



次数間高調波注入方式による単独運転検出の製品改良とその適用状況

Improvement of Islanding Detector Using Interharmonics Current Injection Method and Its Applications

石倉 定幸*
Sadayuki Ishikura

中谷 英之
Hideyuki Nakatani

高木 潤哉
Junya Takagi

深田 勉
Tsutomu Fukada

西村 莊治
Shoji Nishimura

羽田 儀宏
Yoshihiro Hada

再生可能エネルギーによる分散型電源を電力系統に連系する場合、単独運転を防止するための保護装置が必要である。2001年に当社は、次数間高調波注入方式を用いた新しい単独運転検出装置を開発し、広く適用されている。本稿では、検出原理とFRT要件への対応状況、および適用状況を紹介する。

When distributed generation resources, such as renewable energy sources, are interconnected to electric power grids, anti-islanding protection devices are necessary. In 2001, we developed an islanding detector using the interharmonics current injection method, and since then it has been widely used. This paper introduces the principle, fault ride through (FRT) capability, and applications of the detector.

キーワード：系統連系、分散型電源、次数間高調波、逆潮流、単独運転検出

1. 緒言

近年、再生可能エネルギーとして太陽光発電・風力発電・水力発電・ごみ処理施設の廃熱を活用した発電・バイオマス発電など、分散型電源が増加の一途を辿っている。こうした分散型電源を電力系統と連系する場合、系統電源喪失時の逆充電による単独運転を防止することが求められる。従来は転送遮断装置による保護が一般的に採用されていた。しかし、転送遮断装置は変電所側と分散型電源設備設置者側の双方に転送送受信装置を要し、また両者の間に専用通信線を必要とするなど、設置スペースや費用面、保守・運用の複雑化などの問題があった(図1上図)。

当社では、2000年度に関西電力(株)との共同研究のもと、

新しい理論に基づき独自の特長を持った次数間高調波注入方式による単独運転検出装置(以降本装置、製品名：エネリンク)を開発した(図1下図)。

現在、日本国内の全ての電力会社管内へ納入し順調に稼働している。そこで今回、その原理、工夫、検証試験結果、改良、および、適用状況を紹介する。

2. 単独運転検出方式の開発

2-1 次数間高調波注入方式の原理

次数間高調波とは、図2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しか存在しない(電圧では基本波成分に対して0.01%程度のレベルである)。

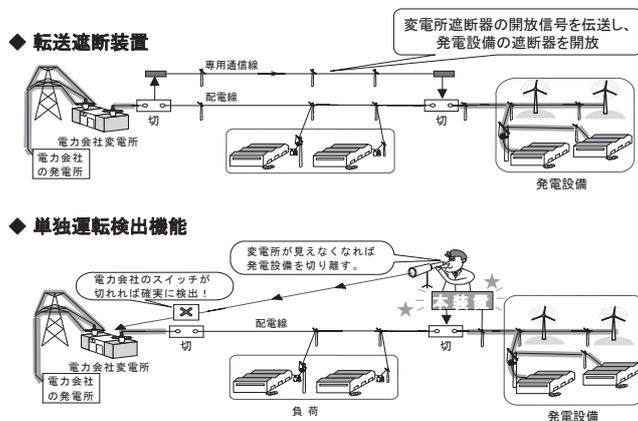


図1 転送遮断装置と単独運転検出装置の比較

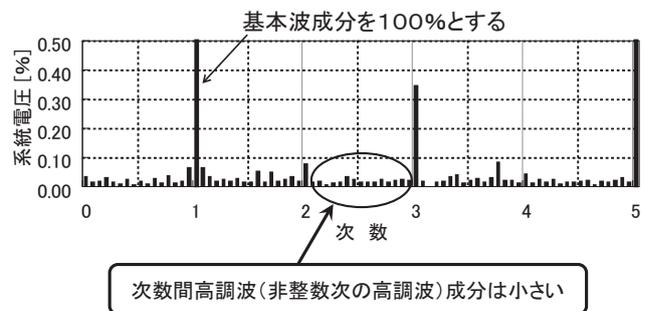


図2 無注入時における配電系統電圧の周波数特性

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以下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4)。

