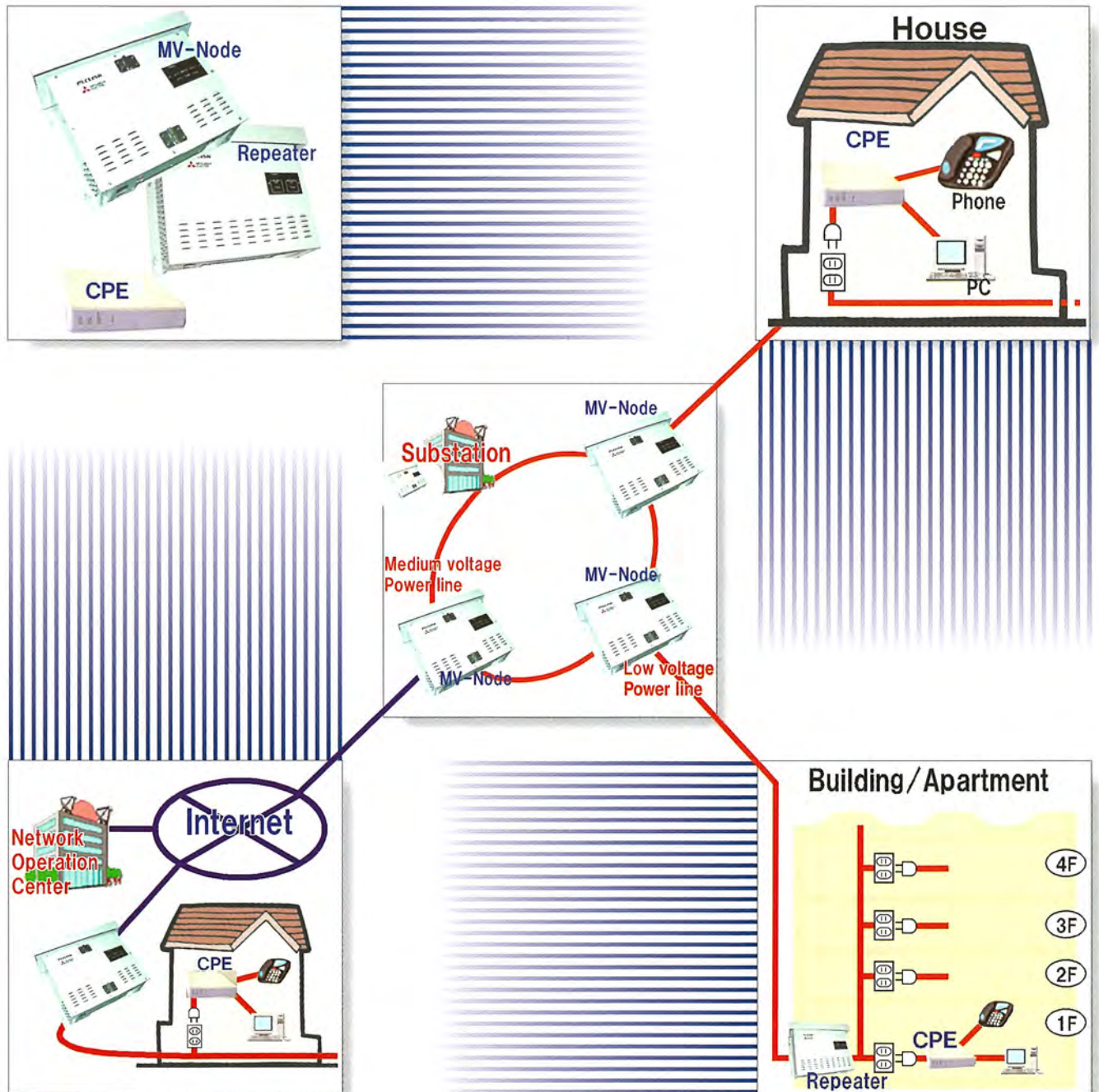


MITSUBISHI

三菱電機技報 Vol.78 No.7

2004 **7**

特集「高速電力線通信技術」



目次

特集「高速電力線通信技術」

高速電力線通信技術特集に寄せて	1
徳田正満	
高速電力線通信の現状と展望	2
松崎 正・杉本 明・鹿間敏弘	
高速電力線通信に対する各国の動向	7
堀口 彰・弓野雅章・大家正宏	
高速電力線通信の規制緩和の現状と今後の動向	13
森田淳士・下平平史・小根森章雄	
高速電力線通信アクセス系システム	17
小島佐和子・堀 泰彰・斉藤成一・下沢充広・高田佳典	
高速電力線通信ネットワークマネジメントシステム	23
秋富利伸・杉本 賢・中田秀男・津高新一郎・寺内弘典	
高速電力線通信に必要な電力システム技術	29
下村哲朗・岡本 弘・久山和宏	
配電線解析と通信可否判定支援ツール	35
北山匡史・泉井良夫・安部淳一・田邊信二・河野良之	
信号結合装置とバイパス装置	41
村田雄一郎・田邊信二・木村 亨・下村哲朗	
低密度パリティ検査符号技術	47
松本 渉	

High Speed Power Line Communication Technology

Foreword to Special Issue for High Speed Power Line Communication	Masamitsu Tokuda
Perspective on High Speed Power Line Communication	Tadashi Matsuzaki, Akira Sugimoto, Toshihiro Shikama
World Trend of High Speed Power Line Communication	Akira Horiguchi, Masaaki Yumino, Masahiro Oya
Current Status and Future Trend of Deregulation of High Speed PLC	Atsushi Morita, Heishi Shimodaira, Akio Konemori
High Speed Power Line Communication System for Access Network	Sawako Ojima, Yasuaki Hori, Seiichi Saitou, Mitsuhiro Shimozawa, Yoshinori Takada
High Speed PLC Network Management System	Toshinobu Akitomi, Satoshi Sugimoto, Hideo Nakata, Shinichiro Tsudaka, Hironori Terauchi
Power System Technology for High Speed Power Line Communication System	Tetsuro Shimomura, Hiromu Okamoto, Kazuhiro Kuyama
Distribution Network Analysis and Service Provisioning Support Tool	Masashi Kitayama, Yoshio Izui, Junichi Abe, Shinji Tanabe, Yoshiyuki Kono
Inductive Coupling Unit and Bypass Tool for Power Line Communications	Yuichiro Murata, Shinji Tanabe, Toru Kimura, Tetsuro Shimomura
Low-Density Parity-Check Codes	Wataru Matsumoto

普通論文

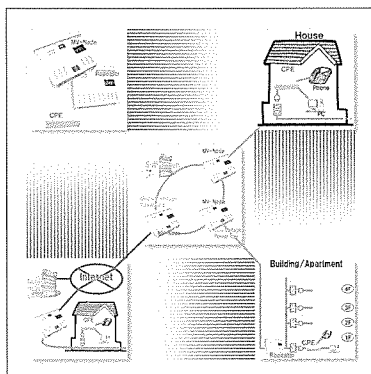
IHクッキングヒーターのキー技術	51
加賀邦彦・菅 郁朗・守田正夫・松原則幸・文屋 潤・野村 智	
IHクッキングヒーターの新調理機能	55
中野真理子・木下広一・中村 宏・梶島山青・前島成人	

Developing Key Technology of IH Cooking Heater	Kunihiko Kaga, Ikuro Suga, Masao Morita, Noriyuki Matsubara, Jun Bunya, Satoshi Nomura
The New Functions of Induction Cooking Heater	Mariko Nakano, Hirokazu Kinoshita, Hiroshi Nakamura, Takaharu Kabashima, Shigeto Maejima

特許と新案

「洗浄能力評価方法」「製品搬送用ハンド」	59
「半導体洗浄装置及び方法, ウエハカセット, 専用グローブ並びにウエハ受け治具」	60

スポットライト 配電線特性測定分析装置



表紙

高速電力線通信システム構成

高速の電力線通信(Power Line Communication : PLC)は、電力線を通信媒体として電力線に微弱な高周波変調信号を重畳することにより情報を伝送する通信技術である。中圧(MV)／低圧(LV)の変電所にMVノード, 集合住宅室にリピータ, ユーザー宅内にCPE(Customer Premises Equipment)を設置し, 中圧の配電線と低圧配電線を利用して高速のPLCによるインターネットアクセスを実現すれば, 新たにアクセス用の回線を敷設することなくブロードバンドサービスを提供できる。また, PLCは, 電源コンセントを情報コンセントとして利用することで, 家庭内のどこでも使えるユビキタスネットワークを実現する有力技術の一つと位置付けられる。

高速電力線通信技術特集に寄せて

Foreword to Special Issue for High Speed Power Line Communication



徳田正満

Masamitsu Tokuda

電力線は電気電子機器に電気エネルギーを供給することが主目的であるが、その同じ電力線に情報を伝送させる電力線通信システムが存在する。電力線通信システムは、元来電力ネットワークの制御用に使用されていたが、一般の情報伝送にも使用できるシステムが開発されている。450kHz以下の周波数を使用するEchonetシステムは電波法で使用が認められている。ところが、450kHz以下の周波数では、CISPR(国際無線障害特別委員会)規格による規制が国内で今まで実施されていなかったため、電力線内の電磁ノイズが極めて多いという問題があり、かつ、高速の伝送ができないため、実用化システムが余り開発されていない状況である。それに対して、2~30MHzの短波帯を使用した高速電力線通信システムが諸外国で開発され、国内での使用を求める動きが活発になってきた。この周波数帯では、電力線の伝導妨害波がCISPRによって規定されており、国内でも妨害波の発生量が規制されているため、450kHz以下の周波数帯よりノイズレベルが小さいという特徴がある。

「e-Japan重点計画-2002」において、「電力線搬送通信設備に使用する周波数帯域の拡大(2~30MHzを追加)について、放送その他の無線業務への影響について調査を行い、その帯域の利用の可能性について検討し、2002年度中に結論を得る」とされたため、総務省では、「電力線搬送通信設備に関する研究会」(座長・杉浦東北大学教授)を平成14年4月に発足した。その研究会ではヒヤリングWGと実環境実験WGの2つのWGを組織し調査を開始したが、2つのWGとも筆者が主査を務めた。この研究会は社会の注目を集め、十数名の委員に対して50名以上の傍聴者が出席して

おり、アマチュア無線のホームページには会議の状況が即日詳細に掲載されたくらいである。筆者も政府関係の委員会にはかなり出席しているが、このような経験は初めてであり、世の中の関心の高さを痛感した次第である。平成14年7月末に、「①現状の技術では既存無線設備に対して有害な混信源となり得るため、周波数を拡大することは困難。しかし、今後漏洩(ろうえい)電界強度を大幅に低減する技術開発が期待されることから、研究開発等を継続することが必要。②研究開発を促進するため実証実験を今後も実施する必要がある、そのための制度整備(研究開発目的の設備の許可制度)が必要。」等の結論を研究会として出した。

上記研究会の結論を受けて、国内での高速電力線通信システムの早期実用化を目指すために、平成15年3月に高速電力線通信推進協議会(PLC-J)が設立された。10社の企業が集まり、筆者も特別会員として参加している。PLC-Jが積極的に総務省に働きかけた結果、研究開発目的の実証試験が可能のように電波法が改正され、平成16年1月に官報に公示された。既にPLC-J会員会社を中心として、実証試験の申請が行われ、3月から試験が開始されている。

筆者は、光ファイバケーブルの黎明(れいめい)期にNTTで研究実用化の最前線を指揮した経験があるが、東京都区内で昭和53年に実施されたNTTで最初の光通信システム現場試験で世界最高の性能を実現でき、その後の商用化に向けて確実な一歩を記すことができた。そのときの熱気を現在の高速電力線通信システムにも感じることができ、漏洩電波低減技術の確立と、周波数領域の拡大に向けて、確実な一歩が記される予感がする。

高速電力線通信の現状と展望

Perspective on High Speed Power Line Communication

Tadashi Matsuzaki, Akira Sugimoto, Toshihiro Shikama



松崎 正*



杉本 明**



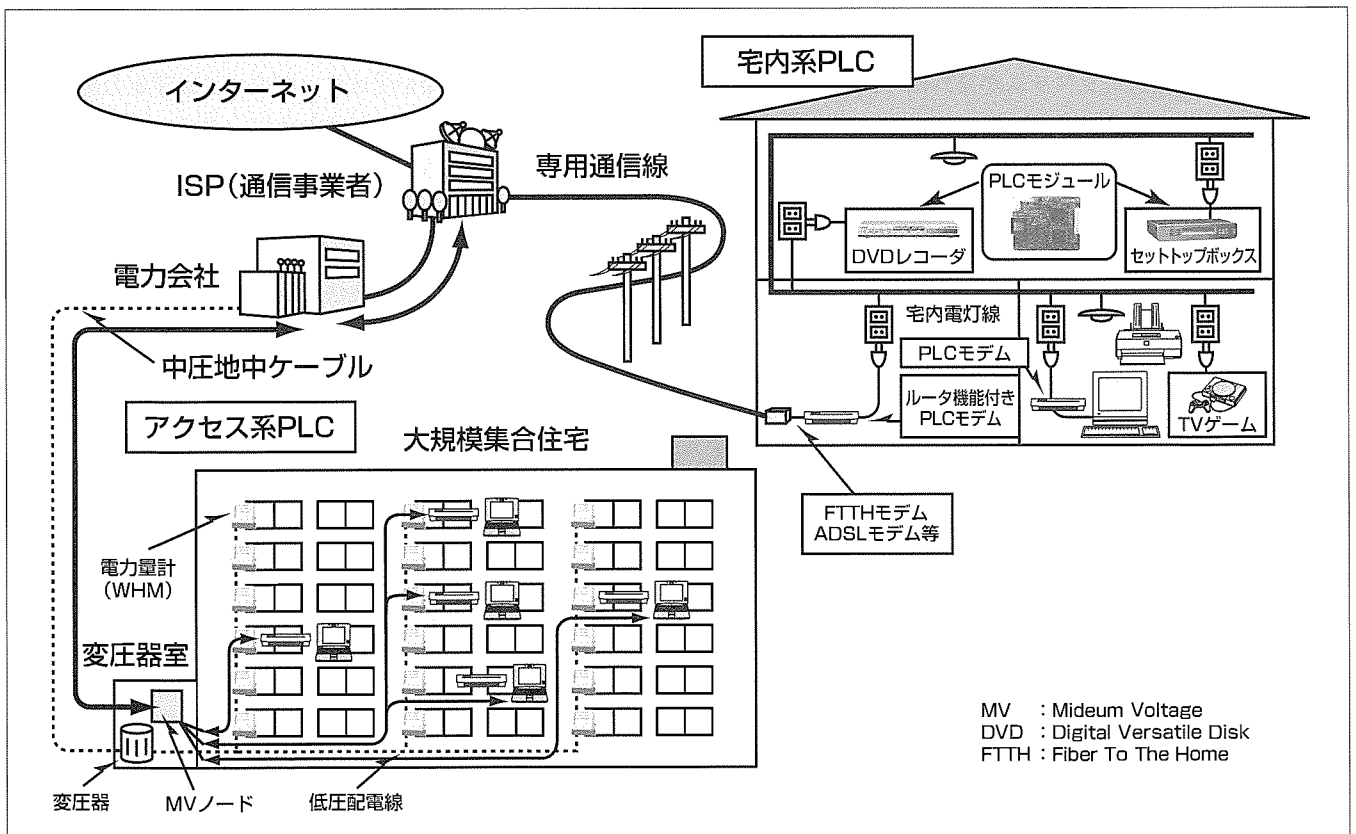
鹿間敏弘***

要旨

最近のデジタル通信技術の進歩により、電力線を利用して通信を行う電力線通信(Power Line Communication: PLC)において、100Mbpsを超える速度のネットワークを経済的に実現できる見通しが得られるようになった。世界的にインターネットの爆発的普及が進み、さらにADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)の普及によりブロードバンド化の時代を迎えているが、PLCは、従来の通信キャリアに加え、新たな通信サービス事業者に参加の道を開くものとして期待されている。また、今後のIT分野は、どこでもだれでも容易にネットワークを利用できるユビキ

タスネットワークに向かって進化していくものと見られている。PLCは電源コンセントを情報コンセントして利用できるため、家庭内のどこでも情報アクセスができるユビキタスネットワークの実現に有望な技術である。海外ではPLCのフィールド実験により実環境での通信特性の把握が進んでおり、PLCによる商用アクセスサービスも開始されている。技術的にはPLCによる通信ネットワークの本格的展開に向け機が熟してきたと言える。

本稿では、高速PLCに対する期待と現状及び技術概要とサービスについて述べる。



高速電力線通信の適用形態

この図は、高速PLCを用いたサービス形態の構成例である。宅内高速PLCモデムは加入者宅の宅内電灯線を使用し、また、アクセス系高速PLCモデムは電力会社から大規模集合住宅の変圧器室までの中圧配電線と集合住宅内の加入者宅への低圧配電線と宅内電灯線を通信用として使用し、ネットワークを構成する。

1. ま え が き

PLCとは、電力線を通信媒体とする有線通信で、家庭で使われる電力線(日本ではAC100V)に微弱な高周波変調信号を重畳することにより実現する。最近のデジタル通信技術の進歩により100Mbpsを超える通信速度が得られるようになっている。

電力線はほとんどすべての家庭やビルに敷設されているため、高速なPLCによりインターネットアクセスを実現すれば、新たにアクセス用の回線を敷設することなくブロードバンドサービスを提供することができる。変圧器の2次側の低圧電力線に通信信号を結合することにより、変圧器から電力供給を受けている全家庭との間で通信が可能になるため、大規模なアクセスネットワークを少ない投資で効率的に構築及び運用できる利点がある。世界的にインターネットの爆発的な普及が進み、さらにADSLによりブロードバンド化を迎えているが、高速なPLCは、従来の通信キャリアに加え、新たな通信サービス事業者へ参入の道を開くものとして期待されている。

また、家庭内でほとんどすべての部屋にコンセントが存在し、また、接続も容易であるため、PLCを用いることにより高速の宅内ネットワーク実現が可能となる。PLCでは、通信用と電源用で電力線を共用できることも、ユーザーから見た大きなメリットである。今後のIT分野は、どこでもだれでも容易に通信できるユビキタスネットワークに向かって進化していくものと予見されている。PLCは、電源コンセントを情報コンセントして利用することにより、家庭内でどこでも、だれでも、どのような情報でも運べるユビキタスネットワークを実現する有力技術の一つとも位置付けられる。

上記のようにPLCは、アクセス系と宅内系の両方において、ネットワークのブロードバンド化とユビキタス化を促進するものとして期待される。

本稿では、PLCの課題と現状、PLCの技術そしてサービスについて概要を述べる。

2. PLC の課題と現状

2.1 PLCの技術課題

電力線を用いた通信の歴史は古く、発想は20世紀初頭から存在し、1980年代には非常に低速なものが調光器などの機器制御に用いられていた。

しかし、電力線は本来電気を運ぶために敷設されているため、通信媒体としての特性は明確に規定されているわけではなく、また、家電機器からのノイズの問題やこれらの機器を接続することにより電力線の通信特性が動的に変化する問題もあり、広く普及するまでには至っていない。

このような課題に対し、アナログ回路技術、AD変換技

術、デジタル信号処理技術の進歩とこれを経済的に実現可能とする大規模LSI技術などにより、高速のPLCを経済的に実現することが可能となってきた⁽¹⁾。最近では最大200Mbps程度の通信性能を持つものも発表されており、更なる高速化に向けて研究開発が進んでいる⁽²⁾。また、フィールド実験などにより実環境での電力線の通信特性把握も進んでいる。以上から、技術的にはPLCによる通信ネットワークの本格的展開に向け機が熟してきたと考えられる。

2.2 国内の状況とPLCに関する法規制

国内において、現在の電波法は、短波放送、既存無線設備などへの妨害波混入の懸念から、使用可能な周波数帯域を10~450kHzと定めている。しかし、帯域が狭く、家電機器によるノイズの影響を受けやすいため安定した通信が難しい。一方、2~30MHzの高い周波数帯を商用目的で利用することは現状では認められていないが、帯域やノイズの点で通信に適した帯域と考えられ、欧米では、この周波数帯を利用したPLCが既に実用化されている。国内においても総務省による規制緩和に向けての検討が進んでおり、2003年8月8日のe-Japan戦略IIでは家庭内の電力線の高速通信への活用について述べている。また、民間企業を中心に高速電力線通信推進協議会(PLC-J)が発足し、規制緩和に向けた活動を行っている。

このような状況から、2004年1月からPLCの漏洩(ろうえい)電波低減技術に関する実証実験の実施が可能となっており、今後、高い周波数帯を利用したPLCの実用化が加速するものと予想される。

2.3 海外での普及

海外では、PLCに対する規制緩和及び標準化が活発に推進されている。欧州のスペイン、ドイツ、イギリスではアクセス系の商用サービスが開始されており、フランス、ポルトガルなどでも実証実験が行われている。欧州では2012年までにPLCによるアクセスサービスが2,000万所帯に普及するものと予測されている。アジアにおいても、マレーシアや中国で実証実験が行われている。米国では、宅内系が実用化されており、今後アクセス系のサービスも検討されている。

以上のような状況から、欧州、北米、南米、アジアなどでPLCはインターネットアクセスを中心に導入が検討され、巨大な市場を形成しつつある。

3. PLCの技術概要

3.1 電力線ネットワーク

日本では、図1に示すように、発電所で作られた電気は500~154kVで一次変電所へ送られ、一次変電所で110~66kVに降圧され、送電線で鉄道や大工場、そして配電用変電所などへ送られる。配電用変電所では更に22~6.6kVへ降圧され、送電線でビルや中小工場へ送られ、各家庭へ

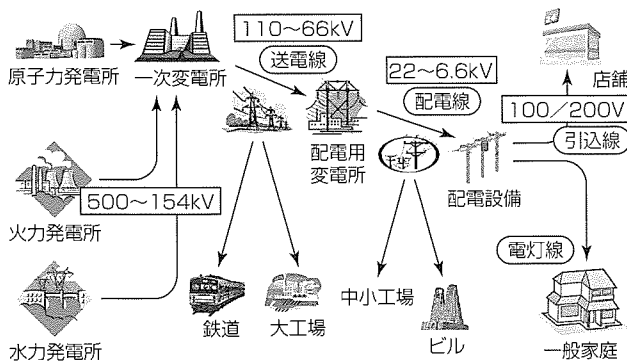


図1. 電力線ネットワーク

は配電線を通り、柱上変圧器で200V/100Vに降圧された後、引込線で宅内へと供給される。宅内では、電灯線によって各部屋のコンセントや照明端子として分配される。

海外でも電圧の違いはあるものの、発電所から送電線でつながれた幾つの変電所を経て徐々に降圧されながら工場やビル、各家庭へと供給される点は同じである。ただし、欧州では、鉄塔や電柱を使わず地下を使って配電線を敷設している場合が多い。

