

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04328

研究課題名（和文）不確定性を有する電力システムの過酷状態の検討および停電作業計画への応用

研究課題名（英文）A study on severe condition of power systems with various uncertainties and its application to outage works

研究代表者

造賀 芳文（Zoka, Yoshifumi）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：40294532

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：電力システムの点検・整備に必須である停電作業計画について、電源の不確定性に対応する技術を開発した。これまでの考え方を再検討し、どのような需給状態をベースに、どのような方法で作業システムを策定すべきかについて研究を行った。まず、今までの想定需給断面を見直して新たに想定すべき条件を検討し、その条件を導くための定式化を試みた。また、簡単な例題システムに適用し、その効果を確認した。さらに考慮が必要な点について研究を進め、大規模なシステムでの検討も実施した。結果、実施可能な作業システムが極めて少なくなるという厳しい場合が存在することが判明した。よって、本研究のような検討が将来計画には必要であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学会発表を行ったときにも、実際に電力システムの運用を担っている一般送配電事業者から停電作業の計画・調整が困難になってきているという声があり、重要な社会インフラである電力システムの維持に対して重要な問題であるため、社会的な意義は大きいと考える。また、今回の研究は最悪な需給状態を想定することを提案し、またその条件を具体的に数学的な問題として定式化した点に学術的な意義がある。また、その問題を解くための現実的な解法を開発したことも意義として挙げられる。得られた研究成果は学会発表および国際会議や電気学会の論文誌にて発表した。

研究成果の概要（英文）：For outage work planning, which is essential for the inspection and maintenance of power systems, we have developed a technique to deal with the uncertainties of power supply. We reviewed the previous approach and studied how the outage work system should be planned based on what kind of supply-demand conditions.

First, we have reexamined the conventional supply-demand condition, and attempted to build a new formulation to derive appropriate conditions. We applied the formulation to a simple example system and confirmed its effectiveness. Further research was conducted on points requiring further consideration, and additional simulations were also conducted on a large-scale system. As a result, it was found that there existed severe cases in which the number of outage work system candidates that could be performed was extremely small. Therefore, this kind of studies should be considered necessary for future planning.

研究分野：電力システム工学

キーワード：停電作業 作業システム 太陽光発電 不確定性

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、電力設備の点検・修理・増設などの保守作業が不可欠である。そのうち、通電を停止して実施する必要のある作業を「停電作業」という。通常、電力系統は送電ロスの削減や保護協調などの理由から、一部を開放し常時系統として運用している(図1上)。よって、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(図1中)。そのように迂回路を考慮した系統を「作業系統」というが(図1下)、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(限度を超えて電力が流れること)などは絶対に避けねばならない。

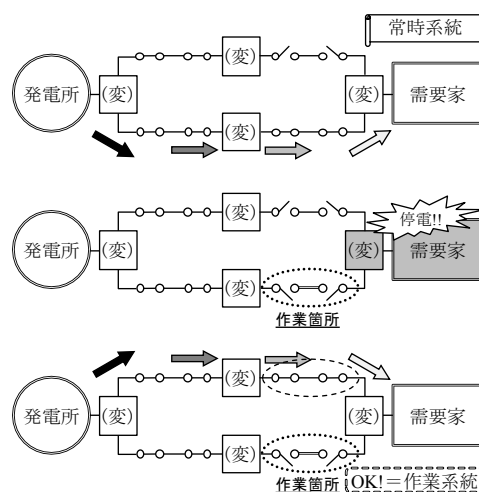


図1：停電作業系統

図2に、今まで一般的に行われてきた需給計画・制御の流れを示す。縦方向に時系列を考え、内容を横3列に並べて整理してある。電力需給(電力の需要と供給)は、「需要=供給」という関係(需給バランス)を常に維持する必要があり、この関係が崩れると周波数が乱れ、最悪の場合は大停電に至る。よって、かなり前からどれくらい電気が使われるかを予測し(左列)、それに基づいてどのように発電・送電すべきかを検討して需給計画を作成する(中央列)。ただ、実際は電力を流す送電系統における制約(例えば過負荷など)をクリアしておく必要がある(右列)。よって、かなり先のことを予測・想定しておく必要があり「不確定性」が大きな問題となる。

