

技術解説

系統連系のコストダウンに役立つ単独運転検出装置 - その役割と技術開発の流れ -

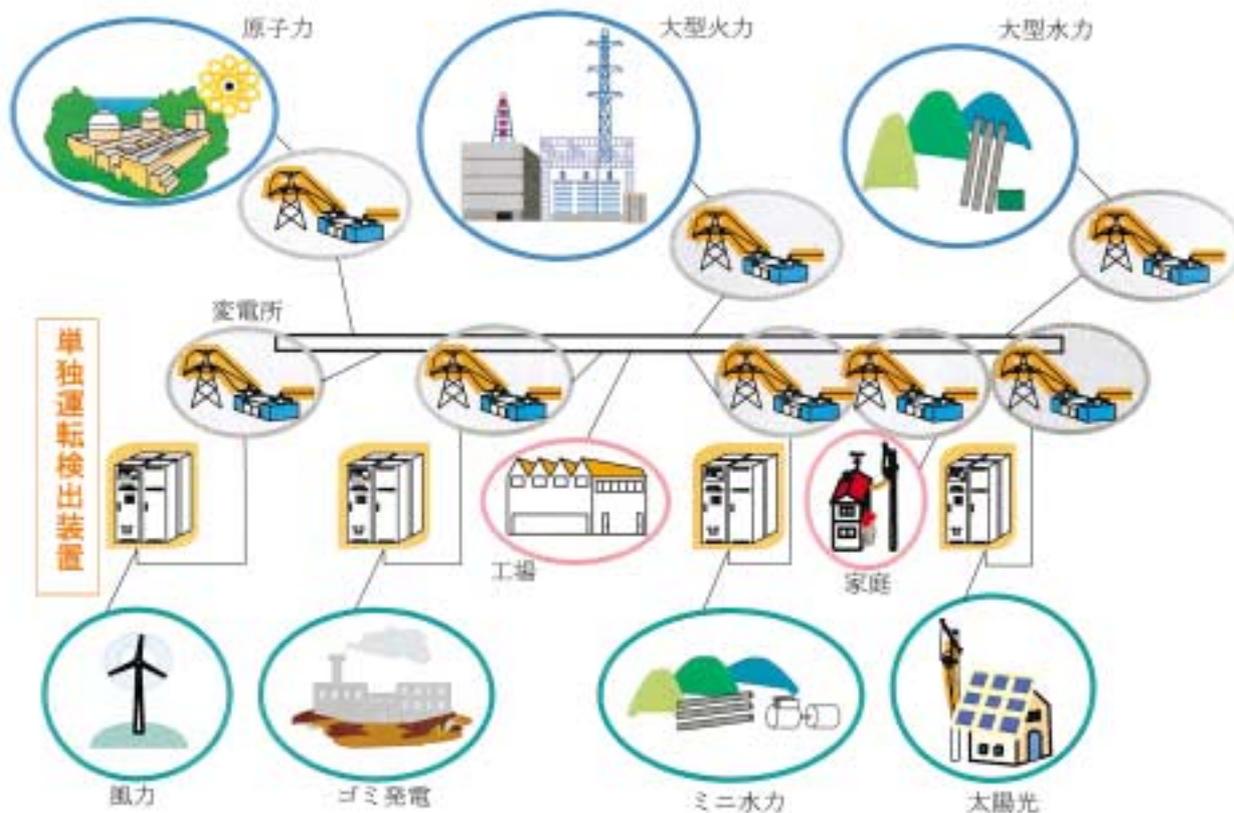
Advanced islanding protection relay as useful device for cost reduction of dispersed power source interconnected with utility grid - the roll and technology -

西村 莊 治* 夏田 育 千*
S. Nishimura Y. Natsuda
植村 耕 作** 羽田 儀 宏**
K. Uemura Y. Hada
田村 俊 一**
S. Tamura

はじめに

昨今、京都議定書の批准や電力自由化推進などの社会的情勢により、新エネルギー発電、IPP(発電事業者発電)といった発電設備が注目されている。主な発電方式としては、風力発電、ミニ水力発電、ゴミ発電などのバイオ

マス発電やIPP電源といったものが挙げられる。単独運転検出装置はこれらの発電設備(本解説では分散電源(*1)と呼ぶ)で用いられており、“次数間高調波注入”方式のものは、発売開始後わずか3年半程度で100セットを採用頂いており、年々その数は増加している。



* 技術開発研究所
** 産業・電力システム事業本部

これは本方式の装置が分散電源の電力会社の送配電線への接続において、安全性・信頼性を確保したコストダウンに極めて有効との評価を頂いているため、と考える次第である。

従来、“JEAG9701 - 2001分散型電源系統連計技術指針”には単独運転の防止対策などが記載されていたが、電気設備の更なる安全を求める情勢に従い、制度の遵守を求められ、法遵守の気運により、2004年10月より、経済産業省の省令である“電気設備の技術基準”に、主な記載が移っている。