3.2 電力線の伝送路特性

電力線はもともと通信目的の媒体ではないため、線長や分岐に特別な規定がなく多様なネットワークトポロジーを持ち、線材も配電線と引込線、宅内の電灯線といった違いや、国による違いが存在する。さらに、電源に接続される機器も多種多様である。したがって、電力線の伝送路特性も場所や時間によって異なり、モデル化が困難である。伝送路の減衰特性の例を図2に示す。大局的に見ると電力線の伝送路特性の特徴は次のとおりである。

(1) 大きなノイズ

特に宅内における1MHz以下の帯域では、接続される家電製品からインパルスノイズを含む多様なノイズが発生する。

(2) 高い減衰量

数km以上となる配電線長のみならず変圧器等の送電設備を介することで信号が大きく減衰する。

(3) インピーダンスの変化

家電品の接続状況や動作状況による変動や、交流電源周期(数十ms)に起因したインピーダンス変化が生じる。

(4) 狭帯域で大きな減衰を生じるノッチの存在

負荷や分岐によるインピーダンスの不整合により反射が生じ、信号を打ち消すような狭帯域の大減衰ノッチが場所により異なる周波数で存在する。

通信の観点から電力線の特性を周波数帯域ごとに見た場合、おおむね次のような状況である。図3に概要を示す。

2MHz以下：高雑音・低インピーダンスで悪条件。また狭帯域で高速困難。国内では450kHz以下のみ利用可能。

2~30MHz帯：伝送損失はあるが低雑音で比較的良好。

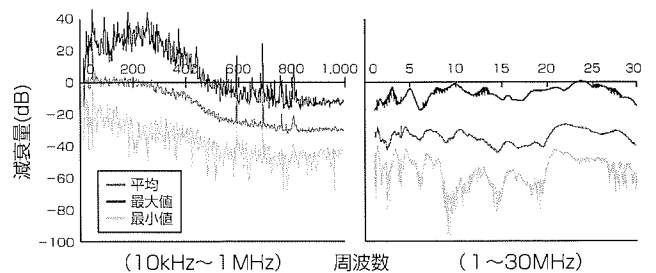


図2. 減衰特性の例

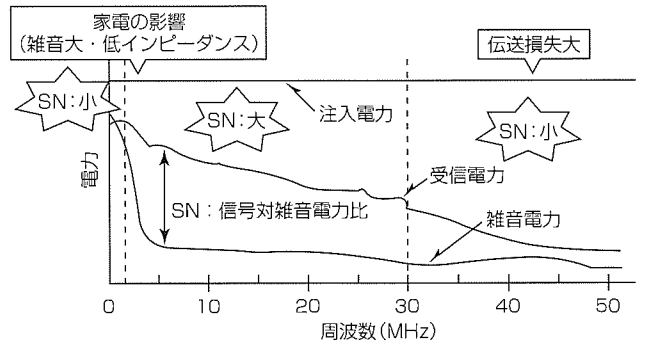


図3. 注入信号とSNR

帯域も広く高速化可能だが、国内では、商用では利用不可。ただし、漏洩電界低減技術の実証目的の場合は、許可制で実験可能。欧米では利用可能で一部実用化開始。

30MHz以上：低雑音であるが伝送損失は増加傾向。現在は国内/海外とも利用不可。

3.3 通信技術

一般に通信機能は階層化したモデルにより定義される。PLCに固有な通信技術は、下位の物理層とMAC(Media Access Control)層を中心に位置付けられる。

3.3.1 物理層

物理層は、電力線の通信特性に適用できる変復調や同期などを行う。PLCモデムに用いられる変調方式は、PSK(Phase Shift Keying)やFSK(Frequency Shift Keying)によるシングルキャリア方式、携帯電話等でCDMA(Code Division Multiple Access)に利用されているスペクトラム拡散方式、ADSLや地上波デジタル放送に用いられているOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)方式の3つが一般的である。

シングルキャリア方式は、古くから様々な通信で利用されており非常に低コストで実現できるが、狭帯域通信であるためノイズに弱く、一般的に転送速度も数k~数十kbps程度である。

スペクトラム拡散方式は、PSKなどで1次変調された信号に擬似乱数系列を乗じることにより、信号を広い帯域に拡散させ、受信側で再び同じ擬似乱数系列を乗じて逆拡散を行い、元の信号を再生する方式である。このとき伝送路上でノイズが印加されても逆拡散によりノイズ成分が広い帯域に拡散されるため、ノイズに強いという特徴を持って

いる。また、異なる擬似乱数系列で拡散された信号が同時に伝送路上に存在しても、それぞれの擬似乱数系列で逆拡散を行うことで分離可能であり、多重化により全体として～数Mbps程度の転送速度が実現可能である。

OFDM方式は、直交性を利用して隣接するキャリアの帯域が重なるように配置し、限られた帯域の中で数百～数千のキャリアを同時に利用する方式で、周波数利用効率が非常に高く、数十～数百Mbpsの転送が可能となる。また、伝送路状況に応じてキャリアごとに割り付ける転送ビット数の変更や、他の既存通信帯域との共存のため、特定のキャリアを使用しないといった柔軟な帯域利用が可能である。このような特徴から高速PLCでは多くのチップメーカーがOFDM方式を採用している。表1に各社PLCチップの変調方式等の比較を示す。また、OFDM伝送方式の概念を図4に示す。

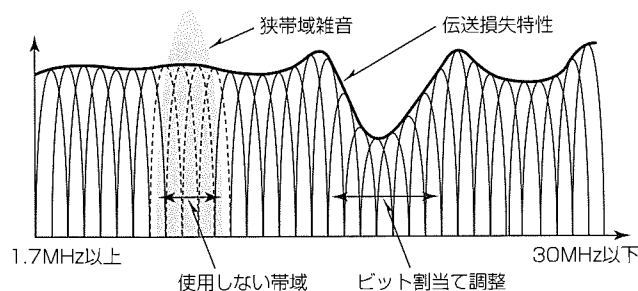
また、PLCの物理層における重要な技術として、電力線に対し信号を注入&抽出する結合回路がある。配電線や引込線では送電を止めずにPLCモデムを設置する技術が必要となる。また、規制緩和の焦点であるEMC(Electro Magnetic Compatibility)対策においても、結合回路におけるコモンモード電流の抑制技術が重要である。

3.3.2 MAC層

表1. 各社PLCチップの変調方式、帯域、速度比較

メーカー名	伝送速度	変調方式	利用帯域	アクセス方式
DS2 (スペイン)	Up: 18Mbps, Down: 27Mbps	OFDM	1~38MHz	Master/ Slave
ITRAN (イスラエル)	2.5/12/24Mbps	ACSK/SS	4~20MHz	CSMA/CA
Main.net (イスラエル)	2.5Mbps	DSSS	1~30MHz内の 3MHz	CSMA/CA
ASCOM (スイス)	4.5Mbps	GMSK	2.4~24.6MHz内 の3キャリア	
Xeline(韓国)	2/24Mbps	OFDM	2~23MHz	CSMA/CA
Intellon(米国)	13.75Mbps	OFDM	4.3~20.9MHz	CSMA/CA
EasyPlug(米国)	2/4Mbps	マルチキャリア	2~8・20MHz	DSMA/CTP

ACSK: Adaptive Code Shift Keying
 SS: Spreat Spectrum
 DSSS: Direct Sequence Spreat Spectrum
 GMSK: Gaussian filtered Minimum Shift Keying
 DSMA/CTP: Datagram Sensing Multiple Access/Centralized Token Passing



利用可能な周波数帯域に、多数の通信キャリア(1,000本以上)を配置し、雑音や損失特性に応じて適応的に高速通信を行う。

図4. OFDM伝送方式

PLCでは、複数のモデムがトポロジー的にはバス状又はスター状に接続され、電力線の帯域を共有して通信を行うため、メディア・アクセス制御が必要である。電力線の通信は単純なバス型の通信とはならないため、CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)のような衝突検出は使えず、単純なデータ転送であればCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)を用いることが多い。しかし、音声や映像などのストリーム情報を送るために帯域保証を行う場合は、より複雑なポーリングやトークン・パッシング方式なども用いられる。

PLCでは、変復調方式だけでは十分な通信品質が得られない場合が多く、誤り検出符号とともに強力な誤り訂正符号が用いられることが多い。リードソロモン符号による誤り訂正のほか、最近ではターボ符号やLDPC(Low Density Parity Check)符号の導入が検討されている⁽³⁾。さらに、高信頼性を要求されるデータでは再送も併用され、再送機能や再送に伴う順序制御はMAC層で実現される。

前述のようにPLCでは電力線を複数のモデムで共用して通信し、さらに電力線にはだれでも接続できることから、盗聴が容易に可能である。このため、セキュリティに関する機能が不可欠で、暗号が用いられる。

3.3.3 上位層

PLCにより通信ネットワークを構築する場合、電力線のトポロジーや障害時の系統の切換えなど電力線固有の課題が存在する。しかし、ルータやレイヤ2スイッチによる自動設定技術や障害対策技術さらにネットワーク管理技術も進歩しており、これら機器の低コスト化も加わって、大規模で高信頼なアクセスネットワークを経済的に構築及び運用できるようになってきている。

3.3.4 ネットワーク運用支援技術

PLCによるネットワークを構築する上では、事前に線路特性や配電系統などからサービスの適合性を判定するツールや、サービスの品質をチェックするシミュレータなどの運用技術が必要となる。

最近のフィールド試験の積み重ね及び理論的な解析技術の進歩により、電力線を通信に使う場合の条件の整理も進みつつあり、このようなツールの検討も進んでいる。

4. 高速PLCによるサービス

4.1 ビジネスモデル

PLCのビジネスモデルとしては表2に示すものが考えられる。この中で、大規模住宅を対象としたアクセス系及び宅内LAN(Local Area Network)が最も有望と考えられる。

4.2 アクセス系PLC

アクセス系とは、電話線や光ファイバの代わりに電力線を使用してインターネット接続を実現するサービス形態で

表2. PLCのビジネスモデル

項目	海外	国内
アクセス系 インターネットアクセス	欧州はインターネット普及率が低い、また、アジア新興国は通信インフラ未整備のため、普及可能性大	ADSL、光等の競合方式が既に2,000万軒に届く状況にあり、規制緩和後、PLCの急速な普及と拡大は難しい
宅内系 インターネット向け宅内LAN	HomePlug ^{GEI} 陣営がパソコン用ネットワークとして宅内モデムを販売	規制緩和後により価格次第で市場が創出される可能性大
宅内系 ブロードバンドホームネットワーク	日本市場に遅れて普及の可能性大	デジタル家電の急速な普及でAudio Visual Videoを楽しむ環境が広がる可能性大

(注1) HomePlugは、HomePlug Powerline Allianceの登録商標である。

ある。日本では既にADSLによるインターネット接続が広く普及しているが、電力各社は従来から総延長17万kmを超す独自の光ファイバ網を保有しており、引込線を使ったPLCで家庭と接続し、柱上変圧器以上は光ファイバ通信とすることで、ADSLのように電話局からの距離に左右されず、より高速なインターネット接続が可能となるという魅力を備えている。

一方、海外では、光ファイバの敷設が日本ほど進んでいないため、配電用変電所などを基点とし、配電線と引込線を使ったPLCで実現する。欧州やアジア太平洋、南米地域ではインターネット接続市場が拡大している最中であり、各国の通信政策により市場拡大は更に加速される方向にある。こうした状況により、既存の通信事業者のみならず電力会社も通信事業参入の機会としてPLCを利用したインターネットアクセスに意欲的に取り組んでおり、海外でのアクセス系サービスはPLCの現在最も期待される市場である。アクセス系PLCの例を図5に示す。

4.3 宅内系PLC

宅内系は建物内の電灯線を使用したPLC通信を利用するものであり、高速PLCとしては複数のパソコンでインターネット回線やプリンター等を共有する宅内LANや、AV系ネットワークとしての利用が考えられる。また、低速にして安価なPLCチップを実現し、センサ類や家電品等に組み込むことにより、コンセントを挿すだけで簡単かつ安価にネットワークを形成し、相互に連携してホームセキュリティや家電の省エネルギー制御等に利用することも考えられる。図6に宅内系PLCの例を示す。

4.4 その他

PLCの技術は、電力線に限らず、本来通信目的ではない他のケーブル類を媒体とする通信の応用可能な技術である。道路、鉄道線路、ガス、水道などの通信以外のインフラ網や、自動車、鉄道車両、船舶に付随する既設のメタル配線

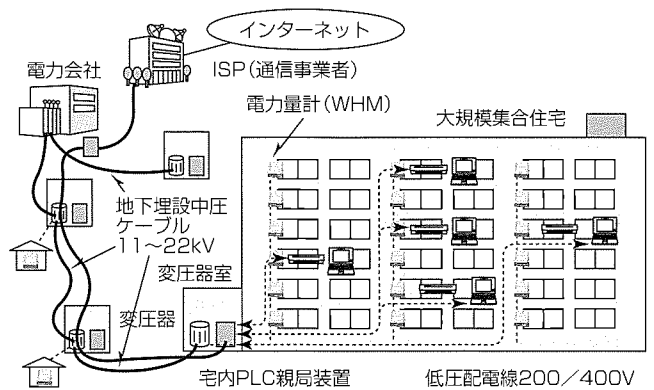


図5. アクセス系PLC(集合住宅)

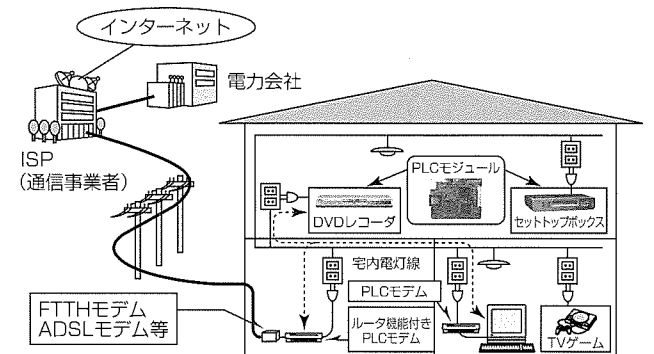


図6. 宅内系PLC

を通信媒体として適用範囲を広げることで新たなサービス形態への適用が広がる可能性を持っている。

5. むすび

以上、ブロードバンド化とそれに続くユビキタス化の時代を迎えて、高速PLCに対する期待とその概要及びサービスについて概説した。個々の課題と技術の詳細についてはこの特集の各論文を参照されたい。

本稿で述べたように、既設の電力線を使用し高速なインターネット接続や宅内LANを実現する高速PLCに対する期待は大きく、低コストで高い品質の製品の開発と普及に向けた努力の積み重ねが重要である。

参考文献

- (1) 長島義明, ほか: 高速PLCネットワークシステムの開発, 三菱電機技報, 76, No.9, 614~618 (2002)
- (2) Pavlidou, N., et al.: Power Line Communications: State of the Art and Future Trends, IEEE Communication Magazine, 41, No.4, 34~39 (2003)
- (3) 松本 渉: 低密度パリティ検査符号技術, 三菱電機技報, 78, No.7, 485~488 (2004)

高速電力線通信に対する各国の動向

堀口 彰*
弓野雅章**
大家正宏**

World Trend of High Speed Power Line Communication

Akira Horiguchi, Masaaki Yumino, Masahiro Oya

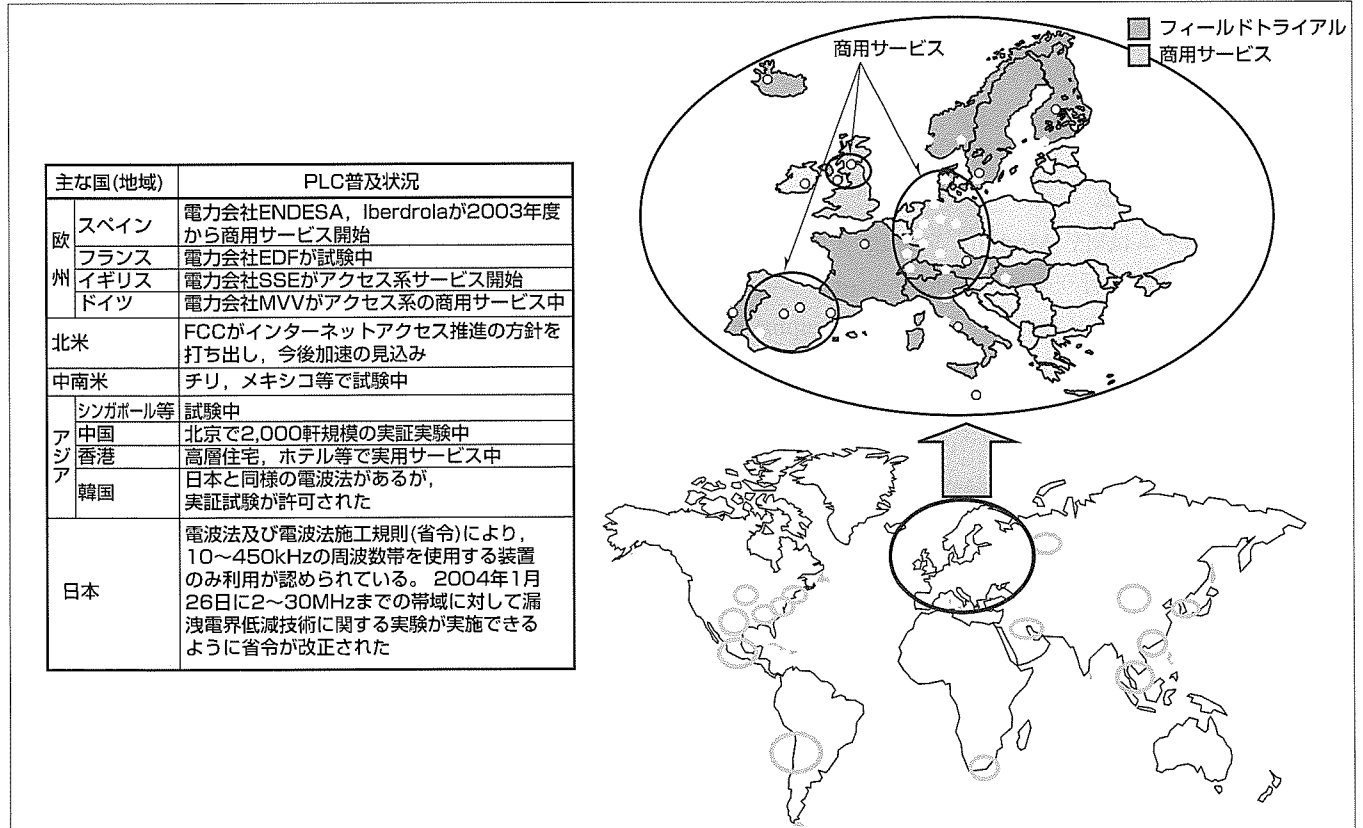
要 旨

情報化社会のインフラ技術として、各国は、ブロードバンドの普及を促進している。高速PLC(Power Line Communication：電力線通信)システムは、電力系統の既設の電力線を通信媒体として利用するため、新たな通信ケーブル敷設工事が不要である。電力線は、電力供給のための基本的なインフラであり、普及率が高い。一方、固定電話は、世界的に見れば普及率の低い国が多く、ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)だけではブロードバンド普及を担うことができない。このため、電力線を利用する高速PLC技術は、ブロードバンドを普及させるための有力な手段の一つと位置付けられている。従来から電力線に信号を重畳し配電線の制御等に利用する配電線搬送方式があるが、周波数帯域は450kHz以下で、伝送速度は数

百bps程度の低速である。これに対し、近年、高度な多重化技術を適用し高速の伝送が可能になったため、ここ数年、各国でフィールド試験が行われ、ドイツ、スペイン等では商用化に至っている。

高速PLCで電力線を通信線として利用するに当たっては、通信線としての観点から、電力線の特徴を把握することが重要である。電力系統の形態は一様ではなく、各国で使用電圧区分、回線数、変圧器配置などが異なっており、電力系統の運用で、構成を変更したときの通信ネットワークとしての影響を考慮せねばならない。

本稿では、電力会社が通信事業を行う観点から、各国の状況を概説し、併せて、三菱電機の高速PLCに対する取り組み状況及びビジネスに必要な課題について述べる。



高速電力線通信の普及状況

海外では、現在、インターネットアクセスを目的とした商業化を目指している国が多い。表に各国のPLC実験サービス状況を示す。特に欧州で盛んであり、スペイン、ドイツ等で商用サービスを開始している。

1. ま え が き

高速PLCは、配電線、電灯線を通信線として利用するので、新たな通信線敷設の投資が不要であるが、本来電力を送電する設備を通信線として利用するための技術開発が必要である。ここでは、主にPLC事業の市場動向と、事業モデル、通信対象である配電系統の特長及び技術開発項目を述べる。

2. 高速PLCとは

2.1 高速PLCの特長

高速PLCは電力線を通信媒体とする有線通信で、下記のような特長がある。

(1) 通信ケーブル敷設工事が不要：legacy(遺産)の活用
ほとんどの国では隅々まで配電線・電灯線が敷設されている。これを通信線として利用することにより、新たな通信ケーブル敷設工事なしで、ブロードバンド対応のネットワークを構築できる。固定電話の普及率が20%以下の国では、ADSLの普及が難しく、電力線を利用する高速PLCが有望である。

(2) 200Mbpsの高速通信が可能

高度な多重化(Orthogonal Frequency Division Multiplexing：OFDM)技術などを採用し、電力線上で2～30MHz帯を利用して、物理速度200Mbpsの高速通信が可能となる。

(3) 安価なネットワーク機器

超LSI化、DSP(Digital Signal Processor)制御によって低コスト化が可能となる。

2.2 高速PLCシステム

高速PLCシステムはMV(Medium Voltage：中圧)ノード、PLC信号の中継を行うリピータ(Repeater)、ユーザーが宅内で使用するCPE(Customer Premises Equipment)、PLC信号を電力線に重畳する信号結合装置(Coupling Unit)及びこれらの機器の運用管理を行うネットワークマネジメントシステムから構成される。

宅内のCPEは、図1のように、通常のコンセントから動作電力の供給を受けるとともに、情報コンセントとして、

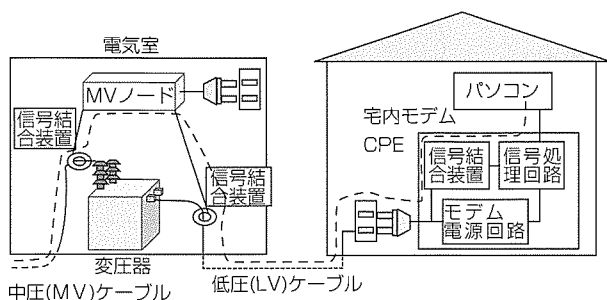


図1. 信号の結合方法

信号結合装置を介して電力線を利用して送受信する。この構成により、宅内のPLCモデムをコンセントに差し込むだけで、通信が可能になる。

電気室に設置されたMVノードは、中圧と低圧(Low Voltage：LV)回路の各々に接続された信号結合装置を介して信号を重畳し、中圧・低圧間で信号を伝送する。

配電回路で複数の分岐や接続機器によって信号が減衰する場合には、中継用のリピータを設置する。

なお、中圧とは海外の分類であり、日本では6.6kVを高圧、22kVを特別高圧と区分している。

3. 高速PLCの適用形態

3.1 ビジネスモデル

高速PLCの適用形態は、表1に示すように、インターネットアクセスを中心としたアクセス系への適用と、屋内・宅内での情報ネットワークに適用するインハウス系に大別される。

