

博士学位論文審査要旨

2013年2月13日

論文題目： 柱上変圧器の非線形磁気特性を用いた太陽光発電システムの
単独運転防止方法に関する研究

学位申請者： 吉田 義昭

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査： 同志社大学 名誉教授 石原 好之

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 長岡 直人

要 旨：

今後大量に普及が進むと予想される太陽光発電システム (PV) が配電系統に多数台連系した場合、停電時の単独運転の発生を速やかに防止することが電気の保安上重要になってくる。しかしながら、従来の単独運転検出方式では上記機能を満たしておらず、また、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) で開発された新型能動的方式 (ステップ注入付周波数フィードバック方式) は、発電量と負荷が完全に平衡する領域では検出時間が延びる可能性がある。

そこで本研究では、新たな単独運転検出方法を実現することを目的として、柱上変圧器の非線形磁気特性を用いた能動的方法を提案するとともに、系統連系インバータの試作機等を用いて実用化に向けた研究を行っている。

第1章では、本研究の背景および意義を述べている。

第2章では、単独運転移行時に生じる高調波電圧歪みの影響を考慮するため、フーリエ級数法を用いた柱上変圧器の非線形磁気特性の解析モデルを提案し、単独運転移行時の高調波電圧歪みを模擬した電圧源で柱上変圧器を励磁して、その磁気特性 (励磁電流高調波成分、皮相電力、鉄損、無効電力) を詳細に調べ、モデルの妥当性を示している。

第3章では、単独運転時の柱上変圧器の非線形磁気特性に起因した高調波電圧変化を解析する方法を提案し、太陽光発電システムの系統連系インバータを模擬した正弦波電流源で柱上変圧器を励磁して、並列接続した負荷に電力を供給して単独運転状態とする実験を行い、解析方法の妥当性を示すとともに、PV 多数台連系においては、高調波電圧変化を受動的に検出するだけでは単独運転の防止が困難になることを示している。

第4章では、PV 多数台連系時における単独運転検出の困難を解決する方法として、柱上変圧器の励磁電流高調波に同期した高調波注入による能動的単独運転防止方式 (高調波インピーダンス検出方式) を提案し、0.1 秒程度で単独運転を高速検出できることを示している。

第5章では、提案方式を搭載した系統連系インバータを3台試作して同一方式が多数台連系した場合を含めて性能検証を行い、単機連系および多数台連系の場合においても、0.1~0.15 秒程度で単独運転を高速検出できることを示すとともに、不要動作防止には、提案する能動的方式を一時的にマスクし、改良した周波数変化率方式による受動的方式が有効であることを示している。

第6章では、提案方式を搭載した試作機と今後普及が予想される NEDO 方式のインバータが、混在連系した場合の単独運転検出性能についてシミュレーションと実験の両面から検証を行い、異なる能動的方式が混在連系した場合でも、両方式の能動信号が相互干渉することなく、ともに単独運転を高速に検出できることが示している。

第7章では、本研究で得られた成果を要約するとともに、配電システムのさらなる安定性向上のために必要な課題を述べている。

太陽光に代表される自然エネルギーの大量導入の実現に向け、信頼性の高い電力システムの構築は、ますますそのニーズが強くなっている。本論文の成果は、今後、分散電源を安全に運用するための実用的技術として寄与するところ大である。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2013年2月13日

論文題目： 柱上変圧器の非線形磁気特性を用いた太陽光発電システムの
単独運転防止方法に関する研究

学位申請者： 吉田 義昭

審査委員：

主査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	藤原 耕二
副査：	同志社大学	名誉教授	石原 好之
副査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	長岡 直人

要 旨：

本論文提出者は、本学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程（前期課程）を1996年3月に修了後、東京電力（株）に入社し、営業所勤務の後、技術開発研究所において、一貫して分散電源や配電に関する実用化技術の開発業務に従事している。2011年4月に博士課程（後期課程）に入学し、現在、2年生である。

