

高感度交流き電保護継電器 の開発



井桁 敏明** 安藤 政人* 尋田 伸幸*

交流 I 形故障選択継電器 (50F) と距離継電器 (44F) は故障電流と負荷電流の識別をき電電流に含まれる高調波含有率で行っている。しかし、新形式車両であるPWMインバータVVVF制御車は従来のサイリスタ制御車に比べ低次高調波成分が少ないため故障検出能力が低下する。そこで、故障電流と負荷電流の位相差を利用して、従来のスカラー差検出からベクトル差で検出する方式とし、故障検出感度を向上させた交流き電保護継電器の開発を行った。

キーワード：保護継電器、デジタルリレー、高調波成分

1 はじめに

交流き電回路において地絡や短絡事故が発生した場合、変電所で速やかに事故を検出してき電停止を行い、事故区間の設備の損壊や健全区間への事故の波及を防ぐ必要がある。変電所では、交流 I 形故障選択継電器 (50F) と距離継電器 (44F) の二種類の継電器で行っている。

これらの継電器は、き電電流に含まれる低次高調波含有率で故障電流と負荷電流の識別を行い、検出感度を向上させていた。しかし、新形式車両であるPWMインバータVVVF制御車は従来のサイリスタ位相制御車に比べて低次高調波成分の含有率が少ないため、電気車が力行または回生時に事故が発生した場合、故障検出能力が低下してしまう。

そこで、新形式車両の負荷特性を考慮し、負荷電流と故障電流のベクトル差を検出する方式とすることにより、故障検出感度を向上させた交流き電用保護継電器の開発を行った。

2 現状の検出方式と問題点

2.1 交流 I 形故障選択継電器

従来の I 形故障選択継電器は変化前の電流値と変化後の電流値の絶対値 (スカラー値) で比較を行い、変化量の大きさ (図 1 における I) が整定値以上になると故障として検出していた。しかし、電気車負荷がない時

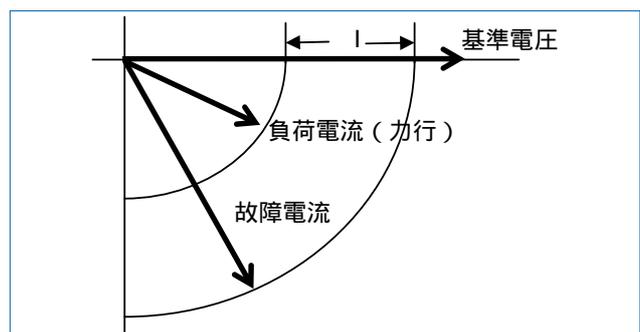


図 1：従来の交流 I 検出原理

に比べ電気車負荷がある場合、図 2 に示すように故障電流の変化量が小さくなる (I_1)。そこで、故障電流は高調波成分をほとんど含まず基本波成分のみであるのに対し、電気車負荷電流には15~20%程度の第3次高調波が含まれていることを利用して保護能力の向上を図っている。

第3次高調波含有率による基本波成分の抑制は (1) 式のように含有率に応じて基本波成分が小さくなるように行っている。抑制率は第3次高調波含有率が15%で、基本波電流が50%となる抑制としている¹⁾。