上記の中間形態として、自動検針と組み合わせたサービスが想定される。

日本は、現在、電波法の規制でPLCは10～450kHzの周波数領域のみ使用できるが、今後の規制緩和で高速のサービスが可能になると、宅内を中心に市場が創出されることが期待される。

3.2 ビジネスモデル例(インターネットアクセスモデル)

図2は、中圧系、低圧系共に高速PLCを適用したインターネットアクセスの例である。大規模集合住宅に隣接した変圧器室に中圧/低圧の変圧器が設置されている。ここにMVノードを設置して住宅内のモデムCPEと通信する。

図3は、インターネットアクセスとインハウスの中間領域のモデルである。電力自由化に対応して各家庭の時間帯別料金の把握を行い、時間帯別料金をきめ細かに管理する

表1. ビジネスモデル

項目	海外	国内
アクセス系	インターネットアクセス 欧州はインターネット普及率が低い、また、アジア新興国は通信インフラ未整備のため普及可能性大	ADSL、光等の競合方式が既に2,000万軒に届く状況にあり、規制緩和後、PLCの急速な普及と拡大は困難
インハウス系	電力取引自由化対応情報サービス 欧州では自動検針+インターネットサービスの要求あり	電力自由化制度に対応した自動検針ニーズから電力需要家への総合的な生活情報サービスへと発展する可能性あり
	インターネット向け宅内LAN HomePlug ^(注1) 陣営がパソコン用ネットワークとして宅内モデムを販売	規制緩和後により価格次第で市場が創出される可能性大
	ブロードバンドホームネットワーク 日本市場に遅れて普及の可能性大	デジタル家電の急速な普及でAudio Visualを楽しむ環境が広がる可能性大

LAN：Local Area Network

(注1) HomePlugは、HomePlug Powerline Allianceの登録商標である。

ほか、外出先からの家電機器制御など付加サービスを提供する。

図4は、家庭内のAV機器、パソコン等の間的高速・大容量の通信を可能にするネットワークの例である。

4. 各国の動向

4.1 海外のフィールドテストと商用試験概要

海外では、現在、インターネットアクセスを目的とした商業化を目指している国が多い。表2に、各国のPLC実験サービス状況を示す。特に欧州で盛んである。

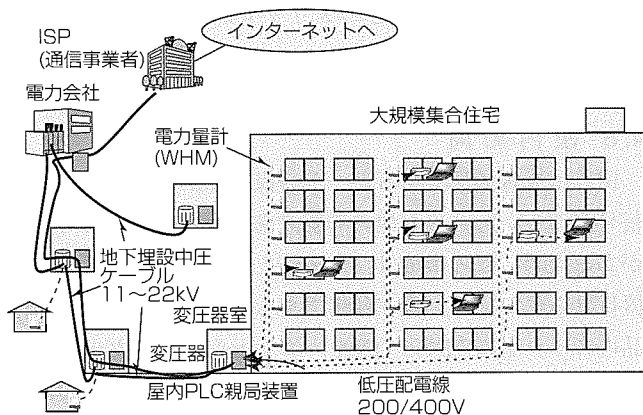


図2. インターネットアクセスモデル例

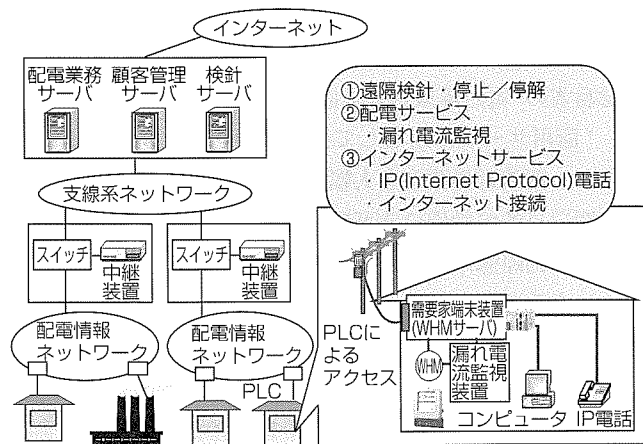


図3. 電力取引対応サービスモデル例

4.2 欧州の状況

(1) ブロードバンド普及状況

欧州は、ブロードバンドの普及率が低い。ブロードバンドサービスとしてADSL、CATV(Cable TV)があるが、インフラの革新が遅れていることから、通信速度、通信料金が高い傾向にある。

欧州のブロードバンドサービスは、Videostreaming、VoD(Video on Demand)、バーチャル会議などの高速サービスの要求が高まるに従い、高速アクセスの必要性が高まると予想されている。高速PLCはxDSL及びCATVに続く位置を占め、今後10年間で2,000万軒の市場規模があると予想している(欧州PLC白書⁽¹⁾)。

(2) 実験・サービス状況

欧州は、高速PLCへの取り組みが早く、各国で高速PLCの実験が行われ、スペイン、ドイツ等で商用化している。特にスペインは熱心で、スペインの電力会社であるENDESA社はサラゴサ、バルセロナで、Iberdrola社はマドリッドで、それぞれ2003年からサービスを開始している。ドイツではMVV社、イギリスではSSE社などが商用化している。

図5に、ENDESA社のシステムの概要を示す。MV/LVの両電圧システムを用いた高速PLCサービスを目指してい

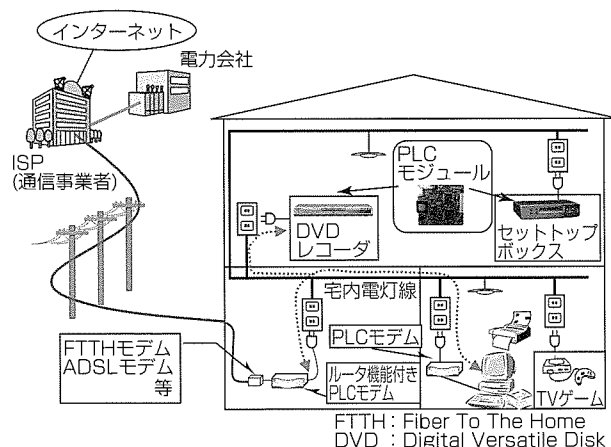


図4. ブロードバンドホームネットワークの例

表2. 各国のPLC実験・サービス状況

国(地域)	配電線の状況	PLC普及状況
欧州		
スペイン		電力会社ENDESA, Iberdrolaが2003年度から商用サービス開始
フランス	1つのMV/LV変圧器から300軒程度の家に電力を供給、	電力会社EDFが試験中
イギリス	地中埋設率が高い	電力会社SSEがアクセス系サービス開始
ドイツ		電力会社MVVがアクセス系の商用サービス中
北米	1つのMV/LV変圧器から5~10軒程度の家に電力供給	FCCがインターネットアクセス推進の方針を打ち出し、今後、加速の見込み
中南米	架空のLV配電線から電力供給	チリ、メキシコ等で試験中
アジア		
シンガポール等	配電線が地中化され、集合住宅、ビル等の高層建物が多い	試験中
中国	大都市は地中化、その他は架空配電線	北京で2,000軒規模の実証実験中
香港	配電線が地中化され、集合住宅、ビル等の高層建物が多い	高層住宅、ホテル等で実用サービス中
韓国	韓国は日本とほぼ同じ形態	日本と同様の電波法があるが、実証試験が許可された
日本	高圧(海外の中圧)、低圧配電線共に架空配電が多い、都心部はケーブル	電波法及び電波法施工規則(省令)により、10~450kHzの周波数帯を使用する装置のみ利用が認められている。2004年1月26日に2~30MHzまでの帯域に対して漏洩電界低減技術に関する実験が実施できるように省令が改正された

る。バックボーンとして光ネットワークをMV系統のMV/LV変電所に設置し、高速PLCのMVノード装置に接続している。MV系統及び下位のLV系統でPLCネットワークを構成し、LV系統を利用して、加入者にインターネットサービス及びVoIP(Voice over IP)サービスを行う。

(3) PLCを実現するための欧州共同研究プロジェクト

欧州では、EUがスポンサーとなって、高速PLCのプロジェクトであるOPERA(Open PLC European Research Alliance)が2004年1月からスタートした。このプロジェクトは、更に大きなブロードバンドプロジェクト“Broadband for ALL”の一部である。EC(European Commission: 欧州委員会)はヨーロッパのブロードバンド市場のための高速PLCの重要性を強調している。OPERAは、“eEurope”とこれに付随するIST(Information Society Technologies)プロジェクトの枠組みで資金を受けている。OPERAは二つのフェーズに分かれておりそれぞれ2年間である。電力会社、メーカー、研究機関、コンサルタントの合計36メンバーから構成され、統一した欧州のPLC標準を開発する計画である。欧州委員会の長期的な目標は、欧州にブロードバンド市場を開拓し、xDSL及びCATVアクセスを補完する技術とすることである。

当社は、このプロジェクトに参加し、PLCシステムの開発と標準化の分野で活動している。

4.3 米国の状況

(1) ブロードバンド普及状況

現在2,000万軒以上がブロードバンドに加入している。PLCによるインターネットアクセスは米国ではBPL(Broadband over Power Line)と呼ばれている。

FCC(Federal Communication Commission: 米国連邦通信委員会)は、BPLが、CAVやxDSLのサービスが受けられない地域にサービスを提供できる技術と評価している。

(2) 実験・サービス状況

米国では、インターネットアクセスと宅内ネットワークの二つ共に検討されている。宅内系はHomePlugの技術を適用した製品がパソコンネットワーク用として販売されている。

米国のインターネットアクセスは小規模トライアルの段

階であるが、各地で実験が計画又は実施されている。

米国においても、郊外地域にブロードバンドインターネットアクセスを普及させることが目的の一つであり、地方電力会社が事業化を検討している。APPA(全米電力組合、主に地方電力)加入のManassas市では、市営電力として米国初のBPL実施を検討している。

UPLC(United Power Line Council), PLCA(The Power Line Communications Association)などで実用化に向けた検討が活発に進められている。

4.4 アジア、南米等

中国など固定電話の普及率が低い国が多く、普及率の高い電力線を利用することのメリットが大きい。高速PLCの導入を積極的に検討している。韓国にも日本と同様の電波法があったが、実証試験が許可された。

4.5 国内動向

PLCは有線通信であるが、その媒体である電力線からの信号漏洩(ろうえい)が他の無線設備に影響を与える可能性があるため、この帯域は、電波法上は高周波利用設備と位置付けられている。現在利用できる周波数帯域では、家電品のスイッチのOFF/ONや、コンセントプラグの挿抜の影響を強く受けるため、高速で安定した通信を行うのは難しい。

e-Japan重点計画2001に盛り込まれたPLCの規制緩和(2~30MHzまでの帯域を商用サービス用に使用できるようにすること)については、2002年4月に立ち上げられた総務省の「電力線搬送通信設備に関する研究会」で検討され、“商用サービス用として周波数帯を拡大することは困難だが、漏洩電界強度を大幅に低減する技術開発のために、研究開発目的の設備の許可制度を整備し、我が国の状況を反映した国際基準の策定を目指す”という答申が出された。

これを受けて、当社を始めとした10社で、高速電力線通信推進協議会(PLC-J)を設立し、PLCの技術開発(通信及び漏洩電界低減技術開発)及び普及活動を行ってきた。この活動と機を同じくして、2003年11月12日の電波監理審議会で“実験のための電波法の改正は妥当である”旨の答申が出され、2004年1月26日の官報公示によって2~30MHz帯を使ったPLCに対する電波法関連法規の改正が行われ、日本国内でも実験が可能となった。

当社においても、漏洩電界低減策の検証を実施中である。

4.6 各国の推進団体

各国の高速PLC推進団体を表3に示す。当社は、星印(★)の団体に参画して、高速PLC技術の開発・標準化に貢献している。

5. 電力系統の特長

電力系統の構成は、各国の電源・負荷の状況等によって異なっている。

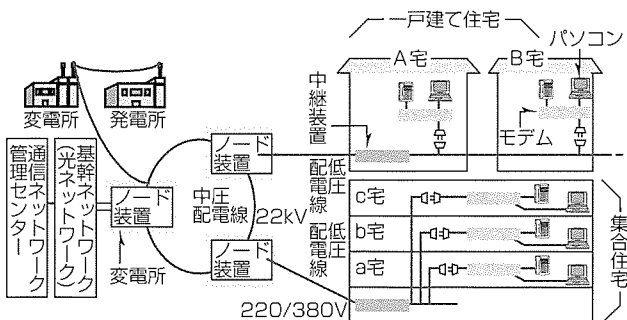


図5. ENDESA社PLCシステム概要

表 3. 各国のPLC推進団体

団体名 (設立)	参加企業	主な活動
PLC Forum (2000/3)★	ENEL, EDF, ASCOM, Atanvo, Main-net, DS2, Sydkraft, 三菱電機等 約57社	<ul style="list-style-type: none"> ● PLC産業の普及活動, PLC市場の開拓 ● PLCの全世界的な展開の推進母体 ● PLCに関連する標準化と規制緩和活動
HomePlug (2000/3)★	3Com, Compaq, Intel, Cisco Systems, Intellon, 松下電器, 三菱電機等 約45社	<ul style="list-style-type: none"> ● In-house向け高速配電線搬送の仕様統一と普及 (2001/6に電灯線ホームネットワーキングの仕様HomePlug 1.0を発表 (内容はIntellon社の技術))
UPLC (2000/3)	AEP(アメリカ電力), AT&T, Amperion, Main.net, PPL(電力会社), Silicon Valley, 東京電力, TXU(テキサス電力)等 約14社	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国の電力会社とPLCメーカーとのアライアンス。アクセス系についての取り組みが主体。PLCの技術情報, 規制情報の提供, 普及が目的 ● UTC(連邦通信協議会)の下部組織
PLCA (2000/3)	Ambient, Ameren, ErathLink, M@in.net, PPL, Southern Company, Progress Energy, 等 約11社	<ul style="list-style-type: none"> ● 電力会社主導の団体で, 北米に, PLCを普及させることが目的。アクセス系についての取り組みが主体
PUA (2000/3)★	ENDESA, EDF, EnBW, ENEL, EDP, Iberdrola, Union Fenosa, EEFの8社	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州の地中海沿岸電力会社のアライアンス (PLCの標準化, 展開を指向)
PLC-J 高速電力線通信推進協議会 (2000/3)★	A会員として関西電力, 東京電力, きんでん, 住友電工, 日立, 富士通, 本多エレクトロン, 松下電器, 松下電工, ラインコム, NEC, トヨコム, 三菱電機の13社, 他にB会員13社	<ul style="list-style-type: none"> ● PLCに関連する国内規制緩和に向けた活動 ● PLC産業の普及に向けた活動 ● PLCの海外団体との意見交換/協調

5.1 系統電圧

家庭で使用する交流電圧は日本では100V, 又は200Vであるが, 発電所から消費地までの間には, 例えば500kV, 275kV, 154kV, 66kV, 22kV, 6.6kVなど複数の電圧区分(電圧階級)を経由している。高速PLCの適用が考えられているのは配電分野で大別して次の2階級がある。

(1) 中圧(MV)

海外では11kV, 22kVの電圧を中圧と呼称している。一方, 日本では6.6kVを高压, 22kVを特別高压と区分している。

(2) 低圧(LV)

海外では200V, 400Vを採用しているが, 日本では100V, 200Vが採用されている。

海外では低圧から中圧の22kVまでを高速PLCの通信線として利用し, バックボーンに光ネットワークを利用するのが一般的である。

5.2 MV系統の形状(トポロジー)

電力系統による電力供給停止を極力減らすためには, 例えば図6に示すようなループ系統を構成することにより, 複数の経路で電力を供給することが望ましい。

一方, 電力系統に複数の供給経路があるとき, 各々の経路を通過する電力は, 経路のインピーダンスで決まり, 電力通過量の配分を自由に制御することができない。

そのため, ループ系統の場合, 常時は1か所開放した, オープンループの運用を行う。又は, 図7に示すように隣接系統との接続点を設けておき, 必要時に線路・負荷を切り換える運用を行う。

通信の観点から言えば, これらの系統操作により通信経路の変更が発生することを意味している。これに対応したPLCネットワークシステム構築が必要になる。

5.3 PLC通信機器の設置例

配電線の線種として, 地中埋設ケーブル及び架空配電線

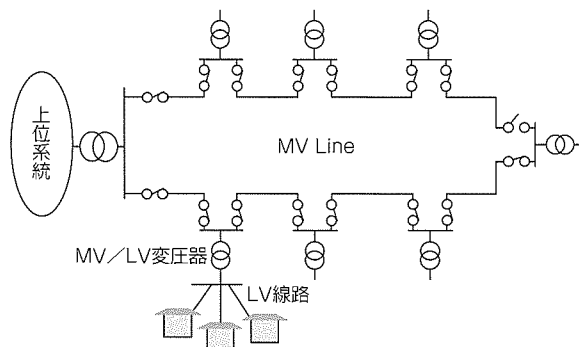


図 6. 複数経路による電力供給形態

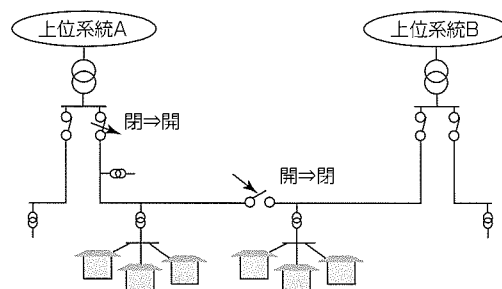


図 7. 系統切換え操作

がある。また変圧器も, 柱上変圧器, 地上置きで密閉形のパッドマウント変圧器, 及び室内設置の変圧器がある。上記の条件の組合せに対するPLC機器設置例を示す。

(1) MV, LV共に地中埋設ケーブルの例

図8は, 欧州の都市部で標準的な系統構成である。MV/LV変圧器は屋内又は地下室に設置されるが, パッドマウント変圧器等の屋外設置の場合もある。ビルへの電力供給時には変圧器をビルに隣接又は内部に設置する場合がある。

(2) MV, LV共に架空配電線の例

図9は, 米国, 南米, 日本などに見られる形態である。MV/LV変圧器を柱上に設置している。MV/LVのモデ

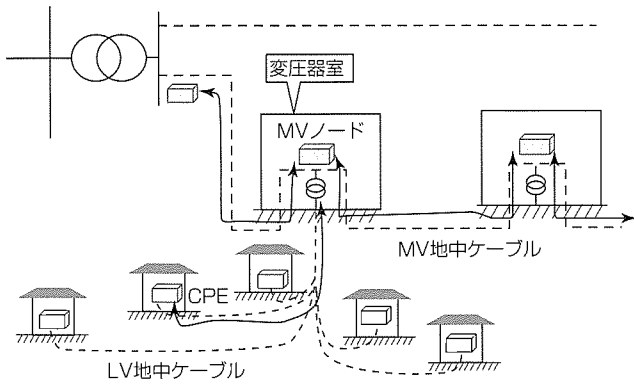


図 8. MV, LV共に地中ケーブル系統の例

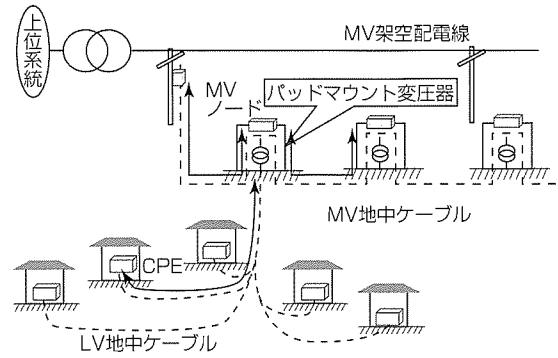


図10. MVは架空配電線と地中ケーブル混在, LVは地中ケーブル系統の例

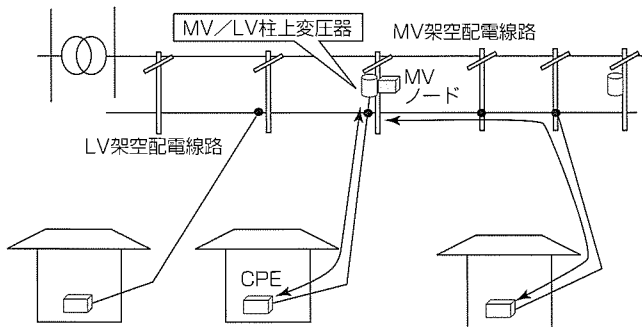


図 9. MV, LV共に架空配電線系統の例

ム及び信号結合装置は柱上変圧器近傍の屋外設置になるため、耐環境性が必要である。

(3) MVは架空配電線と地中埋設ケーブルの混在で、LVは地中ケーブルの例

図10は、米国で見られる形態である。MVは架空配電線で負荷近くまで送電し、電柱からMVケーブルを引き出し住宅近くの変圧器まで地中埋設ケーブルで供給する。変圧器は、住宅地内に設置されるため、密閉型で地上置きのパッドマウント変圧器を採用している。MV/LVモデム、信号結合装置の設置スペースの確保が課題となる。

5.4 配電線の通信性能

当社は、世界の各地でフィールド試験に参画し、配電線 の特性(信号減衰特性)を測定している。その結果、配電線

の材質、配電線の分岐などの構成によって減衰特性が異なることが分かっている。したがって、配電線の特性を把握し通信線化する技術の開発が不可欠である。また、大量のサービス実施段階においては、通信性能の予測技術が必要と考えられる。

6. むすび

高速PLCは既存の電力線を利用できるという大きいメリットがある。一方で、電力線を通信線として利用するための技術が必要である。高速PLCを用いたネットワークシステムの開発課題として下記事項が挙げられる。

- 各国のIT政策の把握
- 高速PLC推進活動、規格の標準化、規制緩和活動
- 配電線通信線化技術開発
- ネットワークシステム、モデム開発

当社は、電力分野、通信分野の両方において事業を展開しており、異なる分野の技術を総合して、高速PLCシステムビジネス開拓に当たっている。

参考文献

- (1) White Paper on Power Line Communications (PLC) and its Impact on the Development of Broad band in Europe, November 25th (2002)

