

異周波混触現象の解析

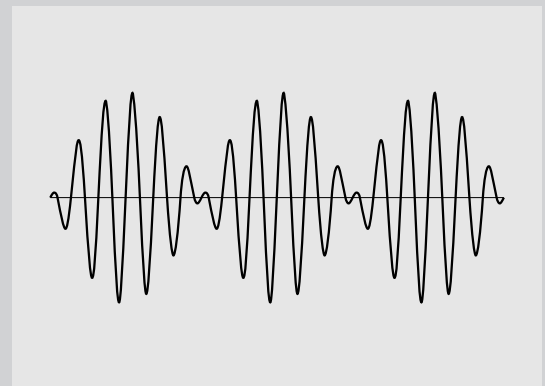
交流電気鉄道，き電回路，保護継電器，50/60Hz，シミュレーション

* 植田喜延 Yoshinobu Ueda

** 衛藤憲行 Noriyuki Eto

概要

50Hzと60Hzのように異なる周波数の電力が混触すると、図に示すようなビート状の大電流が流れる。北陸新幹線は50Hzと60Hzの電力供給区間が混在するために、当社は既に営業区間向けに異周波混触保護継電器を開発し、納入している。北陸新幹線の延伸工事にあたり、系統容量の差異による混触事故検出時間及び整定値への影響と、一層の検出時間の短縮可能性を検討することを目的として、異周波混触保護継電器のシミュレーションモデルを構築し、延伸区間における混触事故検出特性と、検出時間の短縮の可能性についてシミュレーションによる検討を行った。



混触事故電流波形

1. ま え が き

北陸新幹線は高崎で上越新幹線と分岐し、長野・富山・金沢を経て、大阪に至る整備新幹線である。この内、高崎～長野間については既に営業開始しており、現在金沢までの延伸工事が行われている。北陸新幹線では、50Hzと60Hzの電力供給区間が混在しており、異なる周波数の電力が混触するとビート状の大電流が流れることから、これに対応した保護が必要される。

当社は高崎～長野間の工事において、混触電流特有の周波数を検出する方法、及び相手方変電所の周波数成分を検出する方法による、異周波混触保護継電器⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を開発し、納入した。

本稿では、延伸区間における異周波混触保護継電器の適用において、系統容量の差異による混触事故検出時間及び整定値への影響と、一層の検出

時間の短縮可能性を検討することを目的として、電力系統瞬時値解析用ソフトウェアであるPSCAD/EMTDC上に異周波混触保護継電器モデルを構築し、異周波系統間の混触事故に関するシミュレーション検討を行った結果を紹介する。

2. 異周波混触保護継電器

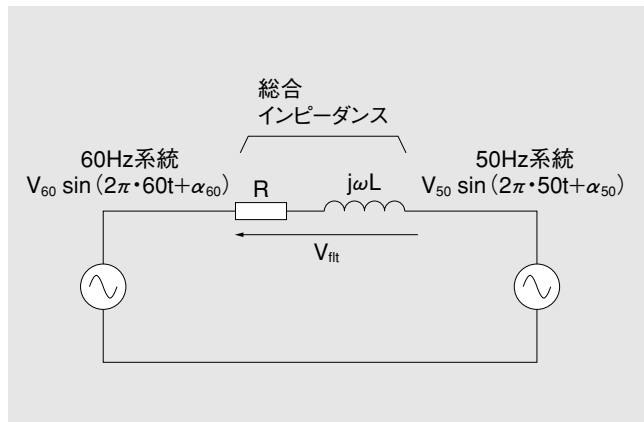
2.1 異周波混触検出の原理

50Hzと60Hzの異周波電力が混触しているき電回路を簡略化すると、第1図のように表すことができる。簡単のために $V_{50}=V_{60}=V$ 、 $\alpha_{50}=\alpha_{60}=0$ とすると、異周波電源間のインピーダンスにかかる電圧 V_{it} は式(1)となり、55Hzの波形が0.1秒周期で強弱を繰り返すビート状の電流が流れる。

