

ダイナミックレーティング用送電線監視システム

Overhead Powerline Monitoring System for Dynamic Rating

三田 雅樹*
Masaki Sanda

小嶋 隆夫
Takao Kojima

東 栄治
Eiji Higashi

丸山 剛史
Takeshi Maruyama

岩間 成美
Narumi Iwama

酒井 治
Osamu Sakai

再生可能エネルギーの増加に伴い、電力の送電が制限される系統制約の問題が顕著化している。系統制約の一つの要因として送電容量による制約があり、これを解決するためには系統の増強が必要である。しかしながら、系統の増強には多額の費用と時間が必要であり、まずは既存系統を最大限活用していくことが重要である。当社では、既存系統の送電容量を増加させることを目的に、送電線の温度と電流値をリアルタイムに監視するシステムを開発中であり、その状況について報告する。

With an increase in the use of renewable energy, the problem of power system constraints in which electricity transmission is limited has become significant. One major factor of this is the restricted transmission capacity of powerlines. While the enhancement of the powerline capacity is necessary to solve this problem, it requires a large amount of capital and time. Therefore, it is important to utilize existing systems to their maximum potential. For the purpose of increasing power transmission capacity of existing systems, we have been developing a real-time monitoring system for the temperature and electric current value of power transmission lines. This paper reports on the present status of our ongoing developments.

キーワード：ダイナミックレーティング マルチホップ通信 自己発電

1. 緒言

国内の総発電量に占める再生可能エネルギーの割合（水力発電を含む）は、2011年度10.6%、2016年度15.3%に増加し、2030年には22~24%に達する見込みである。従来の電力網系統は、計画的に建設された発電所と需要地を結ぶように構成されており、分散的に作られる再生可能エネルギーの発電電力を送電するように設計されたものではない。そのため、再生可能エネルギーの拡大に伴い、系統の送電容量の不足問題が顕著化しつつある。新規に電源を系統に接続する場合、系統に空き容量があれば先着順に受入れを行うことが可能であるが、容量がない場合には、受入れが拒否される場合や容量の増強が必要になる。一方、欧州などでは、既存系統の容量を最大限活用し、一定の条件付で接続を認める制度を導入している国もある^{(5)~(10)}。

送電容量の増強には、送電線張替によるサイズアップや回線の増設などが考えられるが、多額の費用と時間が必要のため、既存系統の有効活用が重要となる。昨今は、日本でも系統の空き容量を柔軟に活用し、一定の制約条件の下で系統への接続を認める仕組みが議論されている^{(5)~(10)}。

現在の送電容量は、図1に示すように、気象条件は気温40℃、風速0.5m/s、日射量1,000W/m²で一定として、使用される電線の温度定格を超えないように許容電流を計算している。環境条件は、電線温度が最も高くなる条件を考慮しており、通常運用中の電線温度はこれよりも低いと考えられる。そこで、既存の系統を最大限に活用するため、送

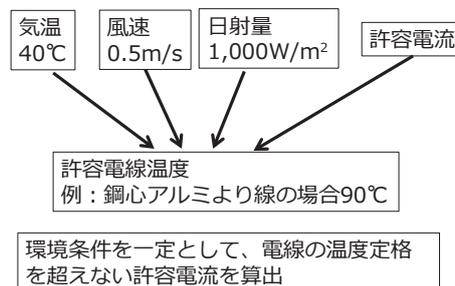


図1 送電線の許容電流の決定プロセス

電線の温度と電流値をリアルタイムに測定して送電容量を動的に計算し、実態に合わせて運用するダイナミックレーティングシステムが提唱されている^{(3),(4)}。当社は、送電容量の運用管理や将来の動的制御を目的とした送電線監視システムを開発しており、本稿では、システムの概要や開発状況と今後の展望について報告する。