高速電力線通信の規制緩和の現状と今後の動向

森田淳士*
下平平史*
小根森章雄**

Current Status and Future Trend of Deregulation of High Speed PLC

Atsushi Morita, Heishi Shimodaira, Akio Konemori

要旨

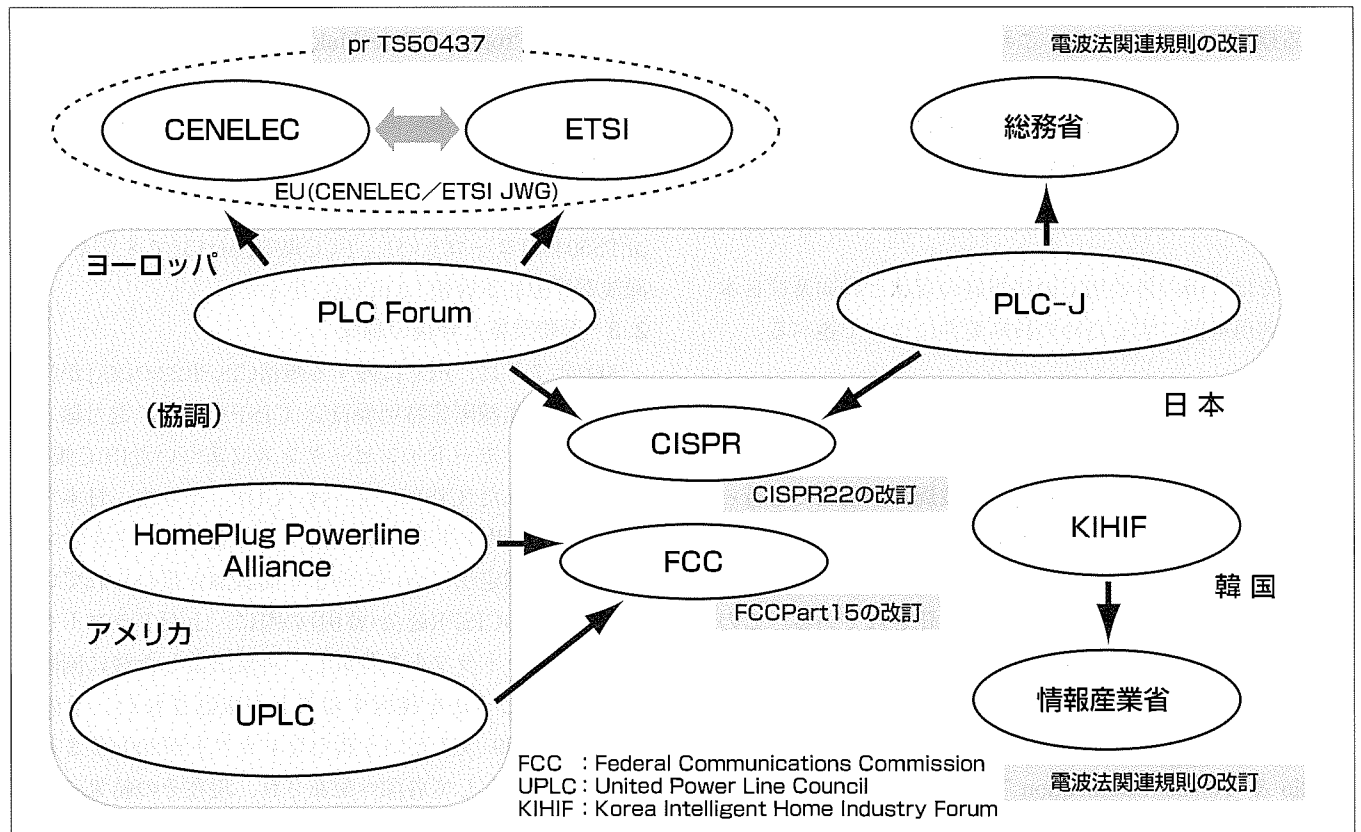
e-Japan戦略、e-Japan重点計画によって、日本の高速アクセス系ネットワークインフラは、急速に普及し、2004年2月末時点で、DSL(Digital Subscriber Line)は1,000万加入を、FTTH(Fiber to the Home)も100万加入を超え更に増加している。

一方、近年のLSI技術の発展に伴い、今まで高価で簡単に実現できなかったデジタル処理が比較的簡単に低価格で実現できるようになり、無線通信用のノイズに強い変復調方式を使った電力線通信(Power Line Communication: PLC)が実現されてきた。OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: 直交周波数分割多重方式)、SS(Spread Spectrum: スペクトル拡散)などの変復調技術は無線LAN(Local Area Network)、xDSLなどに適用され広く普及してきたもので、2~30MHzの周波数帯域を使っ

た高速PLCにもこれらの技術が適用されてきた。その結果、xDSL、HFC(Hybrid Fiber Coaxial)、CATV(Cable TV)、FTTH等のネットワークと比べても遜色(そんしょく)のない高速なデータ通信が可能となった。既存の配電線、電灯線を利用することで新たな通信媒体の設置が不要となるため、高速PLCは、ブロードバンドネットワークの手段の一つとして期待されている。

三菱電機が取り組んでいる高速PLCは2~30MHzの帯域を使用するもので、この帯域に既に割り当てられている短波放送、アマチュア無線、電波天文、航空無線局などに対して実用上の影響を与えないようEMC(Electro-Magnetic Compatibility: 電磁両立性)問題を考慮した適用が必要である。

本稿では、このEMCに関する状況や取り組み、今後の動向について述べる。



各国団体のPLC関連規制策定の取り組み

高速PLCに関連する規格は、現在FCCで定められたもののみであるため、各国の団体が所轄の規制当局に対して許容値、測定法などを積極的に提案している。ヨーロッパではEU(欧州連合)の下でCENELEC(欧州電気標準化委員会)とETSI(欧州通信規格協会)がジョイントWGを作り許容値等検討中で、日本では、国内法の基になるCISPR(国際無線障害特別委員会)規格の策定に対して積極的に活動している。

1. ま え が き

現在日本では、無免許で使用可能なPLCは450 kHz以下の周波数帯域を使用したものであり、当社が取り組んでいる2～30 MHzまでの帯域を使用した高速PLCは、525 kHz以上に中波放送(NHKラジオ, AFN(American Forces Network), 民放, 高速道路情報など)の帯域があり、これらを保護するため現状の電波法では許可されていない。

しかしながら、この450kHz以下の帯域は、家電品のスイッチのON/OFFの影響や低インピーダンスによる信号低下の影響を強く受けるために、安定した高速通信を実現するのは非常に難しい。そのため当社では、高速でかつ安定した通信を実現するために、上記のように2～30MHzの帯域を使った高速PLCの開発に取り組んでいる。この帯域には、既に、短波放送、特に国内の放送(ラジオNIKKEI(旧ラジオ短波)), 海外向けの放送(NHKワールド:NHK), 海外からの日本向け(BBC World Service, VOA(Voice of America)など)放送や、アマチュア無線、電波天文、航空無線などの無線局がある。高速PLCを使用するとPLCモデムやそれが接続されたネットワークから漏洩(ろうえい)電磁界が発生し、そのために上記の無線局の業務に影響を与えることが懸念されており、2002年には総務省総合通信基盤局電波部の中に「電力線搬送通信設備に関する研究会」が設置され、これらの問題について議論された。その結果、既存の無線局に妨害を与えるおそれが強いとして商用のための周波数帯域の開放は見送られたものの、この帯域を使った実験のために制度整備を行うこととなり、2004年1月26日に実験のための改正電波法が施行された。

本稿では、国内外のPLCの法規制の現状と動向及び日本国内で利用可能にするための技術要件について述べる。

2. 海外の現状と今後の動向

2.1 ヨーロッパ

ヨーロッパでは、各国が独自の電波周波数割当てを行っているが、10～150 kHzの帯域ではPLCの利用が認められている。一方で、既に2～30 MHzの帯域を使用した高速PLCが実用化され、一部の国では商用化されている。この2～30 MHzの帯域を使った高速PLCについては、国際的な技術基準がまだ整備されていないため、欧州委員会はEMC(Electromagnetic Compatibility)指令及びR&TTE(Radio & Telecommunication Terminal Equipment)指令、低電圧指令を満たす製品を作る(CEMarkingを取得する、また、PLCモデムについては国際規格CISPR22と協調をとった欧州整合規格EN55022及び電気安全の技術基準を満足することによって、商用サービスを認めている。

ドイツでは、xDSL, CATV, PLCなどが接続されたネットワークから放射される漏洩電界強度を規定したNB30という規格がある。フィールドで障害が発生した場合には、このNB30を使ってフィールドでの影響を評価することになっている。

同様に、イギリスにはMPT1570という規格がある。ヨーロッパの国ごとに異なった技術基準が存在しているため、欧州委員会では高速PLC(モデム)につながる配電系からの漏洩電界強度に関する欧州統一技術基準の策定をETSI(欧州電気通信規格協会)とCENELECに委嘱した。2004年3月末に技術仕様書(CLC/prTS50437)という形でその最終ドラフトが作成され各国の承認待ちとなっている。

2.2 米 国

米国では、この2～30 MHzのPLCについてはFCC(Federal Communication Commissions: 米国連邦通信委員会)で既に認められているため(前述のCarrier Current System)、宅内での利用にターゲットを絞ったHomePlug^(注1)(HomePlug Powerline Alliance)が標準仕様を定義し製品開発が行われて、既に市場で販売されている。しかしながら、高速PLCの出現により特に問題となるアクセス系PLC漏洩電界等につき昨年広く米国内の各業界、利害関係者に意見を求め検討した結果、条件付きながら、FCCは、基本的には、現在の規格FCCPart15が適用可能との結論に達し、現在最終的な意見聴取に入っている(2004年2月にNPRM(Notice of Proposed Rule Making)が出された)。

現在、アクセス系PLCの実験も多く行われており、規格も現状のものが適用可能ということで、宅内に続きアクセス系での高速PLC採用が期待されている。

図1に、NB30(ドイツ), MPT1570(イギリス), CLC/prTS50437(ヨーロッパ), FCC規則Part15(アメリカ)の各漏洩電界強度許容値(3m地点)を示す。

2.3 国際規格と今後の動向

2002年7月に、PLCに関する規格CISPR22の改訂が検討され、国際無線障害特別委員会(CISPR)から“電力線の平衡度とコモンモードインピーダンスに基づいたPLC規格”案が提案された(CISPR/I/44/CD)。その後、日本で収集した約250サンプルの電力線の平衡度のデータを含めて、許容値及び測定法について約1年間議論を重ねられている。2003年9月のCISPR総会(韓国)の際に、上記ドラフトを見直した新たなドラフトを作成し、再度議論した後に国際規格化するかどうかを検討することが確認された。その後、CISPR/I/89/CDという新たなドラフトが2004年2月20日を回答期限として各国へ配布され、現在その結果についてまとめていると思われる。

日本は、“PLCの通信機能が動作しているときの伝導妨
(注1) HomePlugは、Homeplug Power Line Allianceの登録商標である。

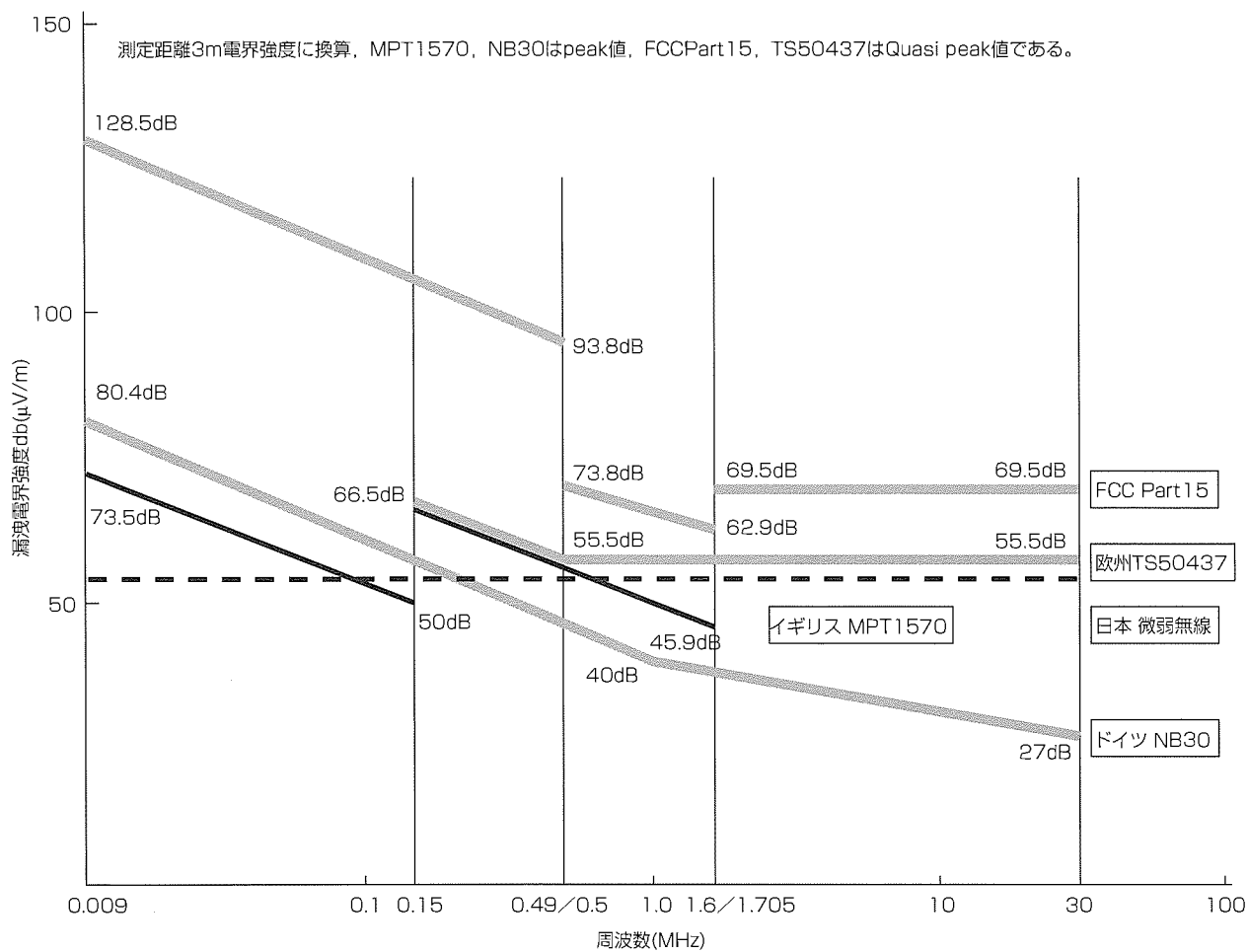


図1. 海外PLC関係TC Network漏洩電界強度許容値

害レベルに対して、従来の電源ポートの許容値を適用すべきである”という意見を提出している。今後、各国からの意見を集約し、2004年5月ごろ開催予定のCISPR/IのWGでこのドラフトの国際規格化を進めるか否かについての検討が行われる予定である。

3. 国内の規制の現状と今後の動向

3.1 国内の規制の現状

PLCは有線通信であるが、その媒体である電力線からの信号漏洩が他の無線設備に影響を与える可能性があるため、電波法上は高周波利用設備と位置付けられている。

関係法令を以下に記す。

電波法令では、電線路に10 kHz以上の高周波電流を通ずる電信電話その他の通信設備を高周波利用設備と定め(第100条)、電波法施行規則で免許が不要な型式の認定を行い(第46条など)、無線設備規則で利用可能なPLCの周波数帯(10~450 kHz)及び送信設備の最大の高周波出力を10ワット以下と定めている(第60条など)。

この帯域は、家電品のスイッチのON/OFFや、コンセントプラグの挿抜の影響を強く受けることや接続された家電品のインピーダンスが低く通信用の信号が吸収されてし

まうなどのため、PLCを使って高速で安定した通信を行うのは極めて難しい。逆に、家電品のノイズは500 kHz以上はカットされているため、2~30 MHzの帯域は、ノイズが少なくインピーダンスも安定しておりPLCの通信に適している。そのため、前述の海外動向と同様に日本でも2~30MHzの周波数帯域を使ったPLCを実用化すべきである。

3.2 今後の動向

e-Japan重点計画2001に盛り込まれたPLCの規制緩和(2~30MHzまでの帯域を商用サービス用に使用できるようにすること)については、2002年4月に立ち上げられた総務省の「電力線搬送通信設備に関する研究会」で検討され、「商用サービス用として周波数帯を拡大することは困難だが、漏洩電界強度を大幅に低減する技術開発のために、研究開発目的の設備の許可制度を整備し、我が国の状況を反映した国際基準の策定を目指す」という答申が出された。

これを受けて、当社を始めとした10社で、高速電力線通信推進協議会(PLC-J: <http://www.plc-j.org>)を2003年3月に設立し、PLCの技術開発(通信及び漏洩電界低減技術開発)並びに普及啓発活動を行ってきた。この活動と機を同じくして、2003年11月12日の電波監理審議会で“実験の

ための電波法の改正は妥当である”旨の答申が出され、2004年1月26日の官報公示によって2～30 MHz帯を使ったPLCに対する電波法関連法規の改正が行われ、ようやく日本国内でも実験が可能となった。

この省令改正の内容は“漏洩電界強度の低減技術を検証する目的であれば、2 MHz～30 MHzまでPLCを高周波利用設備の設置許可申請を行うことによって利用可能とする”ものであり、設置者の連絡先、実験の期間、混信等の対策などを実験計画書として記載し実験場所を管轄する総合通信局に提出することが義務付けられている。

当社では、近畿総合通信局から神戸の当社施設での実験の許可を受け、漏洩電界低減策の検証を開始する予定である。

4. 国内の規制緩和に向けた活動

国内では、短波帯にある既存の無線局からPLCの漏洩電界が無線業務に支障を来すのではないかという懸念が表明されていること、2002年の総務省による研究会の結論としても、“漏洩電界を大幅に低減のための技術開発が必要である”旨も報告されていることから、PLCモデム及びPLCモデムが接続されているネットワークからの漏洩電界強度を低減することが特に必要となる。これらの漏洩電界発生メカニズム及びその低減技術の一部につき述べる。

4.1 漏洩電界低減技術開発への取り組み

4.1.1 漏洩電磁界発生メカニズム

電力線に通信信号を差動信号として重畳させるPLCでは、電力線がアンテナとしても機能するため、通信信号が漏洩電磁界として放射されるおそれがある。この漏洩電界発生メカニズム(図2)を検討しておくことが、PLCを実用化する上で、避けては通れない重要事項である。

通信信号の重畳された電力線からの漏洩に関しては、国内外の各種実験により以下の事項が判明している。

- (1) 電力線から漏洩する電磁界は、通信とともに発生し、電力2線に同相で流れるコモンモード電流と呼ばれる電流と相関がある。したがって、コモンモード電流が増えれば漏洩電磁界も増加する。
- (2) このコモンモード電流は、電力線の平衡度(通常、不平衡減衰量LCL(Longitudinal Conversion Loss)で表わす。)の影響を受ける。したがって、平衡度の低い電力線ではコモンモード電流が流れやすくなる。

国際的には、CISPRにおいて、電力線の平衡度に関する実フィールド・データから一般的な電力線特性を代表する平衡度を求め、その平衡度に対する、PLCモデムから発生するコモンモード電流の許容値を定める方向にある。

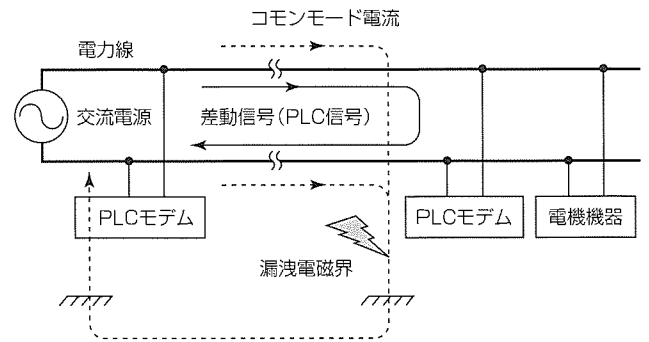


図2. PLCによる漏洩電磁界の発生メカニズム

4.1.2 漏洩電界低減策

PLCモデムの動作に伴い電力線から漏洩する電磁界を抑制するためには、コモンモード電流発生が少ないPLCモデムを開発する必要があるとともに、電力線側の検討も必要である。電力線の漏洩特性を把握するため、現在、電波暗室内に模擬電力線を仮設し、各種実験が行われている。この実験で幾つかの注意点が明らかになってきた。

- (1) 宅内配線のように中性線が接地されない電線路では、屋外配電線のように近傍で中性線が接地される電線路に比べて漏洩電磁界は小さい。
- (2) しかしながら、宅内配線においても片線分岐電線路(照明器具スイッチ系回路等)では、2線が平行近接配線された電線路(コンセント系回路等)に比べて漏洩電磁界が大きくなりやすいことと、通信自体も困難になる傾向がある。
- (3) また、宅内配線において垂直に立ち上がる電線路では、水平に引き回された電線路に比べ漏洩電磁界が大きくなりやすい。

したがって、PLCを実用化するには、用途を限定した運用も必要になるであろう。

5. む す び

ヨーロッパやアメリカではPLCを普及させるための法制度の整備が行われているが、世界の中で日本が最も真剣にPLCモデムからの漏洩電界低減問題をとらえ、最も真剣に対応している状況にある。今後の国内実験において漏洩電界低減技術の成果が確認され、世界に誇れる技術をベースにして国内で商用化できることを期待している。

PLCは配電線、電灯線といった既存のインフラを活用して高速な通信を行う技術であり、高速インターネットのアクセスインフラのみではなくデジタル家電に代表されるホームネットワークの非常に重要なインフラになると考えられるため、早期実用化に向けて技術開発に取り組んでいきたいと考えている。

高速電力線通信アクセス系システム

小島佐和子* 下沢充広***
堀 泰彰* 高田佳典***
齊藤成一**

High Speed Power Line Communication System for Access Network

Sawako Ojima, Yasuaki Hori, Seiichi Saitou, Mitsuhiro Shimosawa, Yoshinori Takada

