

2021年度主な研究成果の概要



2022年8月

R 電力中央研究所

グリッドイノベーション研究本部

目次

2021 年度主な研究成果の概要

I. 送電分野

1. 腐食に対する送電用鉄塔の健全性診断技術—腐食量推定手法および検査・診断技術の個別機能と具体例—p. 8
ファシリティ技術研究部門 堀 康彦
2. 未塗装の送電用鉄塔を対象とした空撮画像を用いた劣化ランク自動判定システムの開発.....p. 11
ファシリティ技術研究部門 石野 隆一
3. 送電線耐雷設計ガイド(2022年改訂版).....p. 14
雷リスク調査研究委員会 送電雷リスク分科会
4. 送電線における多相雷事故率の評価手法の開発—交流位相差を考慮した 2 並列気中ギャップの同時フラッシュオーバー特性—p. 17
ファシリティ技術研究部門 中根 龍一
5. 着氷雪がいしの着雪特性およびフラッシュオーバー特性の評価—人工着雪課電実験による放電進展様相と耐電圧特性の検討—p. 20
ファシリティ技術研究部門 三好 雅仁
6. 難着雪リングが及ぼす直流コロナ特性への影響—コロナケージを用いた実験的検討—p. 23
ファシリティ技術研究部門 宮島 清富
7. 送電用マンホールでの遠隔絶縁診断に向けた部分放電波形データの圧縮手法の開発.....p. 26
ファシリティ技術研究部門 真下 貴文
8. OF ケーブルでの油中ガス拡散挙動の解明—油浸紙を介した油中ガス拡散係数の測定とモデル実験系での油中ガス拡散挙動解析—p. 29
ファシリティ技術研究部門 牧野 裕太
9. 超高压 CV ケーブルの空間電荷測定における過渡温度条件下での信号補正法の開発.....p. 32
ファシリティ技術研究部門 森田 翔亮
10. 空間電荷測定に基づくケーブル絶縁体の電界分布推定における解析精度評価方法の考案.....p. 35
ファシリティ技術研究部門 布施 則一

II. 変電分野

1. 電力流通設備のアセットマネジメントへの外部診断の適用事例ーシャントリアクトル内の部分放電源の同定ーp. 38
ファシリティ技術研究部門 宮寄 悟
2. 長寿命設備を想定した運用実績に基づく故障統計解析手法の検討.....p. 41
ファシリティ技術研究部門 高橋 紹大
3. テレコン用の従来通信方式と IEC 61850 間の変換を担う通信アダプタの開発.....p. 44
ネットワーク技術研究部門 パウデル サロジユ
4. VSTL REV に基づく発変電所低圧制御回路のサージ解析技術の開発（その 2）ー金属シース付制御線のモデル化手法の開発とその制御線誘導サージ解析への適用ーp. 47
ファシリティ技術研究部門 立松 明芳
5. レーザ誘起ブレイクダウン分光法を用いたナノコンポジット絶縁材料中のナノフィラー分布評価法の開発ー実規模試料に適用可能な評価法の提案ーp. 50
ファシリティ技術研究部門 三坂 英樹

III. 系統分野

1. 電力系統の周波数安定性の維持に資する需要側インバータの制御方法に関する基礎検討ー系統負荷の電圧・周波数に対する自己制御性を模擬した有効電力制御ーp. 53
ネットワーク技術研究部門 佐藤 勇人
2. 周波数変換所を活用した 50・60Hz 系統間の広域負荷周波数制御の実現に向けた効果検証.....p. 56
ネットワーク技術研究部門 徳光 啓太
3. インバータ主体系統における単独運転検出機能の不要動作に関する基礎検討ー基幹系統で三相地絡事故が発生した場合ーp. 59
ネットワーク技術研究部門 白崎 圭亮
4. 電力系統のレジリエンス強化に資する緊急時の周波数制御に関する基礎検討（その 3）ー再エネ脱落特性を考慮した負荷遮断方式の IEC 61850 による実現方法ーp. 62
ネットワーク技術研究部門 上田 紀行
5. 電源脱落時における地点毎の周波数変化率の高速概算法.....p. 65
ネットワーク技術研究部門 会田 峻介
6. EV 導入・活用時における系統負荷のモデリングに向けた EV 用充電器の特性把握.....p. 68
ネットワーク技術研究部門 増田 宗紀

IV. 配電分野

1. 光学振動計測技術を用いた電柱の振動姿態の可視化.....p. 71
ファシリティ技術研究部門 高田 巡

2. PV 余剰電力活用のための複数台の家庭用ヒートポンプ式給湯機の連携運転計画法の提案と評価.....p. 74
 ENIC 研究部門 石川 歩惟
3. 電磁波を用いたコンクリート内の空隙計測（1）－コンクリート表面付近の空隙計測用モデルの提案－.....p. 77
 ファシリティ技術研究部門 本田 匠

V. 情報通信分野

1. IP 保護リレー情報に対する伝送経路の増強コスト最小化に向けた設計手法－マイクロ波無線通信網への適用と評価－.....p. 80
 ネットワーク技術研究部門 田中 彰浩

VI. 電化促進分野

1. 換気量の増加がエアコン冷暖房運転時の室内温熱環境とエアコンの消費電力に与える影響の評価.....p. 83
 ENIC 研究部門 安田 昇平
2. 住宅のエネルギーに関するレジリエンス性向上のための調査－自然災害による長期停電時の困りごとの把握－.....p. 86
 ENIC 研究部門 安岡 絢子
3. 電気自動車の熱管理システムに関する研究開発－熱管理システムのコンセプトモデルの提案－.....p. 89
 ENIC 研究部門 張 莉
4. 全国町丁字別の PV 導入量を考慮した地域レベルの電力需要カーブの推定手法の構築.....p. 92
 ENIC 研究部門 上野 剛
5. 人感センサを備えたエアコンの空気流制御機能が室内温熱環境へ及ぼす影響の把握.....p. 95
 ファシリティ技術研究部門 上野 剛
6. 建物内の多様な温熱環境を模擬可能な快適性試験室の開発 その 3 エアコン暖房環境の再現手法と妥当性の検証.....p. 98
 ENIC 研究部門 宮永 俊之
7. EV アグリゲーションによる VPP 事業の可能性評価－九州 V2G 実証事業における当所の 3 年成果－.....p. 101
 ENIC 研究部門 高橋 雅仁

Ⅶ. 水力発電分野

1. 水力発電機固定子巻線の保守点検への機械学習手法の導入に向けた基礎検討—固定子巻線異常判定のためのデータベースの構築—.....p. 104
ファシリティ技術研究部門 倉石 隆志

2021 年度掲載された学術論文

p. 107 – 113

1. Direct Lightning Performance of Distribution Lines with Shield Wire Considering LEMP Effect..... ファシリティ技術研究部門 石本 和之
2. 直撃雷に対する高圧配電線雷事故率の総合評価—フラッシュオーバーおよび避雷器処理エネルギーの評価プログラム—..... ファシリティ技術研究部門 石本 和之
3. Melting and breaking characteristics of strands of high-strength and high-corrosion-resistant OPGW due to DC arc discharge simulating high-energy lightning strike.....
..... ファシリティ技術研究部門 岩田 幹正
4. 高エネルギー雷撃を模擬した直流アークによる高張力・高耐食 OPGW の素線溶断特性..... ファシリティ技術研究部門 岩田 幹正
5. Standoff Detection System Using Raman Spectroscopy in the Deep-Ultraviolet Wavelength Region for the Detection of Hazardous Gas.....
..... ファシリティ技術研究部門 江藤 修三
6. Alternative test method of internal arcing for replacing SF₆ by air in SF₆-insulated power equipment..... ファシリティ技術研究部門 神足 将司
7. Energy fault detection for small buildings based on peer comparison of estimated operating status..... ENIC 研究部門 小松 秀徳
8. 電力システムのレジリエンス強化と脱炭素化の両立に資する再生可能エネルギー電源の脱落特性を考慮した緊急時周波数制御..... ネットワーク技術研究部門 佐藤 勇人
9. Calculation of Internal Electric Fields Induced by Power Frequency Magnetic Fields During Live-Line Working Using Human Models With Realistic Postures.....
..... ファシリティ技術研究部門 椎名 健雄
10. Blue Light Monochromatic Irradiation for 12 Hours in Lighting Pattern with Combinations of Blue and Red Light Elongates Young Cos Lettuce Leaves and Promotes Growth under High Daily Light Integral..... ENIC 研究部門 地子 智浩
11. Cultivation of cos lettuce using blue LED and quantum dot wavelength conversion sheets
..... ENIC 研究部門 地子 智浩
12. Manipulation of Intraday Durations of Blue- and Red-Light Irradiation to Improve Cos Lettuce Growth..... ENIC 研究部門 地子 智浩

13. Time-varying Photosynthetic Photon Flux Density and Relative Spectral Photon Flux Density Distribution to Improve Plant Growth and Morphology in Plant Factories with Artificial Lighting.....ENIC 研究部門 地子 智浩
14. Single-Conductor Transmission Line Model Incorporating Radiation Reaction.....
..... ファシリティ技術研究部門 田代 大貴
15. Lightning Current Simulation of 66-kV Substation With Power Cables Using the Three-Dimensional FDTD Method..... ファシリティ技術研究部門 立松 明芳
16. Three-Dimensional FDTD-Based Simulation of Induced Surges in Secondary Circuits Owing to Primary-Circuit Surges in Substations.....
..... ファシリティ技術研究部門 立松 明芳
17. Development of a method for calculating the transmission-line constants of a three-phase enclosure-type gas insulated bus taking the proximity effect into account.....
..... ネットワーク技術研究部門 田中 洋平
18. 方形断面洞道に布設されたケーブルの線路定数計算手法の開発.....
..... ネットワーク技術研究部門 田中 洋平
19. Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation.....
..... ネットワーク技術研究部門 田辺 隆也
20. Use of Voltage Stability Assessment and Transient Stability Assessment Tools in Grid Operations..... ネットワーク技術研究部門 田辺 隆也
21. 大電流のインパルスアークによる OPGW の溶損量の推定.....
..... ファシリティ技術研究部門 中野 智之
22. IoT センサを用いた家庭内の行動観察..... ENIC 研究部門 服部 俊一
23. 家庭用ヒートポンプ給湯機のエネルギー消費性能評価に関する研究（その 1）：各種試験による性能データの取得および分析..... ENIC 研究部門 藤縄 剛史
24. Millimeter wave imaging of underfilm corrosion using a monopole antenna equipped with a semispherical silicon lens..... ファシリティ技術研究部門 布施 則一
25. 油隙を有する油浸紙積層絶縁系における油分解ガスの発生様相一部分放電発生状況の違いによる様相変化—..... ファシリティ技術研究部門 牧野 裕太
26. Calibration Scheme of Impulse-High-Voltage Measuring System Traceable to National Standards of Japan..... ファシリティ技術研究部門 宮寄 悟
27. Detection of Winding Axial Displacement of a Real Transformer by Frequency Response Analysis without Fingerprint Data..... ファシリティ技術研究部門 宮寄 悟
28. Long-Term Stability of Reference Measuring System for Impulse High Voltage.....
..... ファシリティ技術研究部門 宮寄 悟

29. Method of Evaluating Probability of Pressboard Failure in Power Transformer with Disc-Type Winding Due to Electromagnetic Force by External Short Circuit.....
.....ファシリティ技術研究部門 宮崎 悟
30. 高圧配電線の構成が直撃雷による相間スパークオーバ発生率に与える影響.....
.....ファシリティ技術研究部門 山口 宜大
31. Concept of Carbon-related Energy to Connect Energy Consumption with CO2 Emissions.....ENIC 研究部門 山本 博巳
32. Cost analysis of stable electric and hydrogen energy supplies derived from 100% variable renewable resources systems.....ENIC 研究部門 山本 博巳
33. Development of a reversible transformer model for the calculation of inrush currents energizing from higher and lower voltage windings.....
.....ネットワーク技術研究部門 米澤 力道
34. 低圧巻線側からの加圧にも対応した励磁突入電流解析用変圧器モデルの開発.....
.....ネットワーク技術研究部門 米澤 力道

－補足事項－

本誌は 2021 年度に発行された報告書等の概要を取りまとめたものです。目次における所属は、本誌刊行時点(2022年8月)のものであります。本文中の所属は報告書等の発行時点のものであるため、目次とは異なる場合があります。

グリッドイノベーション研究本部 研究統括室

腐食に対する送電用鉄塔の健全性診断技術 —腐食量推定手法および検査・診断技術の個別機能と具体例—

堀 康彦*¹ 谷 純一*² 石川 智已*³
足立 和郎*⁴ 朱牟田 善治*⁵ 佐藤 雄亮*⁶
石野 隆一*⁷ 服部 康男*⁸ 大原 信*⁹
須藤 仁*⁸ 長沼 淳*¹⁰ 布施 則一*¹¹
福富 広幸*¹² 大石 祐嗣*⁴

キーワード：送電用鉄塔
維持管理
大気腐食
点検
社会インフラ

Key Words : Transmission tower
Maintenance
Atmospheric corrosion
Inspection
Social infrastructure

Soundness Assessment Technologies for Corrosion in Aged Transmission Towers —Individual Features and The Operation Results of Corrosion Amount Evaluation as well as Inspection and Diagnosis—

Yasuhiko Hori, Junichi Tani, Tomomi Ishikawa, Kazuo Adachi, Yoshiharu Shumuta,
Yusuke Sato, Ryuichi Ishino, Yasuo Hattori, Shin Ohara, Hitoshi Suto,
Atsushi Naganuma, Norikazu Fuse, Hiroyuki Fukutomi and Yuji Oishi

Abstract

Transmission towers built during the years of Japan's high economic growth have gradually aged over the years, and these structures now require the standardization of their efficient repair and rebuild. CRIEPI has embarked a research program to contribute the streamlining of the maintenance for the aged transmission towers, under the cooperation of all Japanese electric power companies. Elemental information and technologies were consolidated in the program's first stage that was conducted from 2012 to 2014. The second stage of the program has built the evaluation methods by combining the elemental technologies.

The methods constructed and developed are to estimate the corrosion amount, as well as to conduct inspection and diagnosis for transmission towers. This report shows the individual features of the methods and how they actually operate against social infrastructure and field data obtained.

*¹ 電力技術研究所 気体絶縁・放電現象領域 上席研究員
*² 材料科学研究所 上席研究員
*³ 地球工学研究所 副研究参事
*⁴ 電力技術研究所 上席研究員
*⁵ 地球工学研究所 構造工学領域 副研究参事
*⁶ 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員
*⁷ エネルギーイノベーション創発センター デジタルトランスフォーメーションユニット 上席研究員
*⁸ 地球工学研究所 流体科学領域 上席研究員
*⁹ 環境科学研究所 大気・海洋環境領域 主任研究員
*¹⁰ 材料科学研究所 電気化学領域 主任研究員
*¹¹ 電力技術研究所 固体絶縁・劣化現象領域 主任研究員
*¹² 材料科学研究所 構造材料領域 上席研究員

背 景

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁などの社会インフラの老朽化が全国的に深刻な問題となっている。一方、電力設備、特に架空送電設備についても、大量に建設された送電用鉄塔が、2020年代には約半数が経年50年を超えることとなり、経年による腐食劣化への対策が一層重要となってきている。このような状況の中、一般送配電事業者および電源開発送変電ネットワーク株式会社では、設備実態や立地環境に応じた維持管理フローを定め、効率的な管理が進められており、保全実務を支援し一層の省力化を実現できる保守点検技術が望まれている。これらを踏まえ、当所では2012年度より腐食劣化の観点に着目して鉄塔の健全性診断技術に関する研究に着手し、腐食量推定手法および検査・診断技術などの個別技術を構築・開発した^{*1)}。

目 的

送電用鉄塔を対象として、腐食に対する保全のために構築・開発した腐食量推定手法および検査・診断技術について、それぞれの技術が有する機能を示すとともに、通信用鉄塔などの社会インフラでの当該技術の活用に向けて具体例を提供する。

主な成果

1. 腐食に対する健全性評価に資する個別技術の機能

鉄塔を対象に開発した健全性診断技術の個別機能を図1に示す。腐食量推定手法は、面的に広がりをもって設置されている鉄塔の中から、要点検鉄塔・要点検部位を抽出する機能を有する。開発した検査技術は、抽出した要点検鉄塔・要点検部位の部材の減肉部位・形状の検出および劣化度合い評価を行う機能を、さらに、開発した診断技術としての耐荷力評価法は、部材としての性能（余寿命）を把握する機能を有する。

2. 社会インフラでの活用に向けての具体例

- ・ 広範囲に建設されたインフラの点検優先度の評価において、個々の腐食計測では広範囲な環境の違いを含めた検討は容易ではない。本腐食量推定手法では、広範囲な環境を計算できる数値解析^{*2)}により、例えば対象エリアの鉄鋼の腐食マップ（図2(a))を作成可能である。当該マップは、広範囲に多数設置されている鉄塔の中から要点検鉄塔が抽出でき、点検の優先度検討に資する情報となる。
- ・ 検査・診断技術の一例として、図2(b)の写真による劣化ランクシステムでは、空撮画像を解析することで相対的な点検の優先度検討に資する情報が得られるとともに、当該インフラでの要点検部位を抽出し塗装などの補修の優先度検討にも活用できる。これら個別技術またはこれらを組み合わせた一連の健全性診断により、社会インフラの塗装による補修判断、部材の交換等の保守計画策定・更新判断に活用可能である。

*1) 堀他, 「送電用鉄塔の腐食等に対する健全性評価技術に関する研究—第一Ⅱ期(2015-2018)の成果—」電力中央研究所報告 H18009, 2019.

*2) CRIEPI-RCM-Era2 (通称: NuWFAS 長期高解像度気象再解析データ)、風況・海塩粒子輸送解析コード NuWiCC-ST、などを使用

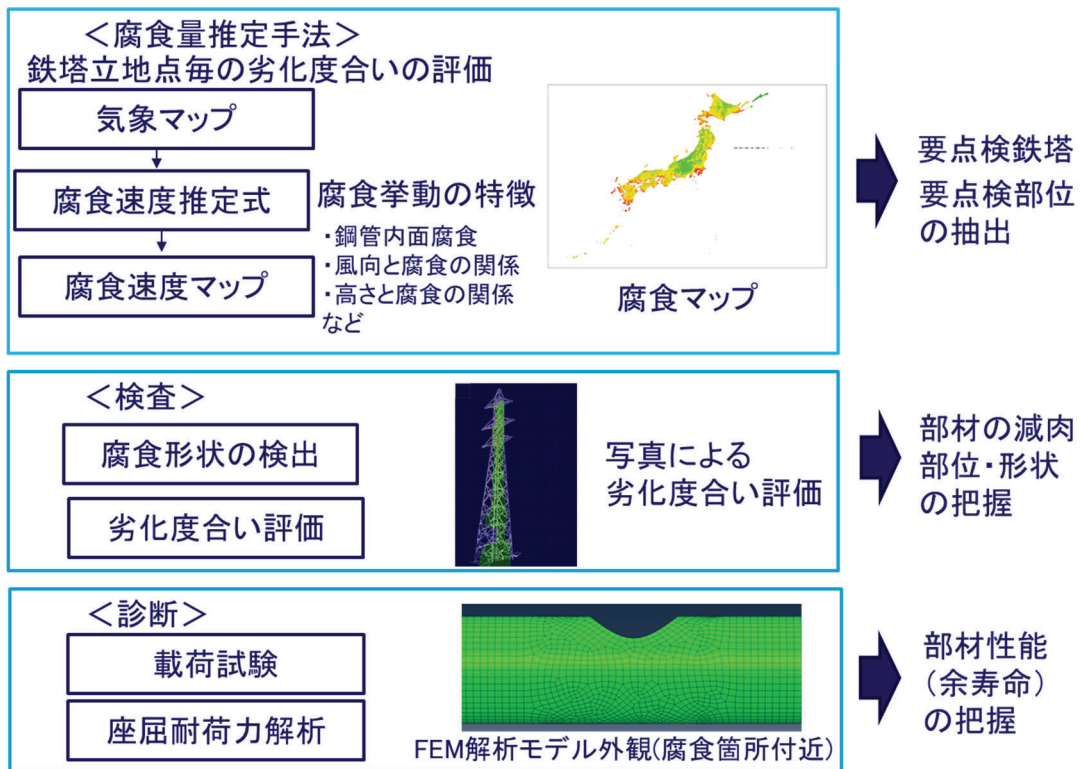


図1 健全性診断技術の個別機能

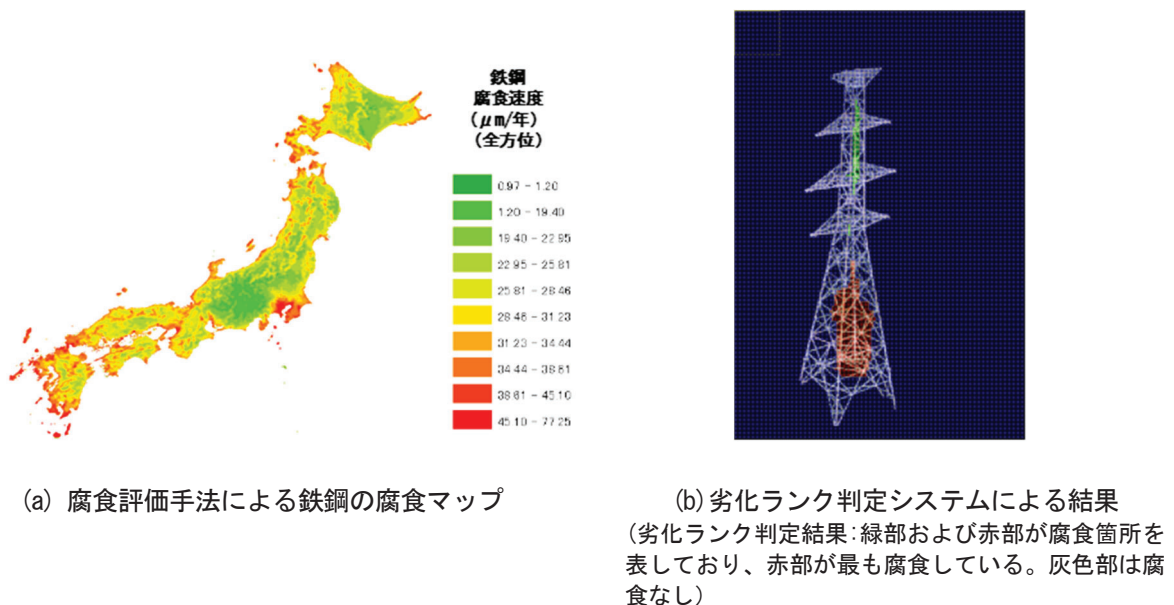


図2 健全性診断技術の活用に向けて各機能を示す具体例^{*1)}

関連報告書:

- [1] N24 「送電用鉄塔の腐食等に対する健全性評価技術に関する研究—第I期(2012-2014)の成果—」(2016.10)
 [2] H18009 「送電用鉄塔の腐食等に対する健全性評価技術に関する研究—第II期(2015-2018)の成果—」(2019.6)

未塗装の送電用鉄塔を対象とした空撮画像を用いた劣化ランク 自動判定システムの開発

石野 隆一*¹

キーワード：送電用鉄塔
錆
画像処理
深層学習

Key Words : Transmission Tower
Rust
Image Processing
Deep Learning

Automatic Decision System of Deteriorating Level for Galvanized Transmission Tower Using Aerial Image

Ryuichi Ishino

Abstract

We are trying to develop support tool using an aerial image of a transmission tower for decision of deteriorating level for the tower. The support tool judges which a deteriorating rank of a tower each pixel on the aerial image of the tower belongs. The support tool was not an automatic system because extraction of a tower image by hands was needed before the judgment. Using deep learning techniques, we have achieved automatic extraction of a tower in an aerial image. The support tool can extract 99.5% pixels on towers. Due to development of automatic tower extraction routine, the support tool can automatically judge deteriorating level for towers.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員

背景

一般送配電事業者および大手送電事業者では送電用鉄塔の更新時期延伸のため、膨大な数の鉄塔の中から錆の進行度合いが大きい鉄塔を対象とし防錆塗装^{注1)}を行っている。錆の進行度合いは、昇塔して撮影した鋼材の色合いで判定することが多いが、その判定が個人の主観に依存するという課題がある。そこで、ヘリコプター等で空撮した画像にICTを適用して、鉄塔の簡易劣化ランクを判定するための支援ツールの開発を進めている。これまでに、判定する鉄塔に対応する3D構造モデルを用意し、マウス操作によって鉄塔部材を抽出後、機械学習^{注2)}により判定するプロトタイプを開発している[1、2]。実業務では大量の空撮画像が蓄積されるため、大量の空撮画像を処理するには、空撮画像から鉄塔部材の自動抽出が必要である。

目的

未塗装の送電用鉄塔を対象に深層学習を利用した鉄塔部材の自動抽出手法を開発するとともに、劣化ランク判定の自動化を実現する。

主な成果

1. 深層学習を利用した鉄塔部材の自動抽出

実際の劣化診断用として撮影された鉄塔を含む画像から鉄塔部材を抽出するために、深層学習を実施した。深層学習させるデータとして、1つの鉄塔に対して、鉄塔全体を1つの画像とした場合と1つの鉄塔を分割して複数枚の画像とした場合を比較した^{注3)}。その結果、複数枚の画像を用いた場合は、複数枚画像間の関係性の学習が難しく、1つの画像で学習する方が良いことがわかった(図1)。また、学習に使う画素数の大きい方が、鉄塔の骨組みの情報が欠落しにくくなる。そこで、画素数の大きな鉄塔全体の映った画像を使って学習させることにより、鉄塔の画素をほぼ全て(99.5%)抽出できた(表1)。

2. 簡易劣化ランク判定の自動化システムの実現

鉄塔部材の自動抽出を組み込み、未塗装の送電用鉄塔を対象とした空撮画像を用いた劣化ランク自動判定システムを開発した。本システムは、既開発のプロトタイプで必要であったマウス操作を不要としたため、空撮画像を所定のフォルダーに保存すると、鉄塔部材を抽出し、劣化ランク判定までを自動で行うことができる(図2)。

注1) 鉄塔は建設時には未塗装であることが多く、建設から長い年月が経過すると、防錆塗装を必要とする鉄塔が増えていくため、本報告では未塗装鉄塔を対象としている。

注2) 種類の異なるものを区別するための境界線を、区別の難しいデータ間の距離が最大になるように求める手法。

注3) ヘリコプター等による空撮画像には、分割して撮影した場合と全体を撮影した場合があるため、両者を比較することとした。



(a) 分割画像例 (b) 鉄塔全体 (c) 分割画像で学習 (d) 鉄塔全体で学習

図1 学習データの画像例と抽出結果例

表1 鉄塔全体で学習させた場合の画素数の大小による抽出結果

画素数(縦×横)	正解率(%)	再現率(%)
512×512	96.3	95.6
1024×1024	96.7	99.5

正解率：全画素に対して正しく画素判定できた割合 再現率：鉄塔全画素のうち抽出できた画素の割合

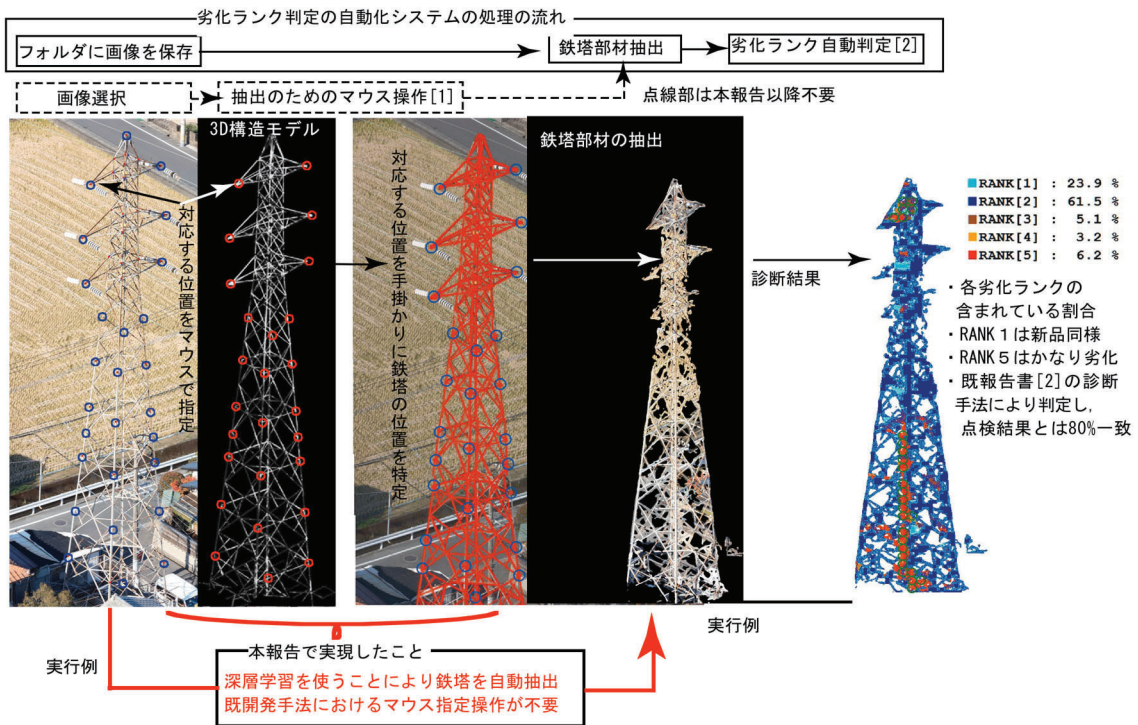


図2 空撮画像を用いた簡易劣化ランク自動判定システム実行例と処理の流れ

関連報告書：

[1]C16009 「塗装すべき経年鉄塔の選定に役立つ画像処理技術の開発—空撮画像からの鉄塔抽出手法の開発—」(2017.06)

[2]C17013 「塗装すべき経年鉄塔の選定に役立つ画像処理技術の開発—空撮画像を使った簡易劣化判定のための支援ツールのプロトタイプの開発—」(2018.06)

送電線耐雷設計ガイド (2022年改訂版)

雷リスク調査研究委員会 送電雷リスク分科会

キーワード：雷

耐雷

送電線

絶縁協調

雷サージ

Key Words : Lightning

Lightning protection

Transmission line

Insulation co-ordination

Lightning surge

Guide to Lightning Protection Design for Transmission Lines (revised in 2022)

Subcommittee for Transmission Lines, Study Committee on Lightning Risk

Abstract

As basic references for lightning protection design for transmission lines, "Design Practices of Transmission Lines to Prevent Lightning Faults (published in 1971)", "Lightning Proof Design Guide-book for Transmission Lines (published in 1976)" and "Guide to Lightning Protection Design for Transmission Lines (published in 2003)" have been widely used by electric power utilities. However, almost twenty years has passed since these three references were published. To reflect the technical progress since their publication and to merge these three references, the updated guide has been released. The guide consists of nine chapters and two appendixes as follows:

Chapter 1: Introduction

Chapter 2: Lightning phenomena

Chapter 3: Lightning performance of transmission lines

Chapter 4: Estimation method of lightning outage rates on transmission lines

Chapter 5: Various lightning protection methods

Chapter 6: Lightning protection design and countermeasure for transmission lines

Chapter 7: Analysis of lightning outage for transmission lines

Chapter 8: Lightning protection design for power stations, substations, and underground transmission lines

Chapter 9: Introduction of lightning protection design concepts of the IEEE and the CIGRE

Appendix A: Index of technical terms

Appendix B: Cumulative frequency distribution of lightning current amplitude

背 景

これまでわが国の架空送電線の耐雷設計は、電力中央研究所 雷リスク調査研究委員会送電雷リスク分科会の前身の委員会にて検討され、耐雷設計の実用書として「送電線耐雷設計基準要綱（1971年発刊）^[1]」, 「送電線耐雷設計ガイドブック（1976年発刊）^[2]」, 「送電線耐雷設計ガイド（2003年発刊）^[3]」の三部のガイドが発刊されてきた。しかし、前報の発刊から間もなく20年が経過し、雷現象や耐雷設計に関する最新知見の反映が必要なこと、三部の既刊ガイドに耐雷設計の技術的記述が分散しており内容の把握が煩雑なことから、ガイドの改訂が望まれていた。

目 的

送電線耐雷設計に関わる技術の進歩を取り入れるとともに、三部の既刊ガイドの内容を統合した「送電線耐雷設計ガイド（2022年改訂版）」を取りまとめる。

主な成果

本ガイドの構成と概要を表1に示す。本ガイドの主な内容は以下の通りである。

- (1) 雷現象について取りまとめるとともに、送電線耐雷設計に必要な雷電流波形の雷パラメータについて近年の雷観測結果を取り込んで整理した。また、耐雷設計や保守にも活用される落雷位置標定システム LLS^{注1)} について現行システムの解説を更新し、新型 LLS : LENTRA^{注2)} の開発動向についても取りまとめた（第2章）。
- (2) 1980年度～2020年度までの41カ年の雷事故実績を調査し、送電線の雷事故様相を把握するとともに、雷事故と再閉路方式の関係について取りまとめた（第3章）。
- (3) 雷事故の発生について、雷過電圧の分類や侵入経路などの基礎的な説明を新たに記載し、逆フラッシュオーバーと雷遮蔽失敗の解説を整理した。雷遮蔽については最新の各種モデルを紹介した。また、電力中央研究所で開発が進められてきた送電線雷事故率予測計算プログラム LORP^{注3)} をもとに雷事故率計算手法について解説した（第4章）。
- (4) 各種の雷事故低減策として、架空地線の多条化、不平衡絶縁の採用、塔脚接地抵抗の低減、送電用避雷装置の適用実績と効果などについて記載した（第5章）。
- (5) 架空送電設備の耐雷設計として、電力線および架空地線の溶断特性やアークホーン的设计、送電線の設備被害の傾向と分析について記載するとともに、設備の補修方法と効果について取りまとめた（第6章）。
- (6) 雷事故様相の解析手法として、EMTP^{注4)} /XTAP^{注5)} による回路解析について記載するとともに、近年開発が進んでいる数値電磁界解析に基づく VSTL REV^{注6)} による3次元の雷サージ解析手法についても紹介した（第7章）。
- (7) 発電所や地中送電線との協調について、「発電所及び地中送電線の耐雷設計ガイ

ド（2021年改訂版）」から送電線設計者に必要な記載を抽出して紹介した（第8章）。
 (8) 国外における耐雷設計手法として IEEE や CIGRE など国外の雷事故率予測計算手法を調査するとともに、国内手法（LORP）との比較検討を行なった（第9章）。

表1 送電線耐雷設計ガイドの構成と概要

章タイトル	概要
緒言	・送電線耐雷設計の歴史の変遷とガイド改訂の経緯
第1章 送電線耐雷設計の概要	・流通設備全体としての絶縁設計の概念 ・架空送電線の耐雷設計と雷事故低減策の概要
第2章 雷現象と雷パラメータ	・大地雷撃の発生メカニズム ・耐雷設計に必要な雷電流波形の雷パラメータ
第3章 雷事故実績	・わが国の全国大の送電線雷事故実績
第4章 雷事故率計算手法	・雷過電圧の分類や侵入経路 ・逆フラッシュオーバーと雷遮蔽失敗 ・過電圧計算と雷事故率計算手法
第5章 各種雷事故低減策	・架空地線の多条化，不平衡絶縁の採用，接地抵抗の低減，送電用避雷装置の適用実績と効果
第6章 架空送電設備の耐雷設計	・電力線・架空地線の溶断特性，アークホーン設計 ・送電線の設備被害の傾向と分析 ・設備の補修方法と効果
第7章 雷事故様相の解析	・EMTP/XTAPによる回路解析 ・VSTL REVによる雷サージ解析（数値電磁界解析）
第8章 発電所や地中送電線との協調	・架空ー地中接続系統および発電所近傍送電線の耐雷設計と協調
第9章 国外における耐雷設計手法	・IEEE や CIGRE の WG の雷事故率予測計算手法
結言	・本ガイドのまとめと今後の課題
付録 A	・用語の解説
付録 B	・雷撃電流波高値の累積頻度分布

注1) Lightning Location System, 落雷位置標定システム

注2) Lightning parameters Estimation Network for Total Risk Assessment, 電力中央研究所で新たに開発中の落雷位置標定システム

注3) Lightning Outage Rate Program, 電力中央研究所で開発した送電線雷事故率予測計算プログラム

注4) Electromagnetic Transients Program, 北米で開発された電力系統過渡現象解析ソフトウェア

注5) eXpandable Transient Analysis Program, 電力中央研究所で開発した電力系統瞬時値解析ソフトウェア

注6) Virtual Surge Test Laboratory Restructured and Extended Version, 電力中央研究所で開発した3次元雷サージ解析ソフトウェアで FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) に基づいている

関連報告書：

[1] 71037 「送電線耐雷設計基準要綱」(1971.09)

[2] 175031 「送電線耐雷設計ガイドブック」(1976.03)

[3] T72 「送電線耐雷設計ガイド」(2003.02)

送電線における多相雷事故率の評価手法の開発 — 交流位相差を考慮した2並列気中ギャップの同時フラッシュオーバー特性 —

中根 龍一*¹ 三木 貫*² 三木 恵*³

キーワード：雷

送電線
多相逆フラッシュオーバ
アークホーン
送電用避雷装置

Key Words : Lightning

Transmission lines
Multiphase back flashover
Arcing horns
Transmission line surge arresters

Development of evaluation method for multi-phase fault rate of transmission line - Concurrent flashover characteristics of two parallel gaps in air with potential difference considering effect of AC phase difference -

Ryuichi Nakane, Toru Miki and Megumu Miki

Abstract

The purpose of this report is elucidation of concurrent flashover characteristics of two parallel gaps in air for arcing horns and externally gapped line arresters (EGLA) of 66/77 kV transmission lines. The experiment is conducted by using two types of experimental cases. One is rod-rod / rod-rod electrode parallel configuration, the other is rod-rod / EGLA. Short-tail lightning impulse voltage is applied by using 12MV impulse generator in Shiobara testing yard assuming that lightning strikes a transmission tower. DC voltage is superimposed on one side of two parallel gaps in consideration of the effect of AC phase difference in the actual transmission lines. In other words, “insulation gap” occurs between two parallel gaps. This means that even if the lengths of two gaps are the same, the mechanism for leader propagation in air is different between two parallel gaps. The concurrent flashover rate with potential difference under superimposed DC voltage is obtained while measuring voltage and current waveform and time transition of leader propagation in air. As a result, we experimentally verify that the larger or smaller the insulation gap between two parallel gaps, concurrent flashover rate decreases or increases. In addition, we quantitatively clarify that concurrent flashover occur at the averaged electric field from 0.83 to 1.22 kV/mm in two parallel air gaps regardless of experimental cases.