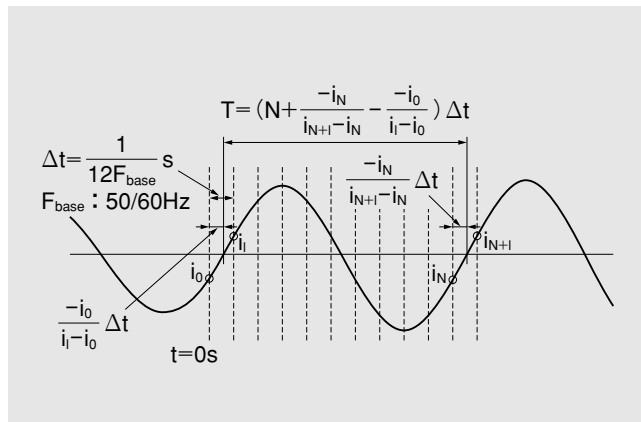
$$V_{it} = 2V \cos(2\pi \cdot 55t) \cdot \sin(2\pi \cdot 5t) \dots\dots\dots(1)$$

異周波混触保護継電器では、①電流の周波数を

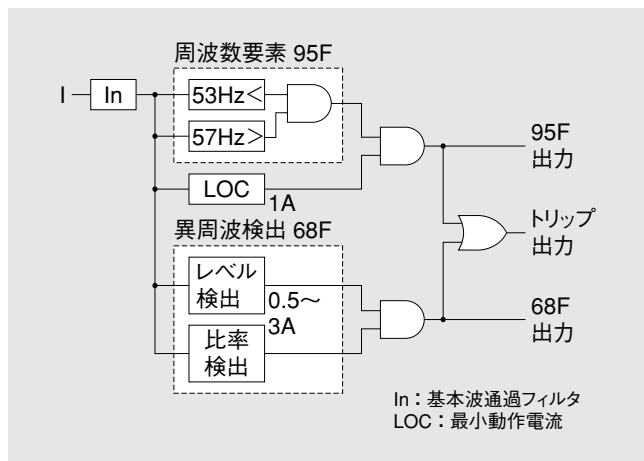
*エネルギーシステム技術部 **電鉄技術部



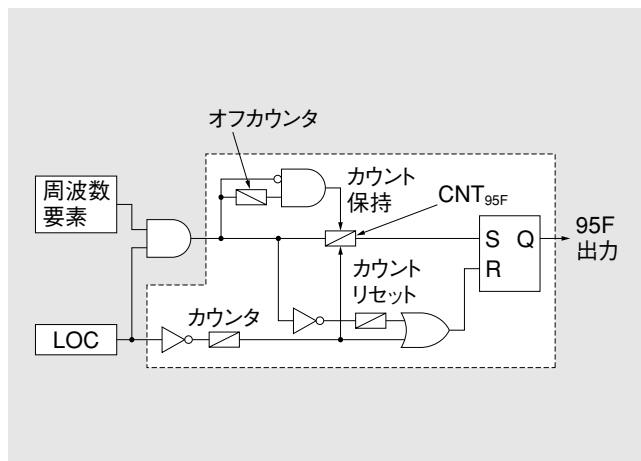
第1図 異周波混触回路の簡略図
60Hz（左側）と50Hz（右側）の電源系統が混触している状態の回路を示す。



第3図 1サイクル時間の演算方法
基本周波数の30°サンプリングした電流値から1サイクルに要する時間を求める。



第2図 異周波混触保護継電器のブロック図
電流55Hz成分の有無による検出部（95F）と、相手側変電所の周波数成分の電流成分による検出部（68F）を組み合わせて異周波混触を検出する。



第4図 95F判定カウンタ回路
電流55Hz成分を一定回数連続判定にした場合に95Fを判定するが、ビート状電流の谷において判定回数のリセットを防止するオフカウンタを備えている。