要 旨

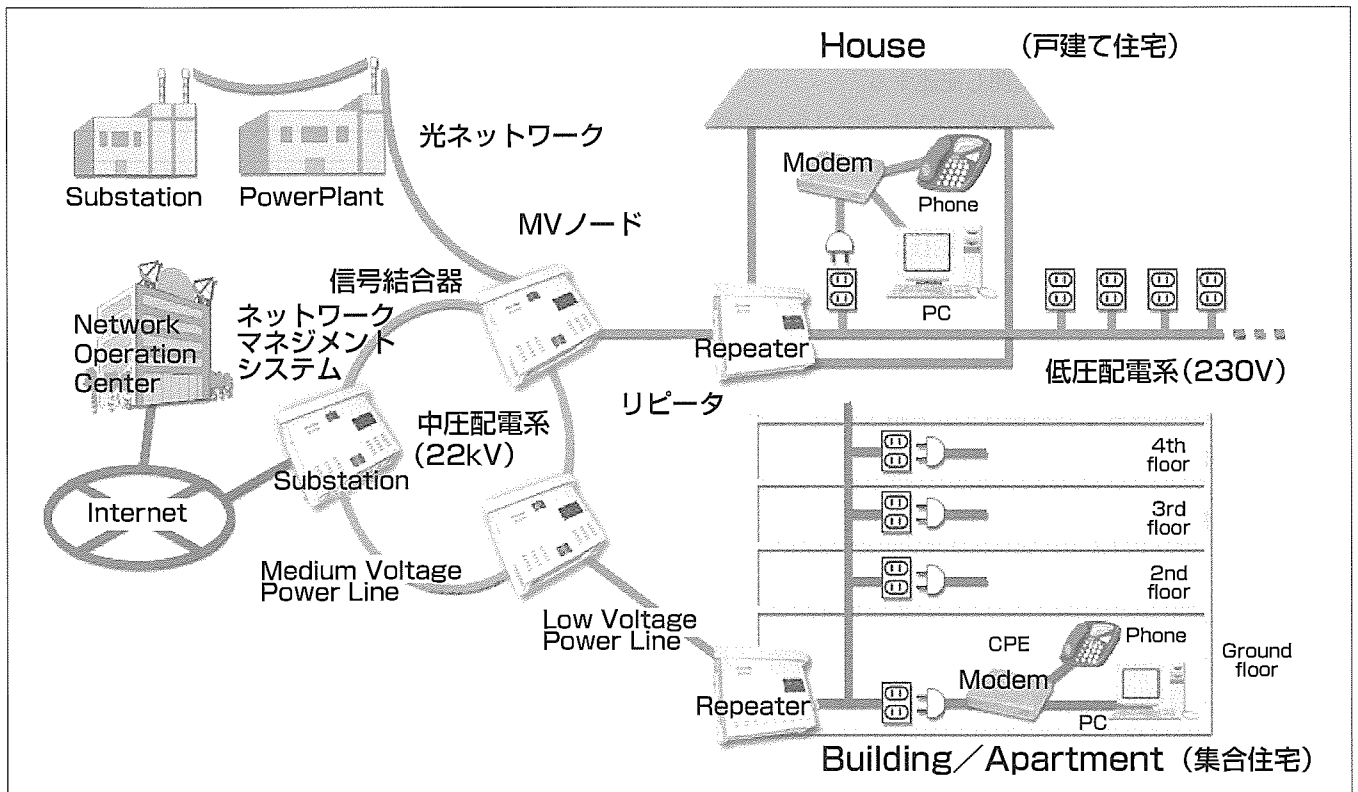
高速の電力線通信 (Power Line Communication : PLC) は、既存の電力線を高速通信インフラとして使用する技術である。電力線の伝送路特性を劣化させる要因としては、周波数変動の大きな減衰特性、電力線上に接続される配電機器及び家電等から発生するノイズ、電力線上の反射によるマルチパスの発生等がある。これら電力線特有の厳しい伝送路上の特性に対応し、かつ上位レイヤとして、データ・音声・映像等の各種サービスを高品質に安定して提供することがPLCによるアクセス系システム開発の技術課題である。

現在、高速PLCアクセス系システムのモデム装置として物理速度45Mbpsを実現するPLC-AMシリーズの開発を完了し、欧州を中心に市場展開を図っている。また、新規に物理速度200Mbpsを実現するPLC-AWシリーズを開発中である。

PLCアクセス系ネットワークは、バックボーンネットワ

ークとしてのMV (Medium Voltage : 中圧22kV配電系統) 及びMVから宅内までスター型トポロジーで構成されるLV (Low Voltage : 低圧230V配電系統) で構成される。これらの電力線をアクセス系ネットワークとして利用可能にするためのモデム装置としては、MV上に設置され高速データ中継を行うMVノード、ユーザーが宅内で使用するCPE (Customer Premises Equipment)、MVノードと宅内のCPE間でPLC信号の中継を行うリピータ (Repeater : REP) の各装置及び、信号結合装置、ネットワークマネジメントシステムで構成される。下図に高速PLCアクセス系ネットワーク構成図を示す。このようにPLC技術をアクセス系のトータルネットワークシステムとして確立するため開発に取り組んでいる。

本稿では、PLCアクセス系システム本体のモデム装置を中心に紹介する。



高速PLCアクセス系ネットワーク構成図

この図は、高速PLCアクセス系ネットワーク構成図を示す。モデム装置としてのMVノード、REP、CPEが電力線上に設置される位置付けを示す。MVノードは、MV/LVトランス室に、REPは集合住宅のメータ室に、CPEはユーザー宅内に設置される。

1. ま え が き

高速電力線通信は、既存のMV、LVの電力線を高速通信インフラとして使用する技術である。電力線の伝送路特性を劣化させる要因としては、周波数変動の大きな減衰特性、電力線上に接続される配電機器及び家電等から発生するノイズ、電力線上の反射によるマルチパスの発生等がある。これらの電力線特有の厳しい伝送路上の特性に対応し、かつ上位レイヤとして、データ・音声・映像等の各種サービスを高品質に安定して提供することが高速PLCアクセス系システム開発における技術課題である。

現在、高速電力線通信システムとしては、物理速度45Mbpsを実現するPLC-AMシリーズの開発を完了し、欧州を中心に製品の市場展開を行っている。また、今般、新規に物理速度200Mbpsを実現するPLC-AWシリーズの開発を開始した。

本稿では、以上の内容について紹介する。

2. システム概要

要旨の図に示すように、高速PLCアクセス系システムは、バックボーンとしてのMV上に接続され高速データ中継を行うMVノード、ユーザーが宅内で使用するCPE、MVノードと宅内のCPE間でPLC信号の中継を行うREP、PLCの高周波信号を電力線に結合する信号結合装置、及びこれらの機器の運用管理を行うネットワークマネジメントシステムから構成される。本稿では、PLCシステムの本体装置であるMVノード、REP、CPEに関し記述する。

MVノードは、MV配電系のMV/LVトランス室に設置されるアクセス系ネットワークにおけるバックボーン装置であり、LV系のユーザー側からトラヒックを集約し上位の光ネットワーク等と接続する。CPEはユーザー宅内のコンセントに接続し、パソコンやアナログ電話との通信インタフェースを持つことでインターネットやIP(Internet Protocol)電話サービスを提供する。REPは、主に集合住宅のメータ室等に設置される信号中継装置であり、MVノードとCPE間の信号の再生中継を行う。

3. PLC-AMシリーズのモデム製品群

表1にPLC-AMシリーズの共通諸元を示す。

3.1 MVノード

MVノードは、中圧配電系の道路脇の地下に位置するMV/LVトランス室等に設置されるため、粉塵(ふんじん)に対する防塵(ほうじん)フィルタが必要であり、かつ温度条件として0~55℃を満足する必要がある。また、設置容易化のためウォールマウント(壁掛け)方式を採用している。図1に外観を、表2に主な諸元を示す。

3.2 REP

REPは、電気メータ室等限られた設置スペースに設置する必要がある、小型化と低騒音設計が要求条件である。この要求条件に対応し、この装置は自然空冷方式を実現した。図2に外観を、表3に主な諸元を示す。

3.3 CPE

CPEはユーザー宅内に設置され、パソコンとアナログ電

表1. PLC-AMシリーズ共通諸元

項目	仕様
周波数帯域	2~30MHz
物理速度	45Mbps
2次変調方式	OFDM*方式
1次変調方式	QAM**変調方式
送信出力	-50dBm/Hz
アクセス方式	TDM (Time Division Multiplexing)
管理プロトコル	TCP/IP***, Telnet等
製品規格	CE Marking

*ODFM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**QAM: Quadrature Amplitude Modulation

***TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol

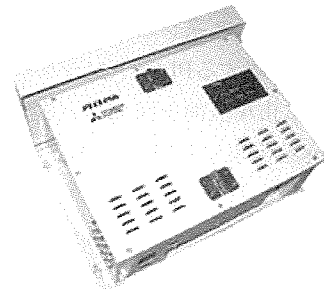


図1. MVノード(外観)

表2. MVノード諸元

項目	仕様
設置場所	MV(22kV)/LV(230V)トランス室
温度・湿度	0~55℃, 0~95%RH, 防塵フィルタ付き
サイズ	(W)390×(D)143×(H)265(mm)
通信インタフェース	●PLCインタフェース ●10/100Mbpsイーサネット(注1)インタフェース

(注1) イーサネットは、米国Xerox Corp.の商標である。

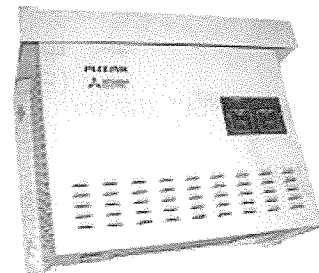


図2. REP(外観)

表3. REP諸元

項目	仕様
設置場所	電気メータ室等
温度・湿度	0~45℃(自然空冷), 0~95%RH
サイズ	(W)390×(D)143×(H)265(mm)
通信インタフェース	PLCインタフェース

話との通信インタフェースを持つことでインターネット及びIP電話サービスを提供する。図3に外観を、表4に主な諸元を示す。

4. PLC-AMシリーズの特長

PLC-AMシリーズの主な特長を以下に示す。

- (1) OFDM(直交周波数分割多重)方式の採用
- (2) 物理速度45Mbpsの実現
- (3) S/N比(Signal to Noise Ratio)の性能向上
- (4) IP電話サービスの実現と柔軟なQoS(Quality of Service)機能の実現
- (5) セキュリティ機能の実現
- (6) 欧州市場向け製品規格の取得

以下に、それぞれの項目について述べる。

4.1 OFDM方式の採用

PLC通信を行うキャリアの多重化方式としては、OFDMを採用した⁽¹⁾。電力線の伝送路特性を劣化させる要因としては、周波数変動の大きい減衰特性、電力線上のノイズ、反射によるマルチパスの発生等がある。OFDMの採用により、これらの厳しい伝送路上の特性に対応し以下の課題を解決した。

- (1) 周波数利用効率の向上
- (2) 減衰・ノイズ特性の変動に対する耐性
- (3) マルチパスに対する耐性

4.1.1 周波数利用効率の向上

減衰特性の周波数変動、時系列変動、またノイズ等によりキャリアの使用可能な周波数帯域は制限される。OFDMにより、狭帯域の多数のキャリアを互いに干渉す

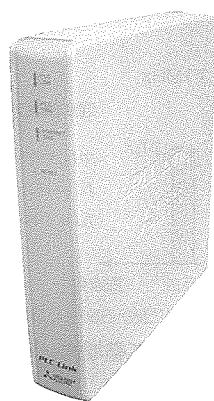


図3. CPE(外観)

表4. CPE諸元

項目	仕様
設置場所	宅内
温度・湿度	0~45℃・0~95%RH
サイズ	(W)45×(D)213×(H)230(mm)
通信インタフェース	<ul style="list-style-type: none"> ● PLCインタフェース(電源と共有) ● 10/100Mbpsイーサネット, USBインタフェース ● アナログ電話インタフェース

ることなく直交に配置することで周波数利用効率を向上し、限られた周波数帯での通信性能を向上した。

4.1.2 減衰・ノイズ特性に対する耐性

図4に配電線の減衰特性例を示す。配電系統のL・C成分等の要因により減衰特性はリニアとはならず周波数変動を生じる。また、接続される配電機器等からバーストノイズ、インパルスノイズが発生する。OFDM方式により、図5に示すように周波数変動に対応したSNR(Signal to Noise Ratio: 信号対ノイズ比)に応じて各サブキャリアごとにアダプティブな変調を行うことにより、このような減衰・ノイズ特性に対しても通信性能を得ることができる。

4.1.3 マルチパスフェージングに対する耐性

また、電力線の伝送特性として、配電線の接合部等での反射等によりマルチパスフェージングが発生することによるシンボル間干渉の問題がある。図6にマルチパスにより

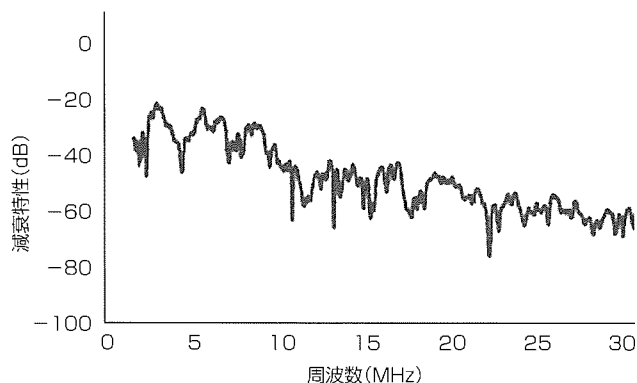


図4. 減衰特性例

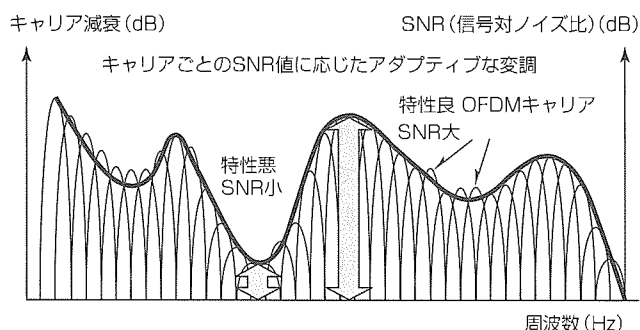


図5. OFDMによる適応変調

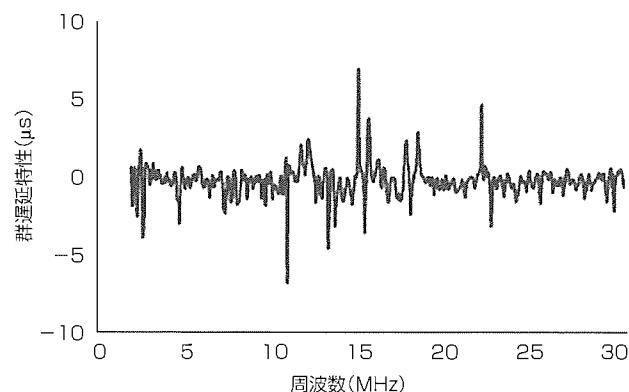


図6. 群遅延特性例

群遅延特性が変動する例を示す。このような群遅延の発生はOFDMシンボル間干渉を発生する。シンボル間干渉を回避するために、遅延による揺らぎを吸収するためガードインタバル(GI)を設けている。

図7は、OFDM方式でのGIによるシンボル間干渉の回避の図を示す。図に示すようにシンボルの最初にGIを付加することで、最初のシンボルである基本波に対し次のシンボルに遅延が生じた場合でも、遅延がGI以内であればシンボル間干渉を防止することを可能とする。

4.2 物理速度45Mbpsの実現

周波数帯域としては2~30MHz帯を使用するが、キャリアのアロケーションとしては、上位ネットワークからユーザー側へ下り方向、ユーザーから上位ネットワークの上り方向にそれぞれ別々の周波数帯域を使用し、下り方向で物理速度27Mbps、上り方向で物理速度18Mbps、合わせて45Mbpsの物理速度を実現した。

各キャリアの変調方式としてはQAM変調方式を採用している。QAMは、信号の振幅と位相に送信データを割り当てることで限られた帯域幅で高い通信効率を得ることができる変調方式である。また、伝送路上のノイズによる伝送誤りへの耐性を高めるため、誤り訂正符号としてFEC(Forward Error Correction)方式のリードソロモン符号を用いている。リードソロモン符号は、送信データにあらかじめ誤り訂正符号を付加して送信するため通信負荷は上がるが、バースト誤りに対する訂正能力が高い符号化方式である。

4.3 S/N比の性能向上

電力線とモデム装置のデジタル部との間でモデム信号を中継する部分としてAFE(Analog Front End)部がある。図8に内部ブロック図を示す。

AFE部は、デジタル部での最大変調性能を得るためのS/N比の確保に重要な役割を果たす。AFE部では性能向上のため以下の施策を実施した。

- (1) スプリアスの低減
- (2) ノイズの低減と高SNRによる増幅

以下にそれぞれの施策とその内容について述べる。

4.3.1 スプリアスの低減

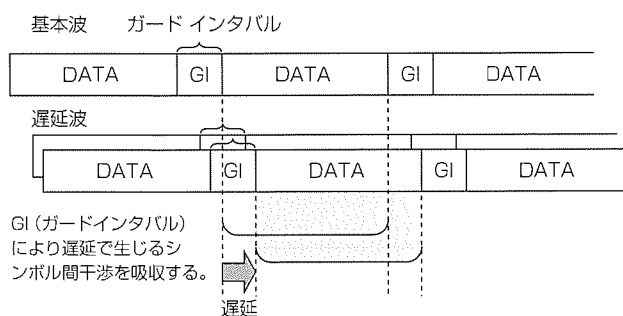


図7. ガードインタバルによるシンボル間干渉の回避

送信側は、デジタル部からの信号をD/A変換(Digital to Analog Conversion)するとともに、送信アンプにより所定のレベルまでひずみなく電力増幅しスプリアスの少ない送信信号を生成する必要がある。このためには、送信アンプ系のリニアリティを良くしIMひずみ(Inter Modulation: 相互変調ひずみ)をなくすことが必要である。リニアリティが悪いと入力信号に直線的に追従せず入力信号の2次、3次などの高調波成分が発生する。図9に示すように、このとき2つの周波数成分を持つ信号が入ってくると $mf_1 \pm nf_2$ (m 及び n は整数)の周波数成分が発生し、帯域内のノイズ成分が発生する。

この送信ひずみを抑制するために、送信アンプの選定とひずみ抑制の調整を行うことでリニアリティを確保した。

4.3.2 ノイズの低減と高SNRによる増幅

受信側では、受信アンプによるノイズを極限まで抑えてSNRを高める必要がある。これに対しては、回路設計及びプリント基板実装設計に対する高度な技術が不可欠である。

グラウンド系ノイズを減少させるには、差動回路構成とすることが有効である。図10に示すように、差動回路の基本は、信号の+側と-側をグラウンドに対してバランスさせることによってコモンモード成分がディファレンシャルモ

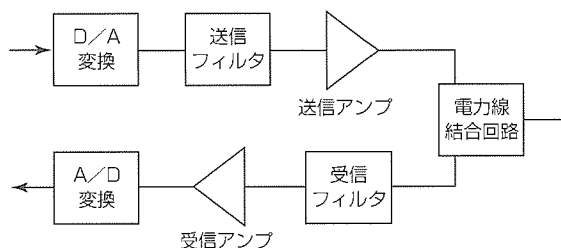


図8. AFE機能ブロック図

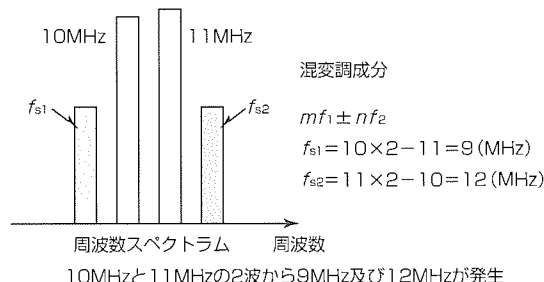


図9. IMひずみによって帯域内ノイズが発生する例

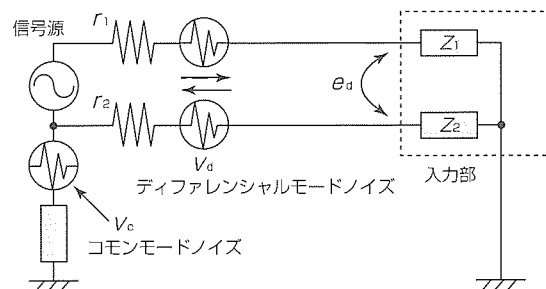


図10. コモンモードノイズとディファレンシャルモードノイズ

ード成分に変換されないようにすることである。コモンモードノイズ除去性能を示す値として、コモンモード除去比(Common Mode Rejection Ratio : CMRR)が用いられる。図において、ディファレンシャルモードノイズ $V_d = 0$ 、コモンモードノイズ $V_c = e_c$ としたとき、 e_c がディファレンシャルモードに変換される電圧 e_d とすると、CMRRは式(1)のとおりとなる⁽²⁾。

$$CMRR = \frac{e_c}{e_d} = \frac{1}{\frac{Z_1}{r_1 + Z_1} - \frac{Z_2}{r_2 + Z_2}} \dots\dots\dots(1)$$

これに対しては、適切な部品選定とパターン設計によりCMRRを向上させ性能向上を図った。

4.4 IP電話サービスの実現と柔軟なQoS機能の実現

ユーザー宅内で使用するCPEは、イーサネットインタフェース及びアナログ電話接続インタフェースを実装し、インターネット機能とVoIP(Voice over Internet Protocol)による音声通信機能を実現した。VoIPのプロトコルとしてはH.323を実装し、欧州標準のIP電話サービスを提供する⁽³⁾。

VoIPの実現に当たっては、音声通信のリアルタイム性を考慮し、遅延(レイテンシ)及び揺らぎを保証するQoS機能の実現が重要である。

電力線のような共通のメディアアクセス方式としては、主に、マスタ/スレーブ方式のTDM(Time Division Multiplexing)方式とCSMA(Carrier Sense Multiple Access)方式が考えられるが、コリジョンベースのCSMA方式は、基本的にマスタが存在しない自律分散制御方式であり、VoIPやストリーミングに必要とされるリアルタイム性や優先制御のQoSを保証することは難しい。

PLC-AMシリーズでは、TDMによるマスタ制御方式を導入し、スレーブはマスタの制御の下に確定的なチャンネルアクセスを可能とする。これにより、遅延及び揺らぎを保証するQoS制御を実現した。

4.5 セキュリティ機能の実現

セキュリティ機能としては、通信データの盗聴防止、モデム認証、パソコン認証機能等を備える。

PLCの物理フレームに対しては、DES(Data Encryption Standard)による暗号化を行うことにより強化を図っている。また、モデム認証は、センター側の認証サーバにあらかじめ接続許可をしたモデムのMAC(Media Access Control)アドレスを登録しておくことでサービス登録されたモデムのみ接続を許可する。さらに、MACフィルタリング機能を持ち、CPEに接続可能なパソコンのMACアドレスの事前登録によりセキュリティを確保する。

4.6 欧州市場向け製品規格の取得

欧州向け製品規格としてCEマーキング(Conformite Europeene Marking)を取得した。CEマーキングは国際規

格であるCISPR(International Special Committee on Radio Interference)規格等に準じ、EMC(Electro Magnetic Compatibility)/EMI(Electro Magnetic Interference)規格と安全規格から構成される。

5. PLC-AWシリーズの新規開発

現在、変調方式の性能向上及びメディアアクセス方式の性能向上等を行うことにより物理速度200Mbpsを実現するPLC-AWシリーズを新規に開発中である。表5に、PLC-AWシリーズの共通諸元を示す。PLC-AWシリーズの主な特長を以下に示す。

- (1) 物理速度200Mbpsの実現
- (2) メディアアクセス方式の性能向上
- (3) QoS等ネットワーク機能の向上

5.1 物理速度200Mbpsの実現

PLC-AWシリーズでは、PLC-AMシリーズと同様、キャリア多重方式としてOFDM方式、1次変調方式としてQAM方式を採用しているが、PLC-AWシリーズでは、キャリア数を更に増加し、また、QAM変調方式の性能を向上させることにより物理速度200Mbpsを実現する。

5.2 メディアアクセス方式の性能の向上

PLC-AWシリーズでは、キャリア周波数帯は、上り/下り方向を分割せず同一周波数帯域に広くアサインし、また、メディアアクセス方式を時分割半二重方式としている。これにより、上り/下りの各通信方向でより広い周波数帯域の使用を可能とした。使用周波数帯域としては10MHz帯域から最大30MHz帯域を一度に使用可能となることで、周波数変動の大きい減衰特性・ノイズ特性に対しより性能を高めることが可能となる。

