

複雑化する電力系統の運用をサポートする 停電作業調整支援システム

Outage Work Support System Capable of Efficiently Coordinating Schedules of Complicated Power Grid Operations

水谷 遼太 MIZUTANI Ryota 豊嶋 伊知郎 TOYOSHIMA Ichiro 館小路 公士 TATEKOJI Takashi

電力系統では点検・補修・工事のために、電力設備を停止する作業（以下、停電作業と呼ぶ）が必要である。停電作業は送配電事業者ごとに年間数万～十数万件に上り、事前の調整は豊富な運用知識と経験を持つ技術者が人手で行っている。近年、経年設備の増加や、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の大量連系による系統運用の複雑化、働き方改革による業務環境の変化などにより、停電作業調整が一層困難になると予想される。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、これまでの系統制御システム開発のノウハウを生かして停電作業調整支援システムを開発している。停電作業調整を効率化する新たな業務フローを考案して適用し、送配電事業者の実系統でのフィールド実証を通して、基本機能の有効性を確認した。

To ensure stable power grid operation, several tens of or hundreds of thousands of outage tasks necessary for suspending equipment, such as inspections, repairs, expansions, etc., are performed annually by each power distribution and transmission company in Japan. Coordination of outage task schedules is currently handled by a limited number of engineers with a high level of operational knowledge and experience. However, an increasing number of aging facilities, complicated grid operations due to mass introduction of renewable energy systems, and changes in business configurations due to promoting workstyle reforms, have become issues of vital importance.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is developing an outage task support system applying a new workflow to streamline coordination processes using expertise gained during the development of grid control systems. Verification tests applying a prototype to a power distribution and transmission company's actual grid have confirmed the effectiveness of its basic functionality.

1. まえがき

電力系統を運用する中で、新たな発電設備の連系、送電線の保全点検、変電所内の設備の点検・修繕・増設など様々な要因で、対応する電力設備を停止する必要がある。停電作業の要求は、送変電設備の場合は送配電事業者の各設備主管部門が行い、停止可否判断は送配電事業者の系統運用部門が実施する。

系統運用部門が停止可否の判断を行う上では、代替供給ルートを確認し、当該ルートの過負荷防止や適性電圧維持はもちろんのこと、作業中に他設備の事故が発生した場合でも電力供給が維持可能かどうかの指標（以下、供給信頼度と呼ぶ）や、あるいは事故停電箇所に対して復旧ルートを確認可能であるかなどの事前検討を行う。必要であれば供給ルートの切り替えなどの対策を実施する。更に、電力設備の接続形態により、同時停止すると電力供給に支障が生じる場合は、当該設備を同時停止不可と判断する。また、同時停止により供給信頼度が低下する場合も、当該設備を同時停止不可と判断することがある。

電力設備の主管部門から、当該設備が停止不可の日時に停電作業要求された場合や、同時停止禁止設備に対して同じ日時に停電作業要求された場合、あるいは同じ供給ルートの複数作業を停電回数の低減から同一日時で行う場合などは、系統運用部門が仲介して、停止作業日時を変更する。このような手続きを、停電作業調整と呼ぶ。

停電作業調整では、これらのほか、作業員や公衆の安全確保や、作業停止の公平性、合理性など、様々な制約を考慮しながら作業日を調整する。停電作業の件数は、電力系統の規模によって年間数万～十数万件に上るが、現状これらの調整は、豊富な運用知識と経験を持つ技術者が人手で行っている。

今後、設備の経年劣化による修繕や更新の増加、再エネの大量連系による系統運用の複雑化や、更には、働き方改革などの社会変化への対応などから、停電作業調整の困難化が予想される。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、このように複雑化する電力系統の停電作業調整の省力化を実現する停電作業調整支援システムの開発に取り組んでいる。ここでは、停電