2. ダイナミックレーティングシステムの概要

2-1 方式検討

ダイナミックレーティングにおけるセンシング対象は、海外での実証事例の報告によると、電線温度、温度による電線の伸縮に伴う電線張力や電線の傾斜角などがある。

表1に各センシング対象の比較を示す。比較を行った結果、許容電流の算出精度が良く、簡易に求められることから、電線温度を直接測定する方式を採用することにした。

表1 センシング対象の比較

| 対象 | 電線温度 | 張力 | 電線傾斜角 | |
|-------|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 設置箇所 | 電線表面 | 耐張鉄塔 | 懸垂鉄塔 | |
| 使用センサ | 表面温度計 | 電線張力計 | 傾斜計 | |
| 特徴 | センサ構造 | ○ 比較的簡易 | × 碍子に加工要 | ○ 比較的簡易 |
| | 電源 | ○ センサで 発電可能 | △ 太陽電池+ バッテリー | ○ センサで 発電可能 |
| | 測定精度 | ◎ | ○ | △ |
| | 許容電流 算出 | ◎ 電線温度との 比較が容易 | △ 温度と張力の 換算が必要 | △ 温度と傾斜角の 換算が必要 |

2-2 当社システムの概要

当社で開発中のシステムは、図2に示すように、直接送電線に複数の情報収集端末を設置し、電線温度と電流値を計測する。

情報収集端末は、高電圧の電線に直接装着するため、外部から絶縁する必要があり、電源を外部から供給することが困難なため、自発的に送電線電流から発電する方式とした。

自己発電機能を有することで、電池駆動のような定期的なメンテナンスが不要となっている。

また、情報収集端末は、近接の情報収集端末から伝送される情報を無線中継するホッピング機能を有している。この機能を使用して、情報収集端末が計測した温度と電流値は、920MHz帯の無線を使用して、情報収集端末で中継しながら集約装置まで伝送され、最終的に集約装置からデータ収集サーバへLTE回線等を用いて伝送される。

集約装置から伝送することで、公衆回線網のサービスエリア外になるような山間部からも送電線に関する情報を集められるとともに、集約装置から携帯電話などを使い一括

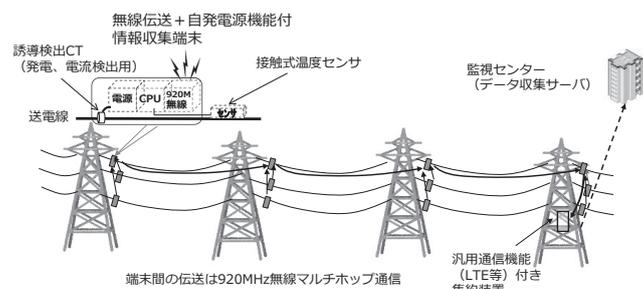


図2 システム図

して伝達するので、後付でも情報伝送に必要なネットワークが容易に構築でき、公衆回線費用が削減できる。

また、送電線に沿ったマルチホップ通信による情報伝送ルートができれば、温度や電流以外に他のセンサからの情報も情報収集端末を介して取り込むことで新たな通信インフラとして使用することも可能である。

無線マルチホップ通信は、メッシュ状のネットワークが一般的に使用されているが、この場合経路構築が複雑なためホップ数が20以下に限られる場合が多い。一方、長距離の送電線は、数十kmにおよぶ巨長を持つケースがあり、ホップ数は20を超えるため、無線メッシュネットワークでは、全線にわたって情報を伝送できない場合が考えられる。