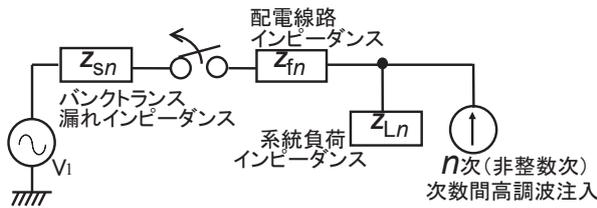


図3 単独運転発生時の系統モデル図

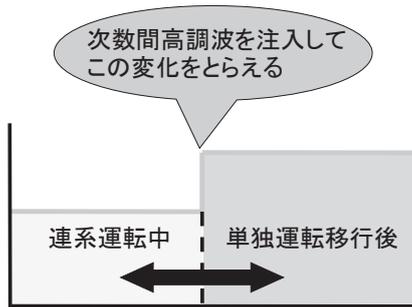


図4 単独運転検出原理図

2-2 装置構成と実用化に向けての工夫

本方式のシステム構成および本装置の構成を図5に示す。本装置は、次数間高調波信号発生部、電流注入部および判定部にて構成される。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 Transform: 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。

実用化に向けての1つの工夫として、次数間高調波注入インバータに直列にLC共振回路(注入次数間高調波:共振周波数の近傍、基本波:共振周波数から遠方)を挿入することで注入インバータの小容量化を実現した(図6)。

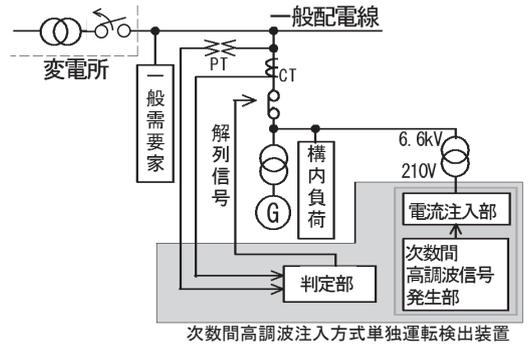


図5 本方式のシステム構成と単独運転検出装置の構成

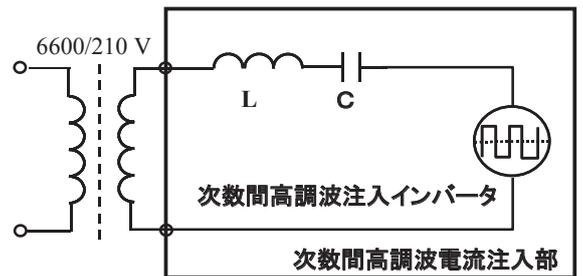


図6 次数間高調波注入インバータの小容量化

2-3 実システムでの検証試験

関西電力(株)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(144Hz)調波電流を本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7に系統電圧周波数特性を示す。図7に示すように、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た。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。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

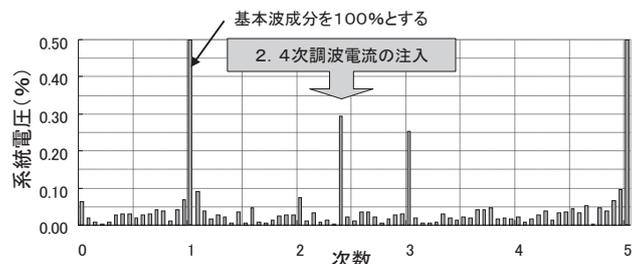


図7 黒川風力発電所の次数間高調波電流注入時の系統電圧スペクトル

ば、相互干渉を受けないことを示している。

単独運転検出動作検証試験は、**図8**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とし、実施した。

