

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560274

研究課題名（和文） 自然エネルギー発電の大量導入に伴う将来システムの崩壊回避に関する基礎的検討

研究課題名（英文） Basic Studies of new security assessment to avoid the power system collapse involving renewable energy penetration

研究代表者

餘利野 直人（YORINO NAOTO）

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70182855

研究成果の概要（和文）：

太陽光発電など不確定性を持つ電源に対して、電力システムの信頼性を維持するために必要となる解析技術・制御技術には限界がある。本研究では、「系統崩壊」と呼ばれる大規模停電の回避を目的とし、従来の系統崩壊に関する研究代表者の研究成果を駆使し、解析法や制御法など具体的な回避手法について「ロバスト信頼度」という新しい指標を提案し、数値シミュレーションによって将来システムの運用困難さを明示することができた。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we propose the robust dynamic stability regions (RDS) evaluating the N-1 security quantitatively under the circumstances of uncertainties. By using the area of RDS, the key region for judging the security, based on the concept of robust power system security, as a new evaluation index for quantitative analysis. This concept can be applied to the benchmark for maintaining the N-1 security at adequate level and how to calculate the battery installation for the N-1 security and power supply quality separately is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

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・電気機器

キーワード：電力系統, 供給信頼度, 自然エネルギー発電, ロバスト信頼度

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な電力自由化の進展に伴い、電力システムを多数の事業者で利用することから、階層構造の系統制御方式を維持できない状態に至っている。このような状況の中、世界各国では大規模停電が発生しているが、さらに将来に向けて自然エネルギー発電の大量導入

が進められており、問題の本質は未解決のまま、電力システムの制御性の悪化や信頼性の低下が水面下で進展している。現在、電力技術者の主な課題は、出力不安定な自然エネルギー電源に対する出力安定化や周波数維持と言った目先の問題解決であり、特にスマートグリッドなど主に系統末端部分における、イメ

ージ先行型の技術開発に主眼が置かれている。これらの技術開発に加えて、基幹系統の信頼性維持は極めて重要な問題である。

電力系統の崩壊問題は、1990年頃より多くの研究がなされてきた。とりわけ電力系統の安定性問題は、解析技術や計算技術、電力系統の監視・制御技術と言った様々な要素技術を有機的に結合して研究が行われてきた。

研究代表者もこの課題に深く関わり、不安定現象のメカニズム解明や解析ツールの開発を行ってきた。近年は、これらの研究により現象解析ができるようになったため、この問題については、現在は確定論的な観点では解決可能な部分は解決されたと言ってよい。しかし、将来の自然エネルギー発電の大量導入を考えると様々な不確定性に対処できる有効な対策がなく、申請者は以下の問題点を指摘している。

## 2. 研究の目的

本研究では、複雑な系統崩壊メカニズムを有する大規模電力システムにおいて、大きな不確定要因を考慮する場合に、どのように信頼性維持を達成できるかを策定することが目的である。現状の信頼性維持の手法は、不確定要素が大きく介在する状況では計算機性能の面でも実行困難であることから、新しいアプローチが必要である。そこで本研究では、将来の不確定環境を考慮して問題を整理するために、次の2つの信頼性領域

- ・静的信頼性維持領域（静的実行可能領域）
- ・動的信頼性維持領域（動的実行可能領域）

を定義し、それぞれについて現状の解析技術を最大限に利用して領域の性質を解明し、「系統崩壊」回避の新しい考え方（ロバスト信頼度）を構築することを基本方針とした。

前者の「静的実行可能領域」は、運転時刻直前まで予測不能なシナリオを確定論的に取り扱った場合の発電機群の出力状態に関する信頼性維持領域であり、シナリオ毎に描かれる領域の積集合となる。将来系統でこのような領域をどの程度確保できるかを調べることは、そのための手法開発も含めて本研究の重要な研究領域である。

一方、後者の「動的実行可能領域」は、電力システムの動的な特性から決まる、状態遷移が可能な領域である。将来の電力系統において、システムの信頼性を現状レベルに維持するためには、現状のN-1基準あるいは同等な基準で上記領域を算出し、運転時にこの領域を確保した上で、領域内に運転点を維持できるような対策を講ずる必要がある。すなわち、本研究では、以下の点を明確にした。