本システムでは、図3に示すように、端末が直線的に設置されることを考慮し、直列にホッピングさせる方式を開発し、50ホップまでの通信を可能とした。

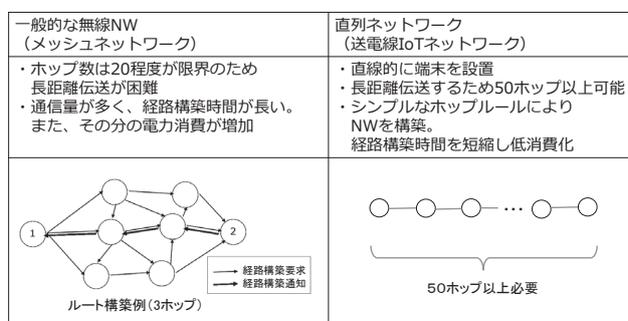


図3 ホッピング方式の比較

本ホッピング方式は、シンプルなホップ方式にカスタマイズしたことにより、ホッピングテーブルの簡略化や低消費電力化に有効な方式となっている。

3. 開発機器の詳細

本システムは、電線に装着する情報収集端末と測定した情報を集約する集約装置から構成される。本章では、各装置の開発状況を以下に説明する。

3-1 情報収集端末装置

情報収集端末のブロック図を図4に示す。送電線電流から発電するために、送電線電流から出る磁場から誘導電流をピックアップする発電用カレントトランス (CT)、そのCTから得られる交流電力から直流電源を生成する電源部、電流センサ用CT、送電線の温度を測定する温度センサ部、取得した温度と電流の処理を行うとともに、マルチホップ通信により集約装置まで伝送する制御/無線部から構成される。

写真1に情報収集端末の概観、写真2に内部構造を示すとともに、表2に概略仕様を示す。本装置を送電線に装着する場合には、高所での作業が必要であり、停電時間を短くするため、施工の容易性が求められる。本装置は写真1、2に示すように半割りの円柱構造になっており、電線把持部で送電線に固定後、円柱の横部分にあるネジを閉めるだけで容易に装着が可能となる。

本装置は送電線に装着すると送電線運用が停止されるまで取外しできない機器であるため、高信頼でメンテナンスフリーが要求される。本装置は自己発電機能を有しており、バッテリー等は不要である。機器は、有寿命部品であるメカリレーやアルミ電解コンデンサなどを使用しておらず長寿命設計を行っている。また、電線を伝わって装置内に雨水が浸入する可能性があるため、装置内部は樹脂充填を行い、完全密閉の構造としており、信頼性の高い設計となっている。さらに円柱構造にすることで、コロナ放電が出にくい構造になっており、高電圧線路に装着しても安定で長寿命動作が可能である。

温度センサは、測定精度を高めるために電線に直付けする構造となっており、測定場所に柔軟性をもたせるために、本体から距離を調整できる。また、本試作では、本体と温度センサ部を分けているが、本体内部に温度センサを収納することも可能である。

無線部は、920MHz無線を使用し、無線伝送に必要なとなるホッピング方式は、自社開発を行った。

送電線上に情報収集端末を設置した場合、自己の発熱による温度上昇の他に、電線温度の上昇に伴い端末自身の温度が上昇する。電線温度は、一般的に使用されるアルミ電線（ACSR）において、最高許容温度が90℃まで上昇することから高温状態になっても装置が動作できるように設計を行っている。また、送電線事故が発生した場合には、線路が遮断されるまでの短時間であるが、事故に伴う大電流が流れるため、事故電流に対する保護機能も有している。

装置を動作させるファームウェアは、ソフトウェア上の問題や将来の機能変更が発生した場合でも、集約装置からソフトウェアをダウンロードしてバージョンアップが可能な仕組みを持ち、ファームウェアを2面持ちすることで可用性を確保している。

3-2 集約装置

集約装置のブロック図を図5に示す。情報収集端末から伝送されたセンサ情報を受信する920MHz無線部とその情報を集約し、データ収集サーバに伝送するLTEルータ部から構成される。データのセキュリティを確保するため、LTE回線契約、データ収集サーバのホスティングとも、インターネットを通らない構成としている。設置場所は、鉄塔上もしくは、鉄塔周辺の建物屋上を想定している。本装置を鉄塔に設置した場合には、AC100V等の外部電源を確保することが困難なため、装置の電源としてソーラパネル＋バッテリーで駆動させる構成としている。当社は、これま