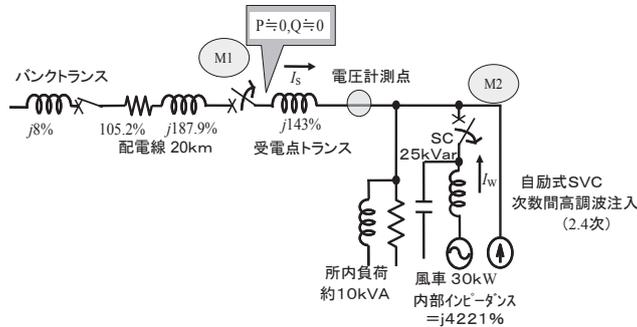


図8 単独運転検出検証試験の系統回路モデル

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、所内負荷および自動式SVC (Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置) 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。なお、検出のしやすさから実際にはインピーダンスの逆数の虚部であるサセプタンスを監視している。**図9**に試験結果を示す。

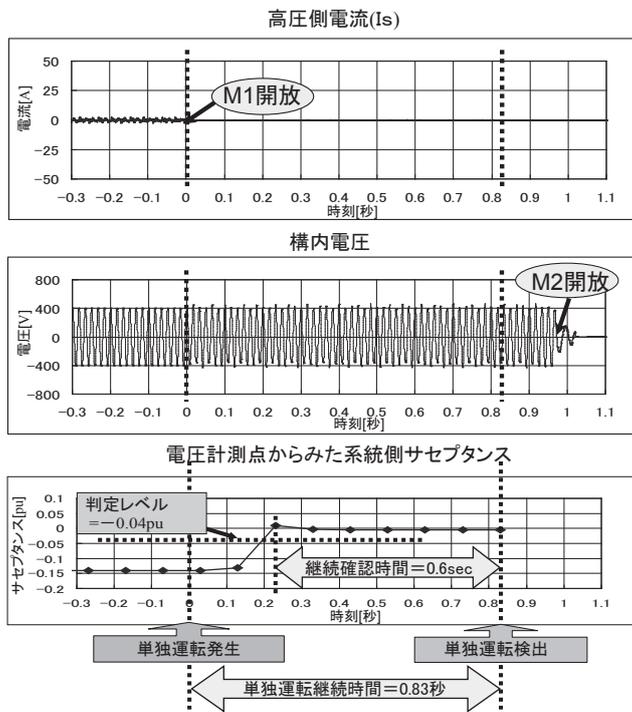


図9 単独運転検出検証試験の結果

本装置の単独運転検出条件を以下(1)、(2)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
 定値 = -0.04pu

連系時における系統サセプタンス計測値 -0.14pu の約30%値とする(ただし10MVA, 6.6kVを1pu)。この系統サセプタンス計測値は**図8**での回路計算(実効値計算)による注入次数(2.4次)サセプタンスの算出値 $-j0.123pu$ とほぼ一致している。

- (2) 単独運転継続時間 = 0.6秒

図9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。1秒以内の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。

3. 特長

3-1 連系に必要な保護装置

分散型電源を電力系統へ連系するためには、分散型電源故障時の保護、連系系統事故時の保護および単独運転防止を目的とした各保護リレーの設置が必要である。系統連系時の技術要件は系統連系規程に定められている。

本装置は、分散型電源を電力系統に連系するために必要な保護リレーを全て内蔵している(**表1**)。

表1 系統連系時に必要な保護装置(高圧連系の場合)

保護対象等	同期発電機		誘導発電機		逆変換装置	
	有り	無し	有り	無し	有り	無し
逆潮流の種類						
発電設備故障時の系統保護	OVR、UVR					
系統の短絡事故時の保護	DSR		UVR			
系統の地絡事故時の保護	OVGR					
単独運転の防止	OFR	○	-	○	-	○
	UFR	○	○	○	○	○
	RPR	-	○	-	○	-
転送遮断装置 又は 単独運転検出機能	○	-	○	-	○	-
再開路時の事故防止	線路無電圧確認装置					

