

次数間高調波注入による 単独運転検出方式と製品開発

Advanced Islanding Phenomenon Detection Method for Dispersed Power Sources and a New Product

西村 莊 治*	袁 輪 義 文*
S. Nishimura	Y. Minowa
志方 俊 彦*	江村 徳 男**
T. Shikata	N. Emura
竹内 雅 靖**	奥田 誠**
M. Takeuchi	M. Okuda
北野 信 之**	羽田 儀 宏**
N. Kitano	Y. Haneda

Synopsis

We have developed an advanced islanding phenomenon detection method for dispersed power sources. It is injecting a little fixed interharmonic current into a distribution line and detecting the change of the interharmonic impedance.

The merits of our method for utility network are as follows ;

- (1) Influence on utility network is negligible.
- (2) Performance is not subject to other dispersed power sources with the same detecting system.
- (3) It is able to detect islanding phenomenon within about 1 sec.
- (4) It is able to apply for all kinds of generator for dispersed power sources.
- (5) Performance is not subject to capacity and number of generators in the dispersed power source facility.

We have also developed a new product with this method. We are confident that we have succeeded in advancing the worldwide level of active islanding phenomenon detection technology greatly.

1. ま え が き

近年、省エネルギー意識の高まりに伴い、一種類のエネルギー源から複数のエネルギーを取り出すシステム、特に発電の際に生じる熱エネルギーを再度発電に利用するコジェネレーション（cogeneration：廃熱発電，熱電併給，熱併給発電等）や風力発電などの分散電源が積極的に導入されつつある。図1に現在（1990年代後半）の導入状況と2010年の予測を示す。

配電系統に連系された分散電源の運転形態の例を図2に示す。電力系統の事故等により電力会社の変電所の送り出し遮断器が開放された場合、切り離された系統は、分散電源がともに切り離された他の需要家に電力を供給

する状態（単独運転状態）となる可能性があり、次の問題が生じる。

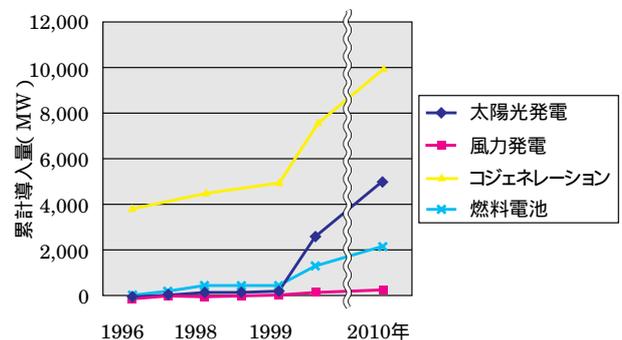
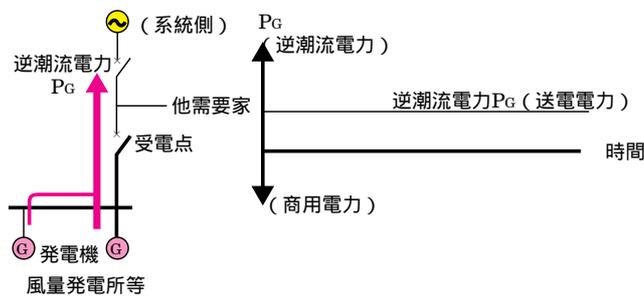


図1 各分散電源導入量の現在（1990年代後半）と将来予測
社団法人電気共同研究会 第56巻第4号
「分散電源技術と電力系統の将来展望」

* 技術開発センター システム開発グループ
** 社会環境事業部 ソリューションシステムグループ

(1) 常時逆潮流運転 (売電事業)



(2) 短時間の逆潮流運転 (構内発電機運転中の負荷の変動・脱落等による一時的な逆潮流)

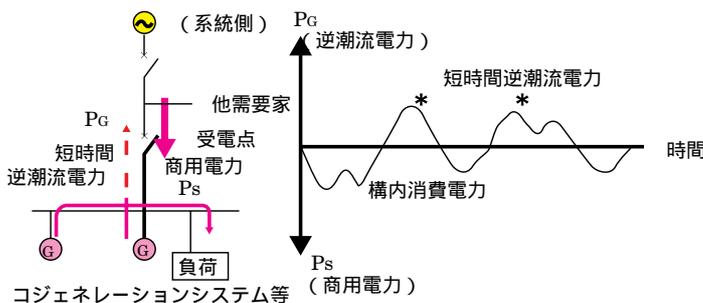
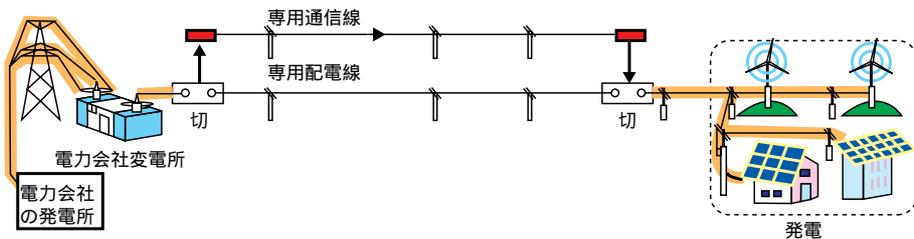


図2 分散電源システムの運転方法 (逆潮流ありの場合)

(1) 一般公衆あるいは保守員が充電された電路に触れた場合、感電する可能性がある。
 (2) 電力会社の遮断器が再閉路した場合、非同期投入となるため機器を損傷する可能性がある。
 このような保安上および供給信頼度の問題から、系統側が供給停止時には分散電源側の単独運転を速やかに検出して、系統から確実に解列する必要がある。
 系統連系については電力系統連系技術要件ガイドライ