*1グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員
*2グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員
*3グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 塩原実験場長

背 景

送電線の多相事故は供給支障に至る可能性のある重大な事故であるため、多相雷事故率の計算は送電線の耐雷設計上重要である。このため当所では、塔頂雷撃時に複数のアークホーン (AH) が同時にフラッシュオーバー^{注1)}する現象を明らかにし、LORP^{注2)}における多相雷事故率の計算手法の高度化を進めている。これまで、2相のAHにおける多相事故を模擬するため2つの気中ギャップを用いて、50%フラッシュオーバー電圧に対する印加電圧の過電圧率や線路サージインピーダンスの同時フラッシュオーバーに対する影響を明らかにしてきた^{注3)}。一方で実際の送電線では、相間または回線間の交流位相差により電圧の瞬時値に差が生じるが、これが同時フラッシュオーバーに与える影響は明らかになっていない。

目 的

66/77 kV 系統の送電線のAHおよび近年適用が進む酸化亜鉛型避雷AHを対象とし、交流位相差による電圧の瞬時値の差を考慮した同時フラッシュオーバー特性を明らかにする。

主な成果

AH (実験ケースI) および酸化亜鉛型避雷AH (実験ケースII) を模擬した実験系 (図1) を作成し、これに短波尾雷インパルス (短波尾LI)^{注3)}を印加することで、同時フラッシュオーバー特性を取得した。なお、交流位相差による電圧の瞬時値の差は、片側の棒-棒ギャップにDC電圧を重畳することにより模擬した^{注4)}。以下に得られた知見を示す。

1. 同時フラッシュオーバー率に及ぼす短波尾LIとDC電圧の極性の影響

一定の充電電圧で短波尾LIを10回印加し、フラッシュオーバー時の静止写真 (図2) から、同時フラッシュオーバー率を取得した (表1)。同時フラッシュオーバー率に及ぼす短波尾LIとDC電圧の極性の関係に着目すると、短波尾LIとDC電圧が同極性の場合、いずれの実験ケースにおいてもDC電圧の上昇に伴い同時フラッシュオーバー率は低下するが、逆極性の場合は、変化がない (実験ケースI) か、上昇する (実験ケースII) 傾向があることが判明した。これは短波尾LIとDC電圧の重畳電界が並列ギャップの見かけ上の絶縁格差に影響を与えていることを示唆しており、これより同時フラッシュオーバー率を重畳電界 (ギャップのフラッシュオーバー電界 E_{Fo})^{注5)}で整理できる可能性が明らかとなった。

2. 気中ギャップのフラッシュオーバー電界と同時フラッシュオーバー率の関係

同時フラッシュオーバー率をギャップのフラッシュオーバー電界 E_{Fo} で整理した結果、全ての実験ケースで E_{Fo} が 0.83 kV/mm 以下では同時フラッシュオーバーは発生せず (同時フラッシュオーバー率 0%)、1.22 kV/mm 以上では必ず発生する (同時フラッシュオーバー率 100%) ことがわかった (図3)。今回、66/77 kV 系統の送電線を対象とした結果ではあるが、同時フラッシュオーバー率を電界で整理できる見通しが得られたことにより、今後、3相以上の同時フラッシュオーバーや異なる電圧階級の送電系統の検討に適用できる可能性がある。

今後の展開

異なる電圧階級の送電系統を想定した同時フラッシュオーバー特性の検討を行うことで得られた知見を LORP に取り込み、精緻化を図る。

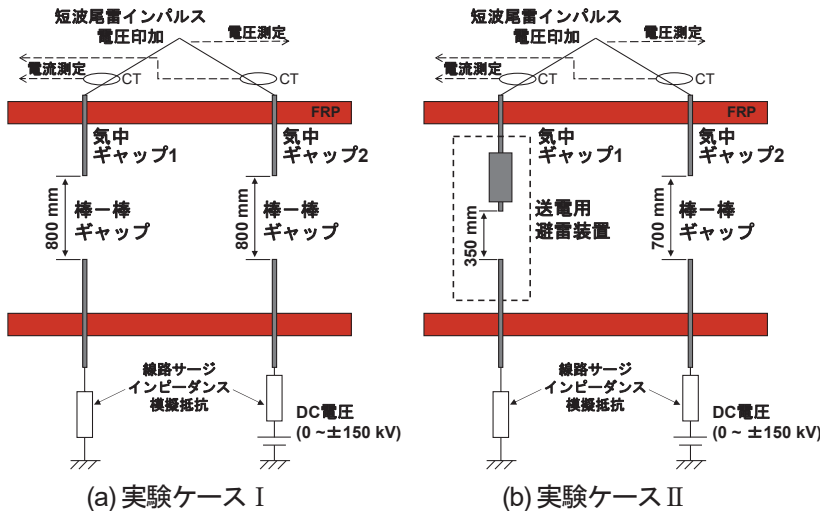
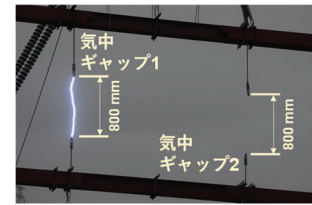


図1 実験系の模式図



(a) 片側フラッシュオーバー



(b) 同時フラッシュオーバー

図2 放電の静止写真 (実験ケース I)

表1 全実験ケースにおける DC 電圧に対する同時フラッシュオーバー率の実験結果

実験ケース	ギャップ構成		正極性短波尾雷インパルス		負極性短波尾雷インパルス		DC電圧の上昇に伴う同時フラッシュオーバー率の変化 ↑ ... 上昇するケース → ... 変化しないケース ↓ ... 低下するケース
	気中ギャップ1	気中ギャップ2 (DC重畳)	正極性 DC電圧	負極性 DC電圧	正極性 DC電圧	負極性 DC電圧	
I	棒-棒ギャップ	棒-棒ギャップ	低下	変化なし	変化なし	低下	
II	送電用避雷装置	棒-棒ギャップ	低下	上昇	上昇	低下	

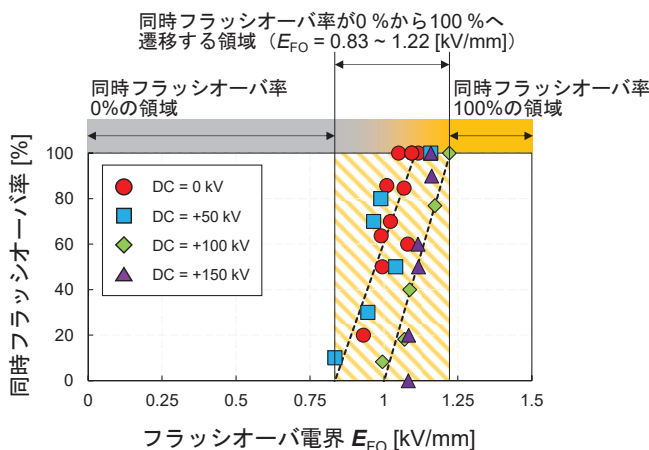


図3 気中ギャップのフラッシュオーバー電界と同時フラッシュオーバー率 (表1の実験ケース I : 短波尾 LI と DC 電圧が正極性の場合)

注1) 塔頂雷撃時に発生する雷過電圧によって複数の AH が逆フラッシュオーバーする現象。本報告では、1回の電圧印加に対し、2つのギャップで1回ずつ、計2回のフラッシュオーバーが発生したとき同時フラッシュオーバーとする。

注2) Lightning Outage Rate Program : 送電線雷事故率予測計算プログラム

注3) 塔頂雷撃時に AH のギャップ間に発生する雷過電圧は、塔脚からの雷サージ電圧の負反射により、波尾長が数 μs 程度の短波尾雷インパルス波形となる。(参考文献: 青島他, 電学論 B, Vol. 109, No. 3, pp. 135-142, 1989)

注4) 短波尾 LI 電圧波形 (1.8/5.5 μs) に比べ、送電線の交流電圧波形の変化は ms と十分に長い。したがって、DC 電圧 (0 ~ ± 150 kV) を片側のギャップに重畳し、77kV 系統の送電線の相間または回線間で発生し得る交流位相差による電圧の瞬時値の差の最大値 (109 kV) を考慮した。

注5) フラッシュオーバー時における短波尾 LI の波高値に DC 電圧の重畳分を考慮し、ギャップ長 (実験ケース I では 800 mm, II では 700 mm) で除したものを。

着氷雪がいしの着雪特性およびフラッシュオーバー特性の評価 —人工着雪課電実験による放電進展様相と耐電圧特性の検討—

三好 雅仁*¹ 本間 宏也*²

キーワード：架空送電線
着雪
がいし
フィールド観測
フラッシュオーバー

Key Words : Overhead line
Snow accretion
Insulator
Field observation
Flashover

Evaluation of Snow Accretion and Flashover Properties of Snow Accreted Insulators - Study of Discharge Development and Withstand Voltage Characteristics by Artificial Snow Accretion Energizing Tests -

Masahito Miyoshi and Hiroya Homma

Abstract

In December 2005, Japan experienced a major outage in Niigata Kaetsu area due to a large amount of wet snow mixed with sea-salt accreted on several transmission insulators. Observation of the discharge development and flashover tests of snow accreted insulators considering the state of snow accretion and electricity imposed on them have been carried out. As a result of the flashover tests using artificial snow, it was observed that partial discharge occurred in the initial stage of voltage application, and then local arc between the gaps occurred when the snow melted due to the partial discharge.

This time, we carried out simplified experiments of energized test sample simulating a snow accreted insulator, and the discharge was observed using a spectroscope. The results of the spectroscopic analysis revealed that the emission was delivered from N₂ during the partial discharge and Na during the local arc discharge.

As for the flashover test of snow-accreted insulators, the 154kV insulator flashover tests have been conducted by applying voltage to the insulators covered with snow in advance. However, in the case of actual salt and snow damage in service, it is necessary to consider the situation where the snow has landed on the insulators of the live lines. Therefore, the other flashover tests were conducted with either the pre-energizing or pre-snowing procedures. As the results, both test methods showed the same discharge development pattern, but different withstand voltage. The effects on the withstand voltage characteristics due to differences in the sequence of snow accretion and energizing was clarified.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員
*²グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員

背景

2005年12月、新潟県下越地方で発生した雪害事故を契機に、当所では、雪害事象に対応した研究を開始した^[1-3]。その一環の塩雪害^{注1)}に関する研究として、これまで現地着雪観測や実規模がいしの着雪課電実験等により、着雪特性や電気絶縁特性の評価を行ってきた。上記の着雪課電実験では、フラッシュオーバの前駆現象として放電様相の変化が確認されていたが、その放電進展メカニズムは明らかになっていない。また、実線路における塩雪害事故として、活線状態で着雪が発達しフラッシュオーバに至る「課電先行型」^{注2)}の事故と、一旦停電した状態で着雪が発達し、再送電時にフラッシュオーバに至る「着雪先行型」の事故がある。一方、これまでの着雪課電実験では、実験上の制約^{注3)}から「着雪先行型」での実施にとどまっております、適切な雪害対策の実現のためには「着雪先行型」と「課電先行型」の耐電圧特性の違いを明らかにする必要があります。

目的

人工雪を用いた着雪課電実験により、着雪がいしの放電進展メカニズムを明らかにするとともに、着雪・課電プロセスの違いが耐電圧特性に与える影響を明らかにする。

主な成果

1. 着雪がいしの放電進展メカニズムの解明のための検討

着雪がいしを模擬した磁器板試料^{注4)}に対して、電圧(30 kV_{rms})を印加し(着雪先行型)、課電中の放電進展様相を分光器により観測した(図1)。その結果、部分放電発生時は、空気中の窒素^{注5)}に由来する発光のピーク(波長300~400 nm)が認められ、これは雪内部の空気層におけるボイド放電であると判明した(図2(a))。その後、放電の継続に伴い融雪が進むと、一部でギャップ部が形成され、そこに局部アーク放電が発生する。この放電については、窒素およびナトリウムに由来するピーク(波長590 nm付近)が認められ、これは融雪に伴う沿面放電であることが明らかとなった(図2(b))。

2. 着雪・課電プロセスの違いが耐電圧特性に与える影響

配電用がいし2種に対し、従来の「着雪先行型」に加え、新たに「課電先行型」による着雪課電実験を行い、人工雪の導電率と耐電圧の関係を評価した(図3)。その結果、「着雪先行型」に比べ、「課電先行型」の方が10~30%程度耐電圧が低くなることが分かった(図4)。「着雪先行型」の場合、放電に伴う融雪によりギャップの拡大が進むと、それ以降はフラッシュオーバに至らないが、「課電先行型」では、雪が継続して吹き付けられるため、フラッシュオーバの機会が多くなり、結果として「着雪先行型」よりも耐電圧が低くなったと考えられる。以上より、着雪・課電プロセスの違いが耐電圧特性に与える影響が明らかになり、実線路の事故形態を考慮した塩雪害対策の検討が可能となる。

今後の展開

人工雪を用いた着雪課電試験と実使用環境との等価性の検証を行う。

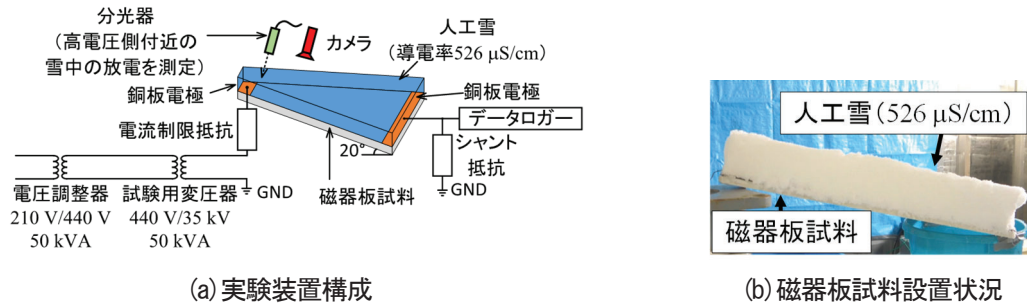


図1 磁器板試料を用いた着雪課電実験装置の構成と設置状況例

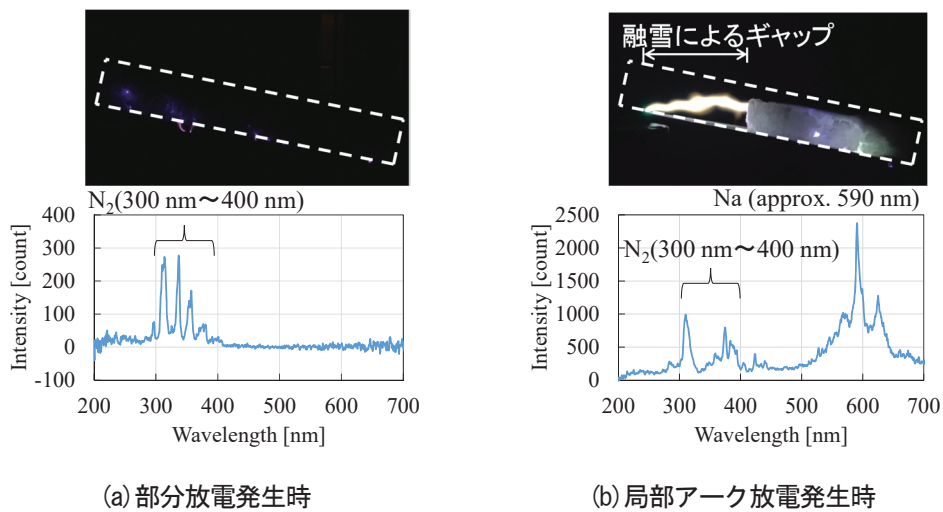


図2 着雪した磁器板試料の電圧印加中における放電進展様相と放電発光スペクトルの一例



図3 着雪課電実験時の着雪様相

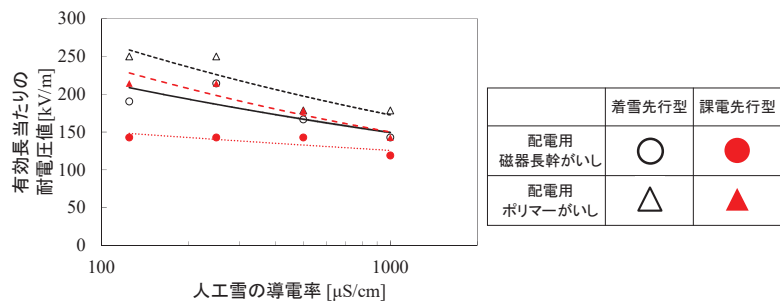


図4 人工雪の導電率と耐電圧の関係

- 注1) 塩分を含んだ湿雪が、がいしの空間を埋め尽くすほどの圧密着雪による地絡事故。
 注2) がいしの着雪課電実験を行う場合、供試がいしに人工雪を吹き付け、交流電圧を印加する方法が「着雪先行型」である。一方、交流電圧を印加した供試がいしに人工雪を吹き付ける方法が「課電先行型」である。
 注3) 課電中、人工的に着雪を形成・制御することが困難であるが、今回、ブロワーを用いることにより可能とした。
 注4) 磁器板試料（電極間距離 296 mm）の上に、型枠を用いて人工雪（導電率 526 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）を厚さ約 60 mm で成型している。
 注5) 窒素分子の第2正帯遷移の脱励起に伴う発光。

関連報告書：

- [1] N19 「送電設備の雪害に関する研究—2007～2011年度成果—」 (2012.05)
 [2] H11018 「送電用がいしの着雪時フラッシュオーバー特性の評価 (I)」 (2012.06)
 [3] H11019 「送電用がいしの着雪時フラッシュオーバー特性の評価 (II)」 (2012.05)

難着雪リングが及ぼす直流コロナ特性への影響 ーコロナケージを用いた実験的検討ー

宮島 清富*¹ 椎名 健雄*²

キーワード：直流送電
架空送電線
イオン流帯電
コロナ放電
予測手法

Key Words : DC power transmission
Overhead transmission lines
Ion flow electrification
Corona discharge
Prediction method

Study on DC Corona Characteristics of Snow Resistant Rings - Experimental Study Using Corona Cage-

Kiyotomi Miyajima and Takeo Shiina

Abstract

An ion flow occurs by corona discharge generated from charged conductor of DC transmission line. Since the ion flow may charge on object under DC transmission line, it is necessary to predict it in advance.

In this report, a corona cage test was conducted in order to develop a prediction method of DC electric environment factors of conductor with snow resistant rings. From the corona cage test results, it was clarified that the corona current was larger when the positive voltage than the negative voltage was applied. In addition, a coefficient indicating the state of occurrence of corona discharge from conductor was calculated from the measurement results of the corona current. It was clarified that when a positive voltage was applied, a conductor with snow resistant rings was apt to generating corona discharge than a conductor wrapped with spiral wires.

*1グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員

*2グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

背景

架空送電線の建設においては、環境への配慮が求められており、直流送電線の設計の際には、電線から発生するコロナ放電に伴うコロナ騒音や、イオン流に起因する線下物体の帯電電圧等の電気環境的要因も考慮する必要がある。当所ではこれまで標準電線（鋼心アルミより線）およびスパイラル線を装着した標準電線を対象として、直流送電線のコロナ特性を解明するとともに、これに基づく直流電気環境予測計算プログラム^{注1} [1,2]を開発してきた。

近年、国内の架空送電線では、雪害対策のため、難着雪リングが多く適用されているが、電線に装着された難着雪リングは、電線表面の突起物となるため、そのコロナ特性の解明や電気環境評価が必要となる。しかしながら、これまで難着雪リングが装着された電線の直流コロナ特性の検討はなされていない。

目的

コロナケージ^{注2}を用いた試験により、難着雪リングの直流コロナ特性を明らかにするとともに、直流電気環境予測計算に必要なパラメータを算出する。

主な成果

1. コロナケージ試験による難着雪リングが装着された標準電線の直流コロナ特性の解明

塩原実験場のコロナケージを用い、標準電線（ACSR810mm²）の単導体に難着雪リングを90cm間隔で装着したケースについて、正極性および負極性の直流電圧（最高312kV、 G_{\max} ^{注3}=30kV/cm）を課電し、コロナ電流の測定を行った^{注4}（図1, 2）。この結果、コロナ放電は難着雪リングを装着した箇所から発生しやすく（図3）、コロナ電流の絶対値は、負極性よりも正極性の電圧を課電したほうが、大きくなることを明らかにした（図4）。

2. コロナケージ試験に基づく直流電気環境予測計算に用いるパラメータの算出

コロナケージ試験から得られたコロナ電流の G_{\max} 特性を用い（図4）、標準電線に難着雪リングを装着したケースについて、直流電気環境予測計算プログラムでの予測計算に必要なパラメータ（ K_b 値^{注5}）を算出した。なお、コロナ電流の G_{\max} 特性の測定結果において、極性による差が顕著に表れたため、正・負極性それぞれに対して K_b 値を算出した（表1）。標準電線に難着雪リングを装着した場合、 K_b 値は負極性よりも正極性の電圧が課電された場合のほうが値は大きいことがわかった。これにより、直流送電線下物体のイオン流帯電電圧の平均値や50%il値^{注6}の予測計算を可能とした。

- 注1：Deutschの仮定（イオンは電界の大きさに影響を与えるが、電界の方向には影響を与えない）を適用し、イオン流がないときの電気力線に沿って、電界とイオン流を計算するプログラム。
- 注2：送電線実規模スケールで電線の注水課電ができ、電線のコロナ特性を評価できる大型試験設備。
- 注3： G_{max} とは、最大導体表面電位の傾き。電線と同じ直径の円筒をモデルとし、算出する。
- 注4：2016年と2017年に冬季、2017年に夏季、2020年に春季と秋季と、四季を通じた測定を実施。
- 注5：試験で求められたコロナ放電の発生のしやすさを示す係数。値が大きいほどコロナが発生しやすい状態にあることを示す。
- 注6：50%il値とは、例えば、イオン流帯電電圧のデータを小さいほうから並べたとき、上位50%の順位となるイオン流帯電電圧の値。

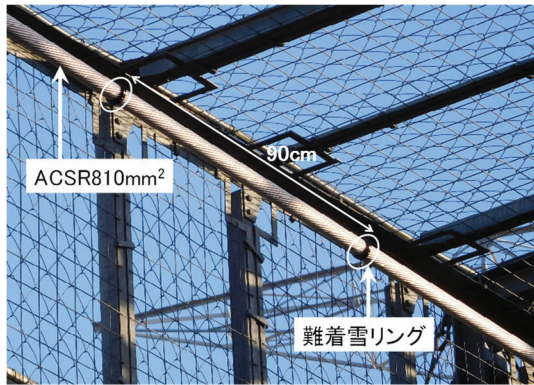


図1 試験電線

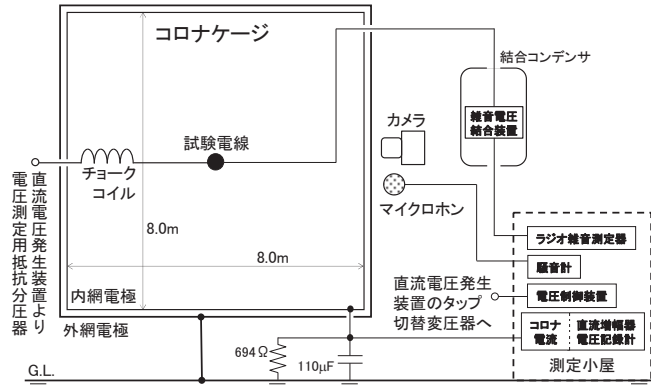


図2 コロナケージの測定回路

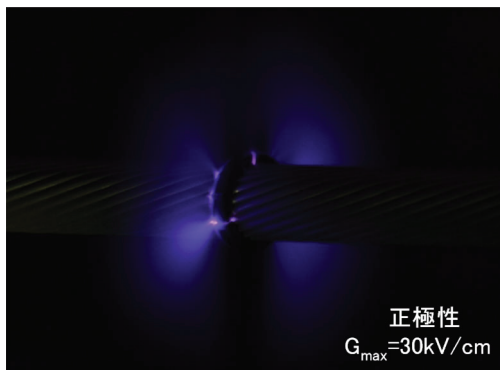


図3 難着雪リングからのコロナ放電の観測例

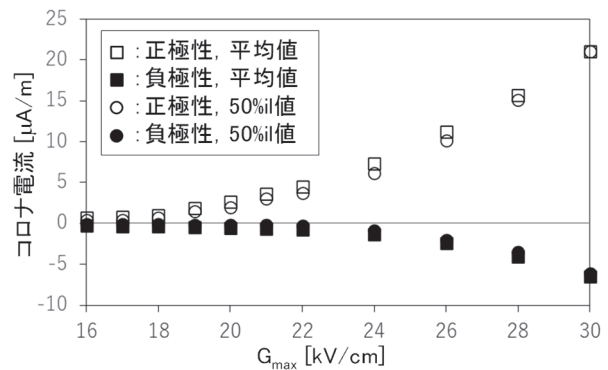


図4 コロナ電流の G_{max} 特性

表1 K_b 値の算出結果

統計量		平均値	50%il値
K_b 値	標準電線 ^[2]	1.2	0.8
	標準電線+スパイラル線 ^[2]	4.9	4.6
	標準電線+難着雪リング	正極性: 48.1	正極性: 38.9
		負極性: 1.4	負極性: 1.1

関連報告書：

[1] T30「直流イオン流場の解析手法と直流送電線への応用」（1993.09）

[2] H18012「スパイラル線の影響を考慮した直流送電線下のイオン流帯電電圧の予測手法の開発-コロナケージと実規模試験送電線による実験的検討-」（2019.05）

送電用マンホールでの遠隔絶縁診断に向けた 部分放電波形データの圧縮手法の開発

真下 貴文*¹ 高橋 俊裕*² 石野 隆一*³
堀 康彦*⁴

キーワード： 地中送電設備
マンホール
ICT
LPWA
部分放電

Key Words : Underground power transmission facility
Manhole
Information and communication technology
Low Power Wide Area
Partial discharge

Development of Data Compression Method of Partial Discharge Waveform for Remote Insulation Diagnosis in Manhole for Power Transmission Cable

Takafumi Mashimo, Toshihiro Takahashi, Ryuichi Ishino and Yasuhiko Hori

Abstract

Partial discharge (PD) measurement is considered to be one of dominant measures for insulation diagnosis of underground power transmission cable system. PD would be a sporadic phenomenon in its early stage, thus its continuous measurement is essential for its rapid understanding. The major PD source would be joints of cable system laid in manholes, which gives difficulties in transmission of measured PD data from manhole to an aboveground station. LPWA (Low Power Wide Area) technology can realize the data communication between inside manhole and the aboveground station, but its low data transmission speed brings the limitation of data transmission. Therefore, a data compression method with high efficiency is important for continuous PD measurement in a manhole. This report develops a data compression method for PD signals using Gaussian process regression to overcome the limitation of LPWA. The method could compress the PD data to a minimum of about 10% in its size and was confirmed that PD signal can be efficiently transmitted using the developed method.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員
*²グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー
*³グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員
*⁴グリッドイノベーション研究本部 研究統括室 兼 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 分野統括

背景

地中送電設備では、電力ケーブルの中間接続箱や終端接続箱の経年による絶縁性能低下が懸念されている。絶縁破壊を未然に防止するため、その前駆現象である部分放電の継続的な測定が重要である。また、部分放電発生箇所の特徴やノイズとの弁別には、部分放電波形を高時間分解能かつ対象設備の複数箇所でも同時測定して比較評価することが必要である^{注1)}。一方、近年のデジタル化の進展に伴い、IT やセンサ技術等の ICT を活用し、マンホール内の中間接続箱における部分放電測定を遠隔かつリアルタイムに行うことによる劣化の早期発見が期待されている。マンホール内はシステムの動作電源の確保が困難であるため、測定された部分放電波形データの地上への伝送に消費電力の小さな無線通信技術 (Low Power Wide Area: LPWA)^{注2)} を適用することが検討されている。一方で、LPWA の伝送速度は低速であるため、部分放電波形データを適切に圧縮する必要がある^{注3)}。

目的

マンホール内で測定された部分放電波形データを効率的に伝送するためのデータ圧縮手法を考案するとともに、手法の適用性を検証し、LPWA を用いたデータ伝送システムへ実装する。

主な成果

1. 効率的な部分放電波形データの伝送に向けたデータ圧縮手法の考案と適用性検証

部分放電発生箇所の特徴やノイズとの弁別に必要な波形情報^{注4)} を保持できるデータ圧縮手法を考案した (図 1)。本手法ではデータの圧縮と復元にガウス過程回帰^{注5)} を用いるものであり、圧縮されたデータから元の複雑な形状の波形を推定することができる。代表的な部分放電波形データ 3 種類に対して本手法を適用し、データ圧縮状況の評価を行った結果、波形 A では 8.6%、波形 B では 7.0%、波形 C では 20.8%までデータサイズを圧縮することができた (図 2)。

2. データ圧縮手法の LPWA を用いたデータ伝送システムへの実装

部分放電波形データを LPWA で伝送するシステムを構築し、考案したデータ圧縮手法を実装した (図 3)。このシステムを用いて部分放電波形データを伝送したところ、伝送時間を 20%以下に短縮することができた。以上の検討より本システムの実現の見通しを得た。

注 1) 高橋俊裕ほか、電力ケーブルの現場劣化診断のための部分放電測定の階層化手法の提案、電中研報告、H14017 (2015)

注 2) 低消費電力で動作し、長距離の無線通信が可能である一方で、伝送速度が低速な通信方式。マンホール内のような障害物で囲まれたエリアに対しても有効であり、特定小電力無線によるものは、免許および登録が不要であるため導入コストが低い。

注 3) 例えば、LPWA の伝送速度を 100 バイト (以降、B) /秒としたとき、1 kB の部分放電波形データを伝送するためには 10 秒以上の伝送時間を要する。これに対して絶縁体の劣化の初期段階では、部分放電は数秒に 1 回程度の頻度で発生する場合があります。劣化の早期発見のためにはこの頻度で発生する部分放電の波形データを欠損なく伝送する必要がある。

注4) 本報告では、波形の立ち上がり時間と第1ピーク値とした。なお、本手法は任意の波形情報を、圧縮・復元性の確認パラメータとして指定できるため拡張性が高い。

注5) サンプルングデータ間の相関を示す分散共分散行列を用いて未知のデータ（本手法では復元波形）を推定する回帰手法。元波形の形状が不明な場合でも適用できる。推定される復元波形は分布として得られ、この分布の平均を復元波形とした。より少ないサンプルングデータで復元波形を精度よく推定するためにはサンプルングデータの選択方法が重要であり、本手法では元波形のピーク値を最初のサンプルングデータとし、推定された復元波形の推定精度が低い箇所から順にサンプルングデータを追加していくことで効率的に復元波形を推定できる。

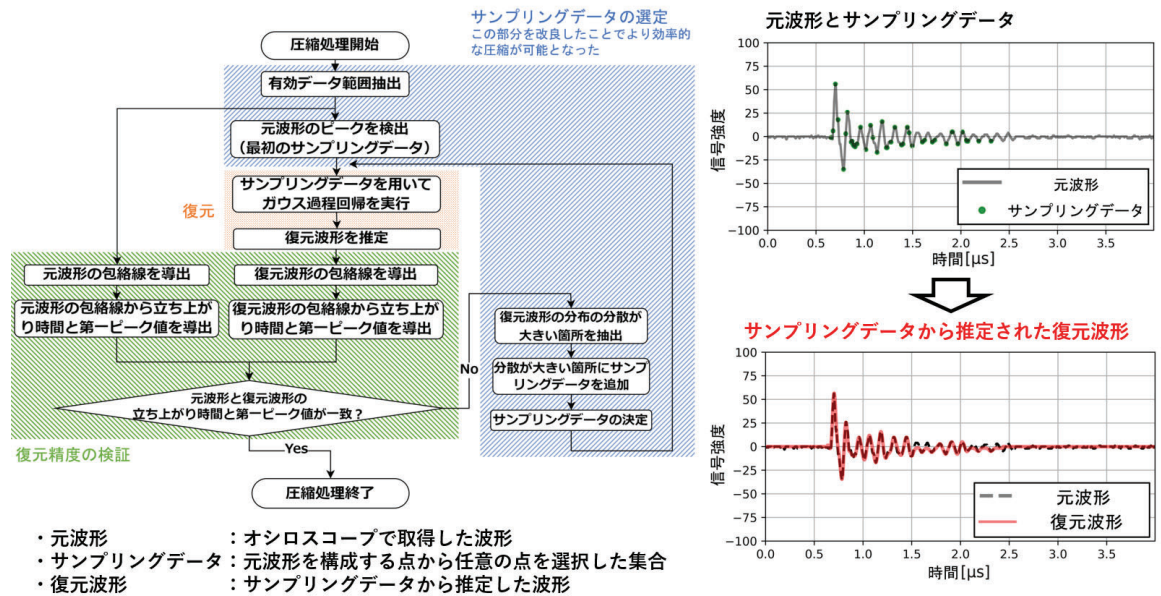


図1 効率的な部分放電波形データの伝送に向けたデータ圧縮手法の概要
 (左：考案した圧縮手法の手順，右：圧縮手法を部分放電波形データに適用した例)

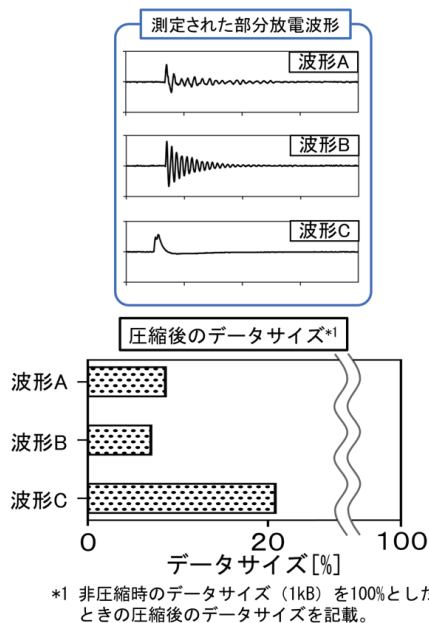


図2 各種部分放電波形データに本手法を適用した場合のデータ圧縮状況

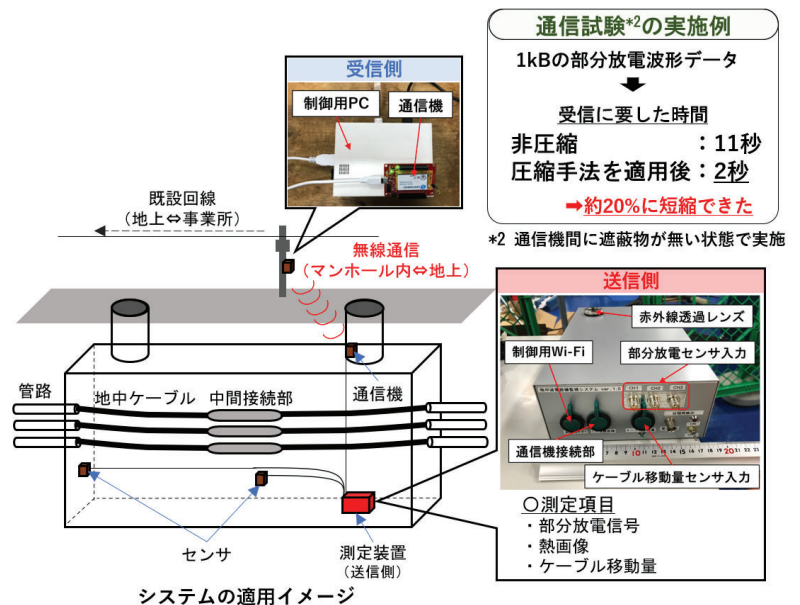


図3 部分放電波形データをLPWA方式で伝送するシステムの概要

OF ケーブルでの油中ガス拡散挙動の解明 -油浸紙を介した油中ガスの拡散係数の測定と モデル実験系での油中ガス拡散挙動解析-

牧野 裕太*¹ 栗原 隆史*² 高橋 俊裕*³

キーワード：OF ケーブル
油中ガス
油浸紙
拡散係数
温度依存性

Key Words : Oil-filled cable
Dissolved gas
Oil-impregnated paper
Diffusion coefficient
Temperature dependence

Study on Diffusion Behavior of Dissolved Gas in Insulating Oil on Oil-filled Cables - Measurement of Diffusion Coefficients of Dissolved Gas in Insulating Oil through Oil-impregnated Papers and Diffusion Calculation on Coaxial Cylindrical Model -

Yuta Makino, Takashi Kurihara and Toshihiro Takahashi

Abstract

Insulating oil used for the dissolved gas analysis of oil-filled cables is sampled from cable joints and terminations. Partial discharges in the insulating layer decompose the insulating oil into gases such as acetylene and hydrogen. The gasses dissolve into the insulating oil, and they diffuse to the outer insulating oil layer in cable joints and terminations through the electrical insulation layer consisting of laminated oil-impregnated papers. Therefore, it is important to understand the diffusion characteristics of dissolved gases in the laminated oil-impregnated insulating paper layer. In this report, the diffusion coefficients of dissolved acetylene were measured experimentally in the oil through oil-impregnated insulating papers in the laminated direction and the stratabound direction at a constant temperature. As a result, it was revealed that the diffusion coefficient of dissolved acetylene in the stratabound direction is higher than that in the laminated direction, both are dependent on temperature. In addition, the diffusion characteristics of dissolved acetylene in the insulating oil on a coaxial cylindrical model was measured at room temperature, and calculated using the diffusion coefficients achieved in the above experiment. As a result, it was confirmed that the calculated result was similar to the experimental one.

*1グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員
*2グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員
*3グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

背 景

OF ケーブルの絶縁性能は主に油中ガス分析に基づいて管理されており^{注1)}、その分析対象となる絶縁油はケーブル接続部の保護銅管に付属する採油口から採取される。ケーブル絶縁体中で異常や劣化が生じた場合、発生した分解ガスは絶縁体である油浸紙を介して保護銅管に充填された絶縁体外側の油まで拡散した後に検出される。このため、油中ガス分析の適用に当たっては油浸紙を介した油中ガスの拡散挙動の把握が重要である^{注2)}。

目 的

温度一定の条件下^{注3)}での油浸紙を介した油中ガスの拡散係数^{注4)}を基礎実験系で取得し、その拡散係数を用いた油中ガス拡散挙動の解析の妥当性をモデル実験系で確認する。

主な成果

1. 基礎実験系による油浸紙を介した油中ガスの拡散係数とその温度依存性の取得

部分放電などによって発生する代表的な分解ガスの一つであるアセチレンを溶解させた絶縁油を用いて、基礎実験系で油浸紙の積層方向および沿層方向の拡散係数を測定した(図1)。その結果、沿層方向への拡散係数は積層方向への拡散係数よりも二桁程度大きく、また、それぞれの拡散係数は絶縁油の温度の上昇とともに増大した(図1)。

2. モデル実験系による上記の拡散係数を用いた油中ガス拡散挙動の解析の妥当性確認

導体側から油浸紙を介して絶縁体外側の絶縁油に油中ガスを拡散させる同軸円筒形状の実験系(図2)を構築し、外油のアセチレン濃度の経時的変化を測定した^{注5)}。この結果を、上記の拡散係数を用いた油中ガスの拡散挙動解析より得られた結果^{注6)}と比較したところ、概ね一致した(図3)。これより、基礎実験系で取得した拡散係数を用いた油中ガス拡散挙動の解析によって、実機 OF ケーブルでの油中ガス拡散挙動を把握できる見通しを得た。

今後は、温度変化を伴う場合の油中ガスの拡散様相を把握するとともに、油中ガス拡散挙動の解析によって実機 OF ケーブルでの油中ガス拡散挙動を解明する。

注1) 放電や異常過熱によって絶縁油や絶縁紙が分解されるとガス(水素、炭化水素、一酸化炭素など)が発生して絶縁油に溶解する。そこで、油中ガス分析によって把握した油中ガスの成分や量に基づいて異常・劣化状態を推定する。

注2) シリコン油に溶存したアセチレンが油浸紙を介して拡散する場合の拡散係数は測定された例がある[1]ものの、OF ケーブル用合成油(アルキルベンゼン)を用いた検討および温度依存性の検討はこれまでに実施されていない。

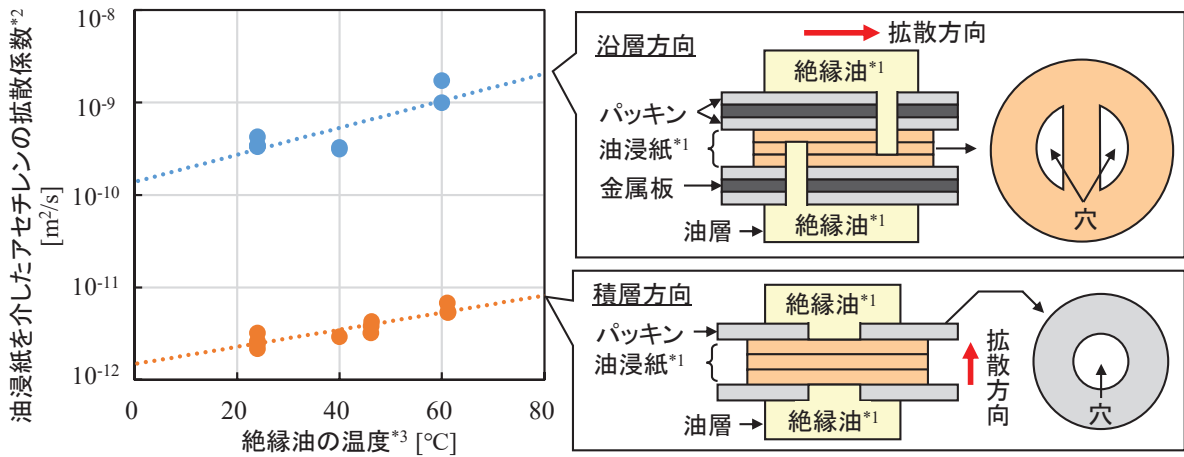
[1]小野田他、「超高压 CV ケーブル用油浸終端接続箱の劣化現象について」、電気学会 B 部門大会, 282(2009)

注3) OF ケーブルでは、絶縁油は給油設備によって加圧されているものの絶縁油の強制的な循環はない。通電時のヒートサイクルや布設場所の温度変化に伴う絶縁油の膨張・収縮による移動は別途検討する必要があるが、本検討では、基礎検討として、温度一定の条件下で拡散係数を測定した。

注4) 単位時間当たりに単位面積を通過する物質の量は、その単位面積表面での濃度勾配に比例して移動する物質に等しい。この比例定数が拡散係数である。拡散係数が大きいほど拡散しやすい。

注5) 油浸紙中にはアセチレンが均一濃度で存在し、内・外の絶縁油にはアセチレンが存在しない条件(新油)で測定。

注6) 油中ガスの拡散挙動の解析には COMSOL Multiphysics[®]を用いた。



- *1 絶縁油にはOFケーブル用合成油、絶縁紙にはクラフト紙を使用。(絶縁油が含浸された絶縁紙を油浸紙と呼称。)
- *2 片方の油層の絶縁油にだけアセチレンを溶解し、一定期間静置後に両油層のアセチレン濃度を測定して拡散係数を算出。
- *3 絶縁油の温度は、OFケーブルの常時の導体最高許容温度である80°Cもしくは85°C(電圧階級による)を考慮して設定。

図1 油浸紙を介したアセチレンの拡散係数の測定結果

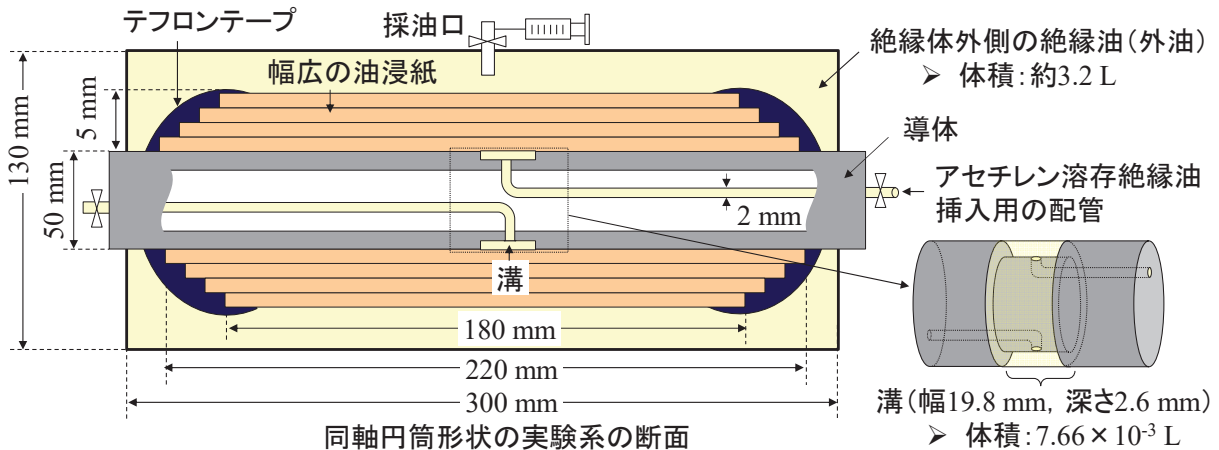
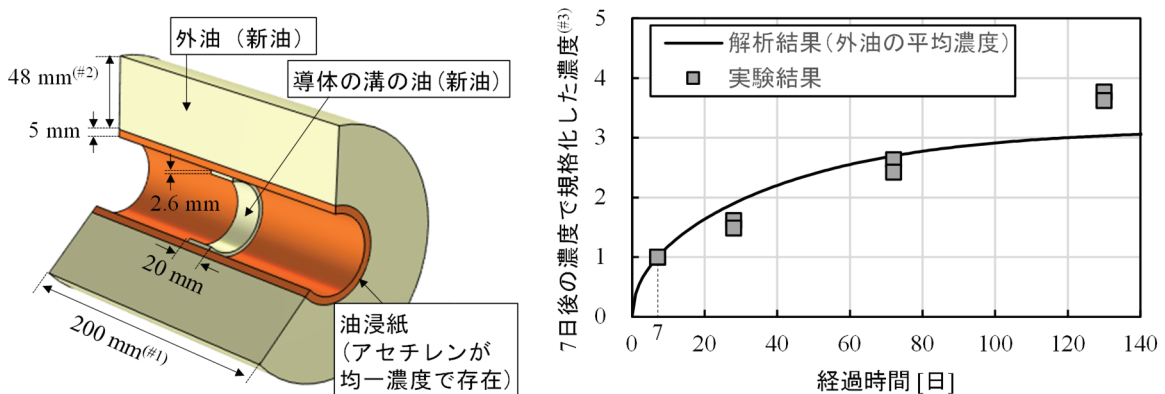


図2 導体側から油浸紙を介して外油に油中ガスを拡散させる同軸円筒形状の実験系



- (#1) 横幅は油浸紙の横幅の平均値に設定。
- (#2) 外油の縦幅は外油の体積が約3.2 Lとなるように設定。
- (#3) 油浸紙のアセチレン初期濃度を測定できなかったため、7日後の濃度で規格化した濃度(拡散係数に依存)で実験結果と解析結果を比較。

- (a) 解析時の形状と初期条件
- (b) 実験結果と解析結果の比較

図3 同軸円筒形状の実験系における実験結果と解析結果

超高圧 CV ケーブルの空間電荷測定における 過渡温度条件下での信号補正法の開発

森田 翔亮*¹ 布施 則一*² 高橋 俊裕*³
穂積 直裕*⁴

キーワード：超高圧直流 CV ケーブル
過渡温度条件
空間電荷測定
パルス静電応力法

Key Words : HVDC XLPE cables
Transient temperature conditions
Space charge measurement
Pulsed electro-acoustic method

Development of Signal Correction Method under Transient Temperature Conditions for Space Charge Measurement of XLPE cables

Shosuke Morita, Norikazu Fuse, Toshihiro Takahashi and Naohiro Hozumi

Abstract

This report presents the signal correction method of the pulsed electro-acoustic method for space charge measurement of full-size XLPE cables under transient temperature conditions. A general measurement under steady-state temperature necessitates the reference waveform at the measuring temperature for correction. Unlike the steady-state measurement, the reference waveform at the measuring temperature is unobtainable in transient temperature. Hence, we took an approach to apply the reference waveform measured at the ambient temperature for the signal correction of different temperatures up to 90 °C, which is the maximum conductor temperature of HVDC XLPE cables. For the accurate signal correction, temperature characteristics of the system's impulse response should be considered for this approach. Therefore, we experimentally measured the reference waveforms about every 3 hours for 100 hours under ambient and high-load temperature conditions before and after the 460 kV application by means of the differential method. As a result, the temperature characteristics were not significant in this series of experiments. Furthermore, we measured signals under the 24-hour load-cycle condition as an example of the measurement under transient temperature. We applied the proposed signal correction and obtained a space charge profile under transient temperature conditions.

