1ms で、一定時間間隔 (40ms) 後のき電電流の正領域 (零アンペア以上の電流) におけるき電電流増加量 (di/dt) を ΔI 電流とするものである。 ΔI 電流が整定値を超えた場合、該当するき電回線に遮断信号を出力する。

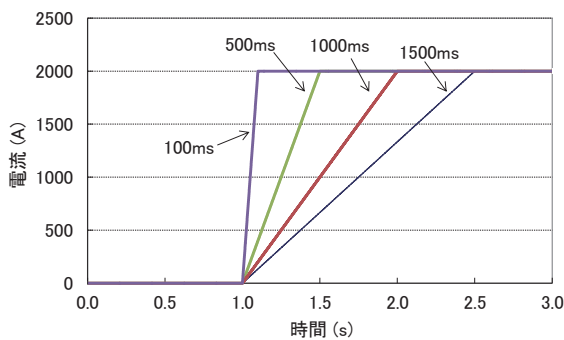


(a) 50F の検出原理

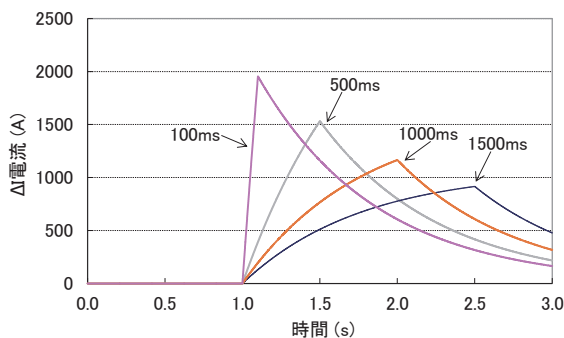


(b) 50F の等価出力回路

図 2 50F の検出原理と等価出力回路



(a) 回線電流立ち上がり波形



(b) ΔI 電流計算結果

図 3 回線電流と ΔI 電流の関係

3. ΔI 電流測定結果

VVVF 制御車と抵抗制御車が混用され、両者とも負荷電流が大きく、50F の履歴情報から電流立ち上がりが ΔI 整定値に近いと想定される直流変電所において、回線電流と ΔI 電流を測定した⁴⁾。測定対象とした 6 箇所の変電所の概要を表 1 に示す。測定期間は何れの変電所も 1 ヶ月程度とし、回線電流あるいは ΔI 電流が大きい値を示した際の 2 ~ 3 秒間のデータを取得した。ただし、セクション通過に伴って発生する大きな ΔI 電流は除外した。

隣接変電所間の距離については、参考値として起点方、終点方の一方のみを記載した。なお、F 変電所に関しては両隣の変電所間に上下タイポストがあり、変電所とタイポスト間の距離を示した。

整流器容量が比較的大きい A 変電所における抵抗制御車と VVVF 制御車の波形例を図 4、図 5 に示す。

回線電流の最大値は図 4 に示す抵抗制御車の例の方が大きい、 ΔI 電流の最大値は図 5 に示す VVVF 制御車の例の方が大きい。抵抗制御車の負荷電流は、直流電動機回路の抵抗器構成の直並列切替に伴って段階的に大きくなるが、図 4 の例では、 ΔI 電流は 3000A 弱から 4000A 付近までの電流上昇分のみが現れ、3000A 弱までの電流変化の影響を受けない。したがって、抵抗制御車の力行時における編成数増や速度増の ΔI 電流への影響は、VVVF 制御車と比較して小さい。これに対して図 5 に示す VVVF 制御車の例では、回線電流は時間に比例して上昇する。VVVF 制御車の場合、編成数増や速度増があると回線電流の立ち上がりも急峻になるため、 ΔI 電流も大きくなる。

A, C, D, F の各変電所で最も大きな ΔI 電流が計測されたのは、パンタグラフとトロリ線が離線した後に再接触したと想定される際の一時的な電流上昇によるものであった。以下、上記現象を「再着線」と呼ぶ。図 6 に C 変電所での測定波形例を示す。回線電流の立ち上がりは 10 ~ 20ms 程度であった。図 3 に示したように、回線電流の変化が 100ms 以内の立ち上がり、立ち下がりであれば、 ΔI 電流は回線電流の変化とほぼ同様な波形となる。その後の ΔI 電流は振動しながら減衰する。