$$I = I_f \cdot \left(1 - \frac{100}{30} \frac{I_t}{I_f}\right) \quad (1)$$

ただし I_f : 基本波成分

I_t : 第3次高調波成分

このため、負荷電流時は、図 2 の I_2 に示すように第3次高調波成分の含有率によって基本波成分の抑制を行

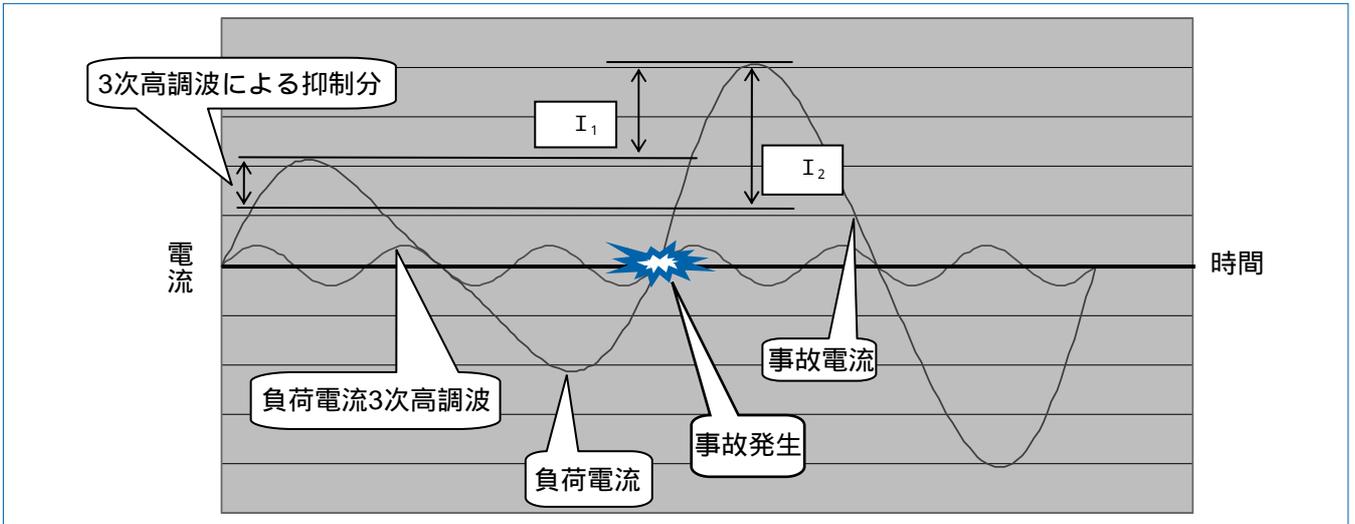


図2：第3次高調波による抑制

い見かけ上負荷電流の値を小さくし、故障時に立ち上がる電流幅を大きくしている。

しかし、新形式車両であるVVVF制御車の負荷電流はサイリスタ位相制御車に比べて第3次高調波の含有率が1/3以下と少ないため、従来の検出方式では、(1)式における負荷電流の抑制量が小さくなる。その結果、電気車負荷電流がある場合に故障検出感度が低下することになる。

また、き電開始時及び再開路時のATや切替セクションを通過する時の車両変圧器には大きな無負荷励磁突入電流が流れる。これら無負荷励磁突入電流による不要動作を防止するため、無負荷励磁突入電流には、第2次高調波成分が基本波成分に対して30～45%含まれていることを利用している。第2次高調波含有率が一定値(在来線15%、新幹線12%)を超えた場合は、無負荷励磁突入電流と判断してI形故障選択継電器の出力をロックしている。

2.2 距離継電器

距離継電器はき電電圧とき電電流からき電回路のインピーダンスを検出し、そのインピーダンスの値が列車負荷時と故障時では異なることを利用して故障を検出している。図3に距離継電器の保護範囲を示す。距離継電器設置箇所から隣接SP(SPの場合は隣接SS)までの短絡インピーダンスに抵抗を含む事故が発生した場合のインピーダンスを考慮した平行四辺形を保護範囲としている。平行四辺形の内側のインピーダンスを検出した場合に故障発生となる。

しかし、近年では列車本数の増加や高出力の力行電力

により変電所からのき電電流が増加し、負荷領域が保護領域に近づいてきている。列車負荷による不要動作を防ぐために保護領域を小さくすると故障時における検出感度が減少してしまう。

従来のサイリスタ位相制御車の場合は、第3次高調波を含むときには列車負荷電流であると判断し、一時的に保護領域を小領域として負荷電流による不要動作を防いでいる。しかし、低次高調波をほとんど含まないVVVF制御車では領域切替を行わず大領域のままとなってしまう、不要動作が起こりやすくなっている。