ン (以下ガイドライン) で技術指標が示されており、分散型電源を逆潮流ありで系統に連系する際には、単独運転検出装置の設置あるいは電力会社からの転送遮断により単独運転の保護を行うこととなっている。
 単独運転保護方式としては、転送遮断装置は専用の配電線、通信線の敷設などが必要で多くのコストがかかるため、自律方式による単独運転検出装置の設置が望まれている (図3)。

(転送遮断装置)



(単独運転検出装置)

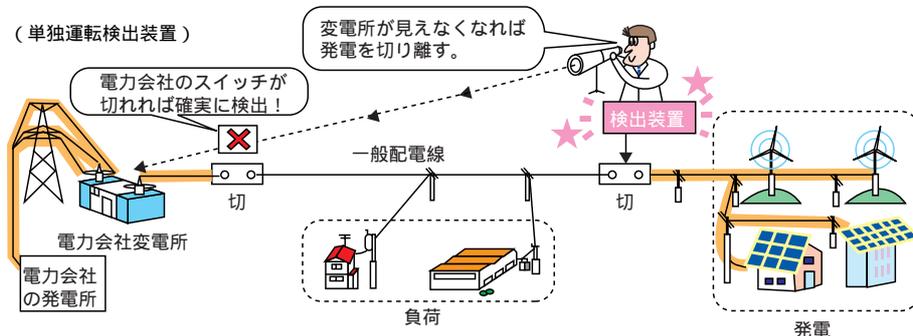


図3 転送遮断装置と単独運転検出装置の比較

また、ガイドラインにおいては単独運転検出装置の適用が求められているが、既存の従来方式では次の課題がある。

- (1) 連系時の電力変動による系統の諸変動を引き起こす可能性が考えられ、照明のちらつき（フリッカ）などの原因になる。
- (2) 単独運転検出装置が複数台設置された場合には相互干渉による検出不感帯が生じ、確実に単独運転検出できず感電など保安上の問題がある。
- (3) 検出時限については条件によって数秒程度要する場合があります、分散電源の停止が遅れ保安上の問題がある。

これでは、電力会社や一般利用者に不利益をもたらすことになるため、分散電源設置者にはこれらの課題を解決することが要求されている。

当社では、これらの課題を解決するために次数間高調波注入という新しい方式に基づく単独運転検出方式を開発し、さまざまなシミュレーションや実系統での性能評価を実施し、本方式の有効性を実証してきた。

さらに当社標準のデジタルリレー技術を活用し、本機能ならびに系統連系保護に必要なリレー機能一式を搭載した単独運転検出装置（連系保護装置）の実用化も行

った。

本稿ではその技術やシミュレーション結果などについて紹介する。

2. 次数間高調波注入による単独運転検出の原理

次数間高調波とは、**図4**に示すように整数次高調波間に存在する非整数次の高調波であり、その系統電圧ならびに電流成分は定常的に非常に低いレベルである（電圧では基本波成分に対して0.01%程度のレベル）。したがって、次数間高調波電流を連系点から微量を注入するだけで連系点の注入次数に対する電圧・電流を計測して、容易に系統インピーダンスを計測することができる。

この原理を応用して次のようにして単独運転検出を行う。まず、連系点から眺めた系統インピーダンスを常時監視しておく。**図5**に示すように、通常系統インピーダンスは変電所バンクトランスの漏れインピーダンスと配電線インピーダンスが大部分であるため値が小さい。しかし、系統の供給停止時には系統インピーダンスが極めて大きくなる。そこで、このインピーダンスの大きさの変化を検出することにより、単独運転状態を判定することができる（**図6**）。

