

き電用変電所制御回線のデジタル化における方式提案

小西 武史* 森田 岳* 平川 慎太郎*
竹内 恵一** 山口 大介** 岩本 功貴**

Proposition of Digital Communication Applying for Traction Substation Control Line

Takeshi KONISHI Gaku MORITA Shintaro HIRAKAWA
Keiichi TAKEUCHI Daisuke YAMAGUCHI Koki IWAMOTO

Control signals or measurement data are transmitted between the control board and the substation equipment via a lot of metallic lines. There is a possibility of simplification and cost reduction of the transmission by applying digital communication systems to a wireless or an IP/Ethernet network. The introduction of digital communication to substations requires high reliability, low transmission delay, and robustness to electromagnetic field. Firstly, we clarify the required reliability and transmission speed of the signals and measurement data of railway substations. Secondly, we evaluate the EMC level for the digital communication systems in the railway substations under the condition in which circuit breakers open or close. Thirdly, we apply the digital communication systems to the control line between the temporally control board and circuit breaker, and evaluate the transmission speed of the systems. The results show that the reliability and the transmission requirement can be satisfied by the IP/Ethernet and power line communication.

キーワード：変電所，デジタル化，操作連動，電波雑音，イーサネット，電力線搬送

1. はじめに

き電用変電所における配電盤から主要機器（開閉器や計器用変成器など）に至る制御・計測情報は、基本的にアナログ信号であり、メタル回線で伝送されている。各情報は個別のメタル回線で伝送されるため、メタル回線の配線数が必然的に多くなり、施工時のコスト増、保守作業の複雑化につながる。そこで、近年のIP（Internet Protocol）系技術を適用したデジタル伝送による設備のスリム化、設備コストの低廉化が期待される。しかしながら、変電所へのデジタル伝送の導入には、機器の入切や保護のための通信速度の確保や、電鉄用変電所構内の電磁界の影響に対する頑強性などへの懸念がある。それらの課題に対して、変電所内の情報伝送に必要な機能の整理、電波雑音環境測定による変電所の無線通信環境の把握、仮設の配電盤と遮断器にデジタル化方式を適用した操作連動試験を行った。その結果を踏まえ、鉄道への適用の可能性のある通信方式を選定するとともに、設計上の課題を抽出した。

2. き電用変電所制御回線の概要とデジタル化

2.1 概要

変電所内の各機器と電力指令の各装置との間の制御回

線と、これら機器との関係を図1に示す。本論文における「変電所」とは、変電所と同種の開閉器等を有する箇所（例えばき電区分所）も含める名称とする。

電力指令は、基本的に監視制御装置、中央処理装置、伝送を行う遠隔装置で構成される。監視制御装置は開閉器の状態、故障や異常の発生状態を監視し、開閉器や機器の制御（開閉操作）を行う。中央処理装置には、複数の順序制御を連続的に実行する機能が実装されている。変電所は電力指令からの制御を受け、配電盤を介して機器や開閉器の制御動作を実行する、もしくは機器や開閉器の情報を電力指令に伝送する。開閉器は変電所内の保護継電器から直接制御、あるいは他の変電所からの制御により連速装置を介して入切操作を実行することもある。

図1中の太矢印で示した箇所は、既にデジタル伝送化が実施されている箇所である。すなわち、変電所と外部との情報伝送は既にデジタル伝送化が実施されている。一方、変電所内に関しては、配電盤間の制御伝送や計測装置はイーサネット回線によるデジタル化が一部適用されているが、他の配線は基本的にデジタル伝送化されておらず、直流110V系を主とした入切による情報を伝送するためのメタル回線が実装されている。直流110Vの電源は、蓄電池制御盤から供給される。

