



再生可能エネルギーの大量導入に向けた 架空送電線監視装置

Overhead Transmission Line Monitoring Equipment for Large-Scale Introduction of Renewable Energy

東 栄治*
Eiji Higashi

丸山 剛史
Takeshi Maruyama

梅村 侑史
Yuji Umemura

吉田 雄一郎
Yuichiro Yoshida

三田 雅樹
Masaki Sanda

小嶋 隆夫
Takao Kojima

カーボンニュートラルの実現に向け、再生可能エネルギーの主力電源化の取り組みが進められている。しかし、再生可能エネルギーの増加に伴って電力系統が混雑し、新規電源の接続が困難になるという課題が生じている。この課題に対して、系統の混雑に対応するために従来の運用方法を見直す日本版コネクと&マネージの検討、新たな運用技術で送電容量の拡大を図るダイナミックレーティングの導入検討が行われている。これらを実現する上で、送電線の状態と鉄塔周辺環境をリアルタイムに監視する装置が必要であり、将来再生可能エネルギーが大量導入されていく中で、このようなシステムが重要な役割を担うことになると思われる。当社は、再生可能エネルギーの大量導入に向けた架空送電線監視システムの開発を行っており、本稿では、開発したシステムと装置の特徴について紹介する。

In order to achieve carbon neutrality, there is a growing trend to use renewable energy as the main power source. However, with the increased introduction of renewable energy, the power system has become congested, making it difficult to connect other new power sources. To solve this problem, Japanese Connect and Manage is being developed to review conventional methods and address power system congestion. Moreover, dynamic rating is being considered as a new operational technology. To realize these concepts, a real-time monitoring system is needed to monitor the conditions of overhead transmission lines and the environment around transmission towers. This system will play an important role as renewable energy will be introduced in large quantities in the future. We have been developing an overhead transmission line monitoring system for large-scale introduction of renewable energy. This paper introduces the features of the developed system and equipment.

キーワード：再生可能エネルギー、ダイナミックレーティング、ノンファーム型接続、自営通信網、IEC61850

1. 緒 言

カーボンニュートラルの実現において再生可能エネルギーは重要な役割を担っており、主力電源化へ向けた取り組みが行われている。近年、再生可能エネルギーの増加により、電力系統が混雑し、既存の系統や従来の運用方法では新規電源の接続が困難になるケースが生じており、導入拡大への課題となっている。この課題を解決すべく、欧米では新たな系統接続の制度を導入している国も見られ⁽¹⁾、国内においても、従来の運用方法を見直す日本版コネクと&マネージの検討⁽²⁾や新たな運用技術であるダイナミックレーティングの導入検討⁽³⁾が進められている。

日本版コネクと&マネージでは、想定潮流の合理化^{*1}、N-1電制^{*2}、ノンファーム型接続^{*3}の3つの取り組みが行われている。N-1電制およびノンファーム型接続ではこれらを適用した系統に対して、送電容量を超過する場合に出力制御を行うことを前提として、既存系統の最大限の有効利用を図っている。出力制御は通常、発電所の発電予定量や需要想定に基づいて計画的に行われるが、落雷などの突発的な回線故障の発生や、再生可能エネルギーの発電量が出力予想を上回り大きく変化した場合においても送電容量を

超えないようにする必要がある。再生可能エネルギーが大量導入されると、潮流量が季節や時間帯によって大きく変化するようになり、系統も複雑になるため、送電線の状態を常時監視し、系統設備と連携して出力制御を行うシステムが望まれる。

一方、ダイナミックレーティングは、送電線の送電容量を動的に算出することにより既存系統の送電容量を増加させる運用技術である。

送電容量を決定する要素の一つは送電線の熱容量であり、電線種ごとに定められている許容電線温度以下で運用する必要がある。すなわち、ある気象条件において電線が熱的に平衡状態にあるとし、電線温度が許容温度となる時の送電電流が、送電容量である。

現在の送電容量は電線温度が最も高くなる気象条件を想定しており、気温、風速、日射量を常に一定として算出しているため、固定値として扱われている。ダイナミックレーティングは送電線の周囲の気象条件と電線温度を常時測定して送電容量を動的に算出する手法であり、実際の状態に合った送電容量で運用することにより、系統の最大限の活用が可能になる⁽⁴⁾。