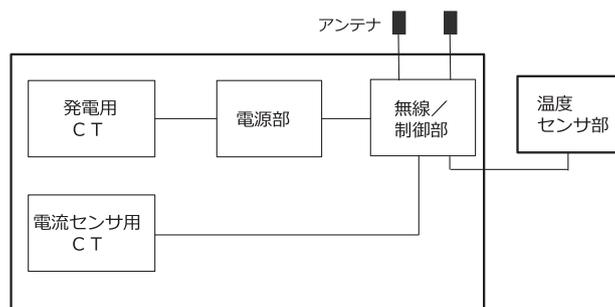


図4 情報収集端末ブロック図

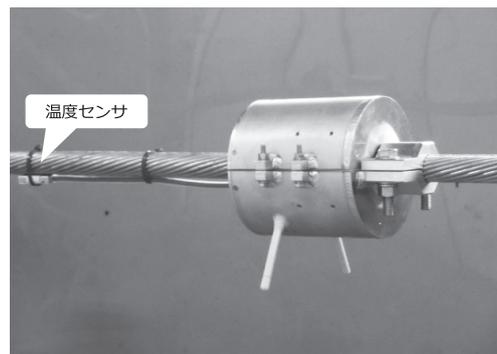


写真1 情報収集端末外観

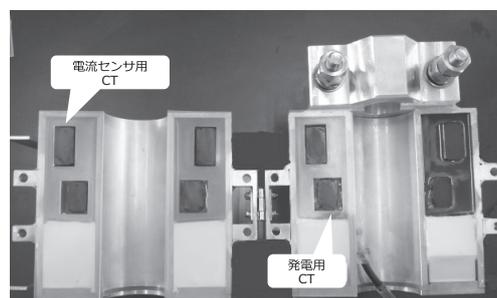


写真2 情報収集端末内部構造

表2 情報収集端末概要仕様

| 項目 | 仕様 | 備考 |
|----------|---|--------------|
| 駆動電流 | 50A~1,000A | 装置が駆動する送電線電流 |
| 測定電流 | 50A~1,000A | |
| 目標電流精度 | ±2% | |
| 測定温度範囲 | -20~+105℃ | |
| 目標温度精度 | ±2℃ | |
| RF920無線部 | ARIB-STD-T108準拠 ⁽¹⁾ ポップ数：最大50 周波数：920MHz帯 出力：20mw 伝播距離 見通し内1Km以上 | |
| 測定間隔 | 10分間隔 | |
| 寸法 | φ150×L146(mm) | 電源把持部除く |
| 重量 | 約5Kg | |
| 設計寿命 | 10年以上 | 有寿命部品は未使用 |

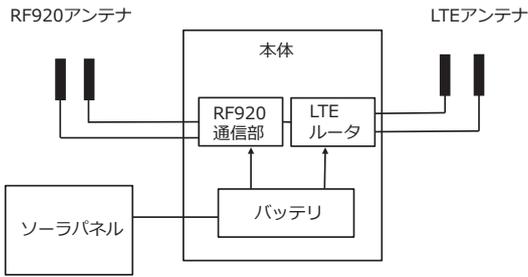


図5 集約装置ブロック図

で種々の架空線監視製品を開発・納入しており、その経験を活かして、鉄塔上に設置する機器として、ソーラパネルやバッテリーの容量を小さくするとともに軽量化を実現するため、消費電力の最適化を行った。

写真3に集約装置の概観、写真4、5に今回使用した920 MHzアンテナハウジング及びLTEのアンテナの外観を示す。また、表3に集約装置の概略仕様を示す。



写真3 集約装置本体外観



写真4 920MHzアンテナハウジング

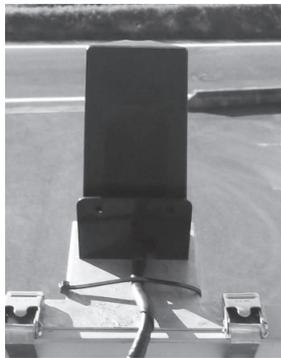


写真5 LTEアンテナ

表3 集約装置の概略仕様

| 項目 | 仕様 | 備考 |
|----------|--------------------------------|------|
| 電源 | ソーラパネル+バッテリー | |
| RF920無線部 | ARIB-STD-T108準拠 ⁽¹⁾ | |
| LTE無線部 | ARIB STD-T63準拠 ⁽²⁾ | |
| 測定間隔 | 10分間隔 | |
| 寸法 | H800×W45×D400(mm) | 本体のみ |
| 重量 | 約65Kg | |