変電所内のメタル回線について、保護連動、操作連動、情報計測の3種別に分類した（図1）。3種別のそれぞれの情報の重要度を勘案して、要求される応答速度レベル

* 電力技術研究部 き電研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：電力技術

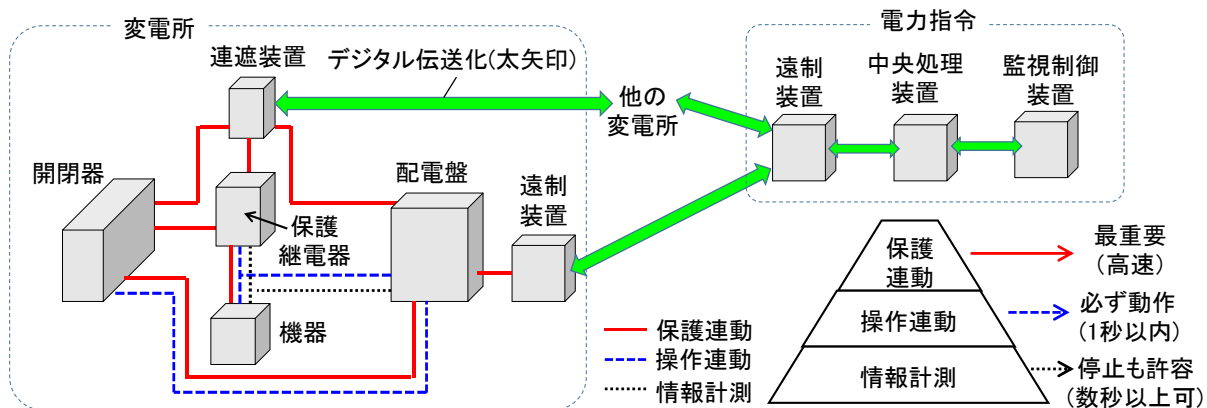


図1 き電用変電所の制御回線の種別と要求される応答速度

は異なる。

保護連動は、短絡事故などの異常発生に対して速やかに動作する必要があることから、可能な限り高速動作が求められる。開閉器の開閉操作を行うため、開閉器と連遮装置、保護継電器、配電盤間のメタル回線において保護連動の回線が必要となる。その他、計器用変成器の情報をもとに保護継電器を動作するために、機器と保護継電器間も保護連動の回線が必要となる。

操作連動は、開閉器の開閉などの状態を監視し、他機器の開閉状況の条件に応じて、複数の機器を連続的に動作させる。保護連動と比較すると、開閉する対象機器、開閉頻度が多い。必ず動作することが要求されるが、伝送速度に関しては保護連動よりは要求レベルが低くなる。

情報計測は、各回線の電圧・電流等の計測データを指す。従来、変電所において短いサンプリング周期での情報計測は行われていなかったが、近年は1秒以内のサンプリング周期を有する情報計測装置が導入されるケースも多い。計測データは電力指令に伝送されるが、仮に伝送が中断しても、運行上の影響はなく、伝送速度もそれほど高いレベルは要求されない。

現状のメタル回線に占める割合としては、操作連動が最も多数を占める。従って、最もデジタル伝送しやすいと想定される情報計測と併せてデジタル伝送を適用すれば、メタル回線を大きくスリム化できる。

2.2 想定されるデジタル方式

変電所の操作連動の回線のデジタル化を実現するための方式として考えられる3つの方式を図2に示す。

図2(a)は現状のメタル回線のイメージである。配電盤と変電機器1台の間に、電源ケーブルと平行して、入切表示、圧力、鎖状等の操作連動・情報計測に関わる制御ケーブルが多芯線として敷設されている。対象とする変電機器が遮断器・断路器の場合、制御に関わる信号数が多く、制御ケーブルの芯数は2ケタに達する場合もある。

る。変電機器が多数存在する変電所では制御ケーブル敷設のコスト増につながる。

図2(b)は制御ケーブルをイーサネットケーブルに代替した場合のイメージである。配電盤側から送信したデジタル信号は、イーサネットケーブル、D/A変換器(一般的にはPLC: Programmable Logic Controllerを利用)を介して変電機器側のアナログ信号を授受する。イーサネットケーブルはあらゆる分野において適用されている汎用品であるが、変電所用制御ケーブルへの適用においては、高耐圧性、高信頼性、長距離における適用性が求められる。なお、イーサネットケーブルではなく光ケーブルを適用することも考えられる。光ケーブルは電磁誘導ノイズの影響を受けにくく、伝送損失が少ない特長があるが、ケーブルの屈曲に弱く施工面の制約が生じるという課題がある。イーサネット方式は、変電所監視制御システムを対象とした国際規格であるIEC 61850に準拠した監視制御装置(IED: Intelligent Electronic Device)にも該当し、国内外の一般電力用変電所において導入が拡大している¹⁾。IEC 61850は「通信プロトコル」と設備のデータを標準化した「情報モデル」を制定し、異なる製造業者のIEDを相互接続することを可能としていることが特徴である。

