# 高調波対策付新形保護継電装置の開発 Development of New Protective Relays with Improved Performance against High Harmonics

電力系統の事故時に発生する高調波は,ケーブル系統・調相用コンデンサなどの 適用拡大により増加の一途をたどっており,保護継電装置に対しても動作遅延など の悪影響を与えることが懸念されている。今回これらの問題に対処するため,実系 統の高調波解析を行ない,これに基づき,高調波対策付新形保護継電装置の開発を 行なった。

この論文では、実系統での高調波発生機構・発生量の解析を行ない、ケーブル系 統で第3~20調波、調相用コンデンサについて第2.5~3 調波が発生することを明ら かにし、保護継電装置の高調波対策の必要性と、各継電器の高調波対策の考え方を 明白にした。この結果に基づき、継電器入力部に非振動形の高精度アクティブフィ ルタを適用し、所期の高調波性能をもつ新形保護継電装置を開発した。また同時に 新形保護継電装置では、入力変成器として小形トロイダルコアを開発し、1 ボード 継電器を実現するとともに、装置の全IC化を図り、30%の小形化(当社従来比)を 図った。

久 保 隆 生*	Kubo Takao
岩谷二三夫*	Iwatani Fumio
牧野淳一**	Makino Jun'ichi
小野俊雄***	Ono Toshio

日 緒 言

最近,電力系統の重負荷に対する調相用コンデンサ,及び 超高圧地中ケーブル送電線は増加の一途をたどり,更に周波 数変換所などの電力用フィルタの設置も手伝って,系統事故 時に発生する電圧・電流高調波成分は著しく増大しており, しかも,その次数も基本波に近い第2~3調波近傍のものが 発生するケースが多くなってきている。

このような高調波の発生に対し、従来の静止形(トランジス タ形)保護継電装置は、その影響により特性ひずみを起こし、 動作遅延又は最過酷ケースでは誤不動作に至るおそれがある ことが明らかになってきた。

これらの問題点に対処するため,実系統の高調波発生機構 を解明し,発生量の解析を行ない,この結果に基づき高精度 アクティブフィルタを適用した高調波対策付新形保護継電装 置の開発を行なった。以下,その結果について述べる。

# 2 電力系統事故時の高調波解析

電力系統に事故が発生した場合,系統のインダクタンスL と調相用コンデンサ,又はケーブル送電線などの対地静電容 量Cに蓄えられたエネルギーの放電によって過渡振動が生じ, 基本波成分(50Hz又は60Hz)とは異なった高調波の周波数成分 が発生する。このような高調波の保護継電装置に及ぼす影響 を解明するため,ディジタル計算機によるシミュレーション 及び高調波の発生メカニズムを考慮したアナログ解析手法を 用いて高調波解析を行なった。特に,アナログ解析手法では 非整数高調波についても,発生量,周波数が比較的精度良く 解析でき,保護継電装置に対する影響を検討するのに有効な 手段といえる。このアナログ解析手法は,図1に示す一般的 なモデル系統の高調波が(1)式~(4)式で表わされることに着目

- ここに  $I_A$ : A 端から流入する高調波電流
  - wA:A端から流入する高調波電流の角速度
  - CA:A端背後の調相用コンデンサ容量
  - E:電源電圧
  - LG:A端背後の電源インダクタンス
  - *L<sub>A</sub>*: A端から事故点Fまでの送電線のインダクタンス
     *t*:時間

$$V_A = \omega_A^2 \cdot C_A \cdot E\left(\frac{L_G}{L_G + L_A}\right)^2 \cos \omega_A t \cdots (2)$$

ここに V<sub>A</sub>:A端での高調波電流 図1のB端での高調波

$$I_B = \omega_B \cdot C_B E \sin \omega_B t \cdots (3)$$



し解析したが、この結果は、ディジタル計算機によるシミュ レーション結果とよく一致した。 図1のA端での高調波(各定数は図1参照。)

図 | 超高圧ケーブル系統例 系統事故時,調相用コンデンサ $(C_A)$ や ケーブル送電線の対地静電容量 $C_B$ と系統のインダクタンス $L_G$ ,  $L_A$ ,  $L_B$ に蓄え られたエネルギーの充放電により高調波が発生する。

