

令和元年5月25日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06224

研究課題名(和文) 太陽光発電の大量導入に対応した停電作業系統計画に関する研究

研究課題名(英文) A study on power system outage work planning for mass introduction of PVs

研究代表者

造賀 芳文 (Zoka, Yoshifumi)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40294532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：電力系統の使命は電力の安定供給であり、定期的な設備点検・保守作業は非常に重要である。特に、設備の通電停止を伴う作業(停電作業)は事前に十分な検討・計画が必要であり、この計画を「停電作業計画」という。近年は、太陽光発電(以下PV)が大量に導入されてきているが、PVからの出力は天気に左右されることから今までの計画手法が通用しなくなる恐れがある。よって本研究では、まずPV大量導入が停電作業計画に与える影響を考察し、その問題点を明らかにした。また、その問題点に対応した停電作業計画手法を提案、開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、まず停電作業系統をどのように策定するかという問題を数学的に定式化した。作業中に需要家が停電せずかつ安定運用に支障がないように制約をかけ、万一の場合でも停電量を最小とするよう目的関数に設定した。面的に広がるPVについては天候区分を吟味してエリアを設定し、天候によらず上記の制約が満たされるように定式化を拡張した。また、その問題を解くための効率的な解法アルゴリズムを開発、典型的な例題系統において効果があることも確認した。社会的には、実際の系統に対する効率的な解法が確立されれば実業務にも適用でき、大変意義深いと考える。

研究成果の概要(英文)：The mission of power system is stable power supply and maintenance works of facilities are very important. For the works with partial outages, it is necessary to carefully build a work plan in advance, and this process is referred to as "outage work planning". In these days, more and more photovoltaic (PV) generation systems are being installed into power systems. Since the output of PV varies depending on weather, there is a possibility of causing not only power imbalance but also line overloads. The PV output fluctuations make it impossible to obtain feasible system configurations during the outage works by conventional methods. In this research, therefore, we have investigated the impact of PV penetration to power systems and make the induced problems clear on the outage work planning. In addition, we have proposed an improved method for determining system configurations and shown several simulation results to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

研究分野：電力システム工学

キーワード：停電作業計画 太陽光発電 作業系統

1. 研究開始当初の背景

(1) 停電作業 (計画) とは

電力の安定供給を確保するためには、電力設備の増設・保守・点検など、電力設備の通電停止を要する作業 (以下、停電作業) が不可欠である。しかし、停電作業が必要な箇所 (作業箇所) に対して適切な迂回路を用意しておかないと、需要家に供給支障が発生する。そのように迂回路を考慮したシステムを「作業システム」というが、これは単に迂回路を用意すればよいというものではなく、系統切り替えによる線路過負荷の発生や安定度の喪失などは許されない。また、作業中にさらに事故があった場合に備え、保護協調や事故復旧のことも考慮する必要がある。

図1に一般的な需給計画・制御の流れを示す。まず、需要を予測し (左列)、それに基づいて需給計画を策定していくが (中列)、最終的には実際に電力を流す送電系統における制約をクリアしておく必要がある (右列)。停電作業を実施するためには資材の準備、人員の確保など相応の時間が必要となり、一般的に1年程度前から計画されることが多い。よって、かなり先のことを予測・想定する必要があり、不確実性が問題となる。今までは注意すべき不確実な要素といえば「需要だけ」であって、これまでの経験からかなり正確に予測が可能であった。

(2) 太陽光発電普及の影響

しかしながら、最近では太陽光発電 (以下 PV) が爆発的に普及しつつあり、電力系統を取り巻く情勢が大きく変わってきた。PV出力の増大は、電力系統側からすると需要が減っていくように見え、今後は需要に加えてPVなどの「不確定電源」についても予測が必要になる (図1左列)。また、家庭用のPVは面的に広がって分布していることが問題をさらに複雑にしている。送電系統制約を考える場合は、PV出力が場所によって異なっていることを考慮したうえで、その場所 (ここでは「エリア」と呼ぶ) ごとの出力予測が必要であり、1年も前からエリアごとの出力予測をすることは困難を極める。