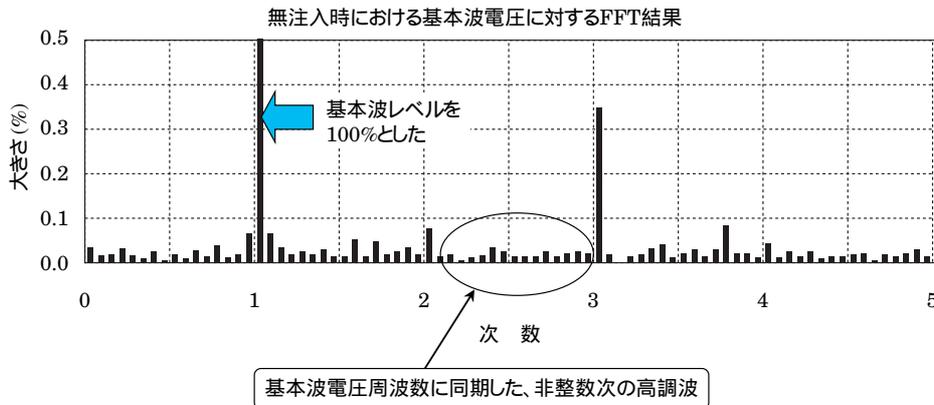


図4 無注入時における基本波電圧に対するFFT結果

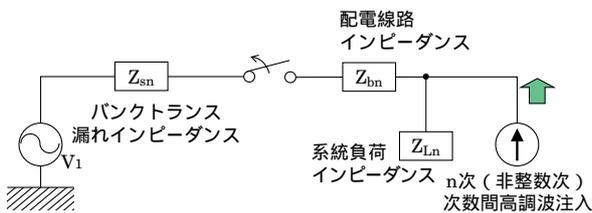


図5 単独運転発生時の系統モデル図

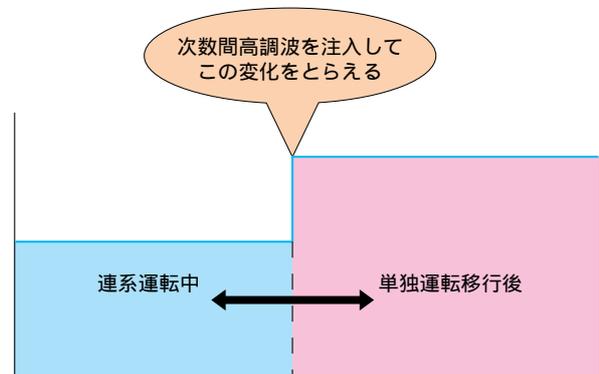


図6 単独運転検出原理図

本方式のシステム構成を図7に示す。本システムは、次数間高調波信号発生部、電流注入部および判定部に構成される。次数間高調波信号発生部からの注入信号に基づき、電流注入部で系統に電流注入する。電流注入部は、小容量のインバータで構成されている。判定部では、計測した電圧、電流波形のそれぞれをDFT（Discrete Fourier Transformation：離散的フーリエ変換）し、注入周波数（次数）に対する系統インピーダンスを算出・監視する。

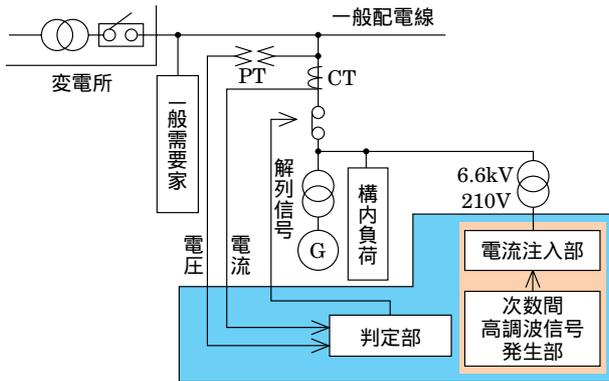


図7 システム構成図

本方式の単独運転検出フローを図8に示す。本方式は、次の二つの項目を判定要素としている。

(1) 系統インピーダンスのレベル整定値

インピーダンス（監視のしやすさから実際にはアドミタンスの虚部であるサセプタンス）がこの整定値以上かどうかにより、系統健全状態あるいは単独運転状態（系統供給停止時）かを認識する。

(2) 単独運転状態継続確認整定時間

単独運転状態がこの整定時間以上継続すれば単独運転検出と判定する。

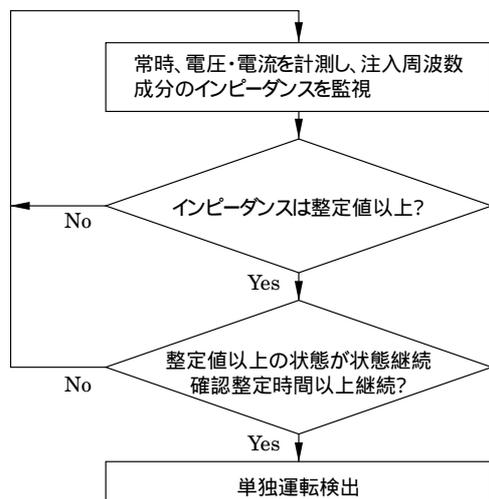


図8 検出フロー

3. 本方式の従来方式に対するメリット

本単独運転検出方式は、検出に基本波を利用している従来方式と違い、基本波周波数から外れた次数間高調波成分を利用しており次のメリットがある。

(1) 系統への影響は軽微である

本方式は、定常的にその成分が系統にほとんど存在しない次数間高調波を注入電流として用いており、小容量でその周波数成分の系統電圧を基本波電圧に対してわずか0.1%程度歪ませるだけで系統インピーダンスを計測（監視）することができる。

従来の単独運転検出方式は、系統基本波電圧あるいは電流を能動信号により0.1秒～数秒周期的に変動させる方式であり、基本波の周期的な変動によりフリッカを引き起こす可能性がある。本方式は基本波成分を使用していないためこのような心配はない。

(2) 複数台設置による相互干渉がない

本方式の単独運転検出装置が同一バンクに複数台設置された場合でも、別々の次数（周波数）に設定した各々の注入次数に対する系統インピーダンス監視を行うことにより、相互干渉を受けない。

(3) 短時間で検出する

本方式は、常時、電圧・電流計測データからDFTにより注入高調波を抽出し当該高調波のインピーダンスの算出を行うため、数秒要していた従来方式に比べ1秒程度での検出が可能となった。

(4) 分散電源発電機の種類を選ばない

本装置は発電機に外付で設置されるので、分散電源の発電機の種類に関係なく、すなわち、同期機、誘導機、あるいはインバータ出力タイプのものであっても対応でき、汎用性に優れている。

(5) 装置容量

本方式は、小容量（3kVA）インバータから電力系統に電流を注入してその注入次数の系統電圧歪み率を0.1%程度とするものである。ちなみに発電設備構内で注入された電流はインピーダンスの低い方へ向かって流出するので、ほとんどの注入電流が系統側へ流出することになる。したがって、本装置の容量は、分散電源発電機の容量とは関係なく、小容量の標準装置で対応することができる。

(6) 複数台まとめた保護

(5)と関連することであるが、本方式は発電機の台数にも関わりなく、標準装置で対応することができる。すなわち、発電設備に複数台の分散電源用発電機がある場合でも、本装置1台で保護可能となりコストの低減が図れる。