演算して、異周波混触時に発生する55Hz成分の有無により検出する方法と、②ビート状の電流を自変電所の周波数成分とそれ以外の成分に分離して、相手側変電所の周波数成分の電流レベルによって検出する方法を組み合わせている。詳細は次項に示す。

2.2 異周波混触保護継電器の構成

第2図に異周波混触保護継電器のブロック図を示す。55Hz成分を検出する要素（95F）及び95Fの最小動作電流を検出する要素（LOC）と、相手側変電所の周波数成分のレベルと混触比率を検出する要素（68F）からなっている。95Fの動作範囲は53～57Hz固定であり、LOCは1.0A、68Fの動作電流の整定範囲は0.5～3Aである。

95Fの検出原理を以下に述べる。入力電流を基本周波数（50又は60Hz）に対して30°間隔でサン

プリングし、1サイクルに要する時間を、零クロス時点前後のサンプル値から直線近似することで求める。第3図に1サイクルの時間演算方法を示す。1サイクルの時間の逆数から周波数を演算し、動作周波数範囲であることと、入力電流がLOC以上であることのAND条件により混触を判定する。実際には瞬時の電流擾乱による不要動作を防ぐために、周波数及びLOCの判定を負→正及び正→負の零クロスごと（1/2サイクルごと）に行い、第4図の破線内に示すカウンタ回路（CNT_{95F}）によって一定回数以上連続判定した場合に95Fが動作する。また、0.1秒周期のビートの谷においては、55Hz成分が抽出しにくくなり、且つ電流レベルも低下するために、連続判定のリセット回路にオフカウンタを設けている（第4図）。

次に、68Fの検出原理を述べる。式(2)の通り、

入力電流に基本周波数とそれ以外の成分が混在している場合に、入力電流とその基本周波数1サイクル前の値との差分をとると、基本周波数成分を除去することができる。異周波混触保護継電器においては、基本周波数の30°間隔でサンプリングし、12サンプル前の値との差分を取ることで、基本周波数成分を除去している。

$$\begin{aligned}
 & I \sin(2\pi ft + \alpha) + I' \sin(2\pi f't + \alpha') - \\
 & \left\{ I \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{1}{f} \right) + \alpha \right] + \right. \\
 & \left. I' \sin \left[2\pi f' \left(t - \frac{1}{f} \right) + \alpha' \right] \right\} \\
 & = 2I' \sin \left[\frac{f'}{f} \right] \pi \cos \left[2\pi f' \left(t - \left[\frac{1}{2f} \right] \right) + \alpha' \right] \dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

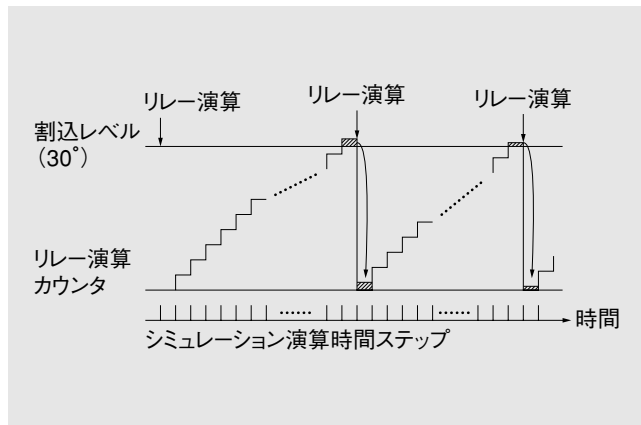
基本周波数成分を除去した電流は、混触事故における相手側変電所の周波数成分に相当するので、入力電流の相手側変電所周波数成分の実効値 (I_{68F}) が動作レベル以上且つ基本周波数成分除去前の実効値に対して一定の比率以上である場合に混触と判定する。この判定を基本周波数の90°ごとに行い、一定回数以上連続判定すると68Fが成立する。