\*日立製作所大みか工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所那珂工場

768 日立評論 VOL. 61 No. 11(1979-11)



2	こに	$I_B$	:	B端から流入する高調波電流
		$\boldsymbol{\omega}_B$	:	B端から流入する高調波電流の角速度
		$C_B$	:	B端背後のケーブル送電線の対地静電容量
		$V_B =$	ω	$^{2}_{B} \cdot L_{B} \cdot C_{B} \cdot E \cos \omega_{B} t \cdots (4)$
Ξ	ここに	$V_B$	:	B端での高調波電圧
		$L_B$	:	B端から事故点Fまでの送電線のインダクタンス
		$\omega_A$	=	$1 / \sqrt{C_A \left( L_G \parallel L_A \right)}$
		$\omega_B$	_	$1/\sqrt{C_B \cdot L_B}$

以上のアナログ解析手法及びディジタルシミュレーション による実系統の高調波解析結果を図2~4に示す。これらの 解析結果から、ケーブル系統の対地静電容量による高調波は ほぼ次の(5)、(6)式で表わされることが明らかとなった。 電流高調波重畳率 $\eta i = 10n$  .....(5) 電圧高調波重畳率 $\eta v = 10n^2$  ....(6) ここに n = 高調波 数

また, 調相用コンデンサから発生する高調波はほぼ第2.5~ 第3高調波, 発生量は電流で2~6kA程度で, 事故点による 周波数の変化はほとんどない。図3にはディジタル計算機に よるシミュレーション結果の一例としてケーブル系統の高調 波波形の具体例を示す。

# 8 従来形継電器に対する高調波の影響



nと高調波重量率 $\eta$ にはほぼ一定の関係がある。

以上のような高調波の発生に対して、入力電圧・電流を方 形波に変換して位相比較を行なう直接位相比較原理の継電器 では、高調波による波形ひずみの影響を受けやすい傾向にあ る。その例として、図5に従来形距離継電器の高調波含有時 の応動を示すが、高調波の含有により、位相特性に *Δθ* の遅





図3 実系統の高調波発生例(計算値) ディジタルシミュレーション による高調波解析例を示す。

8

 0
 2
 4
 6
 8
 10

 高調波電流の大きさ IF (kA)

 図4
 調相用コンデンサによる高調波電流発生例(計算値)
 調相

 用コンデンサによる高調波は、ほぼ第2.5調波から第3高調波の間に分布し、事

 故点による周波数の変化はほとんどない。



電器の応動(距離継電器

れ又は進み方向の誤差を生ずるとともに、最大感度(60度又は 75度)上の整定値Zs付近では不動作の傾向となる。図6に第 3高調波を電流に10%、電圧に30%重畳させたときの位相特 性の具体例を示すが、高調波の発生量が更に増加した場合、 位相比較のための方形波が波形割れを生じ継電器としては不 動作の傾向となる。

#### 4 新形保護継電器の高調波対策

以上のような従来形継電器の問題点を解決するため,高性 能アクティブフィルタを使用した高調波対策付新形保護継電



装置の開発を行なったが、これに先だち各種継電器の高調波 対策の考え方を明らかにした。

# 4.1 高調波対策の考え方

保護継電器の高調波対策を実施するに当たっては、各継電 器の整定条件から高調波に対する許容誤差の制約を受ける。 このため, 各種継電器の整定条件から許容誤差の検討を行な い,その高調波対策の考え方を表1に示すように決定し,高 調波影響に対する目標性能とした。またこのときの高調波発 生条件としては、先の高調波解析の結果図2、3に基づき、 第3高調波電流30%, 電圧90%重畳の最も厳しいと想定され る条件を設定した。なお、調相用コンデンサからの高調波は 第2.5調波と更に低次の高調波が発生するが、高調波の発生量 が比較的少なく、保護継電器への厳しさは、第3高調波電流30 %重畳とほぼ同程度とみなすことができる。