本解説では、上記のような高い評価を得た理由と製品の将来ビジョンを紹介するため、主に、

第1章：単独運転検出装置の適用が分散電源を電力会社の送配電線に接続する時のコストダウンにつながる理由

第2章：ベースとなっている信号処理技術

第3章：製品化の将来（安価な特別高圧用装置の実現）

について、最新の動向を踏まえて、詳細技術を解説する。

なお、単独運転検出装置の基本的な技術については、既報の日新電機技報Vol.46, No.2を御参照頂きたい。

*1：単独運転検出装置が適用される発電設備は電力会社側の設備に異常を生じたときなどに電力会社の送配電線から切り離すべき発電設備（発電設備単独では適正な系統電圧と周波数が維持できない、あるいは消防活動要請に即応できない発電設備：パラサイト電源と呼ばれている）である。ここには、IPPなど集中型電源の一種と考えられるものも含まれるが、この技術解説では、便宜上、上記の電源をすべて“分散電源”と呼ぶことにする。

第1章：単独運転検出装置の適用が分散電源を電力会社の送配電線に接続する時のコストダウンにつながる理由

第1章では、

- 1 - 1 . 単独運転と、その問題点
- 1 - 2 . 各発電方式と単独運転
- 1 - 3 . 従来の単独運転防止策と単独運転検出装置のメリット
- 1 - 4 . 原理と特徴
- 1 - 5 . 他の単独運転検出方式との比較
- 1 - 6 . 本装置の経緯

について、概要を紹介する。

1 - 1

単独運転と、その問題点（図1 - 1参照）

単独運転とは、発電設備を電力会社の送配電線に接続して電力を送出している状態において、事故（火災、地絡、欠相、過電流、雷）などの理由により、電力会社変電所の送電の遮断器を開放（スイッチ切り）したとき、分散電源と周辺の需要家だけが接続された状態となり、分散電源より電力が供給される単独系統での電力供給が行われてしまう状態をいう（図1 - 1上図参照）。この状態は分散電源の出力電力と周辺の需要家の需要電力が、ほぼ一致した場合に、長時間継続することが多い（電圧、周波数などに変動が生じにくいため）。

事故の継続と消防活動の阻害：電力会社の変電所側では、事故から保護するため、あるいは消防活動のために電力供給を停止しようとするが、単独運転の状態では電力供給が継続されてしまうため、問題となる（事故が継続する。消防活動が行えない。）。

非同期投入：また、電力会社が電力供給を再開すると非同期投入の問題が生じる。（図1 - 1下図参照）。非同期投入は、発電機の発生する電圧と電力会社の送出する電圧が一致しない状態で接続されてしまうもので、事故は電力会社の変電所から送配電線、分散電源発電機までのすべての機器に致命的な故障をもたらす、二次災害の可能性も高い。このため、66/77kV以上の電力会社の変電所では、非同期投入事故をさけるよう、線路無電圧確認装置がほぼ完備されており、事故は回避される。しかし、分散電源は電圧や周波数を維持するような運転を設定されないため、周辺の需要家では不安定な電力供給が長時間継続してしまう問題が残る。（電力会社より分散電源側に電話連絡をして、発電機の接続を停止してもらわなければならない。）また、大半の6.6kVと、一部の22/33kVの電力会社の変電所では、線路無電圧確認装置は設置されておらず、単独運転防止策が必要となる。

1 - 2

各発電方式と単独運転

風力発電：単独運転は負荷と発電電力がほぼ一致したときに発生しやすいことを前節で述べた。風の変化により、風力発電の出力は短時間で変動するため、電力会社の変電所と切り離された送配電線においては、発電と需要（負荷）のバランスが崩れてしまい、単独運転が継続しないので、単独運転の発生は極まれであり、実際上ありえないのではないかと、この考え方も従来はあった。しかし、最近の風力発電設備においては、風車羽根のピッチ制御、回転数制御、風車ポールや羽根のたわみ等により、一定以上の風力があれば安定した出力を得られる機能を持ったものが多く見つけられる（各風車メーカーの

風力発電出力の特性表を参照されたいが、イメージを右記に示す。) このため、電力会社と連系している間は、安定した電力を供給し、電圧変動なども少なくなることが期待できる反面、電力会社と切り離された単独系統になっても、適当な負荷(需要家)が存在すれば、単独運転の状態(つまり、発電と負荷がバランスして電力供給を継続する異常状態)が長い時間継続すると思われる。以上のような条件から、風力発電においては、せっきくの風車出力安定機能が無駄にしないために、有効電力・無効電力を問わず、電力変動を伴わない形での単独運転検出装置であることが望まれる。