- (1) 静的実行可能領域の効率的計算法の開発
- (2) 動的実行可能領域の算出法の開発
- (3) リアルタイム信頼度維持手法の検討

上記、(1)では、現状でも計算負荷がボト

ルネックになっている発電機群の安定性問題（過渡安定度解析）を中心に研究する。不確定環境下で現状のシミュレーション手法を採用すると莫大な計算が必要となるため、研究代表者が近年開発した臨界トラジェクトリー法を用い、全く新しい考え方に基づき目的を達成する。

上記、(2)は、従来手法であるダイナミック負荷配分問題を応用し、申請者の従来研究成果に基づいて調達可能な動的発電調整力から算出する手法を開発する。

上記、(3)については実行領域内で確実に系統運用を実施する信頼性維持手法を策定する。実行可能領域の確保が厳しい場合には、現状の系統運用を前提とせず、スマートグリッド等での将来技術の活用や現行では実施されていない負荷制御も実施して、実行可能領域を確保する手法（系統調整力となり得る蓄電池の導入）を検討する。

## 3. 研究の方法

まず、「(1)現行方式に基づく効率的手法の開発」を行い、現状の信頼度維持手法の考え方に基づく効率化手法を策定した。次に、(1)を用いて「(2)静的実行可能領域の厳密解析」を実施し手法の限界を策定する。次年度では、将来系統の動的性能を考慮して「(3)動的実行可能領域の計算法の開発」を行うとともに、研究代表者ら独自の手法である臨界トラジェクトリー法を用いて、「(4)不確定性許容値の感度解析アルゴリズムの開発」を行う。最終的には、(4)を利用して「(5)実行可能領域の近似算出法の開発」および「(6)将来系統における信頼度維持方式の新たな枠組み構築」を行った。

(1)現行方式に基づく効率的手法の開発 将来系統において系統運用計画を策定する場合に、自然エネルギー発電による不確定性の影響を勘案した運用計画を策定する。しかし、現状の計画手法では、時々刻々の計画運用点において、過渡安定性判別がボトルネックとなる。過渡安定性判別とは、想定故障の地点と故障除去時間CTを指定して、シミュレーションにより安定判別（安定または不安定の判別）を行う作業であり、不確定性が存在すると様々なシナリオ設定が必要となるため、シミュレーションの回数が爆発的に増加する。ここではまず、現状の方法論および既存手法の限界を評価するために、現行の系統解析を自動化するアルゴリズムを作成し、これを最大限に効率化した。

(2)静的実行可能領域の厳密解析 小規模な例題系統において、上記(1)の手法を用いて信頼性計算を実施した。このとき必要となる計算量とともに信頼性維持の限界ポイントを調べる。また、(1)の手法を繰り返し用いて、厳密な静的実行可能領域を実際に算出し、

自然エネルギー発電の導入量をパラメータとした実行可能領域の遷移状態を調べ、領域確保の観点から許容可能な不確定性（自然エネルギー発電の最大導入量）を整理する。

(3) 動的実行可能領域の計算法の開発 将来システムにおいては原子力発電の比率増加が、CO<sub>2</sub>排出削減の重要な要素となっているため、周波数調整能力に関しては、発電機の出力変化率などダイナミックな発電機特性が非常に重要である。ここでは、現在議論されている周波数維持の観点に加えて、信頼性確保の観点で動的実行可能領域（ロバスト信頼領域）を算出するアルゴリズムを開発した。