# 4.2 アクティブフィルタの構成と性能

保護継電器の高調波対策を行なうに当たっては、動作時間 特性を阻害せず, また系統事故発生及び除去時の過渡現象の 影響を受けないよう十分な配慮が必要である。このため、高 調波対策付新形保護継電器で、周波数特性及び過渡特性の十 分な検討を行ない、ローパスフィルタ2段+バンドパスフィ ルタ1段構成の高精度アクティブフィルタを適用した。図7, 8にその構成、周波数特性及び過渡特性を示す。特に、2入

従来形モー特性距離継電器高調波特性例(実測値) × 6 高調波 を非同期で重畳した場合の特性を示す。図5で説明した傾向が顕著に表われている。

力の位相比較を行なう直接位相比較形継電器では高精度の均 一な特性を必要とするため、フィルタの構成素子は精密級の ものをデバッギングして使用し,高精度・高信頼性のフィル タを実現した。図8の過渡特性からも明らかなように、フィ ルタ出力 V3 は非振動減衰となっており、これを適用した距離 継電器で、オーバリーチが数パーセント以下の極めて少ない安

9

#### 770 日立評論 VOL. 61 No. 11(1979-11)

# 表 | 新形保護継電装置(K5シリーズ)の高調波対策の考え方 各種継電器の整定条件から高調波 に対する許容誤差が決定される。

No.	デイバスNo.	名 称	特性	整定の考え方	高調波対策の考え方	高調波対策の説明
1	44SI	短絡方向 距離継電 器	X $\theta$ $\theta$ R	<ul> <li>(1)保護区間インピーダンスZ1の300%程度以上 Zs&gt;3Z1</li> <li>(2)次区間の遠端事故の後備保護を行なうため、150%(自区間+次区間)以上の整定を考え、</li> <li>              Z1 Z<sup>2</sup>             J2s&gt;1.5(Z1+Z2)      </li> </ul>	高調波含有率30%(at f <sub>3</sub> )で 最大感度θ上 でリーチ誤差-15%以内とする。 (高調波含有時のリーチZs=(1-0.15)Zs =0.85Zs)	<ul> <li>(1)保護区間インピーダンスZ1がリーチ の40%以内に入ることを目標に, Z1/Z's=Z1/(1-0.15)Zs=Z1/ (1-0.15)×3Z=0.39&lt;40%</li> <li>(2)高調波含有時Z's&gt;(Z1+Z2)になる ことを目標に,Zs=(1-0.15)Zs= 1.275(Z1+Z2)&gt;(Z1+Z2)</li> </ul>
2	44G1	短絡方向 距離継電 器	x $Zs$ $R$	44SIと同一の考え方に下記零相補償を行 なわないためのアンダリーチを考慮し、 $Z_{s} > (1.6 \sim 2) \times 3Z_{1} = 5 \sim 6Z_{1}$ 零相補償の考え方 $Z_{1} = \frac{V_{a}}{I_{a} + 3kI_{0}} = \frac{V_{a}}{(1+k)} = \frac{V_{a}}{(1.6 \sim 2)I_{a}}$	同上	同上
3	44SX	短絡距離 継電器	X Zs -01	保護区間インピーダンスの80~85%程度 の整定を考え, Zs=(0.8~0.85)Z1	高調波含有率30%(at f <sub>3</sub> )で,最大感度θ上 でリーチ誤差-15%以内とする。 (高調波含有時のリーチZs=(1-0.15)Zs =0.85Zs)	高調波含有時, 整定インピーダンスZ's が保護区間の60%程度以上になることを 目標に, Z's=(1-0.15)Zs=(1-0.15) ×0.8Z1=0.68Z1
4	44GX	地絡距離 継電器	同上	保護区間インピーダンスの70~75%程度 の整定を考え, Zs=(0.7~0.75)Z1	同上	高調波含有時,整定インピーダンス $Z$ 's が保護区間の60%程度以上になることを 目標に, $Z$ 's=(1-0.15) $Z$ s=(1-0.15) ×0.7 $Z$ 1=0.60 $Z$ 1
5	78	各相位相 比較キャ リヤ継電 器	Juliu Oran	<ul> <li>(1) <i>I</i><sub>LH</sub>レベルは最小事故電流<i>I<sub>F</sub></i>に対し <i>I<sub>F</sub></i>&gt;(1.5~2) <i>I</i><sub>LH</sub>, また内部充電電流 <i>I<sub>C</sub></i>に対し <i>I</i><sub>LH</sub>&gt;<i>I<sub>C</sub></i>とする。</li> <li>(2) <i>I</i><sub>LL</sub>レベルは内部2φ-S時の流出電流 <i>I<sub>SO</sub></i>に対し, <i>I<sub>LL</sub>&gt;I<sub>SO</sub></i>とする。また <i>I<sub>LH</sub></i>と協調をとり, <i>I<sub>LH</sub>&gt;</i>1.4<i>I<sub>LL</sub></i>とする。</li> </ul>	(1) $I_{LH}$ レベルは高調波含有率30%(at $f_3$ ) で誤差+15%以内 (2) $I_{LL}$ レベルは非電源端より流入する 電流 $I_{LL}$ をレベルに引っかけないよう, $I_{LL} > \alpha I_F$ (フィルタによる減衰率 を $\alpha$ とする。)	高調波含有時の感度低下があっても動作 時間遅延が少なくなるよう <i>ILH</i> <1.3 <i>IF</i> 程度とするため, <i>IH</i> =(1-0.15) <i>ILH</i> <1.5 <i>IF</i> より <i>ILH</i> <1.27 <i>IF</i> (高調波含有時の位相誤差は±5以内 とする。)
		调雷油		事故電流1Fがタップ値1Tに対し	第5高調波で, 整定値の3倍以上で動作	タップ値の150%電流で動作復帰とも15 ms以下と高速であり、ストッパとしての





