

次数間高調波注入方式による 単独運転検出装置

Novel Islanding Phenomenon Detection System for Dispersed Power Sources

岡本 光明*
M. Okamoto

西村 莊治**
S. Nishimura

蓑輪 義文**
Y. Minowa

志方 俊彦**
T. Shikata

Synopsis

We have developed a novel islanding phenomenon detection system for dispersed power sources.

It is composed of a specific interharmonics current generator and a system impedance monitoring unit which calculates the interharmonic impedance by using DFT operation of voltages and currents on the distribution line.

The merits of our system are as follows;

- (1) Its influence on utility network is negligible.
- (2) Its performance is not subject to other power sources with similar detection system.
- (3) It is able to detect islanding phenomenon within 1 sec.

1. ま え が き

近年、省エネルギー意識の高まりに伴い、風力発電あるいはコジェネレーションなどの分散型電源が積極的に導入されつつある。配電系統に連系された分散型電源が、電力系統の事故など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状態で運転を継続すると、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）となり、次の問題が生じる。

- (1) 一般公衆あるいは保守員が充電された電路に触れて感電する可能性がある。
- (2) 開放された遮断器の再開路の際に非同期投入をして機器を損傷する可能性がある。

これでは、保安あるいは供給信頼度の問題があるので、系統側が供給停止時には分散電源側の単独運転を早急に検出して、系統から確実に解列する必要がある。そこで「電力系統連系技術要件ガイドライン」（以下ガイドライン）で技術的指標を示しているように、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している。

しかし、転送遮断装置はコストや運用上の課題があり、単独運転防止機能としては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。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、これらの方式には、

- (1) 連系時、フリッカ等の電圧変動を引き起こす可能性が考えられる。
- (2) 単独運転検出装置が複数台設置された場合に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ない可能性がある。
- (3) 開放点において電力需給バランスが平衡している場合、あるいは近辺の需要家に大容量の分散型電源（あるいはモータ負荷）が設置されている場合に検出時間が極めて長くなることがある。

などの課題が残っている。

本論文では、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原理に基づいて開発した能動的な方式単独運転検出装置を紹介する。

* 関西電力㈱
** 技術開発センター システム開発グループ

2. 次数間高調波注入による単独運転検出原理

次数間高調波とは、**図1**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、電源周波数に同期させて計測すれば定常的にほとんど存在しない（電圧では基本波成分に対して0.01%程度のレベルとなる）。したがって、次数間高調波電流を連系点に微量量系統に注入するだけで、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2**ならびに**図3**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は小さいが、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。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。