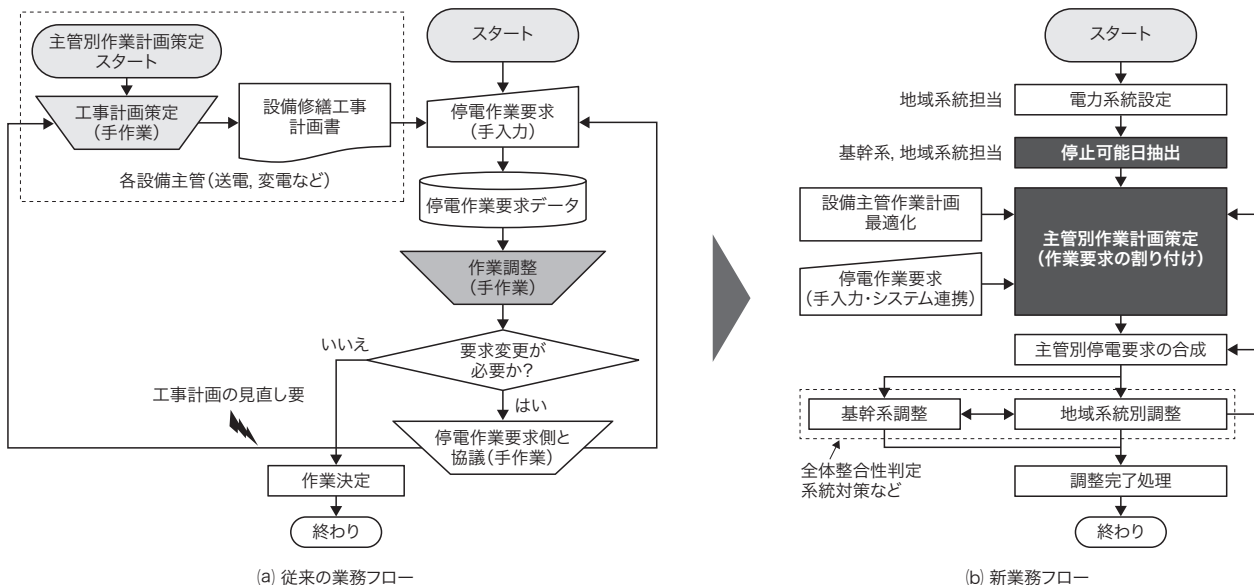


図1. 停電作業調整の業務フローの比較

従来の業務フローでは、各設備主管部門は停止可能日を事前に把握できないため、調整時に多くの手戻りが発生する。新業務フローでは、あらかじめ停止可能日が提示されるため、手戻り削減が可能となる。

Comparison of conventional and new workflows to plan outage tasks

作業調整支援システムの新たな業務フロー、省力化を実現するための主要技術、及び実系統でのフィールド実証について述べる。

2. 停電作業調整の新業務フローの提案

停電作業調整支援システムの大きな特長は、停電作業要求から調整に至る業務フローを、根本的に見直した点にある。図1に、停電作業調整の従来の業務フローと新業務フローを示す。従来の業務フローでは、停止可能日を事前に把握する手段がなく、停電作業要求を全て集めてから作業日時や作業内容を調整することから、多くの調整件数を処理する必要がある。また、変更があれば停電作業要求の最上流にある工事計画に立ち返って見直しが必要となる場合があり、大きな労力が掛かる。新業務フローでは、前段の、“停止可能日抽出”の処理が年間の全供給ルートでの停止可能日を自動抽出して提示し、後段の“主管別作業計画策定”ではホテル予約のように停電作業要求元が停止日を選択する仕組みを構築した。更に、主管別作業計画策定で選択した停止日が他作業と重複する場合は、停電作業要求ごとに指定する作業日の変更許可範囲内で、ほかの停止可能日に自動で要求日を変更できる。