95Fと68FのOR条件が異周波混触保護継電器の動作条件となる。すなわち、95Fと68Fのいずれか早い方により動作する。

3. シミュレーションモデル

シミュレーション環境として、混触事故の模擬を容易に行うことができる電力系統瞬時値解析用ソフトウェアPSCAD/EMTDCを用いた。

In以降の検出部については、基本周波数に対して30°間隔で演算を行うので、50Hz系では600Hzサンプリング、60Hz系では720Hzサンプリングとなる。50Hz、60Hzが混在したき電回路において、等時間間隔のシミュレーションでこれらを同時に満足するためには、3600Hzの整数倍でサンプリングを行う必要があるが、将来様々な現象に対する解析を実施する際においても、サンプリング時間に関して制約が生じないように、**第5図**に示す通り時間カウンタを準備して、基本周波数に対して30°に相当する時間を超えるごとにリレー演算を行い、時間カウンタを30°分戻すことで次のカウンタの初期値に超過した時間をバイパスする方式を採用した。



第5図 リレー演算カウンタ
50/60Hz用のリレー演算を並行して行うためのカウンタの動作を示す。

第1表 回路インピーダンス

シミュレーションに用いた回路インピーダンスの組み合わせを示す。

系統条件	周波数 (Hz)	インピーダンス (Ω)	
		上位・変圧器	き電線
容量最小	60	j14.1	10.2+j35.7
	50	j18.4	10.6+j30.8
容量最大	60	j13.7	13.5+j47.2
	50	j17.3	0.7+j2.3
60Hz容量大	60	j13.7	13.5+j47.2
	50	j18.4	0.7+j2.3
50Hz容量大	60	j14.1	10.2+j35.7
	50	j12.6	10.6+j30.8

4. シミュレーション検討

4.1 北陸新幹線延伸区間における継電器動作時間の評価

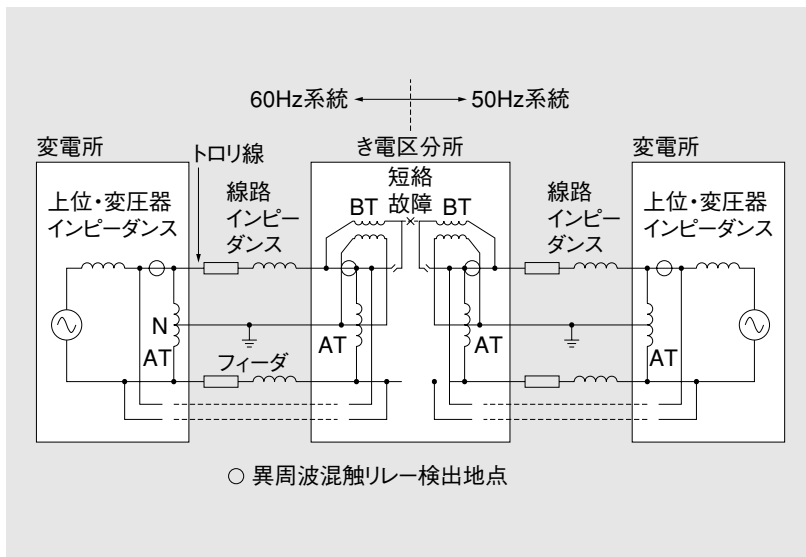
北陸新幹線延伸区間には、50Hzである新上越変電所 (SS) を挟んで、60Hzの新長野SSと新黒部SSが位置している。延伸区間における系統インピーダンスの違いが継電器動作時間に与える影響を評価するために、営業区間と同一の保護継電器整定 (68F整定0.5A) でシミュレーションを実施した。

系統条件として上位及び変圧器インピーダンスと、き電線のインピーダンスを模擬する地点に応じて変更した。更に各SSの上位インピーダンスに最大値と最小値があるので、回路の組み合わせとしては8通り考えられるが、簡単のため**第1表**にインピーダンスを示した4通り (系統容量最小、系統容量最大、60Hz容量大、50Hz容量大) について評価した。