以上のように、N-1電制およびノンファーム型接続の運用やダイナミックレーティングの導入において、送電線の温度・電流、鉄塔周辺の気象をリアルタイムに監視可能なシステムが重要となる。当社は、再生可能エネルギーの大量導入に向けた架空送電線監視システムの開発を行っており⁽⁵⁾、本稿では、開発したシステムと装置の特徴について報告する。

2. 架空送電線監視システムの概要と特徴

図1に当社で開発したシステムの構成を示す。

温度・電流センサは送電線の導体に直接装着して設置され、電線温度と送電電流を計測し、そのデータは無線を使用して集約装置に伝送される。

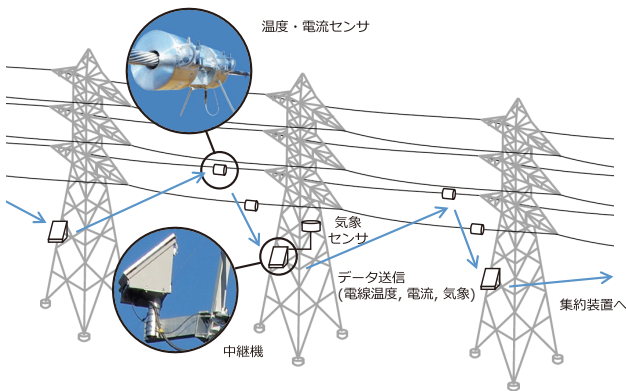


図1 架空送電線監視システム構成（鉄塔側）

中継機は鉄塔脚部に設置され、温度・電流センサから送信されるデータを中継する。気象センサを中継機と同じ鉄塔に設置することにより気象データを取り込むことができ、そのデータは集約装置に伝送される。

温度・電流センサ、中継機、集約装置で構成しているセンサネットワークには920MHz帯の無線を使用しており、その仕様を表1に示す。温度・電流センサも別のセンサあるいは中継機から送信されるデータを中継する機能を有しており、多段の中継を行う、マルチホップ通信機能により広域・長距離通信を実現している。

本システムでは送電線路に沿って機器を配置する。マルチホップ通信ではメッシュ状のトポロジがよく用いられるが、それを直線状のネットワーク向けに最適化し、経路構築に当社独自の方法を用いることにより、システム全体として通信効率を高め、低消費電力化も実現している。

センサ及び中継機から集約装置までを結ぶセンサネットワークは公衆回線を使用しない自営通信網であり、通信事業者のサービスエリア外となるような山間部等においてもネットワークを構築できる。通信方式の世代交代期におい

表1 920MHz帯無線の仕様

項目	仕様
通信方式	920MHz帯特定小電力無線 ARIB STD-T108準拠
通信トポロジ	直線状マルチホップ
最大中継台数	50
使用周波数帯	922.5~927.7MHz
周波数チャンネル数	14
出力	20mW
アンテナ数	2
伝送距離	見通し 1km

てもその影響を受けることなく、長期的な継続運用が可能である。

集約装置に集められたデータは、LTE等の閉域網やOPGW^{※4}の回線を使用し、クラウドや変電所に設置された演算・蓄積用サーバーに送信され、許容電流の算出や予測に必要な演算が行われる。取得したデータはサーバーに蓄積され、解析等の用途に利用可能である。

各機器に搭載されているファームウェアは、遠隔から更新することが可能であり、保守運用上必要となる改善や新機能の追加を行うことができ、長期安定運用が求められる本システムにおいて保守性と可用性を確保している。

3. システムを構成する各機器の特徴

3-1 温度・電流センサ

温度・電流センサの外観を写真1に、ブロック図を図2に示す。本センサは高電圧の送電線導体に直接装着するため、外部からの絶縁が必要であり、地上からの電源供給は困難である。電池式電源を使用すると定期的な電池交換が必要となることから、送電線電流から電磁誘導を利用して発電を行う誘導電源を用いている。誘導電源は送電線電流によって生じる磁場から誘導電流を生成する誘導電源用カレントトランス（CT）とその誘導電流から直流電圧を生成する電源部から構成される。この他、電流測定用CTと電流値を算出する電流測定部、送電線の導体に取り付ける測温プローブと電線表面温度を算出する温度測定部、データ



