

平成21年5月18日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560273
研究課題名(和文) 電源とネットワークの整合性評価に基づく供給信頼度確保に関する研究
研究課題名(英文) Assurance of Power System Reliability Based on Evaluation of Balance between Generators and Network
研究代表者 北 裕幸 (KITA HIROYUKI) 北海道大学・大学院情報科学研究科・教授 研究者番号：30214779

研究成果の概要：電気事業の自由化は世界的な潮流であり、わが国でも新規参入の発電事業者による電源の建設・運用が進んできている。本研究では、発電事業者が建設・運用する電源が、電力の安定供給にどの程度貢献するかを評価する手法を開発した。開発した手法は、電力を需要家まで輸送するための電力ネットワークを考慮しているため、本手法により輸送設備が十分ではない地点の電源の価値が小さく評価される。本研究では、上記の価値に基づいて電力の購入価格を決定する手法や、ネットワークの増強・拡充を行う手法についても検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電力系統工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電力機器

キーワード：電力系統, 予備力, 送電設備計画, 予防制御, 信頼度, ノードルプライス, モンテカルロシミュレーション, 送電混雑

1. 研究開始当初の背景

電力自由化の進展に伴い、電力系統の送配電部門が発電部門から分離され、各々の主体が別個の組織になると、両者間での調整が困難となり、電源と送配電ネットワークに様々な不整合が生じる可能性がある。こうした不整合性は電力系統を脆弱化させ、電力安定供給に対する信頼性を大きく低下させる恐れ

がある。このため、発・送配電が分離され、多数の電源が自由にネットワークに接続する中で、電源との整合性を確保できるよう送配電ネットワークをいかに強化していくか、逆に、送配電ネットワークが所与であるとき、電源からの電気エネルギーをいかに有効に調達していくかが重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自己利益最大化に基づき行動する発電事業者の電源と、公共的インフラである電力ネットワークとを需要家に対する長期的かつ短期的な信頼度確保の立場で適切に整合させるための、電力系統の新しい計画・運用手法を開発することにある。

3. 研究の方法

(1)長期的信頼度確保に関する研究

電力系統の各負荷母線における長期的な供給信頼度を、電源と送配電ネットワークからなる流通経路を考慮して評価するための手法を開発する。次に、提案手法に基づき、電源と送配電ネットワークの整合性を確保するためには、どの送配電設備をどの程度強化・拡充すればよいかを決定する手法を開発する。また、負荷母線における分散電源の導入が、長期的信頼度確保にどの程度貢献するかについて評価を行う。

(2)短期的信頼度確保に関する研究

電気エネルギーを調達する電力市場において、電源による予防制御・緊急制御の機能を持たせつつ、市場決済を行うアルゴリズムを開発する。次に、市場決済において定まる各母線における価格（ノードプライス）に基づき、ネットワーク強化・拡充にかかるコストを、ネットワーク利用者で公平に負担する方策を開発する。

4. 研究成果

(1)電源とネットワークを同時に考慮した各負荷母線における供給信頼度評価

電源の制御性能（出力変化率制約）およびネットワークにおける電源の配置を考慮し、各負荷母線における信頼度を評価する手法を提案する。提案手法は、電源ならびに送配電設備の故障を模擬したモンテカルロシミュレーションをベースとしながら、さらに故障

発生前の予防制御、故障発生後の制御を、発電機の出力変化率制約の下で実行する状況を考慮できるよう拡張したものである。すなわち、電源や送配電ネットワークのトポロジーや故障率に基づく長期的な信頼度に、セキュリティ制御に基づくオンライン信頼度を加味したより実際的な信頼度を評価するものである。これにより、応答性の良い予備力用電源を効果的に活用するための送配電設備の増強・拡充方策や、逆に送配電設備が所与であるときの予備力用電源の望ましい調達方策など、運用上の制約を考慮した設備計画を算定することが可能となる。供給信頼度の定量的評価については、欧米において確率論的手法に基づく手法が提案され、わが国でも電力中央研究所を中心にいくつかの研究が報告されている。しかしながら、これまで、発電機の出力調整能力を詳細に考慮した手法は報告されておらず、この点は本研究の独創的な点となっている。