再着線時の一時的な電流上昇は、VVVF 制御車の主回路に存在するコンデンサへの瞬時的な充電電流によるものと考えられる。VVVF 制御車の主電動機、補助電源装置の回路には、ともにフィルタコンデンサとフィルタリアクトルが複数台並列接続される。仮に離線によってフィルタコンデンサの充電エネルギーのほとんどが電車負荷で一旦消費されたあとでパンタグラフが再び電車線へ再着線すると、フィルタコンデンサの初期充電電流は大きなものとなる。

他にも、電車の車輪とレールの間で雨などの水分や

表1 ΔI電流を測定した変電所の概要

変電所名	A	B	C	D	E	F
変電所容量 (kW)	12,000	14,000	8,000	12,000	6,000	6,000
隣接変電所距離 (km)	7.000	7.000	7.380	8.838	9.592	9.300 ※
ΔI 整定値 (A)	2600 ~ 3000	3000	2000 ~ 3000	3000	2600	1800
区間	複々線	複々線	複々線	複線	複線	複線
列車本数 (最大目安)	上下 55 本	上下 55 本	上下 55 本	上下 20 本	上下 8 本	上下 14 本

※隣接の上下タイポストまでの距離

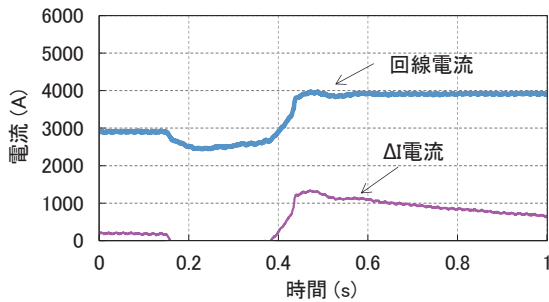


図4 抵抗制御車の電流波形例

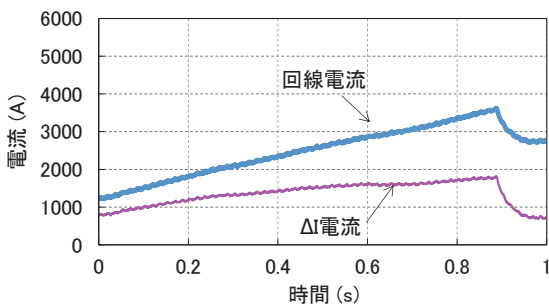


図5 VVVF 制御車の電流波形例

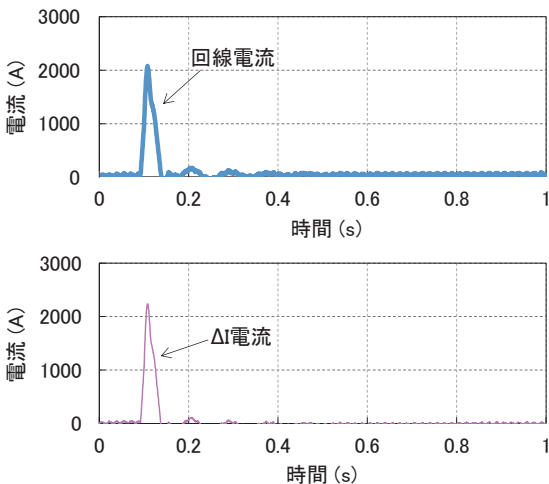


図6 C変電所における再着線時の回線電流とΔI電流の波形例

レールの錆、落葉等が介在し、車輪の摩擦係数が大幅に低下して空転が発生する場合に、再粘着時に変電所の電流が一時的に急増することもある⁵⁾。

A～F変電所において、ΔI電流が大きい場合の、ΔI電流と回線電流の関係を図7に示す。取得した波形データをもとに、抵抗制御車、VVVF制御車、再着線の特

性別に振り分けて示した。

何れの測定変電所においても、電車力行時におけるΔI電流の最大値について、VVVF制御車は抵抗制御車と同等かそれ以上であった。また、抵抗制御車のΔI電流の分布に関しては、多数の測定変電所において、最大でも1000A強の範囲にとどまった。再着線に伴う大きなΔI電流に関しては、頻度の違いはあるが、全ての測定変電所で観測された。B、E変電所を除くと、再着線時のΔI電流の分布は、抵抗制御車やVVVF制御車よりも広い範囲を占めた。