5.3 QoS機能の向上

欧州、北米においてもブロードバンド化が急激に進展しており、IP電話やストリーミング等のマルチメディア通信サービスの利用が広がりつつある。なお、PLCがアクセス系競合メディア(FTTH : Fiber To The Home, ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line, 無線LAN : Local Area Network等)の中で普及するには、最大帯域制御・

表5. PLC-AWシリーズ共通諸元

項目	仕様
周波数帯域	2~30MHz
物理速度	200Mbps
2次変調方式	OFDM方式
1次変調方式	QAM変調方式
送信出力	-50dBm/Hz
アクセス方式	独自TDM (Time Division Multiplexing)
QoS制御	IEEE802.1p等
管理プロトコル	TCP/IP, Telnet, HTTP*等
製品規格	CE Marking

*HTTP : Hyper Text Transport Protocol

表 6. QoSによるサービスのプライオリティ設定例

プライオリティ	アプリケーション例	QoS制御		
		遅延	帯域	ジッタ
P7(高)	IP電話	小	小	小
P6	ゲーム	小	小	中
P5	ストリーミング	小	中	小
P4	FTP*	中	大	中
P3	インターネット	大	小	中
P3				
P1				
P0(低)	その他			

*FTP : File Transfer Protocol

遅延時間制御等の通信サービス品質の保証が重要である。

PLC-AWシリーズでは、表 6 に示すようにIEEE802.1p^(注2)等に準じたきめ細かなQoSサービスを可能としている。表は遅延時間、帯域、ジッタをパラメータとして、VoIPやリアルタイム性を持つゲーム等のサービスを設定した一例を示す。

6. む す び

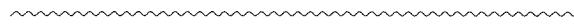
45Mbpsの通信性能を持つPLC-AMシリーズの開発によ

(注 2) 802は、IEEEの登録商標である。

って、電力線という厳しい伝送路特性に対する通信性能を確保し、かつ上位ネットワーク機能を含め安定した柔軟なトータルネットワークシステムの開発を行った。また、現在200Mbpsの通信性能を実現するPLC-AWシリーズを開発中である。今後、モデム装置本体の性能向上のみならず信号結合技術の向上、ネットワーク管理技術を含め、PLC技術をアクセス系ネットワークシステムとして確立した技術とし、グローバルに展開させるため、新たな開発を推進していく所存である。

参 考 文 献

- (1) Bahai, A. R. : Multi-Carrier Digital Communications : Theory and Applications of OFDM, Plenum Publishing Corporation (1999-12)
- (2) Ott, H. W. : Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, New York, John Wiley & Sons (1976)
- (3) Kumar, V. : IP Telephony H.323 : Architecture for unified network, J. Wiely (2001-4)



高速電力線通信ネットワーク マネジメントシステム

秋富利伸* 津高新一郎***
杉本 賢* 寺内弘典†
中田秀男**

High Speed PLC Network Management System

Toshinobu Akitomi, Satoshi Sugimoto, Hideo Nakata, Shinichiro Tsudaka, Hironori Terauchi

要 旨

電力線を通信線として利用するアクセス系の高速の電力線通信(Power Line Communication: PLC)ネットワークシステムにおいて、PLC装置の初期設定・保守運用、及び装置監視・通信路状態監視を行うネットワークマネジメントシステム(Network Element Operation System: NE-OpS)について紹介する。

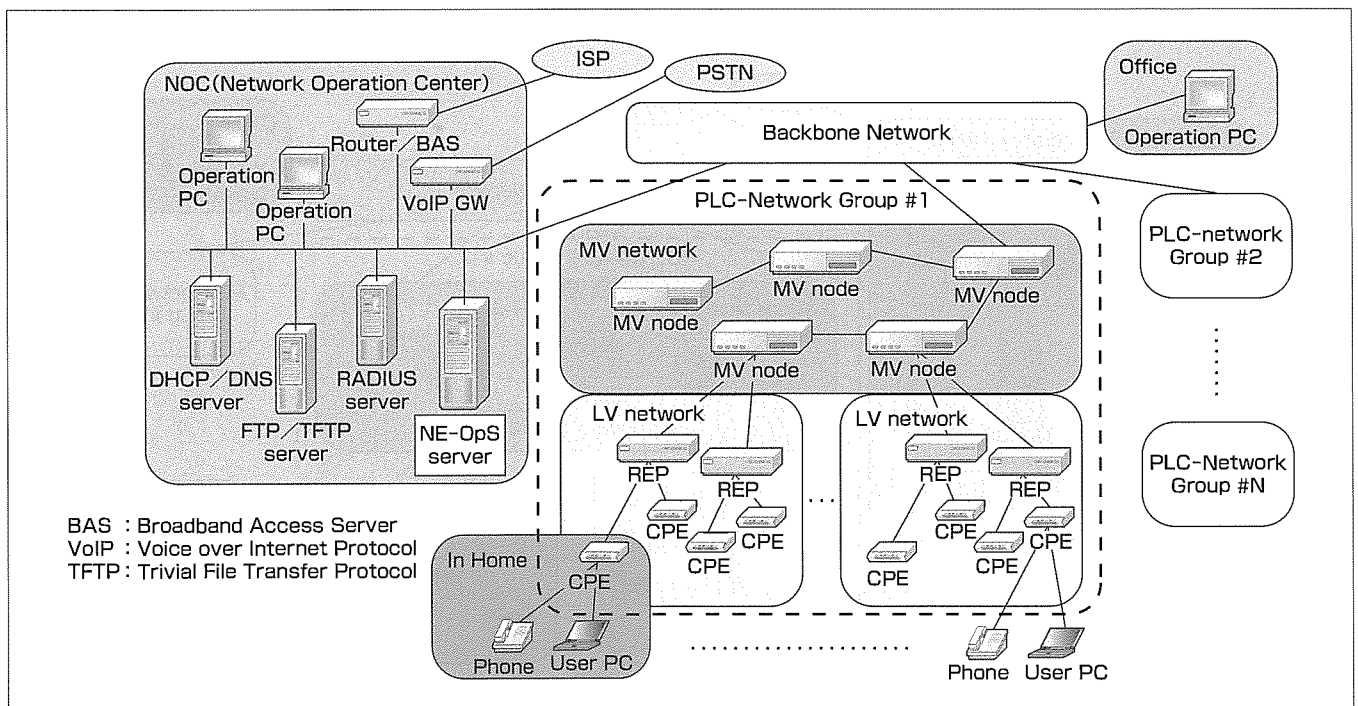
アクセス系高速PLCネットワークは、既存の低圧(Low Voltage: LV)・中圧(Medium Voltage: MV)電力線を用いてアクセス網を提供し、ユーザーのパソコンやアナログ電話を収容してバックボーンネットワーク経由でISP(Internet Service Provider)や公衆電話網(Public Switched Telephone Networks: PSTN)に接続するサービスを提供する。高速PLC装置は、電力線を使用するという性格上、変電所内やメータボックス等で既存電力線へ接続するため、電力会社による電力設備担当者により設置工事が実施される。このときのPLC装置のネットワーク設定は現場では困難であり、ネットワーク管理センターからの

リモート設定・管理が不可欠である。さらに、数量が多いため、設置の容易化・設定作業の効率化が求められている。また、高速PLC独特の物理伝送特性の変動監視や、電力システムでの負荷切換えに対するネットワーク再構成への対応、高速PLC装置自体による自動設定機能(プラグアンドプレイ)も不可欠である。

これらの要求にこたえるため、高速PLC機器を管理するアクセス系高速PLCネットワークマネジメントシステム(NE-OpSサーバ)を開発した。

本稿では、物理速度45Mbpsを実現する高速PLC装置“PLC-AMシリーズ”用NE-OpSサーバの各種機能と、新機種である物理速度200Mbpsを実現する高速PLC装置“PLC-AWシリーズ”に対応したNE-OpSについて紹介する。

三菱電機は、NE-OpSを開発することより、高速PLC装置の供給だけにとどまらず、高速PLCネットワーク設計から客先での工事・保守・運用管理作業まで含めたトータルネットワークシステムを提供していく。



アクセス系高速PLCネットワークシステム構成

アクセス系高速PLCネットワークは、MVノード装置、REP(REPeater)装置、CPE(Customer Premises Equipment)装置の3種類で電力線を使った通信ネットワークを構成する。NE-OpSサーバは、SNMP(Simple Network Management Protocol)を用いて各高速PLC装置のネットワーク機器管理を行う。

1. ま え が き

アクセス系高速PLCネットワークは、既存の低圧・中圧電力線を用いてアクセス網を提供し、ユーザーのパソコンやアナログ電話を収容してバックボーンネットワーク経由でISPや公衆電話網に接続するサービスを提供する。

高速PLC装置は、市場展開中の物理速度45Mbpsを実現するPLC-AMシリーズと、新規開発中の物理速度200Mbpsを実現するPLC-AWシリーズがある。

高速PLC装置は、電力線を使用するという性格上、MVノード装置、REP装置を変電所内やメータボックス等で既存電力線へ接続する。このため、電力会社による電力設備担当者により設置工事が実施される。このときのPLC装置のネットワーク設定は現場では困難であり、遠隔であるネットワーク管理センターからのリモート管理・保守が不可欠である。さらに、数量が多いため、設置の容易化・設定作業の効率化が求められている。

また、一般的な異常監視や通信統計情報の収集機能などのネットワーク保守運用のほかに、高速PLC独特の物理伝送特性の変動監視や、電力系統での負荷切換えに対するネットワーク再構成への対応、高速PLC装置自体の自動設定機能(プラグアンドプレイ)も不可欠である。

これらの要求にこたえるため、PLC-AMシリーズの高速PLC機器を管理するNE-OpSを開発した。

本稿では、PLC-AMシリーズ向け高速PLC装置に対応したNE-OpSの各種機能と、新機種であるPLC-AWシリーズ対応のNE-OpSについて述べる。

2. システム概要

2.1 アクセス系高速PLCネットワークシステム

図1に高速PLCネットワークのシステム構成を示す。高速PLCネットワークは、エンドユーザーの宅内に設置したCPEにより、パソコン及びアナログ電話機を収容し、高速PLCネットワークを介して、バックボーンネットワークに接続される。バックボーンネットワークは、Gateway(GW)を介してISPや公衆電話網と接続し、ユーザーに対してインターネット接続サービスとIP(Internet Protocol)電話サービスを提供する。ネットワーク管理に用いるマネジメントチャンネルも同一ネットワークを用いるため、PLCネットワークからバックボーンを介してNE-OpSなど各種機器を設置するNOC(Network Operation Center)に接続される。

NE-OpSは、NOC内に設置しネットワークの保守運用管理のために、各種高速PLC装置をリモート管理する。汎用ネットワーク機器向けのNMS(Network Management System)としてはOpenView^(注1)を用い、MVノード・REP・CPEの高速PLC装置の管理は、これに特化した保守運用管理機能をパッケージで提供している。

また、NE-OpSは、高速PLC装置の設定・運用に不可欠なDHCP(Dynamic Host Configuration Protocol)サーバ、FTP(File Transfer Protocol)サーバ、RADIUS(Remote Authentication Dial-In User Service)認証サーバとも連

(注1) OpenViewは、ヒューレットパッカード社の商標である。

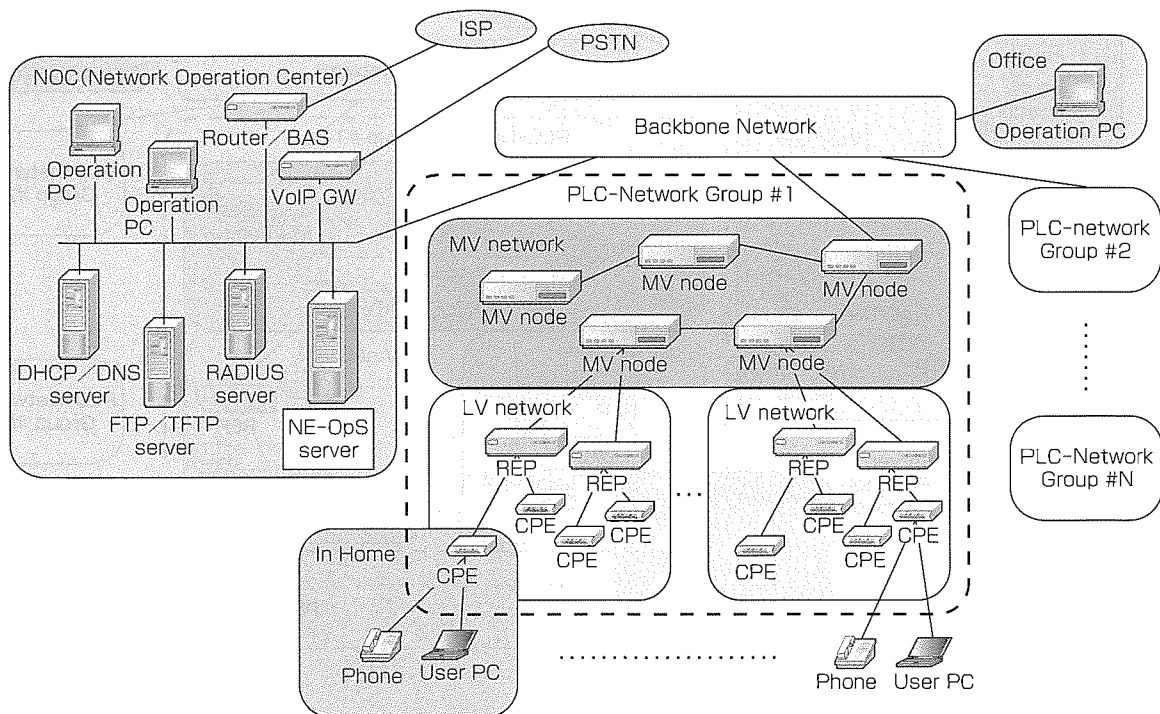


図1. アクセス系高速PLCネットワークのシステム構成

携し、各種の設定自動化(プラグアンドプレイ)機能をサポートする。

2.2 NE-OpSサーバ

図2に、PLC-AMシリーズ用ネットワークマネジメントシステム(NE-OpSサーバ)のソフトウェア構成を示す。

NE-OpSサーバは、Windows^(注2)パソコンで動作し、OpenViewとPLC-MIB Toolサーバとクライアントから構成されるクライアント/サーバシステムである。高速PLC装置とはSNMPで通信する。また、OpenView上からPLC-MIB Tool画面の起動もサポートしている。管理対象のユーザー数(CPE数)は2,000台規模である。

2.3 NE-OpSサーバの機能

表1にNE-OpSサーバのPLC装置対象の機能概要を示す。

2.3.1 装置構成管理機能

MVノード、REP、CPEの登録、削除、機器の各種設定を行う。図3にメイン画面の例を示す。高速PLCネットワークは、MVノード以下がツリー構造となる特徴的なトポロジーであり、ツリー構造を画面に表示するようにした。

高速PLC装置の設定には、PLCの機種・使用周波数帯域(リンク)・AGC(Automatic Gain Control)パラメータ・VLAN(Virtual LAN)等の情報がある。また、付加的な設備情報として設置場所・エンドユーザー情報などを設定できる。

2.3.2 障害管理機能

高速PLC装置の障害監視は、宅内に設置されるCPE以外のMVノードとREPを定周期ポーリングにより監視する。PLC-AMシリーズは、物理速度が45Mbpsのためイーサネットよりも伝送速度が低く、極力ネットワーク負荷をかけないようにポーリング間隔を最低1秒とし、監視対象をMVノードとREPに絞ることで商用の帯域を圧迫せず、アクセス系ネットワークの運用に最低必要な設備を障害監視できるようにしている。障害監視で検出された異常発生と復旧は、異常履歴で画面表示するとともにログとして蓄積できる。また、高速PLC装置の設置工事後、運用を開始していない場合は、NE-OpSから設定で監視対象外にできる。

2.3.3 パフォーマンス管理機能

個々の高速PLC装置の通信バイト数・エラーパケット数等の収集・グラフ表示ができる。PLC-AMシリーズは上り18Mbps、下り27Mbpsの帯域を使うため、通信量統計情報も上りと下りで別々に監視し、併せて送信レベル/受信レベル(TxGain/RxGain)等のPLC物理層の情報も収集できる。また、収集データをExcel上でグラフ表示できるツールも提供している。

また、SNR(Signal to Noise Ratio)、CFR(Channel Frequency Response)、BPC(Bit per Carrier)という高速PLCネットワークに特有の物理伝送特性の情報を定周期に収集し、グラフ表示できる。図4にSNR/CFR/BPCグラフ表示画面を示す。

(注2) Windowsは、米国Microsoft Corp.の米国及びその他の国における商標又は登録商標である。

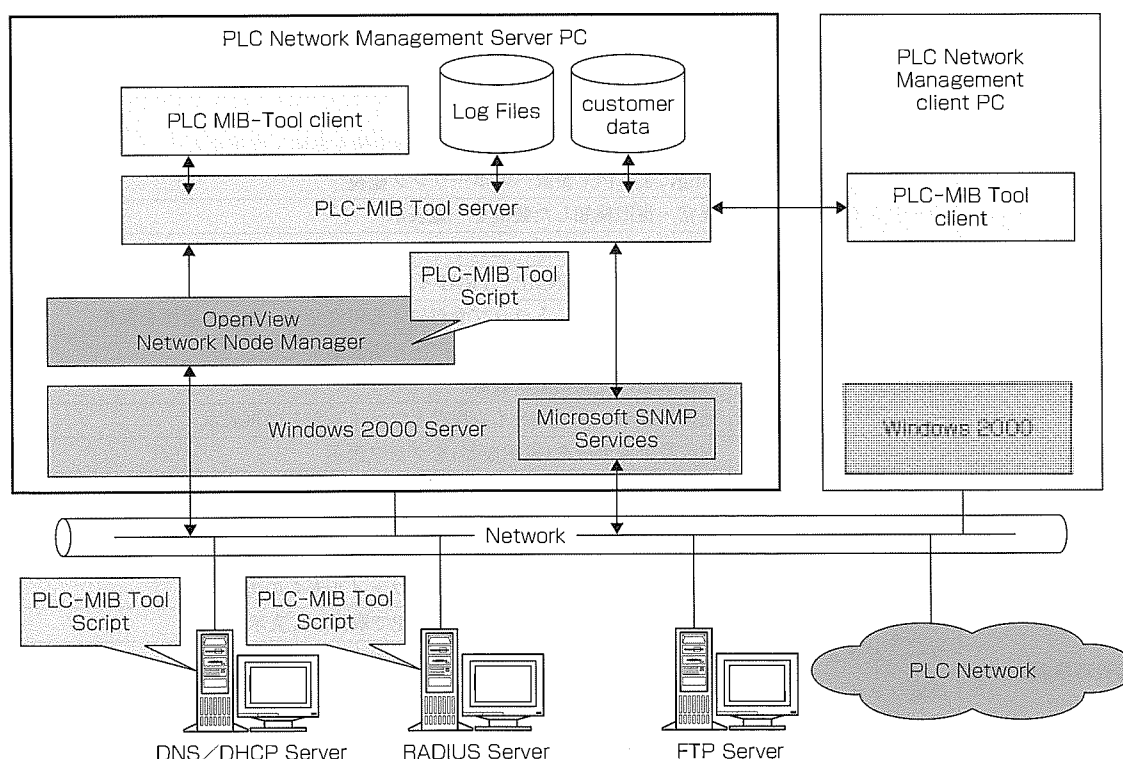


図2. PLC-AMシリーズ用高速PLCネットワークマネジメントシステム

2.3.4 設備管理機能

ファームウェアダウンロード、設定ファイルダウンロード及びアップロード、ファームウェアバージョン表示等をNE-OpSサーバから実行でき、NOCからのリモートでの設備管理が可能である。

2.3.5 オペレータ管理機能

NE-OpSサーバへのアクセスは、オペレータの作業内容に準じて、権限のレベル分けができる。通常、ユーザー権限は状態参照のみであり、機器の登録・設定作業はアドミニストレータ権限でないと実行できない。

3. NE-OpSの課題と対策

3.1 設置容易化—アドレス設定

高速PLC装置のうち、MVノードとREPは、リモート管理用にIPアドレスが必要である。設置時に固定IPアドレスを設定する方式は、設置現場でパソコンを使った作業が発生する。これを避けるため、DHCPサーバからIPアドレスを動的に割り当てる構成とした。しかし、IPアドレスが不

定ではNE-OpSサーバから監視できないため、MAC(Media Access Control)アドレスとホスト名をNE-OpSサーバからDHCPサーバへ登録する機能を持たせた。さらに、DynamicDNS(Domain Name System)機能を持つDNSサーバを設置することで、オペレータからはホスト名でPLC装置を管理できるようにした。DHCPサーバにはNE-OpSと連携して高速PLC装置を個別に登録するスクリプトを実装している。

3.2 機器認証とプラグアンドプレイ

高速PLC装置は、高速PLCネットワークへの接続時に、新規接続装置を自動検出する。この際に、登録された正規の装置かどうか、ネットワークへの参入可否をRADIUS認証によって制御するとともに、設定情報(プロファイル)を指定し、高速PLC装置の自動設定(プラグアンドプレイ)を可能にしている。RADIUSサーバへの設定は煩雑な作業を伴うので、NE-OpSは、DHCPサーバ連携とともに、RADIUSサーバにも高速PLC装置の登録情報を設定し、各サーバへの設定作業を軽減している。

表1. PLC-AMシリーズ用高速PLC NE-OpS機能概要

機能	概要	
装置構成管理	MV/Repeater登録	登録追加・削除
		登録情報の参照・変更
		装置登録の履歴保存
	CPE登録	登録追加・削除
		登録情報の参照・変更
		CPE自動検出(Auto-learning)により接続されたCPE情報を取得して登録追加
		CPE接続先上位装置の変更
	IPアドレス解決	DHCPサーバへの装置情報登録
		DHCP/DNSサーバ連携によるIPアドレス解決
	RADIUS認証情報登録	MV/Repeater情報登録
CPE情報登録		
装置設定	SNMPによりQoS, VLANなどの認定値を参照・変更する	
障害管理	ポーリング監視	pingによるPLC装置へのポーリング監視
		異常・復旧検知した装置を一覧表示
		現在異常状態の装置一覧表示
トラップ受信	PLC装置からのSNMP-TRAPイベントを受信・画面表示	
障害履歴	ポーリング監視, トラップ受信による障害発生・復旧の履歴を保存	
パフォーマンス管理	通信状態モニタ	通信モード, 物理速度の上り/下り別表示
		通信状態の定周期更新表示
		通信状態データのファイル保存とファイルからの再表示
	周波数帯域データ グラフ表示	周波数帯域データ(SNRなど)をグラフ表示
		周波数帯域データを定周期収集でグラフ表示 収集したデータのファイル保存とファイルからの再表示
トラフィック 統計情報	送受信オクテット数などの統計情報を収集, 時系列でグラフ表示 収集したデータのファイル保存とファイルからの再表示	
設備管理機能	バージョン表示	PLC装置のバージョン情報をSNMPで取得して表示
	ファームウェア更新	PLC装置のファームウェア更新を指示する
	設定ファイルのダウンロード/アップロード	PLC装置の設定ファイルをFTPサーバからダウンロード/アップロードする
オペレータ管理	アカウント管理	アカウント・パスワードによるログイン制限
	操作制限	アカウント権限により, 登録・設定の変更操作を制限する