IEEE 信頼度テストシステムを用いて、提案手法の有効性について検証を行った。まず、モ

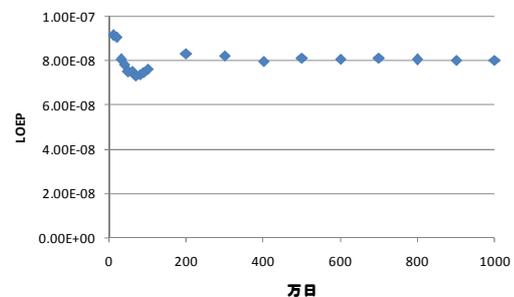


図1 系統全体の LOEP

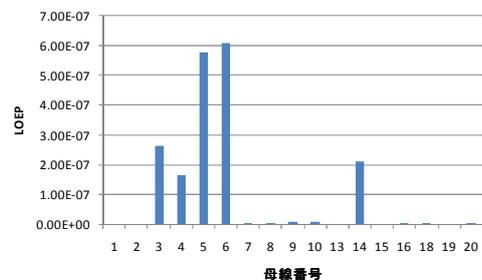


図2 各母線の LOEP (500 万日実行時)

ンテカルロ法の実行日数による、信頼度の変化を図1に示す。500万日程度で十分に収束している様子が確認できる。

次に、各母線における LOEP の値を図2に示す。LOEP は大きい母線と小さい母線で2～3桁程度違っており、母線による信頼度の違いが顕著に表れている。

さらに、発電機の出力調整能力の低下が系統の信頼度にどのような影響を及ぼすのかを評価する。得られた結果を図3に示す。出力変化率を小さくするにつれて、LOEP が大きくなり、供給信頼度が悪化していく様子が確認できる。このことから、出力変化率の低下は、事故後制御ひいては供給信頼度に大きな影響を及ぼす可能性があるといえる。

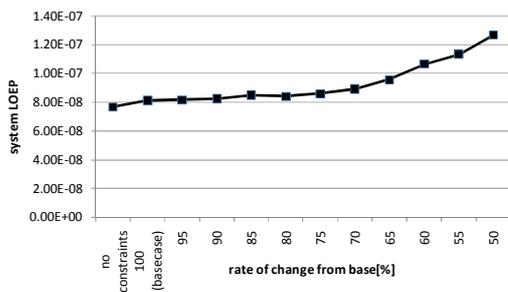


図3 発電機出力変化率と LOEP の関係

(2)信頼度向上方策の評価

緊急時の供給力の確保（供給予備力の確保）と送電設備の増設（送電予備力の確保）の2種類の方策について、信頼度向上への貢献度合いを提案手法により評価する。

・供給予備力確保の評価：系統で追加的に予備力を確保した場合の信頼度向上効果について検討する。ただし、ここでの予備力とは、電力会社が所有する電源に持たせている予備力に限らず、予備力市場や負荷遮断契約など、緊急時に追加的にその母線に電力を供給する（または、需要を減らす）ことが可能な調整容量を意味している。

まず、20[MW]の予備力を各母線に追加的に

に確保した状況に対し、500万日のモンテカルロシミュレーションを実施して供給信頼度を評価した。この評価により、予備力の調達箇所が供給信頼度にどのような影響を与えるのかを考察することが可能となる。試算結果として、予備力調達箇所と母線毎の LOEP の関係を図4に示す。

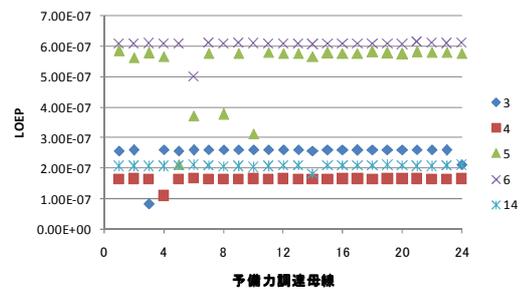


図4 母線ごとの LOEP

以上のように、影響は接続母線に関して限定的となったが、これは本試算の供給支障が系統分離を原因とするものが多いためである。なお、確保できる予備力の容量を変化させて試算した結果、確保する予備力量の増加に伴う LOEP の減少幅は小さくなっており、それぞれの母線で費用対効果の面で最適な調達量が存在する可能性が示された。

・送電設備の増設の評価：送電線の増設が信頼度向上にどの程度貢献するかを検証する。送電線の増設としては、全て2回線化（同一のルートと送電容量をもつ送電線の増設）を対象としている。送電線増設を考慮した場合の供給信頼度を試算した。供給支障の多い一部の母線における LOEP を図5に示す。

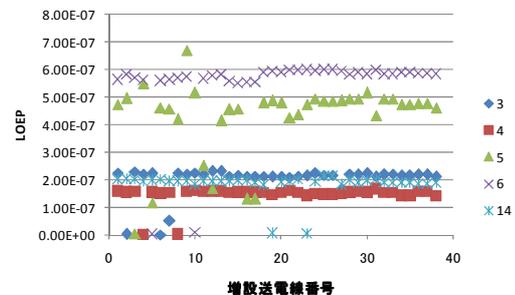


図5 母線毎の LOEP (送電線増設考慮時)