第6図にシミュレーションに使用した回路を示す。本シミュレーションにおいては、き電区分所(SP)付近の50Hzと60Hzのトロリ線が併架された箇所におけるトロリ相間の金属短絡故障を想定した。本シミュレーションでは、混触事故発生時の60Hz系の位相を50Hz系に対して30°間隔で進めていき、両系統のSS及びSPでの95Fと68Fの動作時間を調べた。

第7図に系統容量最小のケースで時刻0.2秒に位相差0°で混触事故を発生させた場合の、50Hz側SSにおける電流波形と継電器動作の様子を示す。上のグラフが300：1のCT比を掛けた電流波形で、下のグラフの内、四角でマーキングされた線が95F

の、三角でマーキングされた線が68Fの動作を示す。それぞれ事故発生から65ms及び130msで動作している。第8図に系統容量最小のケースで混触発生時の位相差を変化させた場合の、各SSにおける95Fと68Fの動作時間を示す。68Fは位相差による動作時間の変化があまりないが、95Fは最短の動作時間は68Fよりも小さいものの、位相差による動作時間の変化が大きかった。評価条件は異なるが、この傾向は過去に実施された保護継電器の工場試験結果と同様であった。また、他の系統構成についてもシミュレーションを実施した結果、いずれも動作時間はおよそ50~120msであり、系統容量最小のケースが最も長かった。

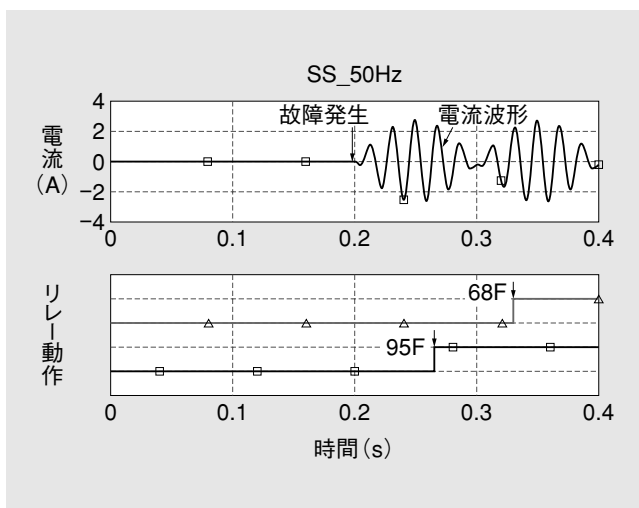


第6図 シミュレーション回路
50/60Hz異周波混触現象の検討に用いたシミュレーション回路を示す。

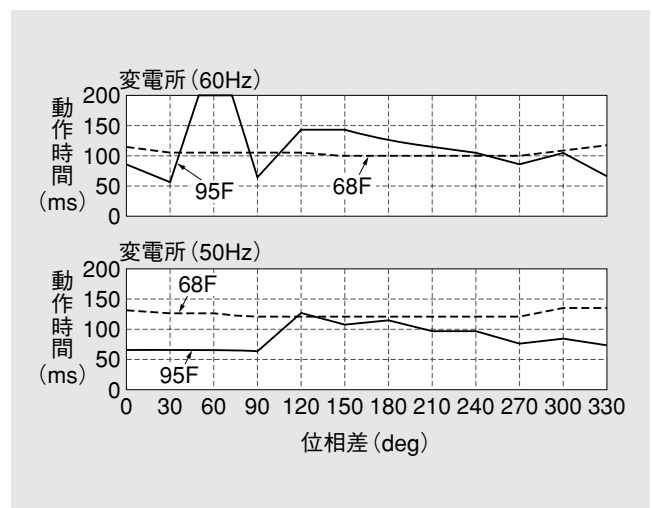
次に、混触箇所の事故抵抗が高く事故電流が少ない場合における、68Fの動作特性を評価するために、系統容量最小の60Hz側SSにおける68Fにおいて検出される電流実効値 (I_{68F}) と68F動作時間の関係を第2表に示す。事故抵抗が高くなるにつれて I_{68F} は減少すると共に68F動作時間が長くなり、事故抵抗が40Ωとなると I_{68F} が整定値である0.5Aを下回り動作しなくなる。