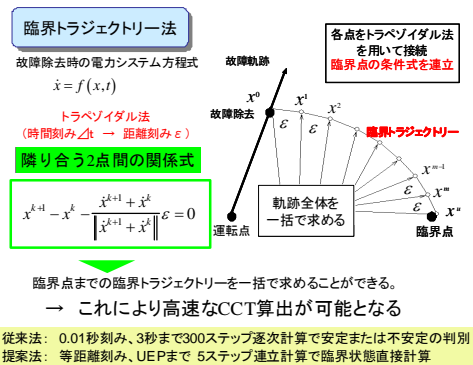
(4) 不確定性許容値の感度解析アルゴリズムの開発 研究代表者が開発した臨界トラジェクトリー法<sup>\*</sup>は、一回の計算で臨界故障除去時間 CCT およびそのときの臨界状態を算出できる。ここで故障除去時間を CT とすれば、

$$M = CCT - CT \quad (1)$$

として、想定故障に対する安定性余裕 M として取り扱うことができる。すなわち、理論的には、この M は当該運転点が信頼性を維持する上での自然エネルギー発電の出力変動許容値 U に変換することができる。オペレーティングマトリックスを S とすると、

$$U = f(M) = S \cdot M \quad (2)$$

※臨界トラジェクトリー法は、最小化問題の解として CCT を算出する手法であり、最小自乗法により問題の停留条件より解を求めている。臨界トラジェクトリー法は、初期値から指定した時間刻みで実施するシミュレーション法とは異なり、同じ問題を初期値と最終点を結ぶ2点境界値問題として解く。ただし、初期値は故障軌跡上で故障除去時間 CT の関数として与え、最終点は臨界条件として方程式で与える。そして、これを最適化問題として解くと臨界点における CT の厳密値 CCT が求められる。そこで、停留条件の感度解析によって上記の行列 S を算出することができる。ここでは、この考え方に基づいて、不確定性許容値を見積もるための感度解析アルゴリズムを開発する。



(5) 実行可能領域の近似算出法の開発 小規模システムにおいて想定故障を指定し、臨界トラジェクトリー法を適用して M を求め、さらに

上記の感度解析を実施して行列 S を求め、(2)式を用いて上記の U を評価する。このとき計算される U は、許容可能な不確定性の領域を表している。このような領域を全ての想定故障に対して算出し、それらの積集合を考えると、これが当該運用点における静的実行可能領域の近似値を与える。ここでは、このような感度解析により実行可能領域を算出し、これを上記(2)に基づく厳密値と比較し、手法の精度を評価した。

(6) 将来システムにおける信頼度維持方式の新たな枠組みを構築 上記(5)の終了時点で、提案法は従来法とは異なり、予想運転点のまわりで不確定性を想定できる手法となる。すなわち許容できる不確定性の大きさが、個々に算出されるため従来法と比較して画期的な手法となることが予想される。そこで、ここでは提案法の解析結果に対して上述の(3)の手法を適用し、計算時間および計算精度面での限界を評価する。そして、この結果に基づいて将来システムにおける信頼度維持方式の新たな枠組みを構築した。

(7) 研究のとりまとめ 以上の研究結果を報告書にとりまとめ、新しい概念「ロバスト信頼度」の有効性・効率性を示した。

#### 4. 研究成果

本研究では不確定性環境下における電力システムの供給信頼度維持を目的とした新たな信頼度概念「ロバスト信頼度」を提案し、その有効性を示すとともに国際・国内学会で多数発表して将来の電力システムにおける信頼度維持の厳しさについて提言できた。まず、本研究結果で整理されたロバスト信頼度の概念を図1に示す。

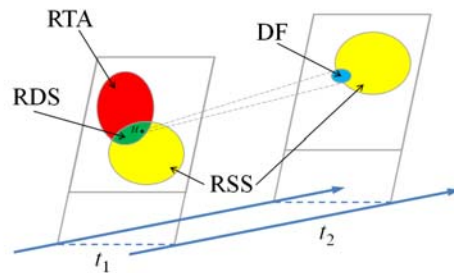


図1 ロバスト信頼領域の概念

図1は時刻  $t_1(t)$ ,  $t_2(t + \delta t)$  における発電機出力平面上にロバスト信頼度の4つの概念を示したものであり、時刻  $t_1(t)$  においてロバスト信頼領域に運用点  $u$  を定めることで、時刻  $t_2(t + \delta t)$  の静的信頼領域に到達できることを示している。不確定環境下で N-1 信頼度を維持可能かどうかは、ロバスト信頼領域の領域面積に依存する。つまり、ロバスト信頼領域の面積を新しい評価指標とすることで、N-1 信頼度の定量的評価が実現できる。本研