表1に本方式の特長と従来方式との比較を示す。

表1 本方式の特長と従来方式との比較

評価指標	各方式	本方式			従来方式	
		無効電力変動方式	QCモード周波数シフト方式	負荷変動方式	無効電力変動方式	QCモード周波数シフト方式
基本性能	(1) 系統への影響	0.1%程度の注入次数成分の電圧歪みを生じさせるのみ	複数設置の際には電圧変動(フリッカ等)が大となる可能性あり	複数設置の際には電圧変動(フリッカ等)が大となる可能性あり	系統連系時の周波数変動なし	複数設置の際には電圧変動(フリッカ等)が大となる可能性あり
	(2) 複数台設置による相互干渉(保護性能)	注入周波数の高精度分離により相互干渉なし	影響を受けないためには変動位相の同期が必要	影響を受けないためには変動位相の同期が必要	特に影響は受けない	影響を受けないためには変動位相の同期が必要
	(3) 検出時限(保護性能)	1秒程度での短時間検出ができるので保安上優れる	場合により数秒程度要する	場合により数秒程度要する	場合により数秒程度要する	場合により数秒程度要する
	(4) 適用できる発電機の種類(汎用性)	発電機の種類によらず使用可能	(発電機を制御する場合)発電機の種類が限定される場合あり	(発電機を制御する場合)発電機の種類が限定される場合あり	発電機の種類が限定される場合あり	発電機の種類によらず使用可能
	(5) 発電機容量(経済性)	発電機容量にかかわらず標準装置で対応可能	発電機容量にかかわらず標準装置で対応可能	発電機容量にかかわらず標準装置で対応可能	発電機容量にかかわらず標準装置で対応可能	発電機容量増大にともない装置(負荷)容量が大
		(6) 分散電源複数台一括保護の可否(経済性)	分散電源複数台をまとめて1台で保護可能	分散電源複数台をまとめて保護することは困難な場合あり	分散電源複数台をまとめて保護することは困難な場合あり	分散電源複数台をまとめて1台で保護可能
総合評価						

4. 装置の構成・仕様

開発した単独運転検出装置の高圧配電線への適用例を 図9 に示す。本装置は、次数間高調波注入方式による単独運転検出能動的機能，電圧位相跳躍検出方式による単独運転検出受動的機能およびその他ガイドラインで必要

とされるすべてのリレー機能を持つ保護リレー部と，保護リレー部から出力された次数間高調波信号を受けて系統へ注入する同次数の高調波電流を発生させる小容量の電圧型インバータからなる次数間高調波電流注入部で構成されている。

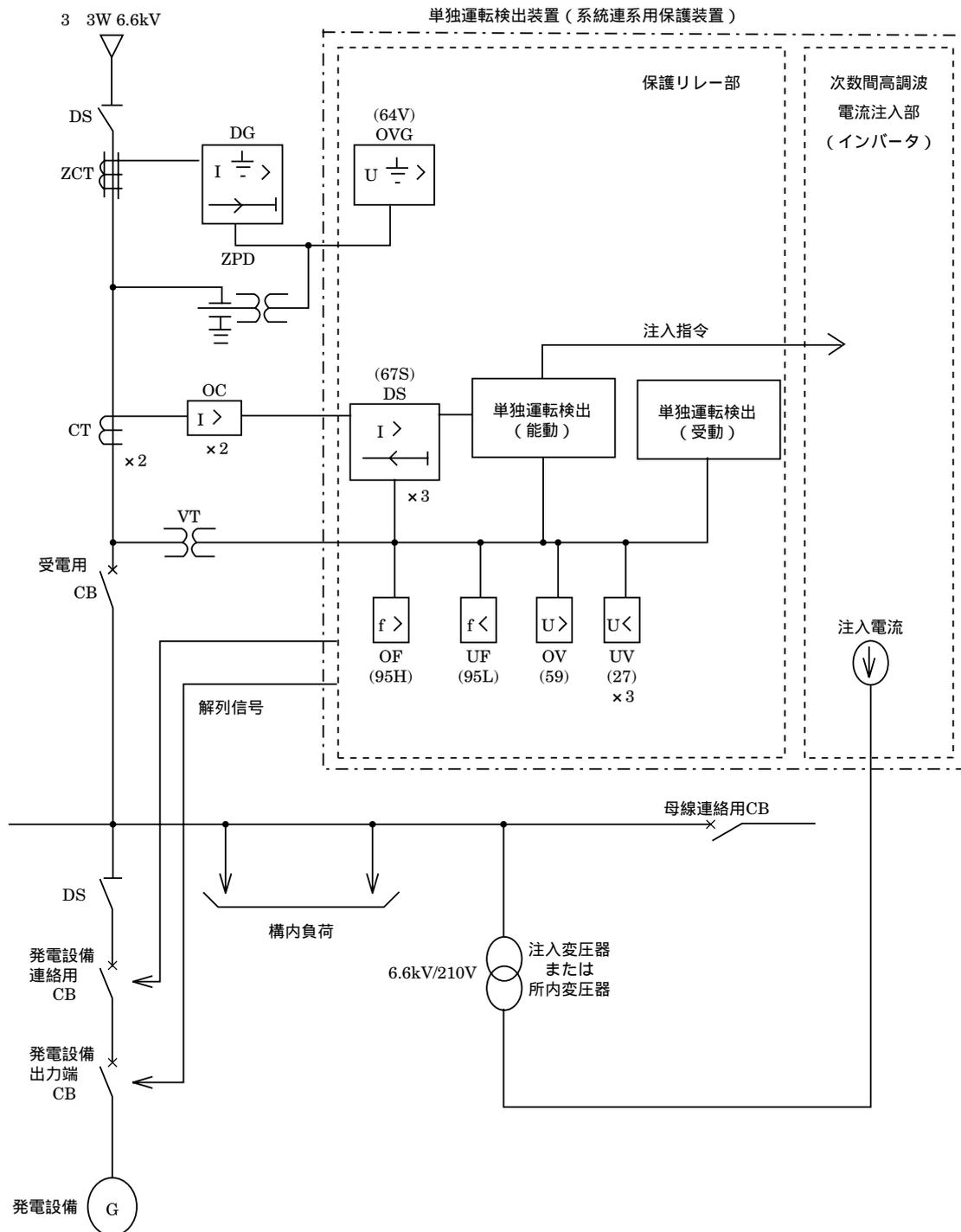


図9 単独運転検出装置の適用例

4・1 仕様概要

本装置の仕様の概要を次に示す。

- (1) 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
- (2) 注入電流：最大 1.3 A（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，高压系基本波電圧に対し 0.2% 以下