4.2 継電器動作時間短縮に関する検討

前項で示した通り、異周波混触時のリレー動作時間は最大120msであり、事故電流の他周波数成分が68Fの整定値に近い場合には更に時間を要する。



第7図 混触時電流波形と継電器動作例
混触事故発生時のビート状の電流波形と95F及び68Fの動作時間を示す。



第8図 継電器動作時間の混触時位相差特性
68F(破線)は混触事故発生時の位相によらず動作時間ほぼ一定であるのに対して、95F(実線)の方が最短の動作時間は短いものの位相に動作時間が変化が大きい。

ここでは、検出口ジックの変更を必要としない動作時間の短縮方法として、95Fについては第4図中のカウンタ回路(CNT_{95F})、68Fについても類似のカウンタ回路(CNT_{68F})の回数を低減して動作時間の評価を行った。系統構成は、動作時間が最も長い系統容量最小とした。

第3表にカウンタ回数と動作時間の関係を示す。既設のリレーでは、CNT_{95F}は4(2サイクル)、CNT_{68F}は22(5.5サイクル)である。それぞれ2分の1、3分の1のCNT_{95F}=2(1サイクル)、CNT_{68F}=7(1.75サイクル)とすることにより最大動作時間を60msまで短縮することができる。なお、他の検出点においても同様の傾向を示し、動作時間は60ms以内であった。

第2表 事故抵抗と68F動作時間の関係

事故抵抗が大きくなることにより68Fの検出電流が減少し、動作時間が長くなることを示す。

事故抵抗 (Ω)	I _{68F} (A)	動作時間 (ms)
<0.1	1.02	112.5
1	1.01	112.5
2	1.00	112.5
5	0.96	112.5
10	0.88	112.5
15	0.79	116.7
20	0.71	116.7
25	0.67	116.7
30	0.58	120.8
35	0.52	125.0
37	0.50	125.0
40	0.48	—