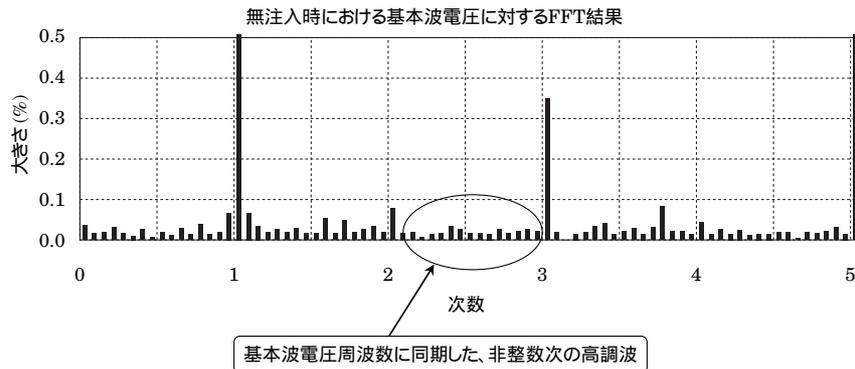


図1 無注入時における基本波電圧に対するFFT結果

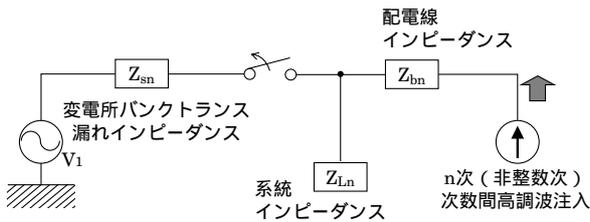


図2 単独運転発生時の系統モデル図

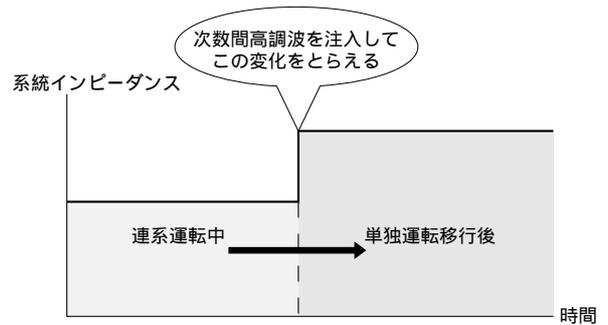


図3 単独運転検出原理図

3. 装置構成と仕様

3.1 構成

本装置のシステム構成を**図4**に示す。本装置は、同期制御部、判定部および次数間高調波電流注入部にて構成される。

同期制御部では、配電系統の電圧・電流を系統基本波（電圧）周波数に対して同期サンプリングにて計測している。判定部にはCPUが内蔵され、計測サンプリング周期を系統電圧1周期に対して、128点の高速サンプリングとし、DFT(Discrete Fourier Transformation: 離散的フーリエ変換)演算を行い、注入次数に対する系統インピ

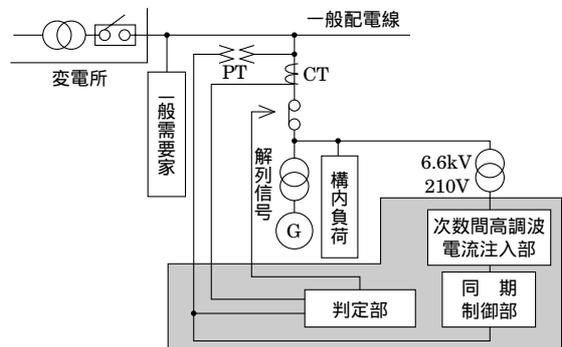


図4 システム構成図

ーダンスを算出・監視している。次数間高調波電流注入部は、小容量の電圧型インバータで構成されており、同期制御部より送出された系統周波数に同期した次数間高調波注入信号を受け、系統に電流を注入している。

3・2 仕様

- (1) 注入電流：最大1.5 A (6.6 kV 側において)
- (2) 注入による次数間高調波電圧歪み
：高圧系基本波電圧に対して0.3 % 以下
- (3) 計測要素：三相電圧および三相電流
- (4) 注入次数：2～4 次における次数間高調波とし、
1/16 (あるいは1/32) ステップずつの次数間高調波の選択が可能である。
例：2 + 1/16 次，2 + 2/16 次，…
注入次数はフリッカなど電力品質に影響を与えないことと、系統に存在する力率改善用コンデンサに影響されないことから、2～4 次間に設定した。
- (5) 計測サンプリング周期
：基本波電圧周波数に対して、128 点サンプリングとする。
電源周波数が60Hzの場合、
60 Hz × 128 点 = 7.68 kHz となる。
なお、系統電圧基本波周波数に対して同期サンプリング計測を実施。

(6) 系統インピーダンス演算周期

：基本波電圧 60Hz，基本波 16 周期計測データより連続で算出する場合
1/60 × 16 周期 = 約 0.27 秒間の計測データより連続で算出している。

(7) 外形寸法：W 500 × D 500 × H 700 mm

図 5 に装置外観を示す。

本仕様は後述の関西電力(株)黒川風力発電所向けの装置であり、電圧・電流計測用 PT，CT を内蔵している。

注入部は電圧変動補償装置 (自励式 SVC) のインバータを使用 (共用) しており、注入容量は約 6 kVA (6.6 kV 系統において次数間高調波電流を 0.5 A 程度注入) である。

4. 単独運転検出フロー

本装置の単独運転検出フローを図 6 に示す。本装置は次の 2 項目の判定要素を有している。

系統インピーダンスの変化レベル整定値 (変化方向も監視)

検出時間 (単独運転状態継続時間) 整定値

常時、配電系統における電圧・電流を計測し、注入次数に対する系統インピーダンス (実際には監視のしやすさからアドミタンスの虚部であるサセプタンス) を常時監視しておく。CPU メモリ内に過去サセプタンス計測



図 5 単独運転検出装置 (黒川風力発電所設置)
(W 500 × D 500 × H 700 mm)

値（例：1秒前計測値）を保存しておき、現在サセプタンス計測値との比較を行い、変化が生じていないかを監視しておく。もし過去サセプタンス計測値に対して、現在サセプタンス計測値が容量性方向に「変化レベル整定値」以上に変化すれば、継続時間のカウンタを開始する。この時間カウンタが「検出時間整定値」以上継続すれば、単独運転状態と判定する。