4. 評価状況

4-1 動作確認試験

写真6に示すように、当社内の実験場で情報収集端末を課電状態の試験用送電線に装着して、下記の基本機能が安定して動作することを確認した。

- ・装置が動作するための電力が得られること（自己発電機能）
- ・送電線温度と電流値の物理量が測定できること（センシング機能）
- ・取得した物理量を情報収集端末No3⇒No2⇒No1⇒集約装置の経路で無線中継できること（伝送機能）



写真6 課電状態での情報収集端末動作試験

4-2 情報収集端末環境試験

既述の通り、情報収集端末は、送電線に直接装着されるため、非常に高い信頼性を要求される。表4に示す環境試験を、各種試験設備を用いて実施し、信頼性に問題ないことを確認した。

表4 情報収集端末 試験項目

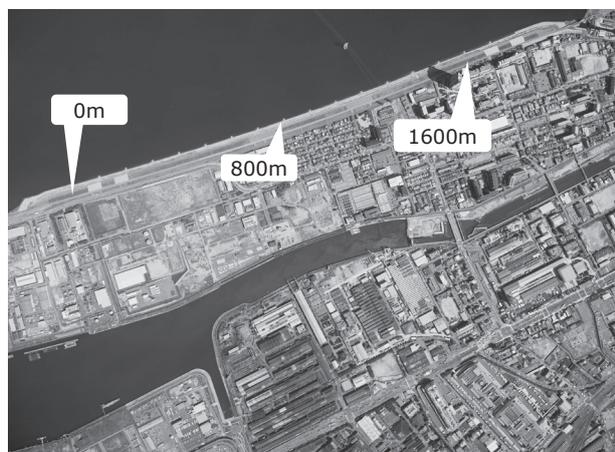
| No. | 項目 | 内容 |
|-----|---------|--|
| 1 | 防水試験 | 50cm水没状態において動作確認 |
| 2 | 高温動作試験 | 105℃恒温槽内に12時間放置後、動作確認 |
| 3 | 低温動作試験 | -20℃恒温槽内に12時間放置後、動作確認 |
| 4 | 耐熱試験 | 電線温度125℃で400時間放置後、動作確認 |
| 5 | | 電線温度150℃で100時間放置後、動作確認 |
| 6 | ヒートサイクル | -20~105℃で100 サイクル実施後、動作確認 |
| 7 | 振動試験 | 電線ひずみ±0.01%で1千万回振動させた後、筐体の破損やネジの緩みがないことを確認 |
| 8 | コロナ音試験 | 電位傾度10~16kV/cm でのコロナ音の確認 |
| 9 | 高電界試験 | 電位傾度10~20kV/cm での通信安定性の確認 |
| 10 | 強磁界試験 | 3,000Aの強磁界印加後、動作確認 |
| 11 | 短絡電流試験 | 電線に63KAを1秒間流した後、動作確認 |

4-3 無線部の動作性能評価

本システムで使用するマルチホップ通信方式は、50ホップまで動作するようにプログラミングを行った。情報収集端末は、直線上に設置されるため、下流の装置（ID若番）から上流（ID老番）の装置に向けて機器IDの大きい番号にパケットを転送するようルーティングを行うことで、ネットワーク構築時間を大幅に短縮している。また、独自データ構造により不要データの送受信を削減し、伝送時間を短縮することができ、リアルタイム性と省電力性の向上を実現することができる。

