



既設電力ケーブルを伝送路とした 地中線設備の保守監視システム

Manhole Monitoring System Using the Existing Power Cables as
Transmission Line

後藤 哲生*
Tetsuo Goto

横山 大
Tai Yokoyama

下口 剛史
Takefumi Shimoguchi

長田 拓馬
Takuma Osada

中西 正温
Masaharu Nakanishi

地中送電線路の点検保守は、従来人手によって定期的に巡視等を行うTBMから、IoTやAIを活用したデジタルトランスフォーメーションを促進し、必要な時に効率的に保守を行う、より高度なCBMへの転換を図るといったスマート保安の推進が要望されている。IoTを実現する課題として、地中送電設備の多くを占める管路布設ケーブル設備の保守情報を取得するための安価で安全かつ信頼性の高い通信方式の確保が困難であったことが挙げられる。本論文では、マンホール内から66kVの既設の電力ケーブル(XLPE)の金属遮蔽層を伝送路として利用して、保守に使用するセンサ情報やカメラ画像を収集する保守監視システムを東京電力パワーグリッド(株)と共同で開発を行ったので紹介する。

In the maintenance of underground transmission lines, there is a need to shift from time-based maintenance, where maintenance is performed manually and periodically, to more advanced condition-based maintenance, where maintenance is performed efficiently when necessary, through the promotion of digital transformation using IoT and AI to achieve smart maintenance. One of the challenges in realizing IoT has been the difficulty in developing an inexpensive, safe, and reliable communication method to acquire sensor information about cables installed in conduits, which account for the majority of underground power transmission facilities. This paper describes the development of a system that collects sensor information and camera images using a 66-kV XLPE cable installed in a conduit manhole, in collaboration with TEPCO Power Grid, Inc.

キーワード：マンホール、地中送電線路、電力線通信、遮蔽層伝送、保守監視システム

1. 緒言

従来の地中送電線路の点検保守は、定期的なケーブルや付帯設備の巡視(外観点検)を中心に、人手による漏油、移動量、温度、部分放電、ガス分析などの測定を組み合わせで行うTBM(Time Based Maintenance)を主体としたものであった。しかし、近年の設備の老朽化や将来的な保守人員の不足などの問題が顕在化しており、スマート保安の推進が強く求められており、IoT、センサ技術や人工知能(AI)等を用いたデジタルトランスフォーメーション(DX)を促進することで、より高度なCBM(Condition Based Maintenance)を主体とした保守の高度化が望まれている。

地中送電線路は、地中の洞道や管路を使ってケーブルが埋設されているため、IoTの実現には、保守に使用する各種センサデータを地中から伝送するために安価で信頼性が高く、高い情報セキュリティを有するセンサネットワークを構築する必要がある。特に、管路マンホール部は、以下の課題があった。

- (1) 既存設備に対して、空管路がない場合は、メタルや光ファイバ等の通信線を後付けで布設することが困難である。空管路があったとしても、布設コストを要する。

- (2) マンホール(以下、MH)から無線によるセンサデータの伝送を行う場合は、電波の飛距離が短いため、データ収集のためのネットワーク構築にコストを要する。
- (3) センサや伝送装置が使用する電源の確保が困難である。
- (4) センサや伝送装置は、MH内部が水没する環境であるため、高い防水性を要する。

従来から、無線を用いた電力ケーブル移動量の測定システム⁽¹⁾や、920MHz帯のLPWA(Low Power Wide Area)など無線通信を用いた監視システムの報告がなされている⁽²⁾。通常、MHの蓋は、送電線事故時を考慮して2重の金蓋を採用している場合もあり、無線通信の大きな減衰を生じ、通信距離は数百mに留まる。さらに、MH内が水没すると、通信距離はさらに短くなる。

これらの課題を解決するべく、電力線通信技術(PLC: Power Line Communication)を活用し、既設電力ケーブルの遮蔽層を伝送路にすることで、新たに通信線を布設することなく、MH内に設置したセンサデータを取得することができ、安価・高信頼性・高セキュリティの通信システムを開発した。また、当該通信システムを応用したMH内設備の保守監視システムを開発したので報告する。