写真1 温度・電流センサ外観

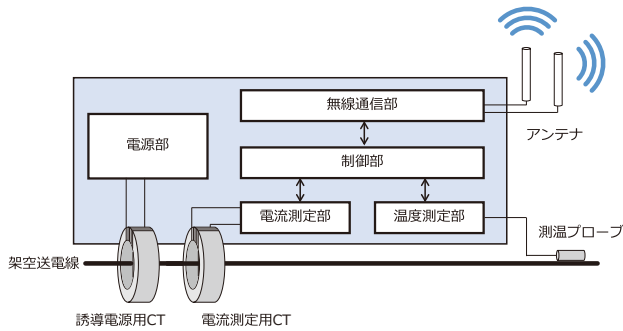


図2 温度・電流センサブロック図

転送のための無線通信部、全体を制御する制御部から構成される。

表2に温度・電流センサの主な仕様を示す。

表2 温度・電流センサの主な仕様

項目	仕様
電源部	動作送電線電流範囲 50~1,200A (Type1) 150~3,200A (Type2)
電流測定部	測定範囲 50~1,200A (Type1) 150~3,200A (Type2)
	目標測定精度 ±3%
温度測定部	測定範囲 -20~+120℃ (Type1) -20~+180℃ (Type2)
	目標測定精度 ±2℃
通信インターフェース	920MHz帯無線
寸法	W180×H180×D314mm (突起部除く)
重量	約11kg

先に述べた通り、動作に必要な電力を送電線の周囲に生じている磁場から電磁誘導によって生成する。電源部の動作送電線電流範囲は誘導電源用CTの特性により50~1,200AのType1と150~3,200AのType2の2種類としている。個別の適用にあたっては、システムに接続している電源と負荷の大きさや位置関係などを考慮する必要があるが、Type1は主にACSR^{※5}系、Type2はTACSR^{※6}系電線を使用したシステムへの適用を想定している。電流測定部の測定範囲についても、基本的にこの範囲と等しい。

動作送電線電流範囲の下限を下回ると、電磁誘導によって得られる電力も小さくなる。この状態で装置が起動するのを避けるため、得られている電力を監視し、それに基づいて起動を制御する機能を搭載しており、センサ、更にはシステム全体としての安定性を高めている。

電流測定は、ダイナミックレーティングをはじめ、N-1電制、ノンファーム型接続を適用した際に、実際の電流値の把握の他、算出された許容電流値や電線温度の妥当性

の検証、精度の向上の目的においても重要である。また、再生可能エネルギーの系統接続が増加したことにより、系統の分岐が多くなり、複雑化している。発電所から負荷への順潮流に、再生可能エネルギーから系統への逆潮流が加わり、その一部は電源の出力変動も大きいため、系統の途中区間を流れる電流の把握が困難となってきている。このような場所に、センサを設置することにより送電電流の動的な把握が可能になる。

電線温度の測定は、精度と応答性を重視して測温プローブを送電線の導体に密着させて直接測定を行う方式としている。特に、応答性については、N-1電制における1回線故障の発生時のような送電電流の急激な変動に伴う温度上昇に対しても追従できることが重要である。

また、本センサは送電線に直接装着するため事故電流やコロナ放電に対する対策が必要である。事故電流に対しては各CTの入力部に保護素子を挿入している。

高電圧の送電線は導体表面からコロナ放電^{※7}が発生することがあり、天候によっては数時間継続することもある。このようなコロナ放電が発生している時においても、安定した動作が可能ないように対策している。また、筐体を円柱構造とし電位傾度^{※8}を低くすることにより、センサ自体からもコロナ放電が発生しにくいようにしている。

3-2 中継機

中継機の外観を写真2に、主な仕様を表3に示す。

中継機は鉄塔脚部に設置される機器であり、太陽光発電パネルとバッテリーによる独立型電源としている。

ダイナミックレーティングにおいて重要となる鉄塔周辺の現地気象計測は風向、風速、気温、日射、降雨等の計測が可能な複合型の気象センサを使用しており、中継機は気



写真2 中継機の外観

表3 中継機の主な仕様

項目	仕様
電源部	太陽光発電パネル：12V-15.5W×1枚
	バッテリー：12V-38Ah×1台
通信インターフェース	920MHz帯無線
	GNSS
外部インターフェース	シリアル (気象センサ用)
寸法	W350×H500×D365mm (突起部除く)
重量	約30kg

象センサから取り込んだデータを無線により集約装置に伝送する。

中継機には GNSS^{※9}受信機能を内蔵しており、時刻情報等を取得し利用することが可能である。

3-3 集約装置

センサデータの流れを図3に示す。集約装置は、温度・電流センサから収集したデータや中継機から収集した現地気象データを演算/データ蓄積用サーバーへ送信する機能を持つ。サーバーへのデータ送信には、LTEを使用する他、メディアコンバータ (MC) を使用することにより OPGW 等の閉域網に接続することもでき、公衆回線を経由しないセキュリティ性の高いネットワークを構成することが可能である。

