

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

A New Hierarchical Fault Diagnosis Method for Power  
Distribution Networks with PV Systems

---Equivalent-Input-Disturbance-Based Approach---

太陽光発電システムを含む配電ネットワーク  
に関する新しい階層的故障診断手法  
— 等価入力外乱手法によるアプローチ —

胡 波  
Hu Bo

環境・エネルギー研究科  
環境・電力システム研究室

2013 年 1 月

## 博士論文審査報告

電力システムは、構成要素及び地域的な広がりにおいて最も複雑で大規模な集合体(システム)のひとつであり、経済、産業、社会が正常に機能するために重要な役割を果たしている。近年、大規模な停電事故が頻発し、例えば2012年7月29日のインド大規模停電は、巨額な経済的損失をもたらすと同時に、需要家と一般社会にも大きな損害を与えている。そのため、電力システム状態監視及び故障診断技術は、電力システムの安定運転に必要な不可欠な技術となっている。この電力システムのいかなる箇所に停電等の故障が発生しても、迅速に発生箇所を検知し、故障影響の範囲と故障設備の数を最小化する対応が求められる。故障診断とは、故障発生位置(箇所)と故障種類を迅速に診断(識別)することである。状態監視情報に基づく従来の故障診断技術は、主に大量のセンサー情報に基づいて行っているが、一旦地震、津波などの自然災害が発生すると、収集できるセンサー情報が激減し、故障診断精度の劣化をもたらすことになる。なお、従来の物理モデルベースの故障診断方法は、電力システム全体のネットワークに関する等価モデルを構築する必要があるため、故障診断の計算時間がかかり、高速な故障診断結果を得ることは困難であった。再生可能エネルギー、特に、太陽光発電の普及及び配電システムへの接続に伴い、従来の故障診断技術では故障識別がさらに困難となることが認識されており、とりわけ、太陽光発電出力の不規則変動(不安定性)により、保護リレーが頻繁に誤動作を引き起こす可能性が懸念されている。

このような背景を踏まえて、本学位論文では、等価入力外乱という新たな方法論に基づく電力システム階層型故障診断技術を提案している。提案した配電システム階層モデルの構築にあたっては、配電システムのトポロジー構造とあわせてマルチ階層構造を作り、各層には複数の負荷ノード集合を内包させ、さらに、各負荷ノード集合はいくつかのノードから構成させる手法を提案している。また、太陽光発電が大量に導入された配電網に対する階層型故障診断手法を提案している。この階層型故障診断手法を、米国電気電子学会IEEE37ノード配電システムモデルへ適用し、故障発生箇所(ノード)特定及び故障種類の識別が可能であることを示し、提案する診断手法の有効性と高速性を検証した。

本論文は、6章からなっており、その成果と知見は、以下のようにまとめられる。

第1章は序論であり、本学位論文の研究背景と解決すべき研究課題を述べている。従来の電力システムの故障診断方法には、状態監視情報に基づく方法と系統回路モデルに基づく方法があり、これらの方法は大量なセンサー情報に依存し、モデルのパラメータの数が膨大になるという欠点があることを示した。なお、大量な太陽光発電システムの系統接続により、従来の配電システム故障診断に新たな課題をもたらす、解決すべき課題となっていることも明らかにした。

第 2 章では、配電系統階層型故障診断モデルの構築方法を提案している。配電系統は、ノードが数が多く、構造が複雑であり、そのまま系統全体に対してモデルを構築すると、故障診断に必要な計算時間が膨大となる。そのため、系統を階層的に分割する方法を用いる階層型故障診断モデルを提案している。提案する階層型故障診断モデルにおいては、系統の配電系統をトポロジー構造とあわせたマルチ階層に分け、各層を複数の負荷ノード集合より構成させ、各負荷ノード集合はいくつかのノードにより構成させている。階層化されたモデルの下層では、さらにその中の負荷ノードグループをトポロジー構造に再分化した。このような手順を各負荷ノードグループの中身がひとつの負荷ノードしかないまで繰り返し、マルチ階層の階層型モデルを構築した。構築した階層型モデルに対して、上位から下位まで逐次的に故障診断を行い、最終的に故障の位置と故障種別を識別する。各階層の中の故障診断モデルには前進後退法による潮流計算を行い系統の状態を算定する。潮流計算では、太陽光発電システムの異なる運転モードにより、それぞれ PV ノード(有効電力  $P$  とノード電圧  $V$  を指定する)、PQ ノード(有効電力  $P$  と無効電力を指定する)として扱う。このような指定の異なるノードへの適用のために、前進後退法の改良を行った。なお、提案した階層型故障診断方法、米国電気電子学会 IEEE13 ノード配電系統モデルへ適用し、階層型モデル構築の実際的手順とその有効性を明らかにした。