究では、信頼度面の問題について、自然エネルギー発電導入量の増加に伴ってN-1信頼度が時間経過を考慮した動的領域において、どのように変化するかを計算機シミュレーションにより明らかにした。シミュレーション条件として電気学会 WEST10 機モデルを3地域に分割したシステムモデル(図 2)を使用した。

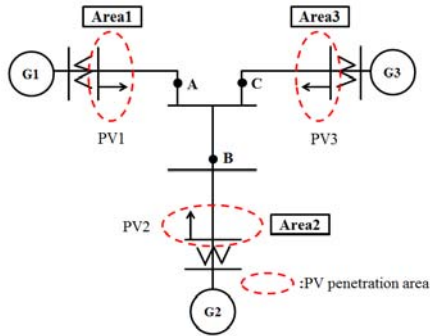


図 2 シミュレーションで使用する電力系統

本研究では、自然エネルギー発電として太陽光発電を想定し、その導入量に応じて系統調整能力となりうる蓄電池の設置量を増加させた(ロバスト信頼領域(表中の数字)の面積は表 1 のようになった。

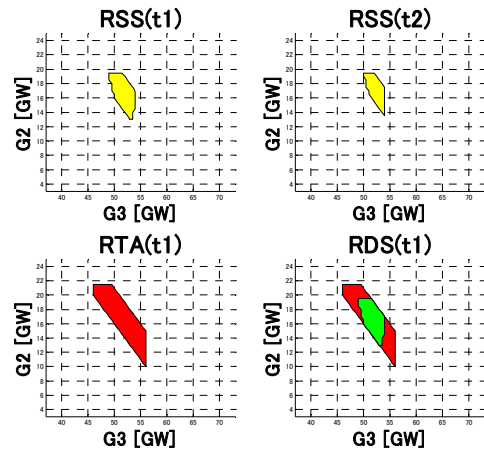
表 1 ロバスト信頼領域の変化

		太陽光発電導入量						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
蓄電池 導入量	0%	45.5	24.1	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	5%	-	24.1	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	10%	-	31.1	12.4	10.0	0.0	0.0	0.0
	15%	-	31.1	23.4	14.5	3.8	1.5	0.0
	20%	-	31.1	30.4	20.5	23.9	13.0	0.0
	25%	-	46.0	38.3	36.3	31.9	33.8	19.8
	30%	-	46.0	38.3	44.8	39.9	42.4	42.6
	35%	-	46.0	46.3	53.0	66.5	69.3	59.4
	40%	-	46.0	61.9	61.8	75.8	78.0	78.9
	45%	-	54.0	61.9	69.6	75.8	78.0	78.9
50%	-	54.0	61.9	69.6	75.8	78.0	78.9	

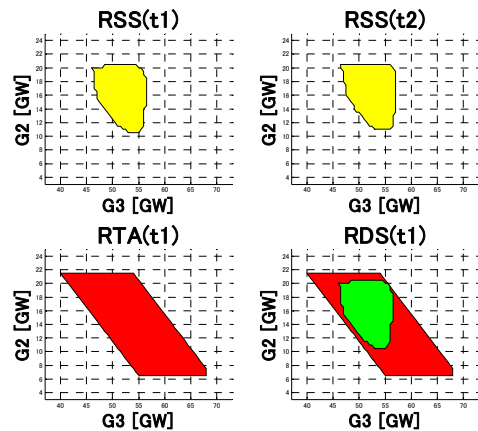
蓄電池を全く導入しない場合(表 1 の緑色の列)の太陽光発電導入量とロバスト信頼領域の面積の関係はトレードオフの関係にあることがわかる。蓄電池の設置により太陽光発電の出力変動が吸収され、ある設置量以上ではロバスト信頼領域の面積が飽和している。これより、N-1 信頼度維持面から判断して、太陽光発電の導入量に対する蓄電池設置の上限も、この表から凡そ判断できる。これより RDS の面積は N-1 信頼度の確保状況を示す、新たな評価指標に成り得ると判断できる。