本論文の内容の一部は、「電気学会論文誌D（産業応用部門誌）、vol. 132、no. 8、pp. 826-835（2012-8）」、「Proceedings of the 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)、no. LS1C-1（2012-10）」、「電気学会論文誌D、vol. 133、no. 1、pp. 56-63（2013-1）」、「電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌）、vol. 133、no. 1、pp. 79-90（2013-1）」に掲載され、既に十分な評価を受けている。

本年1月26日午後3時より、約1時間30分にわたり、提出論文に関する学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により、いずれについても十分な理解が得られた。さらに、講演会終了後、審査委員により、論文に関係した諸問題について口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語については、語学試験に合格している。複数の国際学会において口頭発表もしており、十分な学力を有していると認められる。

以上より、本論文提出者の専門分野における学力、並びに語学力は十分であると認める。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 柱上変圧器の非線形磁気特性を用いた太陽光発電システムの単独運転防止方法に関する研究

氏名： 吉田 義昭

要旨：

今後大量に普及が進むと予想される太陽光発電システム (PV) が配電系統に多数台連系した場合、停電時の単独運転の発生を速やかに防止することが電気の保安上重要となってくる。多数台連系用の単独運転検出装置は、以下の4つの機能を有することが求められている。

- ①単独運転状態の高速検出が可能 (0.2 秒以内)
- ②同一方式間の相互干渉がない。
- ③系統擾乱時に不要動作しない。
- ④多数台連系した場合においても、能動信号が系統に悪影響を与えない。

しかしながら、従来の単独運転検出方式では上記機能を満たしていない。一方、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) で開発された新型能動的方式 (ステップ注入付周波数フィードバック方式) は、発電量と負荷が完全に平衡する領域では検出時間が延びる可能性がある。

そこで本論文では、新たな単独運転検出方法を実現するために、単独運転移行時に生じる高調波電圧歪みが主に柱上変圧器の非線形磁気特性に起因することに着眼した。最初に柱上変圧器の磁気特性の解析モデルを提案し、単独運転時に発生する高調波電圧の解析を詳細に行った。次に柱上変圧器の非線形磁気特性を用いた能動的単独運転防止方法を提案するとともに、系統連系インバータの試作機等を用いて実用化に向けた研究を行った。その要旨を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景である分散形電源の普及に伴う技術的課題、単独運転検出装置の原理とその問題点および本研究の目的について述べた。

第2章において、単独運転移行時に生じる高調波電圧歪みの影響を考慮するため、フーリエ級数法を用いた柱上変圧器の非線形磁気特性の解析モデルを提案した。提案モデルを検証するために、単独運転移行時の高調波電圧歪みを模擬した電圧源で柱上変圧器を励磁して、その磁気特性 (励磁電流高調波成分、皮相電力、鉄損、無効電力) を詳細に調べた。得られた実測値と解析値の比較を行い、モデルの妥当性を示した。さらに従来手法によるモデルとフーリエ級数法によるモデルの精度の比較も行い、フーリエ級数法によって柱上変圧器の非線形磁気特性を高精度で近似できることを示した。

第3章において、第2章で提案したモデルを用いて、単独運転時の柱上変圧器の非線形磁気特性に起因した高調波電圧変化を解析する方法を提案した。提案方法を検証するために、太陽光発電システムの系統連系インバータを模擬した正弦波電流源で柱上変圧器を励磁し、並列接続した負荷に電力を供給して単独運転状態とする実験を行い、単独運転時の高調波電圧、電流特性を明らかにした。得られた実測値と解析値の比較を行い、解析方法の妥当性を示すとともに、従来手法のモデルによる解析値との精度比較も行った。さらに、PV 多数台連系における単独運転時の高調波電圧を明らかにするための検討を行った。その結果、PV 連系台数の増加とともに高調波電圧の検出値は低くなり、高調波電圧変化を受動的に検出するだけでは単独運転の防止が困難になることを示した。

第4章において、第3章で示された PV 多数台連系時における高調波電圧変化の低下による単独運転検出の困難を解決する方法として、柱上変圧器の励磁電流高調波に同期した高調波注入による能動的単独運転防止方式 (高調波インピーダンス検出方式) を提案した。第3章の実験で用