主に増設した送電線に接続される母線の信頼度が向上する結果となった。

(3) 予防制御および事故後制御を考慮した市場決済手法

ノード価格は、潮流方程式、発電機上下制限、最大皮相電力制約、電圧位相角制約、ノード端電圧制約、送電容量制約などの制約条件の下、市場における電力調達コストを最小化する問題を解き、有効電力潮流方程式に対するシャドウプライスとして求めることができる。予防制御を考慮する場合は、さらに全ての送電線単一事故時における制約を条件に加えて、調達コスト最小化問題を解けばよい。モデルシステムを用いて、予防制御を考慮しない場合と考慮した場合の2ケースにおけるノード価格を試算した(図6)。なお、予防制御を考慮する場合については事故後に調整可能な発電機の有効無効電力出力の変化量を $0, \pm 10, \pm 30[\text{MW}]$ の3通りに変え計算を行った。同図より、出力変化速度の上下限値を大きく設定すると、事故後の調整能力が大きくなるため予防制御を考慮しない場合の最経済の状態に近づき、ノード間の価格差が縮小していく様子が見て取れる。逆に、出力変化速度上下限値を小さく設定すると、全体的に価格が高くなると共に、ノード間の価格差も拡大していく様子が見て取れる。次に、発電機の出力変化速度制約上下限値を一定値に固定し、各ノードの需要を変化させた。需要が小さい場合には系統全体の潮流量も小さく、想定事故発生時にも発電機の持ち替えが不要となるため、予防制御の考慮の有無がノード価格に与える影響は小さい。それに対して需要が増加すると、予防制御を考慮しない場合でもノード価格に差が現れる。以上のことから、予防制御を考慮に入れてノード価格を設定した場合には、需要が全体的に増加

した状況のノード価格に近づき、ノード間の価格差が顕著に現れることが分かった。

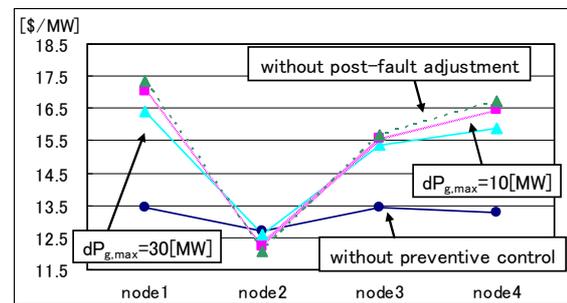


図6 予防制御を考慮したノード価格

この価格差は、系統運用者に対する設備投資の経済的シグナルとして機能しうることから、予防制御を考慮に入れることが、ネットワークセキュリティの維持・向上に寄与しうると考えられる。

(4) 負荷の増加を考慮した調相設備計画への応用

将来の需要増加に対して、系統電圧を維持できないと判断した場合に、独立した系統運用者が調相設備を系統内に設置する状況を想定する。この場合、送電線利用者に公平な立場をとる必要があるため、調相設備計画の目的は長期的な社会余剰が最大となるように導入量・導入箇所を決定する。なお、提案手法では、長期的な社会余剰の最大化を目的としているため、一時間断面の評価ではなく、長期的な観点から評価する。調相設備の導入量を漸次増加させながら年間での総調達コストと設置コストの和(社会余剰減少分)が最小となる導入量を探索する。ただし、本研究では、調相設備導入ノードは単一ノードとしているため、各ノードに対して、社会余剰減少分を最小となる導入量を算出し、その中で最も社会余剰減少分が小さいノードを導入候補ノードと決める。

提案手法による各ノードの最適導入量および年間の調達コストと設置コストの和(社

会余剰減少分)を算出した。次に、社会余剰減少分が最も小さいノードに導入を行った場合について、調相設備導入量を最小化する従来法と提案法の結果をピーク時間帯において比較する。図7はそれぞれピーク時間断面における従来法と提案法でのスポットプライスを表している。従来法では、電圧制約がネックとなり、発電機のあるノード1,2以外の価格が高騰しているが、調相設備を導入することで、全体的に価格が下がり、価格差も小さくなり、需要家の支出も全体的に減少している。これは、調相設備導入により電圧制約が緩和され、安価な発電機に対する出力割り当てを増加できていることに起因する。また、従来法の結果に比べて提案法では、ノード1の安価な発電機の出力が増加し、それに伴い収入が増加し、ノード2の高価な発電機は出力が減少し、収入も減少している。