図2に、停電作業当日に日射の変動によって電力潮流が急変し、線路に過負荷が発生するイメージを示す。全体的な出力変動であれば問題ない場合もあり得るが、この図のように送電系統内のエリアによって出力変動パターンが異なる場合は、電力潮流が偏ることによって線路過負荷が生じてしまう可能性を示している。特に、停電作業時は、その時点ですでに何れかの設備が停止しているわけであり、過負荷が生じやすくなっているはずである。

2. 研究の目的

よって、本研究では、主に以下の点を目的・目標として研究を進めてきた。

- (1) 電力設備の通電停止をとまなう作業を行うための「停電作業システム」計画について、現在、爆発的に普及が進んでいるPVの大量導入に対応する技術を開発する。そのために、まず典型的な送電系統制約である「過負荷」を対象に、PVの出力変動によってどのような影響が出るかを考察する。
- (2) 次に、その影響を吸収することのできる実行可能な方法を模索し、さらに面的な広がりを持つ出力変動をエリア分割して考えることで、効率的な計画手法を見いだすことが目的である。最終的には、具体的な解法アルゴリズムも開発し、典型的な例におけるシミュレーションを通じてその効果を確認することを目標とする。

3. 研究の方法

具体的な研究方法は以下のとおり。

- (1) シミュレーションモデル構築および問題定式化 … 部分的に構築済みの電力系統モデルを充実させ、太陽光発電模擬、エリア分割などが考慮できるよう拡張を施す。同時に、問題の整理、同定を行い、具体的に数学的な定式化を試みる。その後、研究期間を通じて様々な検討を継続的に実施することで適宜アップデートを行う。

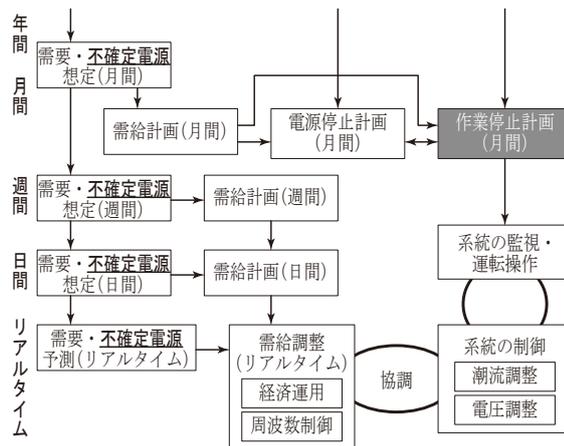


図1：需給計画・制御の流れ (電気学会技術報告第1100号をもとに作成)

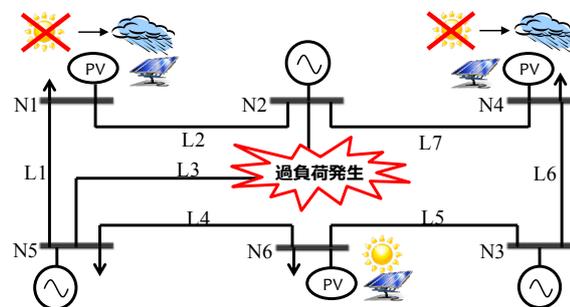


図2：PV出力の変動による過負荷発生

- (2) 効果的なエリア分割の検討と考察 … 日射量をはじめとする気象データ、および可能であれば実系統図を入手し、エリア分割の手法を検討する。
- (3) 効率的な解法の開発と成果発表 … 上記(2)での結果を反映、整理しつつ計画手法の提案を行ったうえで、効率的な解法アルゴリズムを開発・検証し、その結果を報告する。

4. 研究成果

上記の研究方法に従い、研究期間中は進捗に応じでさまざまな検討を行ってきたが、ここでは最も代表的な検討例、成果（主に雑誌論文②）について概要を示す。

(1) はじめに

本研究グループでは、以前から作業系統を決定する問題について検討してきた。例えば引用文献①では、種々の運用上の制約を満たしながら事故時に生じる供給支障電力の最も少ない系統を選択するという方法をすでに提案しており、電力の安定供給を保ちつつ事故時の需要家へのリスクがより低い作業系統を得ている。しかしながら、PV大量導入時においても電力の安定供給を損なうことなく停電作業を行うためには、PVの出力変動がもたらす線路潮流の不確実性を考慮した計画を立てる必要がある。そこで本研究では、PVの出力変動を考慮した停電作業系統の決定法を提案する。まず、PVの出力変動を考慮した場合に生じる従来システム〈引用文献①〉の問題について述べた後、提案手法について説明する。最後に、提案手法の有効性を検証するためにシミュレーションを行ったので、これについて報告する。