2. 電力ケーブルの遮蔽層を用いた PLC 伝送

PLC は、既設電力線に高周波の搬送波信号を重畳し通信を行う技術であり、国内では kHz 帯と MHz 帯の 2 方式がある。今回、MHz 帯の PLC 方式と比較して減衰量が小さく長距離伝送が期待できることや、電力ケーブルの劣化診断に有用な部分放電測定に用いる周波数帯域 (MHz 帯) との干渉を避けるため、10-450kHz の周波数を使用する kHz 帯の PLC 方式を採用した。

高圧や超高圧の電力ケーブルにおいて、導体を伝送路として使用する場合、信号を重畳する結合器が高耐圧化により大型になることや、導体に接続可能な場所が端末部に限定されるといった課題がある。MH 内には、電力ケーブルの接続箱が収容され、接続箱は、**図1**のケーブルの遮蔽層を接続するボンド線や接地線が、接続箱の外部に引き出されている。これらの電線に非接触で信号を誘導結合できる CT (Current Transformer) を用い、遮蔽層を伝送路として利用することとした。**表1**に導体と遮蔽層を使った伝送方法の比較を示す。

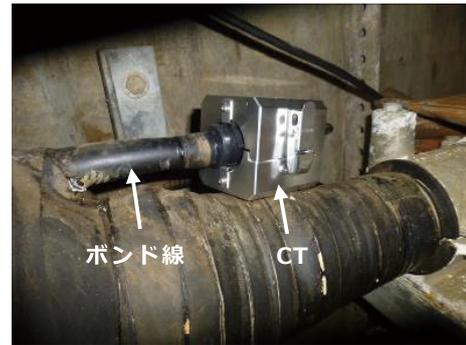
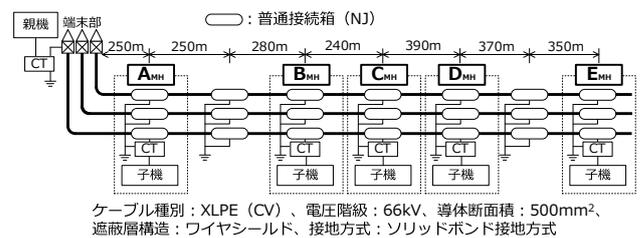


写真1 ボンド線または接地線への CT の誘導結合例



ケーブル種別: XLPE (CV)、電圧階級: 66kV、導体断面積: 500mm²、遮蔽層構造: ワイヤシールド、接地方式: ソリッドボンド接地方式

図2 試験構成

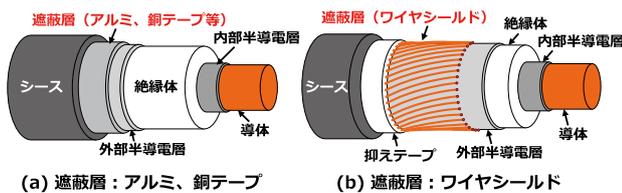


図1 電力ケーブルの構造

表1 伝送方法の比較

	導体伝送	遮蔽層伝送
信号結合	容量結合	誘導結合
信号注入箇所	端末部	端末部または接続箱
伝送距離	長距離伝送可	導体伝送と比較し短距離だが、中継が可能
設置条件	大型設備が必要 設置制約が大	小型 CT で結合可 設置制約が小
利便性	適用ケーブル電圧の 制限あり	適用ケーブル電圧の 制限なし
電磁界漏洩	地中埋設のため、影響なし	
評価	IoT に不向き	IoT に最適

ボンド線や接地線にクランプする CT の外観を**写真1**に示す。CT の寸法は、W105×H85×D120mm と小型であり、取り付けが容易である。この CT を使用して接地線に PLC の搬送波信号を重畳し、他箇所を設置した装置と通信を行った。