図7 アクティブフィルタの構成と周波数特性(距離継電器用) 第3高調波で-19dBの減衰特性を実現している。



注:略語説明 V1, V2, V3(各フィルタ出力電圧)

図8 アクティブフィルタの過渡応答例(距離継電器用) 安定した。 た過渡特性を得るため、フィルタ出力V3は非振動減衰特性とした。

定した過渡特性を得ることができた。なお,周波数特性については,表1の目標性能を満足させるため,第3高調波で-19dBの減衰特性とした。

4.3 新形継電器(K5シリーズ)の高調波性能

10

また特に,新シリーズの継電器では,高調波対策用アクティ ブフィルタの前段ですべてのベクトル演算処理を行なうこと を基本思想として取り入れ,大電流域でも安定した直線性が 得られるよう配慮した。

以上の検討結果に基づき、高精度アクティブフィルタを適 用した高調波対策付新形保護継電器シリーズ(K5シリーズ) の開発を行なった。図9に距離継電器の回路構成例を示すが、 極性回路及び測距回路にアクティブフィルタの適用を図って 高調波対策を行ない、また極性回路についてはアクティブフィ ルタにメモリ効果をもたせ、至近端事故対策も兼ねている。 AND 出力27msの高速動作(50Hzベース)を実現している。

図12に同様な高精度アクティブフィルタを適用した各相位 相キャリヤリレーの動特性試験結果を,従来品(高調波対策な し)との比較で示す。従来品ではB端送信波形にみられるとお り高調波の影響により60msに動作時間が遅延しているが、ア クティブフィルタを適用したK5新シリーズの継電器では20ms と所期の目標性能(1.5Hz, 30ms以下)を十分満足しており、 高調波対策の効果が顕著である。





図9 新形継電器の回路構成(距離継電器の例) 高調波対策用アク ティブフィルタの前段でベクトル演算処理を行ない,大電流域でも安定した直 線性が得られるよう配慮してある。

図10 新形モー特性距離継電器高調波特性例 第3高調波重畳時最 大感度(75度)上のアンダリーチ9%を実現しており,目標性能15%以下を満足 している。





図|| 新形距離継電器の高調波重畳時の動作例 第3高調波重畳時 でもOR出力17ms, AND出力27msの高速動作を実現している。

27ms

-

図12 新形位相比較継電器の高調波重畳時の動作例(各相位相比較 キャリヤリレー) 高調波対策用フィルタなしの場合,送信波形(B端)が 高調波の影響を受け60msに動作遅延している。