図2(c)は制御ケーブルを無線による伝送で代替した場合のイメージである。適用する伝送方式は、列車無線との干渉を避けること、変電所内での伝送が可能な伝送距離(数百m程度)であることが求められる。専用無線と汎用無線(2.4GHzと5GHz)の2種類が考えられるが、前者は無線免許の取得あるいは通信事業者との契約が必要であること、後者は伝送距離の面で他の周波数帯と比較して不利な面がある²⁾。

図2(d)は電力線搬送方式と呼ばれ、変電機器の制御電源である直流110Vに流れる直流電流に対して、伝送信号をkHz帯あるいはMHz帯の周波数の信号として重畳することで伝送を行う²⁾。送信側と受信側の間で新たな通信経路を設ける必要がないことが、本方式の最大の

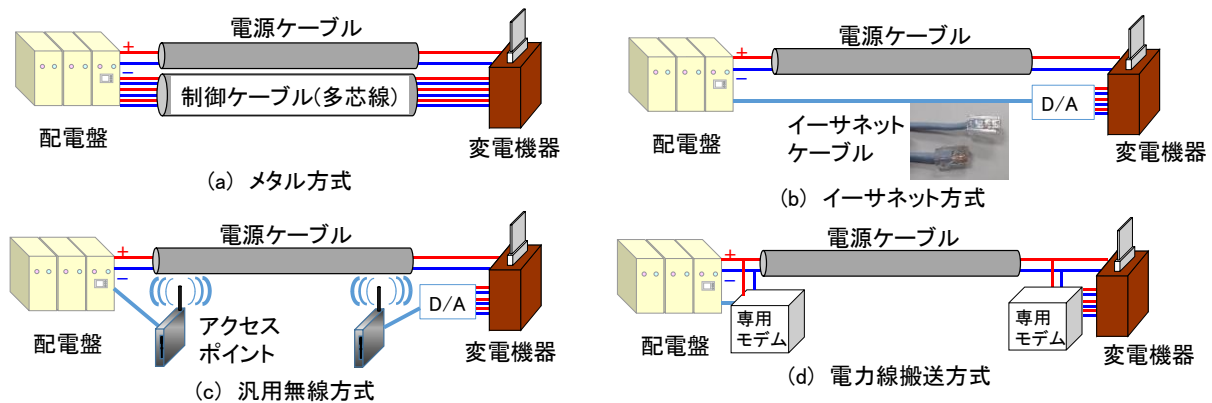


図2 変電所メタル制御回線の代替が期待されるデジタル化方式

特徴である。電力線搬送は交流の電力系統や一般家庭向け電気製品などで実用されているが、直流回路での実績はほぼ皆無であり、本検討において適用可否を検討した。電力線搬送の周波数範囲は、低周波（10kHz～450kHz）と高周波（2MHz～30MHz）の2種類に大別される。前者は電力分野における監視制御に適用され、交流回路用としてスマートメータに多数採用されている。本検討では前者の周波数帯を検討した。

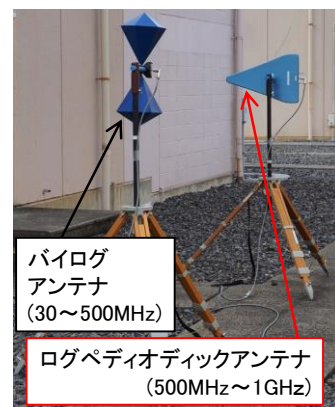
3. 変電所内における電波雑音環境測定とデータ伝送特性測定

変電所の制御回線に無線によるデジタル化を適用する場合、電車走行による負荷電流の変化や開閉器の開閉により変化する電磁環境の影響に対する頑強性が求められる。そこで、複数の変電所構内の電波雑音環境の調査、ならびにデータ伝送測定を行い、無線を適用する場合の影響について検討した。なお、イーサネットや電力線搬送方式への影響に関しては、イーサネットケーブルや電源ケーブルへの影響も知る必要があるため、次章に示すデジタル化方式適用試験の際に評価した。

