

論文の内容の要旨

論文題目 電力系統における同期安定度の非線形動特性
解析とその PSS 制御系設計への応用

氏 名 天野 博之

電力系統を安定に運用するためには、周波数、電圧、同期運転などに関する安定性を保持する必要がある。本研究で扱う問題は、このうちの同期運転の安定性、すなわち同期安定度であり、系統擾乱の後に発電機が同期運転を保てるか否かに関する問題である。

わが国の電力系統について言えば、地形的な制約から系統が一方向に長く大電力・長距離送電を行っており、また故障発生時の事故波及を抑制するため各地域間の連系点が少ないという特徴がある。このため、系統がメッシュ状に密に連系された欧米諸国と比べて同期安定度による制約が厳しい。さらに今後の電力系統においては、コスト低減のために既存設備が最大限に活用されることや電力自由化によって託送量が増加することに伴って、送電線が重潮流化することが予想される。このため同期安定度による制約が一層厳しくなることが懸念される。

このような同期安定度には、電力系統の様々な非線形の影響が影響するため、複雑な現象が発生し得る。特に、今後重潮流化が進み非線形性の影響が増大すると、これまでと比べて N 波脱調（故障後の第二波以降の動揺で脱調する現象）のような非線形性に起因した複雑な現象が増す懸念がある。

一方、安定度解析において現在一般的に用いられている手法としては、シミュレーション解析（数値積分による微分方程式の求解）と固有値解析があるが、非線形性を考慮できるのはシミュレーション解析のみである。またそのシミュレーション解析についても、N 波脱調の安定判別等の解析には多数のケーススタディが必要であるという点で効率的とは言いがたい。このため非線形性を考慮してより効率的に安定性を解析できる手法の開発が必要となると考えられる。また系統制御に関しては、PSS 等の動揺のダンピングの向上を目的とした制御系は主に固有値解析等の線形解析をもとに設計されてい

るが、非線形性の影響が増した場合には制御系が有効に機能する範囲が限られてくる懸念がある。また、線形解析の中で無視されていた系統の非線形性を適切に考慮して設計を行えば、系統の安定性を更に向上できる可能性がある。

このような背景のもと、本研究では以下を目的として研究を行った。

- ・今後増す懸念がある N 波脱調に関して、その発生メカニズムを考察し、非線形動特性解析理論の適用の可能性を明らかにする。
- ・安定度解析に関して、非線形動特性解析理論を応用することにより、非線形性を考慮して安定性を効率的に解析できる新たな手法を開発する。
- ・これまで線形解析が主に用いられていた PSS 等の動揺のダンピングの向上を目的とした制御系設計に関して、非線形動特性解析理論を応用し非線形性を考慮することによって制御効果の向上を図る。

まず N 波脱調の発生メカニズムについては、簡単な電力系統モデルを用いて、状態空間における安定領域の構造から考察した。電力系統を表現するシステムの安定領域の境界は、典型的には、不安定平衡点によって形成される場合と不安定周期軌道（リミットサイクル）によって形成される 2 種類の場合があると考えられる。このため、それぞれの場合について安定領域の構造を詳細に調べ、N 波脱調の発生メカニズムについて考察した。安定領域の構造に関しては、リアプノフ関数などによりその十分条件を求める方法が一般的であるが、本研究では実際の安定領域の構造を調べる必要がある。このため、状態空間の中にある断面をとり、初期条件を格子状に与え、各初期値の収束先を数値積分によって調べるというアプローチを採用した。その結果、安定領域の境界が不安定平衡点によって形成される場合には、安定領域は非常に複雑な構造となり得ることを示し、解析的な扱いが困難であることを示した。一方、不安定な周期軌道によって境界が形成される場合には、安定領域は比較的単純な構造となり、解析的に評価できる可能性があることを示した。