次に、**図2**に示す稼働中の電力ケーブルの遮蔽層を使った PLC による伝送試験を実施した。

表2に MH 内に設置した子機と端末部の親機、または MH 内に設置した各子機間で直接通信した場合の通信試験結果を示す。

表2 66kV CV ケーブル通信試験結果

通信方向	項目	親機 -A 間	親機 -B 間	B-C 間	C-D 間	D-E 間
上り	成功率 (%)	100	100	100	100	100
	実効速度 (kbps)	20.1	0.9	20.5	19.6	20.3
下り	成功率 (%)	100	100	100	100	100
	実効速度 (kbps)	19.8	1.1	20.3	20.1	19.1

試験では各装置間で 1232byte のパケットを 100 回送信し、通信成功率及び平均実効速度を測定した。

上り及び下り方向の通信成功率は、全て 100% であった。実効速度は、**表2**の親機-B 間で低下している。CT によって、遮蔽層に誘導結合された信号は、**図3**に示すように、他相の遮蔽層を使って隣接する普通接続箱 (NJ) 間で電流ループを形成し信号が伝搬する。信号の減衰は、遮蔽層を伝搬中に発生する減衰よりも、NJ を通過する際に分流等による信号減衰の方が大きく、親機-B 間は NJ を 3 区間通過したことで信号が減衰し、S/N が低下したことが原因と考える。

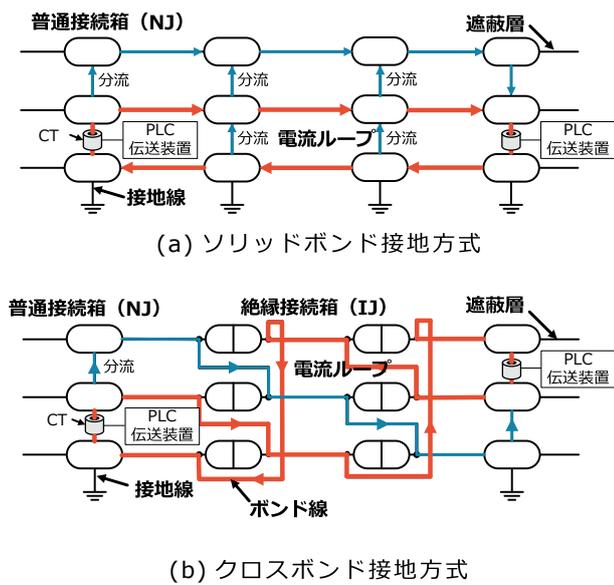


図3 各接地方式での電流ループの形成

本論文では、ソリッドボンド接地方式を例としているが、信号の伝搬において、上記の両接地方式を、接地区間で見れば、クロスボンド接地方式が絶縁接続箱で信号の伝搬する相が入れ替わることを除くと、ソリッドボンド接地方式との間で大きな相違はないと考えられる。したがって、各接続箱間の距離を同等とすると、ソリッドボンド接地方式よりもクロスボンド接地方式の方が、NJ間の距離が約3倍長いことから、相対的に伝送距離が長くなると考えられる。

3. マンホール内設備監視システムの仕様

3-1 マンホール内設備監視システムの構成

遮蔽層を使ったPLC伝送により、IoTに必要な高い信頼性の伝送が可能である。それを利用し、MH内の設備監視を行うためのシステム構成を図4に示す。

マンホール内設備の監視装置は、MH内に設置され、最

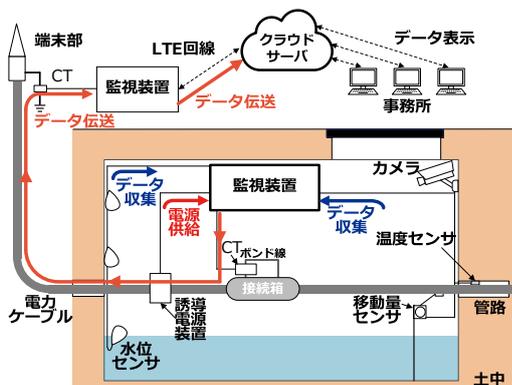


図4 MH内設備監視システムの構成

大10台の監視装置とPLCによる接続が可能である。監視装置は、取得した各種センサ情報を、遮蔽層を使ったPLC伝送により、携帯など汎用の通信手段が使用できる屋外のケーブル端末部まで伝送する。そこからはLTE回線を用いてクラウドサーバに送り、データを蓄積し、事務所などから監視データの確認が可能である。