- (3) 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）
- (4) 計測データサンプリング：基本波 1 サイクルに対して 12 サンプル（固定）
- (5) 演算仕様：DFT による次数間高調波，基本波抽出
（能動要素，受動要素は周波数変動補正機能付き）
- (6) 準用規格：JEC - 2500



図 10 保護リレーユニット

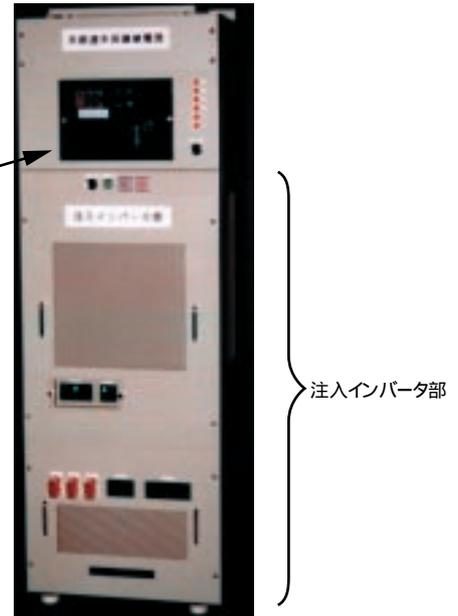


図 11 単独運転検出装置（W 600 × D 360 × H 1800 mm）

(7) 保護リレーユニットの特長

- 16 ビット A/D，32 ビット RISC CPU の採用により高精度・高速演算を実現した。
- 広範囲の自動監視（常時監視 + 自動点検）等により高信頼度を実現した。
- 常時内部演算量（基本波，次数間高調波の大きさ，位相など）のモニタ表示，要素動作時のデータセーブ，不良発生時の内容表示等により高い運用性，保守性を実現した。

(8) 注入インバータ部の特長

- LC 直列共振（2～3 次通過）注入回路の利用によりインバータ容量を大幅に低減した。
- 低容量化により低圧回路への接続を実現した。
- 单相注入方式により部品点数の削減，省スペース化を実現した。

5. シミュレーションによる検証

開発した検出アルゴリズムが確実に単独運転検出をすることを検証するため，図 12 に示す関西電力㈱殿黒川

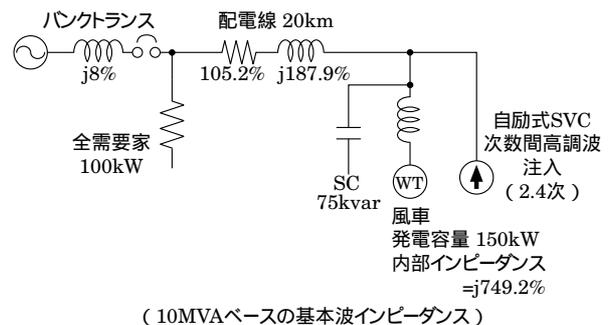


図 12 黒川配電系統シミュレーションモデル

配電系統の系統モデルで，単独運転発生時の系統サセプタンス変化についてシミュレーションによる検証を行った。

前述したように，本方式は受電点電圧を計測し，その計測データについて DFT を行って注入次数成分の電圧を算出している。このため単独運転発生時に電圧の周波数およびレベルの変化がない場合は，DFT 演算で誤差要因となる基本波電圧成分の変化がなく，安定して系統サセプタンス計測ができる。

しかし、単独運転発生時に周波数変動や電圧変動が生じると、系統サセプタンスの算出に影響を与える可能性がある。そこで、単独運転発生時に電圧周波数およびレベルが変化した場合のシミュレーションも行った。

シミュレーション結果1 (図13)

電圧変動および周波数変化が生じない場合(単独運転時完全バランスの場合を想定)。

シミュレーション結果2 (図14)

1秒当たり40%の電圧低下および1秒当たり2Hzの周波数低下が発生すると想定した場合(単独運転時重負荷の場合を想定)。

単独運転検出条件は次のとおりを設定した。

- 系統サセプタンス変化レベル整定値 = - 0.1 pu

(連系時のサセプタンス値 = - 0.2 pu の50% 値)

- 検出時間設定 = 単独運転状態継続確認時間を単体として0.6秒

シミュレーション結果1, 2から、単独運転発生後約0.2秒で単独運転状態と認識しており、さらに単独運転状態の継続確認時間を前記設定値程度見込んで(継続時間を見込む理由は過渡変動の不要動作を避けるためである)、これらの条件で単独運転発生後1秒程度で単独運転検出ができることを確認した。

またシミュレーション結果2では、不足電圧リレー(UVR)や周波数低下リレー(UFR)が動作する状態でも、開発したアルゴリズムで単独運転検出ができることがわかった。