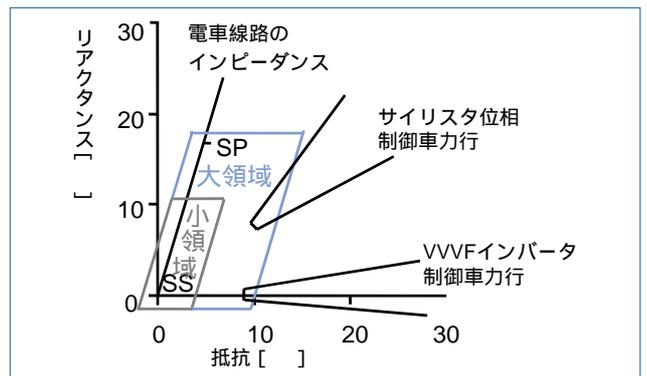


図3：距離継電器の保護特性

3 負荷特性の把握

新形式車両であるVVVF制御車の負荷電流がある場合でも故障検出感度を向上させるために、交流電気車の負荷特性、無負荷変圧器の励磁突入電流特性を明らかにした。

VVVF制御車であるE2系の再力行電流波形を図4に

示す。再力行による電流増加は500ms間で170A程度であった。

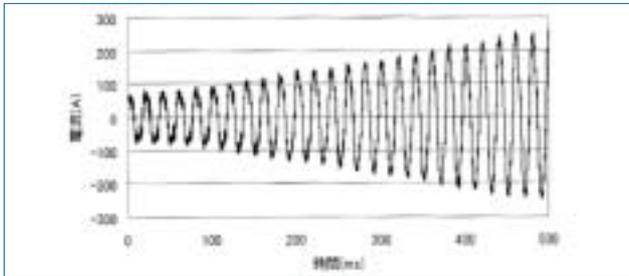


図4：E2系電流立ち上り波形

また、電気車の負荷電流と電気車の励磁突入電流が同時に流れた時の第2高調波電流の最低は0.4A程度であり、第2高調波電流量で継電器の動作を抑制する場合には、整定値を0.4A以下にしなければならない。

4 新しい検出方式

4.1 交流 I形故障選択継電器

負荷特性把握の結果、VVVF制御車の力率がほぼ1と高く、電圧と電流の位相差がほとんどないという特徴を有している。これに対して、故障電流はき電回路の線路インピーダンスにリアクタンス分を含んでいるため、電流は電圧より位相が遅れる（約60～75度）ことになる。この関係をベクトル図で示すと図5のようになる。そこ

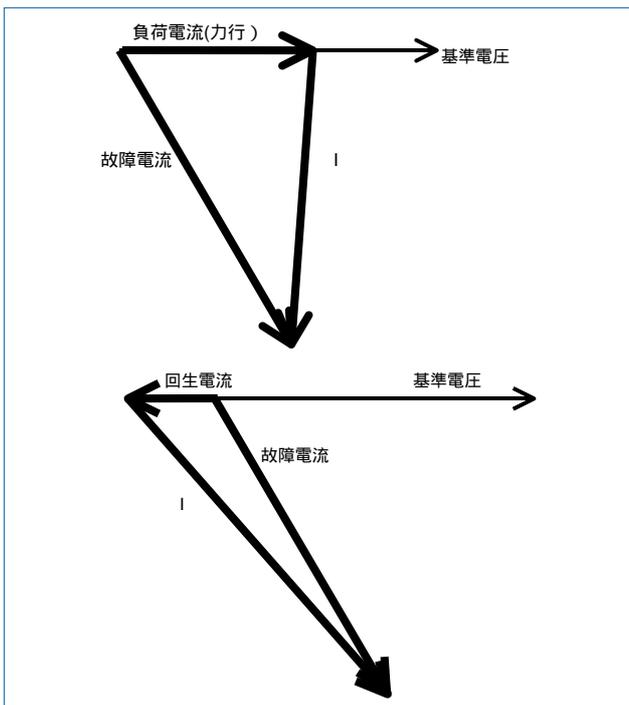


図5：開発品 I 検出原理

で、デジタル継電器を用いて、常時、現時点の電流とその2サイクル前の電流とのベクトル差を比較することにより検出する I形故障選択継電器（50FV）を開発した。これにより、VVVF制御車走行時でもスカラー差検出に比べて電流変化分が大きくなり、故障の検出が可能となる。ただし、ベクトル変化では電流値の増減の区別がつかないため電流絶対値のプラス変化を動作条件とした。

第2次高調波により出力ロックをするようにしたが、出力ロックを含有量と含有率のどちらで行ったほうが効果的か比較できるようにした。ただし、き電電圧が下がっている時には短絡故障が発生していると考え第2次高調波ロックを解除し、故障検出を優先した。