3-2 MH内監視内容と使用センサ

本論文でのMH内の設備監視内容と、使用したセンサを表3に示す。なお、今回採用したセンサとカメラは、コストと手間を考慮して汎用品を採用した。低地にあるMHなどは、雨水や地下水のMH内への流入などによりMH内が水没する箇所がある。そのため、装置やセンサは、水深10mに対応できるものを使用し、カメラ自体も専用の筐体を開発して防水を行い、画像の撮影を行った(写真2)。

表3 MH内の監視内容と使用したセンサ

監視対象	測定項目	使用センサ	
		センシング方式	I/F
内部状態	状態	カメラ	USB
ケーブル移動	移動量	ポテンショメータ	AI
		カメラ	USB
内部水位	水位	フロート式センサ	DI
		カメラ	USB
ケーブル表面、管路内部	温度	測温抵抗体	AI

AI：アナログ信号、DI：接点信号



写真2 MH内へのカメラの設置例

3-3 マンホール内設備監視装置の仕様

表4にマンホール内設備監視装置の主な仕様を示す。

MH内の設備監視には汎用センサを使用するため、別途信号変換器が必要である。汎用センサの出力には2種類あり、一つは温度センサや移動量センサなどで用いられるアナログ信号、もう一つはフロート型の水位センサなどで用いられる接点信号がある。アナログ信号は、センサの測定量を信号変換器で4-20mAの電流に変換して出力する。接点信号は、接点をオン、オフして出力する。そしてこれら

の信号を、さらに PLC 信号に変換するセンサ出力変換器を開発した。

マンホール内設備監視装置の筐体には、地下用光ケーブルの接続で実績のある水深10m対応のクロージャを使用した(写真3)。

なお、マンホール内設備監視装置への電源供給は、電力ケーブルの電流から電磁誘導を利用して発電を行う誘導電源装置を使用した。

表4 マンホール内設備監視装置の主な仕様

項目		仕様
I/F	アナログ信号 (AI)	4ch
	接点信号 (DI)	3ch・接点 (入力)
	USB	2Port
電源/消費電力	DC12V/18W以下	
寸法	W272×H272×D673mm (突起部除く)	
重量	約15kg	
設置場所	MH内 (IP68、水深最大10m)	



写真3 マンホール内設備監視装置

4. マンホール内設備監視システムへの適用

4-1 画像を用いたマンホール内部設備監視

従来、伝送や電源の問題もあり、MH内部を画像で常時監視することは極めて稀である。今回、監視例として、MH内の全景及びケーブルにフォーカスした画像を撮影した。

通常、ケーブルを含めMH内の設備は、動作が少ないため、画像の差分解析を行うことにより、状況変化の検出が可能である。写真4(a)の全景観察によって、例えば、地震などの災害時にMH内部で設備の破損が発生した場合や、ケーブルのオフセット異常などが発生した場合には、早期に検出が可能と考えられる。また写真4(b)では、ケーブル近くからケーブル上のマーカを6時間間隔で撮影し、画像解析(2値化及び差分処理)によってケーブル挙動の検出を行った。その結果を図5に示す。