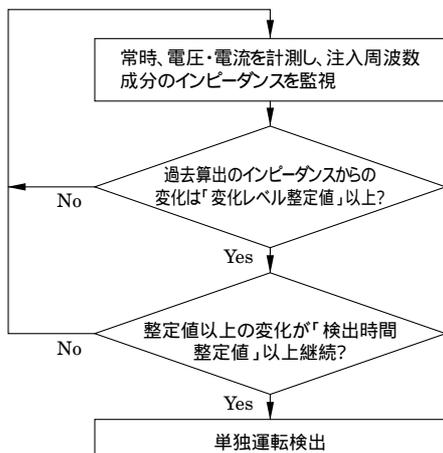


図6 検出フロー

5. 特徴

本単独運転検出装置の特徴を表1に示す。

表1 本方式の特長

各方式 評価指標	本方式	無効電力変動方式 (基本的方式)
系統への影響	基本波電圧に対して約0.1%程度の次数間高調波を注入	複数台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
複数台設置による相互干渉	注入周波数の高精度分離により影響なし	影響を受けないためには変動周期の同期が必要
検出時限	0.5~1秒での短時間にて検出	場合により数秒~10秒程度要する
装置容量	系統電圧の歪み約0.1%程度の次数間高調波注入容量にて可能	検出精度向上には装置容量が大
総合		

(1) 前述したように、定常的に系統に存在しない次数間高調波を用いており、基本波周波数に対して常時、同期サンプリング計測を行うことで、高調波インピーダンスの算出を高精度化し、かつ注入電流の低減により、連系時における系統への影響が小さい。注入電圧歪みは基本波電圧に対して、たかだか0.1~0.3%程度にすぎない。

一般の能動式単独運転検出方式は、系統基本波電圧・電流を能動信号により0.1~0.5秒周期的に変動させる方式であり、基本波電圧の周期的な変動により生じるフリッカあるいはビートといった現象を引き起こす可能性があるが、本方式は基本波成分を使用していないため原理的にこのような心配はない。

(2) 上記(1)による同期サンプリング計測にて、他の次数間高調波との高精度分離を実現しているため、たとえ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、別々に設定したそれぞれ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) 次数間高調波を適用し、高速サンプリング計測を行いつつ、CPUメモリ内に保存された注入次数の系統インピーダンスの過去計測値と現在計測値との変化量(変化方向含めて)を監視することにより、単独運転検出時間が0.5~1秒程度という短時間検出を可能としている。

6. シミュレーションによる検証

図12に示す黒川配電系統シミュレーションモデルにおいて、単独運転発生時の系統サセプタンス変化についてのシミュレーション検証を進めた。

6.1 単独運転発生時の電圧変動・周波数変動による影響について

前述したように、本装置は系統電圧に同期した系統サセプタンス計測を行なっている。そのため、単独運転発生時に電圧周波数変化およびレベル変化が生じない場合は、特に影響を受けることなく安定した系統サセプタンス計測ができる。

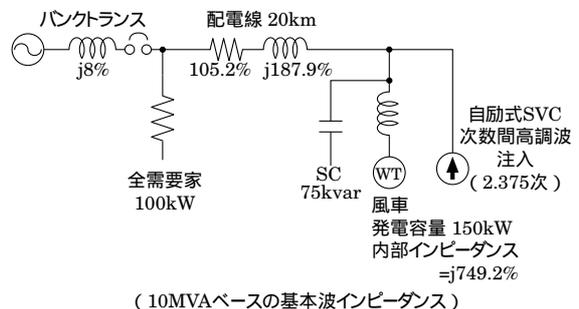


図12 黒川配電系統シミュレーションモデル

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、系統周波数に対し正確な同期ができなくなるため、系統サセプタンスの計測に悪影響を与える可能性が考えられる。そこで、単独運転発生時の電圧変動および周波数変動を想定したシミュレーションを行なった。

(1) シミュレーション結果1 (図7)

電圧変動および周波数変化が生じない場合

(2) シミュレーション結果2 (図8)

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

(3) シミュレーション結果3 (図9)

1秒当たり40%の電圧上昇、および1秒当たり2Hzの周波数上昇が発生すると想定した場合

それぞれの図に示すように、単独運転検出条件は、
 系統サセプタンスの変化レベル整定値 = -0.1 pu (連系時のサセプタンス値 = -0.2 puの50%値)
 検出整定時間 = 0.5秒にて単独運転を検出とした。