3.3 トロポジー表現

高速PLC装置は、MVノードはリング状に接続可能だが、MVノード以下REP装置とCPE装置がツリー状に接続される特徴的なトロポジーである。そのため、NE-OpSでは、ツリー状の接続形式を容易に表現できるディレクトリ構造表示を採用した。MVノードはリング状に接続されるので隣接関係を接続情報を基に隣接に並べて表示できるようにした。また、MVノードとREP間、REPとCPE間の通信状況など、ノード間情報を2つの機器から収集して表示する機能や、ツリー構造に則してMVノード以下のREP、CPEの情報収集を一括処理する機能など、高速PLCの特徴的なトロポジーに対応した機能を提供している。

4. PLC-AWシリーズ対応開発

次期高速PLC装置である200Mbps版のPLC-AWシリーズに対応したネットワーク管理システム(200M-NE-OpS)を開発中である。200M-NE-OpSは以下の新しい特長を持つ予定である。

4.1 管理対象機器・規模の拡大

PLC-AMシリーズ用に加えて、PLC-AWシリーズの装置(MVノード、REP、CPE)を管理可能なシステムとする。PLC-AWシリーズで拡張されたMIBに対応し、装置の接続形態(トロポジー)についても柔軟に対応できる仕様とする。また、管理可能な装置数をこれまでの2,000台程度から1万台以上の規模を1台のサーバで管理可能とする。

4.2 Webベースのアーキテクチャ

PLC-AMシリーズ向けNE-OpSはクライアント/サーバで動作するアプリケーションであったが、200M-NE-

OpSでは、画面及びその遷移、データベース、種々のロジックを内包するアプリケーションサーバと、クライアントパソコンから構成される。アプリケーションサーバが提供する画面をクライアントパソコンのブラウザで閲覧し、監視・操作可能とする。これにより、クライアントパソコンでのインストール作業を不要にし、機能向上時のメンテナンスをサーバのみに限定するとともに、クライアントとサーバとの負荷分散を実現し、クライアント台数の増加に対する柔軟な対応を可能にする。

4.3 Java技術の採用

200M-NE-OpSではJava^(注3)を採用し、システムのプラットフォーム依存性を低くするとともに、他のJava技術との連携を容易にする。開発フレームワークとして、画面とその遷移の設計にはStrutsを用い、種々のロジックの実装には当社開発のDiaSynapse^(注4)を用いる。これらJavaを基盤とするフレームワークの導入によって、ソフトウェアのモジュール化とModel-View-Controlの分離が容易となり、開発・保守作業を容易にするるとともに拡張性に富むシステムの構築が容易となる。

4.4 DBMSの導入

200M-NE-OpSではDBMS(DataBase Management System)を新規に導入し、より堅牢(けんろう)かつスケラブルなシステムを構築する。具体的には、Oracle^(注5)に代表される商用DBMSや、MySQL^(注6)に代表されるオープンソースのDBMSを視野に入れ、API(Application Program Interface)としてJDBC^(注3)(Java DataBase Connectivity)を利用することによって、DBMSの変更に柔軟に対応可能とする。

4.5 論理ネットワークトロポジーのグラフィックス表示

エクスプローラ風のツリー表示に加えて、論理ネットワークトロポジーの表示を可能にし、ノードをクリックして各機器の詳細情報を得たり、異常を検出したノードの色を変えて表示したりといったことを可能にする。欧州では電力系統にループ系統が多く、常時1箇所開放したオープンループで電力経路を運用しており、必要時に線路・負荷の切り換えが行われる。200M-NE-OpSでは、このトロポジー変化を検出し、グラフィックス表示する機能を開発予定である。

4.6 GIS連携

論理ネットワークトロポジーのグラフィックス表示から更に進んで、地データ上の実際の位置に機器や配電線を表示し、各種表示や機器のオペレーションを行うことを可能

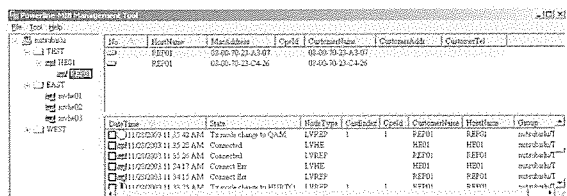


図3. メイン画面例

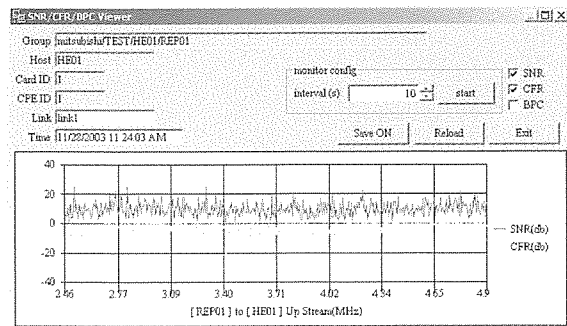


図4. SNR/CFR/BPCグラフ表示画面例

(注3) Java及びJDBCその他のJavaを含む商標は、米国Sun Microsystem, Inc.の商標である。

(注4) DiaSynapseは、三菱電機(株)の登録商標である。

(注5) Oracleは、米国Oracle Corp.の登録商標である。

(注6) MySQLは、スウェーデンMySQL AB社の商標である。

にする。GIS(Geographic Information System)エンジンとしては、当社のPreSerV^(注7)(4)を使用し、ストレスのない高速描画を実現する。表示例を図5に示す。

4.7 障害管理機能の強化

MIB操作による設定・情報収集機能を中心に機能開発したが、200M-NE-OpSでは、客先でのPLC装置の設置容易化、保守・運用の容易化を図るため、設定ファイルの編集機能や、納品用の電子化された機器リストを使った機器一括登録機能、高速PLC装置のオートコンフィギュレーション機能に連動した論理ネットワークポロジ情報の自動収集・表示機能などを実現する。

5. む す び

アクセス系高速PLCネットワークは、現在、欧州電力会社を中心にインフラ整備が進んでおり、当社も、PLC-AMシリーズの市場投入とともに、PLC-AWシリーズの開発を進めている。

これらの高速PLC装置は、市場規模の拡大につれ、設置容易化とともに保守・運用の容易化によるコストダウンと、ネットワーク信頼性確保・通信品質の性能確保が重要となる。

これらの実現のためには、高速PLCネットワークマネジメントシステムでの、きめ細かい保守・運用管理機能の提供が重要になってくる。当社は、NE-OpSを開発するこ

(注7) PerSerVは、三菱電機(株)の登録商標である。

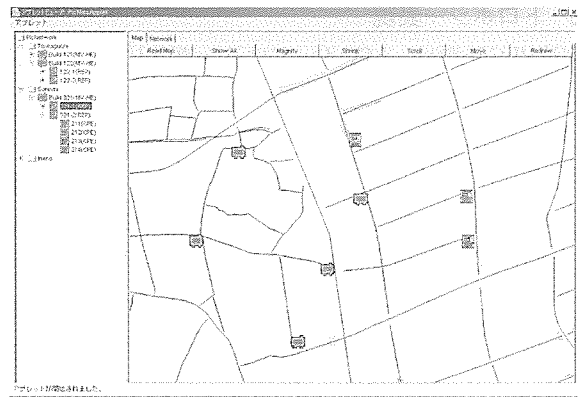


図5. GIS連携イメージ

とより、高速PLC装置の供給だけにとどまらず、高速PLCネットワーク設計から客先での工事・保守・運用管理作業まで含めたトータルネットワークシステムを提供していく予定である。

参考文献

- (1) Miller, M. A. 著, トップスタジオ訳: SNMPインターネットネットワーク管理, 翔泳社 (1998-10)
- (2) 石原 鑑, ほかに: インターネット応用監視制御フレームワーク“DiaSynapse/JAXSON”, 三菱電機技報, 76, No.9, 604~608 (2002)
- (3) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/pre-serv/>

高速電力線通信に必要な電力システム技術

下村哲朗*
岡本 弘*
久山和宏*

Power System Technology for High Speed Power Line Communication System

Tetsuro Shimomura, Hiromu Okamoto, Kazuhiro Kuyama

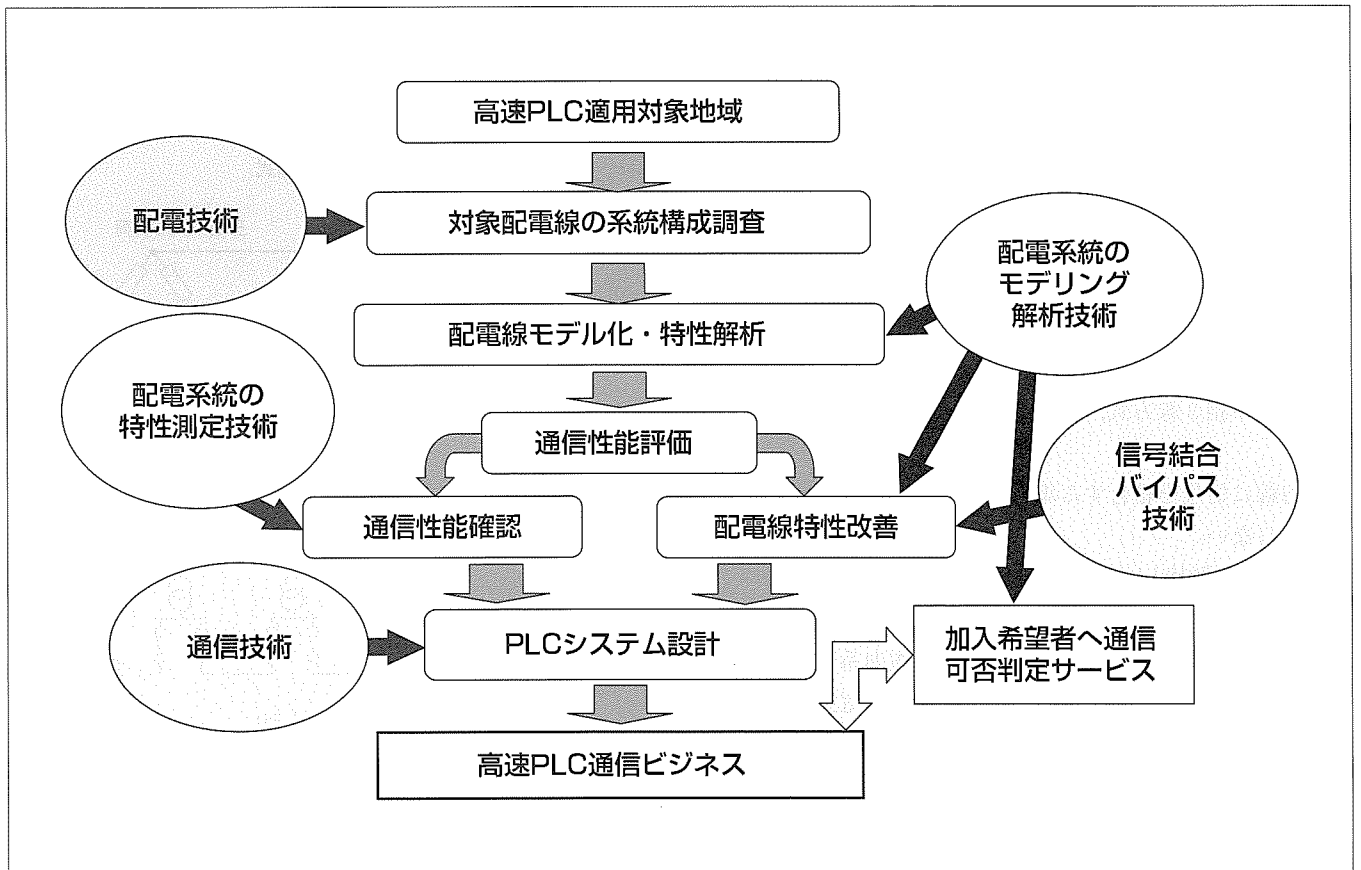
要 旨

高速の電力線通信 (Power Line Communication : PLC) システムは既設の電力線を通信媒体として利用するため、電力システムに関する技術と通信技術の統合が必要である。電力線は本来50Hz又は60Hzの周波数の交流電力を送電するために敷設されているものである。電力システムを構成する設備は商用周波数領域では一般的にインダクタンス、キャパシタンスなど集中定数の回路で表現され、送電電力、電圧を交流回路として計算する。一方、高速PLCで対象としている2~30MHzの周波数領域では線路は分布定数回路として表現され、反射、透過現象で特性が評価される。

商用周波数領域の送電には問題のない系統構成でも、高周波領域では減衰が大きくなり、通信線として不向きな場

合がある。したがって、高速PLCで対象とする周波数領域に対して線路の特性を把握し、通信線としての適合性を評価することが肝要である。

また、電力システムでは系統事故に対する保護動作、事故除去後の復旧操作、又は系統の成長、負荷の変化に対応した系統構成切換え操作が行われ、系統の構成が変化する場合がある。通信線としてとらえたとき、通信ネットワークが外的要因で変化し、通信経路が変更されることを意味する。高速PLCは主に配電線を利用することから、三菱電機では“配電線の通信線化技術”と位置付けて、特性測定、配電線・配電機器のモデル化、系統解析技術などの技術開発を行っている。



配電線を通信線として利用する技術

高速PLCは配電線を利用するため、配電線の構成等に対して2~30MHzの周波数領域の伝送特性を把握し、通信線として十分な性能がでる技術開発が必要である。この図は、電力システム技術の観点から、配電システムの解析技術など高速PLCシステム開発に必要な技術課題を示している。

1. ま え が き

高速PLCでは、本来電力を送電する配電線を通信線として利用するための技術開発が重要である。

ここでは、主に電力系統の特徴、配電線を通信線化するためのPLC技術開発項目について概要を述べる。

2. 電力系統の特徴とPLC技術課題

2.1 系統電圧

電力系統では、系統運用上、電力輸送量に対応して複数の電圧を使い分けている。その中で、高速PLCは、配電分野である11, 22kVの中圧(日本では6.6~22kVの高圧、特別高圧相当)と200/400Vの低圧(日本は100/200V)の2階級を対象としている。

(1) 中圧(Middle Voltage : MV)配電線

国によって異なり、6.6, 10, 11, 17, 20, 22, 33kVと各種存在する。日本は6.6kVが主流である。信号結合装置のように電圧充電部近傍に設置する装置では、電圧区分に対応した電気絶縁強度の配慮等配電線の定格値の考慮が必要になる。

(2) 低圧(Low Voltage : LV)配電線

低圧配電線は100/200V級と200/400V級に大別される。日本は100/200Vを採用しているが、各国で若干値が異なり、110/220V, 115/230V, 120/240V, 127/220V等の分類がある。

200/400V級も220/380V, 230/400V, 240/415V等の分類がある。欧州各国は大陸系の220/380V方式と英国を中心とした240/415Vに大別されているが、IEC-60038の公称電圧の統一規格である230/400Vへの移行を進めている。

低圧は、電圧の違いのほかに、配電方式の違いがある。

図1に単相3線方式、三相3線式、三相4線式の例を示す。

電力線に信号を結合する場合にこの方式の違いを考慮せねばならない。

2.2 系統の形状(トポロジー)

電力系統では、電力供給停止を極力減らす観点から、複数経路による供給が望ましい。一方で、電力系統に複数の供給経路があるとき、各々の経路を通過する電力は、経路のインピーダンスの逆数に比例して決まり、電力通過量を自由に制御することができない。このため、特定の経路の通過電力が過大になり、線路の送電容量超過を引き起こす場合がある。

したがって、常時は単一の経路で電力を供給し、必要に応じて開閉器の開閉によって経路を切り換えることが多い。

欧州では、図2に示すように、ループ構成であるが常時は1か所開放したオープンループ系統が多く採用されてい

る。このほかに、ネットワーク方式、本予備方式、分割連系方式など様々な方式が考えられている。

2.3 系統接続の変更と障害迂回(うかい)

系統の接続状況は電力系統運用上の必要性から変更される。通信ネットワークとしての観点からは、前触れなしに高速PLCの通信経路が変更されることを意味する。

系統に事故が発生した場合の系統の例を説明する。

系統には高い電圧が印加されているため、地絡事故が発生すると図3(a)のように電源から大きな事故電流が流れる。この事故電流を変電所の保護リレーで検出し、事故線路を判定して、変電所遮断器①を開放する。これによって事故電流が遮断される。

配電線が架空線の場合、遮断器操作によって事故電流を遮断すると空気による絶縁が回復することが多いので、遮

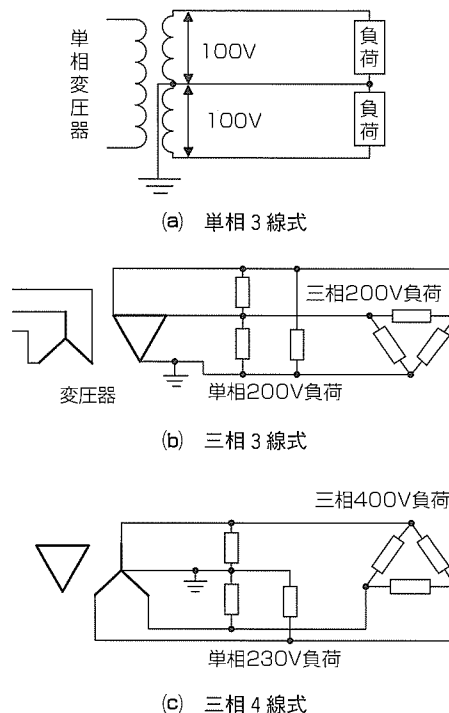


図1. 低圧配電方式

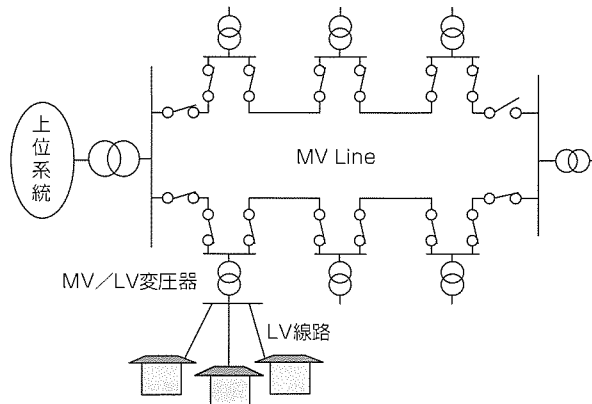


図2. オープンループ系統

断器を閉路して再送電を行うのが基本である。配電線が地中ケーブルの場合、事故部分の絶縁が回復しないので事故区間の両端の開閉器②、③を開放して事故区間を配電系統

から切り離し、遮断器①を閉じる。開閉器②、③の開放によって③の右側の区間の負荷は配電系統から切り離された状態になるので、開閉器④を閉じることによって図の上部の線路から電力を供給する。

電力系統は、事故時以外でも、負荷の増減又は系統の工事等に対応して負荷に供給する線路を変更する場合がある。このような操作によって、通信線としての接続状態が変更になる場合がある。したがって、PLCシステムで通信経路としての障害検出を行い自動迂回をする機能が必要になる。

2.4 配電系統構成とPLC設置環境

配電系統は本来電力供給のための設備であるから、PLCモデム及び信号結合装置設置時に、高電圧の作業を伴う場合がある。また、温度条件などの設置環境は配電系統の構成(配電線の線種、変圧器種別)に依存する。

配電線の線種として、地中ケーブル及び架空配電線がある。また変圧器も、柱上変圧器、地上置きで密閉形のパッドマウント変圧器、及び室内設置の変圧器がある。上記の条件の組合せ例を表1に示す。

(1) MV, LVともに地中埋設ケーブルの場合

MV/LV変圧器が屋内又は地下室に設置されている場合は、MVノード及び信号結合装置の設置スペースは比較的確保しやすい。しかし、変圧器が屋外設置の場合、MVノード及び信号結合装置の設置スペースが別途必要になる。

(2) MV, LVともに架空配電線の場合

MV/LV変圧器は電柱上に設置される。MVノード及び信号結合装置は変圧器の近傍に設置されるため、屋外設置用の設計になる。また、高圧の配電線の近傍に設置されるため、安全性への配慮、設置の容易化の検討が必要である。

(3) MVは架空配電線と地中埋設ケーブルの混在で、LVは架空配電線の場合

住宅地近傍までMV架空配電線で配電し、電柱からMVケーブルを引き出し住宅近くの変圧器まで地下埋設で供給する。変圧器は住宅地内に設置されるため、密閉型のパッドマウント変圧器を採用している。変圧器を収納した密閉筐体(きょうたい)のみが地上に置かれ、配電線は地下埋設となっている。MVノード、変圧器内部に設置する信号結

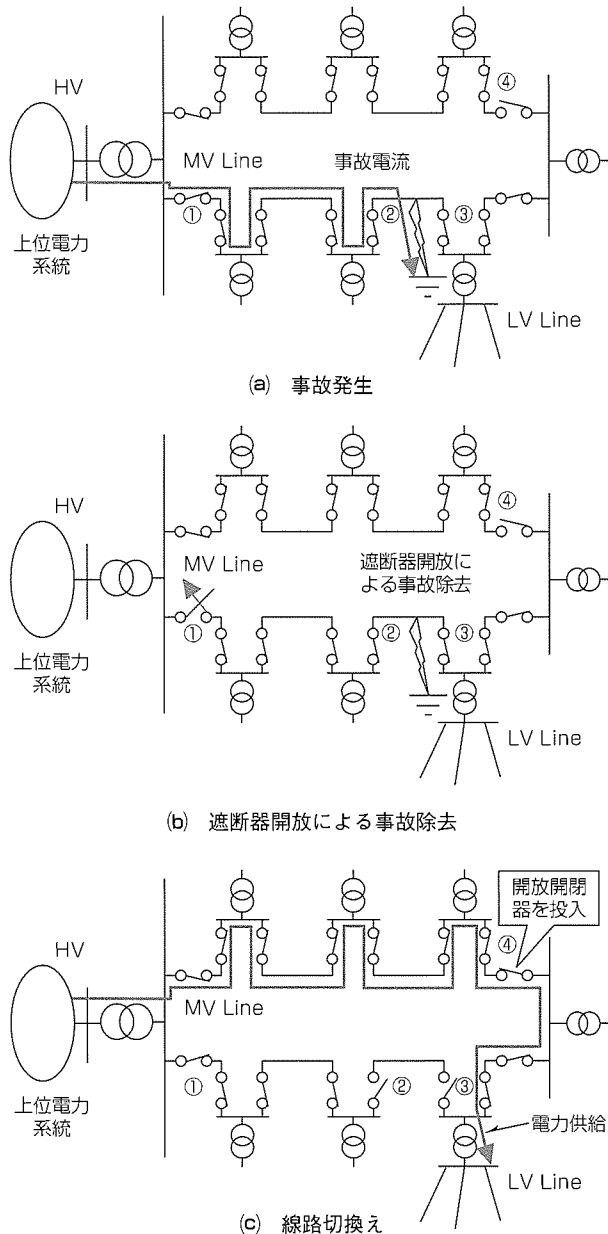


図3. 系統事故対応による系統構成切換え例

表1. MV及びLV線路の組合せ

配電線組合せ	MV線路	変圧器	LV分岐盤	LV線路	地域性
1	ケーブル	屋内変圧器室/地下変圧器室	屋内バスバー	ケーブル	欧州都市部 アジア
2	ケーブル	屋外変圧器	屋内バスバー/ 自立屋外盤内バスバー	ケーブル	欧州地方都市
3	架空線	柱上変圧器	分岐接続	架空線	米国, 南米 日本
4	架空線+ ケーブル	地上用(パッドマウント)変圧器	地中ジャンクションボックス	ケーブル	米国