第3表 カウンタ回数と動作時間の関係

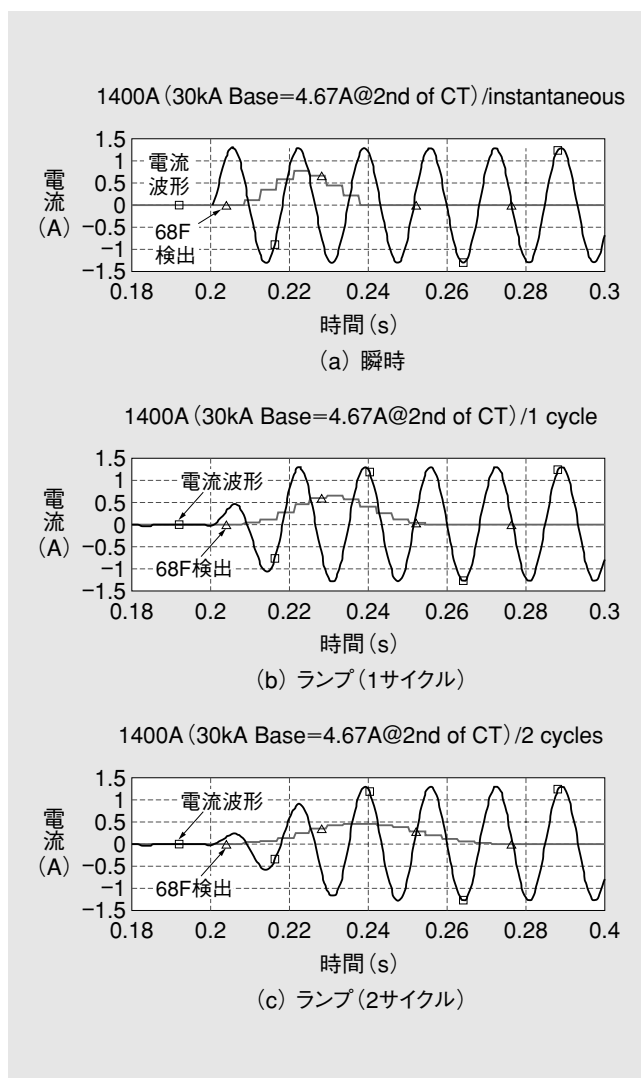
カウンタの回数を減らすことによりリレー動作時間が短くなることを示す。

リレー種別	カウンタ回数(サイクル)		動作時間 (ms)	
	CNT _{95F}	CNT _{68F}	Min.	Max.
95F	4 (2)	—	63.3	126.7
	3 (1.5)	—	55.0	116.7
	2 (1)	—	45.0	108.3
68F	—	22 (5.5)	120.0	135.0
	—	10 (2.5)	60.0	75.0
	—	8 (2)	50.0	65.0
	—	7 (1.75)	45.0	60.0
95F or 68F	4 (2)	22 (5.5)	63.3	120.0
	3 (1.5)	10 (2.5)	55.0	75.0
	2 (1)	10 (2.5)	45.0	66.7
	2 (1)	8 (2)	45.0	65.0
	2 (1)	7 (1.75)	45.0	60.0

カウンタを短縮した場合、混触事故以外の事象での不要動作が懸念される。特に、68Fについては基本周波数の電流変化も検出する可能性があるために、次の2つの事象に関して不要動作の有無を検証した。

4.2.1 負荷変動に対する不要動作の評価

負荷を模擬した抵抗の抵抗値を瞬時~33ms(60Hz系統での2サイクル相当)で、1MΩから30kVベース1400A(60kV系統に設置された300:1 CT 二次側で2.3A)に相当する21.4Ωに変化させたシミュレーション波形の例を第9図に示す。四角でマーキングした線がSSにおける電流波形で、三角でマーキングした線が68Fにおいて検出される電流実効値である。負荷電流は上下線に分流して流れ、更に線路インピーダンスの影響もあるために、想定の1/2をやや下回る0.92Aの電流がCT二次



第9図 負荷電流変化と68F検出の関係

負荷電流の立ち上がりが緩やかになるにつれて68Fにおける検出電流のピーク値が下がることを示す。

第4表 負荷立ち上がりによる68F整定値超過時間

負荷電流変化の68F整定値に対する倍率と立ち上がりサイクル数に対する整定値超過時間を示す。

電流比率 (対68F整定)	電流立ち上がり時間 (cycle)				
	1	2	3	4	5
1	—	—	—	—	—
2	0.58	—	—	—	—
3	0.94	0.82	—	—	—
4	1.18	1.58	—	—	—
5	1.42	1.80	2.10	—	—
6	1.52	1.94	2.58	2.82	—

回路に流れる。68Fの検出 I_{68F} では、瞬時立ち上がりの場合ピーク電流が0.7A程度で3/4サイクルの間0.5Aを超過するが、立ち上がり時間が長くなるにつれてピーク値が下がり、立ち上がり時間が2サイクルを超えるとピーク電流は0.5Aを下回る。