*1グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員

*2グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

*3グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

*4豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授

背景

カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの導入が拡大しており，洋上風力発電の適地から需要地までの超高压直流 CV ケーブルによる高効率長距離電力輸送が注目されている。直流 CV ケーブルでは絶縁体内部の空間電荷蓄積現象^{注1)}による絶縁性能低下の可能性が指摘されている。そこで当所では，空間電荷挙動を考慮した直流 CV ケーブル絶縁性能評価法の確立に向け，パルス静電応力法^{注2)}を適用した定常温度条件下での空間電荷評価法を開発してきた^{注3)}。ここで，実運転中の負荷変動によるケーブルの温度が時間変化する状況，すなわちヒートサイクル付与時の空間電荷測定においては，測定信号から電荷・電界分布への変換過程で温度の時間変化による影響が想定されるものの，その定量的な評価はなされていない。

目的

直流 CV ケーブルの運転時を想定した過渡温度条件下^{注4)}でのパルス静電応力法の適用を念頭に，この温度変化が測定信号から空間電荷・電界分布への変換結果に与える影響を明らかにする。これに基づき，ヒートサイクル付与時の過渡温度条件下において測定が可能であることを実証する。

主な成果

1. ケーブル温度が測定信号の空間電荷・電界分布への変換結果へ与える影響の把握

275kV 級交流 CV ケーブル^{注5)}に対し，常温(5°C)と高温(導体温度 90°C)^{注6)}にて計 100 時間にわたって空間電荷および参照信号^{注7)}の測定を実施した(図 1，図 2)。常温と高温条件下でそれぞれ最初に得た参照信号を用いて，高温測定開始時(図 1 の 72 時間時点)の測定信号を空間電荷・電界分布へ変換した(図 3)。その結果，それぞれの参照信号から得られる電界分布の偏差の標準偏差は 2.0kV/mm で，平均電界(20kV/mm)の 10%程度に相当し，比較的小さいことがわかった。

2. ヒートサイクル付与時の連続的な電界分布測定の実証

ヒートサイクル付与時に連続的な空間電荷測定を実施して得られた測定信号を，常温で得られた参照信号を用いて電荷・電界分布へ変換した。その結果，ヒートサイクル付与時の温度変化に伴う電界分布変化が得られ(図 4)，過渡温度条件下における空間電荷測定が可能であることを実証した。

今後の展開

各種温度条件下の空間電荷蓄積現象を解明し，温度による直流 CV ケーブルの絶縁性能への影響を解明する。

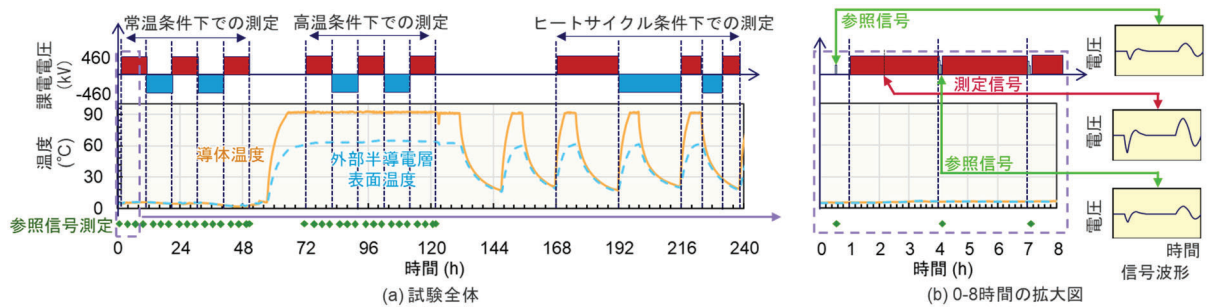


図1 課電電圧及び導体温度などを変化させた場合の参照信号測定タイミング

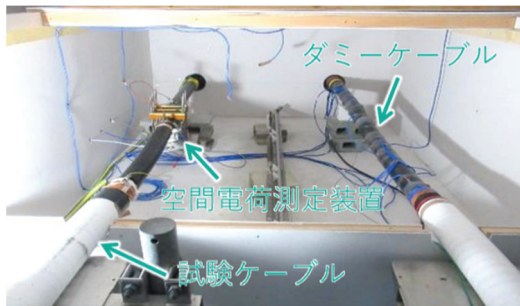


図2 ケーブルと測定装置の配置状況

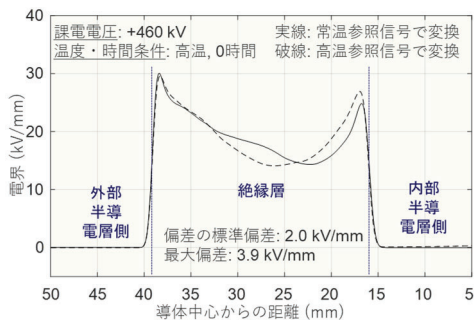


図3 常温・高温条件下の参照信号による電界分布

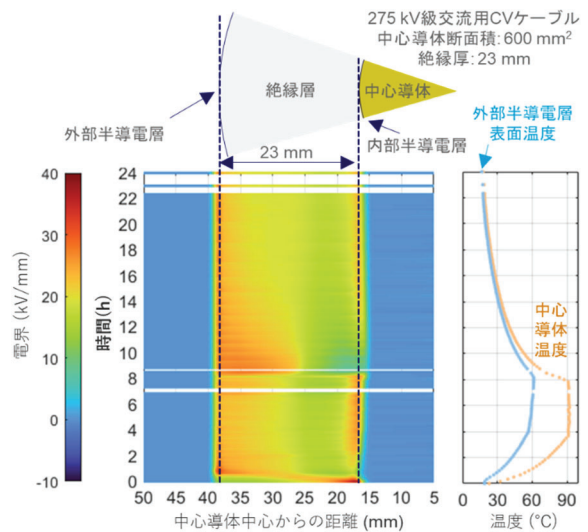


図4 24時間ヒートサイクル付与時の電界分布変

- 注1) 絶縁体中の電荷(空間電荷)が蓄積したとき、絶縁体内の電界は空間電荷が形成する電界と外部電界が重畳した分布となり、絶縁体内部の電界は変化する。この電界変歪が絶縁体の絶縁性能へ影響を及ぼすと考えられている。
- 注2) 絶縁体にパルス電圧を印加したときに絶縁体内部の電荷がクーロン力によって発する音波を圧電素子で測定することで、絶縁体内部の電荷分布を推定する手法。PEA(Pulsed electro-acoustic)法とも呼ばれる。
- 注3) 例えば、森田他、「実規模 XLPE ケーブルの空間電荷計測における補正用参照波形の測定方法と測定電界に関する検討」,令和3年電力・エネルギー部門大会論文集,2WEB8-1, 2021.
- 注4) CV ケーブルの常時許容導体温度は最高で 90℃であるため、常温-90℃の温度範囲における過渡温度条件とする。
- 注5) 今回、導体断面積 600 mm²、絶縁厚 23 mm の 275 kV 級交流 CV ケーブルを用いた。一般的に交流 CV ケーブルの絶縁体は空間電荷が蓄積しやすいと言われており、空間電荷挙動を明瞭に観察する目的で交流 CV ケーブルを用いた。
- 注6) 変流器を利用して交流電流を導体に通電することでケーブルの導体を加熱した。試験ケーブルと同様の熱的条件となるダミーケーブルの導体温度が 90-92℃の範囲となるように ON/OFF 制御した。
- 注7) 測定信号から電荷・電界分布への変換に用いる信号で、空間電荷蓄積がほぼない条件(低電圧かつ短時間)での測定で得られる。参照信号から抽出可能な測定系のインパルス応答と絶縁体の音響伝搬特性を用いて測定信号を補正することで、電荷・電界分布へ変換できる。温度による絶縁体の音響伝播特性の変化を考慮する手法は検討例がある一方、インパルス応答に関する検討例はない。(森田他、「超高压直流ケーブル用空間電荷計測における温度勾配下での信号歪みの補正方法の検討」電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌),140巻4号,p.271-276,2020)

関連報告書：

- [1]W95011 「超高压級 CV ケーブルの空間電荷測定技術の開発—厚肉絶縁ケーブルのための信号補正アルゴリズムの開発」(1996.04)
- [2]H19004 「高電圧直流分野における固体絶縁技術の課題—調査絶縁体の帯電現象と空間電荷計測—」(2020.03)

空間電荷測定に基づくケーブル絶縁体の 電界分布推定における解析精度評価方法の考案

布施 則一*¹ 森田 翔亮*² 宮崎 悟 *³
高橋 俊裕*³ 穂積 直裕*⁴

キーワード：電力ケーブル
空間電荷計測
パルス静電応力法
電界分布
推定精度

Key Words : Power cables
Space charge measurements
Pulse electro-acoustic method
Electric field distribution
Estimation accuracy

A Methodology to Evaluate Analysis Accuracy on Electric Field Distribution in Cable Insulating Wall Based on Space Charge Measurement

Norikazu Fuse, Shosuke Morita, Satoru Miyazaki, Toshihiro Takahashi
and Naohiro Hozumi

Abstract

Evaluation of estimation accuracy of an electric field in a cable-insulating wall is critical when assessing their suitability for high voltage dc systems. A method was proposed for such an evaluation by analyzing space charge measurement results. Time-domain deconvolution was employed to derive stable and fully automatic processing necessary to manipulate large data required for statistical analysis. The evaluation flowchart has the three stages: optimizing deconvolution parameters and evaluating accuracy for low- and high voltage data. The proposed method's validity was verified by analyzing waveforms obtained by applying a dc voltage to a 66-kV-class extruded cable using the pulsed electroacoustic method. Two dc voltages were set to be sufficiently low with the intention that the internal field corresponded to the solution of Laplace's equation. The system impulse response was extracted from the waveform obtained under the low voltage condition and optimized to appropriately analyze several waveforms observed. A similar level of estimation accuracy was confirmed for waveforms obtained under the low and high voltages. It follows that waveforms usually observed to only receive the system impulse response can be used for the accuracy estimation. The evaluated accuracy can be adapted to high voltage conditions, which could induce space charge accumulation and field distortion.

*¹ グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

*² グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員

*³ グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

*⁴ 豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授

背景

欧米などで導入が進んでいる直流用 CV ケーブルについては、絶縁体内の帯電現象である空間電荷蓄積が絶縁耐力に影響を及ぼすと指摘されている¹⁾。そこで、ケーブルの形式試験とともに空間電荷蓄積とそれによる電界強調程度を追加評価することが検討されている²⁾。そのため、今後、空間電荷測定に基づく電界分布解析の精度を把握することが求められる。従来、逆問題を扱うこの解析は解法の安定性に問題があった。しかし、計算技術の進歩によりこれが解決し多量データの解析もできるようになり⁴⁾、解析精度が評価できる見通しが立ってきた。

目的

空間電荷測定結果に基づく電界分布推定の精度検証法を考案する。また、考案した手法の有効性を、CV ケーブルより得た空間電荷信号データを用いて検証する。

主な成果

1. 空間電荷測定に基づく電界分布推定の精度検証法の考案

パルス静電応力法⁵⁾に基づく空間電荷測定では、絶縁体内に電荷が蓄積しない程度の直流電圧 V_L を内部導体に印加し、測定系のインパルス応答を取得する。この通常の手順で取得された多量のデータを活用し、自動解析することで、ケーブル内部の電界分布の推定精度を検証する方法を考案した (図 1)。

2. 考案手法の有効性評価

交流 66kV 用 CV ケーブル⁶⁾に $V_L=30kV$ ⁷⁾を印加し空間電荷データを得、考案手法に基づいて電界分布の推定精度を評価した (図 2)。電荷分布の積分で得た電界分布と理論値を複数データで比較したところ⁸⁾、推定精度 (95.4%信頼区間) が $0.8\pm 24.1\%$ と求まった。また、インパルス応答測定の電圧 V_L より高い印加電圧 ($V_H=45kV$ ⁷⁾) でのデータでも解析精度が上記と同等であることを確認した。これにより、低電圧での評価結果が空間電荷測定結果の解析精度として採用できることがわかり、ケーブルに対する空間電荷測定の試験電圧条件でのデータにも適用できる見通しを得た⁹⁾。

¹⁾ 例えば、(i) H. Fukagawa et al., IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 7, pp. 3175-3184 (1981), (ii) N. Ando and N. Numajiri, IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. 14, No. 1, pp. 36-43 (1979).

²⁾ IEEE Recommended Practice for Space Charge Measurements on High-Voltage Direct-Current Extruded Cables for Rated Voltages up to 550 kV, IEEE Std. 1732 (2017).

³⁾ 直流 CV ケーブルに対する形式試験や PQ 試験は、CIGRE Technical Brochure No. 496などで規定されており、IEEE Std. 1732のような空間電荷測定はこれに含まれない。ただし、空間電荷測定の重要性は年々高まっている。

⁴⁾ 空間電荷測定で観測される高周波パルスは歪んでおり、逆畳み込み解析による補正が重要になる。従来はフーリエ変換を介してこの解析が実施されてきた。計算機の速度向上により生波形での解析が実現され、安定解が見いだされやすくなった。N. Hozumi et al., Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Dielectr., pp. 347-350 (2020).

- ⁵⁾ ナノ秒パルスの印加により電荷がクーロン力を受け、この結果生じる超音波パルスを観測する。ケーブル断面の電荷分布が観測される。(i) T. Maeno et al., Proc. IEEE-CEIDP 1985, pp. 389-397 (1985), (ii) 穂積ほか, 電学論 A, Vol. 117, pp. 13-21 (1997).
- ⁶⁾ 導体断面積 150mm², 絶縁層の内径 16mmφ, 外径 34mmφ。一般的な CV ケーブルの例として使用した。
- ⁷⁾ 空間電荷蓄積が生じず、データ解析結果を同軸ケーブル内の電界分布と比較できる電圧として設定した。
- ⁸⁾ 本研究では、81 個のデータで解析した。
- ⁹⁾ 一般に、試験電圧条件では空間電荷蓄積が生じる可能性があり、その場合、本考案手法による精度評価はできない。ただし、その際の空間電荷信号の S/N 比は印加電圧と正の相関がある。そのため、空間電荷蓄積が生じない電圧 V_L で得た信号で評価した誤差範囲は、大きめの見積り値として扱える。なお、IEEE Std. 1732 では運転電圧で測定を実施する。

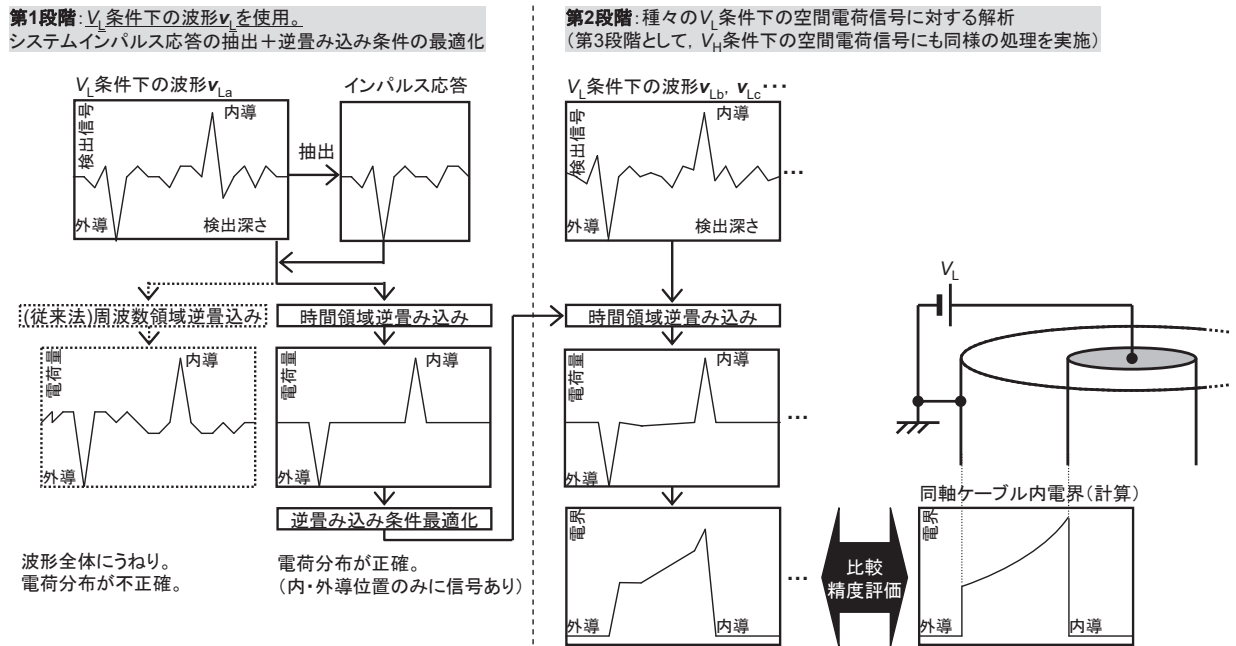


図 1 空間電荷データに対する解析精度評価方法

直流電圧印加により絶縁体界面および内部に電荷蓄積が生じる。この電荷が誘起する超音波振動を検出し、解析に供する。内・外部半導電層の電荷に由来する信号がノイズとともに観測され、ここよりインパルス応答が抽出される(解析第 1 段階)。同図では、周波数領域の逆畳み込み処理では波形全体がうねりやすいことを示した。一般に測定は複数回行われるので、これを添え字 a, b, c...を用いて区別して表現した。上図では、データ v_{La} でインパルス応答を抽出し、それを用いて v_{Lb} , v_{Lc} を解析し、電界分布の推定精度を評価している(解析第 2 段階)。

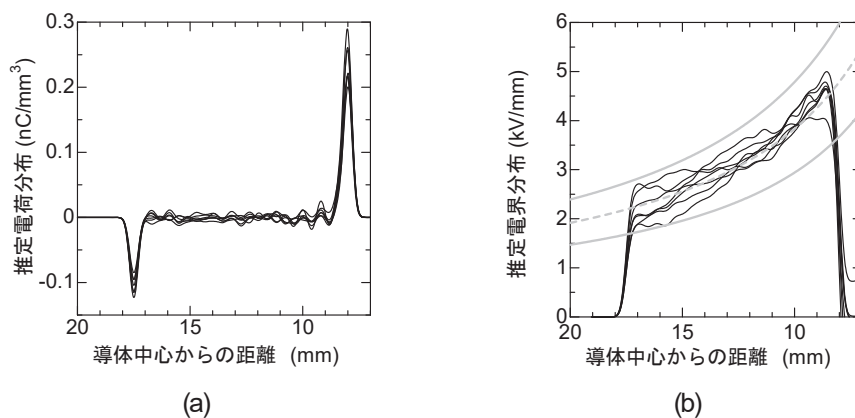


図 2 $V_L=30\text{kV}$ を印加して測定された空間電荷データに対する解析例。(a)電荷分布, (b)電界分布。

(b)では同軸ケーブル内電界としてラプラス方程式から計算される電界分布を灰色点線で示した。また、その上下に、データ解析精度である 95.4%信頼区間を灰色実線で示した。これは解析第 2 段階の解析例であり、同様の解析を $V_L=45\text{kV}$ 印加時のデータに対しても実施した。

電力流通設備のアセットマネジメントへの 外部診断の適用事例 —シャントリアクトル内の部分放電源の同定—

宮崎 悟*¹ 倉石 隆志*² 高橋 紹大*³

キーワード：アセットマネジメント
シャントリアクトル
部分放電
過渡接地電位センサ
周波数応答解析

Key Words : Asset management
Shunt reactor
Partial discharge
Transient earth voltage sensor
Frequency response analysis

Application of External Diagnosis for Managing Electric Power Equipment - Identification of Partial Discharge Source in Shunt Reactor -

Satoru Miyazaki, Takashi Kuraishi and Tsuguhiro Takahashi

Abstract

In recent years, "asset management" or "managing assets" technique has been expected to support the rationalization of maintenance and operation of electric power equipment, especially as a countermeasure for aging equipment. For this purpose, the development of diagnostic methods of aging, remaining life, and faults is necessary. Furthermore, it is important to accumulate case studies applying such diagnostic methods to real equipment and the benefit of the applications of the diagnostic methods. In this report, frequency response analysis (FRA) and a partial discharge measurement are applied to a shunt reactor suspected of occurrence of partial discharge. Results of both the diagnostic method suggest that breakage of the earth bar connecting the iron-core brock and the partial discharge occurs at the iron core. Based on this diagnostic result, the shunt-reactor owner decided to postpone the replacement by two years compared with the case without applying any diagnostic methods. In this report, the benefit of the decided postponement is also evaluated.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

*²グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

*³グリッドイノベーション研究本部 研究統括室 兼 ファシリティ技術研究部門 副研究参事 分野統括

背景

電力流通設備の高経年化を背景に、設備の合理的な維持・更新計画策定手法へのニーズが国内外で高まっている。欧米を中心に先行している、設備のリスク・コスト評価に基づくいわゆる「アセットマネジメント技術」^{注1)}が注目されている。我が国の送配電事業でも実務への導入が志向されており、当所ではそれを支援するアセットマネジメント技術として、変圧器や遮断器等の設備群を対象に現場適用性の高い技術の開発を進めてきた[1]。アセットマネジメントをより実効的なものとするためには、設備個々に対する劣化状態や異常事象の外部診断結果に基づく評価が有効と考えられるが、その便益を定量的に示す報告例は少なく、評価事例を蓄積する必要がある。

目的

油中ガス分析で部分放電発生が疑われたシャントリアクトル (ShR-A)^{注2)}の外部診断を行い部分放電発生箇所^{注3)}を同定する。更に、アセットマネジメント評価の例として、それに基づき事業者が策定した運用方針における外部診断の便益を定量的に示す。

主な成果

1. シャントリアクトルの外部診断

(1) 周波数応答解析 (FRA) による診断 ShR-A に FRA^{注4)}を適用した結果、U-W 相間伝達関数の 12kHz 付近の共振周波数の変化が確認された (図 1)。この共振周波数の変化様相は、鉄心コアブロックの接地片が破断した同一設計器の事例[2]と同様であり、当該シャントリアクトルでも鉄心コアブロックの接地片が破断していると診断された。

(2) 部分放電測定による診断 現地で ShR-A の部分放電測定を行った結果、運転開始直後に特徴的な笠状の部分放電パターン^{注5)}が測定された (図 2)。鉄心コアブロック接地片の破断を模擬した電極系でも同様の部分放電パターンが測定されたことから、ShR-A でも鉄心コアブロックの接地片が破断し、そこで部分放電が発生していると診断された。

2. 外部診断に基づく運転方針の決定とその便益評価

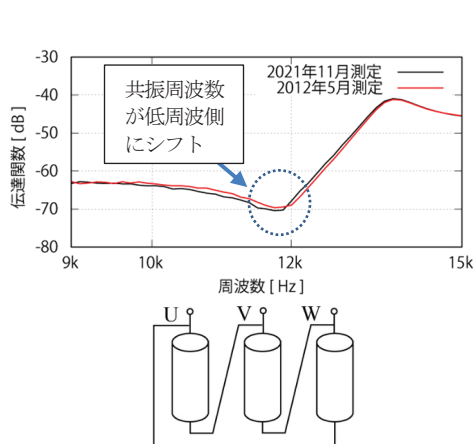
ShR-A を運用する事業者は、想定する今後の運用方針 (表 1) の中から、外部診断結果に基づきシナリオ 2 を選択した。すなわち、外部診断実施により、実施しなかった場合 (シナリオ 1) に比べ 2 年間更新時期を延伸できたこととなる。この更新時期延伸による便益を、先送りして支出する更新費用の現在価値から定量的に示した^{注6)} (図 3)。

関連報告書：

[1]H20013 「階層別アセットマネジメント支援技術の開発 ―変電機器用支援プログラム開発とその適用法―」(2021.09)

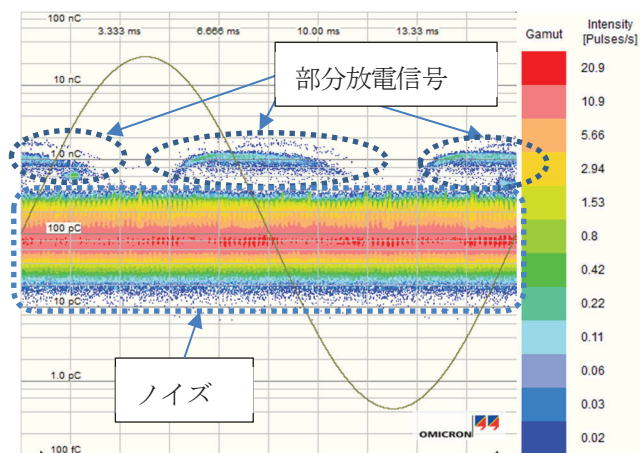
[2]H14010 「周波数応答解析 (FRA) による変圧器巻線異常判定基準の提案」(2015.05)

- 注1) ISO55000シリーズでは、組織全体または部署横断で全体最適化を志向する Asset Management と、対象設備ごとまたは細分化された部署ごとに最適化を志向する Managing Asset を区別しているが、通常日本語では両者ともアセットマネジメントと称される。本報告でいうアセットマネジメントは、後者を指す。
- 注2) 一般送配電事業者が運用中の定格容量 20,000kVA、定格電圧 66kV、経年 44 年のシャントリアクトル。鉄心脚は円柱状のコアブロックを絶縁物で挟んで積み重ねた構造であり、コアブロック間が接地片で接続されている。
- 注3) 部分放電発生箇所が巻線部の場合、部分放電により絶縁紙が炭化して絶縁耐力が低下し、短絡・地絡故障に移行する危険性が高く緊急の対応が必要だが、鉄心部であればその危険性は低いと考えられる。
- 注4) FRA では変圧器巻線のある端子に電圧源を接続し、他端子との電圧比を広い周波数帯で測定して伝達関数とする。変圧器が健全時に測定しておいた過去データと比較した変化の有無から巻線異常を診断する。
- 注5) 交流電圧下で発生する部分放電は、発生箇所に介在する絶縁物および導体の種類や形状によって特徴的な部分放電パターン（部分放電の発生数とその放電電荷量の位相特性）を示すことが知られている。
- 注6) シャントリアクトルの更新費用を 100（正規化値）、期待寿命 47 年（劣化状況から経年 47 年での取替を計画していた）とし、年間利率をパラメータとして評価した。



U-W 相間の測定は W 相巻線の両端での測定となり W 相の異常が疑われる

図1 U-W 相間の伝達関数測定結果



横軸は位相、縦軸は放電電荷量、色は放電の頻度を示す。

図2 高周波接地線 CT による部分放電測定結果

表1 外部診断結果に応じたシャントリアクトルの更新シナリオ（計算条件）

シナリオ	状況	更新時期
1	外部診断を行わない、行っても部分放電発生箇所を同定できない、または巻線部と同定された場合。	2021年更新 (即座に運転停止する場合)
2	外部診断を行った結果、部分放電発生箇所が鉄心部と同定された場合。	2023年更新 (シナリオ1に比べ2年の更新時期延伸)
3	部分放電が発生していなかった場合	2024年更新（当初計画） (シナリオ1に比べ3年の更新時期延伸)

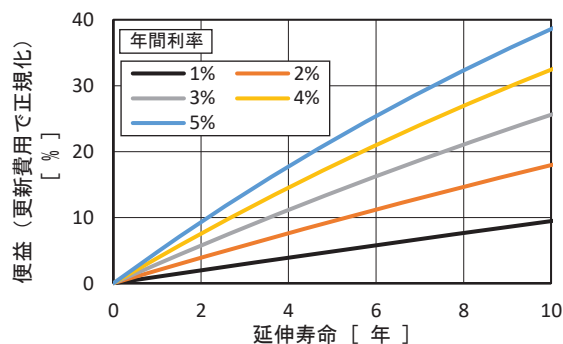


図3 更新時期延伸による便益の評価結果

長寿命設備を想定した運用実績に基づく 故障統計解析手法の検討

高橋 紹大*¹

キーワード：アセットマネジメント
リスク評価
故障率
ハザード解析
運用実績

Key Words : Asset management
Risk analysis
Failure rate
Hazard analysis
Operation data

Study of statistical failure analysis for long life equipment based on operation data

Tsuguhiro Takahashi

Abstract

In developed countries, to operate and maintain aged power equipment are very important issue, and rational measures by utilizing the asset management techniques are being pursued. In Japan, the Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operator (OCCTO) has introduced an evaluation method of renewal planning based on risk analysis. In order to carry out such a risk analysis, it is necessary to accurately estimate the failure rate of the equipment to be evaluated. One of the methods to understand the aging characteristics is the statistical analysis of equipment operation data such as failures and operating results, but there are some points to be considered when applying this method to equipment that can be operated for a long period, has a wide age distribution, and is expected to have high reliability with preventive maintenance. This report presents the procedure of statistical analysis by using simulated data of operation results with wide age distribution, and the points to be considered when carry out this analysis. In addition, examples of failure rate evaluation that takes into account the results of preventive renewals are presented.

*¹グリッドイノベーション研究本部 研究統括室 兼 ファシリティ技術研究部門 副研究参事 分野統括

背景

先進諸国において電力流通設備の高経年化対策は重要課題であり、アセットマネジメント技術導入による合理的な対応が志向されている。日本でも 2023 年度からの託送料金制度見直しに合わせ、電力広域的運営推進機関（OCCTO）により「高経年化設備更新ガイドライン」[1]が策定され、リスク評価に基づく更新物量算定手法が導入されるが、このような「リスク評価」を行うためには対象設備の故障率を精度よく推定する必要がある。その経年特性を把握する方法の一つに故障や稼働実績といった設備運用データの統計解析がある。ただし、解析対象には、長期間の運用が可能で幅広い設備量経年分布を持ち、高信頼度かつ予防保全を前提とするという特徴があるため、故障統計解析を実施する上での留意点を明確化しておく必要がある。

目的

幅広い経年分布の設備群を仮定し、運用実績シミュレーションデータをサンプルとした故障率推定を実施する。また事故・更新実績調査事例を用いて予防保全的更新実績を加味した推定例を示す。以上を踏まえて解析実施上の留意点を明確にする。

主な成果

1. 運用実績シミュレーションデータによる故障率推定

図1の設備量経年分布を仮定した設備を5年間運用した場合の故障発生を乱数により模擬し、その結果から故障特性をハザード解析^{注1)}により求めた。図2にシミュレーション時に設定した故障率の「真値」と、5回分のシミュレーション結果から求めた「推定値」を示す。推定値はシミュレーション実施のたびに真値の周りにばらつく。真値に近い推定値を得るためには適切に調査された運用実績データ^{注2)}を増やしてばらつきを抑えるよりほかに、長期間にわたるデータ蓄積が不可欠である。

2. 事故・更新実績調査を活用した故障特性推定例

過去に実施された調査事例^{注3)}を用い、事故実績と更新実績を合算^{注4)}して故障特性の推定を行った。特高・高圧ケーブルに対する推定結果を図3に示す。例えば経年30年時点では更新実績を考慮した場合の故障率は考慮しない場合の約26倍となるなど、影響が大きいため更新実績・理由の調査、合算は必須と考えられる。

以上を踏まえ、運用実績データに基づく統計解析を行う上での必須調査内容と留意点を表1にまとめる。

注1) 耐久試験等での故障データから故障特性を統計解析し、ワイブル分布関数に当てはめる解析手法で、試験途中での打ち切を含むデータに対応する手法として知られる。

注2) 調査実施年度における1年単位での設備量経年分布と故障発生経年分布は必須。その他、表1を参照。

注3) 「関東東北産業保安監督部管内電気主任技術者会」にて2008年度に加盟する約200社に対して実施された10年分の設備事故・更新実態調査[2]。

注4) 予防保全的更新は経年劣化に伴う故障の顕在化を抑え、高経年設備の事故を減らすため、事故実績のみに基づく故障特性評価は過小評価となる。ここでは更新された設備は一律5年後に故障に至るものであったと仮定、更新経年+5年を擬似的に故障発生経年とみなし、事故実績と合算した。更新判断から実際に故障するまでの猶予として見積もる期間は更新理由の調査や設備特性から個別検討することが望ましい。

- [1] OCCTO, 高経年化設備更新ガイドラインの策定および公表について,
https://www.occto.or.jp/koukikeitou/guidelines/20211217_guideline.html, (参照 2022-01-06)
- [2] 「絶縁診断に基づく電力機器のアセットマネジメント」, 電気学会技術報告 No. 1243 (2012)

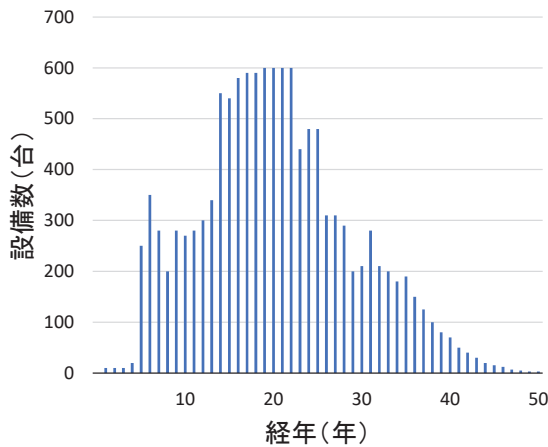


図1 仮想設備量経年分布 (計 12340 台)

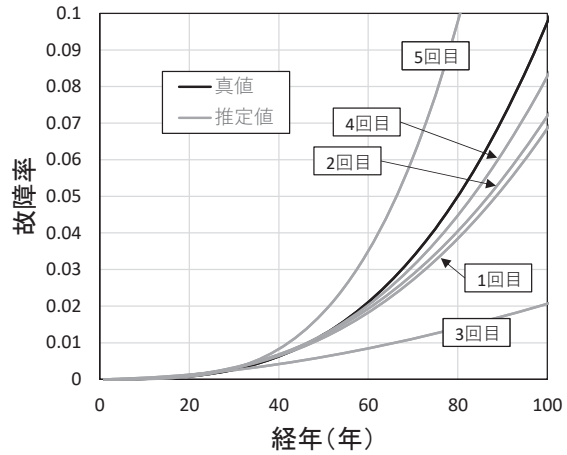
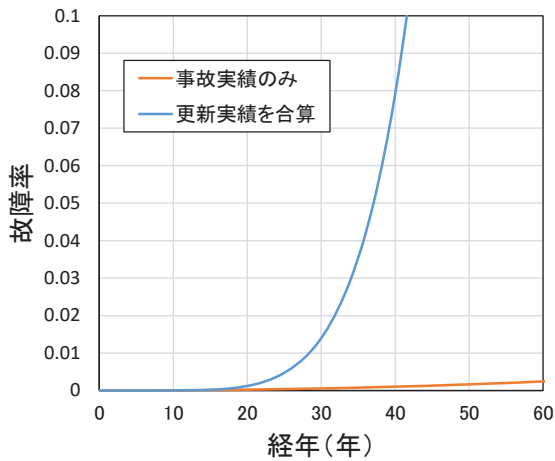
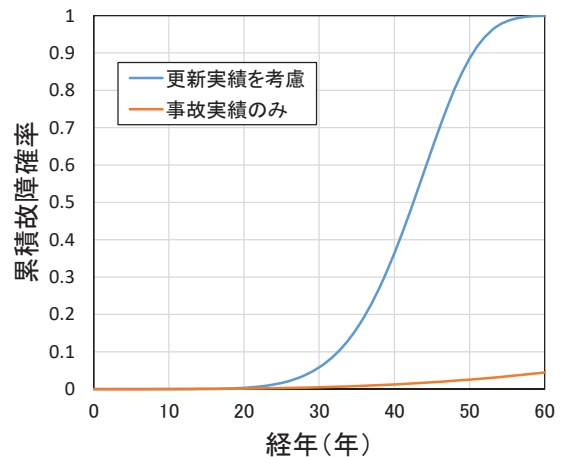


図2 推定故障率と真値の比較



(a) 故障率



(b) 累積故障確率

図3 特高・高圧ケーブルの事故・更新実績に基づく故障特性推定結果

表1 故障統計解析に用いる運用実績データに関する必須調査内容と留意点

調査項目	必須調査内容	調査上の留意点
設備稼働実績	故障せずに稼働した設備の設備量経年分布	<ul style="list-style-type: none"> ・解析精度のため1年単位での経年分布が必要 ・観測期間*中、毎年のデータが必要
故障実績	故障した設備数の経年分布	<ul style="list-style-type: none"> ・高信頼度(低故障率)の設備では故障数が少なく、故障率推定精度の低下要因となるため、長期間にわたる調査が必要 ・故障対応方策検討のため、要更新か、修繕対応可能かを区別できる故障種別情報が必要 ・修繕対応検討のためには故障部位情報も有用
更新実績	更新した設備数の経年分布	<ul style="list-style-type: none"> ※予防保全的更新実績を合算しなければ顕在化しなかった故障を無視した過小評価となる ・更新実績を適切に合算するために個々の実績ごとに更新判断を下した理由が必要

*ここで言う「観測期間」は運用実績を調査できる期間のことで、その間は上記要調査項目すべての情報が必要

テレコン用の従来通信方式と IEC 61850 間の 変換を担う通信アダプタの開発

パウデル サロジュ^{*1} 瀬戸 好弘^{*2} 大谷 哲夫^{*3}
山口 亮^{*4} 山本 勝也^{*4}

キーワード : IEC 61850

テレコン
保護制御システム
HDLC
CDT

Key Words : IEC 61850

Telecontrol
Protection and control system
HDLC
CDT

Development of Communication Adapter for IEC 61850 and Legacy Communication Systems used in Telecontrol

Saroj Paudel, Yoshihiro Seto, Tetsuo Otani,
Ryo Yamaguchi and Katsuya Yamamoto

Abstract

IEC 61850-based systems for substations support interoperability and increase reliability and flexibility. In addition, it may lead to reduction in wiring and engineering time thereby improving set-up and maintenance process and reducing cost. However, one of the major challenges is the communications with the control centers employing legacy communication technologies that are based on protocols such as HDLC (High-level Data Link Control) or CDT (Cyclic Data Transmission). These systems cannot be replaced by IEC 61850-based system all at once. A communication adapter is thus required to communicate between these legacy communication systems and IEC 61850-based system during the transition period. Use of such communication adapter supports and accelerates the transition to IEC 61850-based systems. This report proposes a basic design of such communication adapter consisting of a common module that performs majority of protocol conversion tasks and a custom module that primarily performs the modulating and demodulating of payload information specific to each legacy communication protocol. Consideration is given to maximize the tasks in the common module while minimizing those in the custom module by defining intermediate communication services and mapping definition files.