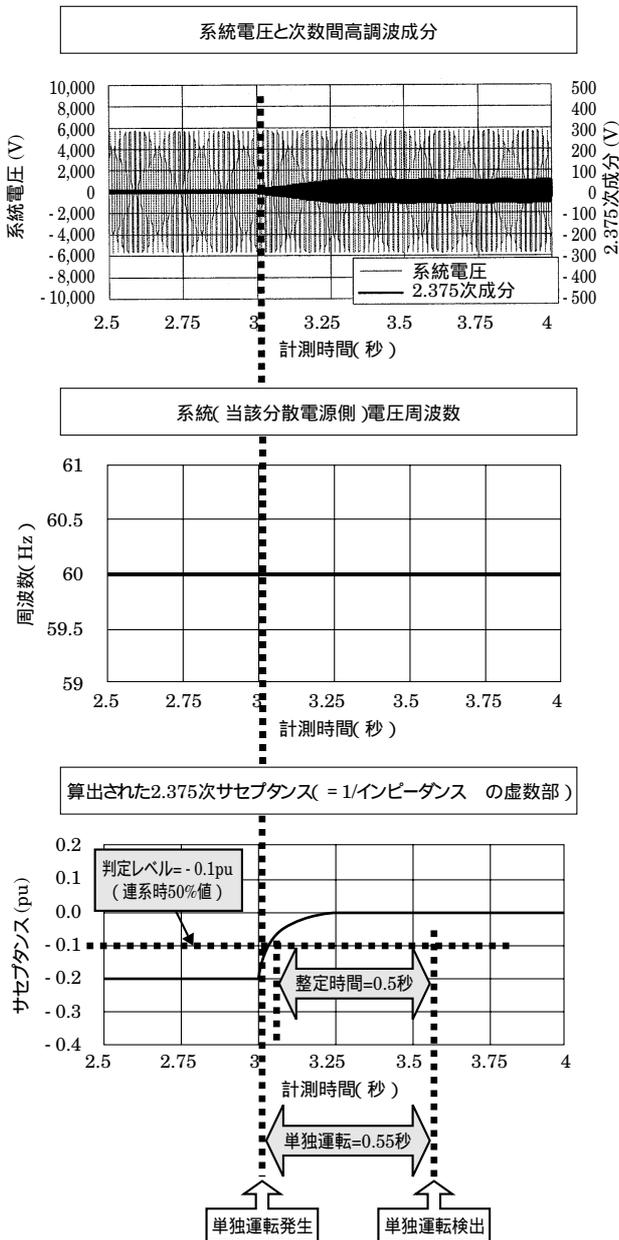


図7 シミュレーション結果1

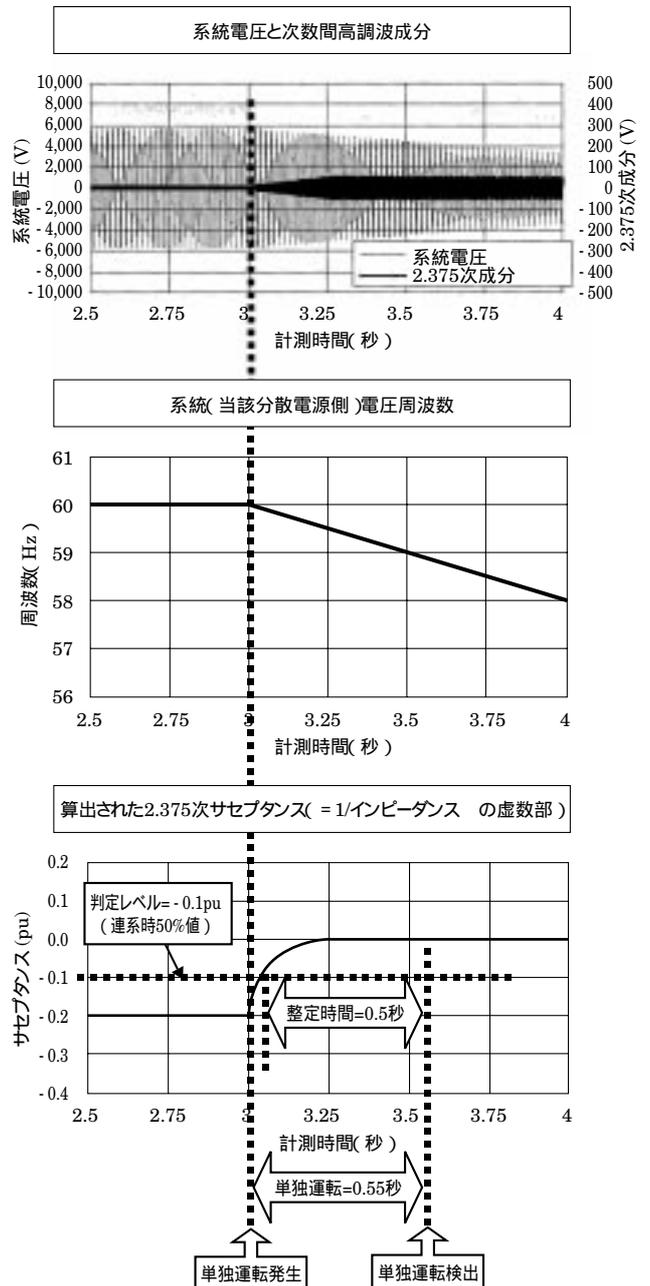


図8 シミュレーション結果2

シミュレーション結果より、この条件において0.6秒程度にて単独運転検出できることを確認した。

6・2 複数台設置による干渉の影響について

同方式の単独運転検出装置の複数台設置を想定し、それぞれ隣接した異なった次数の次数間高調波を注入し、それぞれの注入周波数を分離することで相互干渉なく、0.6秒程度の短時間にて単独運転検出できることを確認した(図10)。また、設置台数が他の場合でも同様の結果であることも確認している。