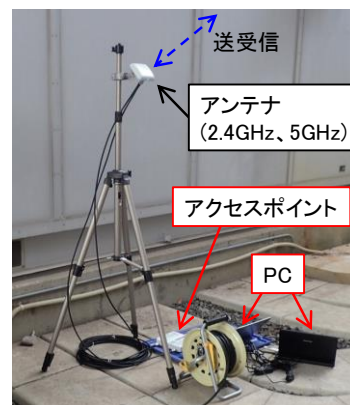
無線によるデジタル伝送を適用する場合、その周波数は100MHz～5GHz帯が有力と想定されるため、1GHzまではアンテナ（パイログアンテナ：30～500MHz、ログペディオディックアンテナ：500MHz～1GHz）で、1GHzより高い周波数帯は汎用無線（WiFiの2.4GHz、5GHz）用アンテナとアクセスポイントで、それぞれ測定評価を行った。測定器設置時の外観を図3に示す。

電波雑音環境測定は、き電電圧もしくはき電電流が大きいこと、開閉器の開閉サージが生じることを想定し、主に遮断器の直近を主要な測定ポイントとした。汎用無線によるデータ伝送測定は、配電盤と、配電盤から最も遠くに位置する機器周辺の間（約100m）で実施した。

列車運行中におけるき電電流の変化の影響を受けて電



(a)電波雑音環境測定のアンテナ



(b)データ伝送特性測定のアンテナ

図3 変電所内における電波雑音環境測定と汎用無線によるデータ伝送試験の外観

波雑音特性が変化する様子は認められなかったが、3.1節、3.2節に示す要因によって影響を受ける事象が確認された。

3.1 開閉器の開閉時の電波雑音環境測定例

日中あるいは深夜の時間帯で変電所内の開閉器を開閉

特集：電力技術

した際の電波雑音環境測定を行った。新幹線用変電所における電波雑音環境測定の結果例を図4に示す。本例では受電用断路器の手前に、図3(a)に示したアンテナを設置した。図4では断路器の開放前と開放時のピーク値をそれぞれ示した。両者を比較すると、開放時に30～500MHzの範囲で電界強度が大きくなったことがわかる。これは、断路器の開放時により微小電流を遮断した際に電極間で発生したアーク放電による電界を取得した影響による。

他の変電所の開閉器動作時に関しては、設備状況によって電磁界の影響は異なった。例えば開閉器がキュービクル内に収容されている場合、金属筐体で電磁界が遮へいされるため、開閉による電磁界の影響は軽微であった。

30～500MHz帯は特定小電力無線あるいは専用無線の周波数帯にあたるため、それらの無線を適用すると、開閉器のアークによる電磁界の影響が生じる可能性があることがわかる。

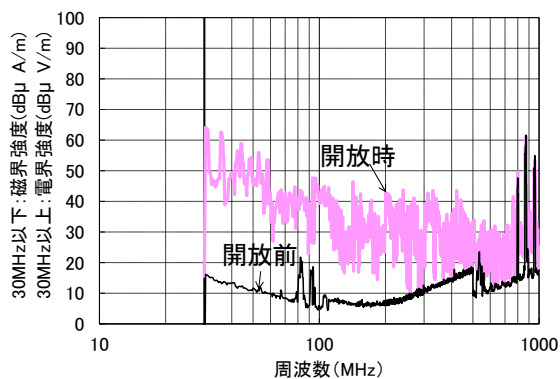


図4 開閉器開放時の電波雑音環境測定結果例
(新幹線変電所の例)

3.2 変電所内外の汎用無線の影響

き電用変電所は、基本的に鉄道沿線に設備されるため、鉄道利用者が所持する携帯端末、変電所付近を移動する一般の人が所持する携帯端末、変電所周辺に設置された汎用無線設備との干渉により、変電所内で使用する汎用無線の伝送品質に影響を及ぼされることが懸念される。また、変電所内には多数の建物、変電機器が存在し、それらの遮へいによって無線による伝送品質が低下することも懸念される。図5(a)は新幹線変電所、図5(b)は直流変電所における汎用無線の単位時間当たりのデータ伝送試験結果の一例である。何れの結果も図3(b)のアンテナを用いて取得した。

図5(a)では、2.4GHz帯はほぼ安定していたが、5GHz帯は一定時間にわたって伝送不可に至るなど、伝送が不安定であった。これは変電所内の建物による遮へいの影響が強く表れた例である。