いた正弦波電流源に能動信号（3次または5次高調波電流）を重畳させて系統に注入し、単独運転状態における能動信号の注入位相角変化または振幅変化に対する高調波電圧特性を把握した。得られた注入位相特性から、柱上変圧器の励磁電流高調波に同期する能動信号の注入方法を明らかにした。また、能動信号の振幅変更によって得られた高調波電圧特性から、負荷インピーダンスの高調波成分（高調波インピーダンス）を推定可能であり、得られた推定値と理論値を比較した結果は概ね一致しており、単独運転防止に有効な方式であることを示した。さらに提案方式による単独運転の高速検出を解析的に検証するために、系統連系インバータ、柱上変圧器および回転機負荷（単相誘導電動機）等の瞬時値解析モデルをPSCAD/EMTDCを用いて開発した。開発したモデルを用いて単独運転試験のシミュレーションを行った結果、0.1秒程度で単独運転を高速検出できることを示した。

第5章において、第4章で提案した高調波インピーダンス検出方式を搭載した系統連系インバータを3台試作し、実用性の観点から同一方式が多数台連系した場合を含めて性能検証を行った。JETおよびIEC等で定められた試験方法を参照し、単独運転検出試験、不要動作試験を行った。単独運転検出試験の回路条件は、単相二線回路と3次高調波電圧がほとんど発生しない三相三線回路の両方について行った。また負荷条件は、回転機負荷（単相誘導電動機）の場合と共振負荷の場合の二通りについて行った。共振負荷については、単機連系の場合に、その共振係数を0.5～3.0まで変更して単独運転検出性能を評価した。これらの試験の結果、単機連系および多数台連系の場合においても、0.1～0.15秒程度で単独運転を高速検出できることを示した。また、第4章で実施したシミュレーション波形（遮断点潮流の有効、無効電力がともに0%のケース）と実測波形を比較した結果、概ね一致することを示した。不要動作試験については、位相急変試験、電圧急変試験、周波数ステップ応答試験および周波数ランプ応答試験の4種類について行った。不要動作試験の結果、JETの認証試験範囲外の条件であるが、位相急変角が±15度以上のときに、不要動作する事例が発生することが確認された、その他の試験では不要動作は発生しなかった。上記、不要動作を防止するための単独運転検出アルゴリズムの改良について詳細に検討を行い、位相急変角が10度を超えたときには、提案する能動的方式を一時的にマスクし、改良した周波数変化率方式による受動的方式で対策可能であることを示した。

第6章において、高調波インピーダンス検出方式を搭載した試作機と今後普及が予想されるNEDOで開発されたステップ注入付周波数フィードバック方式のインバータが、混在連系した場合の単独運転検出性能についてシミュレーションと実験の両面から検証を行った。最初に、各方式が単機連系した場合における単独運転検出性能を比較検証した。高調波インピーダンス検出方式は遮断点潮流が完全平衡領域（ $\Delta P = \Delta Q = 0\%$ ）に近づいても0.1秒程度で単独運転を検出できた。一方、ステップ注入付周波数フィードバック方式は完全平衡領域では検出時間にばらつきがあるものの、共振負荷を用いるとステップ注入機能が動作せず周波数フィードバック機能だけでは検出時間が延びる場合があることを示した。次に、完全平衡領域で高調波インピーダンス検出方式とステップ注入付周波数フィードバック方式が混在連系した場合の単独運転検出特性について評価を行った。高調波インピーダンス検出方式は単機連系の場合に比べて、高調波電圧や高調波インピーダンスの検出値が半分以下に低下するが0.1秒程度で単独運転を検出できた。一方、ステップ注入付周波数フィードバック方式は単機連系の場合と同様に、ステップ注入機能が動作しないが、高調波インピーダンス検出方式のインバータが停止した後、周波数フィードバック機能が動作して0.2秒程度で単独運転を検出できることがわかった。以上から、異なる能動的方式が混在連系した場合でも、両方式の能動信号が相互干渉することなく、ともに単独運転を高速に検出できることが示された。

今後は、提案した単独運転検出装置のさらなる実用化にむけて、アモルファス製柱上変圧器の場合の機能検証や単独運転機能とFRT（Fault Ride Through）機能との両立性の研究にも取り組んでいきたい。

以上