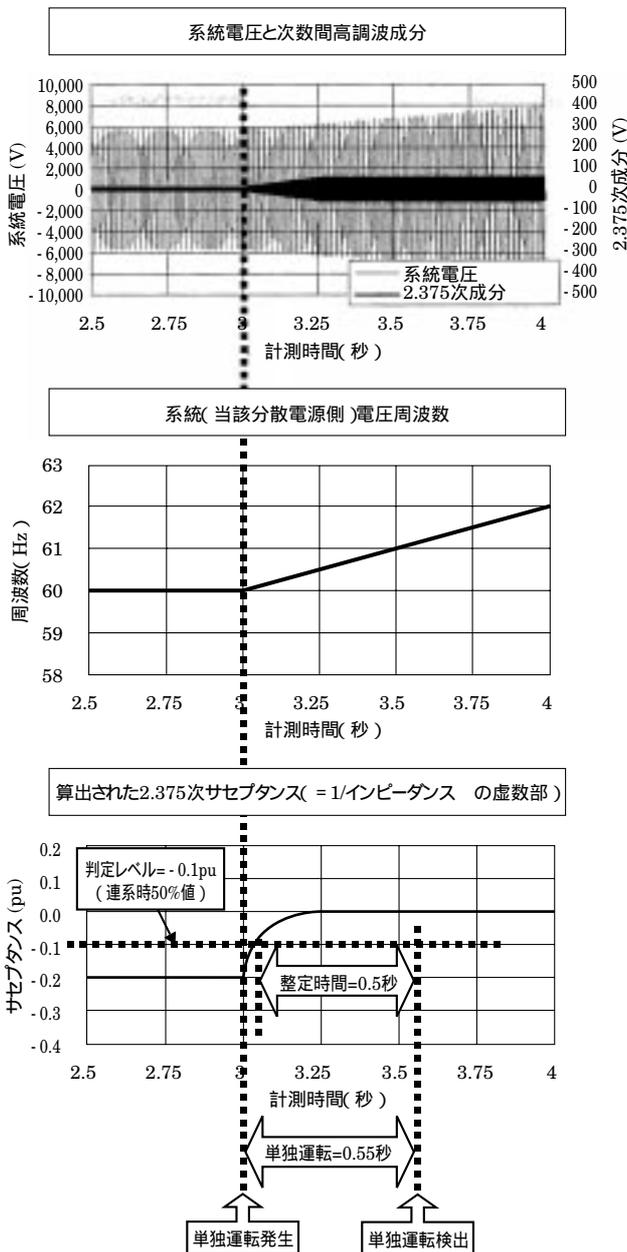


図9 シミュレーション結果 3

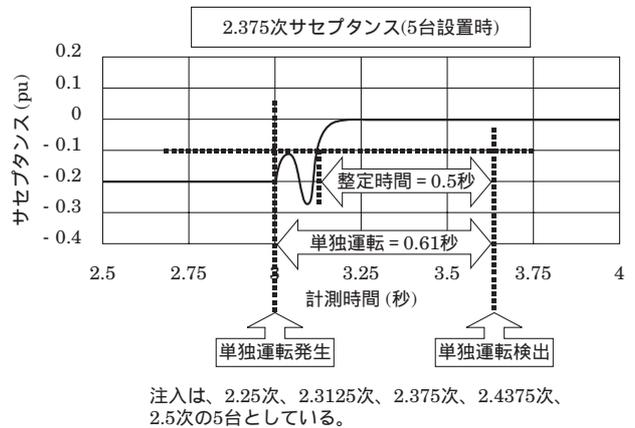


図10 複数台設置時の(2.375次)アドミタンス変化の様子

6・3 分散電源(発電機)容量の影響について

本方式は配電系統インピーダンス変化をとらえる方式であるが、一般に発電機容量はほとんど影響を受けない。図11に示すように、注入電流一定で発電機容量を約3倍と想定しても、確実に単独運転検出できることを確認した。

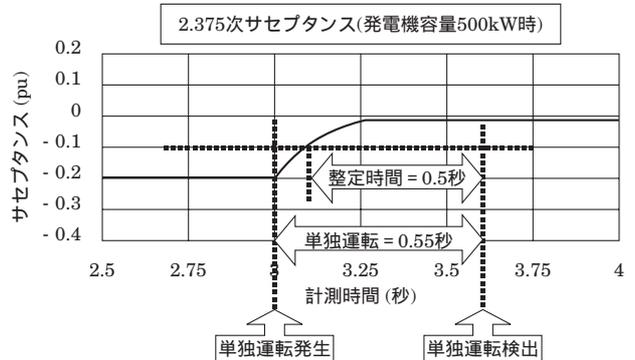


図11 発電機容量を500kWとした場合のアドミタンス変化の様子

また、図13に示すように近辺の他の需要家において大容量の発電機(ならびにモータ負荷)が設置された場合でも検出時間には影響を受けない。さらに、単独運転発生後のサセプタンス値には、近辺の発電機のリアクタンス分が残ることとなるが、単独運転判定レベルを系統連系時のサセプタンス値に対しての変化の割合として整定する(図13では連系時サセプタンス値に対して50%値としている)ことで、単独運転検出できることも確認している。

なお、一般にサセプタンス値変化の整定値は、電力系統供給停止によるサセプタンス変化 bs と他需要家の発電機解列によるサセプタンス変化 bd の差(通常は $|bs| \gg |bd|$ とと思われる)が区別できる設定であればよい。