11



(a) 従来形継電器の構成



図14 新形継電 器の構成 入力変成器をトロ イダルコア形とし, パッケージ搭載を 可能とした。



図13 継電器のハードウェア構成の改良 トロイダルコアの開発により、入力変成器が電子回路部品とともにパッケージ搭載が可能となり、 ーボード(ーパッケージ)継電器の実現が可能となった。



# 5 新形継電装置の装置構成

### 5.1 継電器単体のハードウェア構成

高調波対策付新形保護継電器の開発に当たっては、高調波 性能の向上に合わせ、継電器単体ハードウェアについても種 種の改良を行なった。まず入力変成器については、従来形で は図13(a)に示す外鉄形 EIコアを使用していたため、ハード ウェア的に占める体積も大きく、その自己負担も継電器全体 の50%程度を占めていた。このため、今回磁気材料の見直し を図るとともに、内鉄形トロイダルコアを開発し適用した。 このトロイダルコアでは、磁気材料の改善とともにコア全体 に対し、一次コイル、二次コイルを均一に分布させて巻くた めに、従来形の外鉄形 EIコアに対し次のような特長をもつ。 (1) 実効透磁率を1.5倍に向上できる。

- (2) 入力変成器間の磁気誘導を<u>1</u>00に低減できる。
- (3) 入力変成器負担を20~30%に低減できる。
- (4) 占有体積を50%程度に低減できる。

12

(5) 入力変成器のプリント板搭載が可能である。

以上のような特長をもつ入力変成器の開発・適用により、 新シリーズの継電器単体のハードウェア構成を図13(b)に示す ように改良した。すなわち、従来形では、外鉄形EIコアを使 用していたため、電子回路部品用のパッケージとは別に入力 変成器用フレームを設け、継電器外ケースに収納していたの に対し、新K5シリーズでは、小形の内鉄形トロイダルコア 採用により、入力変成器が電子回路部品とともに1枚のパッ ケージに搭載することが可能となり、1ボード(1パッケージ) 図15 新形保護 継電装置の構成 (220kV標本量位 相比較キャリヤ リレー装置の例) 継電器単体を単要 素・単機能構成と し,装置もブロッ クビルディング方 式の盤構成とし, システム信頼性を 向上させた。

コアを採用するとともに、装置の全IC化を図り、入力変成 器負担を従来の20~30%(当社比)に低減するとともに、30% (当社比)の盤面縮小を図った。また、継電器の1ボード化(1 パッケージ化)に合わせ単要素・単機能構成として取扱い時、 保守時及び試験時の便宜を図るとともに、これらの継電器を 組み合わせたブロックビルディング方式の盤構成としてシス テム信頼性を向上させ、予備品との交換なども容易にした。 また、ブロックビルディング方式を採用することにより、あら ゆる保護方式の構成も簡単にでき、方式変更に対する柔軟性 をもたせた。

また継電器単体を全シリーズ統一し,超々高圧系統から高 圧系統まで一貫したシリーズの継電器が適用できるようにした。

# 6 結 言

以上,高調波対策付新形保護継電装置の高調波性能,過渡特性及び装置の構成について説明したが,この開発により,

ケージに搭載することが可能となり、1ボード(1パッケージ)
継電器を実現した。図14に実際の新シリーズ継電器の構成を
示す。
5.2 保護継電装置の構成
高調波対策付新シリーズの継電器を使用した保護継電装置
の構成例(275kV各相位相比較キャリヤリレー装置)を図15に
示す。この装置では、継電器単体の入力変成器にトロイダル

特性及び装置の構成について説明したが、この開発により、 超々高圧から高圧系統に至るまでの一貫した新形保護継電装 置を完成することができた。この新形保護継電器シリーズの 開発により、あらゆる電圧階級、保護方式に対応できる継電 装置を実現することが可能となった。 最後にこの開発に当たり、終始御指導・御協力をいただい た電力会社の関係各位に対し、深く感謝する次第である。