分散型電源を逆潮流有りで連系する場合は、転送遮断装置又は「単独運転検出機能」の設置が連系要件となっている。昨今、転送遮断装置の設置スペースや費用面、保守・運用の複雑化、施工期間などの問題があり、単独運転検出機能を採用することが比較的多くなってきている。

また、単独運転検出機能の能動方式、受動方式でそれぞれ異なる遮断器を解列することで、再開路時の事故防止用に設置を求められている線路無電圧確認装置を省略することも可能となっている。

3-2 次数間高調波注入方式の特長

本装置は、他方式の単独運転検出装置と比較して、以下の特長がある。

(1) 系統への影響が軽微である

本方式は、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、従来方式の基本波の周期的な変動による電圧変動（フリッカ）を引き起こす心配はない。

(2) 複数台設置による相互干渉がない

本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、相互干渉を防止できる。

(3) 1秒程度の短時間で検出する

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) 分散型電源の種類を選ばない

本装置は、分散型電源に外付けで設置されるので、分散型電源の種類に関係なく対応でき、汎用性に優れている。

(5) 複数台まとめた保護が可能

本装置は、連系点が1箇所であれば、複数台の分散型電源がある場合でも、本装置1台で保護可能となり、コストの低減が図れる。

(6) 複数の系統切替に対応可能

本装置は、系統切替（配電線の経路変更）があっても、複数系統で検出できる設定にすることにより、1台で対応可能である。

(7) 特別高圧系統にも適用可能

本方式は、インピーダンス変化で検出する方式であるため、従来転送遮断装置しかなかった35kV以下の特別高圧系統にも適用可能であり、コストの低減が図れる。

4. FRT要件への対応

4-1 FRT要件とは

近年の太陽光発電・風力発電等をはじめとする、分散型電源の系統連系の増加に伴い、送電線事故による瞬時電圧低下時等、これら分散型電源が一斉解列や出力低下継続した場合、系統全体の電圧・周波数維持に大きな影響を与える可能性が高くなってきている。このため2012年に系統連系規程が改訂され、各種分散型電源には、系統事故における波及を極小化するための新たな要件として、事故時運

転継続（FRT：Fault Ride Through）要件（以降、「FRT要件」）が追加された。この要件は、主に系統事故による系統電圧の瞬時低下と系統周波数の過渡的変動に対する、分散型電源の継続運転・出力復帰の要件を規定しているものである。

4-2 単独運転検出方式とFRT要件

本装置は、系統連系規程に定められる単独運転検出機能として、次数間高調波注入方式（能動的方式）及び電圧位相跳躍検出方式（受動的方式）を採用している。

FRT要件は、系統送電線事故に伴う電圧低下及び周波数変動発生時に、発電設備が運転継続及び出力復帰する条件を規定しているが、これは連系配電線電圧（低圧・高圧・特別高圧）、及び発電設備の種類により、詳細条件が異なっている。本装置は保護装置であるため、FRT要件に規定されている電圧低下・周波数変動では不要解列させず、かつ単独運転防止要件を満たすことが必要となる。このため改良に当たっては、系統連系規程に示される電圧低下・周波数変動の詳細条件の全パターンにおいて検証を行い、発電設備を問わずFRT要件を適用できることを確認した。

4-3 単独運転検出方式の改良

(1) 能動的方式

次数間高調波注入方式は、次数間高調波電流を連系点から微量注入し、注入次数に対する電圧・電流値から系統インピーダンスを計測し、その変化により単独運転状態を検出する方式である。このため、原理的に系統の電圧変動・周波数変動の影響を受けることはなく、FRT要件に求められる電圧低下、周波数変動により、不要解列させることはない。

(2) 受動的方式

FRT要件にて規定されている電圧低下・周波数変動にて不要動作せぬよう、以下の改良を行った。

①電圧低下要件

従来、Vab相のみを取り込み、電圧及び位相跳躍を計測していた。この方式では、FRT要件に示される、他相での二相短絡事故時などで動作する可能性があった。このため、監視電圧条件を三相とした。（位相跳躍監視はVabのみ）。