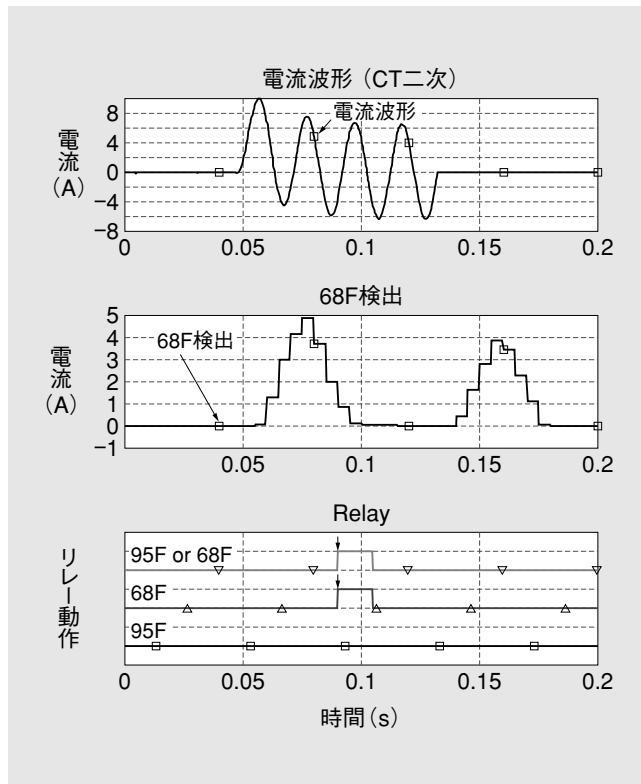
電流変化の68F整定値に対する倍率と立ち上がりサイクル数を変化させた場合において、 I_{68F} が整定値を超過する時間を評価した結果を第4表に示す。数値の入っていない欄は整定値に達しないことを示す。表中に斜字で示した通り、整定値の5倍の電流が2あるいは3サイクルで立ち上がると、1.8サイクルの間68F検出値が整定値を超過するので、 $CNT_{68F} = 7$ (1.75サイクル) とした場合に動作する可能性がある。一方、新幹線2編成同時進入(30kVベース1400A)時はCT二次電流が1.17Aとなり、既設整定値0.5Aの3倍未満のため、68Fは動作しないと考えられる。

4.2.2 AT励磁突入電流に対する不要動作の評価

更に厳しい条件と考えられる、ATの励磁突入電流を含んだ実測の電流波形をリレーに入力し、不要動作の有無を確認した。第10図に $CNT_{95F} = 2$ 、 $CNT_{68F} = 7$ でのリレー動作例を示す。95Fは動作しないが、68Fは不要動作することが分かる。一方、 $CNT_{68F} = 8$ であれば実測波形の4倍の入力電流に対しても不要動作は行わなかった。従って、 $CNT_{95F} = 2$ 、 $CNT_{68F} = 8$ が不要動作を避け得る最短の設定であり、動作時間は第3表から最大65msとなる。

5. む す び

50Hzと60Hzの電力供給区間が混在する交流電気鉄道における、異周波混触保護継電器のシミュレーションモデルを作成し、北陸新幹線延伸区間



第10図 電流実測波形を用いたリレー不要動作例

ATの励磁突入電流を含んだ実測の電流波形をリレーに入力し、68Fが不要動作した例を示す。

を想定したシミュレーションを実施し、系統容量や混触事故の位相差によるリレー動作時間への影響を評価した。

また、混触事故の検出時間短縮手法とそれによる不要動作の発生に関して評価を行い、既設の整定値におけるリレー動作時間に対して55ms短縮し65ms以内にできる見通しを得た。

最後に、本解析にご協力いただいた関係者の皆様に誌面をお借りして厚く御礼を申し上げます次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 持永, 久水, 八木, 加藤, 江本, 加藤: 「異周波混触保護継電器の開発」, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, 1995.8, No.30
- (2) 長谷, 久水, 加藤, 八木: 「異周波混触保護継電器の開発」, 第5回鉄道電気技術研究発表会, 1995, No.6
- (3) 長谷, 持永, 八木, 江本: 「交流電気鉄道用

50/60Hz異周波混触保護継電器の開発」, 電気学会
産業応用部門論文誌, Vol.138-D, 1998.7, No.7/8,
pp.930~935

《執筆者紹介》



植田喜延 Yoshinobu Ueda
電力品質ソリューションの企画・開
発に従事



衛藤憲行 Noriyuki Eto
電気鉄道システムのコンサルタン
ト・設計に従事