回線電流とΔI電流が同じ波形の場合は、各図に示した斜線上に分布する。A、F変電所においては、再着線の分布はほぼ斜線付近に存在し、回線電流の立ち上がり特性が急峻であったことを示している。一方、B、C、D、E変電所に関しては、再着線に伴う大きなΔI電流の分布は斜線から離れた場所にも多く見られる。これは、定常負荷がある状況で再着線が生じたケースがあることを示している。

変電所ごとのΔI電流最大値を表2にまとめる。また、再着線時とVVVF制御車のΔI電流最大値の差も併せて示す。何れの測定変電所においても、ΔI電流の最大値は抵抗制御車が最も小さく、再着線時に最も大きくなる結果となった。B、E変電所を除き、再着線時の50F不要動作を完全に回避するためには、50F整定値を現行よりも400～1100A程度引き上げる必要があることがわかる。

4. 整定手法に関する検討

4.1 現状の整定値変更の可否

前章の測定結果により、抵抗制御車からVVVF制御車に移行すると、ΔI電流が大きくなる傾向であることが分かった。近年は、通勤電車等で使用されるVVVF制御車の起動加速度が従来よりも大きくなる傾向があり、負荷電流の最大値が今後さらに大きくなることも考えられる。したがって、VVVF制御車移行により50F整定値を引き上げる必要性が高まるが、これにより故障検出感度は悪くなる。