これらの仕組みにより、停電作業要求後の人手での調整件数を極小化した。図2に、停止可能日への停電作業要求の割り付け結果の表示例を示す。



図2. 停止可能日への停電作業要求の割り付け結果の表示例

カレンダー画面に各供給ルートの停止可否が表示され、停止可能日に停電作業要求が割り付けられる。

Example of display showing allocation of possible outage tasks

3. 停止可能日抽出

新業務フローの停止可能日抽出では、供給ルートを構成する各電力設備（送電線、変圧器、母線など）に対して、停止可否判定及び同時停止可否判定を実施する。停止可否判定や同時停止可否判定では、停止設備を除く残りの設備で事故が発生した場合でも電力供給を維持できるかどうかのポイントとなる。これらの判定には、放射状系統と基幹ループ系統で異なるロジックを用いる。以下に、各判定方法について述べる。

3.1 放射状系統の停止可否判定

放射状系統において、ある電力設備の作業停止時における残設備の接続パターンは、遮断器や断路器の入／切によ

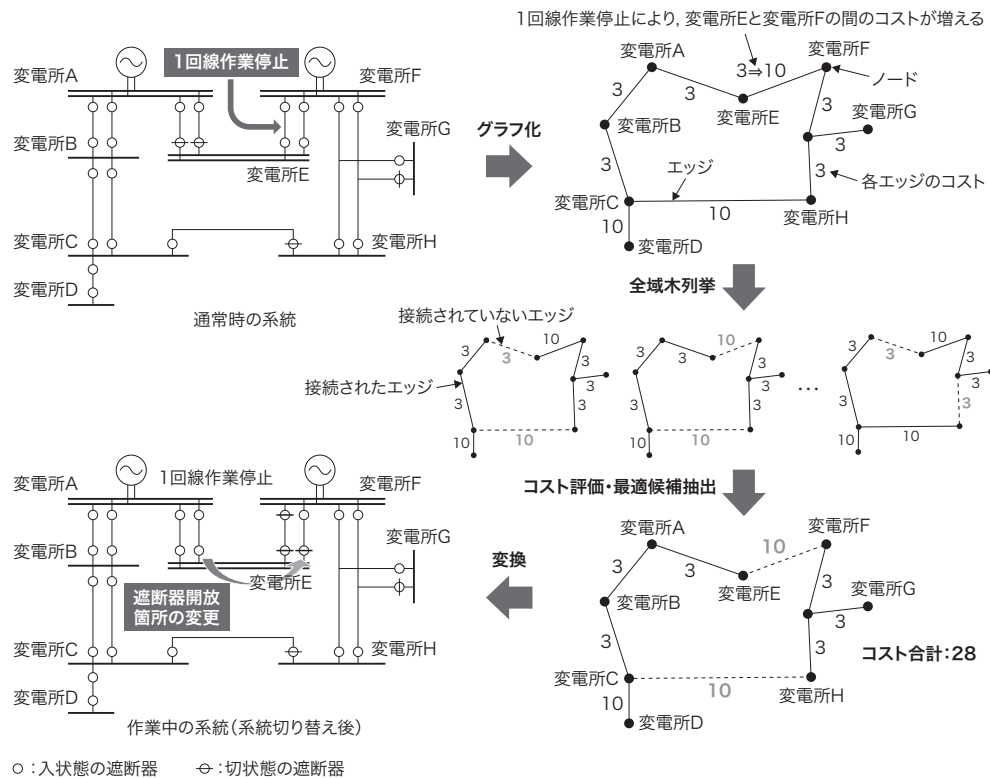


図3. 全域木列挙アルゴリズムによる最適な接続パターン抽出例

変電所Fから変電所Eに供給するルートでの1回線作業停止により、当該エッジのコストが3から10に増えるため、よりコストの小さい変電所Aから供給するルートが選ばれた。

Optimal connection pattern extracted using algorithm for enumerating all spanning trees

り多数の候補が挙げられ、ここから供給信頼度維持や事故復旧を考慮した最適な接続パターンを選択する。選択した最適な接続パターンに対して、判定対象の日程において予測される発電・負荷条件を設定した上で電力潮流計算を行い、電圧・潮流が管理しきい値以内であれば停止可能であると判断する。