演算/データ蓄積用サーバーでは、センサデータからダイナミックレーティングにおける許容電流を算出する。図4に演算/データ蓄積用サーバーにおける許容電流の計算の流れを示す。気象プロバイダ等が配信している気象予報データは特定の距離間隔で区切られたものであり、そのエリアにおける平均値となるため、観測対象とする箇所と比較して差分が生じる場合が多い。そのため、鉄塔に設置し

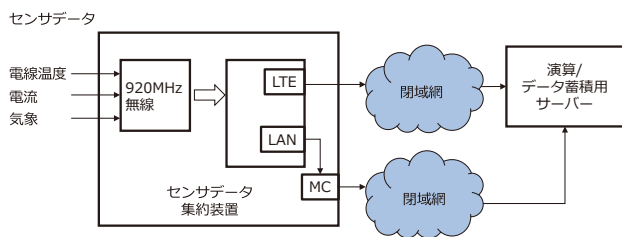


図3 集約装置ブロック図

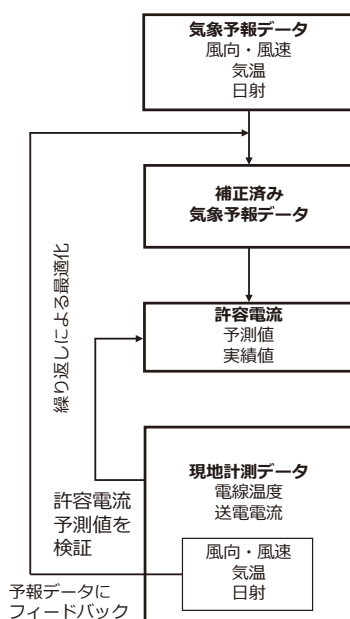


図4 許容電流の算出

た気象センサから中継機によって転送された現地計測の気象データと予報データを比較し、その差分を予報データにフィードバックすることで補正を行う。補正済み予報データに基づく許容電流の予測値を現地計測データに基づく実績値で検証し、これを繰り返すことにより補正の最適化が可能である。

4. 評価状況

開発した装置およびシステムは、主に基本性能についての評価を社内で行った後、送配電事業者の架空送電設備に設置して実証実験を行った。本章ではその評価状況と結果を紹介する。

4-1 温度・電流センサ性能評価

図5に電流測定部の精度の評価結果を示す。Type1については、1,200Aまで1%以内の精度であり、Type2は、3,200Aまで2%以内であった。いずれにおいても所望の精度が得られている。

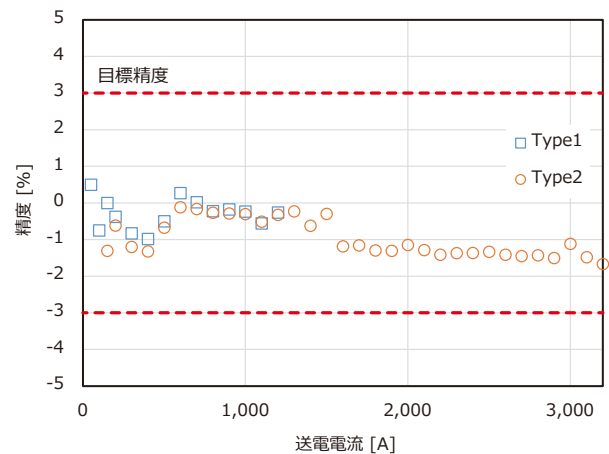


図5 電流測定部の精度

図6に電線温度測定における応答性の評価結果を示す。これは、N-1 電制や再生可能エネルギーの出力変動を想定したものであり、840A を通電し、温度が一定となった後、瞬時に1,160Aに上昇させた時の電線温度の変化を示しており、実測値と計算値を比較した。

なお、ここで比較している電線温度の計算値は、文献(6)に示されている過渡状態における電線温度変化と経過時間の関係式を用いて計算したものである。計算条件は、放射率0.9、気温27℃、日射0W/m²、風速0m/sとしている。実測値と計算値は概ね一致しており、応答性、精度ともに良好な結果が得られている。