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員
^{*2}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 客員研究員
^{*3}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 副研究参事
^{*4}通研電気工業株式会社

背景

発電所において IEC 61850 に基づく保護制御システムの導入が進むと、IEC 61850 に互換性のない従来の通信方式¹⁾を利用するテレコンとの接続が必要となり、データ形式等の変換のために通信アダプタが必要不可欠となる。従来の通信方式は、事業者ごとに仕様が異なる。そのため、仕様の数だけ通信アダプタの開発が求められる恐れがある。この問題を回避するため、異なる従来の通信方式に対応できるような通信アダプタの変換機能を設計する必要がある。

目的

異なる従来の通信方式と IEC 61850 との通信アダプタ（以下、61850 アダプタ）の変換機能を設計する。さらに、設計に基づいて 61850 アダプタを試作し、その変換機能を評価する。

主な成果

1. 61850 アダプタにおける変換機能の設計

異なる従来の通信方式に対応するため、通信プロトコル・情報形式・伝送項目などの調査を行い、IEC 61850 との変換における共通的な変換処理と固有の変換処理を整理した。これを基に 61850 アダプタは、i) 従来の通信方式を使用する制御所親局との通信及び各社固有の変換処理を行う「既設機器通信部」と、ii) IEC 61850 に対応した変電所構内テレコン子局との通信及び共通的な変換処理を行う「61850 機器通信部」の二つに機能分離する構成とした（図 1）。

これらの通信部間の情報交換のために「中間通信サービス²⁾」を利用する方法を採用した。加えて、従来の通信方式における伝送項目と IEC 61850 の情報モデルを対応させた「マッピング定義³⁾」をデータとして読み込む。中間通信サービスを用いることにより詳細仕様の違いを吸収できる。また、61850 機器通信部でマッピング定義を用いることで同一内容の処理を共通化し、既設機器通信部を効率よく開発できる。

2. 61850 アダプタの試作による変換機能の評価

ある事業者の HDLC テレコン仕様と CDT テレコン仕様を対象に 61850 アダプタを試作し、図 2 に示す試験システムで変換機能の評価を行った。HDLC 及び CDT 方式に対する状態表示、計測表示、および選択制御における通信メッセージ等を適切に変換できることを確認した。共通的な変換処理を担う 61850 機器通信部に着目すると、状態値や計測値の変換を 5 ms 以下（図 3）、選択指令の変換を 50 ms 以下、制御指令の変換を 300 ms 以下で実行できることを明らかにした。現状のテレコン親局と子局間の通信遅延時間の一例としては、状態値で最大 4 秒、計測値で最大 12 秒⁴⁾であり、61850 アダプタは十分対応

できると考えられる。

- 注1) 従来の通信方式の代表的なものとしては、CDT (Cyclic Digital data Transmission), HDLC (High level Data Link Control), PMCN (Protocol for Mission Critical Network use) である。
- 2) 中間通信サービスは、従来通信方式における情報の種別と IEC 61850 通信サービスとの対応付けするための中間情報のことを指す。中間通信サービスの仕様の明確化及び TCP/IP を用いた実装により、61850 機器通信部と既設機器通信部において、異なるメーカー製品間の相互運用を可能とする。
- 3) 従来通信方式におけるポジション、制御値、及び状態値それぞれに対し、IEC 61850 における情報モデル、制御値、及び状態値との対応付けを柔軟に行うために外部から提供するデータのことを指す。
- 4) 「IP 対応型 CDT 装置の開発、技術開発ニュース No. 122, 2006」では、系統運用情報伝送システムにおける伝送遅延時間は状態値 (SV) で最大 4 秒、計測値 (TM) で最大 12 秒と示されている。

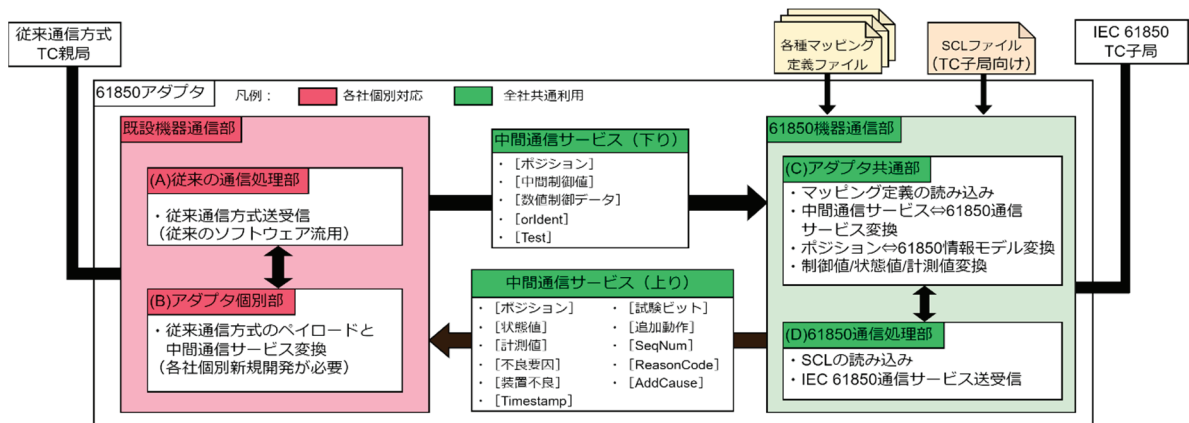
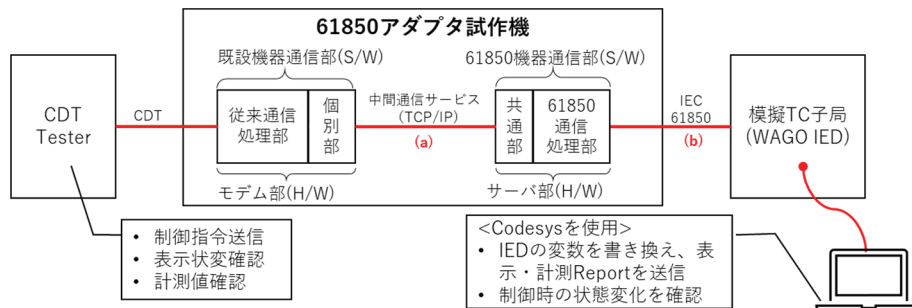


図 1 61850 アダプタのシステム構成



サーバ部：Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC 1.5 GHz
 IED: WAGO PFC200 Controller 750-8212/025-001
 (a)~(b)の測定箇所における通信パケットのTimestampを取得しその時間差を61850機器通信部の処理時間とする

図 2 61850 アダプタ試作機における動作確認試験構成 (CDT 試作機)

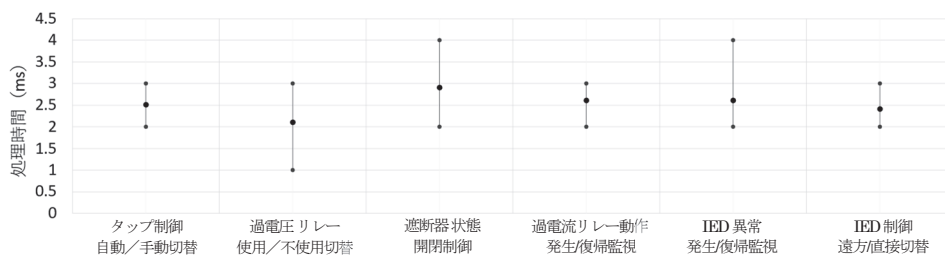


図 3 61850 機器通信部における状態値変換時間 (最小値, 最大値, 平均値)

VSTL REVに基づく発電所低圧制御回路の サージ解析技術の開発（その2） －金属シース付制御線のモデル化手法の開発と その制御線誘導サージ解析への適用－

立松 明芳*¹ 山中 章文*²

キーワード：FDTD 法
雷サージ解析
制御線
低圧制御回路
接地網

Key Words : FDTD method
Lightning surge analysis
Control cables
Low-voltage control circuits
Grounding grid

Development of techniques for surge analysis of low-voltage control circuits in power plants and substations based on VSTL REV (Part 2) - Development of a technique for representing shielded control cables and its application to the analysis of surges induced on control cables -

Akiyoshi Tatematsu and Akifumi Yamanaka

Abstract

Digital control equipment including sensitive electronic devices are commonly installed in secondary circuits in substations and power plants. Electromagnetic disturbances can be induced in secondary circuits, for example, by lightning. To properly protect control circuits from such electromagnetic transients, it is useful to predict electromagnetic transient phenomena through numerical simulations. Nowadays, the finite-difference time-domain (FDTD) method has become a very powerful tool for analyzing electromagnetic transient phenomena in three-dimensional structures and grounding systems.

In this study, first, we propose a technique for representing shielded control cables, which are used as countermeasure against electromagnetic disturbances in secondary circuits, for FDTD-based surge simulations, and confirm its validity through comparison with measured results. Secondly, using the proposed technique, we simulate a shielded control cable placed over a grounding structure, and by injecting a lightning impulse current into the grounding structure, we calculate currents flowing through the grounding structure, ground potential rises of the grounding structures, and voltages induced on the shielded control cable, and compare the calculated results with measured waveforms for validation.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

*2 グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 研究員

背景

発電所の低圧制御回路において、雷サージなどに起因して障害が発生し、供給支障に至ることが懸念されている。当該回路の適切なサージ・イミュニティ対策を確立するために、これまで、サージ現象の実験的な評価とともに、サージ・過渡電磁界現象解析プログラム VSTL REV^{注1)}を用いることで、接地網を含む誘導サージ現象の高精度な解析が可能であることを明らかにした²⁾。また、VSTL REV を低圧制御回路のサージ現象の解析に適用するために、保護継電装置や計器用変成器の模擬手法を開発した。さらに、VSTL REV を用い、変電所へ侵入する雷に起因して、主回路や接地網を伝搬するサージによる制御線誘導電圧の解析を行ってきた³⁾、⁴⁾、^{注2)}。しかし、これらの解析では、低圧制御回路のサージ対策として用いられる金属シース付制御線の効果は検討されていない。

目的

VSTL REV に基づく雷サージ解析のための金属シース付制御線のモデル化手法を開発する。さらに、接地構造物に侵入した雷インパルス電流によって制御線に誘導される電圧を VSTL REV を用いて計算し、実測結果との比較によりその妥当性を検証する。

主な成果

1. 金属シース付制御線のモデル化手法の開発

VSTL REV を低圧制御回路の雷サージ解析に適用するため、FDTD 法に基づくサージ解析のための、金属シース付制御線のモデル化手法を開発した。本モデルでは、制御線の金属シースは FDTD 法の細線導体で模擬し、金属シースを伝搬する電流によって制御線内の心線に生じる誘導電圧・電流は、金属シースー心線間の表面伝達インピーダンスの影響を考慮した伝送方程式を解くことによって求める (図 1)。

2. VSTL REV の低圧制御回路の雷サージ解析への適用

金属シース付制御線 (金属シースは両端で接地) を用いて低圧制御回路の実験回路 (計器用変流器 (CT) - 制御線 - デジタル型保護継電装置) を構築し、上記のモデル化手法を実装した VSTL REV において金属シース付制御線を有する実験回路を模擬した。次に、接地構造物に雷インパルス電流を注入した際の、接地構造物の過渡電位上昇、制御線の金属シースを伝搬する電流、制御線に誘導される電圧を計算した (図 2)。この結果、VSTL REV による計算波形は、実験回路における実測波形と良好に一致しており、本モデル化手法の妥当性を確認した。これにより、VSTL REV に基づくサージ解析において、両端接地された金属シースによる誘導電圧の低減効果の評価を可能とした。

注1) Virtual Surge Test Lab. Restructured and Extended Version の略で、数値電磁界計算手法 (FDTD 法) に基づく解析ツール。

注2) A. Tatematsu, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "Three-dimensional FDTD-based simulation of induced surges in secondary circuits owing to primary-circuit surges in substations," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 63, no. 4, pp. 1078-1089, 2021.

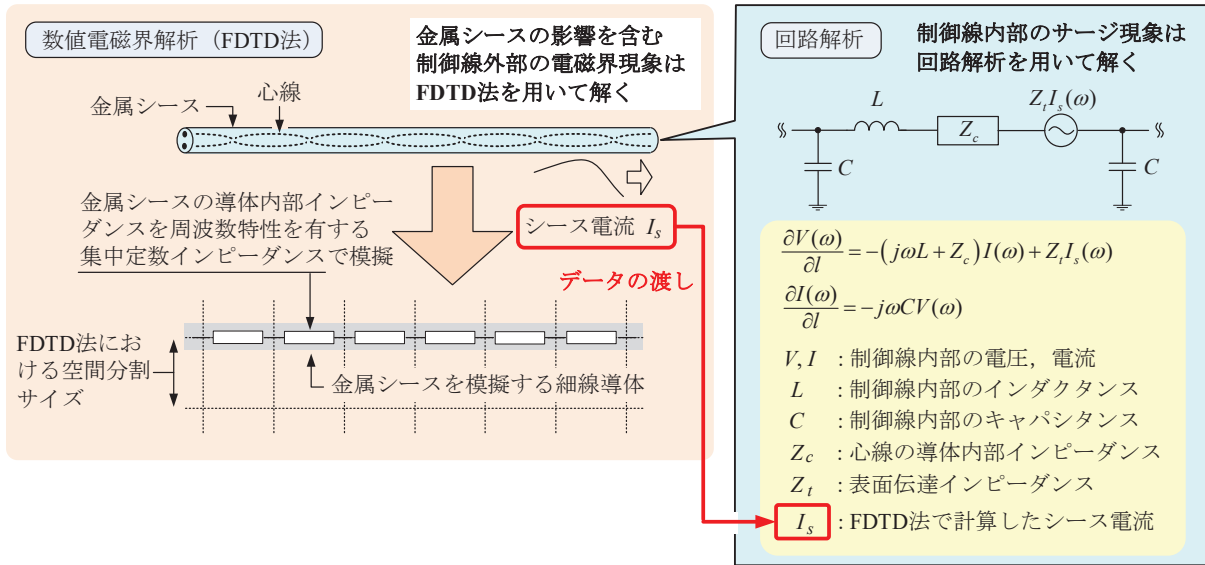


図1 数値電磁界解析 (FDTD法) と回路解析に基づく金属シース付制御線のモデル化手法

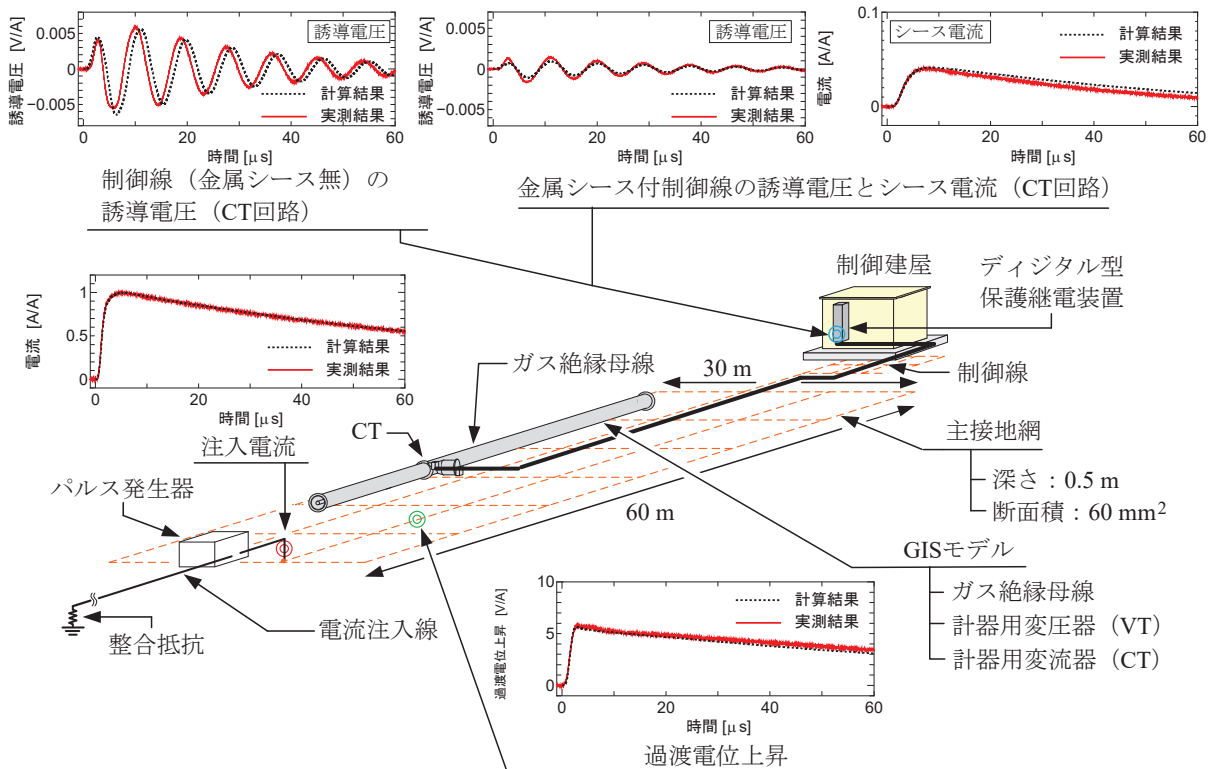


図2 VSTL REV に基づく低圧制御回路の雷サージ解析

(比較のため、金属シースがない制御線を用いた場合の誘導電圧の計算結果と実測結果も左上に示す。)

関連報告書:

- [1] H17005 「サージ・過渡電磁界現象解析プログラム VSTL REV の開発 - FDTD 法に基づく VSTL REV の開発と電力主要設備の雷・開閉サージ解析への適用 -」 (2018.04)
- [2] H08004 「低圧制御回路の雷サージ特性 - その 2 - 制御線誘導サージ電圧計算への VSTL の適用 -」 (2009.05)
- [3] H19008 「VSTL REV に基づく発変電所低圧制御回路のサージ解析技術の開発 - 保護継電装置・計器用変成器のモデル化手法の開発とその制御線誘導サージ解析への適用 -」 (2020.05)
- [4] H20012 「接地網に侵入した雷インパルス電流による低圧制御回路への誘導電圧特性 - 制御線布設経路の影響の実験的・解析的評価 -」 (2021.08)

レーザ誘起ブレイクダウン分光法を用いた ナノコンポジット絶縁材料中のナノフィラー分布評価法の開発 —実規模試料に適用可能な評価法の提案—

三坂 英樹*¹ 江藤 修三*¹ 足立 和郎*²

キーワード：ナノコンポジット絶縁材料 Key Words : Polymer nanocomposite dielectrics
ナノフィラー Nanofiller
フィラー分布評価 Evaluation of filler distribution
LIBS Laser-induced breakdown spectroscopy
実規模試料 Full-scale sample

Development of evaluation method for the nanofiller distribution in polymer composite dielectrics using laser-induced breakdown spectroscopy - Proposal of an evaluation method applicable to full-scale samples -

Hideki Misaka, Shuzo Eto, and Kazuo Adachi

Abstract

Polymer nanocomposite dielectrics, in which nanofillers are added to the resin, are being applied to various electric power equipment because of their improved insulation performance and other functionalities. The uniform distribution of nanofillers in the polymer nanocomposite is important to achieve the high functionality. To evaluate the distribution of nanofillers, scanning electron microscopy (SEM) has been widely used. However, the evaluation results of nanofiller distribution by SEM images do not necessarily represent the distribution trend of the entire bulk sample. Therefore, a new nanofiller evaluation method has been proposed for the evaluation of the entire bulk sample, and its applicability as an evaluation method is confirmed using polymer nanocomposite dielectric sample. Conventional methods for evaluating the distribution of nanofillers have applied analytical methods with high spatial resolution and to evaluate the distribution of individual filler particles by using images. The proposed method is to evaluate the total amount of nanofiller particles contained in a fixed volume as the concentration. LIBS is expected to be an analytical method for estimating the concentration of nanofiller particles as peak intensity. LIBS was applied to nanocomposite materials containing alumina nanoparticles and was found to have sufficient detection sensitivity. The deviation of the peak intensity ratio was used to estimate the variation of the nanofiller distribution, and it was estimated that the variation of the nanofiller distribution in the bulk sample was small and uniform.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

*²グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員

背景

樹脂中にナノフィラーを添加したナノコンポジット絶縁材料^{注1)}は、絶縁性能を含む各種機能が向上・発現することから、超高压直流 CV ケーブルにおいて実用化され、現在も様々な電力機器への適用が進められている^[1]。ナノコンポジット絶縁材料の機能性発現には、材料中のナノフィラーが均一に分布している点が重要であり、走査電子顕微鏡 (SEM) による観察が多用されてきた。SEM による評価は、材料中の局所的なナノフィラーの分布と分散^{注2)}を把握できるが、各種前処理^{注3)}が必要となることから、バルク試料^{注4)}の全体を対象とすることは困難である。そのため、SEM による評価法と互いに補完し合うことのできる、バルク試料全体を対象とした評価法が求められている。

目的

製品サイズを想定したナノコンポジット絶縁材料にも適用可能なナノフィラー分布評価法を提案するとともに、その評価手法のバルク試料への適用性を確認する。

主な成果

1. ナノフィラー分布評価法の提案

ナノフィラー分布評価法を検討する上で、表面や微小部に対する各種分析法を比較した (表 1)。既存の評価法 (SEM や TEM など) は、平面分解能の高さによりナノフィラーを粒子レベルで識別することで、局所的な分布と分散を評価する手法と整理できる。これに対し、バルク試料全体を評価する手法として、一定体積中に含まれるナノフィラー粒子の総量を濃度として捉え、分布評価を行う新たな手法を提案した。この新手法では、分布評価を行った対象空間の精度と計測可能性の点から、レーザ誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS)^{注5)}が最適であることを見出した。

2. LIBS のナノフィラー分布評価法としての適用性の確認

本試験に供するバルク試料^{注6)}へ LIBS (図 1) を適用したところ、含有率 1 vol% の Al_2O_3 ナノフィラー中の Al 由来ピークが確認され、十分な検出感度をもつことを確認した。また、測定ごとのピーク強度の変動が大きいことから^{注7)}、評価指標として Al と Ti に由来するピーク (図 2) の強度比である Al/Ti 比に着目した。この Al/Ti 比について、測定箇所ごとの平均値と、全測定データ (図 3) の平均値との偏差を比較し、 Al_2O_3 ナノフィラーの分布のばらつきを推定した。その結果、Al/Ti 比の平均値のばらつきはわずかであり、ナノフィラーの推定含有率は 0.96~1.04 vol% と見積もられた (表 2)。この結果より、バルク試料中のナノフィラーの空間分布は、試料内で均一であることを推定した。

以上より、新たなナノフィラー分布評価法として LIBS を用いる手法を提案し、製品サイズの試料でも迅速かつ前処理なく評価が可能であることを明らかとした。

表 1 表面や微小部に対する分析法の比較^{注8)}

評価法の観点	局所評価				ナノフィラーの識別 ^{※1}	全体評価	
	nm	μm	mm	cm		精度 ^{※2}	計測可能性
SEM	←→	←→			○	X	X
TEM	←→				◎	△	X
X線CT		←→	←→		X	△	X
顕微マン		←→	←→		X	○	X
顕微FT-IR		←→	←→		X	X	X
μXRF		←→	←→		X	X	X
SEM-EDX		←→	←→		○	X	X
LIBS		←→			X	○	○

ナノフィラー粒子サイズ

※1 「◎」; 粒子表面状態まで識別可能, 「○」; 粒子凝集を識別可能, 「X」; 識別不可

※2 「○」; 高精度, 「△」; 深さ方向全域, 「X」; 材質や条件毎に変動

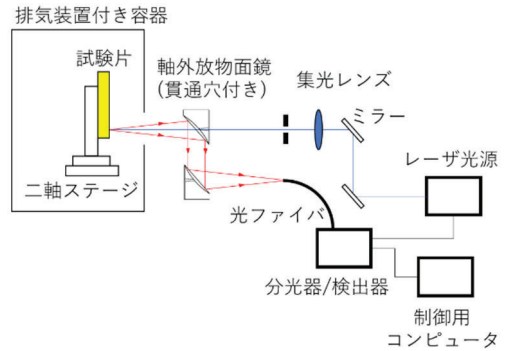


図 1 LIBS 実験系の構成

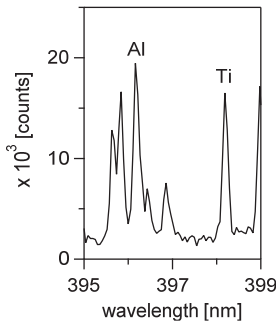


図 2 LIBS スペクトル上で着目した Al および Ti ピーク

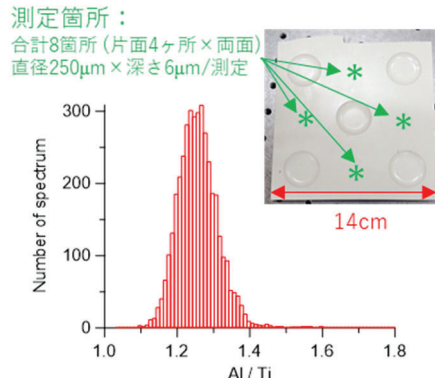


図 3 LIBS スペクトルより取得した Al/Ti 比のヒストグラム (全スペクトル 4,000 個分)

表 2 LIBS 測定により求めた Al/Ti 比と推定 Al₂O₃ 含有率

測定箇所	Al/Ti比	推定 Al ₂ O ₃ 含有率 [vol%]
1	1.26	1.00
2	1.20	0.96
3	1.24	0.99
4	1.28	1.02
5	1.22	0.97
6	1.28	1.02
7	1.31	1.04
8	1.25	1.00
平均	1.26	(1 vol %基準値)

- 注1) 数十 nm オーダーの無機粒子 (Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ など) であるナノフィラーを混入, 均一分散させることで, 電気的特性や熱的特性などを向上させた絶縁材料。
- 注2) フィラーの分布評価は, 材料中の一定体積あたりに存在するフィラー粒子数の多寡を評価するものである。一方, フィラーの分散評価は, 材料中に分布する各フィラー粒子における凝集の有無を評価するものである。本報告では, 前者を対象としており, 後者は別手段による評価が必要である。なお, 製造工程上フィラー粒子は粒径分布を持つが, 本報告では一様な粒径を持つものとみなす。
- 注3) 試料断面での評価が主となるため, 試料切断・樹脂包埋・観察面の研磨・導電化処理などの全て, あるいは複数を実施する必要がある。
- 注4) 本報告では, 製品サイズを想定した 10 cm を超えるサイズを持つ試料をバルク試料と呼称する。一例として, 60kV 級 GIS 用スペーサは直径 30 cm 程度の大きさを持つ。他方, 実験室レベルでの試料形態は数 cm 四方の板状試料などであり, 上記の各種前処理や SEM 観察が容易である。
- 注5) レーザ誘起ブレイクダウン分光法は, レーザ光を測定対象物に集光することでプラズマを発生させ, そのプラズマからの発光を分光することにより, 波長から含有元素の種類を, 発光強度からその含有量を測定する分析法である。
- 注6) 今回供試したナノコンポジット絶縁材料は, GIS スペーサ用途として開発中のエポキシ系ナノコンポジット材料であり, Al₂O₃ ナノフィラーと共に, SrTiO₃ および SiO₂ マイクロフィラーが添加されている。
- 注7) 発光強度のばらつきは, 生成されるプラズマ温度のばらつきに起因するものであるが, 本試料のようにフィラーが内包された複合材料の場合には, アブレーションされる材料の組成のばらつきが, プラズマ温度をさらに変動させる要因になると考えられる。
- 注8) SEM; 走査電子顕微鏡, TEM; 透過電子顕微鏡, X線 CT; X線コンピュータ断層撮影, μXRF; 微小部蛍光 X線分析, 顕微マン; 共焦点顕微マン分光分析, 顕微 FT-IR; 顕微赤外分光分析, SEM-EDX; 走査電子顕微鏡-エネルギー分散型 X線分析, LIBS; レーザ誘起ブレイクダウン分光分析

[1] 進化するテラレーメイドコンポジット絶縁材料に関する調査専門委員会, 電気学会技術報告第 1455 号, 2019.

電力システムの周波数安定性の維持に資する
需要側インバータの制御方法に関する基礎検討
—系統負荷の電圧・周波数に対する自己制御性を
模擬した有効電力制御—

佐藤 勇人*¹ 増田 宗紀*² 天野 博之*³

キーワード：電力システムのレジリエンス
周波数安定性
負荷特性
太陽光発電
電気自動車

Key Words : Power System Resilience
Frequency Stability
Load Characteristics
Photovoltaic
Electric Vehicle

**A Basic Study on Control Method of Demand Side Inverter to Ensure Frequency
Stability of Power Systems
- Active Power Control Method Emulating Load Characteristics Responses to variations
in Voltage and Frequency-**

Hayato Satoh, Muneki Masuda and Hiroyuki Amano

Abstract

In Japan, it is an important issue to ensure sufficient frequency control reserves for realizing decarbonization and ensuring frequency stability of power systems. Conventionally, load characteristics contribute to suppressing frequency fluctuations and voltage fluctuations in the time domain corresponding to the containment reserve and the faster domain. However, in recent years, the contribution of load characteristics is assumed to be on a declining trend. From this perspective, the use of demand-side devices has been discussed. It is recognized that the addition of frequency stabilization control function to demand-side inverters for photovoltaic, electric vehicles, etc., will be one of the effective measures.

Therefore, the authors proposed an effective power control method suitable for demand-side inverters that contribute to ensuring frequency stability. The proposed method was applied to the actual machine in CRIEPI's power system simulator, and a lab test confirmed its characteristics. In addition, the proposed method was validated through time-domain RMS simulations using the IEEJ WEST 30-machine system model. This report clarifies the effectiveness of the proposed method and discusses issues and measures to ensure control reserves using demand-side inverters.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員

*²グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 研究員

*³グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 副研究参事 研究推進マネージャー

背景

わが国では、電力系統の脱炭素化と周波数安定性維持の両立に向けて、十分な調整力の確保が課題となっている。これまで、系統負荷は自己制御性¹⁾により一次調整力²⁾とそれよりも速い時間領域（以下、対象時間領域）における周波数変動を緩和するとともに電圧変動の緩和に貢献してきたが、近年、これが減少傾向にあると想定される³⁾。このような観点から、需要側機器の活用も議論されており^{4,5)}、主として低圧に連系される電気自動車（以下、EV）や太陽光発電（以下、PV）等の需要側インバータに周波数安定性維持に資する制御機能を付加することが有効な対策の一つになると考えられている。

目的

周波数安定性維持に資する需要側インバータに適した有効電力制御方法を提案し、その効果をシミュレーションにより検証する。また、需要側インバータを活用して対象時間領域の調整力を確保していくための課題と対応について整理する。

主な成果

1. 周波数安定性維持に資する需要側インバータに適した有効電力制御方法の提案

需要側インバータの出力を電圧変動に応じて適宜調整し、周波数変動の緩和と電圧変動の緩和を両立させる制御機能として、系統負荷の電圧・周波数に対する自己制御性を模擬した有効電力制御方法⁶⁾を提案した（図1）。

2. シミュレーションによる提案制御の検証

提案制御の適用効果を、電気学会 WEST30 機系統モデルでの電源脱落を想定した Y 法シミュレーションにより検証した。その結果、充電時の EV を模擬した需要側インバータが各負荷ノードの電圧の上昇（低下）に応じて有効電力を減少（増加）させることで、系統負荷の自己制御性が向上し、電圧変動を緩和しつつ周波数の低下を抑制できることを確認した（図2）。

3. 需要側インバータを活用した対象時間領域の調整力確保における課題と対応

今後、導入拡大が見込まれる EV は、PV と比較して時間的な制約が小さく対象時間領域の調整力として随時活用できる可能性が高いと考えられる。需要側インバータを活用していくためには、表1に示す特徴を考慮するとともに、表2に示す課題への対応が重要となる。

注 1) 系統負荷とは上位系統から見た需要家機器の集合体であり、有効電力の自己制御性は、一般に下式の指数関数モデルで表現される。系統負荷の α_p 、 β_p は一般に正の値をとり、系統の電圧・周波数の低下（上昇）に対して有効電力を減少（増加）させることで電圧・周波数の低下（上昇）の緩和に貢献する。需要家機器単体として、 α_p は2程度（熱負荷等）、 β_p は6程度（誘導モータ等）までの値をとる。

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_p} \left(1 + \frac{\beta_p}{100} \Delta f \right)$$

- α_p, β_p : 有効電力の電圧特性指数・周波数特性係数, P_0, V_0 : 有効電力・電圧の初期値, Δf : 基準周波数との偏差。
- 2) 本研究では、発電機等のガバナフリー (GF) 制御の時間領域に相当する周波数調整力を、一次調整力と称す。
 - 3) 一般的にインバータ負荷の α_p, β_p は0であり、インバータ化の進行により系統負荷の α_p, β_p も0に近づいていく。
 - 4) 経産省、「カーボンニュートラルの実現に向けた検討」, 第33回総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 (2020)
 - 5) CIGRE TB 851: “Impact of High Penetration of Inverter-based Generation on System Inertia of networks”, JWG G2/C4.41 (2021)
 - 6) 電圧・周波数の単体制御はあるが、提案制御のように負荷特性を模擬したものは他にない。

順潮流のインバータ (充電時の EV)

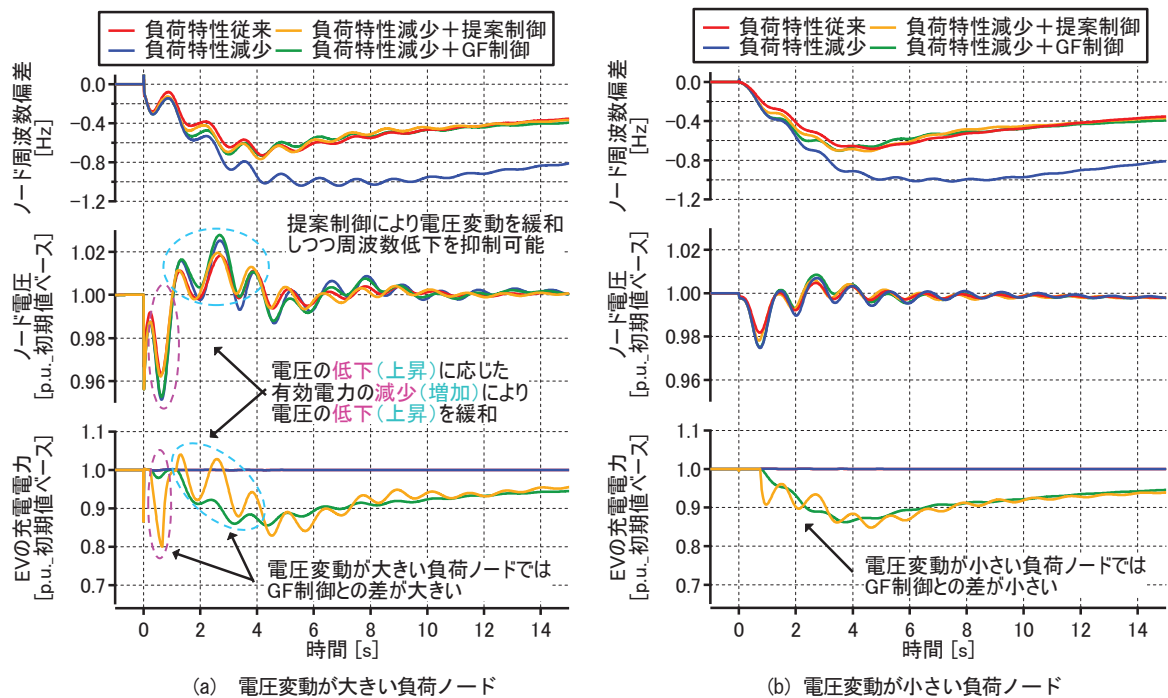
$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_{p,c}} \left(1 + \frac{\beta_{p,c}}{100} \Delta f \right)$$

逆潮流のインバータ (PV, 放電時の EV)

$$P = P_0 \left(\frac{2V_0 - V}{V_0} \right)^{\alpha_{p,c}} \left(1 - \frac{\beta_{p,c}}{100} \Delta f \right)$$

上式にしたがって出力指令値を作成する。 $\Delta f, V$ 等は自端の検出値 (不感帯を設定可能) を用いる。

図1 提案制御における需要側インバータの出力指令値の作成方法



2030年5月昼間断面 (需要: 6200万kW, PV比率53%)に2040年想定 of EV導入量 (需要比率10%)を反映し、すべてのEVに提案制御を適用。負荷特性の想定値は、①負荷特性従来ケースで ($\alpha_p=1.0, \beta_p=3.33$), ②負荷特性減少ケースで ($\alpha_p=0.5, \beta_p=1.67$)と仮定。減少した負荷特性を、③提案制御 ($\alpha_{p,c}=7.0, \beta_{p,c}=16.7$), および、④GF制御 ($\alpha_{p,c}=0, \beta_{p,c}=16.7$)で補完した場合の結果を比較。

図2 提案制御の適用効果の検証例 (最過酷の1G脱落ケース)

表1 EV・PVを活用した調整力の特徴

項目	EV	PV
活用可能な時間帯	・昼夜間問わない	・昼間のみ (出力可能な時間帯に限る。出力増加には出力抑制が必要。)
量の不確実性	・低い (充放電状況による。)	・高い (天候・系統制約等による。出力増加には出力抑制が必要。)
速応性の留意事項	・現状特になし*	・出力増加時の変化率制限 (MPPT制御に起因)**
期待される役割	・対象時間領域の調整力の底上げ	・一時的な一次調整力の上乗せ

* 1機種の実機試験では制御遅れ0.1s程度で応動することを確認。
 ** 1機種の実機試験では0.1 pu/s程度の変化率制限があることを確認。

表2 需要側インバータを活用した調整力確保における課題と対応

課題	具体的な対応
制御による系統への影響緩和	・需要側インバータの制御遅れの短縮* ・同制御遅れ等を考慮したゲイン調整
単独運転検出機能との協調	・単独運転検出性能への影響緩和*と対象時間領域の調整力確保を両立する需要側インバータのゲイン調整・制御ロジックの改良

* むだ時間が増加すると電力動揺の拡大 (持続振動・不安定化)等の影響が懸念される。
 ** 自端の電圧・周波数検出に基づく方式の場合には留意が必要となる (転送遮断方式の場合は影響なし)。

周波数変換所を活用した 50・60 Hz 系統間における 広域負荷周波数制御の提案と実現に向けた効果検証

徳光 啓太^{*1} 天野 博之^{*2}

キーワード：二次調整力①
広域運用
周波数
負荷周波数制御
シミュレーション

Key Words : Automatic frequency restoration reserve
Cross-regional cooperation
Frequency
Load frequency control
Simulation

Proposal and Effectiveness Verification of Cross-Regional Load Frequency Control between Non-Synchronous Power Systems using Frequency Converter Station

Keita Tokumitsu and Hiroyuki Amano

Abstract

In Japan, to ensure more efficient and economical operation of automatic Frequency Restoration Reserves (aFRR), cross-regional load frequency control (CRLFC) will be introduced in FY 2026, which involves the sharing and cooperation of aFRRs between control areas. The CRLFC will be performed for each synchronous system (east area power system of the 50 Hz and mid-west area power system of the 60 Hz) for the time being due to constraints of the DC interconnection system, such as frequency converter station (FC). However, The CRLFC between non-synchronous systems (NSS) can be realized by utilizing the DC interconnection systems to be expanded or replaced in the future.

In this study, we propose the CRLFC between NSSs using FC which will be expanded in FY 2027. The proposed CRLFC determines the aFRR interchange value between NSSs using two distributions to the east area power system and mid-west area power system, namely a pro-rata distribution of the net area control error (ACE) and a merit-order distribution of the net already activated aFRR. The FC controls the interchange power in accordance with the aFRR interchange value between NSSs. The simulation results show that the CRLFC between NSSs by using the FC can reduce the frequency deviation and the activation energy and activation cost of aFRRs compared to those in the CRLFC for each synchronous system.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員
*2 グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 副研究参事 研究推進マネージャー

背 景

わが国では、負荷周波数制御（LFC）で用いられる二次調整力①（二次①）について、2026年度を目途に広域運用（広域LFC）の開始が予定されている¹⁾。これまで当所では、既存直流設備の制約により、同期系統毎に広域 LFC を行う方向で制御手法の検討を進めてきた^{2,3)}。一方、将来的に増設・リプレースされる直流設備については、広域 LFC に活用できる可能性がある²⁾。

目 的

2027年度に増強予定の周波数変換所（FC）を活用した 50・60 Hz 系統間の広域 LFC 手法を提案し⁴⁾、提案手法の効果検証や技術的な留意点の整理を、わが国の広域連系システムモデル⁵⁾を活用したシミュレーションにより行う。

主な成果

1. FC を活用した 50・60 Hz 系統間における広域 LFC 手法の提案

50・60 Hz 系統間の広域 LFC は、FC の潮流を、両系統間における二次①の融通量（補正量 Z）を加味した目標値に制御することで実現する。FC の補正量 Z については、当所既提案の同期系統毎の広域 LFC 手法³⁾に基づき、以下の通り算出する（図 1）。

- 50・60 Hz 系統全体での地域要求量（AR）を、エリア毎の二次①の出力変化速度の比率で各エリアに配分する。
- 50・60 Hz 系統全体での既 LFC 動作量⁶⁾を、二次①の平均単価が優位なエリアから順に配分する。ただし、周波数品質の維持・向上のため、同配分は出力変化速度および上記の AR 配分量を考慮した範囲で行う。
- 50 Hz 系統における AR および既 LFC 動作量の配分量の合計と、同系統で発生している AR と既 LFC 動作量の合計の差分を、FC の補正量 Z として算出する⁷⁾。

2. シミュレーションによる FC を活用した広域 LFC の効果検証

50・60 Hz 系統間の広域 LFC は、同期系統毎の広域 LFC と比べて、周波数変動と二次①の発動量を概ね低減できることをシミュレーションにより明らかにした（図 2）。この要因として、50・60 Hz 系統間で逆方向に発生した AR や既 LFC 動作量を相殺できることや、両系統の応答性に優れた二次①を活用できることが考えられる。また、周波数変動と二次①発動量の低減効果を向上するためには、広域 LFC 機能が補正量 Z を送信してから FC が受信するまでの遅延時間を極力短くすることが望ましい。

注1) 「二次調整力①広域運用の検討状況について」、第 18 回需給調整市場検討小委員会 資料 5, 2020-8.

2) 「二次調整力①広域運用の現状活用案の検討状況について」、第 10 回需給調整市場検討小委員会 資料 4, 2019-3.

3) 徳光, 天野: 「周波数品質の維持・向上と二次調整力①の運用コスト低減を両立する広域 LFC 手法の提案」、電力中央研究所報告 R20002, 2021-4.

