

電力系統の(N-1) 電圧安定性の高速評価手法に関する研究

著者	蘇 粟
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4198号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62009

氏名	蘇 栗	すー すー
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成21年9月9日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻	
学位論文題目	電力系統の(N-1)電圧安定性の高速評価手法に関する研究	
指導教員	東北大学教授 一ノ倉 理	
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理	東北大学教授 斎藤 浩海
	東北大学教授 濱島 高太郎	東北大学客員教授 田中 和幸
	東北大学客員教授 岡田 健司	

論文内容要旨

第1章 序論

将来, 電力系統では電気シフトの拡大などに伴い電力需要が増加し, この需要増加に対して生ずる電力系統の安定性をきめ細かに考慮した系統計画, ならびに系統運用手法が必要になると予想される。電力系統の安定性に関係の大きい系統事象は, 送電線潮流の過負荷, 電圧安定性, 同期安定度, そして周波数安定性の4つである。電力系統の安定性を維持する観点から, 電力系統で想定される故障(基本的には単一故障)に対して, これら4つの現象に起因する安定性を保つ必要がある。この単一故障条件は世界的に共通した信頼度基準であり, 一般には(N-1)条件と略称されている。

本論文では, (N-1)条件に基づく電力系統の電圧安定性に着目し, その系統計画および系統運用で有効となる解析手法を各々開発した。(N-1)条件では, 単一故障計算を全ての送配電線の数だけ繰り返す必要があり, 全体計算の高速化が要点となる。

本論文ではまず, 系統計画に有用な手法として, 想定される需要増加に対して, 仮に単一の発電機で対応するとすればどこまで出力増加可能かという発電余力託送限界電力を, 過負荷と電圧安定性の両面から高速に評価する手法を開発した。開発手法では, 安定限界負荷予測評価関数を用いることで, 従来手法に比べて少ないステップで安定限界となる発電余力を算出可能とした。また, 系統運用への適用を目的として, (N-1)条件での電圧安定性面での安定余裕を, 電圧安定性指標をもとにして定量的にランキングの形で高速評価できる手法を開発した。開発手法では, 潮流感度を用いて(N-1)想定故障後の電圧を計算することにより, 電圧不安定ケースも含めた全ての(N-1)想定故障に対する高速なランキングを簡易な計算手順で実現可能とした。

第2章 種々の電圧安定性評価手法の特徴と比較

電圧安定性の一般特性として, P-V カーブとその求解方法とこれまでに提案されている電圧安定性指標の特徴

について概観した。これまで提案された代表的な電圧安定性指標として、無効電力損失の変化を用いる Q_{loss} 、P-V カーブの高位電圧解と低位解の距離を用いる $VIFI$ 、潮流ヤコビアン行列式の値を用いる $det(J)$ 、電圧安定限界負荷までの負荷余裕を指標とする VP_{idx} などがある。

これらの指標を、物理的なイメージの把握、弱点箇所の特定可能性、推定精度、指標計算量の面で評価した。その結果、本論文の目的から鑑みて、指標 VP_{idx} が総合的に最も優れている

ことをモデル系統への適用試算を通じて明らかにした。電圧安定性指標 VP_{idx} は図 1 で表され、潮流計算のヤコビアン行列要素を用いて簡単に計算できる、物理量（負荷量）に換算できる、負荷地点ごとに得られるという特長がある。

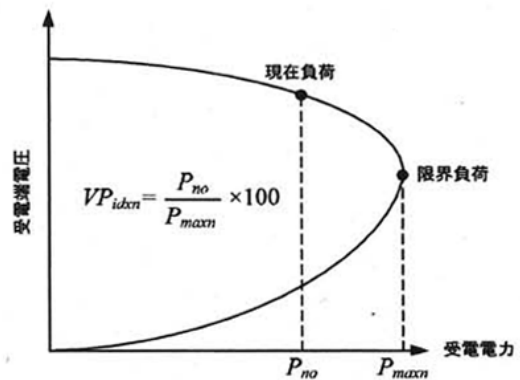


図 1 電圧安定性指標 VP_{idx}

第 3 章 事故時電圧安定性の特徴

電圧不安定現象について、負荷特性との関わりに言及しながら、(N-1)潮流計算において負荷点から見た P-V カーブが指定負荷量との交点を持たないときに電圧が低下し続ける現象と説明できることを示した。この不安定現象をもたらす負荷を正確に抽出する方法はこれまで提案されていないため、抽出可能な方法として、 VP_{idx} と Q_{loss} の 2 つの指標を取り上げてそれぞれの適用可能性について評価し、負荷ごとに指標が得られる個別指標である VP_{idx} が電圧不安定な負荷の抽出性能に優れることを明らかにした。