撮影開始から137日間のケーブル電流とMH内の両端の管路口近くで当該のケーブル挙動の監視を行った。監視を



(a) MH内部の全景 (b) ケーブル上のマーカ

写真4 MH内部の全景及びケーブル

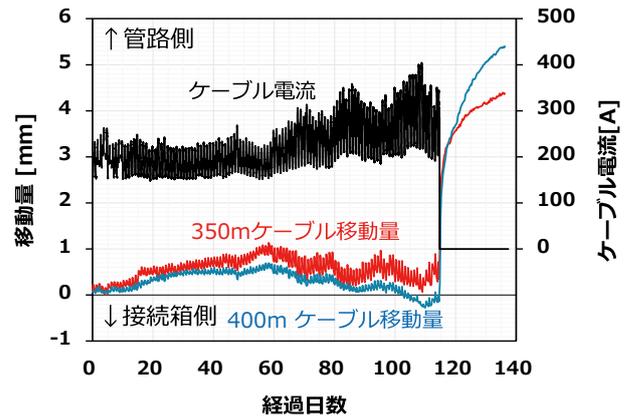


図5 ケーブル移動量と電流の変化

行った管路内のケーブル長は、それぞれ350mと400mである。測定期間中のケーブル電流の変動は、概ね150Aから400Aで推移しており、日間のケーブルの僅かな移動は、日間の電流の変動に追従している。また、通電期間中の1mm以下の微小な伸縮変化が測定できた。図の+方向は、管路内へのケーブルの収縮を示している。測定開始(9/26)から約60日間は、負荷電流の変動幅がほぼ一定であるため、気温低下とともに、徐々に管路内に収縮しているが、それ以降は、電流の変化幅が増加したことで、徐々に伸び出しの傾向が見られた。また、115日目、保守によって線路停止した際には、導体の温度低下に伴う急激な収縮(3mm以上)変化が見られた。本ケーブルは、66kV CVTケーブルのため、負荷電流によるケーブル伸縮は、設計上考慮されないが、mm単位での微小な変化が生じることが確認できた。なお、別に設置した移動量センサも同様のケーブルの変位を検出した。

また、写真4(a)に示す画像を用いて、画像の中央部付近に設置した量水標との比較により水位検出を行ったところ、フロート式水位センサ3台による段階的な水位レベルの検出動作に比べ、連続的な水位の変化を捉えることができた。

MH内の状態を画像によって監視することで、センサのみの監視に比べ、設備状態の識別機能の向上と、例えば、ケーブル移動量などは、画像によるデジタル数値化を行うことで、センサとして活用でき、付加価値の向上が期待できる。

4-2 MH内ケーブル周囲温度の季節的な環境変化

ケーブルの許容電流や熱機械挙動、長期の温度劣化などは、ケーブル周囲の温度条件の影響を受ける。今回測定したケーブル周囲温度の測定データをもとに季節的な環境変化を考察した。図2に示す5箇所にMH及びC-D間のケーブル空管路の温度分布の測定を9月末から約5か月間行った。また、各MHの水位状態などの付帯情報も併せて測定した。

表5に各MHの環境条件を示す。測定期間中の水位検出の結果から、地上深さの深いCは、水を排水してもすぐに水没し、隣接するBとDは、浸水の速度は雨量など季節によって異なるが、浸水や内部の水没が見られた。なおAとEは、期間中の浸水が見られなかった。

表5 MH環境条件

MH	標高 (m)	地上深さ (m)	水没
A	9.7	3.9	無
B	10.5	3.9	有
C	12.3	8.2	有
D	15.3 </td <td>5.8</td> <td>有</td>	5.8	有
E	41.0	6.0	無

12月のMH内のケーブル表面温度とMH内雰囲気温度との差分温度と負荷電流の変化の様子を図6に示す。差分温度と負荷電流は、強い相関関係が見られ、負荷電流に対する温度変化の時間遅れは、約4時間であった。ケーブル表面温度は、MH内温度と電流によって影響されるため、測定をした5箇所のMHにおける季節的な温度状態の変化の様子を考察した。