最適な接続パターンの抽出には、ZDD (Zero-suppressed Binary Decision Diagram) と呼ばれるデータ構造を利用した全域木列挙アルゴリズムを実装したOSS (オープンソースソフトウェア) である Graphillion を採用した。Graphillion は、国立研究開発法人 科学技術振興機構による ERATO 湊離散構造処理系プロジェクトで開発されたソフトウェアであり⁽¹⁾、電力システム分野では配電への応用事例が知られている⁽²⁾。

全域木とは、全てのノードが接続されていて閉路を持たないグラフであり、全域木列挙アルゴリズムではあらゆる接続パターンに対応した全域木を高速に列挙できる。図3に全域木列挙アルゴリズムによる最適な接続パターンの抽出例を示す。列挙された全域木の各エッジに対して、供給信頼度維持・事故復旧可否・切り替え数最小などの観点でコスト

の重み付けを行い、コスト合計値が最も小さいものを最適候補として選定する^{(3), (4)}。

電力潮流計算における負荷条件は、年間計画であれば、各月の最過酷条件（軽負荷最過酷条件であれば、負荷が実績最小かつ発電機出力最大）を設定する。負荷設定は、新業務フロー（図1(b)）の“電力系統設定”で実施する。

3.2 基幹ループ系統の停止可否判定

基幹ループ系統では、連系発電機の出力調整などにより、残設備の過負荷を回避できれば停止可能であると判定する⁽⁵⁾。例えば、2回線送電線の1回線の作業を考える場合、1回線作業停止時に残回線で過負荷が生じないこと（条件A）、更に残回線事故時に他設備に過負荷が生じないこと（条件B）が、作業停止可能と判断する条件となる。

図4に、基幹ループ系統の残設備過負荷回避の概要として、残回線の潮流抑制の例を示す。まず、系統制約付きの経済負荷配分計算（SCED：Security-Constrained Economic Dispatch）により、基幹ループ系統の各ノード1～5に対して、残回線に過負荷を発生させないことを制約条件として注入電力の目標値を算出し、1回線停止前の注入電力との差分から、必要な注入電力変化量 $\Delta P_1 \sim \Delta P_5$

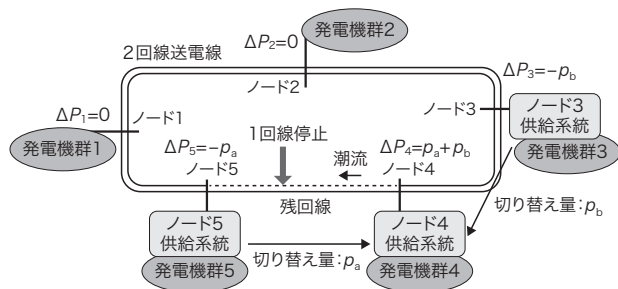


図4. 基幹ループシステムの残設備過負荷回避の概要

ノード3、5の下位システムの負荷の一部を、隣接するノード4側に切り替えるように、供給システム間の負荷の接続を変更して残回線の潮流を抑制し、残設備過負荷を回避する。

Determination processes to avoid overload of equipment remaining in main loop system

を決める。次に、下位システム間の負荷の接続変更により切り替え量 p_a 、 p_b を求め、切り替え後の注入電力変化量残分についてノンファーム電源出力抑制や、基幹ループシステムの連系発電機の出力調整などを行う。この結果、条件A、Bのそれぞれで各ノード注入電力の目標値を満たす場合は、停止可能と判断する。

3.3 同時停止可否判定

同時停止可否判定は、放射状システムと基幹ループシステムのそれぞれの停止可否判定ロジックの拡張により実現する。

放射状システムでは、例えば、ある電力設備の停止可否について、事故復旧ルート確保を条件として停止可能と判定した場合は、当該復旧ルートの電力設備は同時停止不可と判定する。