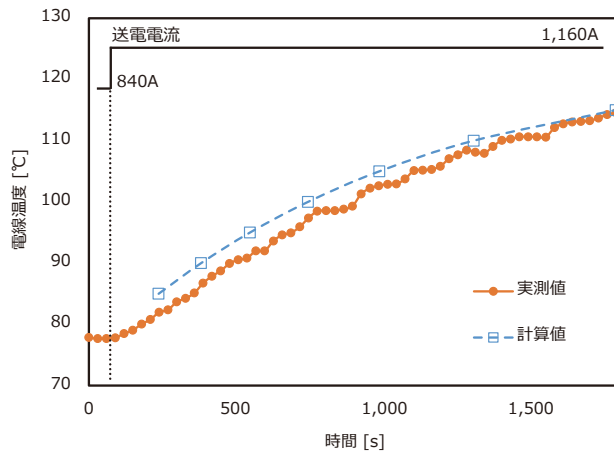


図6 温度測定部の応答性

4-2 通信性能評価

図7に社内で実施した温度・電流センサの受信強度の距離特性の評価結果を示す。センサ間の距離1kmの場合においても受信強度は十分にマージンがあり、実環境において2~3km通信可能であることを確認した。また、ネットワークを構成する装置の台数が10台以上の場合でも安定して通信ができることを確認した。

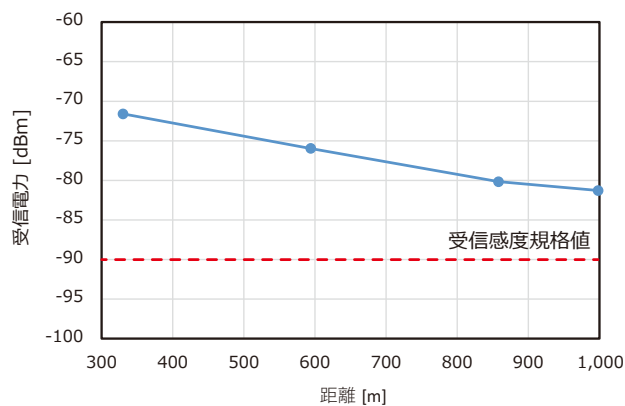


図7 温度・電流センサ受信強度の距離特性

4-3 ダイナミックレーティング

図8にダイナミックレーティングにおける許容電流算出の一例として、気象予報データを用いて算出した許容電流の予測値と現地測定の気象データを用いて算出した許容電流の実績値、および従来の最過酷条件に基づいて算出される許容電流を示す。なお、気象予報データは図4に示した通り、補正したデータを用いている。系統運用に活用する上で、許容電流の予測値の精度が重要であり、大部分の時

間帯において予測値が実績値を超過しないように算出する必要がある。実証実験では30%程度の増容量効果が得られており、予測値は概ね95%以上の確率で実績値内にあることを確認した。

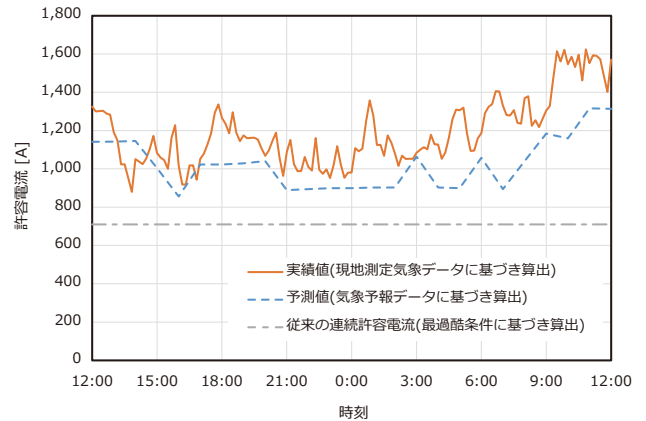


図8 許容電流の比較

4-4 IEDとの相互接続試験

集約したセンサデータの活用は、ダイナミックレーティングにおける許容電流の算出に限らない。当社集約装置は、電力設備の運用自動化のための国際標準プロトコルとして普及してきているIEC61850にも対応しており、IEC61850 GOOSE^{*10}を用いて同プロトコルに対応したIED^{*11}との相互接続性の確認を行い、両装置間での通信対向が可能であることを確認した⁽⁷⁾。IEDおよびIEDと接続して使用される設備制御機器においては、センサデータを活用することにより、従来よりも高度な制御を実現しうるものと考えられる。