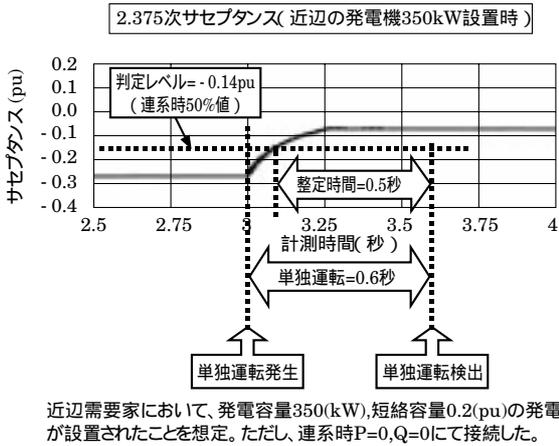
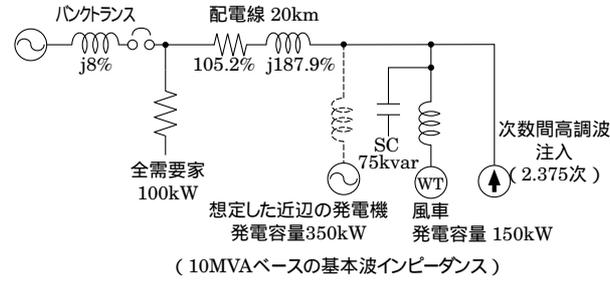


図 13 近辺に発電機 (350 kW) が設置された場合の単独運転発生時におけるアドミタンス変化の様子

7. 性能検証試験

7・1 系統連系時における検証

黒川風力発電所において、注入次数 2.375 次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 14 に系統電圧周波数特性を示す。本装置より注入した結果、電圧歪みが系統に影響を与えない程度とすることを考慮して、6.6 kV 系基本波電圧に対し 0.3 % 程度の歪みとなるよう注入している。また、注入次数 (2.375 次) 成分は他の (周辺の) 次数間高調波成分より十分大きい。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 15 に、黒川配電線での系統連系時における 2.375 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。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。