ケーブル周囲の温度環境は、各MHや埋設区間の土壌の状態によって変わると考えられる。MH内雰囲気温度やCとDの間の管路区間において、測定対象のケーブルの布設

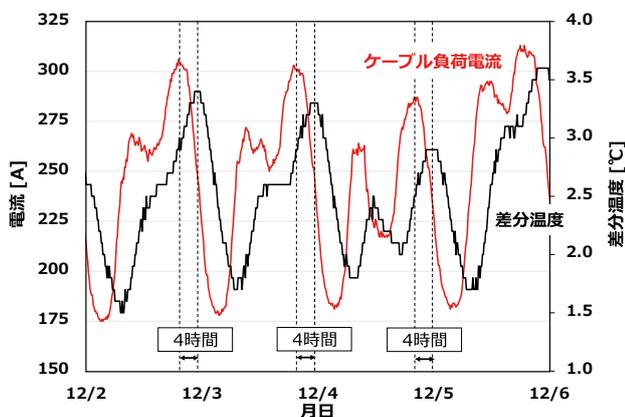


図6 ケーブル表面温度とMH内雰囲気温度との差分温度と負荷電流の変化

管路に隣接した空管路内温度を測定した。図7は、測定結果から9月及び2月に記録した最高温度を示す。空管路内温度は、Cの管路口から約50m及び100m、Dの管路口から約30m及び100m内側に白金測温抵抗体温度センサを設置して測定した。詳細な測定位置は、参考として図8のファイバ温度計による測定結果の図中に点線で記載する。

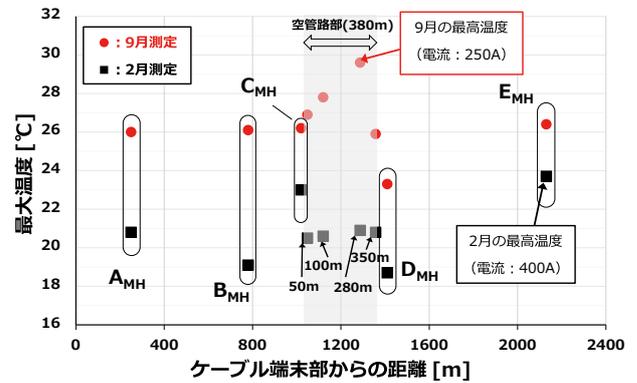


図7 MH内雰囲気温度及び空管路内温度

本結果より、夏場（9月）は、管路部の温度が最も高くなるのが空管路内の温度測定から確認できた。一方、冬場に移行すると、空管路部分の温度が低下し、一部のMH内部よりも低くなるのがわかる。特に冬場は、高台のEと水没しやすいCの温度が管路部よりも高い。これは、Eが、常時空气中にケーブルの発熱に起因するMH内部の温度上昇の影響、Cが、ケーブルが水没状態にあることによる水温の影響をそれぞれ受けたものと考えられる。参考に、夏場と冬場にスポット的にファイバ温度計により空管路内の温度分布を測定した結果を図8に示す。