5. 展 開

先に述べた再生可能エネルギー増加に伴う系統混雑の問題以外にも、架空送電設備の老朽化、保守人員の不足などの問題⁽⁸⁾がある。

当社架空送電線監視装置では、中継機と気象センサにより鉄塔周辺の気象データの取得を行っているが、各種センサの追加により、気象以外の環境データを取得することも可能である。これらのデータの長期的な取得と蓄積、データ分析により鉄塔設備の保守、保全の効率化にも役立てることが可能と考えられる。

6. 結 言

本稿では、当社の架空送電線監視装置の特徴について述べた。カーボンニュートラルとそれに向けた再生可能エネルギー

ギーの大量導入は世界的な潮流となっている。エネルギーを取り巻く環境が変化する中、電力システムの運用においてもセンシング技術やIoT、AI技術の活用が今後ますます重要になってくると考えられ、ダイナミックレーティングをはじめ、様々なニーズへの取り組みを進めていく予定である。

用語集

※1 想定潮流の合理化

空き容量の算定条件として用いる最大潮流の想定は従来、基本的に潮流が最大となる条件で行われているが、より実態に合った条件で想定を行うことにより、空き容量の拡大を図る。

※2 N-1電制

多くの送電線では、2回線での送電が行われており、1回線の故障が発生した場合に備えて1回線の一部の容量は緊急時用に確保されている。N-1電制では電源制御装置を設置し、故障発生時に瞬時に出力制御を行うようにすることで、確保している緊急時用の枠を平常時に活用し、送電容量を拡大する方式。

※3 ノンファーム型接続

平常時にシステムの容量に空きがあれば、それを活用して再生可能エネルギー電源の送電を行い、空きが無くなれば出力制御を行うことにより送電容量の最大限の活用を図る方式。

※4 OPGW

Composite Fiber Optical Overhead Ground Wire : 光ファイバ複合架空地線。

※5 ACSR

Aluminum Conductor Steel Reinforced : 鋼心アルミより線。

※6 TACSR

Thermal-resistant Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced : 鋼心耐熱アルミ合金より線。

※7 コロナ放電

主として降雨時に電線表面に付着した水滴の先端から発生する気中放電現象。

※8 電位傾度

電線から外側に向かう電位の傾き。

※9 GNSS

Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム。

※10 GOOSE

Generic Object Oriented Substation Events : 汎用オブジェクト指向変電所イベント。IEC61850の通信方式の一つ。

※11 IED

Intelligent Electronic Device : インテリジェント電子装置。多機能でプログラマブルな電力システム機器用の保護制御装置。

・LTEは欧州電気通信標準協会（ETSI）の登録商標です。

参考文献

- (1) 電力広域的運営推進機関、「[欧米における送電線利用ルールおよびその運用実態に関する調査（平成30年度—海外調査）]最終報告書」
<http://www.occto.or.jp/iinkai/kouikikeitouseibi/files/2018kaigaihoukokusyo.pdf>
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁、「令和3年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2022）」、pp.182-183
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/3_3.pdf
- (3) 総合資源エネルギー調査会、省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会、再生可能エネルギー大量導入・次世代型電力ネットワーク小委員会、「電力ネットワークの次世代化に向けた中間とりまとめ」、pp.23
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/20210903_2.pdf
- (4) 三田雅樹、「送電線の熱容量について」、電設技術、第66巻、第11号、pp63-68 (November 2020)
- (5) 三田雅樹 他、「ダイナミックラインレーティング用送電線監視システム」、電気評論、第105巻、第3号、pp.15-18 (March 2020)
- (6) 確率論的電流容量決定手法調査専門委員会編、「架空送電線の電流容量」、電気学会技術報告No.660 (1997年)
- (7) 関昌也 他、「センサ情報を異メーカー装置間でIEC61850-GOOSEにて授受する伝送基礎試験に関するレポート」、電気学会保護リレーシステム研究会、PPR-21-006 (May 2021)
- (8) 電気事業連合会、「電力業界におけるスマート保安アクションプランについて」、pp.4
https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/denryoku_anzen/pdf/003_07_00.pdf

執 筆 者

東 栄治* : パワーシステム研究開発センター
主査



丸山 剛史 : パワーシステム研究開発センター
主査



梅村 侑史 : 架空線事業部



吉田 雄一郎 : パワーシステム研究開発センター



三田 雅樹 : パワーシステム研究開発センター
グループ長



小嶋 隆夫 : パワーシステム研究開発センター
部長



* 主執筆者