なお、本単独運転検出装置は、電圧変動補償装置 (自励式 SVC) に組み込まれており、そのインバータを使用して、次数間高調波電流を注入する構成となっている。

7・2 単独運転検出動作検証試験

今回は試験の都合上、図 16 に示すように、発電所内において単独運転状態を発生させることにて実施した。

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 17 に試験結果を示す。

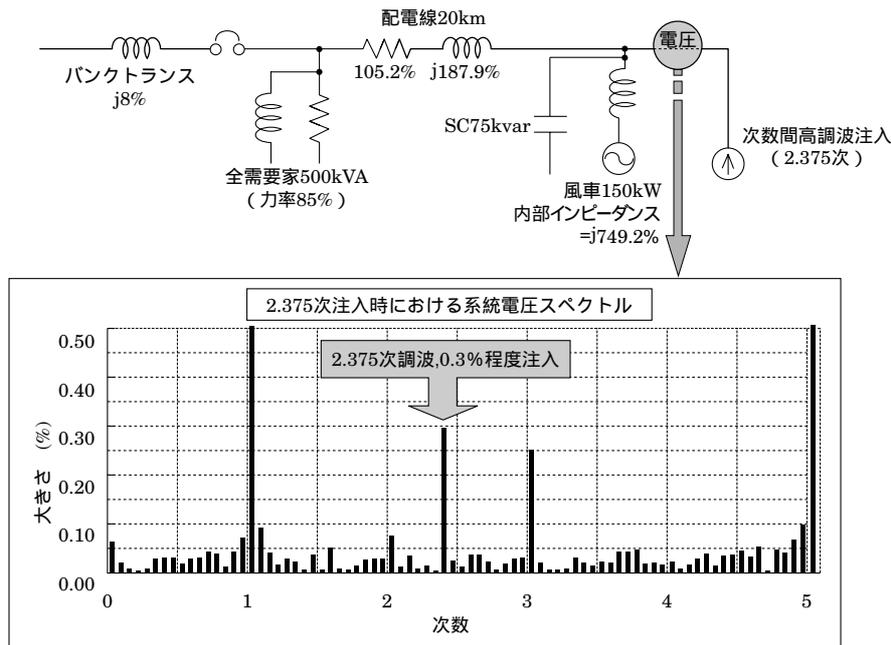


図 14 黒川風力発電所系統モデルと系統電圧スペクトル

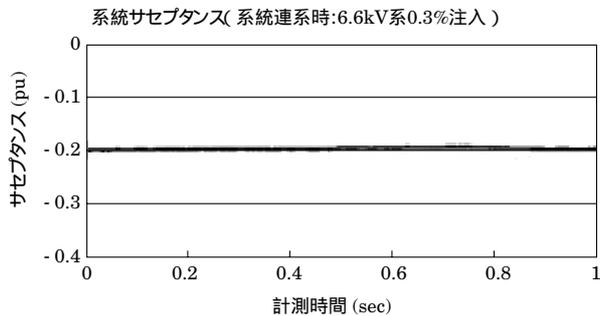


図 15 系統連系時の系統サセプタンス計測結果

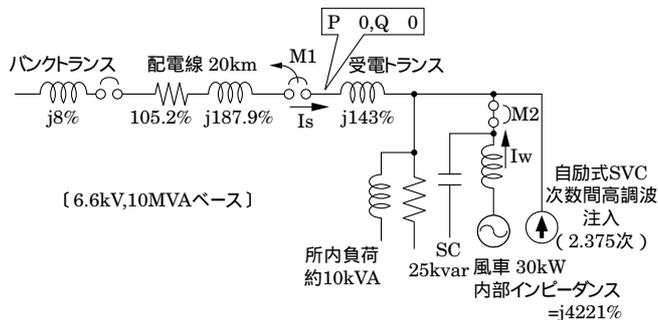


図 16 単独運転検出検証試験システムモデル

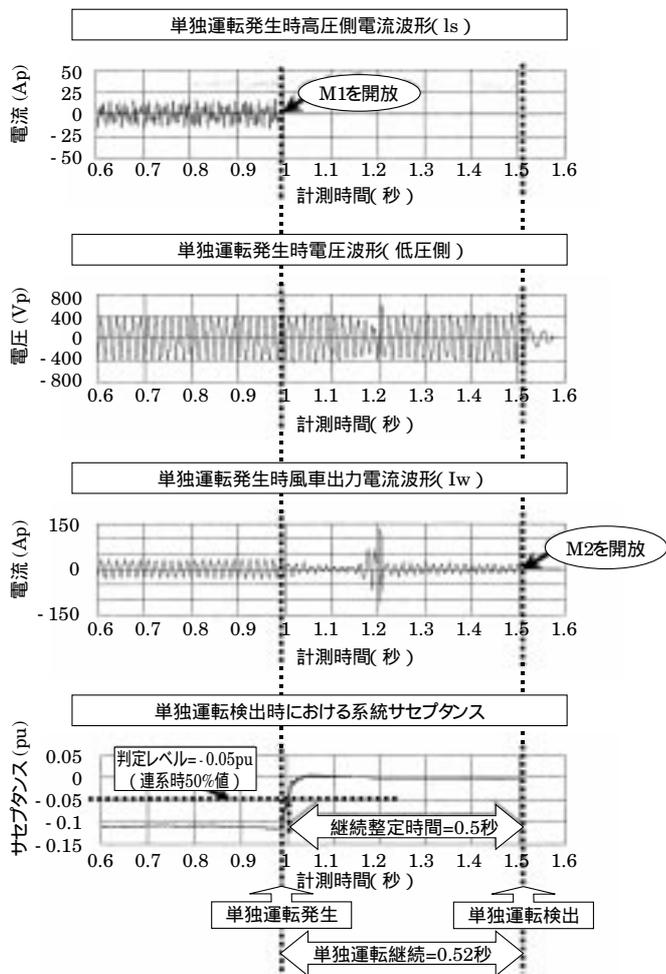


図 17 単独運転検出検証試験結果

本装置の単独運転検出条件は次のとおりとした。

単独運転状態判定レベル整定値 = -0.05 pu
 連系時における系統サセプタンス値 = -0.12 pu の約 50% 値とした。

なお、連系時の系統サセプタンス値は図 16 より概算すると次のようになる。

連系点から眺めた上位系基本波インピーダンス = $j 3.389$ (pu) at 10 MVA ベース

連系点から眺めた 2.375 次上位系インピーダンス = $j 8.049$ (pu)

2.375 次サセプタンス = $\text{Im} [1 / (j 8.049)] = -j 0.12$ (pu)
 本値は図 17 に示す系統連系時における系統サセプタンス値と一致している。

単独運転検出整定時間 = 0.5 秒

図 17 に示すように、計測時間約 1 秒付近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（自動式 SVC 含）との電力需給バランスが平衡となるような状態をつくり出したため、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 0.52 秒にて本装置が単独運転を検出している。即ち 0.5 秒の検出整定時間を考慮すれば極めて短時間で単独運転状態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。