②周波数変動要件

FRT要件に規定されているランプ変動及びステップ変動が発生した場合、位相跳躍と誤認識する恐れがある。そのため、周波数変動補正処理・周波数平均化処理の見直し及び位相跳躍判定と周波数変動判定を組み合わせた変更を実施した。

今回の改良で、本装置は新しく改訂された、系統連系規程の2016年版で規定されている、各発電設備のFRT要件に対応することができた。

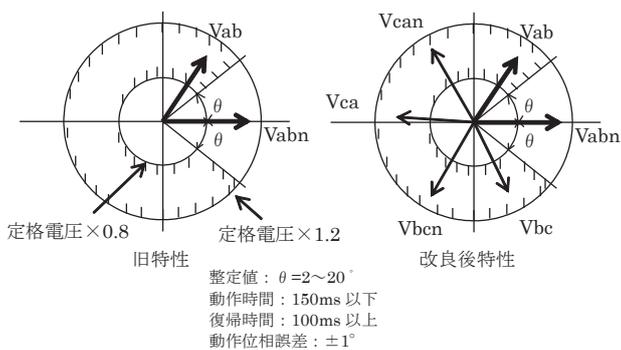


図10 受動要素リレー特性

5. 適用状況

5-1 大規模太陽光発電所（メガソーラ）への適用

近年、再生可能エネルギー発電として、大規模太陽光発電所（メガソーラ）が脚光を浴びている。

メガソーラでは、単体での出力が100kW～500kW程度の複数台のパワーコンディショナ（以下PCS）を並列に接続し、MW級の発電量を得る方式が一般的である。

PCSには、通常無効電力変動方式を使用した、単独運転検出機能を保有しているものが多いが、この方式では以下のような課題があった。

- (1) 通常は複数台のPCSが同期して無効電力を制御し単独運転状態の検出を行うが、異メーカー間のPCSでは、同期した制御ができない可能性がある。
- (2) 大容量のPCSでは、無効電力変動による配電系統への影響が懸念される。
- (3) PCSの付帯機能として、SVC機能を設ける場合があるが、この時無効電力変動方式と干渉し、単独運転状態を正常検出できない可能性がある。

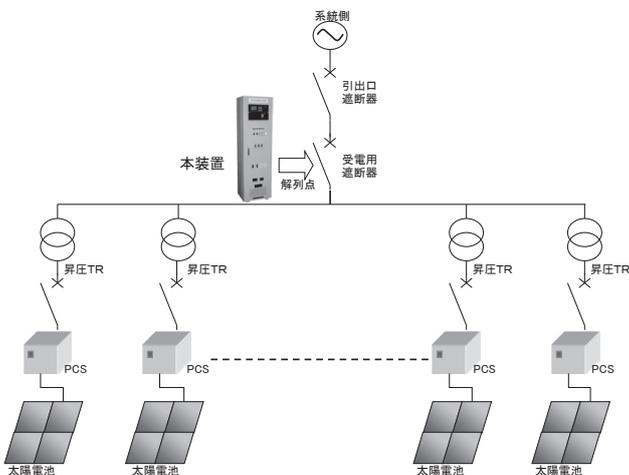


図11 メガソーラへの適用イメージ図

(4) 複数台のPCSがマスタスレーブ構成（マスタPCSの信号によって全スレーブPCSが同期する構成）であった場合、マスタPCSが故障すると単独運転検出機能が喪失する可能性がある。

本装置の次数間高調波注入方式は上記のような課題を解決でき、メガソーラにおいても、全PCSの一次側の1箇所の連系点に本装置を1台適用することで対応が可能となる（図11）。

5-2 同一配電線上の複数の分散型電源への適用

従来の単独運転検出機能（能動的方式）には、「無効電力変動方式」、「無効電力補償方式」、「QCモード周波数シフト方式」、「負荷変動方式」などの方式がある。

これらの方式においては、同一配電線上の複数の分散型電源に設置された場合、以下のような課題があった。

- (1) 複数台設置時に相互干渉を引き起こし、確実に単独運転状態を検出できない可能性がある。
- (2) 複数台設置時には、フリッカを引き起こす可能性がある。
- (3) 単独運転状態の検出時間が通常より長くなる可能性がある。