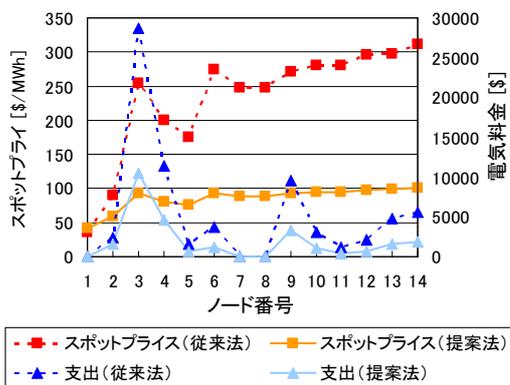


図7 スポットプライス

次に、調相設備の導入によってもたらされる需要家の利益増分の一部を回収し、設置コストに充てる方法を考える。すなわち、従来法に対して提案法による調相設備の導入で各需要家が市場から電力を購入する際にかかる電気料金の減少量を需要家の利益と捉え、この需要家の利益に応じて設置コストを案分して回収するものとする。よって、各需要家の負担割合は次式のように算出する。

$$\text{負担割合} = \frac{\text{各需要家の支出減少分}}{\text{需要家の総支出減少分}} \times 100$$

ただし、従来法における導入量は安定供給に不可欠な最低限の調相設備と考えられるため、それは供給保障責任を持つと想定している系統運用者が費用を負担するのが一般的と考えられる。そこで、従来法による導入量に掛かる費用は系統運用者が負担し、提案法と従来法による導入量の差分に掛かる費用を前述の方法により回収することとする。

社会余剰減少分が最も小さいノード5に導入を行った場合について、ピーク時間帯における各需要家の負担割合を図8に示す。各需要家はこの割合に応じて、従来法での導入量と提案法の導入量との差分の設置コストを回収される。

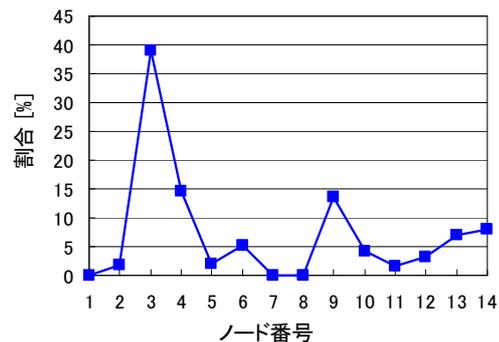


図8 各需要家のコスト負担割合

5. 主な発表論文等 [学会発表] (計7件)

- ① 田村直己, 原 亮一, 北 裕幸:「負荷削減契約を用いた分散エネルギー源(DER)の導入促進計画に関する研究—DERを考慮した供給信頼度評価手法の検討—」, 平成21年電気学会全国大会, 6-131, 2009年3月18日, 北海道大学
- ② 宮野広高, 原 亮一, 北 裕幸:「自由化環境下における調相設備計画に関する基礎検討」, 平成21年電気学会全国大会, 6-115, 2009年3月17日, 北海道大学
- ③ 宮野広高, 原 亮一, 北 裕幸:「最適潮

流計算を用いた調相設備導入量決定手法に関する一考察」, 平成 20 年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.64, 2008 年 10 月 26 日, 北海道東海大学

- ④ 田村直己, 原 亮一, 北 裕幸:「分散型エネルギー源の導入促進計画決定手法の構築に関する検討ー供給信頼度解析手法に関する考察ー」, 平成 20 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.62, 2008 年 10 月 26 日, 北海道東海大学
- ⑤ 宮野広高, 原 亮一, 北 裕幸, 長谷川 淳:「予防制御を考慮したノーダルプライスに関する基礎検討」, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008 年 3 月 21 日, 福岡工業大学
- ⑥ 横畠系典, 原 亮一, 北 裕幸, 長谷川 淳:「ネットワーク制約を考慮した供給信頼度解析に基づく予備力の配置に関する研究」, 平成 19 年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, No.78, 2007 年 10 月 28 日, 北海道工業大学
- ⑦ 横畠系典, 原 亮一, 北 裕幸, 長谷川 淳:「ネットワーク制約を考慮した供給信頼度解析に基づく予備力の配置に関する研究」 電気学会電力系統技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-07-76/PSE-07-91, pp.7-12, 2007 年 7 月 31 日, 愛知工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北 裕幸 (KITA HIROYUKI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 30214779

(2) 研究分担者

原 亮一 (HARA RYOICHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 80361872
田中 英一 (TANAKA EIICHI)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 10124538

(3) 連携研究者
なし