8. あとがき

次数間高調波電流注入による単独運転検出装置の開発・適用により、

- (1) 連系時にはほとんど系統に影響を与えない
- (2) 複数台設置された場合にも相互干渉を受けない
- (3) 他に大容量の分散電源（あるいはモータ負荷）が設置されている場合でも、影響を受けることなく、短時間（0.5～1 秒）にて単独運転検出が可能

の三つの課題を満足する能動式単独運転検出方式をはじめて実現した。これにより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。

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、本装置の開発に際してご指導・ご協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。

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) 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
- (3) 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, P14~23
- (4) 浅野, 谷口, 宅間, 垣本, 石川: 「回転機型分散電源の配電系統への連系による系統特性の解析」平成12年電気学会全国大会, 6 - 110
- (5) 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, P42~47
- (6) 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, P38~42
- (7) 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

◆ 執筆者紹介



岡 本 光 明

1973年関西電力(株)入社。主として, 風力発電の研究に従事。現在, 総合技術研究所主任研究員。



西 村 荘 治

1974年入社。主として, 電力系統の計測システムの開発に従事。現在, 技術開発センターシステム開発グループ主幹。



蓑 輪 義 文

1992年入社。主として, 分散型電源の単独運転検出装置の開発に従事。現在, 技術開発センターシステム開発グループ。



志 方 俊 彦

1993年入社。主として, 分散型電源の単独運転検出装置の開発に従事。現在, 技術開発センターシステム開発グループ。