管路口から管路の中央に向かって夏場の温度上昇は、ケーブル埋設深さが浅いほど著しい。これは、土壌の温度

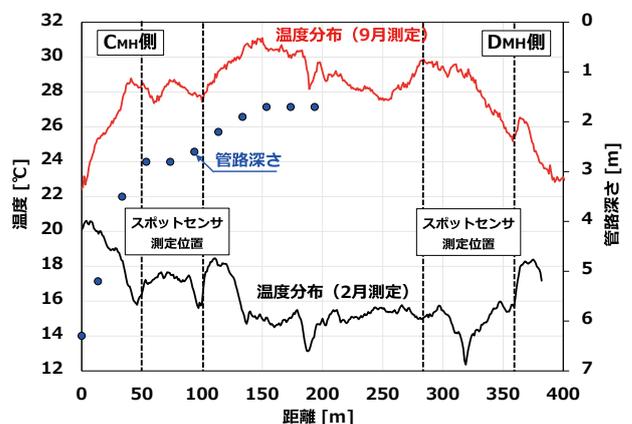


図8 空管路内部温度分布

分布が、埋設深さが浅いほど外気温の影響を受けやすいためと考えられる。逆に冬場も外気温の低下による土壌の温度低下の影響を受けることになるが、MH内の温度変化が管路部に比べて少ないために、逆の傾向を示していると考えられる。夏場の管路内部の温度分布は、管路口から50m以上内側に入れば、中央（200m）地点の29℃から±1℃程度のバラツキの範囲内にある。温度分布を把握するには、ファイバ温度計による連続した分布測定が最良であるが、MH内に測定器を恒久的に設置することは難しいため、特定のMH区間で管路内温度分布を測定する場合には、短い間隔でスポット温度を測定することで、十分な温度分布データが得られると考えられる。

将来的に、ケーブルのDLR（Dynamic Line Rating）による許容電流などを検討する際には、ケーブル周囲の温度条件を考慮し、温度条件の厳しい箇所、いわゆるホットスポットを発見して、導体温度への影響を検討する必要がある。今回の長期の測定結果から、管路布設ケーブルに対して、以下の知見が得られた。

- (1) 管路布設箇所のケーブル周囲温度は、空管路内の温度測定結果より、季節的な温度変化の影響を大きく受ける。土被りが1.7mの地点（150m箇所）において、9月と2月の間で最大16.1℃の温度差を観測した。
- (2) C-D区間は、周囲の地下水が流れ込む環境のため、土壌の温度は、ドライな土壌環境より低いと考えられる。
- (3) Eの周囲の土壌水分量は、C-D区間より少ないことが予想されるため、夏場にはE周辺区間の方が、より温度上昇が大きい可能性が考えられる。

今回の測定は、夏場の負荷電流が冬場よりも小さいため、ケーブルの温度上昇への影響は小さいが、土壌の水分量が少ない、土被りの厚さが薄い、負荷電流による発熱が大きい（発熱による線路の周囲土壌の乾燥なども考慮）布設区間を使って、データの蓄積を行うことで、さらにケーブルの熱環境に対する状況把握に役立つことが期待できる。

5. 結 言

電力ケーブルの遮蔽層を伝送路とした伝送方法を開発し、その特性を評価した。遮蔽層を使ったPLC伝送によって、これまで伝送手段の確保が困難であったMH内からも高い情報セキュリティを有する信頼性の高いIoTネットワークを容易に構築できることを実証した。MH内に設置した汎用のセンサやカメラ等のデータは、デジタル情報として長期間クラウドサーバに蓄積し解析を行うことで、詳細なケーブルの挙動解析に役立つと考えられる。本論文では、昨今のスマート保安の実現に向けて注目されている画像を使ったデジタル化や、温度・水位データとの組み合わせによって、ケーブル周囲の温度環境の季節的な変化を捉えた解析例を示した。今後、本MH温度監視技術は、管路布設

ケーブルのDLRへの活用が期待できる。

このような地中線設備のデジタル化によって、データを蓄積し、AIなどを活用することで、CBMへの転換や将来の予防保全への発展が期待できる。

今後は、地中送電線の運用・保守分野のデジタルトランスフォーメーションの推進に向け、今回開発したMH内設備監視システムを活用したMH内の部分放電計測を行うシステムの導入、及び設備データの蓄積や画像の解析にAI等を活用していき、設備の保守運用の高度化を推進する。

最後に、本システムの開発、及び実線路を使った試験の実施にあたり、東京電力パワーグリッド(株)の関係者の皆様方に、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 舟橋隆、「地中送電ケーブル移動量測定の高度化」、平成29年電気学会全国大会論文集、7-216（2017）
- (2) 重見健太、「地中送電MH内設備遠隔監視システムの開発」、電気学会電力・エネルギー部門大会、262（2019）

執 筆 者

後藤 哲生*：電力プロジェクト事業部 主席



横山 大：電力プロジェクト事業部



下口 剛史：電力プロジェクト事業部 技師長



長田 拓馬：電力プロジェクト事業部 グループ長



中西 正温：電力プロジェクト事業部 部長補佐



*主執筆者