(2) PVの出力変動を考慮した停電作業計画

電力系統内にPVが大量に導入された際、晴れの日を想定して策定される従来の計画では天候によるPV出力変動の影響が考慮されていないため、供給信頼性が確保されているかどうか判断できない。そこで、PVの影響を調べるため、PVを天候によって出力が変動するノード注入電力と捉えて模擬系統の複数個所に設置し、設置個所の天候条件のパターンを変えてシミュレーションを行った。その結果、線路過負荷等の影響でPV出力パターンによって作業可能な系統構成が変化することが分かった〈引用文献②〉。この場合、作業日の系統構成を一つに決定できないため、停電作業計画を策定することができない。

そこで本稿では、PV出力パターンに左右されない作業系統の決定手法を提案する。具体的には、まずPV出力を可能な限り詳細に模擬するため気象区などの情報を参考に対象系統を複数エリアに分割する。次に、それぞれのエリアの天候の組み合わせを考え、その全てに対応する作業系統を導出するものである。図3にそのフローチャートを示す。

本システムは2つのシステムから構成され、まずMain systemにおいて全天候に対応する作業系統を導出する（全天候対応ケース）。ただし、Main systemにおいて解が得られない場合はSub systemを適用し、制約緩和策を採用することで対応する（要過負荷解消ケース）。ここで、PVの出力条件は100%と0%の2パターンのみとし、負荷量は作業日の需要ピーク断面とする。これは、最過酷断面を想定して計画を策定しておくことで、その他のケースにおいても供給信頼度が確保できるという考え方に基づいている。次に、得られた候補の中から全PV出力パターンに共通して得られる系統を選択することで、どのようなPV出力パターンであっても電力の安定供給を確保しつつ作業を行える作業系統候補を導出することができる。さらに、その中でN-2供給支障量（2箇所同時故障時の供給支障量）の上位にランキングされるものを作業系統とすることにより、事故時の需要家へのリスクがより低い作業系統が得られる。

しかし、大容量のPVが局所的に設置された場合、作業箇所によってはMain systemにおいて全PV出力パターンに共通する作業系統候補が得られない場合がある。その場合は対策としてSub systemを適用し、解が得られないPV出力パターンにおいて制約を緩和した解、即ち後述する事前の過負荷解消策を考慮した作業系統候補を採用することとする。

(3) 作業系統候補生成

本章では、前述の全天候対応ケース（Main system）、および要過負荷解消ケース（Sub system）における作業系統候補生成について問題の定式化とその解法を示す。

(3)① 全天候対応ケース

本ケースでは、全PV出力パターンに共通する作業系統候補の中でN-2供給支障電力ランキングの高い系統を選定する。

【定式化】

本問題は、電力設備の接続状態を決定変数とし、全PV出力パターンにおいて実行可能であるという制約条件下で、N-2供給支障電力の最小化を図る最適化問題である。ここで、N-2供給

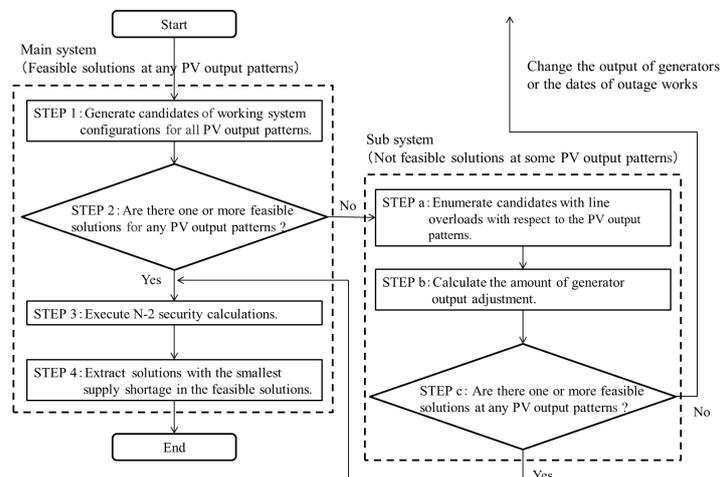


図3：提案手法のフローチャート

支障電力とは、任意の2箇所と同時に事故が起こった場合に生じる供給支障量を、全ての事故の組み合わせに対して合計したものである。また、目的関数を説明するために必要な式を以下に説明しておく。式(1)はPV出力パターンのときの系統のN-2供給支障電力を示している。