第 3 章では、各負荷ノードグループに対して、等価入力外乱法に基づく新たな故障診断方法を提案した。系統のロバスト性の視点から、故障は「系統が外乱を受け、許容できる範囲を超え、系統が不安定性に陥ること」と定義した。このような概念に基づいて、等価入力外乱方法を適用することにより負荷ノードグループへの故障診断を実現した。具体的には、まず、等価入力外乱の概念を導入し、負荷ノードグループの等価動的モデルに基づいて、等価入力外乱推定器を設計し、等価入力外乱の推定値を算定した。次いで、実際に適用している二つの故障診断方法の重要事項である故障外乱模擬の分類方法と故障判断閾値の設定方法を確立した。故障が発生した負荷ノードに対して、系統状態である電流値の観測・分析、故障種類の仕分けをおこなった。最後に、標準電力系統モデルにこの故障診断手法を適用し、提案手法の有効性を検証した。

第 4 章では、階層型故障診断手法を、太陽光発電が導入された標準配電系統モデルに適用し、提案した手法の有効性を検証している。太陽光発電が系統に接続されると、従来の配電系統故障診断方法では故障認識が困難になる。例えば、太陽光発電出力の不安定により、保護リレーの頻繁な誤動作を引き起こす可能性が増えることを挙げられる。実データを用いた検証を行うにあたり、早稲田大学本庄キャンパスで集計した太陽光発電データを用いて、系統接続をした

場合の配電系統へ電圧変動，系統ロスの変更，及び逆潮流の影響を分析した。分析した結果に基づいて，太陽光発電を接続した負荷ノードグループを対象とした等価入力外乱方法による故障診断方法を設計した。太陽光発電の出力変動は，接続した電力系統にはひとつの外乱と見なすことができる。このような外乱が故障擾乱データの収集に影響を与え，等価入力外乱方法による故障診断方法への適用にも影響を与える。このような太陽光発電出力変動の影響を抑えるためには，太陽光発電システム出力擾乱推定器を設計した。太陽光発電システムの出力電流の変化を計測し，そのデータを出力擾乱推定器の入力とし，太陽光発電システムの出力擾乱を求めることができる。系統擾乱から得られた太陽光発電出力擾乱を除去することにより，正味の故障擾乱を得られ，太陽光発電出力変動による故障診断への影響を除去できることを明らかにした。

第 5 章では，本論文で提案した階層型故障診断方法を米国電気電子学会 IEEE37 ノード配電系統モデルへ適用し，階層型故障診断の実施手順を明らかにした。そこでは，まず，IEEE37 ノード配電系統に対し，これまでに提案した故障診断用の配電系統階層モデルを構築する。ついで，各層の負荷ノードグループに対して相応の等価入力外乱推定器を設計する。また，階層型モデルの一層目をリアルタイムで監視し，故障信号が認められる負荷ノードグループに対し，その負荷ノードグループの下位層に入って更なる故障位置の特定を行う。このように，各負荷ノードグループの中身がひとつの負荷ノードしかないまで，つまり再分化できなくなるまで繰り返し，最終的にこの負荷ノードを故障発生位置であると判断する。当該負荷ノード状態量の変化に基づいて，故障種類を識別する。配電系統モデルへの適用の結果，新たに提案した等価入力外乱に基づく電力系統階層型故障診断方法は迅速かつ有効に故障発生ノードの位置を特定し，故障種類を識別できることが明らかになった。なお，この方法によって同時に複数ノードに故障が発生した場合にも診断も可能であることも示された。

第 6 章は，結論であり，本論文で得られた成果と知見をまとめ，また，今後の解決課題を明らかにしている。

このように本論文は，電力システム工学，送配電工学，環境エネルギー工学，および数理工学分野の進歩に寄与するところが大きく，博士論文審査委員が慎重に協議した結果，「合格」と判定した。

2012 年 12 月

主査)	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	横山 隆一
委員)	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	勝田 正文
	早稲田大学教授	(早稲田大学)	友成 真一