- 4) 50 Hz 系統は東北・東京，60 Hz 系統は中部・北陸・関西・中国・四国・九州を対象とした 8 エリア間の広域 LFC を指す（北海道エリアは広域 LFC の対象外）。
- 5) 徳光，天野：「全国 10 エリアの需給・周波数シミュレーションモデルの開発」，電力中央研究所報告 R18003，2019-6。
- 6) 当該時点における二次①の発動量（kW）のこと。
- 7) 60 Hz 系統向けの融通が正として算出される。なお，60 Hz 系統の各諸量から FC の補正量 Z を算出することも可能であり，その場合は 50 Hz 系統向けの融通が正となる（大きさは 50 Hz 系統の各諸量を用いて算出した場合と同一）。

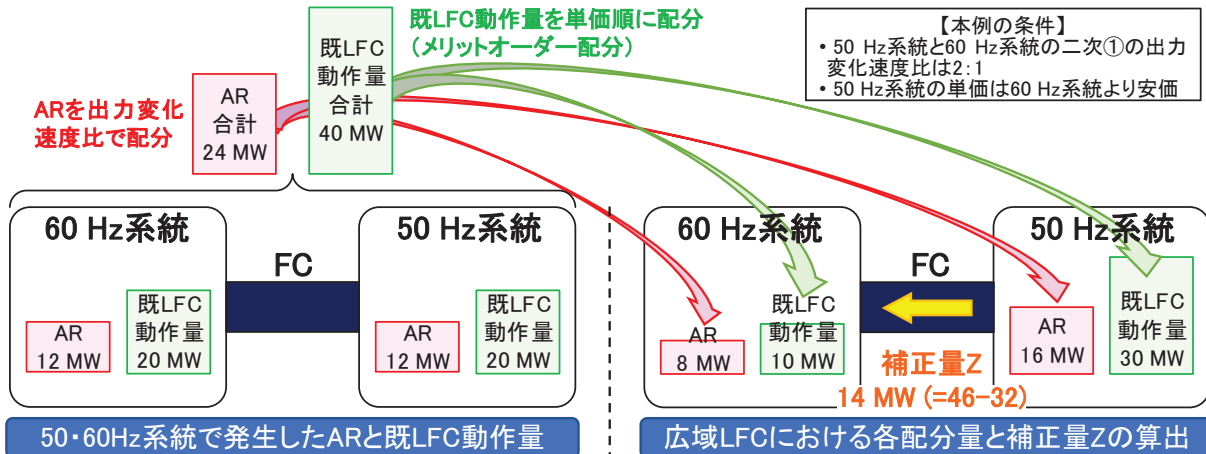


図 1 50・60 Hz 系統間における FC の補正量 Z の算出例^{*1}

*1 50 Hz 系統大の AR と既 LFC 動作量の配分量は，東北，東京への配分量の合計で，60 Hz 系統大については，中部，北陸，関西，中国，四国，九州への配分量の合計で算出（上図では簡単のため，各エリアへの配分は示していない）。

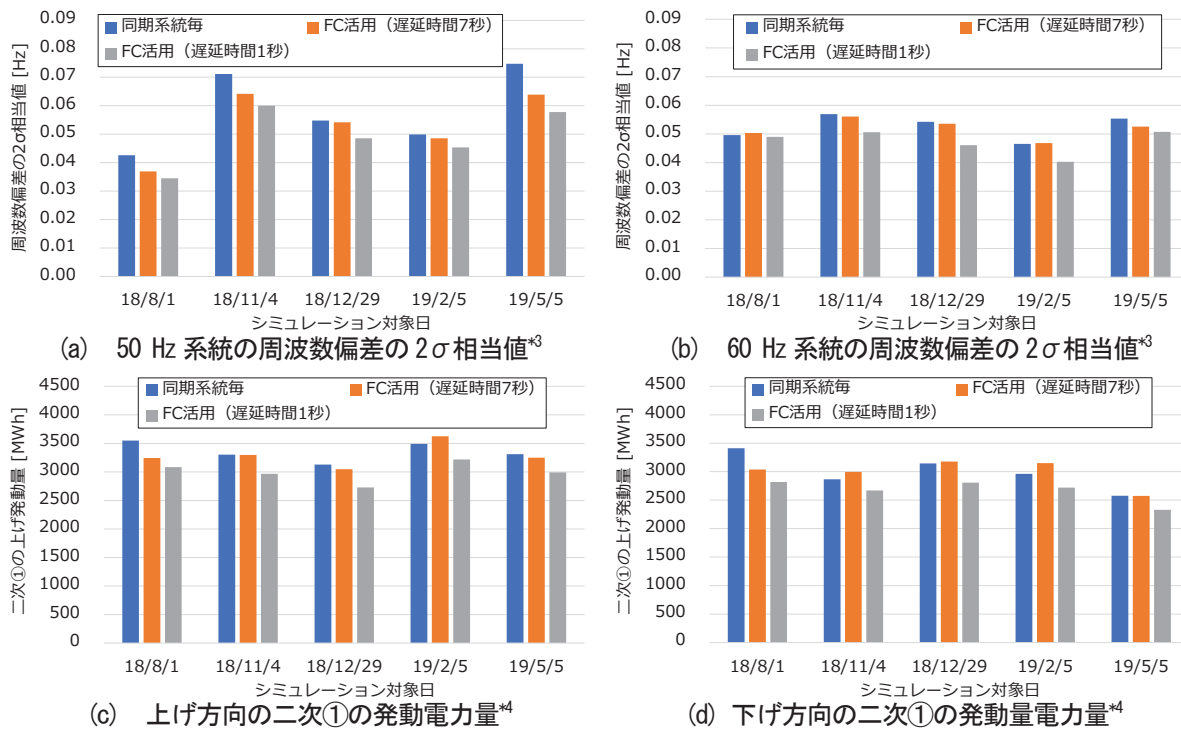


図 2 広域 LFC のシミュレーション結果^{*2}

*2 広域 LFC 機能が補正量 Z を送信してから FC が受信するまでの遅延時間を，7 秒と 1 秒の 2 ケースでシミュレーションを実施した。遅延時間 7 秒のケースでは，FC への補正量 Z の送信経路を「広域 LFC 機能→中央給電指令所（中給）→FC」と仮定し，広域 LFC 機能・中給間で 1 秒，中給・FC 間で 6 秒の遅延が生じるとした。また，遅延時間 1 秒のケースでは，FC への補正量 Z の送信経路を「広域 LFC 機能→FC」と仮定し，その間で 1 秒の遅延が生じるとした。

*3 各シミュレーション対象日（24 時間）における周波数偏差の絶対値の 95.45 パーセンタイル値。

*4 各シミュレーション対象日（24 時間）における 50・60Hz 系統合計の二次①の発動電力量。

インバータ主体系統における 単独運転検出機能の不要動作に関する基礎検討 －基幹系統で三相地絡事故が発生した場合－

白崎 圭亮*¹ 天野 博之*²

キーワード：事故時運転継続要件
太陽光発電
系統連系用インバータ
単独運転検出機能
三相地絡事故

Key Words : Fault Ride Through Requirements
Photovoltaic Generation
Grid-connected inverter
Anti-islanding Protection Relay
Three-phase Ground Fault

Fundamental Study on Unwanted Operation of Anti-islanding Protection Relay in Inverter-dominated Power System - In Case of Three-phase Ground Fault in Bulk Power System -

Keisuke Shirasaki and Hiroyuki Amano

Abstract

Anti-islanding protection relay of grid-connected inverter for photovoltaics generation (PV) is designed to satisfy frequency fluctuation tolerances as a part of Fault Ride Through (FRT) requirements regulated by the grid-interconnection code of Japan. Because anti-islanding protection relay might unnecessarily disconnect the PV under the high rate of change of frequency (RoCoF) condition, there are various considerations such as maintaining a certain level of the system inertia. On the other hand, the frequency fluctuates not only following a sudden large generation tripping, but also during three phase ground fault caused by a three-phase ground fault, as for the latter, the risk of unnecessarily disconnection due to anti-islanding protection relay has not been sufficiently considered yet. Therefore, the mechanism of frequency fluctuation during three phase ground fault is analyzed by the root-mean-square simulations and experimental validation using actual equipment in this study. As the result, it is revealed that the risk of unnecessarily disconnection due to anti-islanding protection relay is increased with decreasing voltage dip during three phase ground fault even if the system inertia is maintained.

*1 グリッドインバージョン研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員
*2 グリッドインバージョン研究本部 ネットワーク技術研究部門 副研究参事 研究推進マネージャー

背景

我が国の系統連系規程では、事故時運転継続（FRT：Fault Ride Through）要件の一部としてステップ状およびランプ状の周波数変動耐量が定められており¹⁾、PCS（Power Conditioning Subsystem）の単独運転検出機能はそれらの耐量を満足するように設計されている。この FRT 要件は、基幹系統における三相地絡事故時のシミュレーション解析²⁾等に基づき策定されたものである。一方、当時とは再生可能エネルギー（再エネ）導入拡大の見通しも変化しつつあるため、将来想定を見直したデータを用いて、単独運転検出機能の不要動作リスクを把握する必要がある。

目的

Y 法シミュレーションにより、将来的なインバータ主体系統において、現状の FRT 要件を満足する PCS の単独運転検出機能が三相地絡事故時に不要動作する可能性について検討する。また、当所の電力系統シミュレータにおいて実機 FRT 対応 PCS を用いた検証試験も併せて実施し、将来的なリスク低減に向けて必要な取り組みを提言する。

主な成果

1. 三相地絡事故時の FRT 対応 PCS の不要動作に関する Y 法シミュレーション

電気学会 WEST10 機系統モデルをベースに、2030 年を想定³⁾して再エネ比率を増加させたインバータ主体系統（図1）を作成し、三相地絡事故時における周波数を分析した。その結果、並列する同期発電機の減少などによって電圧低下が大きくなるほど、事故中の周波数偏差が拡大することを明らかとした（図2）。また、FRT 要件の周波数変動耐量を満足するように設定⁴⁾した 10 種類の Y 法用単独運転検出機能モデルの動作を分析した結果、構成パラメータ次第では、不要動作のリスクがあることを明らかとした（表1）。

2. 電力系統シミュレータにおける実機 FRT 対応 PCS の検証試験

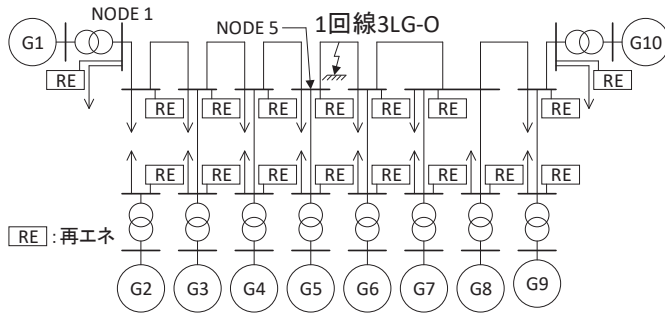
電力系統シミュレータで図3に示す試験系統を構成し、基幹系統模擬の電圧階級で三相地絡事故を発生させた。その結果、計測点（電圧階級・地点）により事故中の周波数が異なること、また、配電系統模擬の電圧階級に接続された FRT 対応 PCS が単独運転検出機能の不要動作により脱落する可能性があることを明らかとした（図4）。

以上から、同期発電機の並列容量が減少した将来系統においては FRT 対応 PCS の単独運転検出機能が地絡事故時に不要動作するおそれがあり、その見極めのため、

- ・地絡事故が発生した基幹系統と、単独運転検出機能を有する PCS が連系された配電系統の両者において時刻同期した周波数の実測値
 - ・PCS に実装されている単独運転検出機能の判定ロジックおよびパラメータ
- についての情報を収集し、実態把握に努めることが重要である。

注1) ステップ状に+0.8 Hz (50 Hz), +1.0 Hz (60 Hz) が3サイクル継続する場合, およびランプ状に±2 Hz/s がUFR/OFRに達するまで継続する場合, 運転を継続すること。

- 2) “新エネルギー技術研究開発 単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究”, 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 成果報告書 (2010)
- 3) “2050年カーボンニュートラルを見据えた2030年に向けたエネルギー政策の在り方”, 経済産業省, 資源エネルギー庁, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会, 第42回会合 (2020)
- 4) 白崎 圭亮, 天野 博之 “PV用PCSに備わる単独運転検出機能の設定値を用いた周波数変化率耐量の概算手法”, 電力中央研究所報告 R17005 (2018) に基づく設定。ただし, 低圧系統における単独運転検出時間の目標値(200 ms)を満たすかどうかについては, 追加の検討を要する。



再エネ出力: 29.4 GW 総需要: 47.25 GW
 総需要に対する再エネ出力の比率: 約 62 %
 同期発電機の並列容量: 72~36 GVA で変更
 図1 2030年を想定したインバータ主体系統

表1 FRT要件の周波数変動耐量を満足する単独運転検出機能10種の判定結果*

発電機容量\設定 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NODE 1 (事故点遠方) における判定結果**										
72 GVA (Case 1)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
60 GVA (Case 2)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
48 GVA (Case 3)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
36 GVA (Case 4)	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○
NODE 5 (事故点近傍) における判定結果**										
72 GVA (Case 1)	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○
60 GVA (Case 2)	×	×	×	○	×	×	○	○	○	○
48 GVA (Case 3)	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
36 GVA (Case 4)	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○

×: 単独運転検出機能が不要動作 ○: 動作せず

*) 三相地絡事故による周波数変動のみから判定している。

**) 設定1~10における単独運転検出機能の構成パラメータはそれぞれ異なり, 三相地絡事故に対する耐量も異なる。

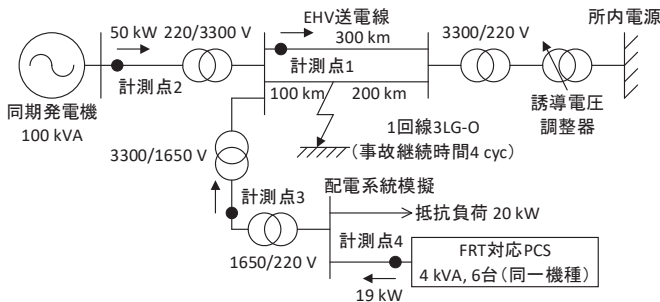


図3 電力システムシミュレータ試験系統図

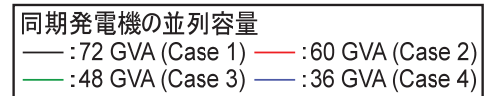
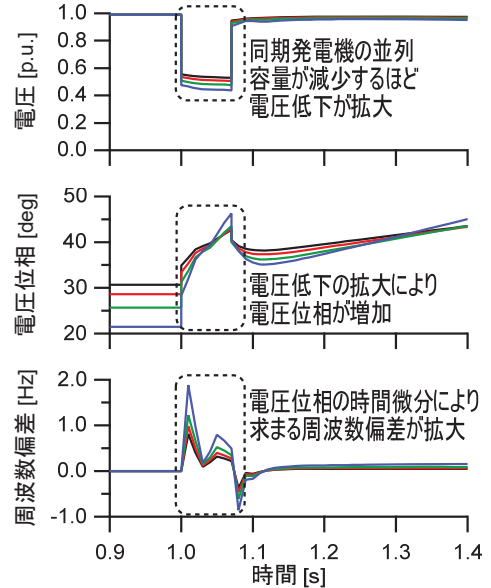
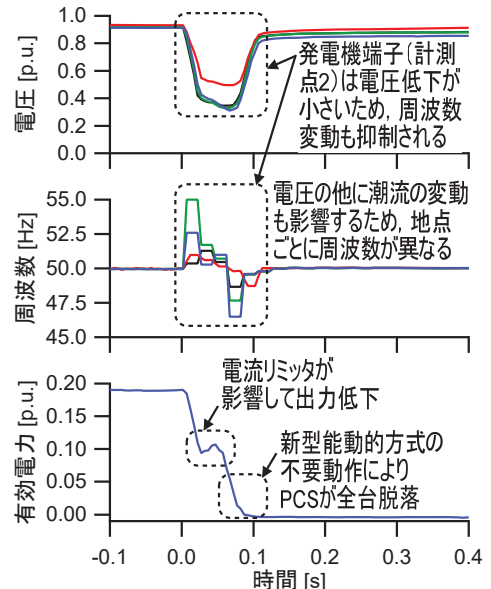


図2 三相地絡事故時の NODE 5 における電圧・電圧位相・周波数偏差



*) 周波数はAB相電圧のゼロクロス点から算算

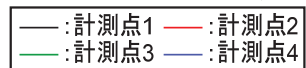


図4 三相地絡事故時における FRT 対応 PCS の脱落に関する試験結果

電力システムのレジリエンス強化に資する緊急時の周波数制御 に関する基礎検討（その3） －再エネ脱落特性を考慮した負荷遮断方式の IEC 61850 による実現方法－

上田 紀行*¹ 増田 宗紀*² 佐藤 勇人*¹

キーワード:電力システムのレジリエンス
緊急時周波数制御
周波数低下リレー
再エネ脱落
IEC 61850

Key Words:Power System Resilience
Emergency Frequency Control
Under Frequency Relay
Self-disconnection of RES
IEC 61850

A Basic Study on Emergency Frequency Control for Enhancement of Power System Resilience (Part 3) - An IEC 61850 based Load Shedding Method considering Self- disconnection Characteristics of RESs -

Noriyuki Ueda, Muneki Masuda, Hayato Satoh

Abstract

In Japan, the rate of change of frequency (ROCOF) at the time of loss of large-scale generation following disasters tends to increase by decreasing system inertia caused by large-scale integration of renewable energy sources (RESs). There is a concern that the amount of self-disconnection of RESs due to the unnecessary operation of anti-islanding protection relays for PV inverters in Japan promotes the frequency drop of the power system. Therefore, the authors developed a load shedding system prototype that adjusts ROCOF relays settings according to the estimated value of the amount of self-disconnection of RESs and maintains the power system frequency. To put this system into practical use, it is important to implement a remote setting function by IEC 61850 in the load shedding systems. This report proposes a load shedding system capable of remote setting by IEC 61850 with MMS protocol. The load shedding devices are constructed by an interchangeable merging unit and a computer. To realize remote setting by IEC 61850, the anti-islanding protection relays compliant with a Japanese Grid Code were implemented as IEC 61850 Logical Nodes (LN) in the computer. Through the evaluation of the proposed system, it was confirmed that the proposed system was possible to operate promptly after the RESs were disconnected, and the remote setting compliant with IEC 61850 was performed appropriately.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員

*²グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 研究員

背 景

再生可能エネルギー電源（以下、再エネ）の導入拡大に伴う系統慣性の低下により電源脱落時の周波数変化率が拡大することが想定される¹⁾。これにより、単独運転検出機能の不要動作に起因する再エネ脱落量が増加し、周波数低下を助長することが懸念される。当所では、再エネ脱落に応じて負荷遮断を行うことで緊急時の周波数安定化を図る制御方式（負荷遮断方式）を提案し、開発を進めている²⁾。この方式を、IEC 61850 に対応させることで、IEC 61850 適用済み変電所等への導入が容易になることが期待される。

目 的

提案する負荷遮断方式を IEC 61850 により実現する方法を提案する。また同方法に基づき負荷遮断装置を試作し、その基本的な性能を明らかにする。

主な成果

1. 再エネ脱落特性に基づく負荷遮断方式の IEC 61850 による実現方法の提案

既提案方式において再エネ脱落量と同量程度の負荷（フィーダ）を遮断するためには、負荷遮断装置が様々な再エネ脱落特性を考慮した複数の RoCoF リレーのロジックを具備し、かつ、再エネ出力・負荷等に応じたロジックと閾値の変更機能を有する必要がある。そこで、RoCoF リレーのロジックを複数の PFRC（周波数変化率リレー用の論理ノード³⁾）を用いて実装し⁴⁾、PFRC 配下の DO にロジックと閾値変更用の変数を割り当てることで、既提案方式を IEC 61850 により実現可能とした（図 1）。

2. 負荷遮断装置の試作と基本的な性能の把握

上記の方法に基づき負荷遮断装置を、変電所向けコンピュータと同等スペックの PC と Merging Unit 製品を用いて試作し、ロジックと閾値の変更にかかる時間と伝送量を明らかにした（表 1）。また、再エネ脱落後から負荷遮断装置が遮断器に接点信号を出力するまでにかかる時間⁵⁾を明らかにした（表 2）。変電所等での長期稼働を想定した場合についても、本結果と同等の性能が得られることが期待される。

注 1) 電力広域的運営推進機関「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討状況について」, 第 5 7 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 資料 3 (2021)

2) 佐藤, 上田, 増田, 天野, 「電力システムのレジリエンス強化に資する緊急時の周波数制御に関する基礎検討 (その 2) - 再エネ脱落特性を考慮した分散制御方式の実験的検証 -」, 電力中央研究所 研究報告 R20006 (2021)。本方式では、想定される再エネ脱落量と同量程度の負荷が遮断されるように、負荷側の周波数変化率 (RoCoF) リレーのロジックにおいて再エネの脱落特性 (単独運転検出機能の集合体としての特性) を考慮する。また、変電所構内で得られる情報に基づき、その時点の再エネ出力・負荷等に応じて整定を変更する。

- 3) 論理ノード (LN) は機能や主回路機器をオブジェクト指向によりモデル化したもの。LN に紐づく処理は一部を除き規格の対象外である。各機器や機能の状態、計測値、整定値等の変数を、あらかじめ用意された LN 配下のデータオブジェクト (DO) に厳密に割り当てることが要求され、DO の値のみ IEC 61850 の通信により読書きや伝送が可能である。
- 4) 再エネ脱落特性を表現する各種単独運転検出方式は、ある時間窓長における位相または周期 (周波数の逆数) 変化量の閾値演算を行っており、これらは周波数変化率の閾値演算の形に式変形可能であるため、周波数変化率の閾値演算を行う PFRC に割当て可能である。また、PFRC は一つの閾値演算のみ表現可能なため、複数種の閾値演算により表現される再エネ脱落特性は、複数個の PFRC により表現する。
- 5) 平均の制御遅れが理論性能と同等 (Sampled Values のための MU 内部処理の要求性能: 2 ms, Sampled Values と GOOSE の要求性能: 各 3ms, MU 製品のデジタル出力の処理遅延: 13 ms の合計値: 21 ms)

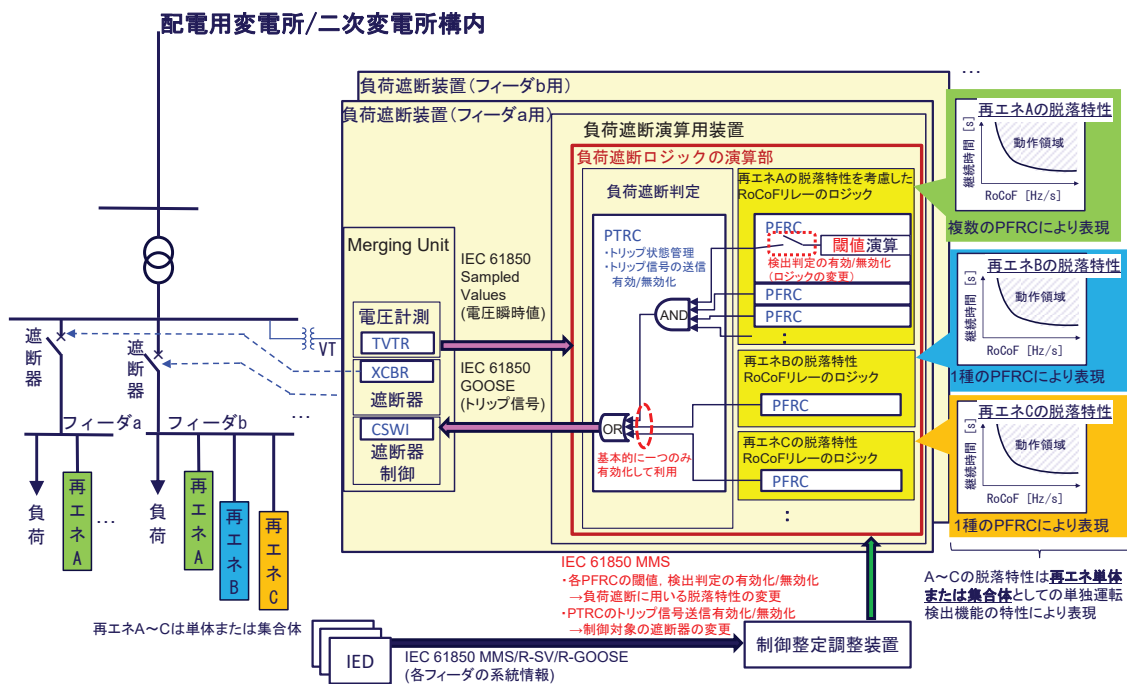


図1 再エネ脱落特性に基づく負荷遮断方式の IEC 61850 による実現方法

表1 ロジックと閾値の変更にかかる時間と伝送量 (各 30 回試行)

測定内容	通信方向*	伝送量 [bits]	所要時間 [ms]		
			平均	最小	最大
負荷遮断のロジック変更 制御整定調整装置が一つの PFRC の検出有効化/無効化に要する所要時間と伝送量 (変更後の値の返答を含む)	下り	1320	104.72	100.69	110.82
	上り	1920			
閾値の変更 制御整定調整装置が一つの PFRC の動作閾値の変更に必要な所要時間と伝送量 (変更後の値の返答を含まない)	下り	1144	0.24	0.19	0.32
	上り	664			

* 下り：制御整定調整装置から負荷遮断装置への方向，上り：負荷遮断装置から制御整定調整装置への方向

表2 負荷遮断機能の性能 (各 30 回試行)

周波数変化率 [Hz/sec]	再エネ脱落のタイミング** [ms]	平均値 [ms]	最小値 [ms]	最大値 [ms]	平均/最大の制御遅れ*** [ms]
1.5	320.0	340.5	331.3	349.6	20.5 / 29.5
2.0	240.0	263.4	254.2	275.2	23.4 / 35.2
3.0	200.0	213.0	202.2	223.5	13.0 / 23.5

** 図1に示した RoCoF リレーのロジックが考慮する再エネ単体または集合体としての脱落特性のうち、最も高感度となっている再エネBが脱落するタイミングを計算により求めた結果である。

***平均の制御遅れ = 平均値 - 再エネ脱落のタイミング，最大の制御遅れ = 最大値 - 再エネ脱落のタイミング

電源脱落時における地点毎の周波数変化率の高速概算法

会田 峻介^{*1} 天野 博之^{*2}

キーワード：周波数変化率

慣性

再生可能エネルギー

電力系統

短絡容量計算

Key Words : Rate of Change of Frequency

Inertia

Renewable Energy

Power System

Short Circuit Current Calculation

A simple method of computing the rate of change of frequency at each node in loss of generation

Shunsuke Aida and Hiroyuki Amano

Abstract

In Japan, the installation of inverter-based resources (IBR), such as solar and wind power, is expected to increase. As the number of synchronous machines decreases and the inertia decreases, the rate of change of frequency (RoCoF) becomes larger during the loss of large-scale generation. If the RoCoF becomes too large, the IBR will be disconnected from the grid, causing an even larger decrease in frequency. To analyze this, the RoCoF needs to be determined for each node of the interconnection of the IBR, and the simulation is performed using a transient stability analysis program. However, it takes a lot of time to perform the analysis under various conditions. Therefore, we propose a simple method to compute the RoCoF at each node. The method first calculates RoCoF_g for the rotor speed by using the fact that the increase in output of each generator during generator loss is proportional to the fault current of each generator during the short circuit fault. The RoCoF_n of each node is calculated by adding the RoCoF_g of each generator weighted by the reciprocal of the electrical distance between each node and each generator.

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員

^{*2}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 副研究参事

背景

今後、インバータ連系電源の更なる導入拡大が見込まれており、系統に並列される同期機が減少して系統の慣性が減少し、電源脱落時の周波数変化率（RoCoF）の増大が懸念されている。RoCoF が過大となるとインバータ連系電源が解列し、周波数が更に大きく低下する恐れがある。インバータ連系電源導入拡大時の周波数安定性解析には連系点毎の RoCoF を求める必要があり、過渡安定度シミュレーション（当所 Y 法等）で求めることもできるが、実際の様々な系統断面の検討には多大な計算労力を要するため、地点毎の RoCoF の効率的な算出が課題となっている。

目的

電源脱落時における地点毎の RoCoF の高速概算法を開発し、妥当性を検証する。

主な成果

1. RoCoF の高速概算法の開発

高速に短絡電流を算出可能な短絡容量計算プログラム（当所 T 法）を拡張し、電源脱落直後における、各発電機の回転速度の変化率 $RoCoF_G$ および各ノードの電氣的な周波数の変化率 $RoCoF_N$ を、以下の手順で簡易的に計算する手法を開発した（図 1）。

- ① 電源脱落地点で三相短絡が生じた際に各発電機が供給する短絡電流を算出。
- ② 算出した短絡電流の比を用いて電源脱落直後の各発電機の出力増加分 ΔP_i を算出。
- ③ 発電機の運動方程式に ΔP_i を代入して各発電機の $RoCoF_G$ を算出。
- ④ 各ノードの $RoCoF_N$ は、各ノードと各発電機の電氣的距離の逆数で重み付けした各発電機の $RoCoF_G$ を加算することにより算出²⁾。

本手法は電圧の変化による負荷の変化等を見逃して簡易的に RoCoF を計算するものであるが、Y 法と比較して計算労力が小さく³⁾、様々な系統断面における RoCoF を効率良く評価できる。また、実際には電源脱落直後には電圧が低下し負荷が減少することが多いため、本手法は悲観サイド⁴⁾の結果が得られる傾向と考えられる⁵⁾。

2. RoCoF の高速概算法の妥当性検証

電気学会 WEST30 機系統軽負荷モデルにおいて電源脱落時の Y 法シミュレーション結果と高速概算法の結果を比較した。その結果、両者の結果は概ね一致し、高速概算法の結果は Y 法結果に対して悲観サイドとなる傾向を確認した（図 2, 図 3）。周波数安定性が問題となる系統断面のスクリーニング等への活用が期待できる。

注 1) 電力広域的運営推進機関、「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について、調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料 3. 2020.10.27

2) ノード周波数は電氣的に近い発電機の回転速度の影響を強く受けると考えたもの。また、正確には $RoCoF_N$ は発電機の回転速度と電氣的な周波数の差異（発電機内部リアクタンスの時間的変化の影響）も考慮して算出している。

- 3) WEST30機系統軽負荷モデルにおける単機脱落全30ケースのRoCoF_GとRoCoF_Nを高速概算法で算出に要する時間が0.1秒程度。
- 4) インバータ連系電源の解列の可能性が検討対象であり、RoCoFが大きい場合を悲観サイドと考える。
- 5) 電源脱落に伴い電圧が上昇するケースでは、本手法の結果は楽観サイドとなるため注意が必要である。

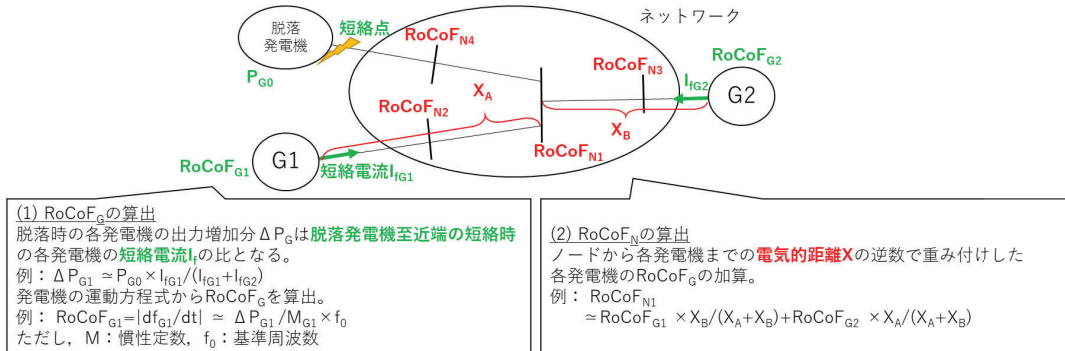
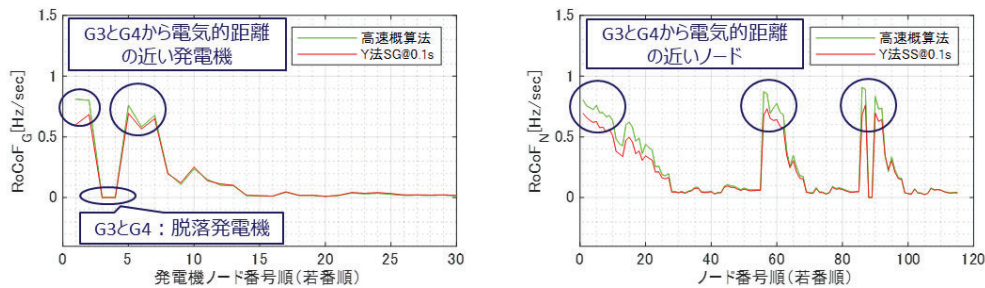


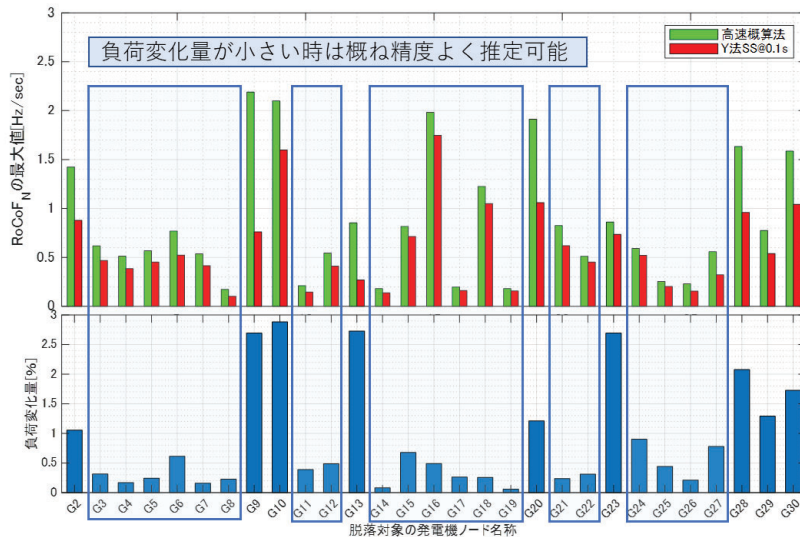
図1 RoCoF 高速概算法の概念図



*1 Y法 SG@0.1sとY法 SS@0.1sはそれぞれ、脱落から0.1秒間の発電機の回転速度（電気角速度換算）およびノード周波数のY法シミュレーション結果から算出。

*2 Y法シミュレーションと高速概算法で傾向が概ね一致し、高速概算法の結果は悲観サイドとなっている。

図2 G3とG4脱落時の各地点のRoCoF_GとRoCoF_Nに関する高速概算法とY法シミュレーション結果との比較



*1 負荷変化量はY法シミュレーション結果における電源脱落から0.1秒時点の全体負荷に対する負荷変化量を示す。

*2 負荷変化量大きいケースでは、両者の差異は大きくなる傾向となっている（負荷変化量大きいケースでは電圧が大きく変化している）。なお、本モデル系統では電源・負荷が集中模擬されており、電源脱落時の負荷変化量は実系統よりも大きいと考えられる。

*3 G1脱落ケースは、Y法シミュレーションにて脱落直後から電力動揺が大きく、同期安定度面で問題が生じているため、本図からは省いている。

図3 単機脱落時の各地点のRoCoF_Nの最大値に関する高速概算法とY法シミュレーション結果の比較

EV 導入・活用時における系統負荷のモデリングに向けた EV 用充電器の特性把握

増田 宗紀^{*1} 佐藤 勇人^{*2}

キーワード：負荷特性
系統解析
電気自動車
実効値解析用モデル
実機試験

Key Words : Load characteristic
Power system analysis
Electric vehicle
Root mean square analysis model
Laboratory test

Experimental Investigation of EV Chargers Characteristics for Modeling of Aggregate Load with Large-Scale EVs

Muneki Masuda, Hayato Satoh

Abstract

In Japan, the electrification of vehicles in the transportation sector is being promoted as one of the measures that will contribute to realizing the decarbonization and ensuring the resilience of power system following disaster. In particular, the large-scale integration of Electric vehicles (EVs) are expected. However, large-scale integration of EVs will change the composition and characteristics of load equipment. There is a concern that this may increase the impact on the operation and control of the power system. To analyze this impact in advance, it will be necessary to develop a load model considering EV's characteristics.

Therefore, the authors conducted laboratory tests using CRIEPI's power system simulator to investigate the characteristics of the response to voltage and frequency fluctuations for two types of charging types, slow charging and fast charging, for commercial products of one representative manufacturer. The results of the tests were used to develop the EVs model considering charging types. This report provided the following key findings obtained from the tests.

- The characteristics of the response of each charging types and its effect on the aggregate load
- Models for root mean square analysis to simulate the response of slow charging and fast charging

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 研究員

^{*2}グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員

背景

わが国では、脱炭素化や災害時のレジリエンス確保に資する対策の一つとして運輸部門での車両電動化が推進されており、特に電気自動車（以下、EV）の導入・活用が期待されている¹⁾。しかしながら、EVの導入拡大が進み、系統負荷の電圧や周波数に対する特性が変化してくると²⁾、電力系統の運用・制御への影響拡大が懸念される。この影響を事前に解析するためには、EV用充電器の特性を把握し、系統負荷の特性変化への影響を分析することが必要となる。

目的

市販のEV用充電器の電圧・周波数特性を試験により把握し、同特性が系統負荷の特性に与える影響を分析する。また、試験結果に基づき電圧・周波数変動時の応動を模擬できるEV用充電器の実効値解析用モデルを開発する。

主な成果

1. EV用充電器の特性把握と系統負荷の特性に与える影響の分析

EVの充電方式は、普通充電または急速充電の2種類に分類される（図1）。そこで、各方式の代表1機種³⁾を対象に、電圧・周波数変動に対する充放電電力の応動を把握し⁴⁾、各方式の特性を分析・整理した（表1、図2）。主な特徴は、以下のとおりである。

- ・電圧変動時の充電電力は、普通充電の場合、車載PCSの有効電力一定制御により電圧変動直後は定格電力値⁵⁾に保たれるが、その後、コントロールボックスの電流一定制御により電圧に応じた値に落ち着く（定電流特性を示す）。一方、急速充電の場合は、EV用PCSの有効電力一定制御により定格電力値に保たれる（定電力特性を示す）。
- ・周波数変動時（急峻な変動を除く）は、普通充電時の充電電力、急速充電時の充放電電力いずれも定格電力値に保たれる（周波数特性はなし）。

系統負荷の特性⁶⁾を表す電圧特性指数および周波数特性係数は、近年の負荷機器のインバータ化により減少傾向⁷⁾にある。上記試験結果を踏まえると、EVの導入拡大が将来の系統負荷の特性に与える影響は各方式によって異なり、普通充電の場合は電圧特性指数の減少傾向を緩和し、周波数特性係数の減少傾向を進行させる。一方、急速充電の場合は電圧特性指数と周波数特性係数の両者の減少傾向を進行させると考えられる（表2）。

2. 電圧・周波数変動時の応動を模擬できるEV用充電器モデルの開発

前述した各充電方式の特徴的な応動は、表3に示すモデル要素により模擬することができ、開発モデルが実機の応動を概ね再現できることを確認した（図3）。今後は、必要に応じて本開発モデルの調整・改良を行うとともに、EV導入・活用時の系統負荷モデル（EVの集合体としての特性を考慮したモデル）の開発を進める。

注 1) 経済産業省, 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(2021)

- 2) 系統負荷とは上位系統から見た需要家側機器の集合体である。今後系統負荷の主要な要素になると想定されるEV用充電器の特性は未知であるとともに、この導入拡大が系統負荷の特性に与える影響は明らかとなっていない。
- 3) 普通充電器は国内シェア上位の機種、急速充電器は実証試験済みで実系統への導入実績がある機種を選定した。
- 4) 任意の電圧・周波数を生成可能なインバータ電源とEV等を直結して特性把握試験を実施した。EV用充電器の力率は1(標準値)であり、無効電力は電圧・周波数変動時もほぼ0であるため、有効電力の応動のみを対象とした。
- 5) 一般的に充電電力は定格電力値となり、放電電力は指定した値(本試験では定格電力値)となる。
- 6) 系統負荷の特性は、一般に指数関数モデル(下式)により表現される。

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_P} \left(1 + \frac{\beta_P}{100} \Delta f\right) \quad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_Q} \left(1 + \frac{\beta_Q}{100} \Delta f\right)$$

α_P, α_Q : 有効・無効電力の電圧特性指数 β_P, β_Q : 有効・無効電力の周波数特性係数

P_0, Q_0 : 有効・無効電力の初期値 V_0 : 電圧の初期値 Δf : 初期周波数(f_0)からの周波数偏差 [Hz]

7) 一般的にインバータ負荷の α_P と β_P は0であり、インバータ化の進行により系統負荷の α_P と β_P も0に近づいていく。

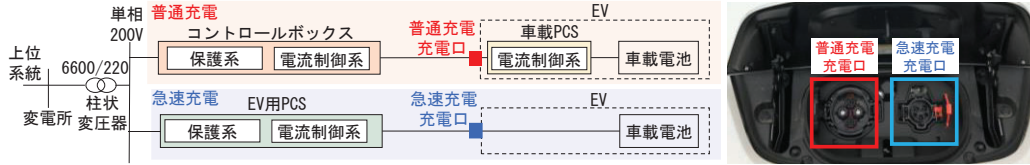


図1 各充電方式の系統連系の概要

表1 代表メーカー市販品のEV用普通/急速充電器の電圧・周波数特性

	静特性	動特性	脱落特性
普通充電	<ul style="list-style-type: none"> 電圧特性は定電流特性である(右に記載のコントロールボックスの応動による)。 周波数特性はなし。 	<ul style="list-style-type: none"> 電圧低下直後は車載用PCSの電流制御系(充電電力一定制御)により、0.1s程度で電圧変動幅に応じた電流値に落ち着く。 電圧低下から0.15s程度経過後、コントロールボックスの電流制御系(電流一定制御)により1s程度で定格電流に引き戻される。 電流リミッタは定格電流の3.2倍程度である。 	<ul style="list-style-type: none"> 瞬低起因の脱落はあり(耐量はコントロールボックスの保護系で決まる)。瞬低継続時間0.3s未満の電圧低下では脱落しない。0.3s以上の場合には電圧低下幅60%以上で脱落する。 周波数変動起因の脱落はなし。
急速充電	<ul style="list-style-type: none"> 電圧特性は定電力特性である(EV用PCSの電流制御系(充電電力一定制御)の応動による)。ただし、電流リミッタの制約により定電力特性となる電圧低下幅は充電時が10%程度未満、放電時が15%程度未満の場合に限られる。 周波数特性はなし。 	<ul style="list-style-type: none"> EV用PCSの電流制御系(充電電力一定制御)により、0.5s程度で電圧変動幅に応じた電流値に落ち着く。 電流リミッタの値は充電時と放電時で異なる。充電時は定格電流の1.1倍、放電時は定格電流の1.2倍程度である。 	<ul style="list-style-type: none"> 瞬低起因の脱落はなし。ただし、EV用PCSの保護系により電圧低下幅80%以上でゲートブロックする。 周波数変動起因の脱落はあり。(EV用PCSの保護系の単独運転検機能による) (・EV用PCSの保護系としてOVR/UVR, OFR/UFRがある)

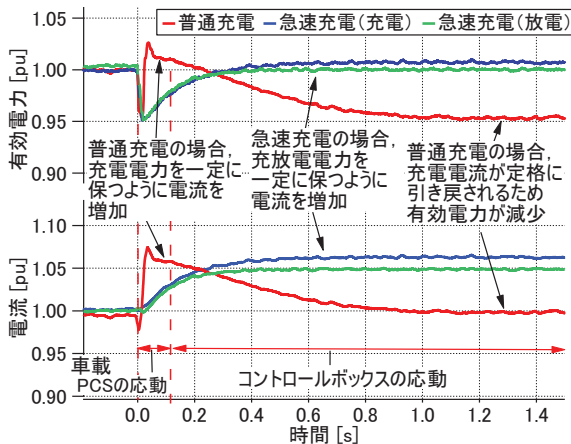
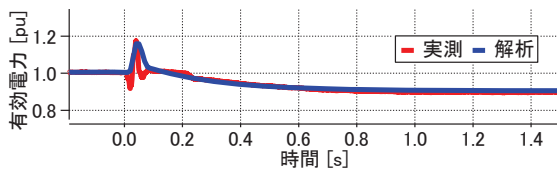


図2 電圧ステップ変動(電圧低下幅5%)時のEV用充電器の応動



(a) 普通充電

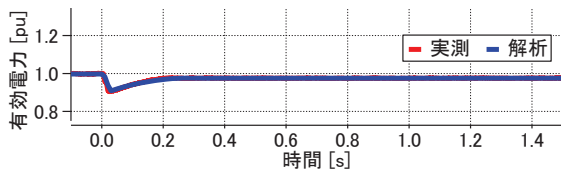
表2 EVの導入拡大が系統負荷の特性に与える影響

充電方式	EVの電圧・周波数特性	負荷特性に与える影響
普通充電	電圧特性は定電流特性 周波数特性はなし	α_P を増加させる β_P を減少させる
急速充電	電圧特性は定電力特性 周波数特性はなし	α_P を減少させる β_P を減少させる

※ α_P の減少(増加)は系統負荷の電圧変動緩和効果を減少(増加)させる。
 β_P の減少(増加)は系統負荷の周波数変動緩和効果を減少(増加)させる。

表3 実効値解析用EV用充電器モデルの構成要素

	電流制御系	保護系
普通充電	<ul style="list-style-type: none"> PI制御系(車載PCS) 不完全微分要素(コントロールボックス) 	<ul style="list-style-type: none"> 瞬時電圧低下リレー(コントロールボックス)
急速充電	<ul style="list-style-type: none"> PI制御系 	<ul style="list-style-type: none"> 単独運転検出機能 OVR/UVR OFR/UFR



(b) 急速充電

図3 電圧ステップ変動(電圧低下幅10%)時のEV用充電器の実測対比

光学振動計測技術を用いた電柱の振動姿態の可視化

高田 巡^{*1}

キーワード：電柱

劣化診断

振動姿態

動画像処理

光学振動計測

Key Words : Utility pole

Deterioration diagnosis

Vibration mode

Video processing

Optical vibration sensing

Visualizing Vibration Modes of a Utility Pole by Optical Vibration Sensing

Jun Takada

Abstract

The dynamic behavior of utility poles, such as vibration and displacement, can provide a lot of information about their structural strength. For this reason, various methods for sensing and simulating the dynamic behavior of utility poles have been developed. However, in order to obtain detailed information on the natural vibration modes of actual poles, it is conventionally required to install multiple contact-type sensors on the poles, which is difficult to apply to a huge number of existing poles in the field. Optical vibration sensing technology, which enables a remote and non-contact vibration measurement and visualization only by video cam, is expected to greatly facilitate the analysis of vibration modes on existing poles. In order to evaluate this technology, we conducted a test analysis to visualize the vibration modes of an experimental utility pole under natural wind conditions (wind speed of 4-10 m/s). The results implied that the vibration modes of the pole in the direction of the overhead wires and the direction perpendicular to the overhead wires could be visualized at 1.1 Hz and 1.5 Hz, respectively, from the footage of the pole taken by a video cam or a smartphone fixed on a tripod. Moreover, the results also implied that the vibration mode of the transformer on the pole could be visualized at 8.8 Hz when the footage was taken with sufficient resolution (over 28 megapixels). We will further expand the verification to clarify the range of applicability of this technology which covers sufficient accuracy, and also apply this technology to poles in various states to examine whether it can detect changes in strength and stability of poles.