基幹ループシステムでは、2設備の同時作業停止の条件で、3.2節と同様の計算を実施し、残設備過負荷回避が可能であれば同時停止可能と判定する。

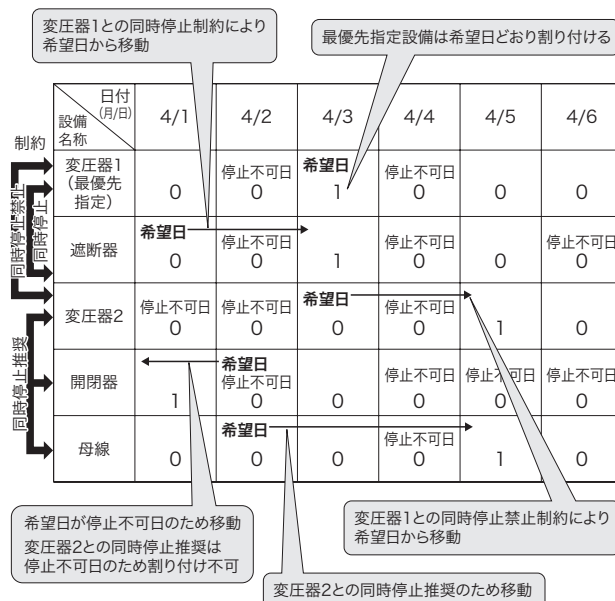
4. 主管別作業計画策定

新業務フローの主管別作業計画策定では、停電作業要求の割り付けを行う。

停電作業要求には、任意で作業希望日を指定して実施するものと、過去の実績に基づき数年単位で周期的に実施するものがあり、停電作業調整支援システムでは、これらを同時停止禁止などの制約条件を考慮して、停止可能日に最適に割り付ける。以降、停電作業要求の割り付けのモデリングなどについて説明する。

4.1 割り付け作成問題のモデリング

停電作業要求には、各停止対象設備の停止日情報が含まれる。実際に設備を停止させる日付は、3章で求めた停止可能日の範囲内から停止実施日を選択することで実現す



1: 停止日 0: 非停止日

図5. 割り付け作成問題の数理最適化による実現の概要

数理最適化技術により、停止不可日を避けた各設備の停止日を決定する。同時停止・同時停止禁止の制約、及び同時停止推奨の目的関数を最大化した。

Example of maintenance schedule obtained by integer optimization

る。このプロセスを割り付け作成と呼ぶ。

割り付け作成は日付以外にも多数の制約に配慮する必要がある、その試行錯誤がプロセス全体のボトルネックの一つとなっている。停電作業調整支援システムでは、割り付け作成機能のコア技術に、数理最適化問題の一つである整数最適化の技術を応用し、作成時間を短縮した。図5に、割り付け作成問題の数理最適化による実現イメージを示す。

割り付け作成時に考慮する制約の一部を、次に示す。

- (1) 停止可能日 停止可能日抽出の結果に加えて、年末年始などの休日には停止させてはならない
 - (2) 同時停止 特定設備の組は同時に停止させる
 - (3) 同時停止禁止 特定設備の組は同時に停止させてはならない
 - (4) 指定日実施 特定日付でだけ停止実施可能な設備の場合に考慮する
 - (5) 上限 (各日) 停止実施 (実際は対応する作業) の総費用には上限がある
 - (6) 回数 停止実施は所定回数以上又は以下とする
- これらは、4.2節に述べるように、インジケータと呼ばれるバイナリー変数を用いて数式で表現可能であり、整数最適化問題の制約条件として用いる。

整数最適化を定義するには、更に目的関数が必要であ

る。割り付け問題で目的関数となりうる指標は次のとおりである。

- (1) 総予算（最小化） 停止実施の総コストを最小化する
- (2) 同時停止推奨設備数（最大化） 特定設備の組の中で同時停止する個数を最大化する
- (3) 希望日からのシフト（最小化） 停止希望日からのずれの総和を最小にする

これらの指標は運用者が望まない相関を示すことがあるため、単一の目的関数に取り込むと効果が相殺されることがある。対応策の一つとして、どれか一つを目的関数として選択すると他の二つが制約条件となる切り替え方式による準最適方式を採用した。