また、この VP_{idx} を用いることにより、電圧不安定に至る想定故障ケースに対し、電圧安定化のための必要な負荷抑制量を効率的に求める方法を示した。具体的には、ニュートン・ラフソン法潮流計算のヤコビアン行列に対して、不安定な負荷ノードに対してのみ定電流特性負荷の電圧依存特性を持たせることで定式化する。これにより、図 2 のように P-V カーブとの交点が生じ、電圧解を得ることができる。この電圧解に対応する負荷量 P' は簡単に計算できるため、電圧安定化のために必要な負荷抑制量は、指定負荷量 P_0 と計算された負荷量 P' との差として得られる。

第 4 章 系統計画のための(N-1)発電余力高速算出法の開発

電力系統の系統拡充計画あるいは電源計画に資することを目的として、需要増

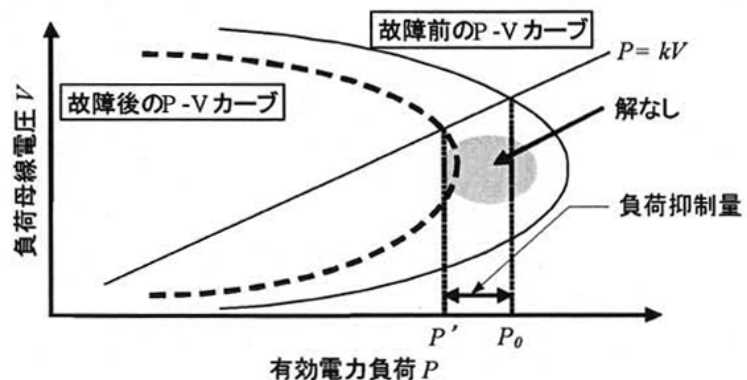


図 2 不安定負荷に対する負荷抑制量算出の概念図

加に対応した(N-1)制約下での過負荷と電圧安定性面からの効率的な発電余力算定手法を開発した。

過負荷については、需要増加時の(N-1)潮流感度を利用することにより想定故障ごとに必要となる三角化分解計算を省略したことや、系統構成（ループ・放射状の別）を事前に判別することで放射状系統時の計算を省略したことなどにより、計算精度を損なうことなく大幅な高速化を可能とした。また電圧安定性については、電圧安定性指標 VP_{idx} からなる需要増加時の(N-1)条件での安定限界推定式を開発することにより、解に到達するまでの需要増加探索ステップを、等間隔増加法などの従来法の数分の一に抑えた手法を開発した。

開発した(N-1)発電余力高速算出法の有用性を、IEEE30母線モデル系統を用いて検証した。表1は結果の一例であり、電圧安定性面から見たG10、G14における(N-1)発電余力の

計算結果である。上段のG10では、最も過酷な送電線故障と推定したL20、L5、L1の3つの故障のみを対象に限界総需要を推定し、基準需要AからB、Cと3ステップで最終解が得られた。また、下段のG14では2ステップで解が得られた。全ての送電線事故計算を対象とする従来手法に比べて大幅な高速化を可能とした。

表1 電圧安定性から見た発電余力結果

需要増加条件		増加率一定		
		A	B	C
総需要		1.0 (6900MW)	1.177 (8121MW)	1.219 (8411MW)
G10	L20	1.177	1.036 [VP_{idx} :95.0%]	1.011
	L5	1.188	1.037	1.008 [VP_{idx} :99.2%]
	L1	1.268	1.104	1.072
総需要		1.0 (6900MW)	1.169 (8006MW)	
G14	L5	1.169	1.025 [VP_{idx} :97.6%]	
	L20	1.177	1.038	
	L1	1.232	1.078	

第5章 系統運用のための(N-1)電圧安定性高速ランキング手法の開発

電力系統の安定運用に資することを目的として、電圧不安定ケースを含む全ブランチを対象とした(N-1)想定故障後の電圧安定性の高速ランキング手法を開発した。開発手法の主な特長は下記2点である。

