

称号及び氏名 博士（工学） 清水 浩一郎

学位授与の日付 令和4年3月31日

論文名 「事故後の電圧変化に着目した新しい過渡安定性評価に関する研究」

論文審査委員 主査 石亀 篤司

副査 森本 茂雄

副査 小西 啓治

論文要旨

近年、過渡安定性が注目されている。過渡安定性とは系統状態が急変したときに発電機の回転運動へ生じる動揺の性質である。系統に発生した事故は保護継電装置の機能により系統から分離、除去されるものの、電圧や電流などに変化が生じたことには変わりはなく、それらの影響が発電機の回転運動へ動揺を生じさせる。時間経過とともに動揺が発散する場合、脱調と呼ばれる同期はずれが発生し、適切な電力を供給することができない。そのため、過渡安定性を把握し、安定な範囲内で運用する必要がある。しかし、太陽光発電に代表される非同期電源が増加すると、過渡安定性が悪化するといわれており、適切な時期に適切な対策を講じなければならない。また、現状でも、日本の連系線は過渡安定性により運用容量が制約されており、設備利用率の低下や送電機会の損失を招くおそれがある。そのため、過渡安定性の重要性は高まりつつある。

過渡安定性の解析には数値計算シミュレーション手法が最も信頼性が高く、一般的な手法として用いられてきた。シミュレーション結果から、発電機相差角の動揺が収束している場合は安定、発散している場合は不安定と判定する。さらに、近年では計算機処理能力の向上により、系統解析をオンラインにて実装する構想が考えられている。そこでは、オンライン上の制限された環境下での数値計算シミュレーション結果から必要な過渡安定性に関する情報を提供することが目的となる。その手段の一つとして、直接法が注目されている。直接法は過渡安定性を比較的高速に算出できることからオンラインへの実装が期待される一方で、いくつか解決すべき課題が残っている。本論文では、系統条件の変化を考慮しにくい点、事後検証が困難である点、判別に時間を要する点の3点を取り上げ、それらが、電力系統の「相差角」をベースとしているためであることを述べた。Dineshらはこれらの問題を解決するために、相差角の代替として電圧とその微分値を用いる手法を提案している。電圧をベースとしていることから前述の直接法の持つ課題の解決が期待できる一方で、新たな課題を解決しなければならない。本論文では電力動揺方程式に基づく考察がなされていない点、二軸グラ

フに軌跡を描く必要がある点の 2 点を挙げた。過渡安定性は電力動揺方程式から導かれる電力システムの挙動を論ずるものである。そのため、電力動揺方程式と提案指標の関係が示されていないと、提案指標の信頼性が低下するだけでなく、理論面からのさらなる発展の機会が損なわれるおそれがある。また、Dinesh の提案指標は電圧挙動を軌跡として確認しなければならず複雑である。提案指標の実務的な使用者である電力会社の解析担当者や系統運用者はかならずしも過渡安定性に深い知識があるとは限らない。そのため、過渡安定性指標はできる限り単純なほうが望ましい。そこで、本論文では Dinesh らの手法の課題を解決するため、提案指標と電力動揺方程式の関係を示すとともに一軸（つまり提案指標の時系列変化）グラフにて判別する新しい手法を考案することを目的とする。すなわち、数値計算シミュレーションの結果から得られる電圧変動時系列データを処理することで新しい過渡安定性指標を開発する。

第 2 章では、本研究で提案する過渡安定性指標について述べ、一機無限大モデルによる本理論の骨子について論じるとともに、その有用性をシミュレーションにて検証した。本研究で提案する過渡安定性指標は電圧をそのまま用いるのではなく、電圧とその微分値の積を用いることで、電力動揺方程式の解をランベルト関数から求めるという新しいアプローチを試みている。数値解析シミュレーションの結果、従来の相边角極大値指標と同様に安定性を判別できるだけでなく、高速で判定できる可能性があることを示した。また、発電機出力、事故点、送電線インピーダンスを変化させても閾値へ与える影響が少なく、指標としやすいことを示した。また、分岐を含む 2 機系統モデルにおける検証から分岐母線を含めた評価をすることで安定性判別の精度が向上することを示した。しかし、本章で用いた 1 機あるいは 2 機無限大モデルは無限大母線が含まれている点において、実系統との乖離があるので、さらなる検討が必要であった。

第 3 章では、一機無限大モデルから無限大母線を排除した三機系統モデルに拡張させることで無限大母線のない状態での有用性を検証した。三機系統モデルは一機無限大モデルと異なり、無限大母線を含まない点の実系統に近い一方で、理論面の複雑性は増す。そのため、提案指標が三機モデルにおいて過渡安定性を判別できることを、ランベルト関数を用いて電力動揺方程式の解を求めることで示した。次に、事故除去時間を変化させた数値計算シミュレーション結果から提案指標は過渡安定性の安定/不安定を問わず一定の値を持ち、それらは事故除去時間に対して線形であることを示した。また、三機モデルにおいても相边角極大値指標より早く判別できることを示した。さらに、発電機出力を変化させる場合においても、動揺周期が著しく長いケースを除いて、過渡安定性判別が可能であることを示した。しかし、実用性を高めるためには更なる検証が必要である。特に、数十機の発電機からなる複雑な電力システムにおいて提案指標が適用可能か否かは重要な点である。