4.2 整数最適化による実現

整数最適化による割り付け作成の基本は、停止実施の有無をインジケータ変数 $x_{i,t}$ でモデル化する(式(1))。ここで、 i は設備番号、 t は離散時間枠である。

$$x_{i,t} = \begin{cases} 0 & (\text{非停止}) \\ 1 & (\text{停止}) \end{cases} \quad (1)$$

停電作業調整支援システムの目的に合わせて停止を1と定義しており、直感とは逆である点に注意が必要である(停止を0と定義しても同等のモデルは得られる)。 $x_{i,t}$, $x_{j,t} \in \{0,1\}$ であり、複数の整数定数を組み合わせることで論理的な制約を表現できる。

$$x_{i,t} + x_{j,t} \leq 1 \quad (2)$$

式(2)の例では、 $x_{i,t}$, $x_{j,t}$ のどちらか又は両方が0とならざるを得ない。これは現実世界で、設備*i*と設備*j*を時間枠*t*で同時に停止させることはできないという事実に対応する。このように $x_{i,t}$ を組み合わせる制約条件と目的関数を作り、整数最適化のモデルを得る。停電作業調整支援システムは離散時間を前提としているため、得られる問題は組み合わせ最適化の分野では勤務表スケジューリング又は時間割作成問題⁽⁶⁾と呼ばれる比較的シンプルな問題となる。

整数最適化問題の解法は、数値最適化ソルバーを採用している。停電作業調整支援システムが想定する設備数と期間数の下で、割り付け作成処理が許容可能な時間に収まることを確認した。

4.3 その他の最適化機能

各設備は、日単位の割り付け作成の前に、月単位・年単位での割り付け作業を実施している。停電作業調整支援システムはそれら長期計画にも対応しており、類似した時間割作成問題を用いて年・月への割り付けを決定できる。

5. フィールド実証

3章と4章で述べた主要技術を用いた停電作業調整支援システムのプロトタイプを試作し、送配電事業者の実系統でフィールド実証を行い、基本ロジックや新業務フローの有効性を確認した。

6. あとがき

停電作業調整支援システムの業務フロー、及び主要技術と有効性の確認について述べた。

今後は、商用機向けのソフトウェア開発を行い、電力系統運用の効率化・高度化に貢献していく。

文 献

- (1) Inoue, T. et al. Graphillion: software library for very large sets of labeled graphs. International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2016, **18**, 1, p.57-66. <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10009-014-0352-z>>, (accessed 2025-02-07).
- (2) Inoue, T. et al. Distribution Network Verification for Secure Restoration by Enumerating All Critical Failures. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015, **6**, 2, p.843-852. <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp.jsp?tp=&arnumber=6915711>>, (accessed 2025-02-07).
- (3) 豊嶋伊知郎, ほか. “グラフ列挙を用いた系統構成導出方法の一検討：停電作業計画を題材として”. 電気学会 電力エネルギー部門 電力技術/電力系統技術 合同研究会資料. 2023-09, p.137-140.
- (4) Toyoshima, I. et al. "Outage Planning Work Management System with Applying Novel Optimization Algorithms". Proceedings of the International Council on Electrical Engineering Conference. Kitakyushu, IEEJ. 2024, O-005.
- (5) Toyoshima, I. et al. "Some Use Cases of Security Constrained Economic Dispatch Problem for Outage Work Planning Collaboration System". 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Kitakyushu, 2024-11, p.488-489.
- (6) 池上敦子, 呉 偉. 学校時間割作成. オペレーションズ・リサーチ. 2020, **65**, 3, p.148-156. <https://orsj.org/wp-content/corsj/or65-3/or65_3_148.pdf>, (参照 2025-02-07).



水谷 遼太 MIZUTANI Ryota
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッド・ソリューション事業部 グリッド・ソリューション企画部
電力系統システム技術部を経て、2025年4月から現職
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



豊嶋 伊知郎 TOYOSHIMA Ichiro, D.Eng.
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッド・ソリューション事業部 インフラサービス開発・設計部
博士(工学) 電子情報通信学会・IEEE・電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



館小路 公士 TATEKOJI Takashi
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッド・ソリューション事業部 電力系統システム技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.