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

背景

国内の一般送配電事業者・通信事業者が管理する配電柱および電信柱（以下電柱）は約 3600 万本あり、各事業者はその状態に応じて更新や補強を行っている。構造力学分野において構造物の強度変化は外力に対する応答特性（変位・振動）に現れるとされ、特に局所的な損傷の影響は振動姿態^{注1)}に現れることが知られている。しかし一般に振動姿態の計測には空間的に密なセンサ設置が必要であるため、膨大な数の既設電柱に適用することは技術と費用の面から従来不可能であった。これに対し、近年、カメラで撮影した動画を使い、構造物の変位や振動姿態を簡便に計測し可視化できる光学振動計測技術が開発されている^{[1][2]}。本技術を用いれば巡視等の際に容易に電柱の柱体（本体）の振動姿態を計測できるだけでなく、柱上設備の装着状態まで対象を広げた検査ができる可能性がある。しかし、本技術を電柱などの配電設備計測に適用した例はほとんど無く、柱体や柱上設備の振動姿態を可視化できるかどうかは確認されていない。

目的

光学振動計測技術を用いて電柱柱体や柱上設備の振動姿態を可視化できるかを調査し、実現可能性を明らかにする。

主な成果

1. 電柱柱体の振動姿態の可視化

電柱柱体の振動姿態の計測実験用に、2800-6300 万画素で 1 秒間に 75-160 枚の画像を撮影できるシネマカメラと、830 万画素で 1 秒間に約 30 枚の画像を撮影できるスマートフォンを準備した。両撮影機器を三脚で固定し、屋外の試験用電柱^{注2)}を風速 5-10 m/s の時に撮影した。撮影画像に光学振動計測技術を適用して振動を 1000-10000 倍に強調した結果、1.1 Hz で架線方向、1.5 Hz で架線直角方向の振動姿態が可視化できた（図 1）。ただし、手持ち撮影時や風速が小さい場合（4 m/s 以下）、弁別可能な形での可視化が難しいことも分かった。以上の結果から電柱柱体の振動姿態の可視化の実現可能性が確認できた。

2. 柱上設備の振動姿態の可視化

柱上設備の振動姿態を捉えるため、高解像度撮影ができるシネマカメラを三脚固定し、試験用電柱全体を高解像度（2800 万画素以上）で撮影した。撮影画像に光学振動計測技術を適用した結果、柱体と柱上変圧器で異なる振幅特性が得られ（図 2(a)(b)）、8.8 Hz において両者が異なる振動姿態を示す様子が可視化できた（図 2(c)）。以上の結果から柱上

注 1) 振動モードとも呼ばれ、振動の空間的形狀（各点の振動方向や振幅、節や腹の位置等）を表したもの。

注 2) 試験用のため、供用中の電柱とは柱上設備の設置位置、固定状態などの条件が異なる可能性がある。

設備の振動姿態の可視化の実現可能性が確認できた。

今後の展開

今後、安定・頑健な計測精度を得るための条件や適用可能範囲を明らかにする。さらに、本手法を様々な状態の電柱に適用し、季節（気温）や電線の接続状態・張力、電柱の強度や耐力による振動への影響を分析する。

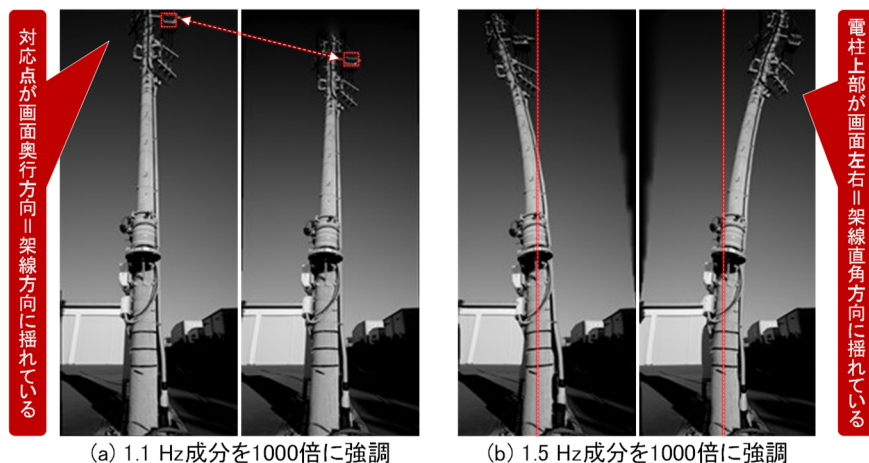


図1 風速 10 m/s 時の電柱柱体の振動姿態を光学振動計測技術により強調可視化した例

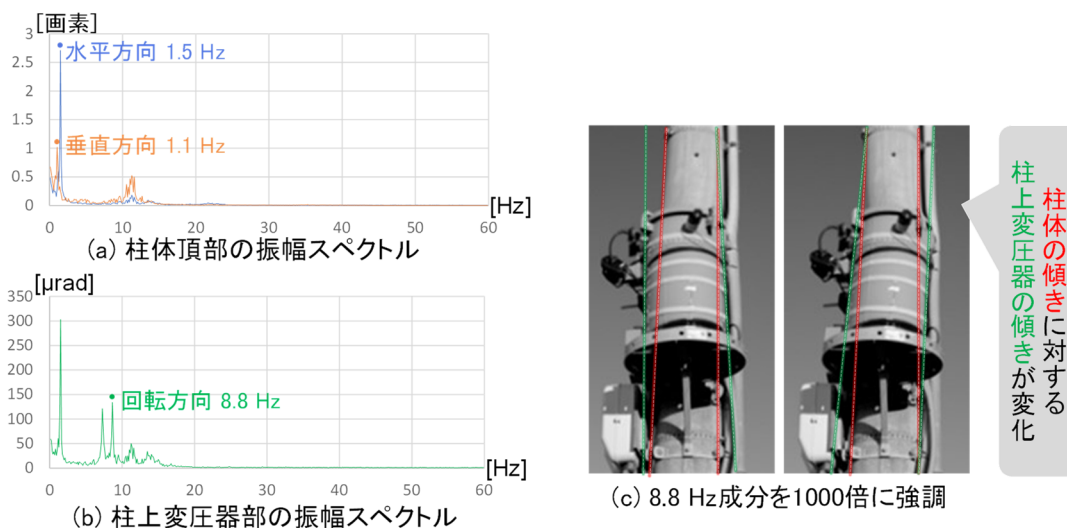


図2 風速 10 m/s 時の柱上設備の振動姿態を光学振動計測技術により強調可視化した例

参考文献：

- [1] 高田巡, 太田雅彦. インフラ構造物の振動・変形を可視化する光学振動計測技術の開発. ビジョン技術の実利用ワークショップ. 2019, IS1-C2.
- [2] 高田巡, 伊藤雅彦. カメラによる振動計測法の発電設備への適用性検証—水車発電機振動の試験計測—. 電力中央研究所報告 C20013, 2021.

PV 余剰電力活用のための複数台の 家庭用ヒートポンプ式給湯機の連携運転計画法の提案と評価

石川 歩惟^{*1} 所 健一^{*2}

キーワード：ヒートポンプ式給湯機
太陽光発電
集合住宅
最適化システム
遺伝的アルゴリズム

Key Words : Heat pump water heater
Photovoltaic power generation
Multiple dwelling
Optimization system
Genetic algorithm

Development and Evaluation of an Operation Planning Method for Multiple Residential Heat Pump Water Heaters for Effective Use of Surplus PV Power

Ai Ishikawa and Ken-ichi Tokoro

Abstract

In Japan, a number of houses that installed a photovoltaic power system has been increased. Because of a concern about power system load by reverse power flow, self-consumption of surplus photovoltaic power by heat pump water heaters (HPWHs) in the houses has attracted attention. In the case such as a multiple dwelling, where the surplus power from one photovoltaic power system can be shablack by several houses, it is expected that cooperative operation of multiple HPWHs leads a long-time and/or a large amount of absorption of the surplus.

In this report, we propose an operation planning method for multiple residential HPWHs. The method can derives cooperative operation plan that blackuces electric bill and reverse power flow as much as possible under the specific conditions inherent in HPWHs, by using the genetic algorithm. The conditions include the startup losses, the dissipation loss, the limitation of storage tank volume and ensuring the minimal storage of hot water. Through a numerical experiment with actual demand data, we found that a cooperative operation plan of three HPWHs derived by the proposed method enables to suppress maximum reverse power flow from a 4 kW overloaded photovoltaic system to 2.10 kW, although it is 3.11 kW when operation of the three HPWHs is planned independently each other.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員

*2 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

背景

近年、太陽光発電(PV)の普及拡大が進み、多量の逆潮流による電圧上昇や配電線設備容量の不足などの問題が生じている。この解決策の一つとして、家庭用ヒートポンプ式給湯機(HP式給湯機)を活用した余剰電力の自家消費が注目されている。ただし、現状は主として個別の戸建住宅が対象となっており、集合住宅やマイクログリッドなどを対象に、余剰電力を複数世帯で融通しながら自家消費する方法は十分検討されていない。

目的

複数台のHP式給湯機を連携し、PV余剰電力を効果的に自家消費する方法を提案する。また、実需要家のデータを用いた数値実験により提案手法の有効性を評価する。

主な成果

1. PV余剰電力を活用する複数台HP式給湯機の連携運転計画法

複数世帯で余剰電力を効果的に自家消費するために、複数台のHP式給湯機を連携運転する計画手法を考案した。提案手法では、1日の起動回数の上限や放熱ロス、湯切れ防止など、HP式給湯機特有の制約を考慮した上で、需要家側の電気代負担は最小限に留めつつ、自家消費を最大限に増やすような連携運転計画を作成する(図1)。複雑な制約条件を考慮した最適化が行えるよう、計画作成には代表的なメタヒューリスティックの一つである遺伝的アルゴリズムを採用した。

2. 余剰電力の有効活用に対する提案手法の有効性評価

提案手法の有効性を評価するため、3世帯で一つのPV出力を共用するなど、表1に示す限定的な条件下で数値実験を行った。実験では、余剰電力が発生しやすい5月の快晴日を想定し、日射量を所与として、1日分の運転計画を作成した。その上で、実需要家の電力需要データおよび給湯需要データを用い、提案手法で作成した連携運転計画を評価した。その結果、各世帯を個々に最適化する場合に比べ、3世帯の電気代負担は同等のままに、最大逆潮流を3.11 kWから2.10 kWに削減でき(図2)、作成した連携運転計画の有効性を確認した。

今後の展開

様々な季節、天候、多様な需要パターンをもつ世帯を組み合わせるなど、より現実的な条件下で連携運転の有効性を詳細に検証する。

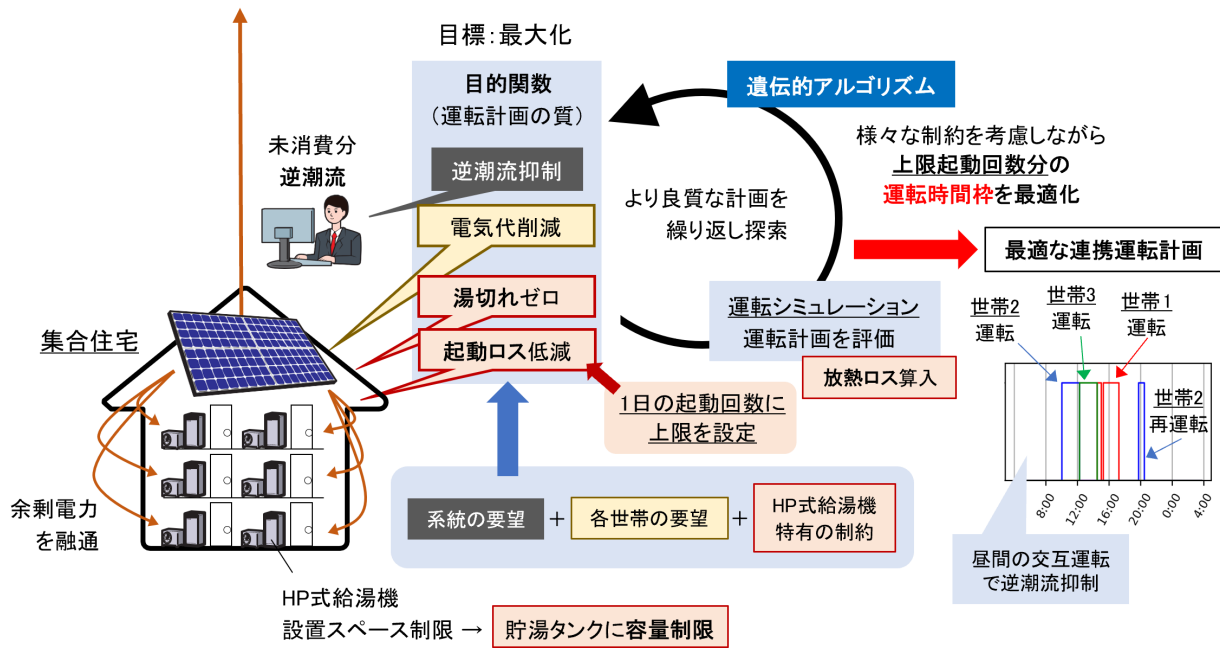
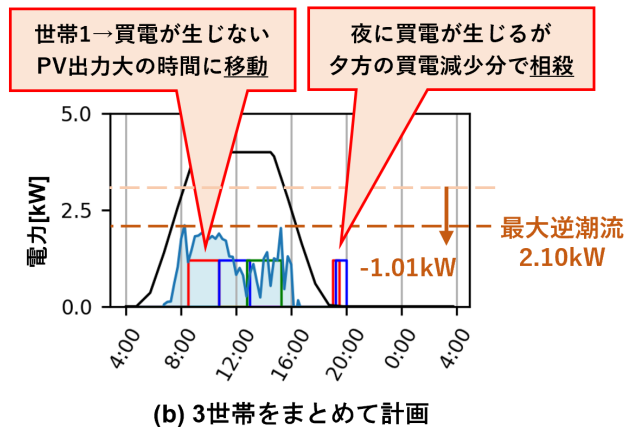
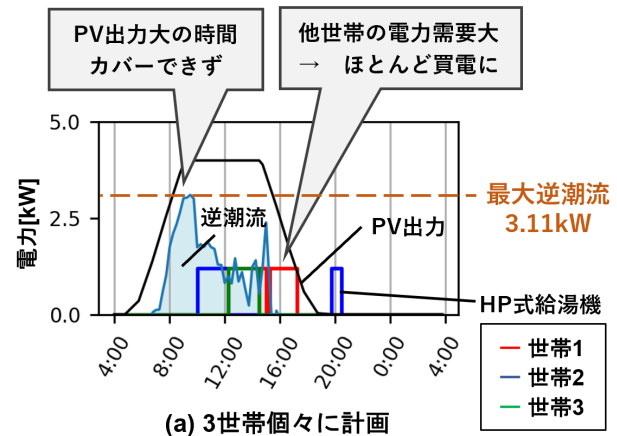


図1 考案した連携運転計画法の概略

表1 実験条件

	設定	備考
世帯数	3	需要パターンの異なる世帯
時間分割数	96	15分1コマの単位で計算
PCS容量	4 kW	3世帯で共用
過積載率	144 %	PCS容量 < パネル容量
天候	快晴	—
定格消費電力	1.2 kW	—
COP	4.0	—
放熱ロス率	1 %/時	—
貯湯タンク容量	300 L	—
1日の最大起動回数	2回	—
電気料金(※)	25.8 円/kWh	6~翌1時
	17.78 円/kWh	1~6時
再エネ賦課金	3.36 円/kWh	2021年度値
売電料金	19.00 円/kWh	2021年度、FIT

※ 参考: 東京電力スマートライフ S/L



※1 電気代を最小限にする制約により必要最小限の運転しか行われない。
 ※2 (a)は各世帯個々に得た運転計画を手作業で組み合わせて作成した。

図2 個別計画と連携運転計画での逆潮流の比較

電磁波を用いたコンクリート内の空隙計測（1） ーコンクリート表面付近の空隙計測用モデルの提案ー

本田 匠^{*1} Hussain Alsalem^{*2} 田中 孝之^{*2}
土井 暁^{*3} 内田 茂^{*3} 大野 湧人^{*3}

キーワード：コンクリート壁
非破壊検査
非接触検査
空隙検出
電磁波

Key Words : Concrete wall
Non-destructive inspection
Non-contact inspection
Void detection
Electromagnetic wave

Inspection of voids in concrete using electromagnetic waves (1) -Proposal of model for measuring voids near concrete surface-

Takumi Honda, Hussain Alsalem, Takayuki Tanaka, Satoru Doi,
Shigeru Uchida and Wakuto Ono

Abstract

The large amount of reinforced concrete structures such as utility poles and buildings are used for electric power equipment, and the safety of the equipment has been confirmed through inspections by experts. However, in recent years, due to the number of equipment deteriorated over time increases, and the number of inspectors decreases, so the efficient inspection method is regarded as important. To solve these problems, we have proposed the non-destructive inspection method for voids in concrete using electromagnetic waves, and we describe improvements. We have shown the possibility of quantitative measurement using microwave multi-layered scanning (MLS), which can confirm voids that are precursors of concrete peeling. It is necessary to build a mathematical model and improve usability in order to enable quantitative void measurement using MLS. We propose a mathematical model that measures voids inside concrete with electromagnetic waves.

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

^{*2}北海道大学 情報科学研究科

^{*3}大林組

背景

電力設備では建屋などのコンクリート製構造物を大量に使用しており、専門家による点検や検査を通して設備の安全性を確保している。しかし、経年設備数の増加だけでなく国内の少子高齢化の進行により、専門知識を持つ検査員の確保が難しくなりつつあり、非接触で資格などが不要のない簡便な検査方法が望まれている。そこで当所は電磁波を活用したマイクロ波多層走査法（MLS: Multi-layered scanning）^{注1)}を使用して、コンクリート表面付近の空隙を定量的に計測する手法の開発に取り組んでいる¹⁾。コンクリート製構造物は一般的に保護塗装やタイルなどで保護されており、この表面付近に発生する空隙による剥離が問題となる。空隙が浅いほど剥離しやすいため、空隙の有無ならびに深さを推定することは重要である。従来の MLS モデル式¹⁾を用いた計測手法で空隙の有無判定を実現したが、深さ方向の情報は推定できていなかった。

目的

コンクリート表面付近の内部空隙について電磁波計測を用いて空隙深さを推定するために、従来の MLS モデル式を改良したモデル式を提案する。また、実験により提案モデルによる推定結果の妥当性を検証する。

主な成果

1. 空隙深さ計測のためのモデル式の提案

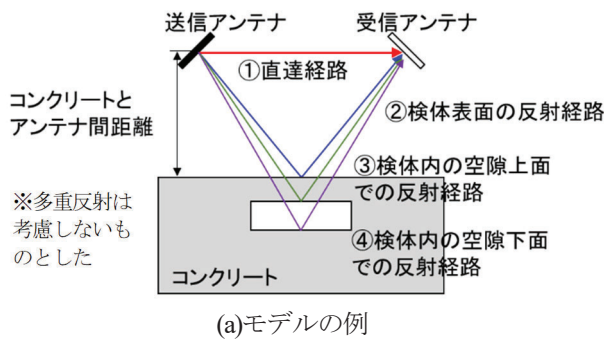
送信アンテナと受信アンテナ間の電磁波として、①直接波、②検体表面の反射波、③検体内の空隙上面での反射波、④検体内の空隙下面での反射波の 4 種を仮定した物理特性を反映し、深さを推定できるモデル式を提案した。図 1(a)は直達経路と反射経路の電磁波が干渉するモデルであり、アンテナとコンクリート間距離が変化すると、直達経路は変わらないが反射経路は変化するため、干渉の仕方が変化し電磁波強度が変化する。図 1(b)の曲線はそれぞれ空隙の有・無の計測結果に基づき提案モデル式の係数を決定し、近似させた結果を示している。この 2 曲線の位相差から空隙の深さを推定できる。

2. 実験による提案モデルの妥当性検証

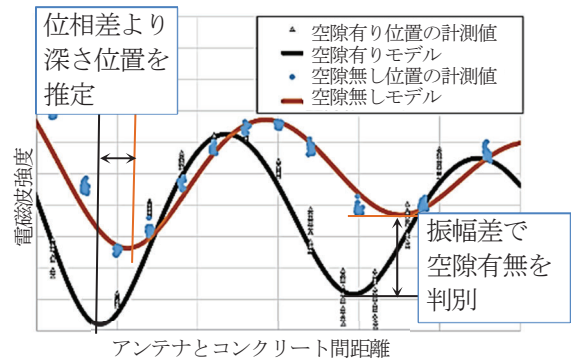
提案モデルを検証するため、これまでに開発した空隙計測装置¹⁾（図 2）を用いて、タイルとコンクリート間の空隙による剥離を模擬した検体（図 3）を計測し、空隙深さを推定した。図 4は図 3の計測線に沿って計測した結果から推定した空隙深さであり、空隙の有無と深さが推定できていることを示す。その推定値は検体の設定値と概ね一致した。これにより、提案モデルの妥当性が検証された。

今後の展開

計測事例を増やし、今回のモデル式に含めなかった外乱の影響を調べ、実用化を図る。



(a)モデルの例



(b)提案モデル式による解析例

図1 提案モデルの原理

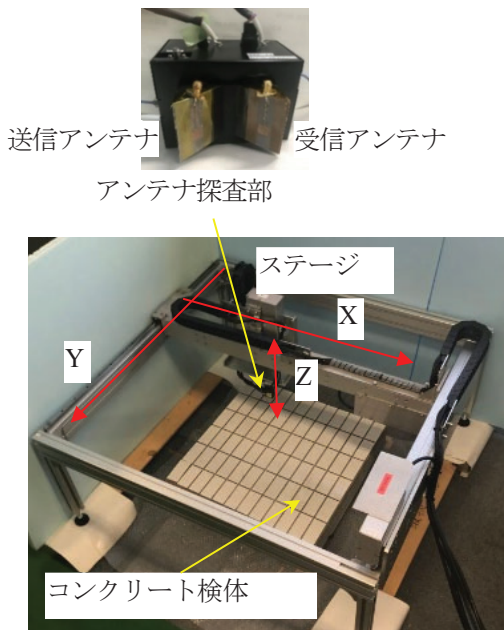


図2 実験装置

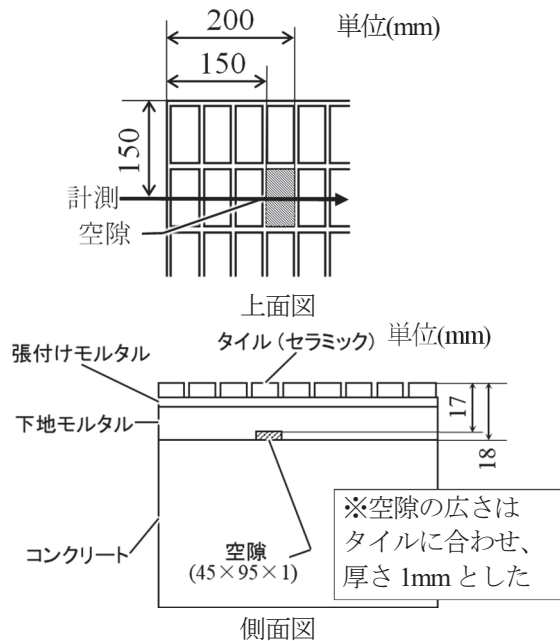
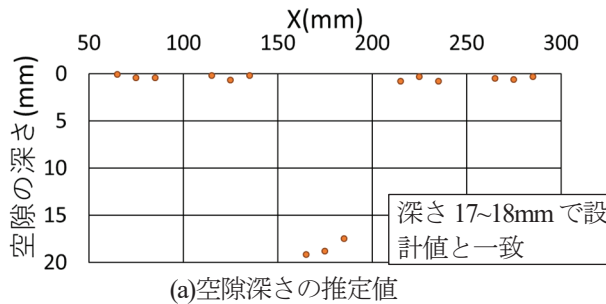
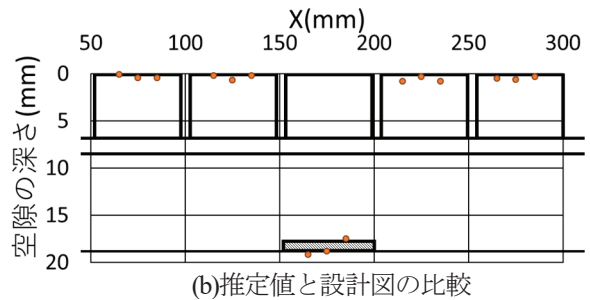


図3 コンクリート検体 設計図



(a)空隙深さの推定値

※モルタルの比誘電率はコンクリートと同程度として深さを推定した



(b)推定値と設計図の比較

図4 空隙深さの設計値と推定値

注 1) 既存の電磁波手法は周波数を変調させ計測するため計測器、計算機が高コストとなる。一方、MLS では周波数を固定し、代わりに壁面とアンテナ間距離を変更し複数回計測する。MLS で用いられる周波数は 10GHz と高いためコンクリート表面付近に限定されるが高分解能で計測できる。

参考文献:

[1] Takumi Honda, et al., Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), Vol.31, No.6, pp. 863-870, 2019

IP 保護リレー情報に対する伝送経路の 増強コスト最小化に向けた設計手法

-マイクロ波無線通信網への適用と評価-

田中 彰浩*¹ 大場 英二*²

キーワード：マイクロ波無線

保護リレー

数理最適化

インターネットプロトコル

点素パス

Key Words : microwave radio communication

protection relay

numerical optimization

internet protocol

disjoint path

A Method for Designing Transmission Paths of IP-based Protection relay information with minimum augmentation cost -Application to Microwave Wireless Communication Networks and its Evaluation-

Akihiro Tanaka and Eiji Ohba

Abstract

In recent years, the application of IP-based technology to the transmission of power line protection relay information has been studied. As the communication volume increases due to application of IP-based technologies, it may become difficult to accommodate it in existing microwave radio communication networks, then microwave radio bandwidth may need to be significantly increased.

In this paper, the authors formulated the problem determining transmission path of IP-based power line protection relay information as a mathematical optimization problem with the objective function of minimizing the cost of microwave radio bandwidth augmentation and solved it by using optimization solvers. They also implemented a greedy algorithm to design the path sequentially according to the update of power line protection relay devices, and to find the least-cost microwave bandwidth augmentation section each time when the microwave radio band is insufficient to accommodate the available capacity. Numerical experiments showed that the proposed method can reduce the cost by 26% on average compared to the greedy calculation method.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 主任研究員

*²グリッドイノベーション研究本部 ネットワーク技術研究部門 特別嘱託

背景

自然災害の影響を受けづらいマイクロ波無線通信は、基幹系統の PCM 電流差動リレーシステムにおける情報（以下、リレー情報）の伝送に多く用いられている。近年、リレー情報の伝送に IP 系技術を適用した IP リレーシステムの検討が進められている。IP リレーシステムの新設や既存のリレーシステムからの更新が進むと通信量が增大するため¹⁾、マイクロ波無線帯域の増強が必要になる可能性がある。IP リレーシステムの要件を満足する伝送経路の設計を、新設や更新の時期に応じて逐次行う方法は、直近のマイクロ波無線帯域の増強コストのみを考慮した設計を繰り返すこととなる。これに対し、全ての新設や更新を踏まえた伝送経路の設計方法に基づき増強計画を立案することができれば、マイクロ波無線通信網の構築に要する総コストの低減が期待できる。

目的

全てのリレーシステムの新設や更新を踏まえ、マイクロ波無線帯域増強に要する総コストが最小となる伝送経路を設計する手法を提案する。また、実規模の通信網を対象とした評価を行う。

主な成果

1. 無線帯域増強に要する総コストが最小となる IP リレー情報の伝送経路設計手法の提案

経路設計問題を、マイクロ波無線帯域増強に要する総コストを目的関数とする数理最適化問題として定式化し、総コストが最小となる増強区間²⁾および IP リレー情報の伝送経路を求める手法を提案した（図 1 (a), (b)）。提案手法は以下の特徴を有する。

- ・ 変電所/中継所とそれらを繋ぐマイクロ波無線通信網に対し、帯域の空き容量と送電線の対向の変電所の組、区間の増強可否や増強可能量を与えることにより、総コストが最小となる増強区間と IP リレー情報の伝送経路を求めることができる。
- ・ 経由する中継箇所が 4 中継以内、対向の変電所間の 2 経路が同一中継箇所を経由しないといった、既存のリレー情報における伝送経路設計の要求を制約式として加え、これらを満足する IP リレー情報の伝送経路の導出が可能である。

2. 実規模のマイクロ波無線通信網を対象とした評価

10×10 の合計 100 箇所の変電所/中継所からなる格子状の実規模マイクロ波無線通信網に対し、乱数を用いて 141 の対向する変電所の組（141 本の送電線の対向変電所）を設定した。提案手法と、伝送経路の設計を逐次行う手法を模擬した貪欲法³⁾（図 1 (a), (c), (d)）を用いて、マイクロ波無線帯域の所要増強区間数を求めた（図 2）。初期の無線帯域の空き容量を変化させて計算した結果、いずれの場合でも提案手法は貪欲法よりも少ない増

強区間数で全ての IP リレー情報を収容可能であった。提案手法により得られる計算結果は、総コストを低減したマイクロ波無線通信網の構築計画立案に活用できる。

- 注1) IP パケットまたは Ethernet フレームに収容して送信するため、通信量が増大する。現状のリレー情報は、1.5Mbps に 7 システム分収容されているのに対し、IP リレー情報の収容可能数は、遅延時間の要求から、6.3Mbps に 6 システム分が上限である。
小久保他「IP 保護リレー情報のマイクロ波無線回線への収容方式の開発-中継時の伝送遅延時間低減手法の提案と評価-」電力中央研究所報告, R18005, 2020
- ここでは、対向する 2 台のマイクロ波無線装置からなる伝送路を区間と呼ぶ。帯域を増強する場合、無線機の仕様に応じた増強量となる。(6.3Mbps→13Mbps や 6.3Mbps→52Mbps など)
 - リレーの更新に応じて伝送経路の設計を逐次行い、マイクロ波無線帯域に空き容量が不足しており収容できない場合にはその都度、最小コストのマイクロ波無線帯域の増強区間を求める手法

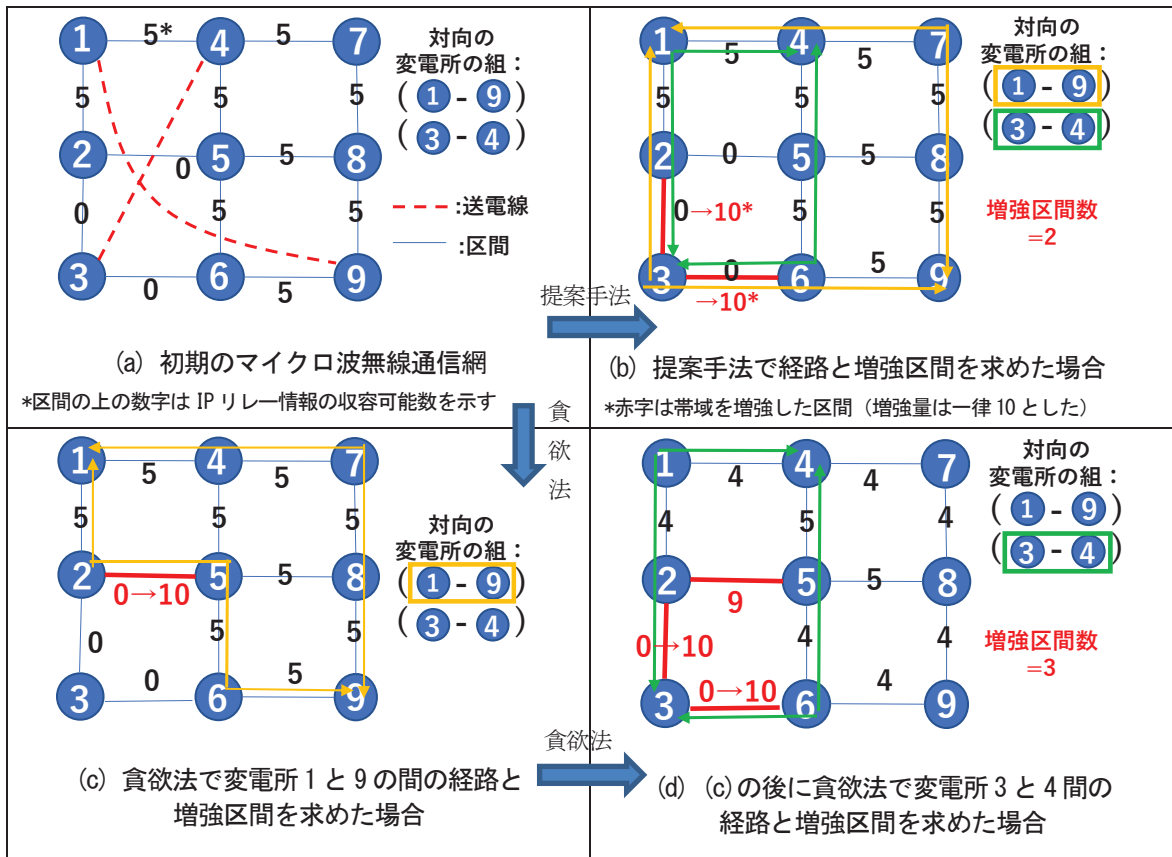


図1 3×3の変電所/中継所を例とした提案手法と貪欲法の解
(2組の対向する変電所間の IP リレー情報を収容する場合)

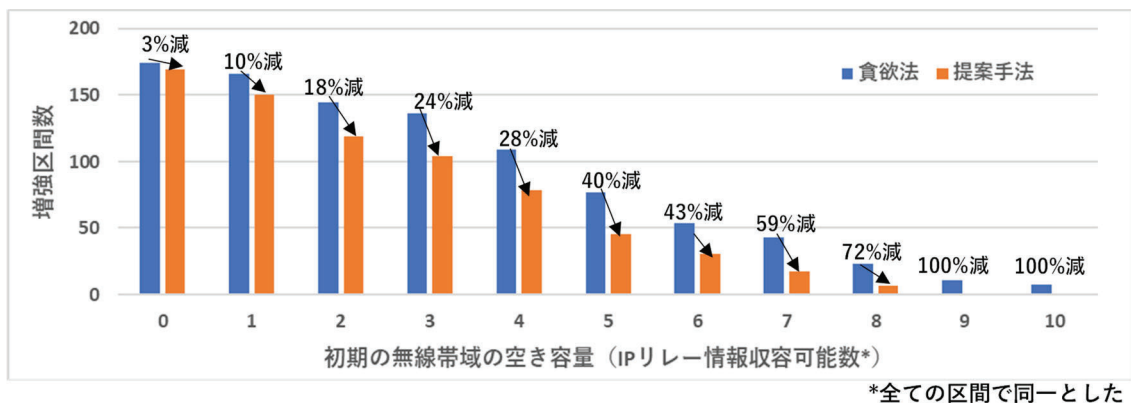


図2 提案手法と貪欲法の比較

換気量の増加がエアコン冷暖房運転時の室内温熱環境と エアコンの消費電力に与える影響の評価

安田 昇平*¹ 上野 剛*² 岩松 俊哉*²
宮永 俊之*³

キーワード：エアコン

換気

消費電力

室内温熱環境

シミュレーション

Key Words : Air Conditioner

Ventilation

Electric Power Consumption

Indoor Thermal Environment

Simulation

Evaluation of the Effect of Increased Ventilation Volume on Indoor Thermal Environment and Air Conditioning Power Consumption during Heating and Cooling Operations

Shohei Yasuda, Tsuyoshi Ueno,
Toshiya Iwamatsu and Toshiyuki Miyanaga

Abstract

Proper ventilation with window openings and exhaust fans is recommended as one measure to prevent infection. However, the general public may not be able to provide adequate ventilation due to concerns about the deterioration of the indoor thermal environment and the increased power consumption of air conditioners caused by ventilation. Therefore, the indoor thermal environment and air conditioner power consumption for various ventilation volumes are estimated using the indoor thermal environment design tool of CADIEE. First, the validity of CADIEE under conditions of increased ventilation is verified. Comparing the measured air conditioner power consumption to the CADIEE of calculation, the average relative error is 20.3%, indicating that CADIEE is valid as a calculation method. Next, we performed calculations for the LDK room of a standard single-family home. The results show that air conditioning power consumption increased by about 10% for cooling and 20% for heating under ventilation conditions of 220.3[m³/h] and by about 30% for cooling and 60% for heating under ventilation conditions of 440.7[m³/h]. The indoor thermal environment was maintained at the set temperature regardless of ventilation conditions.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員

*²グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

*³グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 副研究参事 副部門長 分野統括

背 景

感染症対策の一つとして、窓開けや換気扇等を利用した適切な換気が推奨されている。しかし、一般消費者は換気による室内温熱環境の悪化やエアコン消費電力の増加を懸念し、十分な換気を行わない可能性がある。適切な換気とエアコンによる良好な温熱環境の維持の両立を図るためには、換気量が室内温熱環境とエアコン消費電力へ及ぼす影響を適切な計算手法を用いて定量評価することが重要である。

目 的

換気量が室内温熱環境とエアコン消費電力へ及ぼす影響を当所開発の室内温熱環境設計ツール CADIEE^{注1)}で計算し、実測対比により CADIEE の妥当性を検証する。さらに、戸建て住宅を対象に、換気量が異なる場合の室内温熱環境とエアコン消費電力を試算する。

主な成果

1. 実測対比による CADIEE の妥当性の検証

試験用住宅（図 1）^{注2)}を対象に、換気量^{注3)}を変えた場合のエアコン冷暖房運転時のエアコン消費電力の実測値を CADIEE による計算値と比較した。その結果、エアコン消費電力の平均相対誤差は 20.3%（図 2）となり、概ね一致した。これにより、CADIEE が計算手法として妥当だと判断した。

2. 換気量が異なる場合の室内温熱環境とエアコン消費電力の試算

標準的な戸建て住宅^{注4)}の居間・食堂・台所を対象に、CADIEE による試算を行った（図 3）。換気条件については、台所の換気扇利用を想定した 3 ケースとした^{注5)}。この結果、エアコンの消費電力量は、換気による空調負荷の増加に伴い上昇し、換気量 220.3[m³/h]では冷房 1 割・暖房 2 割程度の増加、換気量 440.7[m³/h]では冷房 3 割・暖房 6 割程度の増加となった（図 4）。一方で、室内温熱環境は換気量に関わらず設定温度に維持された（表 1）。

今回の試算条件は換気量 220.3[m³/h]で厚生労働省が推奨している必要換気量^{注6)}を満たしていることから、上記程度の消費電力量の増加で室内温熱環境をエアコンの設定温度に維持できることが示唆された。

注 1) 当所開発の多数室を対象とする熱回路（質点）計算プログラム。年間熱負荷計算の国交大臣認定（2009）。

注 2) 当所赤城試験センター内の環境試験室内には断熱性能が異なる平屋建て住宅が建設されており、本研究では旧省エネ基準住宅と次世代省エネ基準住宅の 2 棟を用いた。

注 3) 換気量は排気側に設定したファンの風量設定（3 段階：停止／弱設定／強設定）で調整を行う。

注 4) 出典：国土交通省国土技術政策総合研究所・建築研究所監修 平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅。p612. (2013)

注 5) 旧省エネ基準住宅の自然換気量相当の換気量 110.2[m³/h](1.5[回/h])を基準に、人が居間・食堂・台所に滞在する間は台所の換気扇利用を想定し、弱設定 220.3[m³/h](3.0[回/h])、強設定 440.7[m³/h](6.0[回/h])の換気量とした。

注 6) 機械換気：1 人あたり 30[m³/h]、窓開け換気：1 時間に 2 回以上

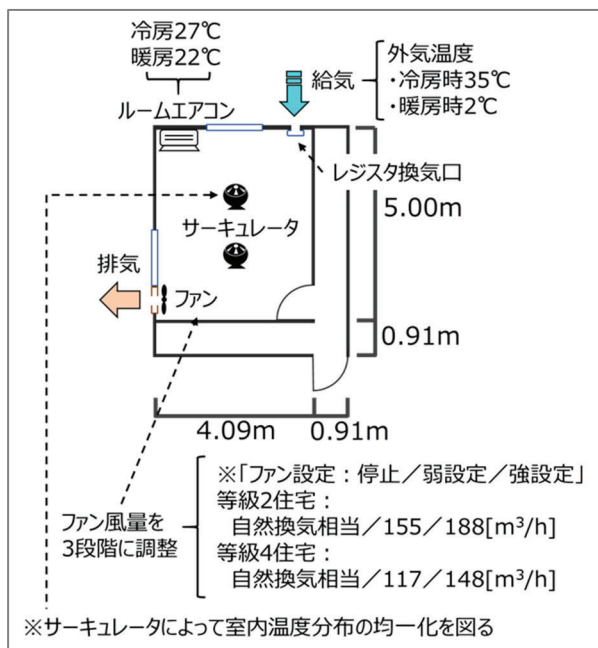


図1. 試験用住宅の平面図

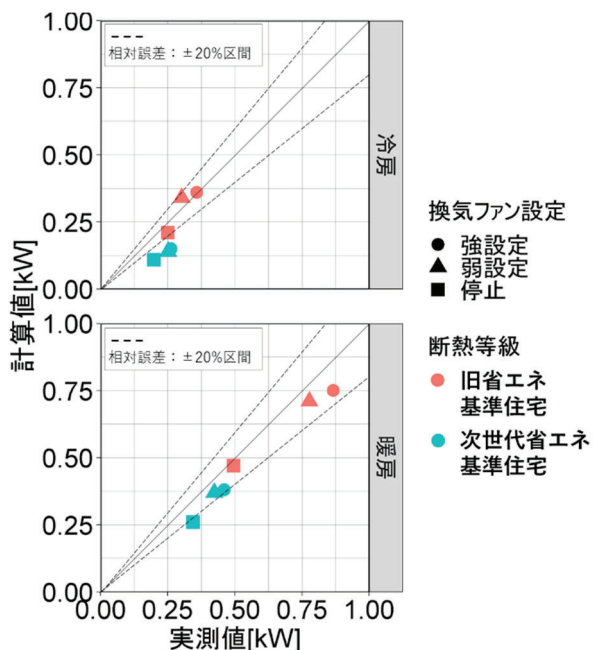


図2. エアコン消費電力の実測値と計算値の比較
※相対誤差 = (|計算値 - 実測値| / 実測値)

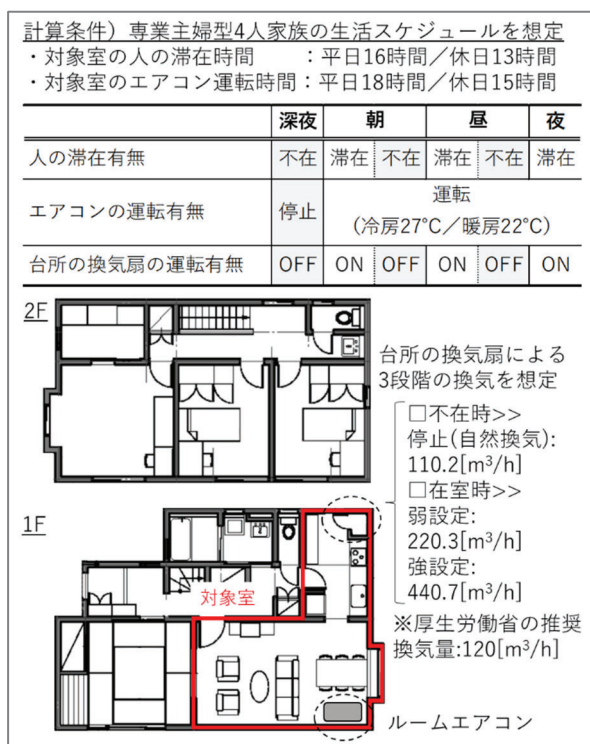


図3. 計算用戸建て住宅の間取り図と計算条件

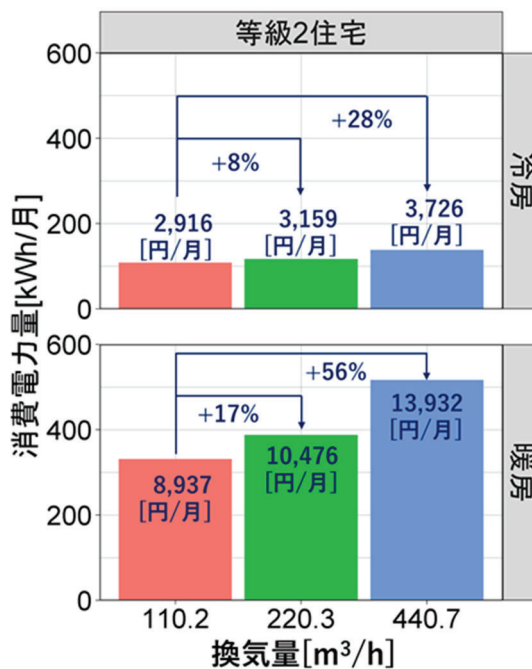


図4. エアコンの消費電力量の計算結果
(東京, 旧省エネ基準住宅)
※電力単価は27円/kWhで計算

表1. エアコン定常運転中の室内温度の計算結果 (東京, 旧省エネ基準住宅)

換気量[m³/h]	8月最暑日			1月最寒日		
	110.2	220.3	440.7	110.2	220.3	440.7
最高温度[℃]	27.4	27.4	27.4	22.2	22.2	22.5
平均温度[℃]	27	27	27	22	22	22
最低温度[℃]	26.8	26.8	26.7	21.8	21.9	21.5

住宅のエネルギーに関するレジリエンス性向上のための調査 －自然災害による長期停電時の困りごとの把握－

安岡 絢子*¹ 向井 登志広*² 上野 剛*³ 宮永 俊之*⁴

キーワード：住宅レジリエンス性

長期停電

困りごと

アンケート

インタビュー

Key Words : Resilience of homes

Long-term power outage

Problem

Questionnaire

Interview

Research to improve the energy resilience of homes -Troubles during long-term power outages due to natural disasters-

Ayako Yasuoka, Toshihiro Mukai, Tsuyoshi Ueno and Toshiyuki Miyanaga

Abstract

As the electrification rate is expected to increase toward carbon neutrality, it is necessary to improve the energy resilience of homes, taking into account the risk of power outages due to natural disasters. In order to achieve this, it is essential to understand the actual conditions, such as problems that occur during power outages and changes in awareness due to power outages.