御採用頂いたお客様の事例(写真1)

御前崎町殿がNEDO殿との共同研究事業でマリパーク御前崎内に風力発電設備を建設された。風力発電機の定格

出力は660kWで、2002年4月より運転を開始している。この施設の系統連系のために、ご採用頂いた。

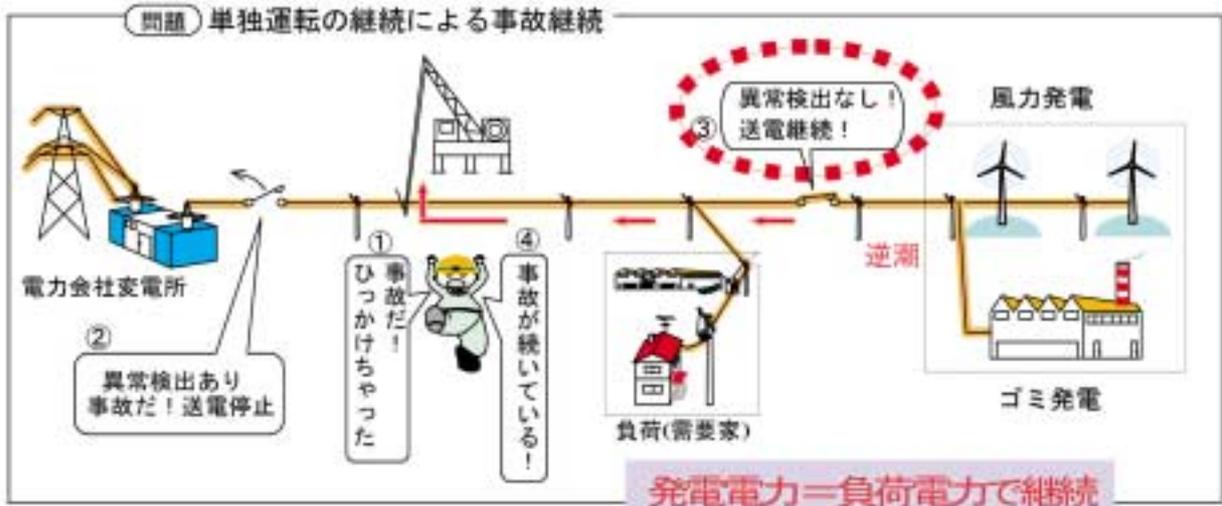
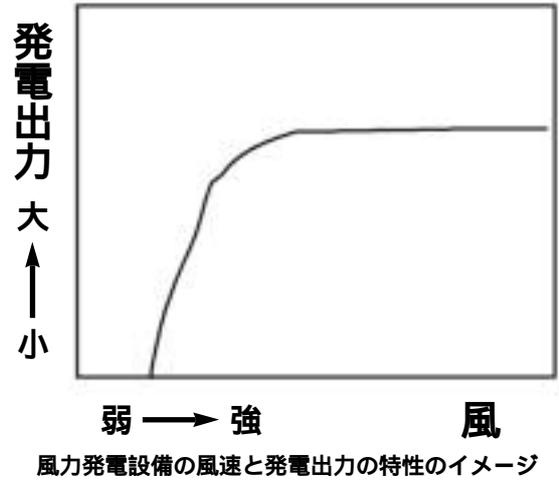


図1-1 単独運転の問題点



写真1 御前崎町殿、風力発電設備

ミニ水力発電：単独運転防止の必要が最初にいわれるようになったのは、ミニ水力発電からである。環境へのダメージを避け、大型ダムを必要としないミニ水力発電が、CO₂削減のために注目を浴びている。しかし、山間部に設置されることが多く、その送配電線路での事故が考えられるため、単独運転防止策は重要となっている。電力会社の小水力発電でもコスト削減のために単独運転検出装置が設置される例がある。

ゴミ発電などのバイオマス発電：ダイオキシン対策などのためゴミ焼却炉を大型高温化し、熱利用の発電設備を設置する例が増えているようである。また、廃棄物由来のガスを発電に用いるものも増加しているようである。さらには林業の間伐材を利用した発電も注目されているようである。これらでは構内で消費される電力以上に発電される事が多く、電力会社への売電となり、単独運転対策が必要となる。

IPP電源：工場内の設備や熱源を利用したIPPが増加しているようである。これらの中でも、1～10MW程度の容量のものは、可能であれば、保護を分散電源と同等とすることがコスト面では有利となるようである。このような場合、単独運転検出装置が用いられているようである。