マルチホップ中継試験については、社内で実験系を構築し、50ホップ通信が可能であることを確認した。

伝送距離の評価は、直線上で大きな障害物が見通し上にならないよう河川敷を使用して試験を行った。アンテナ高さを5mとし、距離は、200m刻みで1,800mまで評価を行った。1,200mまで、エラーフリーで安定した通信が可能、1,400~1,800mまでは、フェージング等の影響により稀



出典：国土地理院の空中写真

写真7 伝送距離評価場所

に情報をロスすることはあるものの、ファームウェアの再送機能などを実装することにより、運用上エラーフリーを実現でき、伝送上問題ないことを確認した。

5. 今後の展望

ダイナミックレーティングシステムは、海外における他社実証実験において送電容量を30%以上増加することができたとの報告例がある。また、本稿では、センシング方法として電線に直接温度センサを設置する方式を検討したが、電線周囲の気象情報（気温や風速など）を測定し、これまで一定条件で計算されていた定数を許容電流の算出に利用することで、増容量化に寄与できるとの報告もある。本システムの適用により電線温度や電流を直接測定できるようにすることで、これまで十分な許容電流に関するデータがなかった送電線の運用実態から比べて、送電線の温度を監視しながらより効率的に運用することができる。海外では、一部ダイナミックレーティングを使った運転制御へのフィードバックも実証されているが、国内では、自動での運用制御を行うには、データの積み重ねにより送電設備の実態を把握し、より確実な制御方法を確立して行くことが必要と考えられる。今後再生可能エネルギー源として、風力発電による発電量の大幅増加が見込まれており、国内でも送電線周囲の温度情報を用いた送電容量の検討を行うプロジェクトも始まっている。本システムを用いることで、より送電容量の予測精度を向上させることが期待でき、効率的な運用につながると思われる。

また、本システムの適用範囲は、ダイナミックレーティングのみに限られたものではない。例えば、本ダイナミックレーティングシステムを、送電線に沿った通信インフラと見立てることができる。送電線が設置されている箇所は、公衆回線の通信エリアから外れている場合もあり、昨今注目されているLPWA（Low Power Wide Area）などが使用できないエリアからも、送電線を無線伝送プラットフォームとして活用することで、送電線周辺に設置された各種のセンサの情報を伝送することができ、付加価値をつけることができる。例えば、山間部の気象情報、山の地滑りセンサの情報などを伝送することが考えられる。

集約装置を通してデータ収集サーバに上げたデータは、AIや機械学習を使って解析することで、保守・保全の効率化、送電設備の寿命診断による延命化に役立てることも可能と考えられる。

2018年度に本システムを使った電力会社での動作実証を計画しており、長期間データの取得を行い、信頼性検証を行った上で製品化を行う予定である。

6. 結 言

今回開発した、実証実験機の評価・検証をさらに進めて

いき送電線設備の保守・保全、設備運用の効率化に有用なシステムの開発を引き続き進めていく。

参考文献

- (1) 一般社団法人電波産業会、ARIB-STD-T108、[920MHz帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備]
- (2) 一般社団法人電波産業会、ARIB STD-T63、[IMT-2000 DS-CDMA and TDD-CDMA System]
- (3) K. Adachi T. Kumeda K. Nagano, "A Method for Expanding the Current Capacity of Overhead Transmission Lines," Cigre session2004 B2-209
- (4) Yoshiyuki Saito, Masanori Isozaki Koji Nagano, "Review on Increase of Allowable Current for Conductors," Proceedings of the 2010 International Conference on Condition
- (5) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第1回）- 配布資料
- (6) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第2回）- 配布資料
- (7) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第3回）- 配布資料
- (8) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第4回）- 配布資料
- (9) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第5回）- 配布資料
- (10) 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・次世代電力ネットワーク小委員会（第6回）- 配布資料

執筆者

三田 雅樹* : パワーシステム研究開発センター
主席



小嶋 隆夫 : パワーシステム研究開発センター
グループ長



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



岩間 成美 : 架空線事業部 グループ長



酒井 治 : 架空線事業部 グループ長



*主執筆者