So we conducted the questionnaire and interview. The main results are as follows: Subjects (38 interviewees and 574 questionnaires) who experienced long-term power outages due to disasters (earthquakes, typhoons, snow damage) were asked their problems in the long-term power outages. Most of the subjects chose refrigerators/freezers, lighting, hot water supply etc. The reason for the selection of problems was the damage to foodstuffs in refrigerators and freezers, and health concerns such as heat stroke in air conditioners. On the other hand, the responses on equipment indicated that, from the standpoint of cost-effectiveness, equipment that can be used not only during emergencies but also during normal times and that can ensure sufficient rated output during power outages is desired. In addition, it was shown that it is important to provide information on home appliances and power supply equipment and their use according to each household's lifestyle.

*¹グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員

*²社会経済研究所 主任研究員

*³グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

*⁴グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 副部門長 副研究参事

背景

カーボンニュートラル実現に向け電化率上昇が見込まれる中、自然災害による停電リスクを考慮した住宅のエネルギーに関するレジリエンス性向上が必要である。このためには、停電時の困りごとや停電による意識変化といった実態把握が不可欠である。しかし、被災状況が異なる様々な災害種別に対し、広範囲を調査した例は見当たらない。

目的

直近6年以内の大規模な自然災害^{注1)}による長期停電経験者^{注2)}を対象に、Webアンケートとインタビューを行い、長期停電時の困りごとや、レジリエンス性に関わる設備^{注3)}に対する意識等を調査し、現状の課題を整理する。

主な成果

1. 長期停電時の困りごと調査

- a) アンケート調査結果 (574名) : 全災害種別において、冷蔵庫・冷凍庫に関する困りごとが最も多く、照明、給湯、テレビ・ラジオ等が上位に並んだ。また、台風時にエアコンを困りごととする回答が地震に比べて多かったが、この要因として、災害が発生した地域(寒冷地と温暖地)や時期(夏期と中間期)の違いが影響したと推察される(図1)。
- b) インタビュー調査結果 (38名) : 主な困りごととその選択理由の回答を整理した(表1)。選択理由として、冷蔵庫・冷凍庫は食材の傷み、エアコンは熱中症等の健康不安が挙げられた。また、エコキュートからお湯を取り出した例があった一方で、取り出せることを知らず、情報不足により設備を活用できていない場合もあった。

2. 困りごとの整理と今後の課題

調査結果に基づき、困りごとを「不快」、「不安」、「不便」の3つに分類し、家電機器等との関連性を整理した(図2)。また、設備に関する回答結果から、図2に示した家電機器を停電時にも活用できることや、停電時に必要な給電設備(蓄電池や発電機)が望まれていることが示された。しかし、給電設備を購入するか否かは、費用対効果を重視していることも明らかとなった。さらに、各家庭のライフスタイルに応じた家電機器や給電設備、それらの利用に関する情報提供が重要であることが示された。

今後の展開

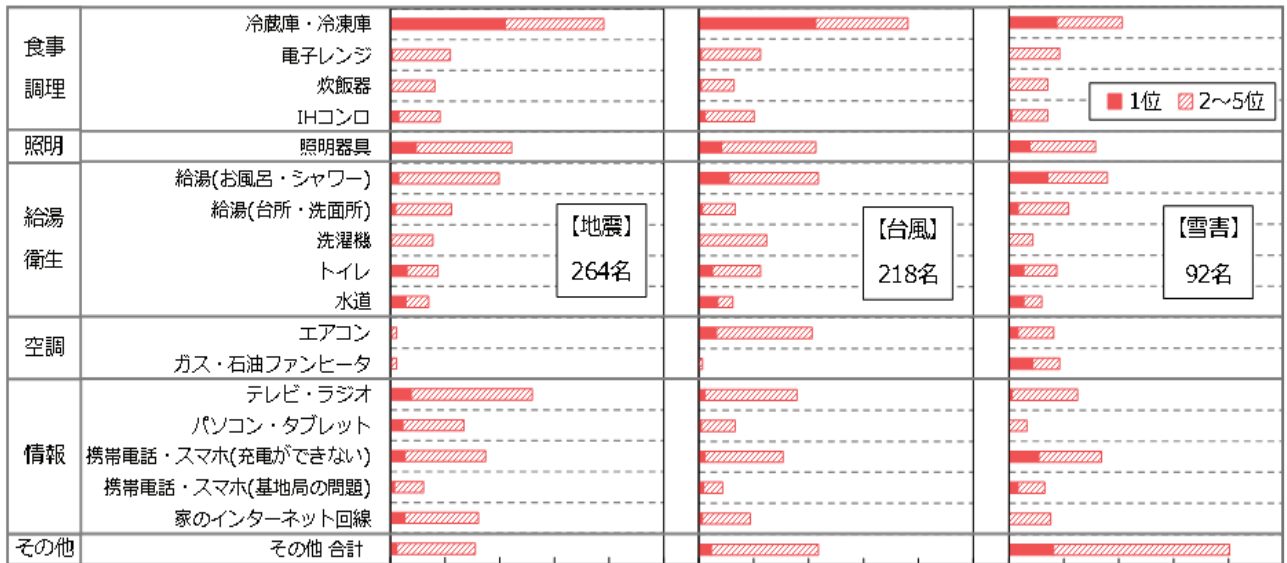
引き続き、困りごとや設備機器の調査を行い、停電時の困りごとの解消に必要な情報提供のあり方や、給電設備を含めた住宅のレジリエンス性を評価する手法を検討する。

注1) 地震:熊本地震(2016.4)・北海道胆振東部地震(2018.9)/台風:台風21号・24号(2018.9)・台風15号・19号(2019.9・10)

雪害:新潟雪害(2020.12)、北陸雪害・秋田雪害(2021.1)、その他雪害(6年以内)雪害インタビューは秋田雪害のみ

注2) 24時間以上(一部12時間以上)の長期停電経験者とし、オール電化住宅と電気ガス併用住宅を同程度とした。

注3) 太陽光パネル発電、蓄電池、発電機、電気自動車等、オール電化住宅の意識等について回答を得た。



横軸：各災害種別における回答割合(%) 0 20 40 60 80 100 0 20 40 60 80 100 0 20 40 60 80 100

図1 アンケート調査から得られた災害による長期停電時の困りごと（各対象者の1～5位の選択結果）

表1 インタビュー調査から得られた困りごとの選択理由（一部抜粋）

困りごと	選択した理由	対処方法	その他意見や情報
冷蔵庫 冷凍庫	<input type="checkbox"/> 食材が傷む/冷凍品が溶ける <input type="checkbox"/> 腐敗臭 <input type="checkbox"/> 廃棄の必要	<input type="checkbox"/> 傷みややすいものから消費/クーラーボックスへ移動 <input type="checkbox"/> 日中はPVから給電 <input type="checkbox"/> 対処できず廃棄した	<input type="checkbox"/> 傷んでいく食品を見るのは悲しく、精神的に辛かった
給湯 入浴	<input type="checkbox"/> お風呂を沸かせない <input type="checkbox"/> シャワーできない <input type="checkbox"/> 洗髪できない	<input type="checkbox"/> 水シャワー/別で沸かした湯を水と混ぜて行水・洗髪 <input type="checkbox"/> エコキュートからお湯を取り出してシャワー <input type="checkbox"/> 入浴せずに済ませた	<input type="checkbox"/> エコキュートからお湯を出すという発想がなく、停電なので使えないと思っていた
エアコン (冷房)	<input type="checkbox"/> 暑さ(つらい・イライラ) <input type="checkbox"/> 汗などの不快感 <input type="checkbox"/> 寝苦しい、寝付けぬ <input type="checkbox"/> 熱中症不安(高齢者、乳幼児・ペット)	<input type="checkbox"/> うちわ/窓を開ける/服を着替える <input type="checkbox"/> 車中でエアコン利用/自宅外の施設などへ出掛けて涼む <input type="checkbox"/> PVやUSB充電で扇風機 <input type="checkbox"/> 発電機でエアコン(ごく一部) <input type="checkbox"/> 対処できずじっと耐えた	<input type="checkbox"/> 北海道では旭川、札幌、帯広などの暑い所はエアコンを付けている人が多いが、それ以外はない家が多い(北海道) <input type="checkbox"/> 地震の頃から年々夏は気温が上昇し、暖房と併用で使えるので購入した(北海道)
エアコン他 (暖房)	<input type="checkbox"/> 寒い(つらい) <input type="checkbox"/> 健康不安、命の危険(特に寒冷地)	<input type="checkbox"/> 反射式、薪、カセットガストーブ(電気非使用器具) <input type="checkbox"/> リビングに集まり、ガスで湯を沸かし部屋を暖める <input type="checkbox"/> 現状はエアコンしかなく、対処できない	<input type="checkbox"/> (台風・地震の対象者) <input type="checkbox"/> 冬であれば困っただろう
スマホの 充電	<input type="checkbox"/> 充電が切れた <input type="checkbox"/> 充電が切れそう	<input type="checkbox"/> モバイルバッテリー/車(シガーソケット)で充電 <input type="checkbox"/> 避難所や通電地域にある勤務先などで充電	<input type="checkbox"/> 東日本大震災等からの教訓でモバイルバッテリーは購入していた

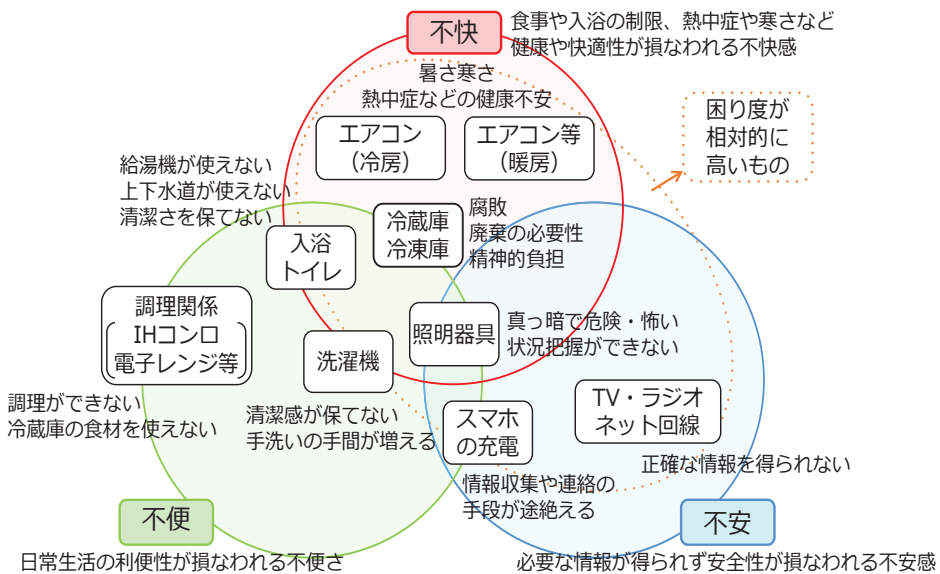


図2 困りごとの3分類

電気自動車の熱管理システムに関する研究開発 —熱管理システムのコンセプトモデルの提案—

張 莉^{*1}

キーワード：電気自動車
熱管理システム
空調
バッテリー
ヒートポンプ

Key Words : Electric vehicle
Thermal management system
Air-conditioning
Battery
Heat pump

Study on thermal management system of electric vehicles - Proposal of a conceptual model of thermal management system-

Li Zhang

Abstract

Thermal management system (TMS) is one of the important technologies to keep the comfortability of cabins, ensure the cruising distance of electric vehicles (EVs), increase the safety and lifecycle of batteries, et al.. Generally, the cabin, battery, motor and inverter of EVs should be adjusted under an appropriate temperature range. In this study, we firstly investigated current technologies about TMS from open available literatures. Based on these investigation results, issues were extracted and some kinds of improvement methods were proposed. There are some issues about the cabin heating operation, defogging of the front glass, battery cooling operation, and so on. Condensate water recovery, heat recovery, desiccant dehumidification and battery thermal storage methods were proposed in this study. Here, a novel conceptual model of thermal management system for EVs was proposed, in which the cabin and battery are cooled or heated by the heat pump, motor and inverter are cooled by the radiator. Furthermore, these proposed improvement methods are also adopted in the conceptual model of the TMS.

Future works will be carried out under the three steps: proposal of a novel TMS; performance analysis of the TMS via cycle simulation; performance evaluation of the TMS by utilizing the actual driving and charging data of EVs.

^{*1}グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

背景

短い航続距離や長い充電時間などの電気自動車（EV）の課題が、大容量バッテリーの搭載や高出力充電器の整備によって解決に向けて確実に進んでいる。さらにEVの商品価値を高めるために、後回しにされていた熱管理が重要な技術として位置付けられ始めている。熱管理には、バッテリーや、インバータ、モータなどを最適に温度制御しつつ、快適な車内温熱環境を実現する、省電力な熱管理システムが必要である。

目的

EVに関する現行の熱管理技術を調査し、課題を抽出する。課題解決の対策とそれらを統合する省電力な熱管理システムのコンセプトモデルを提案する。

主な成果

1. 現行熱管理技術の課題

EVでは、図1に示す多様な要因や条件に対応した熱管理が求められる。これらに対する現行技術を調査の上、整理した（表1）。主要な課題を以下に述べる。

- 課題1：車室冷房中の凝縮水の発生（表1のa）。
- 課題2：車室暖房、ガラス防曇とバッテリー冷却による消費電力の増加（表1のb,d,e）。
- 課題3：ヒートポンプ（HP）除霜による車室暖房の一時停止（表1のc）。

2. 熱管理システムのコンセプトモデル

現行技術の課題解決の対策（表2）とそれらを統合する省電力な熱管理システムのコンセプトモデル（図2）を提案した。

- 熱管理システムを「熱管理対象」、「熱管理機器」、「エネルギー源」に整理することで、類似温度の熱源や熱機器、熱利用を集約する。
- 車室とバッテリーは最適温度が近いため、同一の熱管理機器（HP）で温度調節する。
- インバータとモータは許容温度が近いため、同じラジエータを利用して冷却する。
- 車室冷房中に発生する凝縮水を活用したバッテリー冷却（図2の①）、バッテリーやインバータ、モータの発熱で車室暖房（図2の②）、バッテリーに蓄えられた熱でHP除霜（図2の③）、吸着剤で水蒸気を除去しガラス防曇（図2の④）の対策も取り入れた。

今後の展開

熱管理システムを構築した上で、計算モデルと計算プログラムを作成し、サイクルシミュレーションによる性能分析を行う。

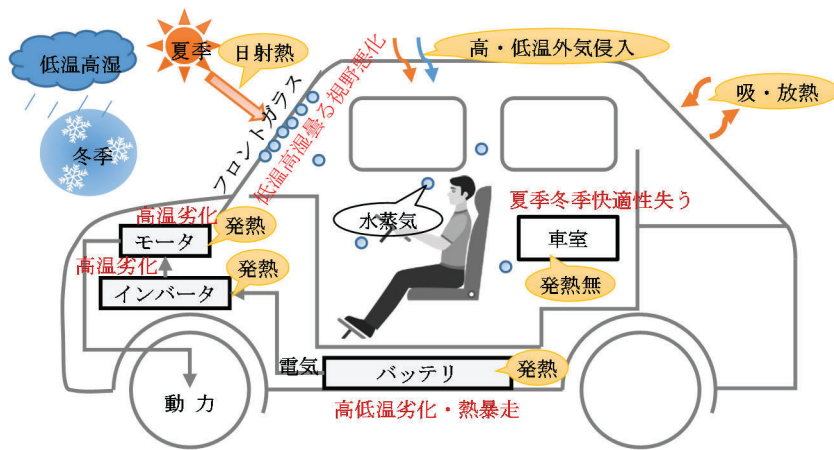


図1 EVの熱管理の必要性

表1 現行熱管理技術と課題

対象	天候	熱処理ニーズ	熱処理機器	課題	原因
車室	夏季	侵入高温熱除去(冷房)	HP or AC	凝縮水発生 ^a	高負荷、低風量、コンパクト熱交換器
	冬季	侵入低温熱除去(暖房)	HP or ヒータ	電力消費量大きい ^b HP除霜・暖房停止 ^c	加熱源無し 外気中の水蒸気
	低温高湿	水蒸気除去(防曇)	HP or ヒータ	電力消費量大きい ^d	車室内の水蒸気
バッテリー	オールシーズン	発熱除去(冷却)	HP or AC	電力消費量大きい ^c	バッテリーの温度特性： 高温性能低下、熱暴走、 低温劣化
	冬季	昇温(加熱)	HP or ヒータ	電力消費量大きい	
モータ・インバータ	オールシーズン	発熱除去(冷却)	ラジエータ	特に無い	HP：ヒートポンプ AC：冷却専用空調機

表2 課題に対する対策案

課題	対策案
^{a,c} 車室・夏季・冷房の、凝縮水とバッテリー冷却電力消費量大きい	① 凝縮水を活用してバッテリー冷却、省電力
^b 車室・冬季・暖房の、電力消費量大きい	② バッテリー・モータ・インバータの発熱で暖房、省電力
^c 車室・冬季・暖房の、ヒートポンプ除霜・暖房停止	③ バッテリーに蓄えられた熱でHP除霜、暖房停止防ぐ
^d 車室・低温高湿・防曇の、電力消費量大きい	④ 吸着剤で水蒸気を除去して防曇、省電力

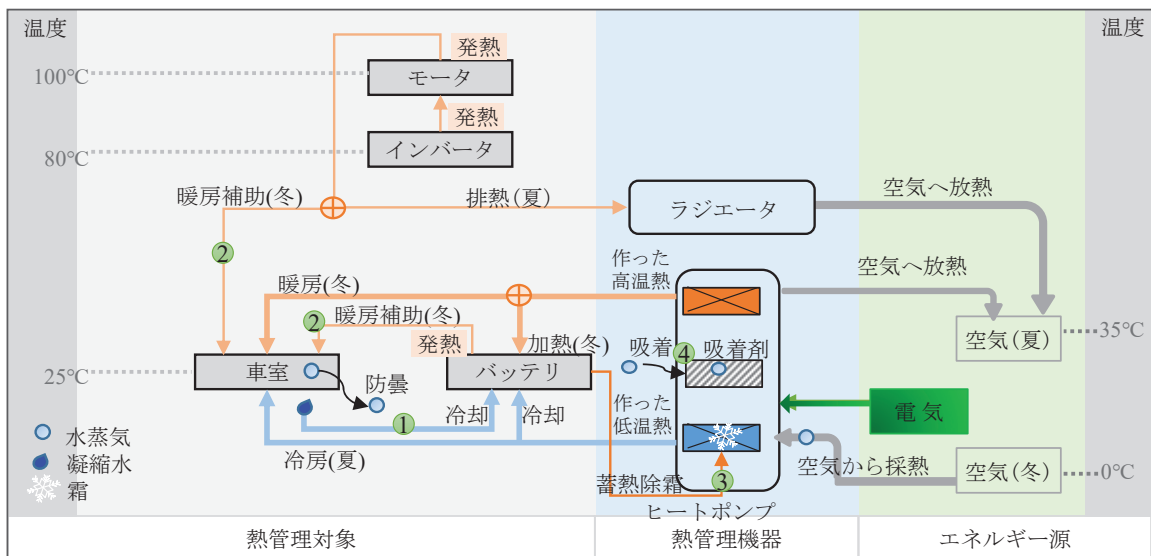


図2 熱管理システムのコンセプトモデル

全国町丁字別の PV 導入量を考慮した 地域レベルの電力需要カーブの推定手法の構築

上野 剛^{*1}

キーワード：太陽電池発電
電力需要
統計データ
地理情報システム

Key Words : Photovoltaic System
Electric Power Demand
Statistical Data
Geographic Information System

Development of a method for estimating electricity demand curves at the regional level considering the amount of PV installed in each town in Japan

Tsuyoshi Ueno

Abstract

In recent years, the installation of PV power generation systems has been increasing and has had a significant impact on the electricity curve. To promote decarbonization and the spread of regional grids, PV installations are expected to continue to grow in popularity. To ensure reliability of electricity supply and promote efficient decarbonization, it is necessary to estimate PV generation at the regional level in detail, such as towns and villages, and demand curves that take PV generation into account. In this study, public data on non-residential PV installations were organized by region and compiled into a database. And a method for estimating electricity demand curves at the regional level considering the amount of PV installed was developed. Finally, calculations were conducted for areas with large PV installations.

^{*1} グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

背景

近年、太陽光発電設備(PV)の導入が進み、需要カーブ¹⁾に大きな影響を与えている。脱炭素の推進や地域グリッドの普及に向けて PV の普及は今後も進むと考えられるが、電力供給の信頼性確保や効率的な脱炭素の推進のためには、町丁字等の詳細な地域レベルでの PV 発電量や、PV 発電量を考慮した需要カーブの推定を行う必要がある。

目的

FIT 認定情報²⁾の非住宅用の PV 導入量に関する公開データを地域別に整理し、地域レベルでの PV 発電量及び需要カーブの推定手法を構築する。また PV 大量導入地域を対象に試算を行う。

主な成果

1. 地域レベルでの PV 発電量及び需要カーブの推定手法の構築

FIT 認定情報の住所を正規化・集計し、都道府県・市区町村・町丁字レベルの年別の非住宅用の PV の累積導入量を整理した。PV の導入量は地域によって大きく異なっており、PV が最も多く導入されているのは世帯密度が 100 軒/km²程度の市区町村であることが分かった(図 1)。世帯密度が高い都市部では設置できる地点が少なく、また山間部等の非常に低い地域でも導入されにくいと考えられる。

また上記に整理した地域別の PV 導入量と、当所開発の需要シミュレーションツール³⁾中の単位容量あたり発電量推定機能を用いて、地域内の PV 発電量カーブの推定手法を構築した(図 2)。本手法による PV 発電カーブと、既往ツールで算出される住宅・事業所の消費電力カーブを合成することによって、地域全体の需要カーブを推定することが可能となる。

2. PV 大量導入地域を対象とした需要カーブの試算

群馬県内の全 2,400 余の町丁字を対象に電力需要カーブの試算を行った⁴⁾。図 3 に PV 導入前(2012 年)に対する PV 導入後(2021 年)の比率を示す。前橋市や高崎市の中心部等、元々の需要が大きく PV が導入されにくい地域では変化が小さく(暖色)、郊外地域で変化が大きかった(寒色)。また群馬県内の複数の町丁字における PV 導入量に基づき需要カーブを試算したところ(図 4)、2012 年には朝から日中にかけてピークがあったが、PV の導入によって徐々に昼間の需要が下がり、地域によっては 2020 年には昼間の需要が逆潮流側に大きく振れることが示された。

今後の展開

地域を対象とした脱炭素や地域グリッドの導入シナリオに関する定量分析を行う。

- 注 1) 本報告では、住宅や事業所での消費電力(電力負荷)に加え、需要家サイドに設置された分散型発電による発電も含めて需要と呼んでいる。すなわち、需要=消費(負荷)-発電と定義している。
- 2) ここでは、経済産業省による、再生可能エネルギー発電事業計画の認定情報を指す。20kW 以上の PV 設備について、発電設備出力、所在地、認定日等が公開されている。
- 3) 関連する電中研報告として R15006、C16003、C18003、C19004、C20010 がある。
- 4) 簡単のため、住宅の世帯ごと消費電力カーブは当該市町村の平均カーブを用い、各町丁字の世帯数を乗じることで町丁字の住宅用消費電力カーブを推定した。また PV 導入量による差異を見ることを目的としており、ここでは住宅・事業所の消費電力カーブは年によらず同じとしている。

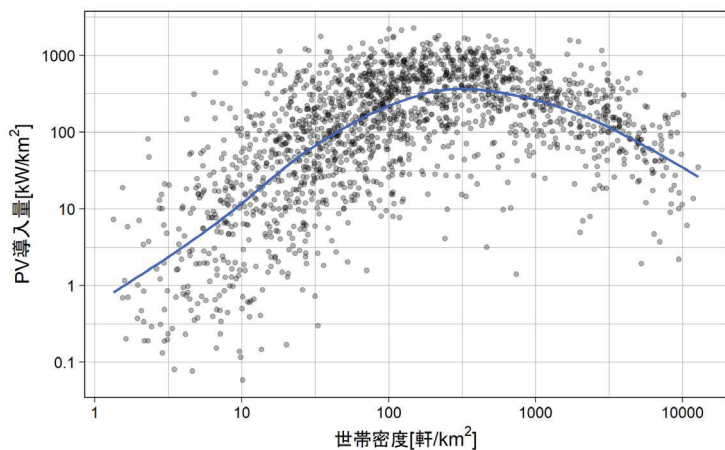


図1 各市区町村の世帯密度と導入量の関係

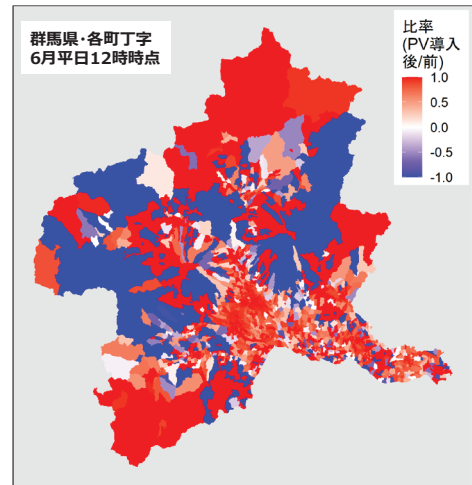


図3 PV導入前後の電力需要の比率 (2012年から2021年の変化)

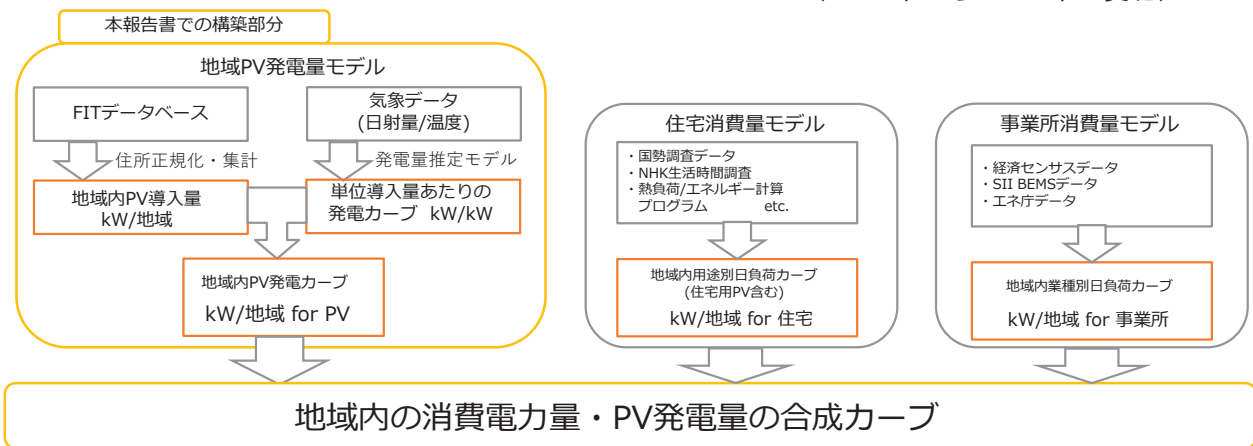


図2 地域レベルでのPV発電量及び需要カーブの推定の流れ

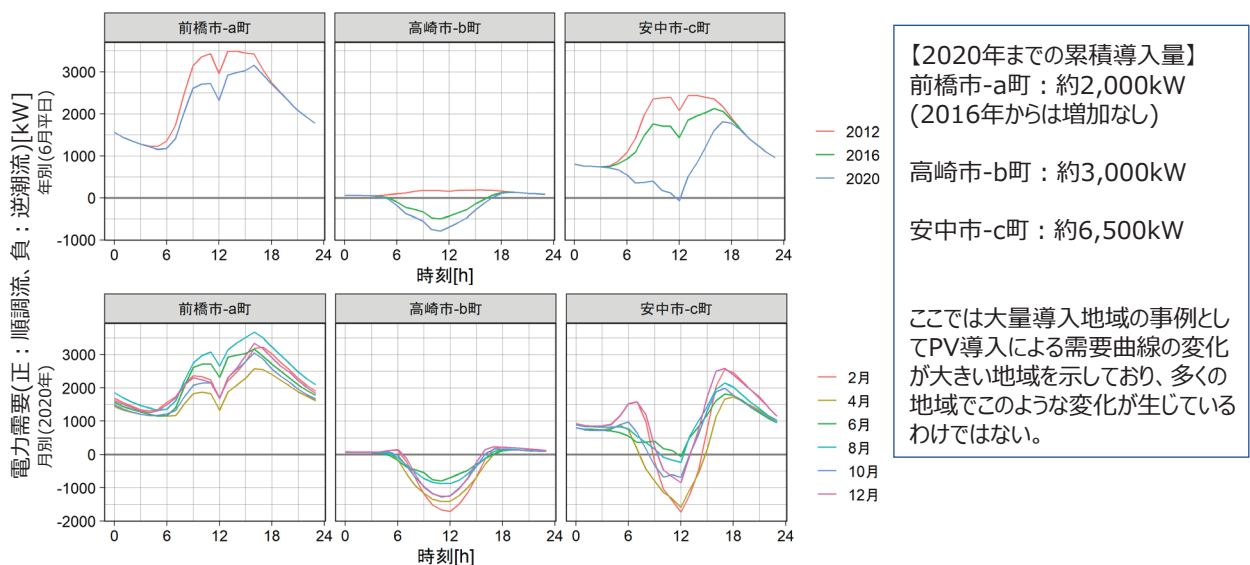


図4 PV大量導入地域を対象とした需要カーブの試算例 (6月平日の合成需要カーブの経年変化と2020年時点の月別の各計算値)

関連報告書：

C20010 「需要シミュレーションツールによる地域レベルの家庭用ガス・灯油消費量の算出」(2021.3) 他

人感センサを備えたエアコンの空気流制御 機能が室内温熱環境へ及ぼす影響の把握

上野 剛^{*1} 安田 昇平^{*2} 宮永 俊之^{*3}

キーワード：家庭用エアコン
住宅
性能評価
室内温熱環境

Key Words : Room Air Conditioner
Residential Building
Performance Evaluation
Indoor Thermal Environment

The Influence of Airflow Control Function of Air Conditioners with Human Sensor on Indoor Thermal Environment

Tsuyoshi Ueno, Shohei Yasuda and Toshiyuki Miyanaga

Abstract

In order to promote energy saving and improve thermal comfort during air conditioner operation, it is expected to use control functions of air conditioners such as human sensing. In this study, a method to continuously measure the direction of flaps and louvers of an air conditioner was developed to understand the behavior of the air conditioner in response to differences in the position of the person in the room. As a result, it was confirmed that the direction of the flaps and louvers changed depending on the control type of the motion sensor function and the position of the person. In addition, we conducted heating and cooling tests under different flap and airflow conditions in test houses with different insulation performance to understand the indoor temperature distribution. As a result, it was confirmed that the larger the airflow rate, the smaller the temperature difference between the top and bottom of the room for both cooling and heating in all insulation-grade houses.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員
*2 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員
*3 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 副研究参事

背景

エアコン運転時の省エネ推進と温熱快適性の向上のため、人のセンシング等のエアコンの制御機能が利用されているが、制御機能利用の効果について評価・試験方法が明確な、客観性のある事例は公開されていない。そこで前報¹⁾では暖房運転時の人感センサ機能利用による室内温熱環境の向上効果を評価した。一方、エアコン自体が空気の流れを制御するフラップ及びルーバーの向きや吹出風量等の挙動は把握できておらず、それらの挙動と室内温熱環境との関係も十分に把握されていなかった。

目的

エアコンのフラップ・ルーバーの向きを連続測定する手法を構築し、在室者位置等の差に対するエアコンの空気流制御の挙動を把握する。また試験用住宅群²⁾において冷暖房試験を行い、フラップの向き及び吹出風量が室内温度分布へ与える影響を把握する。

主な成果

1. フラップ・ルーバー向きの測定手法の構築

画像解析を用いてエアコンのフラップ・ルーバーの向きを連続的に測定する手法を構築し(図 1)、試験用住宅(図 2)において同手法を用いて、人感センサ機能利用時に室内の在室者の位置移動に追従してルーバーの向きが変わることを確認した(図 3)。

2. 人感センサ機能及び空気流制御機能利用が室内温熱環境へ与える影響の実態把握

人感センサ機能の制御種別と人の位置を変えた冷房運転試験²⁾を行い、各住宅でのエアコンの挙動及び室内温度分布を計測した。人感センサ機能の制御種別・人の位置によってフラップやルーバーの向きが変わることが確認された。またどの住宅においても人感センサ機能オフの場合には設定温度よりも低かった室内温度が人感センサ機能を使用すると上昇し(図 4)、エアコンの消費電力が低下することが確認された。

エアコンのフラップの向き及び吹出風量を変えた冷暖房運転試験³⁾を行い、各住宅での温度分布を計測した。冷暖房ともに、どの断熱等級住宅においても、風量が大きくなるほど上下の温度差が小さくなること(図 5)、また冷房と暖房で挙動が異なり、冷房では風量弱の場合には運転開始時の室温が高い時間に置いても消費電力が 500W 程度に留まっていること(図 6)が確認された。

- 注 1) 異なる断熱性能(等級 2 住宅(旧省エネ基準相当)、等級 4 住宅(次世代省エネ基準相当)、HEAT20 住宅(HEAT20 G2 相当))を持つ試験住宅 3 棟(平屋建、リビングダイニング室+廊下)。断熱性能は等級 2 が最も低く、等級 4、HEAT20 の順に高くなっている。試験住宅群は温度制御された環境試験室内に設置されている。
- 2) エアコンは定格冷房能力 3.6kW の代表的な 1 機種、設定室温は 24℃とし、外気温は 35℃に設定した。人感センサ機能は「風あて」「風よけ」及び「人感オフ」とし、人の位置を 3 箇所変更して試験を行った。
- 3) エアコンのフラップ及び風量はそれぞれ 3 段階(フラップ: 上向き、中央、下向き、風量: 弱・中・強)とし、ルーバーは 1 段階(中央)とし、人感センサは「機能オフ」とした。設定温度は冷房時 24℃/暖房時 22℃とし、外気温は冷房時 35℃/暖房時 7℃に設定した。

関連報告書:

[1]C20007「エアコン暖房時の快適性向上のための人感センサ及びサーキュレータの利用に関する基礎検討」(2021.03)

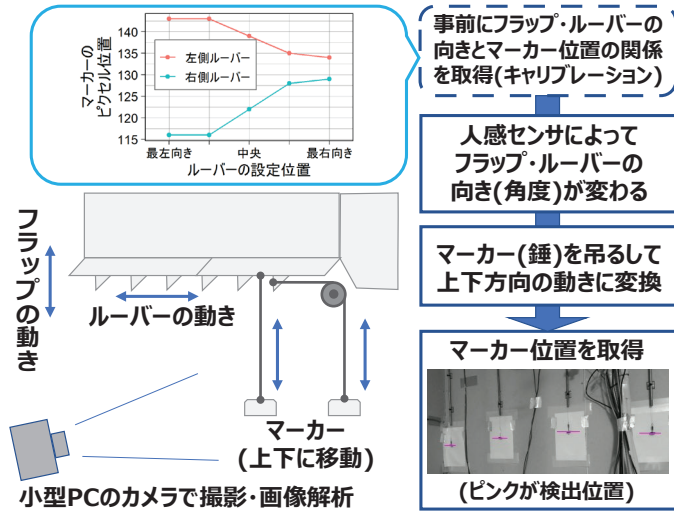


図1 エアコンフラップ・ルーバー向きの連続測定手法の概要

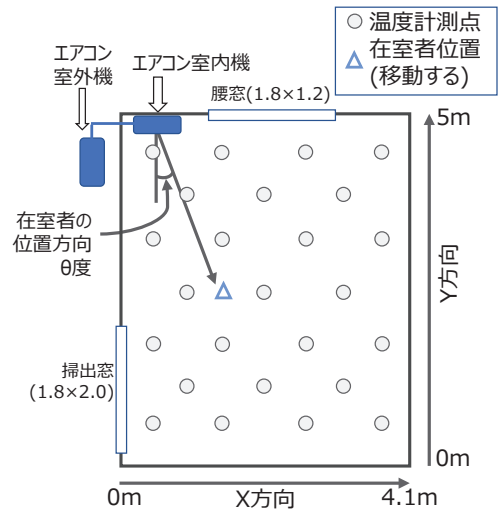


図2 試験用住宅のリビングダイニング平面図

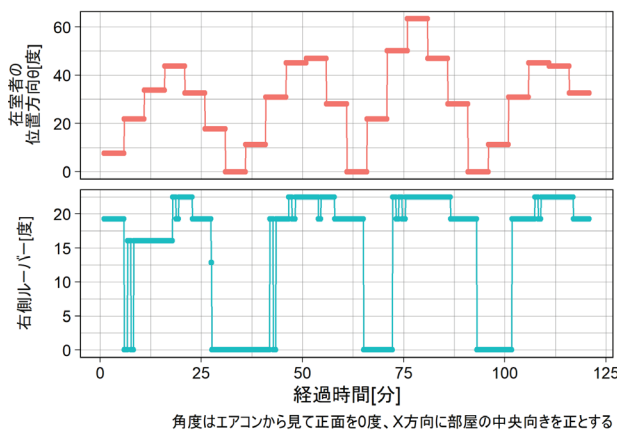


図3 人感センサ機能利用時(冷房、風あて)の人の位置とルーバー向き

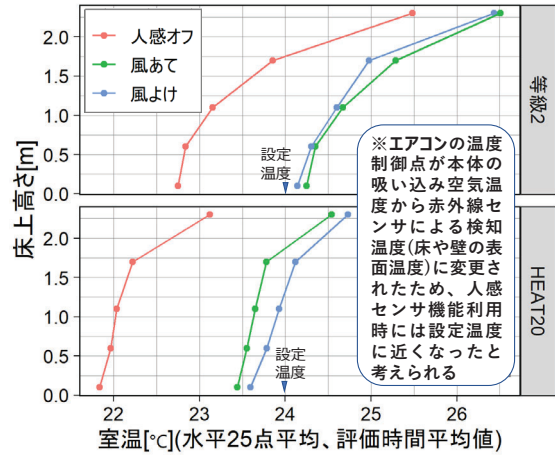


図4 人感センサ種別による室内の室内の上下温度分布の差異(冷房試験)

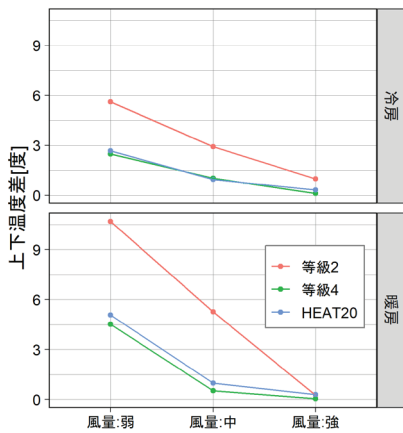


図5 吹出風量と上下温度差の関係(フラップは冷暖房ともに最下向き)

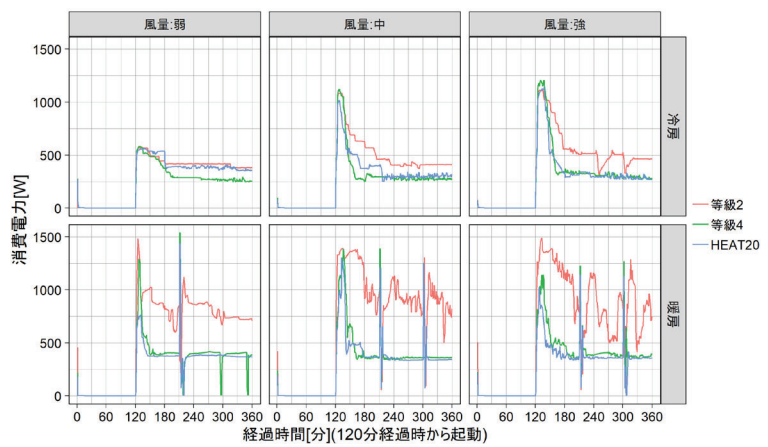


図6 吹出風量ケースごとの消費電力の経時変動(フラップは冷暖房ともに最下向き)

建物内の多様な温熱環境を模擬可能な快適性試験室の開発 その3 エアコン暖房環境の再現手法と妥当性の検証

宮永 俊之*¹ 上野 剛*² 岩松 俊哉*² 安岡 絢子*³ 安田 昇平*³

キーワード：不均一温熱環境
温熱快適性
エアコン暖房
温熱環境再現

Key Words : Non-uniform thermal environment
Thermal comfort
Air-conditioning heating
Reproduction of thermal environment

Development of a comfort test room that can simulate various thermal environments in a building Part3: Reproduction method of air conditioning heating environment and validation of the method

Toshiyuki Miyanaga, Tsuyoshi Ueno, Toshiya Iwamatsu, Ayako Yasuoka
And Shohei Yasuda

Abstract

It is necessary to evaluate thermal comfort by taking into account the unevenness of vertical air temperature, which is considered to be a cause of dissatisfaction with the heating environment, and the non-uniformity of window and perimeter wall temperatures. Therefore, we have constructed a comfort test room that can simulate non-uniform thermal environments, and have prepared an environment that can evaluate the thermal effects on the human body from both experiments and numerical simulations.