また、当分の間はサイリスタ位相制御車とVVVF制御車が混在するため、従来通り第3次高調波による抑制も行うものとした。

4.2 距離継電器

距離継電器の領域切替判定にこれまでの低次高調波含有率（KL2）の他にベクトル演算方式の I形故障選択要素（50FVL）と不足電圧要素（UV）を条件として加えた。第3次高調波成分を含む時には、従来通り負荷電流として領域を小領域に切替える。第3次高調波成分を含まなくても50FVLが動作しなければVVVF制御車による負荷電流と判断し距離継電器の領域を小領域とする。これによりVVVF制御車の負荷電流を事故電流と区別することができる。また、き電電圧が低下している場合には無条件で大領域とし故障を検出しやすくしている。領域切替と各判定要素の関係をまとめると表1のようになる。

また、I形故障選択継電器と同様、第2次高調波含有率による出力ロック機能を持たせた。

表1：距離継電器領域切替動作

不足電圧要素	高調波	I要素	領域切替
動作	有、無	不動作、動作	大領域
不動作	有	不動作、動作	小領域
不動作	無	不動作	小領域
不動作	無	動作	大領域

4.3 試作品構成

試作品は32ビットのマイクロプロセッサを用いたデジタルリレーとし、新しい検出方式を取り入れた交流 I形故障選択継電器と距離継電器の他に過負荷電流継電器、不足電圧継電器および過電圧継電器を1つの基板に

収納した。

試作品ではき電回路1回線分の保護要素を収納し、装置は1重系とし、各継電器要素動作がモニターで確認できるようにシステムアナライザ機能を持たせた。最終出力はモニター用とし、実際の機器トリップには使用しないものとした。

また、瞬時停電でも連続運転が可能なものとし、き電事故後の外部電源停電でも故障情報等は記録保持できるものとした。試作品の外観を図6に、保護連動のシーケンスを図7に、継電器要素の詳細を表2に示す。



図6：試作品外観

表2：継電器要素の詳細

要素		整定	
デバイス	項目	用途	可変範囲
距離方向 (44F)	(ANG)	感度角	55° ~ 80°
	X _L (LARGE)	大領域	4 ~ 40
	X _S (SMALL)	小領域	4 ~ 40
	XB(BACK)	後方領域	4 固定
	RL(LARGE)	大領域	2 ~ 50
	RS(SMALL)	小領域	2 ~ 50
	RB(BACK)	後方領域	4 固定
電流変化 (50FV)	IV(50FV)	ベクトル変化量	1.5 ~ 6.0A
	I+	絶対値+変化量	0.5 ~ 1.5A
44F領域切替	KZ2(2f含有率)	44F領域切替係数	0.0 ~ 1.0
	KZ3(3f含有率)	44F領域切替係数	5 ~ 15%
	IL(50FVL)	44F領域切替条件	1.5 ~ 6.0A
動作抑制	K2(2f含有率)	第2高調波抑制	3.33固定
	K3(3f含有率)	第3高調波抑制	3.33固定
動作抑止	KL2(2f含有率)	2f動作抑止	10 ~ 15%
	UV	大領域切替, 2f抑止解除	60V固定
	LOC	動作条件	1.5A固定
過電流	HOC	短絡電流	15A固定
過電流 (51F)	51F-I	過負荷電流	1.5 ~ 6.0A
	51F-T	動作時限	1 ~ 1000sec
不足電圧 (27F)	27F-V	停電検出	50 ~ 90V
	27F-T	動作時限	0.1 ~ 5.0sec
過電圧 (59F)	59F-V	回生時欠相検出	120 ~ 150V
	59F-T	動作時限	0.1 ~ 5.0sec