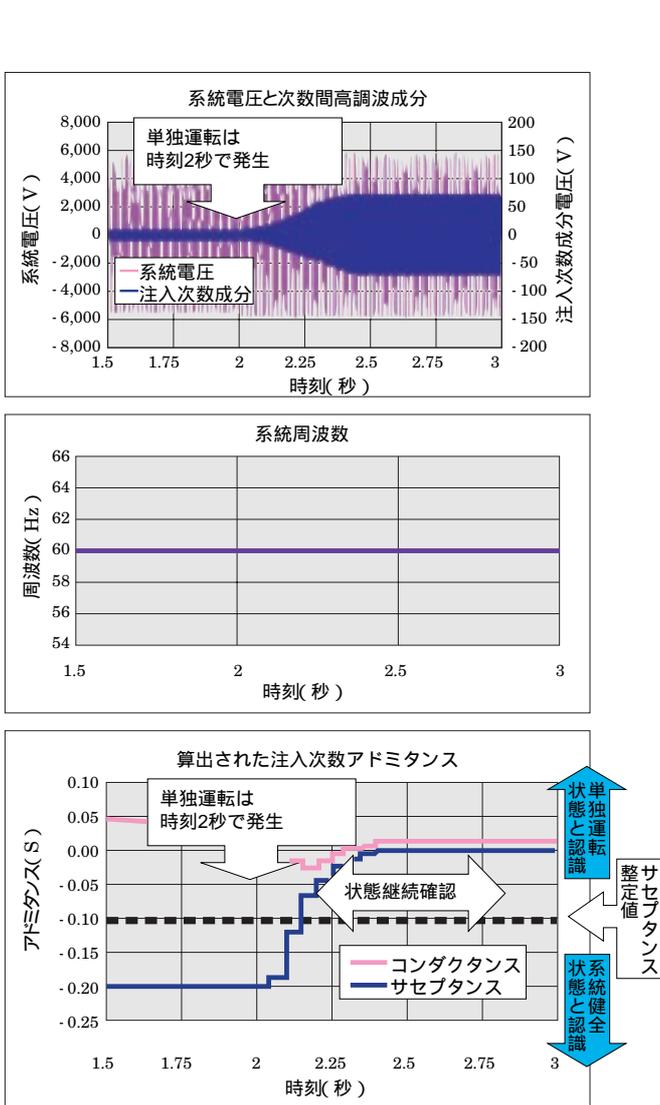


図13 シミュレーション結果1

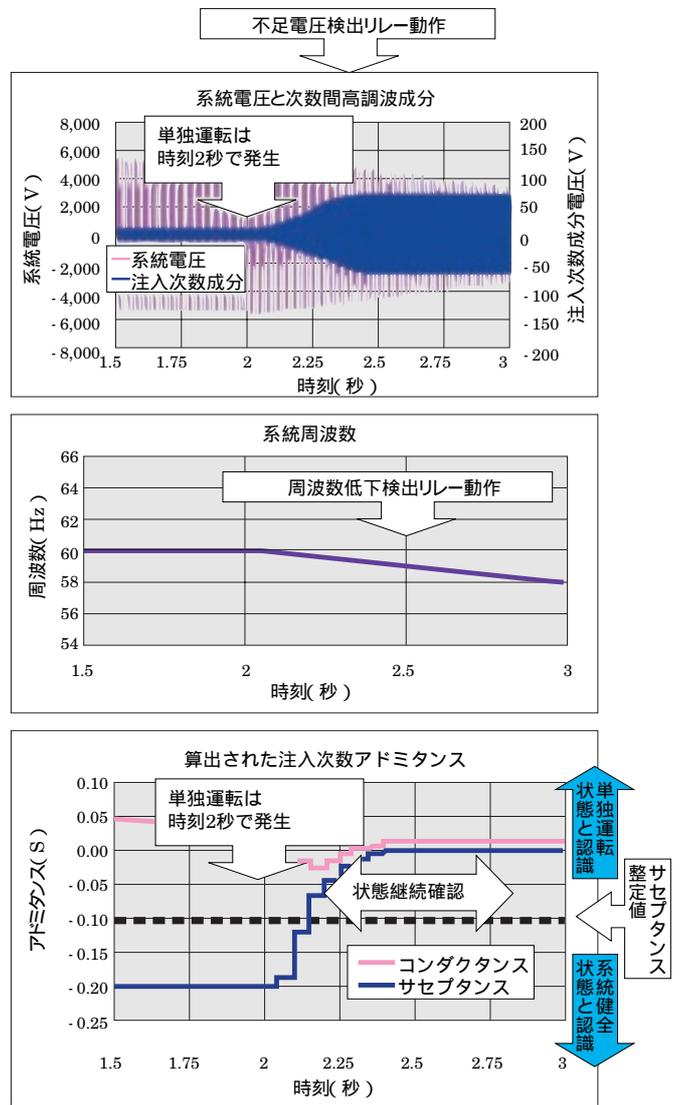


図14 シミュレーション結果2

6. 実系統での性能検証試験

6・1 系統連系時における検証

シミュレーションを行った黒川配電系統の黒川風力発電所において、注入次数2.4次（144 Hz）調波電流を本単独運転検出装置より配電系統に注入し、系統連系時における系統サセプタンスを実測した。図15に系統モデルと系統電圧周波数特性を示す。本装置より注入する次数間高調波が系統に影響を与えない程度とすることを考慮して、6.6kV系基本波電圧に対して0.3%程度の歪みとなるように注入している。また、注入次数（2.4次）成分は他の（周辺の）次数間高調波成分より十分大きい。