1 - 3 従来の単独運転防止策と単独運転検出装置のメリット

単独運転検出装置が採用される以前に使用されていた従来の連系形態（単独運転による問題を回避した電力会社との接続方法）について以下にまとめる。（表1 - 1，図1 - 2参照）

表1 - 1 本方式単独運転検出装置価格を基準とした各システムでのコストの比較（ランニングコスト含む）

	高圧	特別高圧	備考
1) 専用線による連係	数十倍程度	数百倍程度	距離に依存する
2) 転送遮断システム（通信線使用）	数倍程度	左記高圧の更に数倍程度	距離に依存する

（上表の比率は参考値）

1) 専用線(専用送電線、専用配電線)による連系
(図1-2上図)

専用の送電線・配電線のみを経由して、電力会社の変電所に接続する方法である。単独運転状態が発生し難く、単独運転となっても、問題が発生しにくいので、有効な方法といえる。(需要家が接続しないので単独運転が継続し難い。)しかし、分散電源のみが使用する送配電設備のコストは分散電源事業者が負担することになる(電力会社への負担金として)また、敷設方法や経路によっては(特に道路などの公共用地の架空線など)単独運転を防止する必要があり、全線地中ケーブル電線以外の場合、転送遮断か単独運転検出装置が必要になってしまうようである。

2) 転送遮断システム(通信路として専用通信線使用)
(図1-2中図)

単独運転とならないように、通信線にて電力会社の変電所より分散電源設備の遮断器を開放(スイッチ切り)する設備で、ほぼ確実に保護目的を達成できる。しかし、雷誘導ノイズによる不要遮断を防止するため、高価な光通信を使わなければならない場合もある。また、電力会社においては、系統切り替えなど系統運用上の制約の発生、保守費用の増大を招くことになり、電力会社への負担金の大幅な増加となる。また、人手による電話連絡でしか復旧作業を開始できない場合、事故時の復旧作業の長時間化の原因となることも考えられる。

以上のような単独運転防止のための連系形態(専用線、転送遮断システム)の代替として単独運転検出装置を採用することは、分散電源の電力会社への接続に関わるコストダウンとなり、電力会社への負担金が大幅に減額となる。(表1-1, 図1-2下図)