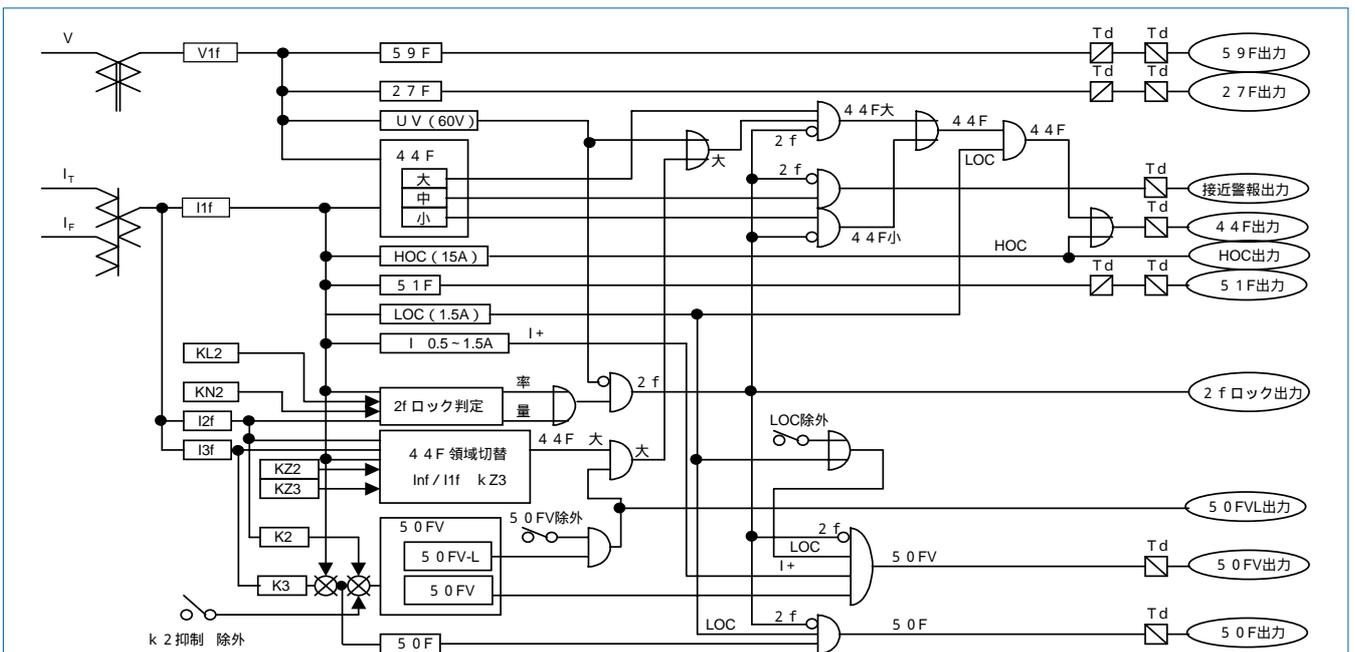


図7：試作品の交流き電保護デジタル継電器仕様

5 試験結果

交流き電方式にはATき電方式およびBTき電方式の二種類の方式がある。したがって、両方式区間で実用化するため、開発品の試験をATき電方式およびBTき電方式の両方式について長期フィールド試験と人工故障試験を行った。

5.1 ATき電区間人工故障試験結果

実施日 : 1999年12月22日 0:40~4:40
 実施場所 : 新熊谷変電所11回線
 実施系統 : 新鴻巣SPにて上下タイ、新熊谷SS12回線
 ATにてT-N短絡

目的 : 44F、50FVの正常動作確認
 50FVLによる44F保護領域選択動作確認
 励磁突流による不要動作の抑止要素として第2高調波含有率と含有量でどちらが適しているかの確認

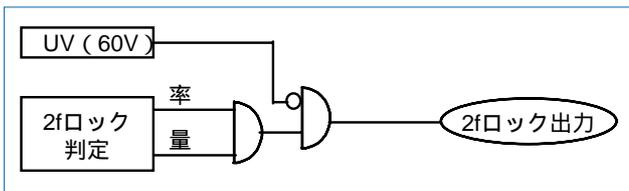


図8 : 出力抑止判定シーケンス

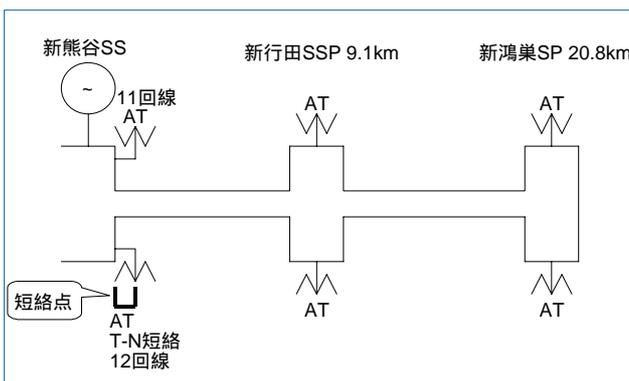


図9 : 新熊谷変電所人工故障試験き電回路構成

試験結果

(1) 図9に示す実際のATき電回路において人工的に故障を発生させ、44F、50FVが正常に動作するかを確認した。44F、50FVとも正常に動作した。第2高調波ロックによりトリップ出力しないケースもあり、ロック機能の確認もできた。第2高調波ロックを不足電圧(UV)リレーで解除する回路も正常に働いた。