図 2 は PV の導入量が 25% の場合(a)と 40% の場合(b)におけるロバスト信頼度の領域がどのように変化するかを「可視化」したものである。このように図で表示すると、各領域の位置関係が明確になる。これを実運用に適

用すると、運用者が各領域の確保状況を目視で確認できるため、信頼度監視に関する系統運用業務の有力な支援ツールになり得るものと考えられる。このようなニーズは、太陽光発電等の自然エネルギー発電の大量導入が見込まれる将来の電力系統において、これまで以上に高まるものと想定される。将来、従来のお客さま負荷の変動に見合う需給調整を行いながら、これら自然エネルギー発電の出力変動も考慮に入れた上で、系統信頼度を確保した運用を行う必要があるためである。



(a) 蓄電池導入量 25%



(b) 蓄電池導入量 40%

図 2 ロバスト信頼領域の可視化

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

1. Habibuddin Mohd Hafiz, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Feasible solution for dynamic economic load dispatch using feasible operation region, IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, Vol. 8, No. 2, 査読有, 2013. 3, pp. 116-122

2. Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Shoki Fujita, Yoshifumi Zoka, Yoshiharu Okumoto, Issues for power system operation for future renewable energy penetration: Robust power system security, ELECTRICAL ENGINEERING IN JAPAN, Vol. 182, No. 1, 査読有, 2013. 1, pp. 30-38

3. 奥本芳治, 餘利野直人, 佐々木豊, 造賀芳文, 山中敏裕, 秋吉朝久, 不確定環境下におけるロバスト信頼度の適用とその評価-将来断面における N-1 信頼度の検討-, 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 1, 査読有, 2013. 1, pp. 56-63

4. Habibuddin Mohd Hafiz, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Feasible operation region for dynamic economic dispatch and reserve monitoring, EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, Vol. 22, No. 7, 査読有, 2012. 10, pp. 924-936

5. Ardyono Priyadi, Naoto Yorino, Masahide Tanaka, Takuma Fujiwara, Yoshifumi Zoka, Hironori Kakui, Mitsuhiro Takeshita, A direct method for obtaining critical clearing time for transient stability using critical generator conditions, EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, Vol. 22, No. 5, 査読有, 2012. 7, pp. 674-687

6. Naoto Yorino, Habibuddin Mohd Hafiz, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, High-Speed Real-Time Dynamic Economic Load Dispatch, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 27, No. 2, 査読有, 2012. 5, pp. 621-630

7. 奥本芳治, 餘利野直人, 佐々木豊, 造賀芳文, 藤田将輝, 山中敏裕, 将来断面における太陽光発電の大量導入に伴う信頼度面の諸課題-WEST10 機系統における振動発散型安定度面の検討-, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 2, 査読有, 2012. 2, pp. 171-180

8. 餘利野直人, 佐々木豊, 藤田将輝, 造賀芳文, 奥本芳治, 自然エネルギー電源大量導入に対する系統解析・計画・運用技術の課題-ロバスト信頼度-, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 8, 査読有, 2011. 8, pp. 670-676

9. Naoto Yorino, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, Mitsuhiro Takeshita, A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 25, No. 3, 査読有, 2010. 8, pp. 1620-1626

10. Ardyono Priyadi, Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Masahide Tanaka, Takuma Fujiwara, Yoshifumi Zoka, Hironori Kakui, Mitsuhiro Takeshita, Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct CCT Computation for Transient Stability, IEEE TRANSACTIONS ON POWER AND ENERGY, Vol. 130, No. 10, 査読有, 2010. 10, pp. 870-876

[学会発表] (計 2 3 件)

1. Yoshiharu Okumoto, An Application of Robust Power System Security to Power System Operation for High-Penetration of PV, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, 14-17 Oct 2012, Berlin, Germany

2. 奥本芳治, 不確定環境下におけるロバスト信頼度の適用とその評価-将来断面における N-1 信頼度の検討-, 平成 24 年電気学会 B 部門大会, 12-14 Sep 2012, 札幌市