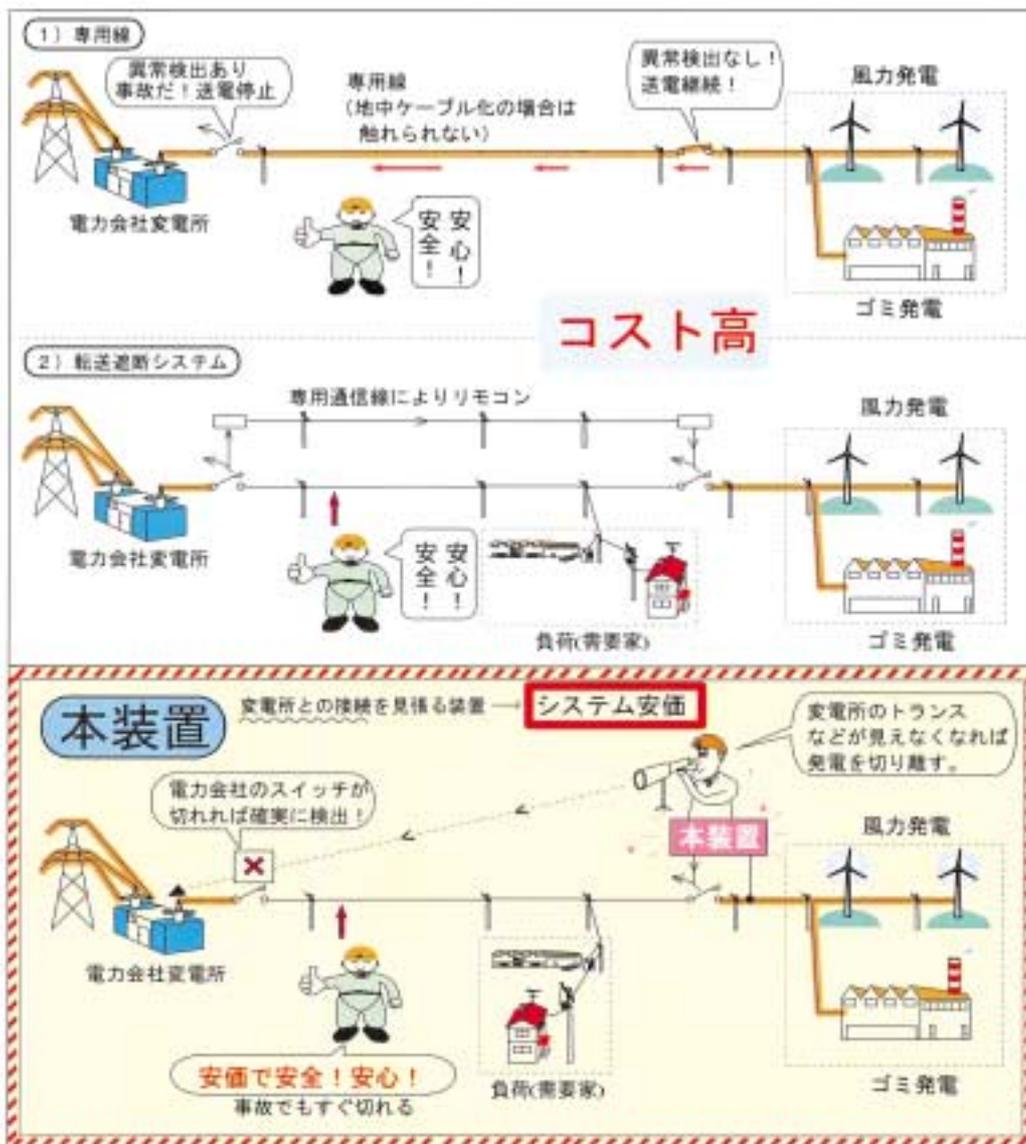


図1-2 単独運転防止のための従来システムと本装置

無効電力変動方式と、有効電力変動方式の特質をあげ、次数間高調波注入方式と比較する。

無効電力変動方式：発電機の出力制御または外付けの変動装置によって、無効電力(損失となる成分は少ない)を変動させることにより、分散電源の出力と、周辺の需要家の負荷が一致するのを避けるようにする方式。有効電力変動方式と比較すると損失は大幅に少ないといえる。しかし、電力会社と接続されている状態において、電圧変動を生じさせてしまうため、高圧(6.6kV)以上の電圧の送配電線で電力会社と接続する場合においては、電圧変動の程度を把握しておく必要がある。分散電源では、発電機出力や負荷の変動を抑えて運用することが安定かつ効率のよい方法であるが、これに反する方式であるといえる。特に風力発電においては、出力を安定にすることにより、電圧変動を生じないように努めているにも関わらず、電圧変動を生じさせる方式を採用するのは、矛盾してしまう。

有効電力変動方式：発電機の出力制御、または外付けの変動装置によって、有効電力を変動させることにより分散電源の出力と、周辺の需要家の負荷が一致するのを避けるようにする方式。負荷変動方式もこの一種と考えることができる。この方式の問題点は、有効電力の変動が損失となってしまう、せっかくの分散電源の出力が無駄になってしまうことである。1例として、2000kWの発電機に適用した場合、負荷変動方式では次数間高調波注入方式と比較して、4倍程度の電力量が損失となってしまうようである。

有効・無効電力変動方式は、いずれにしても電力を変動させることにより、単独運転の継続中に電圧電流の変化を生じさせようとするものである。よって、正確な動作を期して、変化を大きくしようとする、ある程度の電力変動を生じてしまうことになり、電圧変動や系統動揺の原因となりかねなくなってくる。逆に変動を小さくすると、検出が難しくなり、誤動作や誤不動作の原因となりかねない。また、その変動装置が大型となってしまうのを避けるために、発電機の制御系に組み込まれることになっているものは、発電機のメーカーや型式を限定してしまうことになる。さらには、同一の電力会社の変電所のトランスに、複数の事業者の分散電源発電機が設置されると、各々の単独運転検出どうしの装置相互干渉を招いて誤動作の心配を生じてしまう。

これに対し、次数間高調波注入方式で用いられる次数間高調波は大半が無効電力であり、損失を生じにくいなど、1 - 4に挙げた特徴を有している。

現行製品の詳細

当社ウェブページ(<http://nissin.jp>)の新製品情報の“単独運転検出装置”の項を参照頂きたい。ここでは、装置のカタログだけでなく、FAQや資料も掲載されており、基本的な検討を行う助けとなることを狙っている。また、単独運転検出装置の採用の可否を検討するのに必要な系統条件調査シートも掲載されている。このシートに必要な条件を記載し、依頼を頂くと、単独運転検出装置の採用可否、採用時の整定(単独運転と判断すべきレベル)をシミュレーションによって求めることが可能である。

1 - 6

本装置の経緯

ここで、本装置の年度ごとの経緯をまとめる。

- 2000年度：関西電力(株) 殿黒川風力発電所に1号品を設置。年度末に販売開始。第48回オーム技術賞受賞。
- 2001年度：次数間高調波注入方式が記載された技術指針が発刊。日本電設工業協会会長賞受賞。
- 2002年度：特許登録。JEMA発達賞受賞。
- 2003年度：全電力会社の管内に導入頂いた。第8回新エネ大賞(新エネ財団会長賞)受賞。
- 2004年度：100セット採用を達成。都道府県別で8割に導入頂いた。澁澤賞受賞。