図5(b)では、5GHz帯はほぼ安定していた。一方、

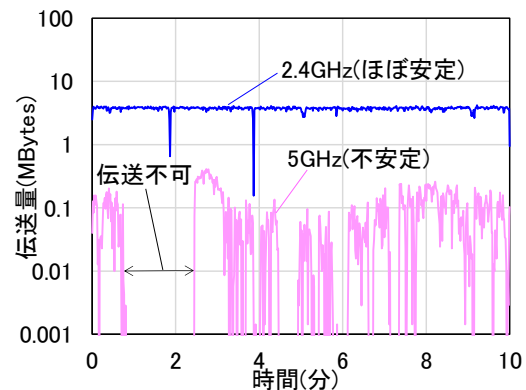
2.4GHz帯のデータ伝送量は平均的に5GHz帯よりも高めであったが、時おり大きく低下して伝送が不安定となった。これは、変電所周辺において同一周波数帯の汎用無線が使用されていたため、干渉により伝送品質が低下したものと推測される例である。

以上の結果から、汎用無線を変電所に適用した場合は、変電所内外の遮へいや同一周波数帯の汎用無線の使用状況によって伝送品質に影響を与えることが懸念され、変電所の操作連動に求められる信頼性を満足しない可能性があることが分かった。

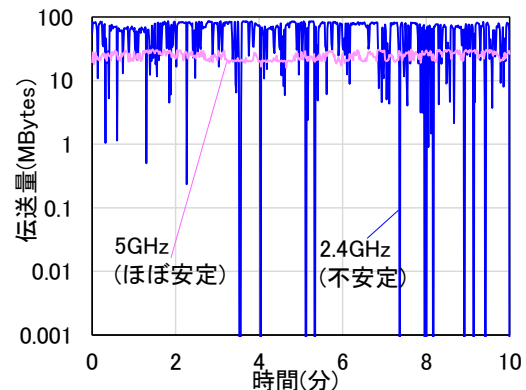
4. デジタル化方式適用試験

変電所における無線以外のデジタル化方式の適用性を評価するため、仮設の配電盤と開閉器を変電所内に設置し、各方式による開閉操作試験を複数回実施し、通信速度と信頼性を評価した³⁾。

図6にデジタル化方式検証試験の機器構成を示す。図中左側が変電所の配電盤機器となるイメージである。従来のメタル方式に加えて、イーサネットおよび直流電源線(CVV-S)による伝送路(約100m)を構成して、遮断器の動作試験と操作連動に要する時間の計測・比較を行った。