3. 山中敏裕, 不確定環境下におけるロバスト信頼度の適用とその評価-蓄電池導入量に関する検討-, 平成 24 年電気学会 B 部門大会, 12-14 Sep 2012, 札幌市

4. 秋吉朝久, ロバスト信頼度の概念とその領域導出手順, 平成 24 年電気学会 B 部門大会, 12-14 Sep 2012, 札幌市

5. 玉木明宏, 確率論的潮流計算を用いたオンライン経済負荷配分に関する研究, 平成 24 年電気学会 B 部門大会, 12-14 Sep 2012, 札幌市

6. 玉木明宏, 需給制御マネージャの開発-確率論的潮流計算を用いた動的経済負荷配分-, 平成 24 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 6-8 Aug 2012, 東京都

7. 奥本芳治, 将来の不確定環境下における供給信頼度維持対策の検討について-ロバスト信頼度面からの考察-, 平成 24 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 6-8 Aug 2012, 東京都

8. 秋吉朝久, 将来系統における蓄電池の役割に関する検討-ロバスト信頼度の観点から-, 平成 24 年電気学会全国大会, 21-23 Mar 2012, 広島市

9. 奥本芳治, 大量導入に伴う太陽光発電に求められる技術的要件についての提案, 平成 24 年電気学会全国大会, 21-23 Mar 2012, 広島市

10. Yoshiharu Okumoto, A Concept of Robust Power System Security and its Application under Renewable Energy Sources Penetration, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, 16-20 Jan 2012, Washington DC, USA

11. Yoshiharu Okumoto, Power System Operation under large amount of Renewable Energy Sources Penetration -Robust Power System Security- AORC-CIGRE Technical Meeting, 26-28 Oct 2011, Chiang Mai, Thailand

12. 山中敏裕, 不確定性を有する将来系統のロバスト静的信頼領域に関する検討, 平成 23 年電気学会 B 部門大会, 30 Aug - 1 Sep 2011, 福井市

13. 大平彰史, 自然変動電源の不確定性に対応した動的経済負荷配分に関する研究, 平成 23 年電気学会 B 部門大会, 30 Aug - 1 Sep 2011, 福井市

14. Mutalib Ridzuan Abdul, A Direct Method for Computation Critical Clearing Time for Transient Stability, 平成 23 年電気学会 B 部門大会, 30 Aug - 1 Sep 2011, 福井市
15. 山田翔太, 確率論的潮流計算による発電機群の経済負荷配分法に関する研究, 平成 23 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 28-30 Sep 2011, 大阪市
16. Habibuddin Mohd Hafiz, ダイナミックス経済負荷配分の実行可能領域, 平成 23 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 28-30 Sep 2011, 大阪市
17. Naoto Yorino, Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis, 17th Power Systems Computation Conference, 22-26 Aug 2011, Stockholm, Sweden
18. 奥本芳治, 太陽光発電と負荷の脱落が過渡安定度に及ぼす影響, 平成 23 年電気学会全国大会, 16-18 Mar 2011, 大阪市
19. 山田翔太, 確率論的潮流計算を用いた発電機群の経済負荷配分法に関する研究, 平成 23 年電気学会全国大会, 16-18 Mar 2011, 大阪市
20. 奥本芳治, 不確定環境下でロバスト信頼度を連続して求める手法の提案, 平成 23 年電気学会全国大会, 16-18 Mar 2011, 大阪市
21. Habibuddin Mohd Hafiz, Feasible Operation Region for Dynamic Economic Load Dispatch, IEEE TENCON2010, 21-24 Nov, Fukuoka
22. Ridzuan Abdul Mutalib, A Novel Method for Direct Computation CCT for TSA Using Critical Generator Conditions, IEEE TENCON2010, 21-24 Nov, Fukuoka
23. 山中敏裕, 将来需給断面における太陽光発電の大量導入に起因する諸問題の一検討, 平成 22 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 23 Oct 2010, 岡山市

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

餘利野 直人 (YORINO NAOTO)  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：70182855

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者 ( )

研究者番号：