4.2 ΔI特性から再着線特性を分離する手法

表2に示した結果より、VVVF制御車の再着線時に

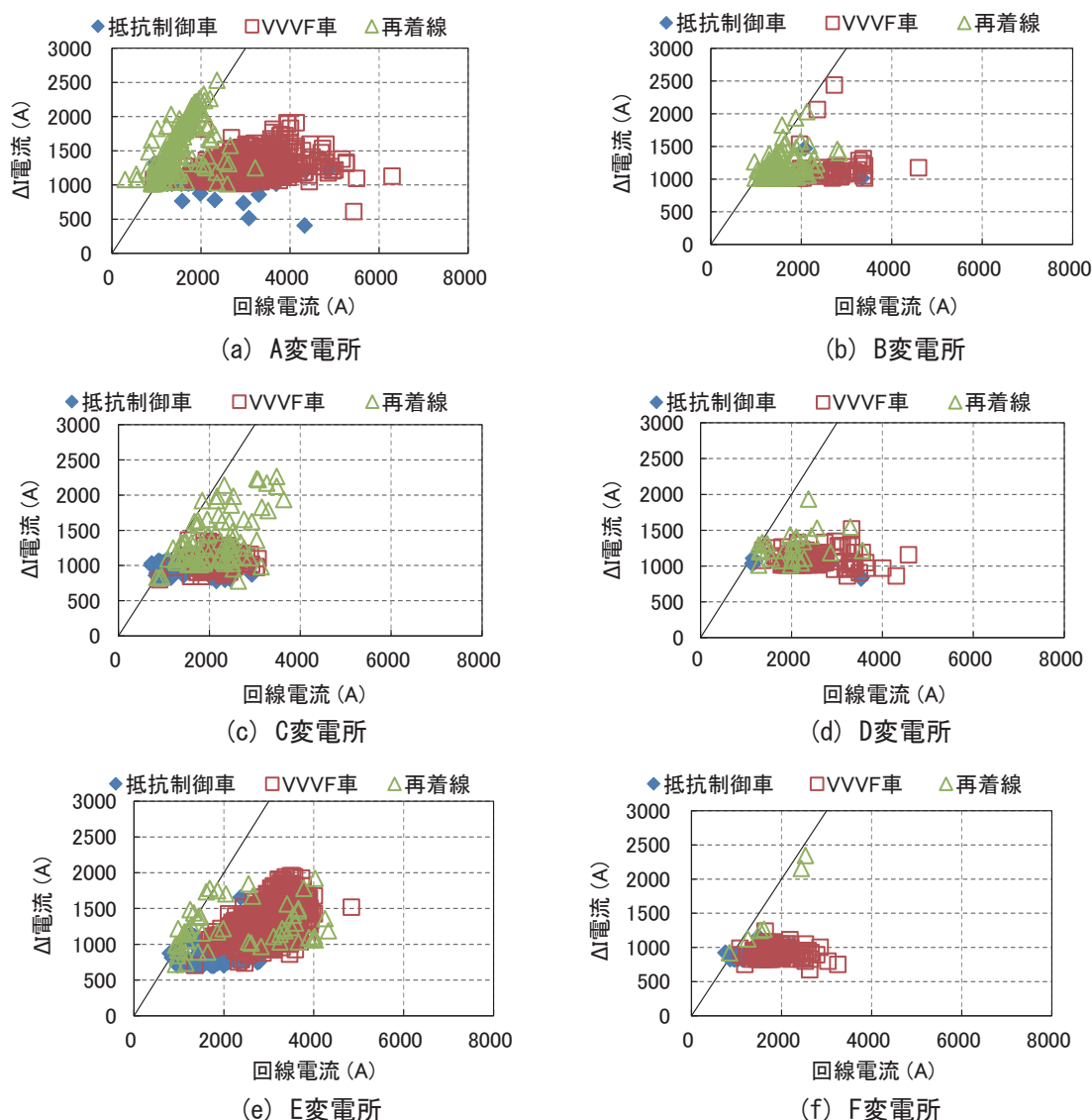


図7 ΔI電流と回線電流の関係

表2 各測定変電所のΔI電流最大値

変電所名	A	B	C	D	E	F
抵抗制御車の最大ΔI (A) [X]	1450	1470	1140	1110	1660	1160
VVVF制御車の最大ΔI (A) [Y]	1910	2440	1360	1520	1950	1230
再着線時の最大ΔI (A) [Z]	2530	2030	2270	1940	1920	2340
[Z]-[Y] (A)	620	-410	910	420	-30	1110

おける50Fの不要動作を回避することができれば、ΔI整定値を下げる事が可能になる。

そこで、事故電流の立ち上がりとΔI電流の関係を考察した。整流器のリアクトルを0.5mH、き電回路の単位インダクタンスを1mH/km、変電所間隔を10kmと想定し、最も検出が難しいとされる変電所中間での短絡時の事故電流の立ち上がり特性を想定すると、図8のようになる。ここで、電源電圧は整流器のリプル電圧を考慮せず、単純な直流電圧源を想定した。

事象発生後から100ms以内では、回線電流とΔI電流の違いはほとんど現れない。図8の回線電流立ち上がりの指標であるR/L比（回路インピーダンスのリアクタンスに対する抵抗の比）は46であるが、図6に示した再着線の例ではこれが63と大きく、より急峻になる。ただし、リアクタンスは電車の位置によって変化するため、再着線時の電流立ち上がり時間には、ばらつきが生じる。また、事故電流の立ち上がりも、故障点が変電所に近づくほどR/L比が大きくなる。したがって、図2に示した

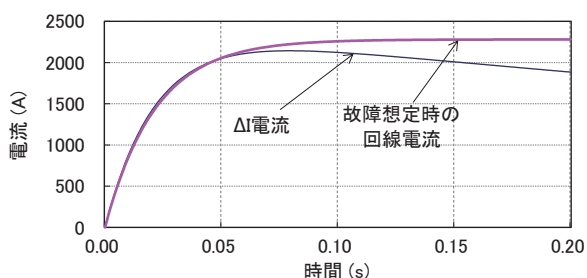


図8 故障想定時の回線電流とΔI電流の例

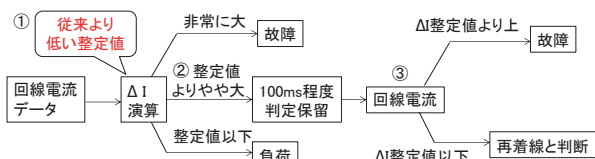


図9 故障時と再着線時の分離の手法例

50Fの出力回路の回路定数(時定数)の調整のみによって、再着線時の立ち上がりと事故電流の立ち上がりとを明確に判別することは難しい。

3章で示した測定結果より、再着線時の回線電流の急激な変化は、他の負荷がない状況ならば、50ms以内には元に戻るが、故障時の電流は50ms後も継続することが予想される。そこで、再着線時の50F不要動作の回避策として、図9に示す手法が一例として考えられる。

図9の考え方は以下のとおりである。

- ① VVVF制御車や抵抗制御車の力行時において不要動作しないレベルまでΔI整定値を下げる。
- ② ΔI整定値をやや上回る程度範囲までにおいてΔI電流を検出した際には、故障か再着線の何れかが発生したものと想定されるため、検出から100ms程度の時間が経過するまで故障判定を留保する。
- ③ 整定値を超えるΔI電流を検出してから100ms程度経過したときの回線電流のレベルを検出し、ΔI整定値以下ならば再着線時と判断し、故障検出とはしない。