短期間に運用実績が急増し、また、好評を得て各種の賞を頂いている。

以降では、装置内部の詳細な原理と、現在進行中の新規開発状況について電気技術者向けに詳細に解説する。

第2章：ベースとなっている信号処理技術

2 - 1 装置小型化を実現する信号処理技術

2 - 1 - 1 基本波のサイドバンド成分の除去による微量注入の実現

次数間高調波成分は基本波周期(50Hz系の場合は20mSEC.、60Hz系の場合は16.7mSEC.)の整数倍の期間(実際の装置は基本波周期の30倍の期間としている)計測した結果をフーリエ演算することで計測できる。しかし電力系統の基本波周波数は0.1Hz程度の微少ではあるが周波数変動がある。その場合基本波非同期により基本波の大きなサイドバンド成分が発生し注入周波数成分に重畳するので、注入電流により発生する微少な注入周波数成分を検出することができなくなる。

そこで注入周波数近傍の前後の(注入していない周波数の)次数間高調波成分を抽出し、この前後の周波数成分の平均から当該注入周波数成分における基本波サイドバンド成分を除去している。これにより微量注入を実現している。

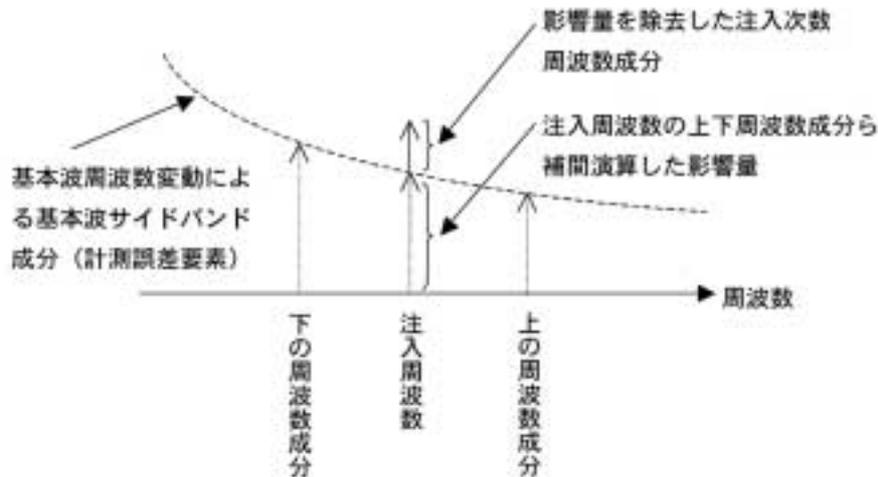


図 2 - 1 サイドバンド成分の除去

2 - 1 - 2 対称成分演算による単相注入の実現

単相注入すると、装置の容積や重量において大きな部分を占める注入回路が、3相注入と比較してコンパクト化できる。以下に、単相注入による3相回路インピーダンスの計測方法について述べる。

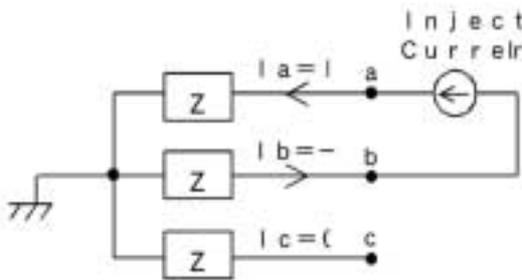


図 2 - 2 3相回路への単相注入

図 2 - 2 において、3相回路のa相、b相間に単相注入電流 I を流すと、各相計測点の電流、電圧は、

$$I_a = I, I_b = -I, I_c = 0 \quad \dots (1)$$

$$V_a = Z \cdot I, V_b = -Z \cdot I, V_c = 0$$

である。

(1)式から計測点における各相電圧、電流のそれぞれの正相成分 $V1$ 、 $I1$ は、

$$V1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad \dots (2)$$

$$= \frac{1}{3} \cdot Z \cdot (1 - a) \cdot I$$

$$I1 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) \quad \dots (3)$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (1 - a) \cdot I$$

ただし、 $a = \exp(j \frac{2}{3})$

となる。したがって、3相回路のインピーダンス Z は、(2)式と(3)式から、

$$Z = \frac{V1}{I1} \quad \dots (4)$$

と算出できる。

なお、電圧、電流のそれぞれの逆相成分を使用しても同様にインピーダンス Z を算出することができる。電圧、電流を3相分計測して対称成分の算出を行なうことにより、注入に使用する2つの相をどのように選択しても(1)から(3)までの演算でインピーダンス Z を算出できるので、注入相を特定する必要がない。