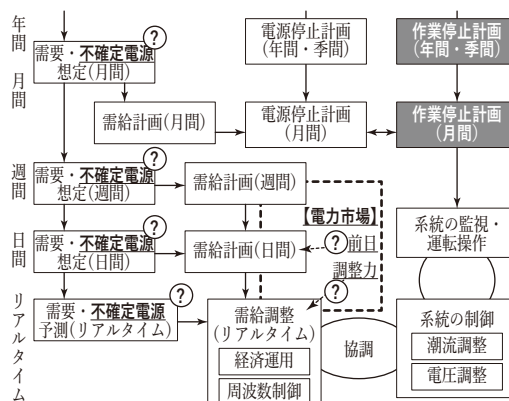


図2：需給計画・制御の流れ
(電気学会技術報告第1100号をもとに作成。本報告者が幹事を務めた調査専門委員会による執筆)

(2) 不確定性の増大(背景)

今まで不確実な要素といえば需要側が主であり、それも豊富な経験から計画用の予測は可能であった。しかし、今後は以下の2点が大きな問題となる。

- ① 太陽光(以降PV)、風力など「不確定電源」の大量導入が進展する。
- ② 市場で調達することになるため、電源の不確実性が増大する。

①について、すでにPVが大量に導入されてきており、その出力を予測する必要がある。ただ、本研究の対象とする1年前のPV出力予測については困難である。また②について、すでに電力系統は自前の電源を持たない一般送配電事業者が運用している。すなわち、その都度いろいろな場所にある電源を調達し、PVの出力変動に対応しながら運用・制御を担っており、前日市場がクローズするまで、どの電源が発電・調整に使えるか正確には分からない状態である(図2「◎」部分)。よって、当日になって①急な天候変化でPV出力が変動し、かつ②その調整が間に合わず、過負荷などの問題が生じる事態に陥りかねない(図3)。

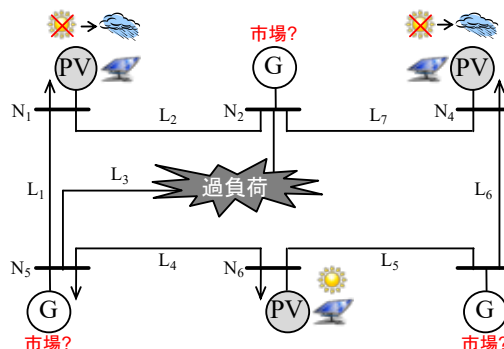


図3：天候変化および市場の影響

(3) 検討断面・計画のあり方(問い)

よって、計画時点では作業系統を策定しようにも「どのような状態を想定すべき」なのか自体が問題になると考えられる。今までは、最も多く電気が使われる状況が最も過酷だと考え、その

過酷な状態を「検討断面」として想定してきた。これまでの経験から需要の推定も可能であり、対応する発電パターンも容易に想定することができた。しかし、今後は「どのような需給断面を想定すべきか、その想定の上でいかに計画を策定すべきか」を検討する必要がある。

2. 研究の目的

よって、電力系統の通電停止をとまなう作業を行うための「停電作業系統」計画について、普及が進んでいる PV などの自然変動電源の大量導入に対応する技術および現在検討が進められている電力市場に対応する技術を開発することが目的である。今までとは異なり、今後の電力系統では「自然変動電源の導入と電力自由化」に伴う 2 つの不確実性が大きな問題となるが、早くから準備が必要な停電作業系統計画については特に顕著であり、計画方法の再検討が必要である。よって、まず今までの前提条件（想定する需給断面）を見直し、新たに定式化を試みることにより問題を同定する。その上で、効率的な解法アルゴリズムも開発し、具体的な停電作業系統計画を策定することを試みる。

3. 研究の方法

本研究の内容を項目に分けると以下ようになる。

- (1) 出力予測が活用できない中、どのような系統状態を検討断面とすべきか検討。
- (2) その断面を導くための具体的な考え方や定式化などを提案。
- (3) 提案する検討断面で実際にシミュレーションを実施し、結果を考察。

(1) 検討断面の検討：まずは、予備研究の内容をベースに、研究分担者とともに、実際に運用に携わる方のご意見も聞きながら考え方を整理し、検討を行う。

(2) 問題の同定および定式化：次に、その断面を導くという問題を数学的に表すために定式化を試みる。

(3) シミュレーション実施・考察：その定式化をもとに、例題系統を用いて実際に検討断面の策定を試みる。その際、定式化に相応しい効率的な解法アルゴリズムも開発する。得られた結果をもとに、(1)の断面検討や(2)の問題定式化まで戻り、改めて意見を聞きながら改良を加える。

4. 研究成果

上記、研究の方法にしたがって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である研究成果（主に雑誌論文[J1]）について、その概要を示す。