ただし、再着線時に他の回線で負荷が存在する場合においては、干渉を受けて不要動作に至る可能性も考えられるため、適用においては長期間測定によって回線電流と再着線発生トレンドを分析する必要がある。

4.3 di/dt特性から再着線特性を分離する手法

図2の原理から得られるΔI電流の整定手法ではなく、より単純な電流変化率di/dtのレベルで検知する方が、再着線の不要動作回避の面で有利となる可能性も考えられる。そこで、di/dtの時間幅を変えた場合の検出レベルとΔI電流との比較を行った。図4、図5、図6、図8に示した回線電流について、電流変化をdi/dtで検出した場合の特性を図10に示す。その時間幅(dt=Δt)は

10ms, 50ms, 100msの3通りとした。なお、本来di/dtはkA/sで表すが、時間幅による特性の違いを比較しやすく示すため、ここではdi分のみで示した。

図10(a)は抵抗制御車の力行時のdi特性を示す。直流電動機主回路の抵抗器構成の直並列切替を行う際にdiの変化が明確に表れている。時間幅が50ms, 100msならば、diの最大値は1000A程度以上を示した。

図10(b)はVVVF制御車の力行時のdi特性を示す。diは何れも低いレベルであった。

図10(c)はVVVF制御車の再着線時の正負のdi特性を示す。時間幅が50ms, 100msならば、ΔI電流の場合と同様に、回線電流とdiはほぼ同じ特性を示した。時間幅が10msの場合、di波形の時間幅は短くなったものの、diの最大値は1000A程度を示した。

図10(d)は故障想定時のdi特性を示す。時間幅が大きくなるにつれてdiの最大値も大きくなる。何れの時間幅でもdiの最大値は図10(c)とほぼ同程度であった。

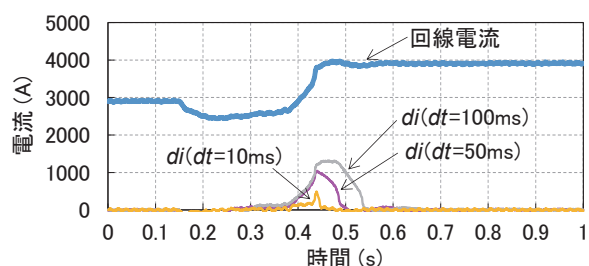
VVVF制御車への移行によって、力行時の回線電流がdi/dtの整定値に近づく機会が少なくなり、不要動作の可能性もΔI方式よりも小さくなるのが考えられる。ただし、現状のdi/dtの整定値を下げると、図10(c), (d)に示したように、di最大値に差が無く、ΔI方式と同様に再着線時の不要動作が懸念される。また、時間幅を小さくした際、再着線時のdi/dtは小さくなるが、故障時のdi/dtも同様に小さくなるため、時間幅の調整によって両者を区別することも難しい。

そこで、別の観点から再着線特性を分離する手法を検討した。図10に基づいて、diに整定値を設定した場合の継続時間から、負荷特性、再着線特性、事故電流特性を分類することを検討した。整定値を1500A, 2000Aに設定した場合の継続時間を表3に示す。時間幅は50msと100msの2種類とした。抵抗制御車の力行時とVVVF制御車の力行時に関しては、図10(a)と図10(b)の結果から明らかにこれらの整定値を下回るため省略した。

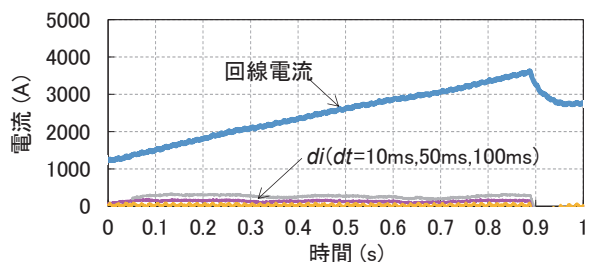
図10(c), (d)のdiの最大値は何れも2000A以上であるが、継続時間は表3に示すように大きく異なる。1500A整定の際、再着線時は時間幅50msと100msの条件でともに11.5ms以下と短いのに対し、故障想定時は何れの時間幅でも比較的長い継続時間を示した。したがって、再着線時のdiの継続時間が短いことを利用し