$$A(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}_k) = \sum_{i=1}^{MC} \sum_{j=1}^{MC} \sum_{b=1}^{MB} \omega_{bij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cdot L_b(\mathbf{p}_k) \cdots (1)$$

ここで、 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{MC}]^T$: 決定変数 (電力設備の接続状態を表す1または0の要素を持つ行列)、 \mathbf{y} : 従属変数 (電圧, 電流, 発電機出力 \dots)、 k : PV出力パターン。ただし、 $k=1$ の場合 (全PV出力100%) を標準ケースとする。これは停電作業計画が基本的には晴れの日を想定して策定されることによるものであり、 $k=1$ のとき従前のシステムと結果が一致する。PV出力パターン数は、PV設置個所数 n に対して出力100% or 0%の2通りとして 2^n パターン存在し、 $1 \leq k \leq 2^n$ 、 \mathbf{p}_k : PV出力パターン k における負荷および発電パラメータ、

$\omega_{bij}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$: 従属変数 \mathbf{y} において、決定変数 \mathbf{x} に依存する重み付け0-1変数、

$\omega_{bij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \cdots$ 従属変数 \mathbf{y} , 決定変数 \mathbf{x} において、想定事故 i, j が同時に発生した時、母線 b で供給支障を発生しない場合。

$\omega_{bij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 \cdots$ 従属変数 \mathbf{y} , 決定変数 \mathbf{x} において、想定事故 i, j が同時に発生した時、母線 b で供給支障を発生する場合。

i : 想定事故ブランチ1, j : 想定事故ブランチ2, MC : ブランチ数, b : 母線番号, MB : 母線数, L_b : 母線の負荷量

《目的関数》

全PV出力が100%の場合 (すなわち、PV出力パターン $k=1$ のとき) に実行可能な系統のN-2供給支障電力の総和を目的関数とし、それを式(2)に示す。本問題を解くことで、全PV出力パターンに共通して得られる系統の中で、晴れの日に最もN-2供給支障電力が少ない系統を作業系統として選択することになる。

$$\text{minimize } A(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}_1) \cdots (2)$$

ここで、 \mathbf{p}_1 : 出力パターン $k=1$, すなわち全PV出力100%のときの負荷及び発電パラメータ。
《制約条件》

- PVの出力変動を考慮した作業系統制約

作業系統候補 \mathbf{x} は、全PV出力パターンにおいて実行可能でなければならない。

$$\forall \mathbf{x}, \mathbf{x} \in \bigcap_{k=1}^{2^n} \mathbf{X}_F(k) \cdots (3)$$

ここで、 $\mathbf{X}_F(k)$: PV出力パターン k で実行可能な解の集合, n : PV設置個所数。

他の制約条件については、引用文献①に記載されているため、ここでは以下に簡単に示す。

- 需給均衡制約

電力系統の供給力と需要は常に平衡する必要がある。対象となる系統は貯蔵設備を考慮していないため、常に発電量は負荷の消費電力と設備損失分の合計でなければならない。

- 系統運用制約

電力系統を運用する上で常に満たすべき制約であり、本研究では、系統分離制約、短絡容量制約、設備容量制約、母線電圧制約、ループ数制約、常時系統ベース制約等を考慮している。

【解法手順】

本問題は決定変数 \mathbf{x} を決める整数計画問題であるが、提案手法では解法として分枝限定法を適用する。以下、図3の解法フローチャートを用いて処理手順について説明する。