- 1) 通常の潮流計算では解が得られない電圧不安定ケースもランキングの対象とした
- 2) 不安定ケースのランキングの尺度に安定化のための負荷抑制量を採用した

開発手法の計算フローを図3に示す。開発手法では通常の収束手順ではなく、1回の推定計算で得られた電圧近似解に基づき、まず想定故障ケースが電圧安定か不安定かを推定する。電圧安定ケースに対しては VP_{idx} の値で、電圧不安定ケースに対しては電圧安定化のための負荷

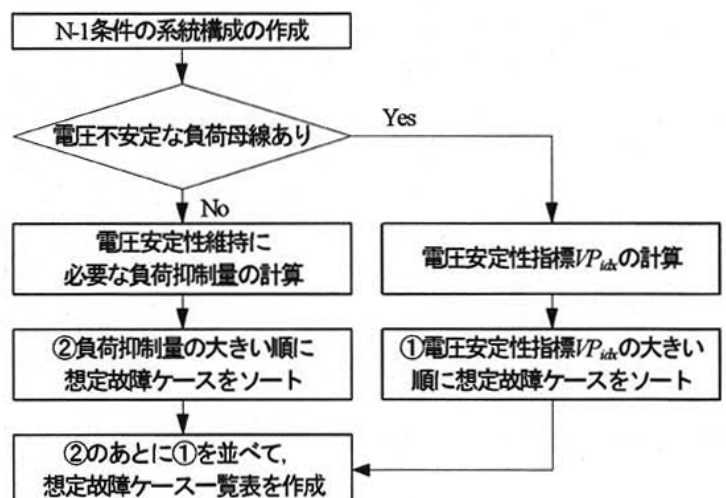


図3 電圧安定性ランキングの概略フロー

抑制量の大きさをランキングする。
電圧安定化のための負荷抑制量の算出には、第3章で述べた方法を用いた。

開発手法の有効性を、IEEE30 母線モデルシステムを用いて検証した結果を図4に示す。開発手法では、左欄の4つの想定故障ケースを不安定と判別し、残りのケースを安定と判別した。同図には厳密計算結果も示し

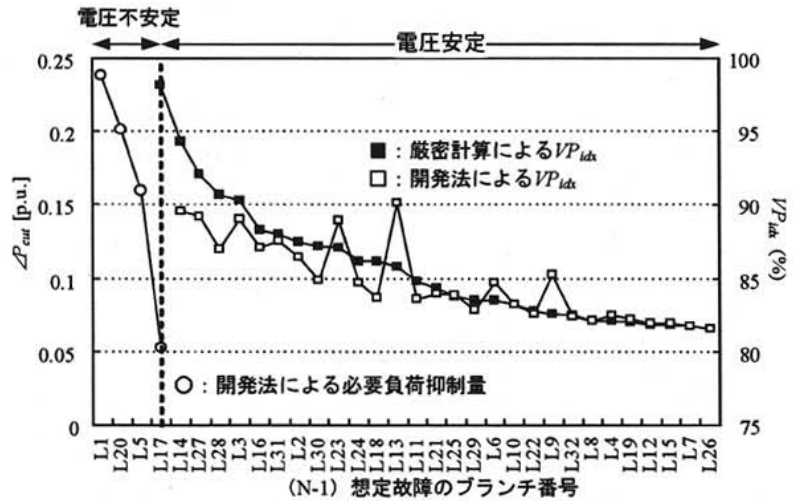


図4 開発した電圧安定性ランキング手法の結果例

ており、安定・不安定の判別精度、また安定ケースでは開発手法によるランキング精度が十分であることが分かる。一方、4つの不安定ケースについては厳密計算では収束過程が発散して解が得られずランキングできないが、開発手法では必要負荷抑制量の推定値でランキングできていることがわかる。

第6章 結論

本論文では、世界的に共通の想定故障条件である(N-1)条件に基づく電力系統の電圧安定性に着目し、系統計画面ならびに系統運用面で有効となる2つの解析手法を開発した。

その1つは、系統計画への適用を目的として、需要増加に対応した(N-1)制約下での過負荷と電圧安定性面からの効率的な発電余力算定手法を開発した。開発手法では、安定限界推定式を用いて限界発電余力を直接推定することにより、表2に示すように限界発電余力までの探索ステップを従来手法に比べて数分の一に抑えた手法を開発した。2つめは、系統運用への適用を目的として、電圧不安定ケースを含む全ブランチを対象とした(N-1)電圧安定性の高速ランキング手法を開発した。IEEE30 母線モデルシステムにより検証した結果、電圧安定、電圧不安定ともに高速にランキングされ、かつ十分な精度を有することを明らかにした。