第3章：製品化の将来(安価な特別高圧用装置の実現)
3 - 1 課題

現行装置が採用されている分散電源の中心となっている発電容量は1000kW前後で、200kW以下は2件のみとなっている。また逆に、2000kW以上(特別高圧の送配電線に接続される)の大容量のものも数件、適用されている。電気設備の設備としての効率を考えると、今後大容量のものが有利となると考えられる。

しかし、本方式の適用を高圧系統と比較して系統インピーダンスが小さい特別高圧系統にまで拡大する場合は、大きな注入電流が必要となり、そのために大型な装置となってしまい、近年の電気設備の小型化に反することになってしまう。そこで、装置の検出性能を損なうことなく、これを小型化する手法(ごく小さな注入電流でも、精度よく検出する手法)についていろいろ検討し、検証試験を行っているが、ここでは重要な改良の1つとして、検出方式の改良を紹介する。

3 - 2 特別高圧用への検出方式の改良

3 - 2 - 1 現行装置改良の方針

現行装置は0.1%程度の注入成分の電圧歪が必要であるが、バックグラウンドノイズに対するSN比を高めてこの歪が1桁小さい場合でも監視できるよう、以下のように入力信号処理方法を改良し、注入電流を現行装置と比較して低減する。(図3-1に追加改良点を太線枠で記載)

3 - 2 - 2 デジタルフィルタによる入力信号処理

電圧電流信号に含まれる基本波や2, 3, 4, 5の各次高調波は次数間高調波成分と比較して、大きな成分となっており、これらの成分が変動するとサイドバンド成分が発生し、これが小さな次数間高調波を精度良く計測する妨げとなる。この対策として、基本波と整数次高調波の周波数成分だけを、急峻な特性をもつフィルタを用いて除去することが必要となる。従来のアナログ回路フィルタでは、通常時の除去性能と単独運転発生時の各成分が急変することに対する即応性能の両方を満足させるのが困難であるので、DSP(デジタルシグナルプロセッサ:高速信号処理演算チップ)を使用したデジタルフィルタで実現することとした。

AD変換したデータを高速演算が可能な回帰型DFT演算して、基本波と整数次高調波の周波数成分を逐次抽出し、これらを原信号から除去する。この結果、基本波成分等の変動により付随的に発生するバックグラウンドノイズが除去でき、SN比が向上する。これを、現行装置の判定ユニットへ入力することにした。(図3-3参照)

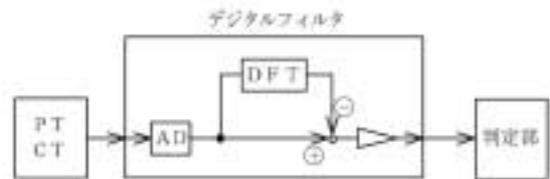
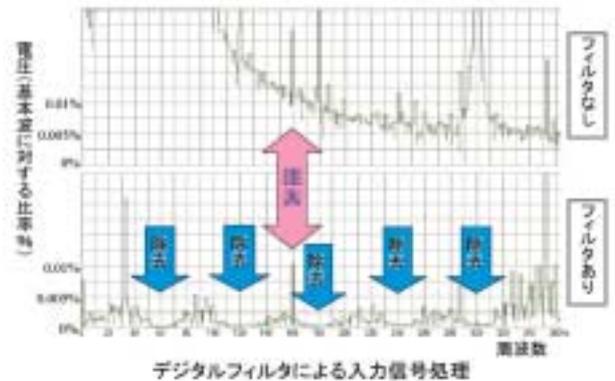


図3-3 デジタルフィルタのブロック図

3 - 3 原理検証試験

関西電力(株)殿電力技術研究所のAPSA(高性能系統解析試験装置:アナログシミュレータ)を使用して、実系統を模擬した単独運転検出試験を行った。模擬回路は電力会社発電機・トランス・送配電線路・負荷・分散電源発電機を接続し、様々なケースについて、通常系統から単独系統(分散電源と負荷がバランス)へ移行する状態を発生させて試験を行った。注入模擬として電流源を分散電源発電機端に接続し、基本波に対して0.01%の電圧歪みを発生させた。

結果として、従来の10分の1程度の電圧歪であるにもかかわらず、様々なケースでインピーダンス(サセプタンス)の変化を捕らえ、単独運転検出を良好に行うことができた。(図3-4参照)