第 4 章では、三機モデルから多機系モデルに拡張させることで、実系統に近い状態での実用性を検証した。まず、提案指標と多機系統における電力動揺方程式の関係について示した。次に、New England 系統モデルの一つの発電機を対象とし、提案手法が相边角極大値指標よりも早く検出でき、安定限界断面における閾値が発電機出力や事故除去時間の影響を受けにくいことを示した。また、閾値と提案指標の差分を地理的に図示化することで、系統の脆弱箇所が視覚的に分かりやすくなることを示した。さらに、すべての発電機を対象とした出力変化ケースを作成し、提案指標は閾値の更新が不要で指標の算出が容易でありながら、エネルギーマージン法と同程度の精度であることを示した。次に、放射状系統とループ系統の違いによる影響は予測結果に大きな影響を与えないことを West10 系統にて示した。加えて、提案指標は相边角極大値指標よりも予測精度が高いことを示した。また、発電機内部位相角の慣性定数に応じた重心を COI (the Center Of Inertia) といい、相边角極大値指標が COI の影響を受けるので過渡安定性評価が困難であることを East30 系統の系統断面が異なるケースにおいて示した。加えて、提案指標が相边角極大値指標より優位であることを示した。そして、East30 系統と West30 系統を用いて提案指標が系統条件の変化の影響を受けにくく、

過渡安定性指標としての実用性が高いことを示した。

第5章では、位相の代替として電圧を用いるという本研究の新しい考え方を従来の等面積法に適用した内容についてまとめた。等面積法は過渡安定性の基本的な特性に注目することで系統事故時に生じる複雑な電気的事象を簡潔に説明できる手法である。そのため、過渡安定性を定性的に把握するためにしばしば用いられる。過酷事故が発生後の事後検証において、事後データから過渡安定性の概要を把握する際に等面積法は有効なアプローチの一つである。しかし、等面積法は相边角をベースとした理論であるため、実系統の相边角状態を計測値から完全に把握することは困難である。特に発電機の内部相边角は一般的に測定できない値である。そこで、本論文では計測が容易な電圧をベースとした手法による解決を目指す。その基礎的検討として、発電機端子電圧を活用した等面積法について述べた。通常、相边角で示される加速・減速エネルギーを電圧に変換することで、相边角情報を用いない理論を示した。さらに、電圧を軸としたグラフを用いて加速・減速エネルギーを面積として図示化することで、従来の等面積法と同様に視覚的な理解が容易な手法となることを示した。最後に、数値計算シミュレーションを用いて本理論が正しいことを示した。

最後に、第6章において、本研究で得られた主な知見についてまとめ、本論文の結論とした。提案指標は電力動揺方程式の解の存在条件と関係があり、過渡安定性指標となりえることを示し、一機無限大モデルから多機系モデルまで理論を拡張させた。また、Dineshの指標は2軸で示されたグラフに軌跡を描き、境界線と抵触するか否かで判定したが、提案手法では軌跡を描くことなく、算出値と閾値を比較することで判定できることを示した。また、相边角極大値法よりも早く判定できることを示すとともに、系統構成や発電機出力、事故点などを変化させても提案指標は予測精度が悪化しにくいことをさまざまな電力系統モデルを用いて検証した。本研究は過渡安定性を電圧面から考察する新しい考え方であり、さまざまな将来発展が考えられる。例えば、GPS (Global Positioning System) を用いて地域性を考慮した過渡安定性指標が研究されている。提案指標は電圧を計測できる地点ごとに指標を算出できるので、地域性を考慮できる可能性が高い。他にも、過渡安定性向上を目的とした蓄電池分散制御が研究されている。制御系入力情報として一般的な位相情報に対して提案指標を代替できる可能性をもつ。また、過渡安定性をメタヒューリスティックな手法により解決を図る研究に対し、特徴量の一つとして提案指標を用いることも一案であると考えられる。

審査結果の要旨

本論文は、再生可能エネルギーの連系などでますます複雑化する電力システムに対して、電圧時系列データを処理することで得られる新しい過渡安定性評価指標を開発し、その指標を実システムに適用するための課題解決について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 提案する電圧指標は電力動揺方程式の解の存在条件と関係があり、過渡安定性指標となりえることを示し、一機無限大モデルから多機系モデルまで理論を拡張させた。従来指標は2軸で示された平面に軌跡を描き、境界線と抵触するか否かで判定したが、提案手法では軌跡を描くことなく、算出値と閾値を比較することで判定できることを示した。これは、現状の相边角による過渡安定性判別と同じ概念で実施することができるので、過渡安定性に深い知識がない解析担当者や系統運用者でも受け入れやすい指標であることが期待できる。

- (2) 提案指標は相边角極大値法よりも早く判定できることを示した。過渡安定性判別時の数値計算シミュレーション打ち切り時間を短縮することができるので、安定限界断面の探索など反復的な数値計算シミュレーションを実施する際の高速化が期待できる。また、提案指標をリレーなどに実装する場合は高速な脱調検出が期待できる。
- (3) 系統構成や発電機出力、事故点などを変化させても提案指標は予測精度が悪化しにくいことをさまざまな電力システムモデルを用いて検証した。また、発電機出力や系統除去時間と提案指標は線形の関係をもつことから、閾値との差分が過渡安定性の評価として活用できるものと期待できる。
- (4) 等面積法において位相の諸元を発電機端子電圧に代替できることを示した。発電機端子電圧は実測が容易であり、従来の等面積法よりも実用性が高く、過去に発生した系統事故時の電圧変動データ等の活用も期待できる。

以上の諸成果は、再生可能エネルギーの大量連系を促進する将来の電力システム構築のための知見を与え、電力の安定供給に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。