表2 電圧安定性から見た発電余力の計算量に関する従来手法と開発手法との比較

	1回あたりの計算 労力比	従来法	開発手法	備考
①ベース需要時の(N-1)潮流計算	1	Br 回	Br 回	Br : ブランチ数
②総需要増加時の(N-1)潮流計算	1	$Br \cdot \beta$ 回	$3\beta'$ 回	β : 電圧安定限界までの総需要増加ステップ数
安定限界の発電余力計算の労力 重み付け計算量(①+②)	一般式	$Br + Br \cdot \beta = 6Br$ 回	$Br + 3\beta' = Br + 15$ 回	$\beta = \beta' = 5$ (5回で電圧安定限界に達すると想定)
	例示	192 回 (100%)	47 回 (24.5%)	IEEE30 母線システム ($Br = 32$) の場合

論文審査結果の要旨

電力系統における安定性は、「電力系統を構成する多数の送電線や変圧器のいずれか 1 つが事故により一時的に使用不能となる、いわゆる(N-1)事故条件下で安定かどうか」という国際的な共通基準に基づいて判定される。そのためには、全ての設備の事故ケースについて安定度計算を繰り返す必要があるが、多大な計算を要するため、簡便で高速な安定判別が課題となっていた。

本論文は、(N-1)事故条件下の電圧安定性（以下(N-1)電圧安定性）の高速評価手法の確立を目的として、(N-1)電圧安定性の判別に必要な事故時潮流計算と、これに基づく電圧安定性指標について研究した成果をまとめたもので、全編 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、電圧安定性の考察の基礎となる有効電力負荷－電圧曲線（以下 P-V 曲線）の計算方法について述べるとともに、これまでに提案された代表的な電圧安定性評価指標の特徴について論じている。

第 3 章では、系統事故時に電圧不安定となる現象を、事故前と事故除去後の P-V 曲線に基づいて考察し、電圧安定性は負荷の電圧特性に大きく依存することを指摘している。次いで、この不安定現象の原因となる負荷を特定するため、有効電力負荷の増加可能量を指標とする電圧安定性指標 VP_{idx} に基づく (N-1)電圧安定性の判別手法を提案している。さらに、電圧不安定現象を回避するために必要かつ適正な負荷抑制量を効率的に求める方法を述べている。この負荷抑制量の算出は、従来ほとんど検討されていなかった電圧不安定性の程度を定量的に評価する手段として興味深い成果である。

第 4 章では、(N-1)事故時の過負荷の回避と電圧安定性の維持を制約条件として、電力需要の増加に対する各発電機の発電余力の高速求解法を論じている。すなわち、需要増加時の(N-1)潮流感度を利用することで送電線事故ごとの潮流計算を省略するとともに、3 章で提案した電圧安定性指標 VP_{idx} を利用して必要最小限の潮流計算で発電余力を算定する手法を提案した。これは、従来の算出方法に比べて極めて少ない手順で効率的に発電余力を求めるもので、将来の電力系統における経済的な系統計画に有用な成果である。

第 5 章では、(N-1)事故時の電圧安定性余裕を高速に評価するランキング手法について述べている。まず、線形近似した電力方程式から(N-1)事故時の電圧と潮流を計算し、これに基づいて安定限界までの需要増加可能量を推定する方法を考案した。推定可能な場合は安定と判別し、増加可能量の小さい順に厳しい事故とする。推定不能な場合は不安定と判別して、電圧安定化に必要な負荷抑制量を算出し、負荷抑制量の大きい順に厳しい事故とする。以上より、電圧不安定な場合も含めて全ての(N-1)事故がランキングされる。このランキングにより、電圧不安定の原因となる地域やその程度、あるいは電圧安定であっても余裕の小さい事故ケースが容易に把握でき、電力系統の一層の安定運用への貢献が期待できる。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、(N-1)事故時の電圧安定性を高速に解析・評価する手法を提案し、IEEE 小規模標準電力系統モデルで検証することにより、提案手法が実用上十分な推定精度と高速性を有することを明らかにしたもので、電力系統工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。