- (2) 50FVL動作により44Fの大領域に切り替わることを確認した。
- (3) 第2高調波の含有量検出は事故電流の発生から消滅まで継続し、含有率は発生時と消滅時のみ検出するケースがあり、含有量でリレーロックすると、事故電流が大きくても第2高調波ロックがかかってしまうため、リレーロックは含有率で行うことが適していることを確認した。
- (4) 電圧の立ち上りに時間がかかったため、不足電圧(UV)の復帰が遅れ第2次高調波による動作抑止を解除してしまい、50FVおよび44Fが不要動作してしまった。

5.2 ATき電区間フィールド試験結果

1999年12月~2000年3月に、実際の実負荷における故障監視状態でI形故障選択継電器と距離継電器の不要動作発生の有無を確認するため、新熊谷変電所の下り線11回線と上り線12回線を合成した電流値で長期フィールド試験を実施した。

フィールド試験中に各継電器の不要動作は発生しなかった。

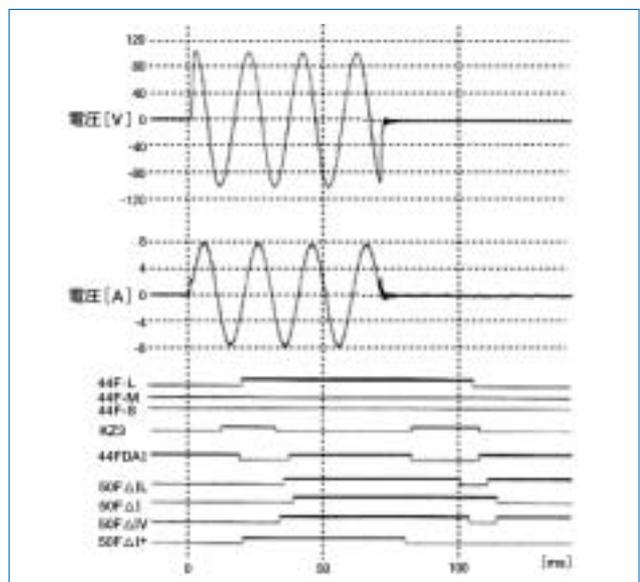


図10 : 新熊谷変電所人工故障試験結果

5.3 改修試験

実施日 : 2000年5月25日
 試験内容 : 新熊谷変電所人工故障試験時のデータを使用し、電圧・電流要素をデジタルリレーに印加したときの動作確認
 改修内容 : 新熊谷変電所で実施した人工故障試験時に

電圧の立ち上りに時間がかかり、不足電圧の復帰が遅れ50FVと44Fの不要動作が発生した。このため次のような改修を行った。50FVは電流値検出の継電器であるためUVによる第2次高調波抑止の解除を行わない。44Fの第2次高調波含有率による出力抑止の解除は、UVおよびLOC動作後にタイマ（30ms）を設けて行う。44Fを大特性にするルートはUVおよびLOCの動作で瞬時に大特性を選択させる。

シーケンスの変更部分を図11に示す。

改修前はUVの復帰遅れのため、第2次高調波含有率によるトリップ出力の抑止を解除してしまい、44F-Lが動作したが、改修後はトリップ出力はなかった。

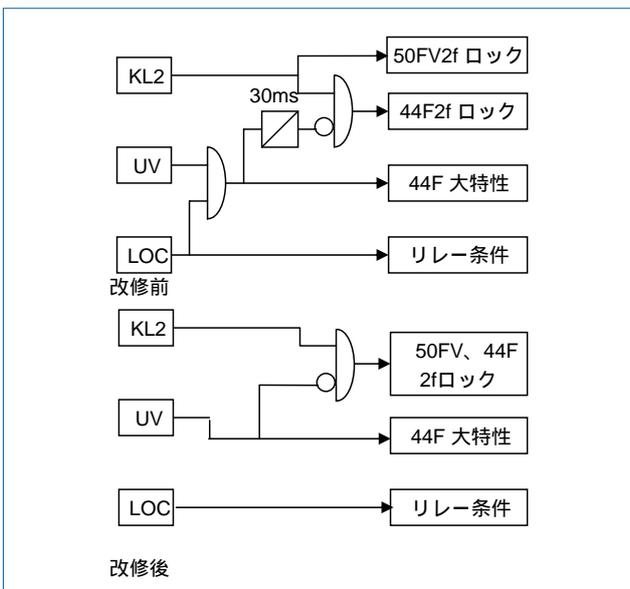


図11：シーケンス改修部

5.4 BTき電区間人工故障試験結果

- 実施日：2000年7月6日 1:50~3:50
- 実施場所：常磐線土浦変電所212回線
- 実施系統：牛久SPにてT-NF短絡
- 目的：44F、50FVの正常動作確認
50FVLによる44F保護領域選択動作確認