In this report, we have developed a method of reproducing a thermal environment in the test room that is equivalent to that of an air-conditioned heating environment. By using thermal mannequins and simulations, we controlled the test room so that the vertical temperature distribution near the mannequins and the amount of heat dissipated by each part of the mannequins in the test room would be the same as those in the air-conditioned heating environment. Four different air-conditioned heating environments were reproduced in the test room. The results of the comparison between the target and the reproduction of the upper and lower temperature distributions and the amount of heat dissipation showed a good agreement between them, and the validity of the method was verified.

*¹ グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 副研究参事

*² グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 上席研究員

*³ グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員

背景

住宅分野でのエネルギー使用量の 3 割を占める暖房の省エネを進めるには、生活者の温熱快適性への配慮が不可欠である。このためには暖房時の室内温熱環境（以降、暖房環境）の不満の原因とされる空気の下上温度ムラや、窓や周壁温度の不均一性を考慮して温熱快適性を評価する必要がある。そこで、不均一な温熱環境を模擬可能な快適性試験室（以降、試験室）^{注1)}を構築し、人体が不均一な温熱環境から受ける熱影響を実験と数値シミュレーション両面から評価できる環境を整えてきた^{[1][2]}。

目的

現実の室内空間の多様なエアコン暖房環境を、試験室内に再現する手法を開発する。さらに、実験により、手法の妥当性を検証する。

主な成果

1. 多様なエアコン暖房環境を試験室内に再現する手法の開発

サーマルマネキン（以降マネキン）^{注2)}とシミュレーション^{注3)}を活用したエアコン暖房環境の再現手法を開発した（図 1）。試験室でのマネキン近傍の上下温度分布と部位ごとの放熱量（放射、対流）が、現実の室内空間（模擬室）の目標値と同じになるよう試験室を制御し、再現を図る。本手法の特徴は、放射による放熱量をシミュレーションで解析し、放熱量を放射と対流に分離して評価できるようにしたこと（図 1 の「特徴 1」）に加え、専用の調整用インターフェースにより再現途中の状況を視覚的にリアルタイム把握できるようにし（図 1 の「特徴 2」）、再現精度の向上と調整の効率化を同時に図った点にある。

2. 再現手法の妥当性の検証

異なる 4 ケースのエアコン暖房環境を試験室内に再現した（図 2）。マネキン近傍の上下温度分布と部位ごとの放熱量の目標値と再現値を比較したところ、前者は各ケースとも 0.5℃以内の差で一致し、後者は最大差が放熱量の総量で 3%、放射による放熱量 5%、対流による放熱量 19%であった（図 2 の「ケース 3 の再現結果」）。対流による放熱量の差が若干大きいですが、エアコン風量の強弱の違いで生じる放射と対流による放熱量の大小関係をよく再現できており、再現手法は概ね妥当と判断できる。

今後の展開

試験室の温熱環境の再現精度の向上を図るとともに、床暖房環境等も再現可能にする。さらに、本試験室における被験者による温熱快適性評価に着手する。

注 1 壁に設置した 12 枚の放射パネルと上下 2 段の空気回転流を組み合わせ、多様な不均一温熱環境を形成できる。

注 2 内蔵ヒータとマイコンで人体発熱を模擬し、部位ごとの放熱量（放射+対流（本報告））を計測する装置。本報告では着衣なし（裸体）、表面温度を 32.6℃に維持した状態で使用した。

注 3 当所開発の住宅用室内温熱環境設計ツール CADIEE（例えば、電力中央研究所 研究報告 R06016）。

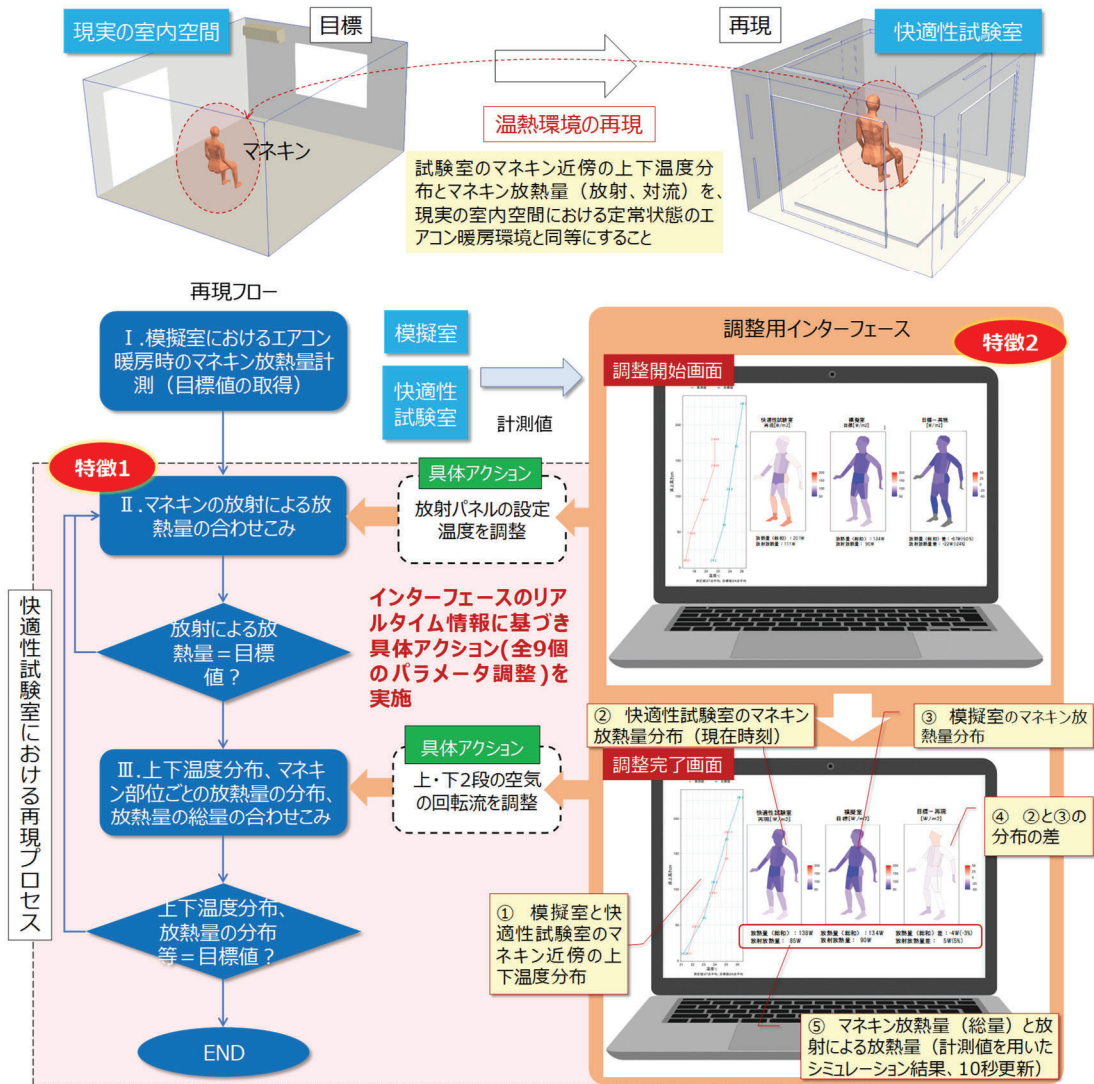


図1 開発したエアコン暖房環境の再現手法の概要

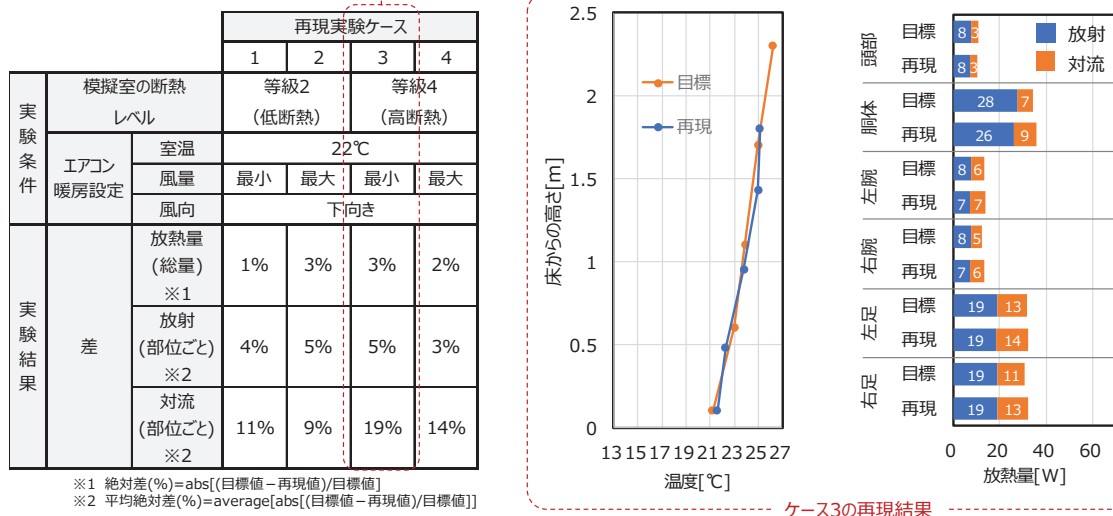


図2 エアコン暖房環境の再現結果のまとめ

関連報告書：

- [1]C19007 「多様な暖房環境を模擬可能な温熱快適性試験室の開発 その1 プロトタイプ構築と空気環境の評価」(2019.06)
 [2]C20012 「同上 その2 サーマルマネキンを用いた熱放射環境と空気環境の評価」(2020.06)

EV アグリゲーションによる VPP 事業の可能性評価 —九州 V2G 実証事業における当所の3か年成果—

高橋 雅仁*¹ 後藤 久典*² 大嶺 英太郎*³ 井上 智弘*² 高木 雅昭*¹
坂東 茂*⁴ 八太 啓行*⁵ 山田 智之*⁶ 浅野 浩志*⁷ 池谷 知彦*⁸

キーワード：電気自動車

ビークルツーグリッド

アグリゲーション

バーチャルパワープラント

可能性評価

Key Words : Electric vehicle (EV)

Vehicle to grid (V2G)

Aggregation

Virtual power plant (VPP)

Feasibility evaluation

Evaluation of the Feasibility of Virtual Power Plant Business with EV Aggregation - Summary of Three-year Results of Kyushu V2G Demonstration Project -

Masahito Takahashi, Hisanori Goto, Eitaro Omine, Tomohiro Inoue, Masaaki Takagi,
Shigeru Bando, Hiroyuki Hatta, Tomoyuki Yamada, Hiroshi Asano and Tomohiko Ikeya

Abstract

Electric vehicle is expected to be a new flexibility-supplying energy resource to manage the power system with large-scale renewable integration as well as a low-carbon mobility option. We joined the government-funded Kyushu VPP demonstration project from FY2018 to FY2020 and evaluated the feasibility of VPP business with EV aggregation in Japan from different viewpoints of VPP stakeholders, that is, power system operator, EV users and VPP aggregator. The results show that V2G provides enough demand creation potential of about 1300MW to suppress the PV power output curtailment in Kyushu area if large number of EVs is widely used in the area, and more than 70% of EV users can accept V2G control to their own EVs during parking time though it depends on compensation, however battery degradation, decreasing stored energy and parking time restriction are their concerns. From our estimation, business value of VPP aggregator with EV aggregation is too low to start the business at present given the cost conditions in this study. Additional VPP aggregator efforts and governmental supports to raise the value are necessary to implement EVs in the power system as a flexibility-supplying energy resource.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 (兼) 社会経済研究所 上席研究員

*2 社会経済研究所 上席研究員

*3 グリッドイノベーション研究本部 主任研究員

*4 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 研究推進マネージャー (兼) 社会経済研究所 上席研究員

*5 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 研究推進マネージャー 上席研究員

*6 グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門 主任研究員

*7 研究アドバイザー

*8 企画グループ 特任役員

背景

電気自動車（EV）を電力需給調整に活用する V2G（Vehicle to Grid）は、再生可能エネルギーの出力変動を緩和する手段として期待されている。しかし、需給調整に活用するための EV 充放電制御手法の検証やその導入可能性の評価は行われてこなかった。九州電力、電力中央研究所、日産自動車、三菱自動車工業、三菱電機の 5 社は、2018～2020 年度において、EV の需給調整への活用可能性を検証する実証事業を行った。

目的

本実証事業において、当所は、V1G/V2G^注 の導入可能性を、系統側、EV ユーザー側、VPP 事業者（アグリゲーター）側のそれぞれの視点から評価する。

主な成果

1. V1G/V2G によるエリア PV 出力制御量の緩和効果【系統側の評価】

九州全域の将来の EV 普及台数を 120 万台と想定し、当所既開発の次世代自動車交通シミュレータと起終点アンケート結果を用いて、エリア内の個々の EV の走行や充電行動をシミュレーションして、九州全域の V1G/V2G による需要創出量を評価した。駐車中 EV の充電器への接続確率 100%と仮定した場合、軽負荷期の休日昼間において、V1G では最大 37 万 kW、V2G では最大 130 万 kW の需要創出ができる（図 1）。V2G による事前放電を行うことで昼間需要を創出でき、年間 PV 出力制御量（kWh）の 37%を緩和できる。

2. V1G/V2G に対するユーザーの受容性調査【EV ユーザー側の評価】

2019 年 12 月に全国の EV 所有者 664 名を対象に普段の EV 充電行動や V1G/V2G の受容性に関するアンケート調査を行った。調査結果では、7～8 割の EV 所有者は対価次第では V1G/V2G に協力可能とする一方で、電池劣化、EV の蓄電残量が減ること（電欠リスク）、駐車時間の拘束の 3 点を懸念している（図 2）。V1G/V2G を社会実装するにあたり、懸念事項を解消し受容される事業モデルを構築する必要がある。

3. V1G/V2G を含む小規模リソースアグリゲーションの事業性評価【VPP 事業者側の評価】

EV（V1G/V2G）の他に、家庭用ヒートポンプ（HP）給湯機、家庭用蓄電池の計 3 種類の小規模リソースを取り上げ、3 次調整力②市場を対象にした VPP 事業の事業性評価を行った。どのリソースについても、現時点ではシステムコストが高く、3 次調整力②市場からの収入のみに拠る VPP 事業の成立は難しい（図 3）。想定条件下では、EV_V2G（逆潮流 OK）の事業価値が最も高く、次いで蓄電池（逆潮流 OK）、HP 給湯の順で事業価値が高いという結果が得られた。小規模リソースを活用する VPP 事業を成立させるためには、システムコストの低減、制度設計、事業者側の工夫（エネマネなど他事業と合わせる等）が必要である。

今後の展開

V1G/V2G は、技術的には問題ない水準にあり、今後、経済的に見合うサービスの選択と事業モデルを検討する段階に入る。制度面からの支援（電池からの逆潮流を認める、職場充電環境の整備等）が必要である。研究課題としては、配電系統における影響（需給バランスや電圧変動、送電線混雑等）を評価し、対策を検討することが必要である。

注）V2G は、通常のEVへの充電に加えて、EVの蓄電池から電力系統への放電を、電力需給調整に活用する方策である。電力系統に放電せずに、EVへの充電のみを需給調整に活用する方策はV1Gという。

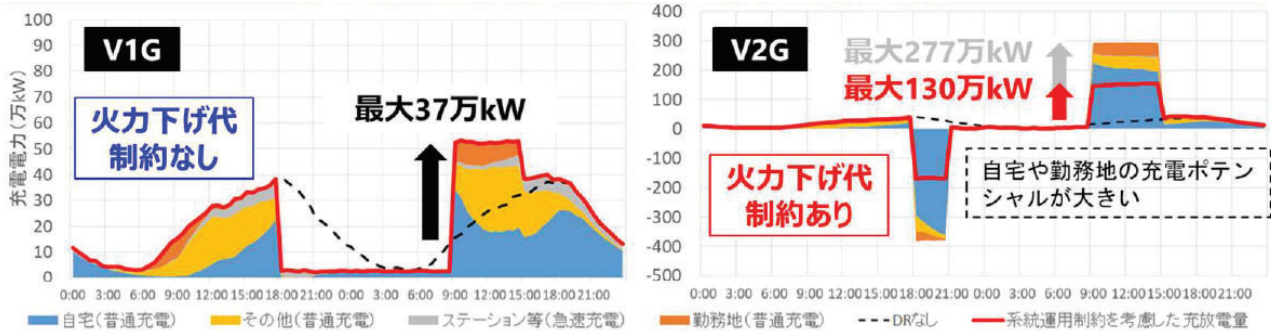


図1 九州全域におけるV1G/V2Gによる需要創出可能量（軽負荷期休日昼間の場合）

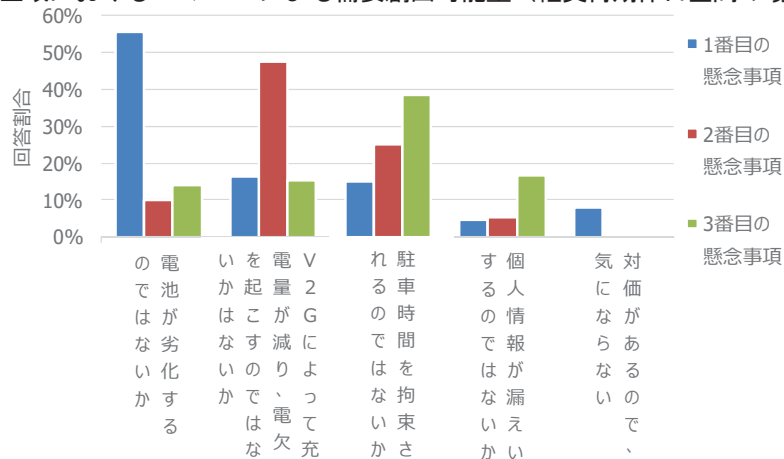


図2 EVユーザーのEV搭載電池の第三者利用に対する懸念事項（上位3つまで）

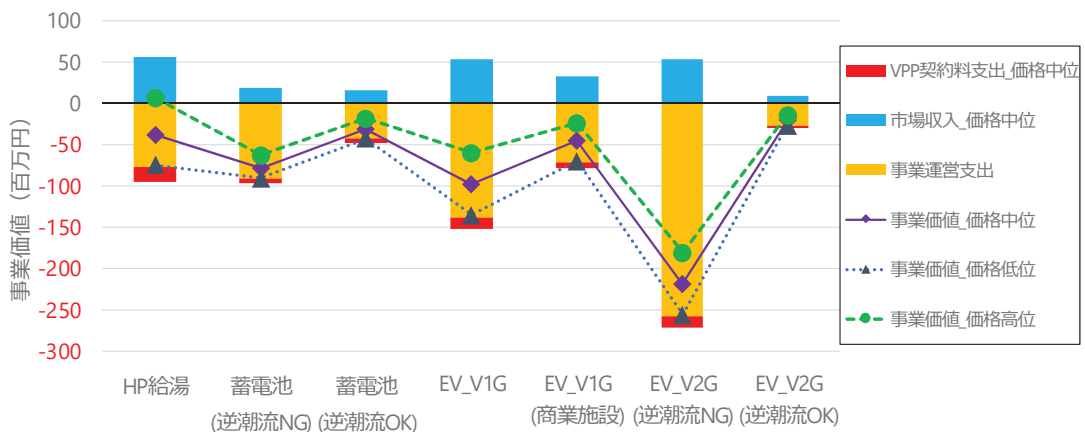


図3 小規模リソースアグリゲーションの事業価値比較（3次調整力②市場価格に関する感度分析）

水力発電機固定子巻線の保守点検への 機械学習手法の導入に向けた基礎検討

—固定子巻線異常判定のためのデータベースの構築—

倉石 隆志*¹ 宮崎 悟*²

キーワード：水力発電機固定子巻線
保守点検
診断
部分放電
機械学習

Key Words : Hydro Generator Stator Coil
Maintenance and Inspection
Diagnosis
Partial Discharge
Machine Learning

Fundamental Study on Introduction of Machine Learning Technique to Maintenance and Inspection of Hydropower Stator Coil —Establishment of Database for Abnormality Identification of Stator Coil—

Takashi Kuraishi and Satoru Miyazaki

Abstract

Accurate and efficient maintenance inspections are essential for the rational replacement of stator windings of aged hydropower generators. In practice, the accuracy of maintenance inspection depends on engineers' experience. The shortage of senior engineers due to the aging population is a big problem, and technology transfer has been an essential subject in Japan in recent years. Various industries are trying to introduce systems that study a large amount of maintenance and inspection data by machine learning technology and automatically diagnose equipment abnormalities. The machine learning technology can also be applied for maintenance and inspection of the stator winding to help engineers determine the maintenance measures. This report proposes a scheme to support maintenance inspection of the stator windings utilizing machine learning techniques. Furthermore, a database is developed which contains partial-discharge data measured at the stator coils, which simulate abnormalities in real stator windings. The accuracy of a diagnostic model based on the developed database is demonstrated.

*1 グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 主任研究員

*2 グリッドイノベーション研究本部 ファシリティ技術研究部門 上席研究員 研究推進マネージャー

背景

水力発電機固定子巻線（以下、固定子巻線）は、運転中に熱・電圧・環境・機械ストレス等の複合ストレスに曝され、絶縁層が劣化し絶縁性能が低下するだけでなく、各種異常現象^{注1)}が発生する。これら異常現象は部分放電の発生を伴い絶縁破壊事故に進展する可能性があり、点検・診断等によりの確に発見し、保守を行う必要がある。一方、近年、保守点検の現場において技術者の高齢化が進み、人員不足や技術継承が課題となっている。そのため、設備の保守点検に関する膨大なデータを機械学習^{注2)}により分析し、設備異常の兆候を自動検知し診断するシステムの導入が電力業界で検討されており^{注3)}、水力発電機の保守点検にもその導入が期待されている。

目的

機械学習による固定子巻線の保守点検支援スキームを提案するとともに、その一要素として、異常がある固定子巻線で発生する部分放電のデータを蓄積したデータベースを作成する。また、このデータベースに基づき機械学習による異常判定^{注4)}を行うモデルを作成し、その性能評価を行う。

主な成果

1. 機械学習による固定子巻線の保守点検支援スキームの提案

機械学習による固定子巻線の保守及び更新計画策定に関する現場技術者の意思決定を支援するスキームを提案した（図 1）。同スキームを利用することで、異常兆候の早期発見による設備トラブルの未然防止、診断および結果解釈等の自動化による将来的な人員不足の解消に役立つと考えられる。

2. 固定子巻線異常判定のためのデータベースの作成

機械学習による固定子巻線異常判定のためのデータベースを作成した（図 2）。同データベースの作成にあたり、固定子巻線で生じる各種異常を模擬し、それらの試料の部分放電測定を行い、データを収集した^{注5)}。

3. データベースを用いた異常判定モデルの性能評価

作成したデータベースの一部を用いて、機械学習により固定子巻線異常判定モデルを作成^{注6)}し、その性能を評価した結果、80%以上の正答率で固定子巻線異常を判定できた。今後、より最適な機械学習法の選択、入力データの追加等により、正答率の向上が期待できる。

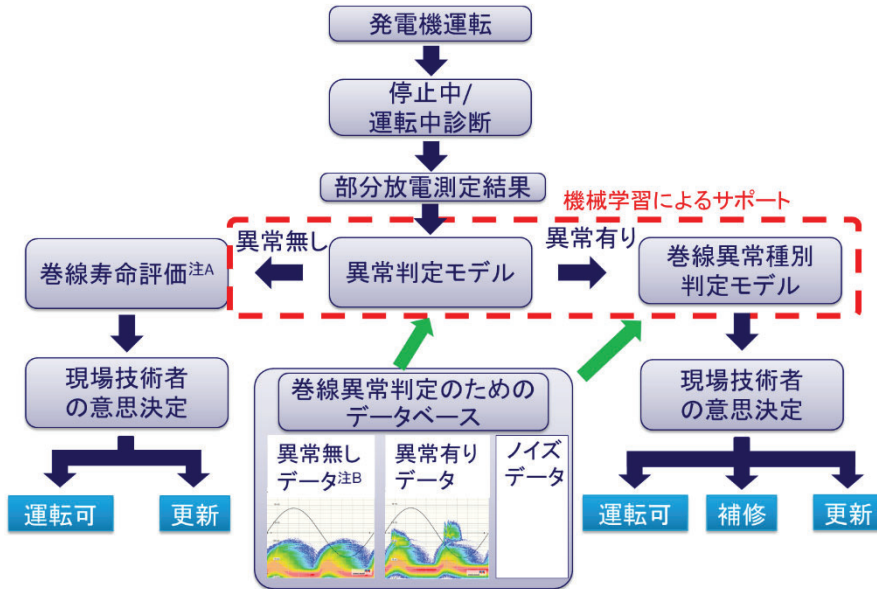
注1) コイル表面摩耗，鉄心ずれ，鉄心過熱，コイルエンド部の汚損等の異常。

注2) 人工知能の一分野であり，人間がもつ学習能力と同じく，コンピュータも経験から学習し，将来予測や意思決定を実現できるようにする技術や手法

注3) 例えば「ICT利活用による電力設備保守・運用業務の効率化」，電気協同研究会，第69巻，第1号，2013

注4) 本報告では検討の第一段階として異常の種別判定は行わず，異常の有無のみを判定する。

- 注5) 本報告では、実機のコイルを使用し、コイル表面摩耗、鉄心ずれ、鉄心過熱の3種の異常を模擬し、これらの異常データを収集した。今後、巻線異常判定を高度化するため、コイルエンド部の汚損による異常データ、および発電機の励磁装置で発生するサイリスタノイズ等のノイズデータを収集し、データベースの拡充を図る。
- 注6) 異常判定モデルを作成するにあたって、部分放電特性の一つである部分放電パターンに着目し、データベースから、それらの異常無し・異常有りのデータセットを抽出した。そのデータセットを用いて機械学習を行い、判定モデルを作成した。また、機械学習の手法として、少ないデータセットで未知データに対する高い識別能力が期待できるサポートベクターマシンを選定した。



注A: 提案スキームでは、運転時の熱や電圧、振動等により徐々に性能が低下する「劣化現象」と、必ずしも発生しないが何らかの不具合により発生する、コイル表面摩耗、鉄心ずれ、鉄心過熱等の「異常現象」を区別する。異常がない場合は巻線の劣化状態から巻線寿命診断を行う。一方、異常がある場合は、劣化の観点からは寿命に達してなくても、異常現象により故障に至ることがあり、これを診断する必要がある。

注B: 発電機固定子巻線は部分放電の発生が許容されている。このため、異常がない場合においても部分放電が測定される。

図1 機械学習を用いた固定子巻線の保守点検支援スキーム

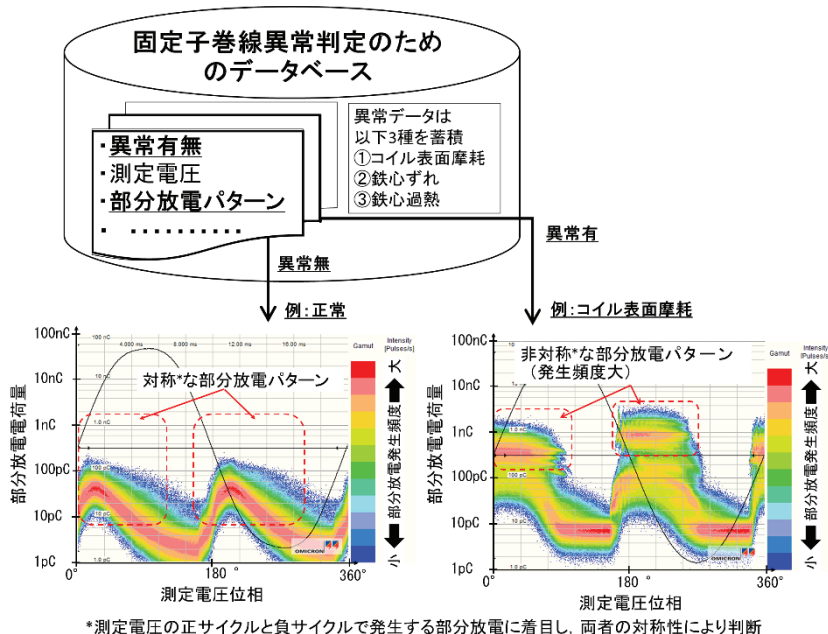


図2 固定子巻線異常判定のためのデータベースの概要

2021 年度掲載された主な学術論文

筆頭著者	石本 和之
論文名	Direct Lightning Performance of Distribution Lines with Shield Wire Considering LEMP Effect
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEE Transactions on Power Delivery, 2021 Volume 37, Issue 1, p. 76–84
キーワード	Lightning, Wires, Surges, Finite difference methods, Conductors, Insulators, Flashover
URL	https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3053620

筆頭著者	石本 和之
論文名	直撃雷に対する高圧配電線雷事故率の総合評価-フラッシュオーバーおよび避雷器処理エネルギーの評価プログラム-
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2022 年 142 巻, 2 号, p. 98–105
キーワード	配電線, 直撃雷, 雷事故率計算, フラッシュオーバー, 避雷器処理エネルギー
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.98

筆頭著者	岩田 幹正
論文名	Melting and breaking characteristics of strands of high-strength and high-corrosion-resistant OPGW due to DC arc discharge simulating high-energy lightning strike
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Electrical Engineering in Japan, 2021, Volume 214, Issue 4, e23345
キーワード	DC arc, high-strength and high-corrosion-resistant OPGW, lightning strike, melting and breaking of strands
URL	https://doi.org/10.1002/eej.23345

筆頭著者	岩田 幹正
論文名	高エネルギー雷撃を模擬した直流アークによる高張力・高耐食 OPGW の素線溶断特性
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2021 年 141 巻 6 号 p. 492–499
キーワード	雷撃, 直流アーク, 高張力・高耐食 OPGW, 素線溶断
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.141.492

筆頭著者	江藤 修三
論文名	Standoff Detection System Using Raman Spectroscopy in the Deep-Ultraviolet Wavelength Region for the Detection of Hazardous Gas
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Applied Spectroscopy, 2022,
キーワード	Standoff detection, Raman spectroscopy, deep-ultraviolet region, hazardous materials, sulfur oxide
URL	https://doi.org/10.1177/00037028221094632

筆頭著者	神足 将司
論文名	Alternative test method of internal arcing for replacing SF ₆ by air in SF ₆ -insulated power equipment
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Engineering Research Express, 2021, Volume 3, Number 3
キーワード	sulfur hexafluoride, air, alternative test method, internal arc tests, SF ₆ -insulated power equipment, pressure rise, exhausted hot gas
URL	https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac0fc2

筆頭著者	小松 秀徳
論文名	Energy fault detection for small buildings based on peer comparison of estimated operating status
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Energy and Buildings, 2021 Volume 246
キーワード	Energy fault, Electricity conservation, Information provision, Small buildings, Smart meter data
URL	https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111110

筆頭著者	佐藤 勇人
論文名	電力系統のレジリエンス強化と脱炭素化の両立に資する再生可能エネルギー電源の脱落特性を考慮した緊急時周波数制御
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2021 年 141 巻, 6 号, p. 415–425
キーワード	電力系統, レジリエンス, 緊急時周波数制御, 周波数低下リレー, 再生可能エネルギー, 脱落特性
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.141.415

筆頭著者	椎名 健雄
論文名	Calculation of Internal Electric Fields Induced by Power Frequency Magnetic Fields During Live-Line Working Using Human Models With Realistic Postures
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021 Volume 63, Number 6, p. 1812–1819
キーワード	Anatomical human model, International Commission on Nonionizing Radiation Protection (ICNIRP) guidelines, live-line working, magnetic field, power frequency, scalar potential finite difference (SPFD) method
URL	https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3083057

筆頭著者	地子 智浩
論文名	Blue Light Monochromatic Irradiation for 12 Hours in Lighting Pattern with Combinations of Blue and Red Light Elongates Young Cos Lettuce Leaves and Promotes Growth under High Daily Light Integral
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	HortScience, 2021, Volume 56, Issue 8
キーワード	artificial lighting, blue-light receptor, leaf elongation, LED, photomorphogenesis, phytochrome
URL	http://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI15959-21

筆頭著者	地子 智浩
論文名	Cultivation of cos lettuce using blue LED and quantum dot wavelength conversion sheets
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Scientia Horticulturae, 2022, Volume 295
キーワード	Artificial lighting, Directivity angle, Energy efficiency, Monochromatic light, QD
URL	https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110772

筆頭著者	地子 智浩
論文名	Manipulation of Intraday Durations of Blue- and Red-Light Irradiation to Improve Cos Lettuce Growth
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Frontiers in Plant Science, 2021, Volume 12, 12:778205
キーワード	artificial light, leaf elongation, leaf morphology, photomorphogenesis, light receptors
URL	https://doi.org/10.3389/fpls.2021.778205

筆頭著者	地子 智浩
論文名	Time-varying Photosynthetic Photon Flux Density and Relative Spectral Photon Flux Density Distribution to Improve Plant Growth and Morphology in Plant Factories with Artificial Lighting
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	The Horticulture Journal, 2021, Volume 90, No. 2, p. 147–153
キーワード	LED, photosynthesis, phytochrome, pulsed light
URL	https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-R015

筆頭著者	田代 大貴
論文名	Single-Conductor Transmission Line Model Incorporating Radiation Reaction
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021 Volume 63, Number 4, p. 1065–1077
キーワード	Mathematical model, Wires, Conductors, Propagation losses, Power transmission lines, Wiring, Surface waves
URL	https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3041468

筆頭著者	立松 明芳
論文名	Lightning Current Simulation of 66-kV Substation With Power Cables Using the Three-Dimensional FDTD Method
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021 Volume 63, Number 3, p. 819–829
キーワード	Power cables, Lightning, Substations, Wires, Poles and towers, Grounding, Conductors
URL	https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3028100

筆頭著者	立松 明芳
論文名	Three-Dimensional FDTD-Based Simulation of Induced Surges in Secondary Circuits Owing to Primary-Circuit Surges in Substations
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021 Volume 63, Number 4, p. 1078–1089
キーワード	Integrated circuit modeling, Surges, Finite difference methods, Surge protection, Time-domain analysis, Substations, Frequency measurement
URL	https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3049144

筆頭著者	田中 洋平
論文名	Development of a method for calculating the transmission-line constants of a three-phase enclosure-type gas insulated bus taking the proximity effect into account
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Electrical Engineering in Japan, 2021, Volume 214, Issue 2, e23331
キーワード	method of moments, proximity effect, series impedance, shunt admittance, surge impedance
URL	https://doi.org/10.1002/eej.23331

筆頭著者	田中 洋平
論文名	方形断面洞道に布設されたケーブルの線路定数計算手法の開発
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2022 年, 142 巻 2 号 p. 128–138
キーワード	洞道布設ケーブル, 方形洞道, 線路直列インピーダンス, 線路並列アドミタンス, サージインピーダンス
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.128

筆頭著者	田辺 隆也 (共同執筆)
論文名	Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation
掲載誌名, 出版年, 出版社	Final summary report, IEA Wind TCP Task 25, 2021, VTT Technology 396
キーワード	grid integration, wind integration, electricity markets, flexibility, capacity value, grid reinforcement
ISBN	9789513887575
URL	https://doi.org/10.32040/2242-122X.2021.T396

筆頭著者	田辺 隆也 (共同執筆)
論文名	Use of Voltage Stability Assessment and Transient Stability Assessment Tools in Grid Operations
掲載誌名, 出版年, 出版社	書籍「Power Electronics and Power Systems」シリーズ, 2021, Springer Nature
ISBN	783030674816

筆頭著者	中野 智之
論文名	大電流のインパルスアークによる OPGW の溶損量の推定
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2021 年, 141 巻 11 号 p. 676–686
キーワード	OPGW, 架空地線, アーク, インパルス電流発生装置, 電流密度
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.141.676

筆頭著者	服部 俊一
論文名	IoT センサを用いた家庭内の行動観察
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), 2022 年, 142 巻 2 号, p. 206–215
キーワード	行動観察, センサ, スマートメータ, デブスインタビュー, 家庭, 省エネ
URL	https://doi.org/10.1541/ieejjeiss.142.206

筆頭著者	藤縄 剛史
論文名	家庭用ヒートポンプ給湯機のエネルギー消費性能評価に関する研究 (その1) : 各種試験による性能データの取得および分析
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	日本建築学会環境系論文集, 2021年, 86巻 789号, p. 840-851
キーワード	給湯機, ヒートポンプ, CO2冷媒, 性能評価試験, エネルギー消費量, 性能因子
URL	https://doi.org/10.3130/aije.86.840

筆頭著者	布施 則一
論文名	Millimeter wave imaging of underfilm corrosion using a monopole antenna equipped with a semispherical silicon lens
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	NDT & E International, 2021 Volume 124
キーワード	Millimeter waves, Non-destructive testing, Underfilm corrosion, Stand-off distance, S parameters
URL	https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102542

筆頭著者	牧野 裕太
論文名	油隙を有する油浸紙積層絶縁系における油分解ガスの発生様相—部分放電発生状況の違いによる様相変化—
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), 2021年 141巻 4号 p. 252-459
キーワード	OF ケーブル, 油浸紙積層絶縁系, 油隙, 部分放電, 油中ガス分析
URL	https://doi.org/10.1541/ieejfms.141.252

筆頭著者	宮寄 悟
論文名	Calibration Scheme of Impulse-High-Voltage Measuring System Traceable to National Standards of Japan
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, Volume16, Issue12, p. 1664-1671
キーワード	impulse voltage, measuring system, calibration, traceability, national standard, Japan calibration service system (JCSS)
URL	https://doi.org/10.1002/tee.23461

筆頭著者	宮寄 悟
論文名	Detection of Winding Axial Displacement of a Real Transformer by Frequency Response Analysis without Fingerprint Data
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Energies, 2022, Volume 15, Number 1, p. 200
キーワード	power transformer, frequency response analysis, winding axial displacement, fingerprint data
URL	https://doi.org/10.3390/en15010200

筆頭著者	宮崎 悟
論文名	Long-Term Stability of Reference Measuring System for Impulse High Voltage
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, Volume17, Issue3, p. 369–377
キーワード	Long-term stability, impulse testing, shielded resistive voltage divider, calibrator
URL	https://doi.org/10.1002/tee.23520

筆頭著者	宮崎 悟
論文名	Method of Evaluating Probability of Pressboard Failure in Power Transformer with Disc-Type Winding Due to Electromagnetic Force by External Short Circuit
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, Volume16, Issue7, p. 973–981
キーワード	power transformer, failure probability, pressboard, axial displacement of winding
URL	https://doi.org/10.1002/tee.23381

筆頭著者	山口 宜大
論文名	高压配電線の構成が直撃雷による相間スパークオーバ発生率に与える影響
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2022 年, 142 巻 2 号 p. 114–120
キーワード	高压配電線, 径間途中断線, 相間スパークオーバ発生率, 架空地線
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.114

筆頭著者	山本 博巳
論文名	Concept of Carbon-related Energy to Connect Energy Consumption with CO ₂ Emissions
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Journal of the Japan Institute of Energy, 2021, Volume 100, Issue 6, p. 62–72
キーワード	Carbon-related energy, CO ₂ emissions reduction, H/C ratio, Kaya identity
URL	https://doi.org/10.3775/jie.100.62

筆頭著者	山本 博巳
論文名	Cost analysis of stable electric and hydrogen energy supplies derived from 100% variable renewable resources systems
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Renewable Energy, 2021, Volume 178, p. 1165–1173
キーワード	100% VRE systems, Stable energy supply, Hydrogen energy, Optimal mix of solar and wind power, Hybrid energy storage system
URL	https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.061

筆頭著者	米澤 力道
論文名	Development of a reversible transformer model for the calculation of inrush currents energizing from higher and lower voltage windings
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	Electrical Engineering in Japan, 2022 Volume 215, Issue 2, e23365
キーワード	air-core inductance, black start, electromagnetic transient analysis, energization from lower voltage winding, reversible transformer model
URL	https://doi.org/10.1002/eej.23365

筆頭著者	米澤 力道
論文名	低圧巻線側からの加圧にも対応した励磁突入電流解析用変圧器モデルの開発
掲載誌名, 出版年, 巻号数, ページ	電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 2022 年, 142 巻 1 号 p. 23-33
キーワード	変圧器リバーシブルモデル, 瞬時値解析, 逆充電, 全停復旧, 空芯インダクタンス
URL	https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.23