(Step 1) 各PV出力パターンにおいて実行可能な作業系統候補を生成する。

(Step 2) 全PV出力パターンに共通する候補が存在するかどうかを判定し、存在しない場合は以下の処理を停止し、Sub systemに移行する。

(Step 3) 全PV出力パターンに共通する候補が得られた場合はそれぞれについてN-2供給支障電力を算出する。

(Step 4) N-2供給支障電力が少ない順に作業系統候補を並べ、ランキングの高い系統を作業系統とする。

(3)-② 要過負荷解消ケース

これまで説明してきた図3のMain systemに対応する作業系統候補生成システムにおいて、大容量のPVが局所的に設置された場合、作業箇所によっては作業系統候補が得られない場合がある。そこで、N-1事故対策付候補も解候補として採用する手法を提案する。具体的には、あらかじめN-1事故が起こった際に線路過負荷を解消できる発電機の出力調整量を決めておくことで、速やかに過負荷解消を行えるよう準備(事故対策)をしておく。これにより、N-1信頼度基準を満たさなくても事故対策付きであれば、ある程度の供給信頼度を持つ作業系統候補として採用可能である。

そこで本手法では、運用制約に違反した作業系統候補に対して、発電機の出力制御によって過負荷解消可能か否かを判定するSub systemを従来のシステムに付加する。制約違反候補が過負荷解消可能であれば、事故対策が予め備わっている作業系統候補とみなす。過負荷解消操作は発電機の出力制御により行うが、可能な限り最小の調整量であることが望ましい。本システムでは、直流潮流計算法をベースとし、発電機の調整量を変数とした線形計画問題として捉え、シンプルクス法にて解を導出する。

【定式化】

本問題は、N-1 過負荷制約違反をおこす作業系統候補の過負荷解消操作における発電機の調整量を決定変数とし、運用制約を持つ条件のもとで調整量の最小化を図る最適化問題となる。

《目的関数》

過負荷解消操作における調整対象とする発電機の出力調整量の絶対値の総和を目的関数としその最小化を考える。

$$\text{minimize } \sum_{m=1}^{MP} (|G_m^+| + |G_m^-|) \cdots (4)$$

ここで、 m : 発電機番号, MP : 発電機総数, $|G_m^+|$: 発電機の出力増加量, $|G_m^-|$: 発電機の出力減少量。

《制約条件》

- 線路潮流調整量の上下限制約 線路潮流は常時容量内に抑えなければならない。

$$-F_j^{max} \leq F_j \leq F_j^{max} \cdots (5)$$

ここで、 F_j^{max} : ブランチ j に流せる電力潮流の上限, F_j : ブランチ j を流れる電力潮流。

- 需給均衡制約 出力調整によって需給均衡が崩れてはならない。

$$\sum_{m=1}^{MP} (G_m^+ + G_m^-) = 0 \cdots (6)$$

- 発電機出力上下限制約 出力調整によって発電機の出力が上下限を超えてはならない。

$$P_m^{min} \leq P_m \leq P_m^{max} \cdots (7)$$

ここで、 P_m^{min} : 発電機 m の出力下限, P_m^{max} : 発電機 m の出力上限, P_m : 発電機 m の出力。

【処理手順】

図3の解法フローチャートの Sub system に対応する処理手順について、以下に説明する。

- (Step A) Step 2 で共通する作業系統候補が存在しない PV 出力パターンにおいて過負荷制約違反を起こした作業系統候補を列挙する。
- (Step B) Step A で列挙した作業系統候補それぞれに対して、過負荷解消に必要な最小の出力調整量をシンプレックス法により最適化問題を解くことで決定する。
- (Step C) 過負荷解消可能な作業系統候補が存在する場合は、それらを事故対策付き系統として作業系統候補に加え Step 3 以降に進む。

(4) シミュレーション

提案手法の有効性を検証するためにシミュレーションを行った。実運用で使用された常時系統をもとに作成した系統を用いて、提案する PV の出力変動を考慮した停電作業系統生成手法の全天候対応ケースと、要過負荷解消ケースそれぞれについて有効性を検証した。