試験結果

図12に示すき電回路構成でBT区間の人工故障試験を実施した。人工故障試験の結果を図13に示す。44F、50FVのともに正常に動作することを確認した。また、50FVL動作により44Fが大領域に切り替わることも確認した。

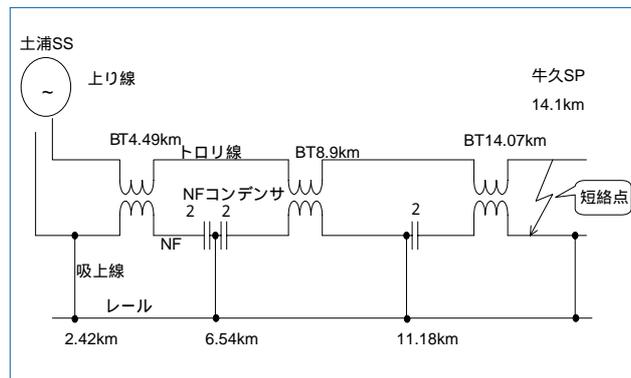


図12：土浦変電所人工故障試験き電回路構成

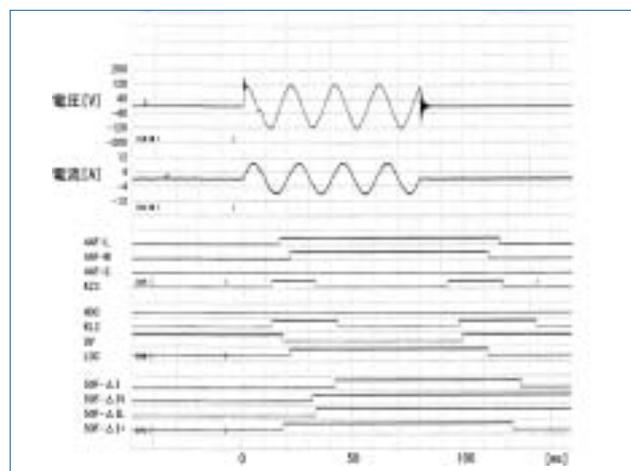


図13：土浦変電所人工故障試験結果

5.5 BTき電区間フィールド試験結果

2000年6月8日～7月5日において土浦変電所下り線211回線でBT区間のフィールド試験を実施した。

BTき電回路の線路インピーダンスはATき電回路に比べて4倍程度大きく、電気車負荷インピーダンス領域が継電器の保護領域に接近するため、考慮が必要となるが、フィールド試験中における不要動作は発生しなかった。

6 整定値

き電回路において電流が増加する要因は、き電回路の故障以外では、電車負荷力行中の電流増加、初き電時の励磁突入電流、切替セクションに力行電車が進入したことによる励磁突入電流がある。50FVの整定値はこれらの要因で動作せず、故障を検出するためなるべく小さい値にすることが望ましい。