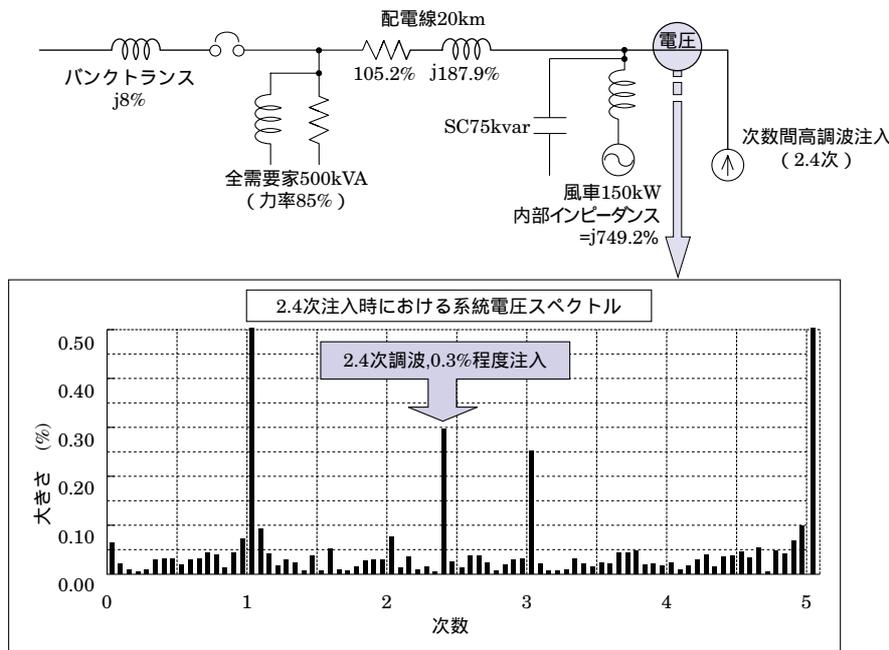


図15 黒川風力発電所系統モデルと系統電圧スペクトル

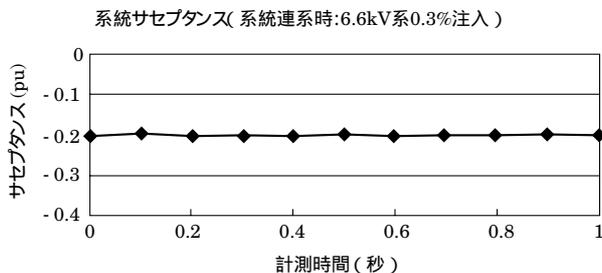


図16 系統連系時の系統サセプタンス計測結果

6・2 単独運転検出動作検証試験

今回の試験は図17に示す系統モデルにより発電所内において単独運転状態を発生させることにより実施した。

発電所受電点において、電力需給関係が平衡状態となるよう所内負荷および自励式 SVC にて調整し、所内受

このことは、本方式で注入次数の高精度分離が可能であることを示しており、同方式の単独運転検出装置が複数台設置された場合でも、注入次数を分離しておけば、相互干渉を受けないことを示している。

図16に、黒川配電線での系統連系時における2.4次アドミタンス計測による系統サセプタンス（アドミタンスの虚部成分）の実測結果を示す。図に示すように約 -0.2 pu で一定した値となっており、系統連系時において安定した系統サセプタンス監視が行えている。また、この実測値は前述したシミュレーション結果による系統連系時の値と一致していることを確認した。

電点の遮断器を開放することで、発電所内での単独運転状態を実現した。図18に試験結果を示す。

本装置の単独運転検出条件は次のとおりとした。

- (1) 単独運転状態系統サセプタンス変化の判定レベル
 整定値 = -0.04 pu
 連系時における系統サセプタンス値 = -0.14 pu の約30%値とする。

なお、連系時の系統サセプタンス値は図17より概算すると次のようになる。

$$Z = j0.08(\text{pu} \text{ 上位系}) + j1.879(\text{pu} \text{ 配電線20km}) + j1.43(\text{pu} \text{ 受電トランス}) = j3.389(\text{pu})$$

注入次数2.4次調波に対する系統サセプタンス演算値は次のようになる。

$$Z(2.4 \text{ th}) = j3.389(\text{pu}) \times 2.4 \text{ th} = j8.134(\text{pu})$$