(a) 新幹線変電所における5GHz伝送不安定の例



(b) 直流変電所における2.4GHz伝送不安定の例

図5 汎用無線のデータ伝送不安定の例

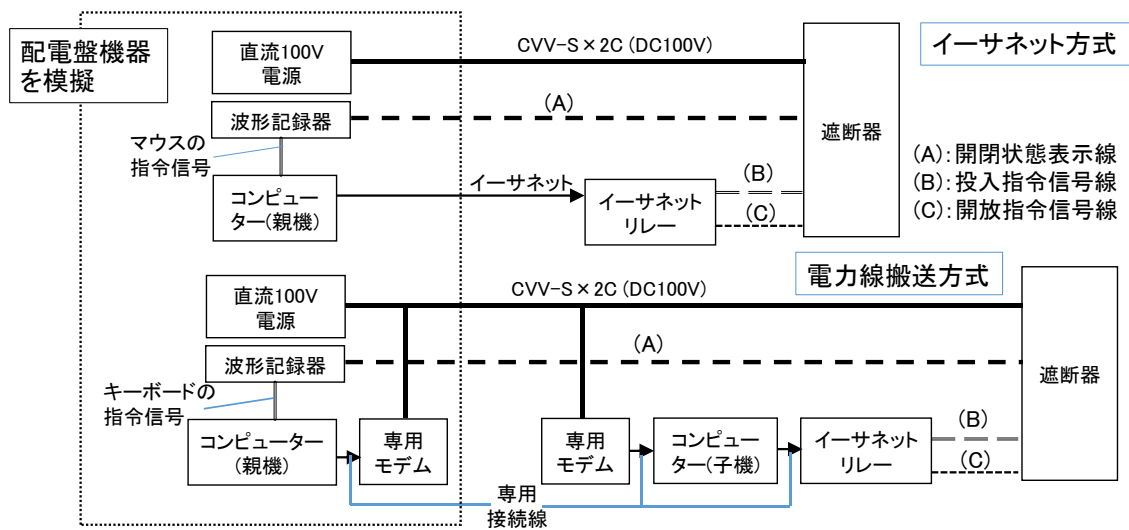


図6 デジタル化方式検証試験の機器構成

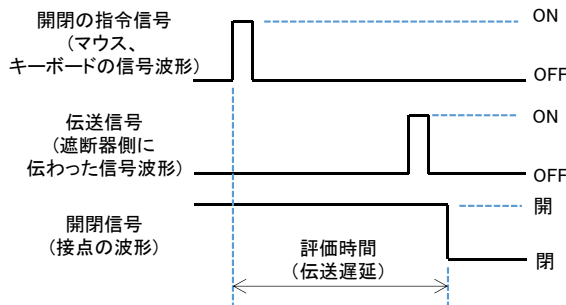


図7 遮断器投入時のタイムチャート

コンピュータ(親機)からの操作指令であるデジタル信号を、制御盤の投入・開放接点へのアナログ信号に変換するために、イーサネットリレーを使用した。また、電力線搬送方式を使用した伝送はコンピュータ(親機)からの操作信号を送・受それぞれの専用モデムを介してCVV-Sによって伝送し、遮断器の操作を行った。

遮断器操作は、マウス、あるいはキーボードを使用しコンピュータ(親機)から入切操作指令を行い、遮断器本体の動作を確認した。同じ操作を複数回行い、遮断器の動作完了に要する時間を伝送遅延として評価した。ここで遮断器の動作完了に要する時間は、親機のコンピュータのマウスあるいはキーボードからの操作指令のトリガ信号から遮断器の投入・開放が完了するまでの時間を計測して評価した。遮断器の投入・開放の確認は、実際に遮断器の主回路に電圧を印加し、開閉操作に伴う主回路の接点間電圧の変化を計測することによって行った。遮断器投入時(開→閉)のタイムチャート例を図7に示す。

在来線交流変電所において、2種類の伝送方式による開閉操作時の伝送遅延を測定した結果を図8に示す。なお、変電所内の実際の遮断器を開閉させ、電磁環境変化が生じている状態において伝送遅延測定を実施した。従来のメタル回線による伝送においては、手動スイッチ操

作による開放操作指令から遮断器の動作完了までに要する時間は、20ms強程度であった。一方で、デジタル化を模擬した各種伝送方式の場合、イーサネット方式では140ms前後、電力線搬送方式では280ms前後を要し、メタル方式と比較して概ね80～300msの範囲で遅延が発生した。動作時間のばらつきは10～30ms程度と少なく、デジタル信号による制御信号の伝送でも、安定的に機器操作が可能なることを確認できた。メタル方式に対して伝送遅延が生じる理由として、(a)コンピュータ処理の遅延、(b)イーサネットリレーの遅延、(c)通信遅延、