力行による電流増加はVVVF制御車のE2系において500ms間で170A程度の増加であるため、力行電流による不要動作はない。

サイリスタ制御車については、電流波形に第3高調波

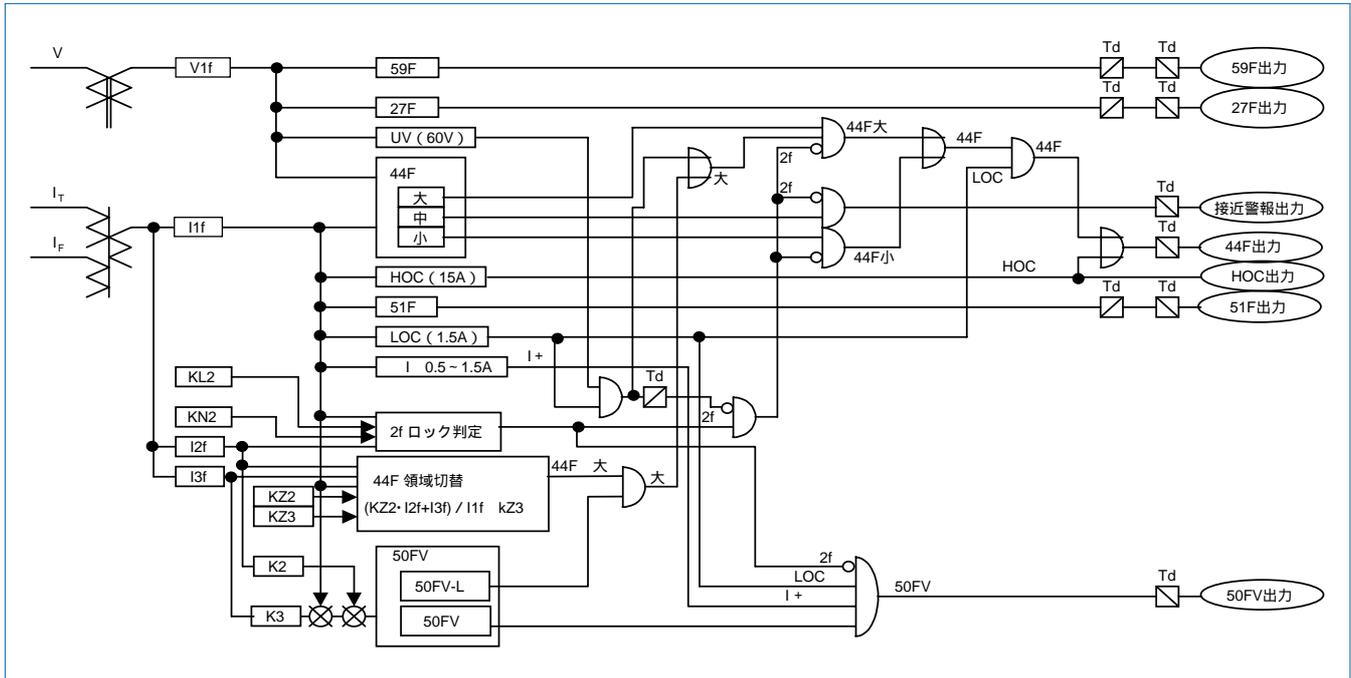


図14：実用器の交流き電保護デジタル継電器仕様

成分を多く含み、第3高調波により基本波の抑制を行っているため力行電流による電流変化は小さい。

初き電時のATへの励磁突入電流は第2高調波含有率が12%以上であるため出力を抑止しており（基本波成分に対して第2高調波が12%以上であると出力を抑止する）不要動作することはない。

切替セクションに力行電車が進入した時の励磁突入電流も第2高調波含有率により出力を抑止する。しかし、同一き電区間に他の力行車がいる場合や進入時の位相により第2高調波含有率が少なくなり、抑止がかからないおそれがある。したがって、50FVの不要動作を防ぐためには、切替セクション進入電車の負荷電流で動作しない整定とする必要がある。

最大負荷としてE4系16両編成を考えると、最大負荷電流は約750Aとなる。これをリレー系に換算すると、変電所電流は負荷電流の1/2となり、CT比は1500/5であるから、

$$750 [A] \times 1 / 300 \times 1 / 2 = 1.25 [A] \text{ となる。}$$

上りと下りの切替セクションに同時に進入電車がある場合でも、50FVの整定値を2.5Aとすると負荷電流による不要動作を防ぐことができる。

7 結論

今回開発した交流き電保護継電器は新形式車両の負荷電流で不要動作が発生せず、従来の保護継電器に比べて故障検出感度が向上することが確認できた。また、継電器をデジタル化することにより保護盤が小さくなり、設置スペースの縮小化が図れた。今回の開発の過程で改修を行い実際に導入する最終の保護連動シーケンスを図14に示す。

現在、新幹線ではCOSMOS（変電）更新工事として変電所の配電盤の取り替え工事を行っているが、この更新工事に合わせて、順次今回開発した高感度交流き電保護継電器を導入していく。

在来線については、配電盤の更新時期にともない導入を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 渡辺 寛、持永芳文：鉄道技術研究所速報「高調波抑制形 I 形故障選択装置の開発」鉄道技術研究所、No.78-1001、pp.31、1978年2月