この結果を踏まえて、不安定な周期軌道に起因して振動的に発散する形態の N 波脱調（以下、振動発散と呼ぶ）に対して、非線形動特性解析理論であるホップ分岐理論および標準形理論等を適用することとした。これらの理論は基本的には固有値解析を非線形性を考慮できるように拡張したものと解釈でき、固有値解析ではシステムの線形項しか考慮しないのに対して、高次（本研究では 3 次）の項まで考慮することによって固有値解析ではできない非線形性を考慮した安定性の評価を可能としている点が特徴である。

非線形動特性解析理論の応用として、まず、ある一つの動揺モードの安定性を非線形性を考慮して評価できるホップ分岐理論の適用について検討した。ホップ分岐には 2 種類あるが、そのうちのサブクリティカルホップ分岐は、ホップ分岐点の手前（平衡点の安定性は安定である範囲）であっても、擾乱が大きいと振動発散に至るため、電力系統の過渡安定度の面から重要である。このため、擾乱の大きさによって減衰したり発散したりするサブクリティカルホップ分岐に対応する場合に対して、動揺の安定性を故障除

去時の運転状態から判別する方法を提案した。提案手法は、ホップ分岐理論を応用することにより安定領域の境界を形成する不安定な周期軌道を算出し、故障除去時の運転状態を非線形性を考慮した固有空間上へ座標変換することによって安定判別を行うものである。また、この提案手法を一機無限大母線系統の振動発散現象に適用し、提案手法によって動揺の安定性を適切に判別できることを検証した。

さらに、実際の電力系統で生じ得る振動発散は複数の動揺モードの相互作用によって引き起こされることが多いことを考慮して、複数の動揺モードの安定性を扱うことができる標準形理論によって前述の安定判別法を拡張した手法を提案した。提案した安定性解析手法は、固有値解析では扱えなかったある程度大きな動揺に対して、非線形性（3次まで）の影響を振幅の変化に対する動揺特性（減衰、周期）の変化という形で表現し、各モードの安定領域の大きさを与えるものである。また提案手法は、わが国のような長距離くし形系統における広域動揺モードの間に生じ易い内部共振の解析に対しても有効である。内部共振とは、複数の動揺モードの固有値の比が整数に近くなり、非線形の相互作用が生じ、安定性に大きく影響する現象である。提案手法では、内部共振を適切に考慮する（内部共振を考慮した標準形を用いる）ことにより、内部共振が生じる場合に対しても安定限界を定める周期軌道の近似解を解析的に求めることができる。この提案手法をわが国の電力系統の特性を簡易にモデル化した電気学会標準系統モデル等の多機系統モデルに適用し、内部共振の場合も含めて安定領域の大きさを的確に評価できることを検証した。

最後に、開発した安定性解析手法を活用して、非線形性を考慮可能な制御系設計手法を開発した。開発した手法は、PSS等の動揺のダンピングの向上を目的とした制御系に対して、非線形性を考慮して振動発散に対する安定性を高めるような設計を行うことによって限界送電電力の増大を図るものである。具体的には、固有値を用いて設計した制御系定数をスタートとし、非線形解析手法から得られる振動発散に関する安定領域の大きさを大外乱に対する安定性の指標として、この指標が拡大する方向に定数を調整する。但し、小外乱を対象に最適化を行う固有値解析に基づく設計と比較すると、小外乱に対するダンピングは低下するため、これを許容範囲内に収めるように留意している。この設計手法を電気学会標準系統モデルにおけるPSSの定数設定に適用し、固有値解析に基づく設計との比較から有効性を検証した。その結果、開発した設計手法を用いることによって、発電機至近端での大外乱事故ケースに対して限界送電電力を数%程度増大できることを明らかとした。

以上、本論文の結果を一言で要約すれば、従来の線形解析では扱えなかった不安定周期軌道に起因して生じる振動発散タイプのN波脱調に対しては、非線形動特性解析理論を適用することによって安定領域の評価が可能であり、それを応用した制御を行うことによって安定性の向上が可能であることを示したと言える。

以上