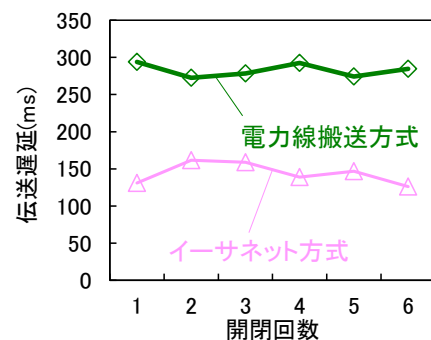


図8 変電所における遮断器開閉時の伝送遅延測定結果例

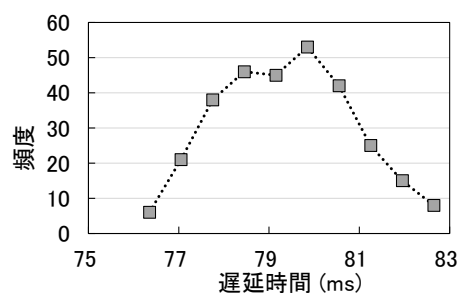


図9 電力線搬送方式の遅延時間ヒストグラム例

表 1 デジタル化方式適用時の目標と課題

	イーサネット方式	電力線搬送方式
適用範囲	情報計測, 操作連動	情報計測, 操作連動
伝送遅延特性	100ms 以内 指令から投入・開放まで 300ms 以内	100ms 以内 指令から投入・開放まで 300ms 以内
エラー率	0.01% 以下	0.01% 以下
EMC	IEC 62236 シリーズ準拠	IEC 62236 シリーズ準拠
通信用配線	- イーサネットケーブルの環状型, ラダー型による二重化 - イーサネットケーブルの高耐圧性 (地絡・雷サージ・開閉サージ対策) - 高シールド性	- CVV-S ケーブルの環状化, ラダー型 - 送信側にノイズ対策としてのアナログフィルタ適用 - CVV-S ケーブルの耐圧と, 機器耐圧のマッチング
電源	- 直流 110V 系からの電源分離 - 分散電源 (太陽電池等) の活用 - もう 1 本のイーサネットケーブルを敷設し, PoE (Power over Ethernet) 電源として活用	- 直流 110V 系からの電源分離 - 別電源線敷設 (直流もしくは交流)

(d) モデムの遅延が挙げられる。特に、電力線搬送方式の遅延は (d) による影響が大きいと考えられる。

実効通信速度のジッタ (遅延のゆらぎ) を評価するため、遅延時間のヒストグラムを評価した。図 9 に電力線搬送方式の例を示す。遅延の分布は正規分布に近い傾向を示し、平均値からのずれも非常に小さい傾向を示した。これは通信が安定していることを示唆している。

5. デジタル化方式適用時の目標と課題

以上の検討により、変電所内の制御回線において、本数が多く比較的遅延を許容できる操作連動、あるいは情報計測に関して、イーサネット、電力線搬送の各方式を適用できる可能性があることが分かった。その際の設計上の目標と課題について表 1 にまとめる。

遅延特性に関しては、2 章の結果を踏まえて実現が十分可能な数値を設定した。エラー率に関しては、開閉器の投入・遮断の回数が、約 20 年あたり 10^3 回～ 10^4 回の範囲であることを想定した数値を選定した。EMC に関しては、変電設備を対象とした IEC 62236-5 を始めとする内容に準拠することを基本とした。通信用配線に関しては、冗長性や信頼性向上を考慮して、環状化やはしご型とすることを基本とするが、現状の制御ケーブルと同様な雷サージやノイズ対策を施す必要がある。電源に関しては、機器側においてモデムや D/A 変換に必要な電源を確保することが必要である。これには様々な手法が考えられるが、複数の方式の採用による二重化を図るなど、信頼性を高める必要がある。

6. まとめ

き電用変電所の制御回線のデジタル化を目指して、変電所内の情報伝送に必要な機能や通信環境を把握し、設備集約が可能な通信方式を検討した。その結果、次の成果を得た。

- (1) 変電所の制御・計測回線を、遮断器の開放を行う保護連動、監視・制御を主体に行う操作連動、支援情報としての情報計測、の 3 つに区分し、それぞれに求められる信頼性と伝送速度を明確化した。
- (2) 複数の変電所において、電波雑音環境測定を実施した。開閉器開閉時に 30 ～ 500MHz 帯域の電界強度が定常時と比較して大きくなる場合、汎用無線 (2.4GHz, 5GHz) の通信が滞る場合があることが確認されたことなどから、汎用無線による操作連動のデジタル化は難しいと判断される。
- (3) 無線以外のデジタル伝送手段としてイーサネット方式、電力線搬送方式を検討した。仮設機器を用いた変電所内での試験の結果、従来のメタル方式と比較して概ね 80 ～ 300ms の範囲で遅延が発生するが、伝送異常等の影響はなく、操作連動、情報計測の通信方式として信頼性に問題がないことを確認するとともに、設計上の目標と課題を明らかにした。

謝 辞

本研究の試験遂行にあたり、東日本旅客鉄道株式会社ならびに九州旅客鉄道株式会社の関係各位に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を申し上げる。

文 献

- 1) 田沼秀和, 杉山将悟, 小磯健志, 前崎恒司: 産業向け電力監視制御システムへの IED 適用, 東光高岳技報, Vol.3, pp.31-33, 2016
- 2) 古金谷正伸, 矢野孝, 徳丸亀鶴, 江村勝治, 棚田耕吉, 佐藤陽介: 新しい電力システム事業への取り組み, SEI テクニカルレビュー, No.190, pp.4-8, 2017
- 3) 平川慎太郎, 小西武史, 竹内恵一, 山口大介, 岩本功貴, 池上洋行: 鉄道用変電所内制御線のデジタル化に向けた基礎試験, 平成 31 年電気学会全国大会, No.5-285, 2019