(1) 過酷潮流条件の検討

本研究では、停電作業の年間計画を対象に作業系統の導出を目的としているため、事前に作業当日の天候や発電機の供給状態は予見できない前提で考える必要がある。想定する需給状態が過酷であるほど得られる作業系統は「強い」系統であり、計画者にとって信頼できる系統になると考えられる。そのため、まずは天候特性や運用の都合は考慮せず、想定しうる最過酷な需給状態を導く過酷潮流条件を検討した。本研究では停電作業における過酷を 2 つの観点から考えた。

- ・ 停電作業中の事故発生による被害の大きさ
（負荷側の想定に関連：N-2 供給支障電力量…同時 2 箇所の事故で停電する量）
- ・ 制約違反の起こりやすさ
（供給側の想定に関連：線路過負荷制約…線路に流せる電力の上限となる制約）

まず前者について、事故時に需要が多いほどその被害が大きくなり過酷になると考える。後者については、満たすべき系統運用の制約を違反しやすいことも過酷な潮流状態であると考え。代表的な制約は線路過負荷制約であり、本研究では線路過負荷制約違反が起きやすい潮流状態を過酷とした。線路過負荷の発生しやすさを表す尺度として「余裕量」を考え、過酷と呼べる供給状態を導く条件を検討した。この余裕量を用い、供給状態に関して「広域的」および「局所的」の 2 つの過酷条件を検討した。各過酷条件で想定する潮流状態のイメージを図 4 に示す。

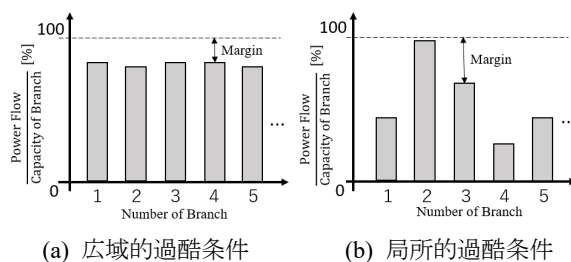


図 4：過酷条件のイメージ

(2) 過酷潮流条件の定式化

①広域的過酷条件 … 系統全体で余裕量の総和が最小の状態を過酷とみなす。系統全体で余裕

量が最小となる発電機およびPVからの供給状態が導出されるよう定式化を行った。

【目的関数】「系統全体で余裕量の総和」の最小化

【決定変数】各発電機およびPVの出力量

【制約条件】

- ・需給均衡制約：常に、発電電力は負荷の消費電力の合計と等しくなければならない。
- ・線路過負荷制約：線路容量を超過する潮流が流れてはならない。
- ・発電機出力上下限制約：発電機の出力は上下限を超過してはならない。
- ・PV出力上下限制約：PVの出力は上限を超過してはならない。

なお、本定式化は、計画問題のための需給想定断面の検討を目的としており、直流法潮流計算を前提としている。

②局所的過酷条件 … 局所的に余裕量が最も小さくなる状態を過酷とみなすことを考える。ここでは、線路潮流最大化と最小余裕線路選択の2段階の問題として定式化した。

【目的関数1】「各1線路潮流」の最大化

【目的関数2】「最小余裕線路」の選択

【決定変数】… ①に同じ。

【制約条件】… ①に同じ。

その他、「PV出力の類似性を考慮した定式化」も実施したが、ここでは省略する。

(3) 例題系統でのシミュレーション

電気学会の標準モデル East10 機系統モデルをベースとし、本検討のために変更を加えた例題系統でシミュレーションを行った(図5)。

まず、先に定式化した問題を解くことで得られた過酷な需給状態は以下のとおりとなった。

①広域的過酷条件の場合：主に発電機から電力が供給されている状態

②局所的過酷条件の場合：発電機とPVが全体的に出力している状態

よって、①広域的過酷条件については設備形成時に計画した通り発電機が出力すれば全体的に余裕が分散し、効率的に電力供給がなされていることができ、②局所的過酷条件については設備形成時には考慮されていないPV出力の影響が大きいことが見て取れる。

次に、それぞれの過酷条件にて実際に作業可能な系統候補を求め、集計した結果を表1に示す。②の局所的過酷条件の方が得られた作業系統候補の数が圧倒的に少なく、PV出力が大きい場合は過負荷となりやすいことから、より厳しい条件であることが分かった。

最後に、そのような過酷な断面でも作業可能であり、かつ最もN-2供給障害電力量(停電量)が小さくなった作業系統を図5に示す。これは、22番線路(赤丸)を作業停止する場合であるが、停電作業をすることによって弱くなった線路の近くおよび負荷が重いノードの近くにブランチを追加することで、制約違反の起こりやすい供給状態においても停電作業中の事故発生による被害の大きさを最小限に抑える系統が得られたと考えられる。また、実規模の大きなモデル系統でもシミュレーションを実施したが、概ね同じような傾向であったことを付記する。詳細は、文献[J1]を参照されたい。