表3 diの継続時間

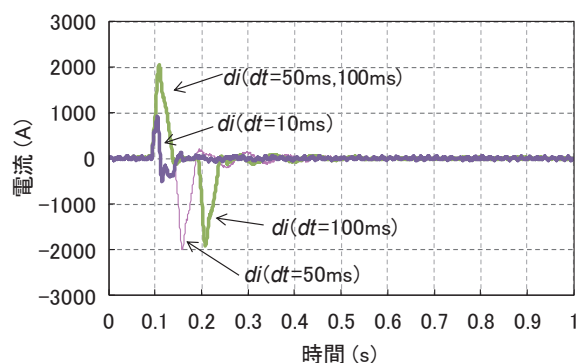
特性 時間幅	再着線時		故障時	
	50ms時	100ms時	50ms時	100ms時
1500A 整定時 (ms)	11.5	11.5	33.5	88.5
2000A 整定値 (ms)	1.5	1.0	5.5	57.5



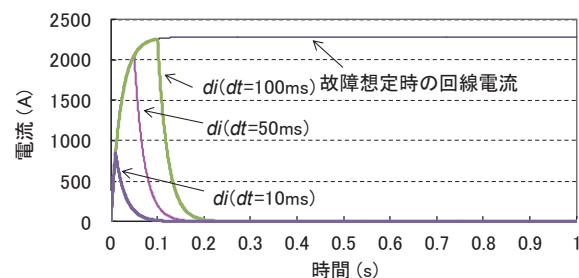
(a) 抵抗制御車力行時の di 特性例



(b) VVVF制御車力行時の di 特性例



(c) 再着線時の di 特性例



(d) 故障時の di 特性例

図 10 di の波形例

て故障と再着線特性を分離できる可能性がある。一方で、図 10 (d) で想定した事故電流よりも電流立ち上がり早い場合は継続時間が短くなり、負荷変化や再着線との区別が難しくなる場合が考えられる。

これに対して、再着線時の di 特性は電流立ち下がり特性も大きいため、図 10 (c) のように負の大きな di が

現れることを利用する手法が考えられる。すなわち、大きな di が発生した後、時間 dt を経過した後に同程度の負の di が発生した際、再着線と判断することにより、より確実かつ高速な故障検出が実現できると考えられる。

5. まとめ

複数線区の変電所にて ΔI 電流測定を行い、VVVF 制御車の特性を考慮した直流き電用変電所の 50F の保護整定手法を検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) VVVF 制御車と抵抗制御車が混用されている線区の変電所を対象に、回線電流と ΔI 電流を測定した。そのデータをもとに、回線電流最大値と ΔI 電流最大値の関係を示した分布図を得た。
- (2) ΔI 電流は、多くの測定変電所において、VVVF 制御車のパンタグラフが離線した後の再着線時に最大となり、整定値に近づく場合もあることを確認した。再着線時の ΔI 電流の立ち上がりは 10 ~ 20ms 程度であった。
- (3) 再着線に伴う回線電流の変動は 50ms 以内に収束することに着目して、一定時間後の回線電流の条件と組み合わせることで、再着線と故障を判別する可能性を示した。
- (4) di の継続時間や電流立ち下がり特性を利用して、故障と再着線を分離する手法が有効であることを示した。

文 献

- 1) 制御と保護, 社団法人日本鉄道電気技術協会, pp.115-119, 2009
- 2) 森本大観, 長谷伸一, 川原敬治: 直流き電用 ΔI 演算模擬回路, 平成 15 年電気学会全国大会, 5-234, pp.334-335, 2003
- 3) 井上一: ウインド形故障選択装置の開発, 電気学会交通電気鉄道研究会, TER-90-13, pp.23-30, 1990
- 4) 小西武史, 今村英樹, 重枝秀紀, 伊東和彦, 川原敬治: VVVF 制御車の特性を考慮した直流変電所保護整定の検討, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 5-9, pp.177-180, 2016
- 5) 根石智史, 西村一実, 飛矢崎篤, 傘木伸樹, 小島靖弘: 電鉄の直流き電回路の事故電流波形による事故原因の特定について, 電気学会交通電気鉄道研究会, TER-09-31, pp.77-81, 2009