本装置においては、注入する次数間高調波の周波数をCH1（2.26次）～CH12（2.73次）まで、12種類から簡単な設定により選択することができる。各々の装置は自らが設定された注入次数における系統のインピーダンス監視を行う。このことにより、本装置導入時に配電用変電所の同一バンク内で同じ注入次数とならないように管理することで、同一配電線上の複数の分散型電源にも、本装置を適用することができる（図12）。

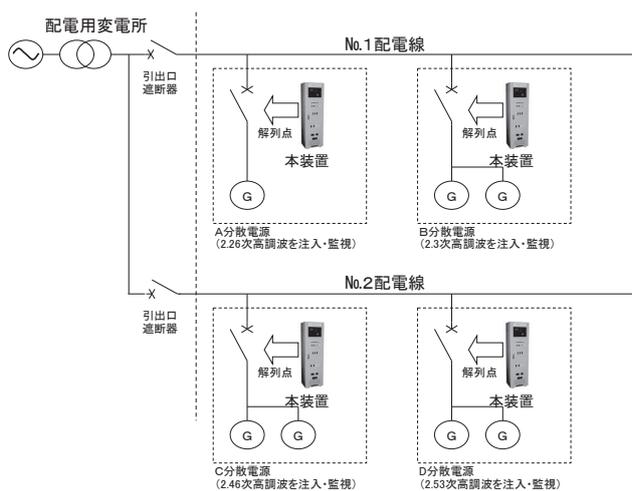


図12 同一配電線上の複数台設置のイメージ図

6. 結 言

本装置によって単独運転状態を短時間で確実に検出できるとともに、分散型電源の種類や容量・台数に関係なく高い汎用性を持った単独運転検出を実現でき、より効率的で信頼性の高い分散型電源の構築が可能となった。

なお、本装置の開発時には、関西電力 総合技術研究所(現 技術研究所) 殿との共同研究のもと、実系統での性能検証試験を実施し、性能確認を行った。2001年の製品化後2016年現在で350セット以上の適用実績を得ており、今後も、分散型電源の増大に寄与できるものと考えている。

・エネリンクは日新電機㈱の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 社団法人 日本電気協会、「系統連系規程」JEAC9701-2016
- (2) 山本、西村、蓑輪、夏田、「分散電源の単独運転検出装置の開発 一次数間高調波高調波注入」、電気設備学会誌、第24巻(2004年12月)
- (3) 田村、西村、植村、石倉、山本、H18年度電気設備学会全国大会G2「次数間高調波注入方式による分散型電源の単独運転検出装置」
- (4) 西村、蓑輪、志方、江村、竹内、奥田、北野、羽田、日新電機技報 Vol.46、No.2、「次数間高調波注入による単独運転検出方式と製品開発」
- (5) 長崎、羽田、電気評論2003年3月号、「発電機に依存しない単独運転検出装置の開発」
- (6) 大槻、山本、高木、深田、石倉、2012年保護リレーシステム研究会、「分散型電源の単独運転検出装置の適用実績」
- (7) 石倉、高木、深田、田村、2014年電気学会全国大会、「FRT要件対応への単独運転検出装置の改良」

執 筆 者

石倉 定幸* : 日新電機㈱ 受配電機器事業部 主査



中谷 英之 : 日新電機㈱ 受配電機器事業部 部長
テクニカルエキスパート



高木 潤哉 : 日新電機㈱ 受配電機器事業部
グループ長



深田 勉 : 日新電機㈱ 受配電機器事業部 主任



西村 荘治 : 日新電機㈱ 電力技術開発研究所
技師長
博士(工学)



羽田 儀宏 : 日新電機㈱ 電力技術開発研究所
主査



*主執筆者