(4)-① 全天候対応ケース

【シミュレーション条件】

提案手法の有効性を検証するため、109 ノード 138 ブランチモデルを用いてシミュレーションを行った (雑誌論文②参照)。この系統の特徴は、総需要約 3000MW, 発電機 7 基を有し、基幹系統をループ、地域供給系統を放射状で運用していることにある。シミュレーションでは様々な作業を検討したが、ここではある 1 回線の停電作業を想定した結果を示す。また、面積 7000km² をカバーする系統の地域性を考慮して 3 つのエリア (A, B, C) に分け、同一エリアの天候は変わらないものとした。従って、PV 出力パターンは出力 100% と 0% の 2 通りについて考えるので 8 通りとなる。PV 導入条件は、対象地域の実際の導入例及び導入計画を基に、メガソーラー及び、住宅用等それ以外の PV 計 150MW (系統容量比 5%程度) が沿岸部を中心に地域全域で導入された場合を想定した。

【シミュレーション結果】

提案法を適用した結果、従来の手法では得られなかった「どの PV 出力パターンであっても需要家に供給支障を生じさせることなく作業を行うことができる系統」を導出することができた。この例では、エリア A, B, C における PV 出力が 100% のときにランキング 1 位の系統が PV 出力パターン全てに共通して得られるという結果となった。すなわち、従来のシステムでは得られなかった、全 PV 出力パターンにおいて需要家に供給支障を発生させることなく停電作業を行うことができる作業系統を導出することができたことになる。

(4)-② 要過負荷解消ケース

【シミュレーション条件】

先ほどと同じ系統において、PV 導入量 300MW (系統容量比 10%程度) を想定し、同じくある 1 回線の停電作業を想定した。これは Main system だけでは解が得られないケースである。

【シミュレーション結果】

Main system において作業系統候補が得られない PV 出力パターンにおいて Sub system を適用した結果、全 PV 出力パターンに共通する作業系統を導出することができた。例えば、本想定条件では、Main system において PV 出力パターンのうち 2 つで停電作業系統候補が得られなかったが、Sub system を適用して発電機の出力調整による過負荷解消を試みた結果、全 PV 出力パターンに共通した作業系統を導出することができた。

(5) おわりに

本研究では、太陽光発電の出力変動を考慮した停電作業計画における作業系統の決定法について提案し、その解法を述べた。また、実系統をベースにして作成した系統を用いたシミュレ

ションを通して検証を行い、提案法の有効性を確認した。今後の課題としては、様々な条件を想定したシミュレーションによる提案手法の有効性の確認、処理時間の短縮を図る効率的なアルゴリズムの導入等が挙げられる。

〈引用文献〉

- ①朝原春海, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木博司:「高供給信頼度系統組合せ問題として捉えた停電作業計画手法の提案」, 電気学会論文誌 B, Vol.125, No. 1 (2005)
- ②伊藤睦晃, 造賀芳文, 川原耕治, 餘利野直人, 佐々木豊:「太陽光発電の大量導入時における停電作業計画に関する一考察」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 39 (2014)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 造賀芳文, 太陽光発電大量導入に対する配電系統の技術的課題, 太陽エネルギー, 査読無, Vol.45, No.2, 2019, 41-47
- ② 伊藤睦晃, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊, 小林良平, 太陽光発電の出力変動を考慮した作業系統決定法の提案, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol.45, No.137, 2017, 117-123

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 造賀芳文, 配電系統への太陽光発電大量導入に対する技術的課題, 日本太陽エネルギー学会・太陽光発電部会第 25 回セミナー, 招待, 2018
- ② 森川史也, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊, PV の大量導入に向けた停電作業系統決定法—最過酷条件の一考察—, 平成 30 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2018
- ③ 森川史也, 川原耕治, 造賀芳文, 池田淳平, 餘利野直人, 佐々木豊, PV の大量導入に向けた停電作業系統決定法—最過酷条件の一考察—, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2018
- ④ 池田淳平, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊, PV 発電を考慮した作業系統生成の信頼度評価に関する一考察, 平成 30 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016
- ⑤ 池田淳平, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊, 伊藤睦晃, PV 発電を考慮した作業系統生成の信頼度評価に関する一考察, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2016

6. 研究組織

(1)研究分担者 (なし)

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 池田 淳平, 森川 史也

ローマ字氏名: (IKEDA, junpei), (MORIKAWA, fumiya)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。