(4) まとめ

以上、電源の不確実性に対応するために、停電作業計画時には本稿で提案したように過酷な需給断面を考慮する必要性が十分に存在するといえる。これらのことから、本提案は、実際の停電作業計画に活用できる可能性があることも判明したと考えられる。

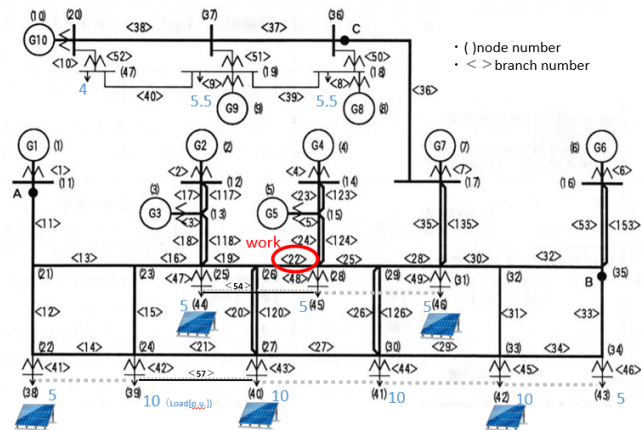


図5：例題系統および作業系統候補の一例

表1：得られた作業系統候補数

過酷条件の種類	従来	①広域的条件	②局所的条件
PV類似の考慮	-	×	○
作業系統候補数	1202	1098	49
共通して得られた作業系統候補数	-	1098	48
		47	

【主な発表論文など】

〔論文誌・国際会議〕

- [J1] 造賀芳文, 重光紗英, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊:「電源の不確定性を考慮した停電作業系統候補導出に関する研究～過酷潮流条件の検討～」, 電気学会論文誌 B, Vol. 142, No. 6, 2022. (掲載決定)
- [J2] Y. Zoka, S. Shigemitsu, N. Yorino, Y. Sasaki and K. Kawahara, “A Derivation Method for Outage Work Grid Configurations under Uncertainty of Power Sources,” Proc. of 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715572, 2021.

〔学会発表〕

- [C1] 森川史也, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊:「自然変動電源を含む電源の不確定性を考慮した停電作業系統の検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-19-079/PSE-19-091, 2019.
- [C2] 重光紗英, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊:「停電作業系統の導出における電圧を考慮した過酷条件の検討」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 204, 2020.
- [C3] 重光紗英, 造賀芳文, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊:「停電作業系統導出問題における過酷潮流条件の検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-20-073/PSE-20-078, 2020.
- [C4] 重光紗英, 造賀芳文, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊:「電源の不確定性を考慮した停電作業系統候補導出に関する研究～作業系統の評価～」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-21-062/PSE-21-075, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 造賀芳文, 重光紗英, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊	4. 巻 142, 6
2. 論文標題 電源の不確定性を考慮した停電作業系統候補導出に関する研究 - 過酷潮流条件の検討 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zoka, S. Shigemitsu, N. Yorino, Y. Sasaki and K. Kawahara	4. 巻 -
2. 論文標題 A Derivation Method for Outage Work Grid Configurations under Uncertainty of Power Sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISGTAsia49270.2021.9715572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 重光紗英, 造賀芳文, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊
2. 発表標題 電源の不確定性を考慮した停電作業系統候補導出に関する研究 - 作業系統の評価 -
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zoka, S. Shigemitsu, N. Yorino, Y. Sasaki and K. Kawahara
2. 発表標題 A Derivation Method for Outage Work Grid Configurations under Uncertainty of Power Sources
3. 学会等名 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重光紗英, 川原耕治, 造賀芳文, 餘利野直人, 佐々木豊
2. 発表標題 停電作業系統の導出における電圧を考慮した過酷条件の検討
3. 学会等名 電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重光紗英, 造賀芳文, 川原耕治, 森川史也, 餘利野直人, 佐々木豊
2. 発表標題 停電作業系統導出問題における過酷潮流条件の検討
3. 学会等名 2020年度電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川 史也, 川原 耕治, 造賀 芳文, 餘利野 直人, 佐々木 豊
2. 発表標題 自然変動電源を含む電源の不確定性を考慮した停電作業系統の検討
3. 学会等名 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川原 耕治 (Kawahara Koji) (80224822)	広島工業大学・工学部・教授 (35403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------