今後、実系統での次数間高調波ノイズの把握に努め、さらに方式検証を進め、製品化に向けた検討を行っていく予定である。

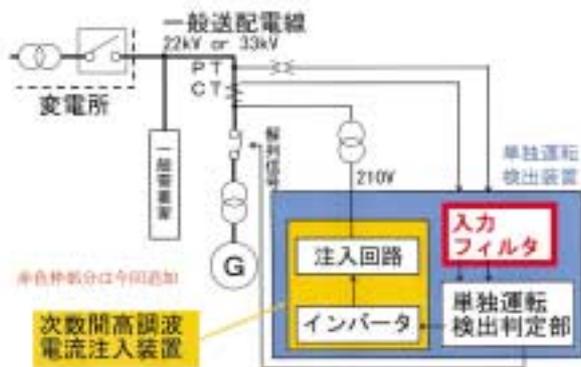
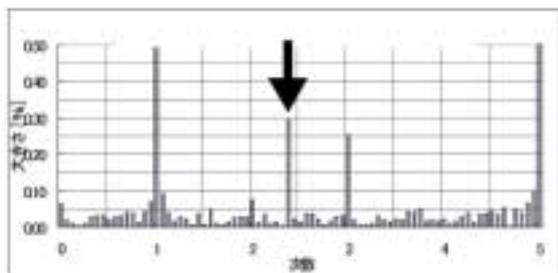


図3-1 システム構成2(改良後)



(2.4次高調波を注入したとき。基本波を100%として表示)

図3-2 電圧の周波数特性

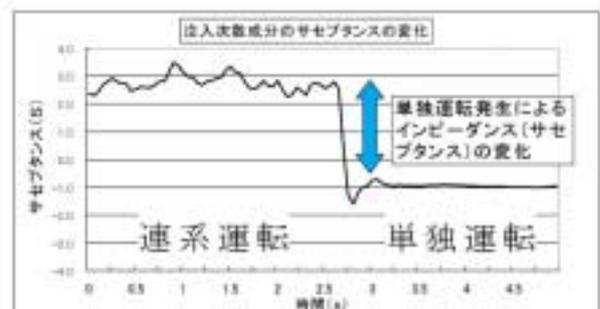


図3-4 APSAでの試験結果

おわりに

単独運転検出装置の利用は、従来の分散電源の系統連系形態(専用線、転送遮断装置)と比較して、系統連系のコストダウンに有効である。本稿ではまずそれを説明した上で、次数間高調波注入方式の単独運転検出装置の経緯と方式の特長、ならびに、それを支える信号処理技術を紹介した。また、さらに今後の特別高圧用の小型化の開発動向として、デジタルフィルタによる入力信号処

理を紹介した。今後いろいろな技術開発により、さらに次数間高調波注入方式の単独運転検出装置の性能が向上し、その適用分野を広げることを目指している。

最後に、共同研究を通じて、本方式の開発に御指導・御協力頂いた関西電力(株)殿エネルギー利用研究所の関係各位に深く御礼申し上げるとともに、今後の更なる御指導ご鞭撻のお願いを申し上げます次第である。

本装置が内蔵する保護方式

区分	方式
発電電圧異常時の保護	「OV」過電圧リレー(59)
	「UV」不足電圧リレー(27)
系統短絡保護	「DS」短絡方向リレー(67S)
	「UV」不足電圧リレー(27)
系統地絡保護	「OVG」過電圧リレー(64V)
単独運転防止	「OF」周波数上昇リレー(95H)
	「UV」周波数低下リレー(95L)
	単独運転検出機能(受動)
	単独運転検出機能(能動)

(電気設備技術基準に準拠)

仕様概要

注入次数	2~3次における次数間高調波で、12の調波(12ch)の中から選択
注入電流	最大2.0A(6.6kV側において) 注入電流による次数間高調波電圧歪みは、高圧系基本波電圧に対し0.2%以下
計測要素	受電点の三相電圧および三相電流 (地絡過電圧要素計測には零相電圧も計測)
演算仕様	DFTによる次数間高調波、基本波抽出
準用規格	JEC-2500
寸法	外形寸法 W600×D400×H1750(mm) (内インバータ部W600×D400×H1300(mm))



製品装置外観

執筆者紹介



西村 荘治 Shoji Nishimura
技術開発研究所
システム研究センター
主幹



夏田 育千 Yasuyuki Natsuda
技術開発研究所
システム研究センター
分散電源システムグループ 主任



植村 耕作 Kosaku Uemura
産業・電力システム事業本部
システム機器事業部電子機器部
パワエレ制御グループ グループ長



羽田 儀宏 Yoshihiro Hada
産業・電力システム事業本部
システム機器事業部電子機器部
パワエレ制御グループ



田村 俊一 Syunichi Tamura
産業・電力システム事業本部
システム機器事業部電子機器部
パワエレ制御グループ