$$Y(2.4 \text{ th}) = 1/Z = 1/(j8.134) = -j0.123(\text{pu})$$

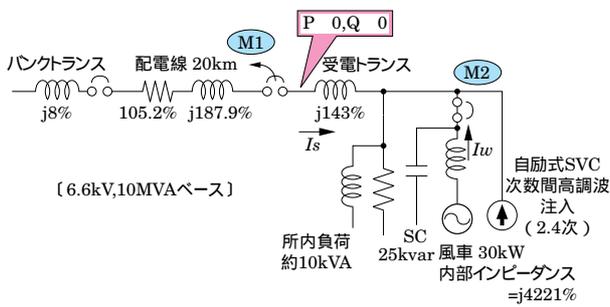


図 17 単独運転検出検証試験システムモデル

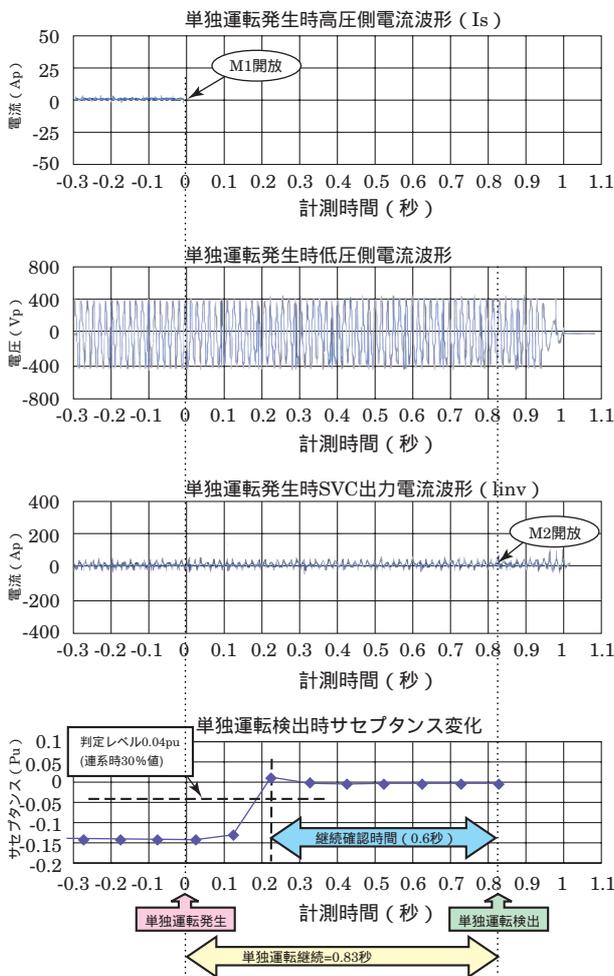


図 18 単独運転検出検証試験結果

ただし、10 MVA、6.6 kV を 1(pu)としている。

本値は図に示す系統連系時における系統サセプタンス値とほぼ一致している。

(2) 単独運転検出時間 = 0.6 秒

図 18 の計測時間 0 秒にて所内受電点の遮断器を開放 (単独運転の発生) した。単独運転発生中も風車出力と所内負荷 (自励式 SVC 含む) との電力需給バラ

ンスが平衡となるような状態を作り出したため、単独運転状態を継続している。受電点の遮断器開放 (単独運転発生) により系統サセプタンス値は変化し、単独運転発生後 0.83 秒にて本装置が単独運転を検出していることになり、良好なフィールド試験結果が得られた。

7. 開発製品試験

開発した単独運転検出装置は形式試験により性能を満足していることを確認した。

特に、単独運転検出能動方式の試験では、基本波成分に次数間高調波成分を任意の大きさ、位相で重畳させて、あるいは急変させて動作特性あるいは動作時間特性を試験するなど、従来のリレー試験にはない特殊な条件での試験を行い問題のないことを確認した。

本試験では、このようなまったく新しい交流試験に対しても試験条件が容易にかつ高精度に設定できるコンパクトな三相電力用試験装置 () により試験を実施した。

() 形式 CMC 256 - 6 (オーストリア オミクロン社製)

仕様 V : 0 ~ 300 V (4 相), I : 0 ~ 12.5 A (6 相),

精度 : 0.1 %

付加機能 : 高調波重畳, 過渡波形出力, 波形記録・波形再生

外形 : W 450 × H 145 × D 390 mm, 重量 :

16 kg

8. あとがき

次数間高調波電流注入という新しい方式に基づく単独運転検出方式を開発し、この方式を適用した能動式単独運転検出装置を実用化した。

関西電力(株)殿黒川配電系統の系統モデルでシミュレーションすることにより、系統への影響および保護性能において、

(1) 連系時にはほとんど系統に影響を与えない

(2) 同じ系統バンクに複数台設置された場合にも相互干渉を受けない

(3) 1 秒程度の短時間で単独運転検出が可能

という三つのニーズを満足することを検証し、能動式単独運転検出方式への信頼性を一段と高めることができた。

また、系統連系保護に必要な機能を一式搭載した標準装置とすることで、

(4) 分散電源の発電機の種類に関係なく使用可能

(5) 分散電源の発電機の容量に関係なく同じ装置で対応可能

(6) 分散電源設備の発電機の台数に関わらず 1 台の装置で対応可能

となり、高い汎用性を有するとともに、コストメリット

の高い装置とすることができた。

今後は、風力発電、マイクロガスタービン、燃料電池発電等の分散型電源の普及が進み、本装置の適用がますます拡大することが期待されている。

最後に、共同研究を通じて本方式の開発に際してご指導・ご協力いただいた関西電力(株)総合技術研究所の岡本主任研究員殿をはじめとする関係各位に深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 解説電力系統連系技術要件ガイドライン'98 資源エネルギー庁編，電力新報社発行
- (2) 本橋，近藤，石川，甲斐，金田，石塚：「配電線に連系される同期発電機の単独運転検出装置」平成11年電気学会論文誌B，1月号，P14～P23
- (3) 加藤，永安，岡土，野宮：「新しい発電機用単独運転保護回路」平成9年電気学会全国大会，1686
- (4) 香田，塚本，西村，夏田，蓑輪，鶴野：「高調波特性計測装置」日新電機技報，1998，Vol.43，No.2，P42～P47
- (5) 岡本，川上，多田，西村，蓑輪：「系統連系保護機能付き電圧変動補償装置の開発」平成12年電気評論，3月号，P38～P42
- (6) 西嶋，岡本，西村，蓑輪，志方，吉川：「次数間高調波注入方式単独運転検出装置の開発」平成12年電気学会全国大会，6-304
- (7) 岡本，西村，蓑輪，志方：「次数間高調波注入方式による単独運転検出装置」日新電機技報，2000，Vol.45，No.2 P3～P11
- (8) 岡本，西村，蓑輪，志方：「系統連系保護機能付き電力変動補償装置の開発[その2]」平成12年電気学会電力エネルギー部門大会，216
- (9) 岡本，西村，蓑輪，志方：「分散電源の新しい単独運転防止装置の開発」平成12年日本太陽エネルギー学会，日本風力エネルギー協会合同発表会，50

◆ 執筆者紹介

西 村 莊 治	技術開発センター システム開発グループ 主幹
蓑 輪 義 文	技術開発センター システム開発グループ
志 方 俊 彦	技術開発センター システム開発グループ
江 村 徳 男	社会環境事業部 ソリューションシステムグループ デジタル制御装置部 部長
竹 内 雅 靖	社会環境事業部 ソリューションシステムグループ デジタル制御装置部 課長
奥 田 誠	社会環境事業部 ソリューションシステムグループ デジタル制御装置部
北 野 信 之	社会環境事業部 ソリューションシステムグループ デジタル制御装置部
羽 田 儀 宏	社会環境事業部 ソリューションシステムグループ デジタル制御装置部