合装置の設置スペースの確保が課題となる。

3. 電力線への信号結合技術

3.1 信号結合技術の必要性

高速PLCの高周波信号を電力線に重畳する装置を結合装置(Coupling Unit)と言う。図4に示すように宅内のCPE(Customer Premises Equipment: 宅内モデム)では電灯線から電力の供給を受けるだけでなく、情報コンセントとして、信号結合装置を介して電力線を利用して送受信する。この構成により、宅内のPLCモデムをコンセントに差し込むだけで通信が可能になる。

3.2 信号結合方式

モデムの信号を電力線に重畳するには、大別して、静電結合(Capacitive Coupling)方式と電磁結合(Inductive Coupling)方式がある。図5に基本概念を示す。

(1) 静電結合方式

モデムの出力をトランスと数千pF程度のキャパシタを介して電力線に結合する。商用周波数に対してはキャパシタのインピーダンスが高いため、商用周波数電圧はキャパシタで分担する。2MHz以上の高周波ではキャパシタのインピーダンスは低くなるため、モデムはキャパシタを介して信号の授受を行う。充電部に直接接触するため、特に

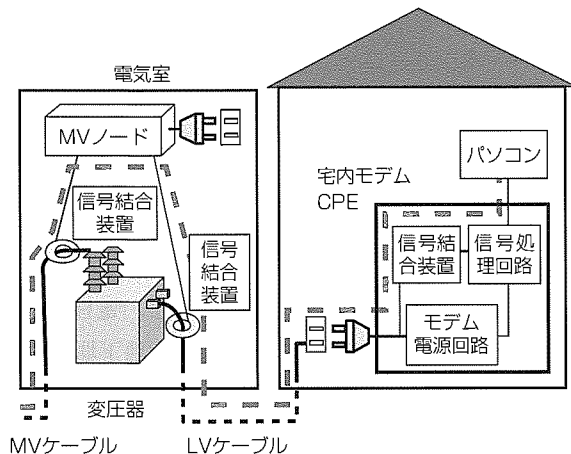


図4. 信号結合方式

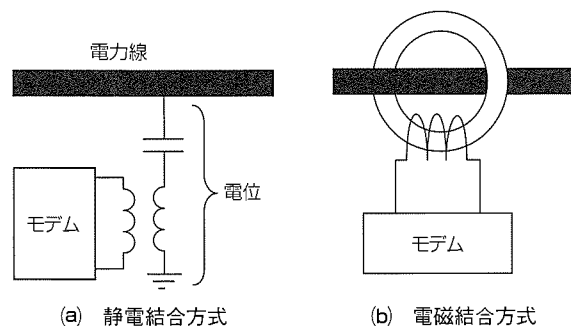


図5. 信号結合原理

中圧配電線に適用する場合には絶縁基準を満足せねばならない。

(2) 電磁結合方式

変流器(Current Transformer: CT)と同様の原理でコアを介して電磁誘導で信号を授受する。シールドケーブルに対してコアを分割してクランプ形にすることにより、取付けが容易である。この方式は充電部と非接触である。

通常は導体に商用周波電流が流れるので、商用周波数電流の作る磁界でコアが飽和するとPLC信号を結合できなくなる。定格商用周波数電流における飽和特性を考慮したコア材料の特性、コア形状の検討が必要である。

これらの信号結合方式は、設置環境・設置目的、施工性、耐環境性等を考慮して選定を行う。

当社は、施工性を考慮して電磁結合方式の装置を開発した。

4. 配電線特性把握と配電線のモデル化技術

4.1 配電線の通信性能

既設の配電線を通信線として利用するため、高速PLCの通信は、配電線の2~30MHzの周波数領域の信号伝送特性に影響される。

当社は、世界の各地でフィールド試験に参画し、配電線の特性(信号減衰特性)を測定している。その結果、配電線の材質、配電線の分岐などの構成によって減衰特性が異なることを把握している。

したがって、PLCシステムとして、配電線の特性を把握し通信線としての特性を評価する技術の開発が不可欠である。また、大量のサービス実施段階では、加入希望者の場所に対して通信性能を予測し、提供できるサービスレベルを回答するサービスが必要と考えられる。このためのサービス可否を判定する技術開発が課題となる。この章では配電線の特性把握に関して述べる。

4.2 PLCシステム設計手順

PLCシステム設計の手順を図6に示す。配電線特性の把握のために対象配電線のモデル化・特性解析が不可欠であ

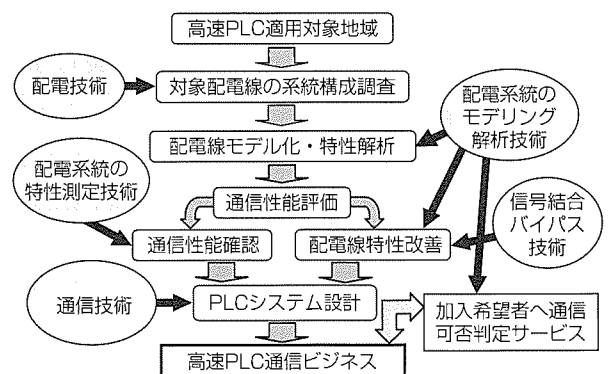


図6. PLCシステム設計手順

る。配電線特性のモデル化には特性測定結果によるモデルの妥当性検証が前提となるため、特性測定技術と解析技術を合わせて概要を述べる。

4.3 配電線特性測定と解析技術開発

高速PLCは2～30MHz帯域の周波数を利用する。対象とする配電線の通信性能を評価するため、この領域における配電線信号減衰の特性解析装置(Broadband Power-line Channel Analyzer)を開発した。この装置は、電力線の信号伝送特性として、信号の減衰、群遅延、位相特性、インパルス応答を測定できる。この装置は制御ケーブルが不要なため、装置の設置・移動が容易であり、距離のある2点間の測定が容易である。また、現地でグラフ出力処理ができるので、作業効率が高い。

図7に測定例を示す。周波数によって減衰の度合いが異なるが、減衰の要因は、電力線の特性インピーダンス、損失特性、分岐線の有無、分岐数、分岐線路長、負荷の有無など系統構成のトポロジーと構成機器の特性に依存する。

上記の装置を用いて、図8に示す22kVケーブル系統の複数のケーブル区間について実測を行った。結果のまとめを図9に示す。横軸にケーブル区間の距離、縦軸に信号の減衰を示す。2本の線は図7のような周波数特性測定結果から5MHz及び10MHzのポイントでの信号減衰量と被測定区間のケーブル長をプロットしたものである。距離に依存して減衰している。しかも周波数によって減衰特性が異

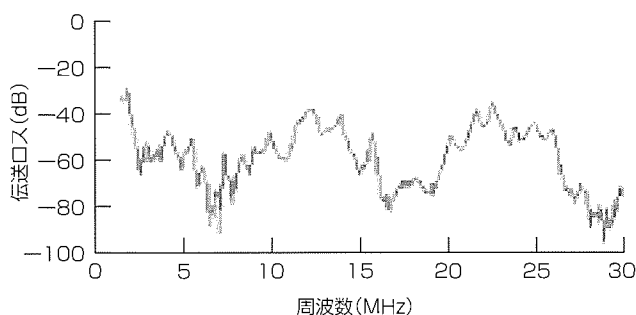


図7. 配電線の信号伝送特性測定例(減衰特性)

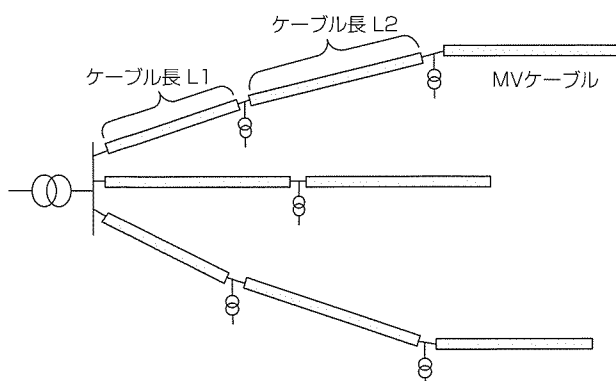


図8. 特性測定ケーブル系統

なり、高い周波数における減衰の程度が大きい。ケーブル系では、距離と周波数に依存した減衰特性があることが分かる。

一方、架空配電線での測定では、周波数依存特性が顕著でないとの結果を得ており、配電線の線種により特性が異なっている。

減衰の要因として、電気抵抗による導体損、導体周りの絶縁皮膜による誘電損、異種の配電線間を伝送する際の特性インピーダンスの違いによる反射損が挙げられる。

高周波領域における電気抵抗の導体損は表皮効果としてモデル化されているが、当社は、誘電損についてもモデル化を行い解析技術を確認した。図10に、当社、模擬配電系統における伝送特性の測定結果と、モデルによる解析結果の比較を示す。

両者はよく一致しており、ケーブルモデルが妥当であることが分かる。

4.4 配電線特性改善技術

配電線、宅内電灯線の特性を測定した結果、信号が著しく減衰して通信できない区間が存在する場合がある。

減衰の著しい低下は、分岐線、配電盤のバスバーにおける特性インピーダンスの不連続、分岐線によるスタブの影

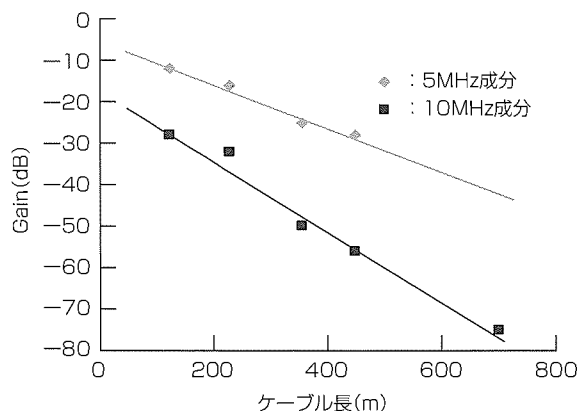


図9. ケーブル系減衰特性の周波数依存性

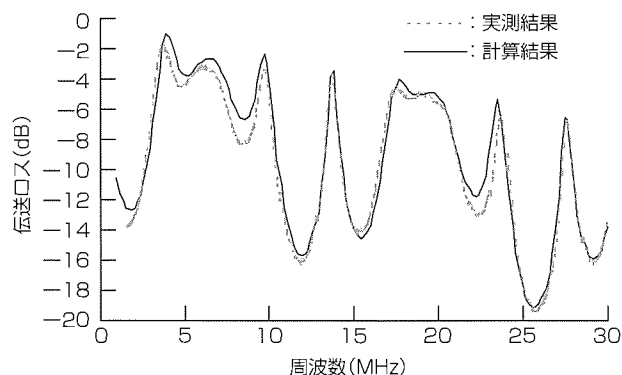


図10. 模擬配電系統における伝送ロスの実測結果と計算結果の比較

響などが原因である。対策として、伝送経路上の減衰が大きい地点に対して信号バイパスする方式が挙げられる。当社は、バスバーを対象に、模擬回路を作成し、解析技術によって性能を設計して、信号バイパス装置を開発した。

5. 高速PLC通信可否判定技術

高速PLCが普及段階に至ると、ADSLのように加入希望者に対して通信の可否を回答するサービスが必要になると考えられる。図11に通信可否判定サービスの概念を示す。

通信可否は通信線である配電系統の特性(減衰特性)に大きく依存するが、問い合わせに対して、すべて現場で直接特性を測定することはできない。したがって、配電系統の、加入希望者と近傍のモデム間の通信特性をシミュレーション等で推定する技術が必要になる。これには前章に述べた配電系統解析技術が基本になる。

図11の配電系統モデルに関する技術は4.3節の考え方が適用できる。しかし、系統解析技術は専用の解析ソフトウェアが必要で、データ作成、モデルの開発、プログラム操作など専門性が高く、だれもが簡単に使える技術ではない。

今回、系統解析技術をベースに、配電系統の各種要素をコンポーネント化し、信号結合位置から信号取出位置までのコンポーネントを組み合わせることによってシミュレーションを行うコンポーネントベースシミュレーション手法を開発した。

6. む す び

高速PLCシステムは、多岐にわたる技術の結集が必要である。本稿では、電力系統の調査結果を踏まえて、配電線通信線化にかかわる技術について概説した。

高速PLCは、これからの普及を目指して、規格化・標準化の動きがあり、当社も参加している。規格化・標準化には、通信を可能にする技術と、電力線を通信線として利用

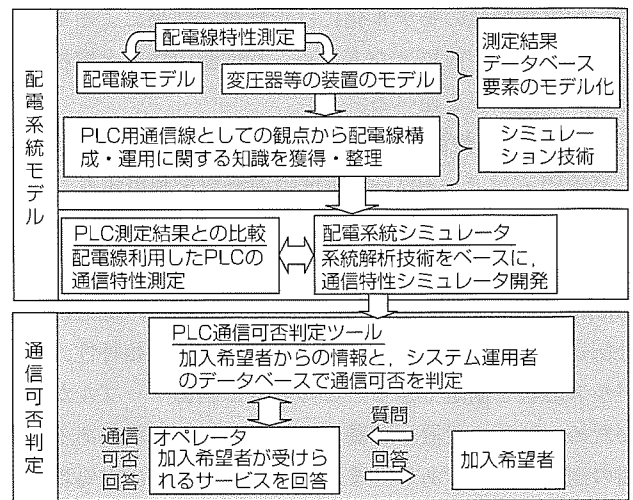


図11. 通信可否判定サービスの概念

する場合に他の無線機器への影響を評価する技術の両面が必要である。当社は、本稿で述べた技術に加えて、EMC技術を保有しており、電波暗室を用いた評価を行うなど、PLC技術の発展に貢献している。

今後、高速PLCが各国に普及するに従い、配電系統の特徴を把握してシステム設計を行うためのトータルネットワークシステムの技術が一層重要性を増すと思われる。

参 考 文 献

- (1) White Paper on Power Line Communications(PLC) and its Impact on the Development of Broad band in Europe, November 25th (2002)
- (2) 20kV級/400V配電方式普及拡大技術, 20kV級/400V配電方式普及拡大技術専門委員会, 電気共同研究, 56, No.3 (2000)
- (3) 配電技術総合マニュアル, オーム社

配電線解析と通信可否判定支援ツール

北山匡史* 田邊信二**
 泉井良夫** 河野良之***
 安部淳一*

Distribution Network Analysis and Service Provisioning Support Tool

Masashi Kitayama, Yoshio Izui, Junichi Abe, Shinji Tanabe, Yoshiyuki Kono

要旨

アクセス系向けの高速の電力線通信 (Power Line Communication : PLC) システムでは、中圧・低圧配電線を通信ネットワークとして用いるが、PLCで用いる周波数帯域における信号伝送特性は考慮されておらず、インピーダンス不整合による反射など伝送特性の劣化が発生する。

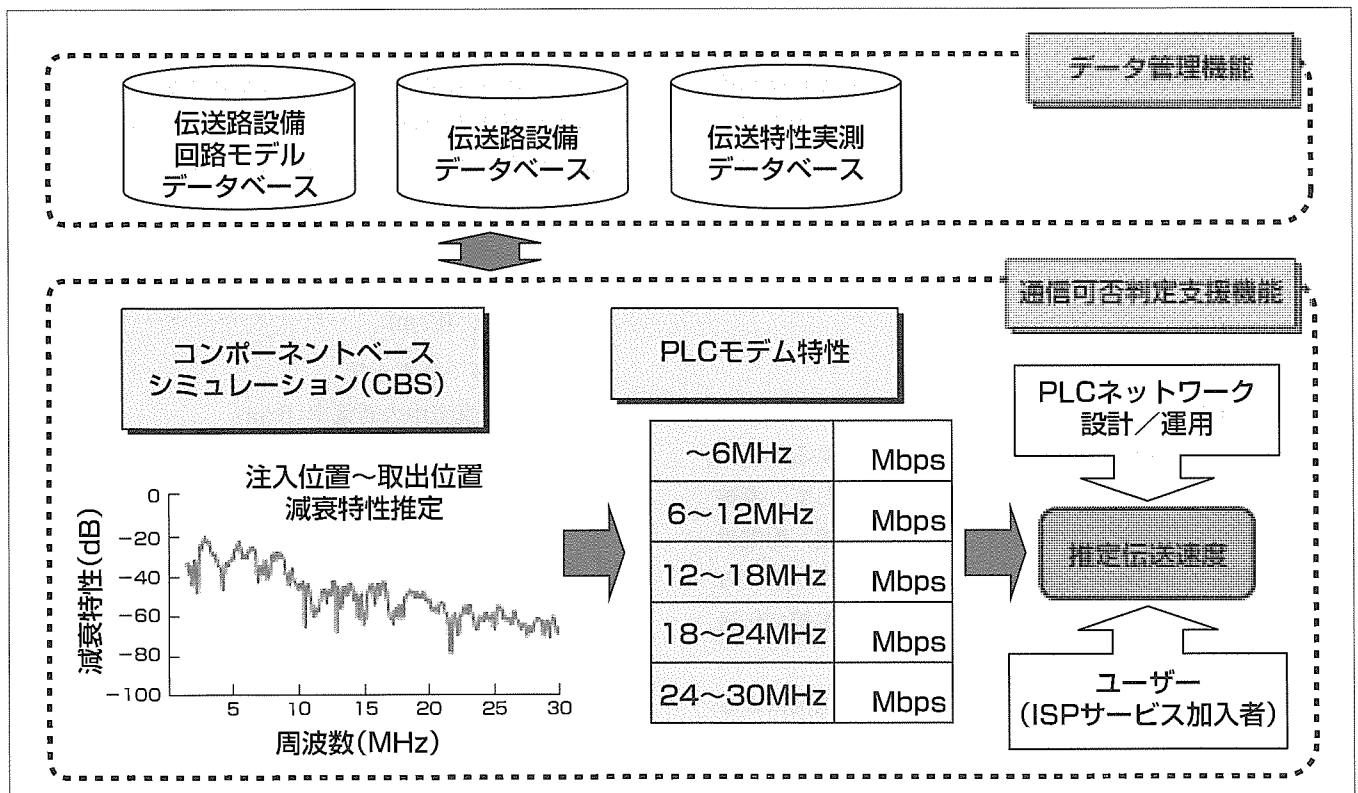
通信の可否をある程度机上で検討することができれば、伝送困難と推定される場所の抽出及び信号中継装置やバイパス装置による対策検討など、PLCネットワークの設計及び運用の支援、また、サービス加入希望者へのサービスレベルの情報提供を実現することが可能となる。このような背景から、筆者らは、PLCシステムの通信可否の推定を行う通信可否判定支援ツールの開発を行っている。

通信可否判定支援ツールは、信号注入位置から信号取出位置までのコンポーネントを組み合わせることでシ

ミュレーションを行うコンポーネントベースシミュレーション (Component-based Simulation : CBS) によって使用する周波数帯域での信号の減衰やジッタ特性のシミュレーションを行い、変復調方式やドライバ・レシーバ特性などを考慮して伝送速度を推定する機能を持っている。

伝送路設備回路モデルは、配電線解析技術をベースとして、配電システムにおけるPLC伝送路回路の等価回路モデルを作成し、配電線のモデル系統又はフィールドでの伝送特性実測値と比較することによってモデル精度の検証を行い、コンポーネントモデルを作成する。

本稿では、配電線解析技術を適用したコンポーネントモデルの作成方法とシミュレーションの考え方、及び通信可否判定支援ツールの機能構成について述べる。



通信可否判定支援ツールの機能構成

通信可否判定支援ツールは、機器又は機器群の回路特性を模擬した伝送路設備回路モデルデータベースと、PLCネットワークの接続状態を格納する伝送路設備データベース及び伝送路の実測値を格納した伝送特性実測データベースを用いて、信号注入位置から信号取出位置までのコンポーネントを組み合わせることでシミュレーションを行うCBSによって使用する周波数帯域での信号の減衰特性のシミュレーションを行い、PLCモデムの動作モードに応じた特性を考慮して伝送速度を推定する機能を持っている。

1. ま え が き

アクセス系高速PLCシステムでは、中圧・低圧配電線を通信ネットワークとして用いるため、PLCで用いる周波数帯域における信号伝送特性は考慮されておらず、インピーダンス不整合による反射などによる伝達特性の劣化が発生する。

通信の可否を机上で検討することができれば、伝送困難と推定される場所の抽出及び信号中継装置やバイパスツールによる対策検討など、PLCネットワークの設計及び運用の支援、また、サービス加入希望者へのサービスレベルの情報提供を実現することが可能となる。このような背景から、筆者らは、PLCシステムの通信可否の推定を行う通信可否判定支援ツールの開発を行っている。

通信可否判定支援ツールの最も重要な機能は、配電線の伝送特性を推定する機能である。配電系統は通常商用電源周波数に合わせた機器設計になっているため、数MHzから数十MHzの高周波帯域での振る舞いを把握しておくことが必要不可欠である。

通信可否判定機能は、EUの共同研究プロジェクトであるOPERA(Open PLC European Research Alliance)での検討課題の一つであり、配電線モデルを用いたシミュレーション機能を応用したサービス・プロビジョニング機能として検討されている。

本稿では、配電線をPLCインフラ設備の伝送線路として使用するために必要不可欠な技術である配電線通信線化技術として、PLCで用いる周波数帯域を対象とした配電線の伝送路モデルの開発、及びこれらの配電線解析技術を適用したコンポーネントモデルの作成方法とシミュレーションの考え方、並びに通信可否判定支援ツールの機能構成について述べる。

2. 配電線特性解析

2.1 配電線のモデル化

配電線特性解析を行うには配電線をモデル化する必要がある。配電線のモデル化に必要なパラメータとして、導線を覆っている絶縁被膜の実効比誘電率、誘電正接、配電線の長さ、特性インピーダンスといったパラメータが挙げられる。これらのパラメータを用いて、信号を配電線で伝送する際の伝送ロス計算手法について述べる。

伝送ロスの要因として考えられるのは、電気抵抗による導体損、導体周りの絶縁被膜による誘電損、異種の配電線間を伝送する際の特性インピーダンスの違いによる反射損である。

このうち、導体損は導体の寸法や特性によって、誘電損は導線を覆っている絶縁被覆の誘電正接や配電線構造によって決定される。

一般的に、導体損と誘電損は $\exp(-\alpha l)$ という式で表すことができる。検討対象の周波数帯域2~30MHzでは、 l は配電線長(m)、減衰定数 α を用いて式(1)で近似的に計算できる。今回検討する周波数帯域2~30MHzでこの条件は満たされる。

$$\alpha = \frac{1}{2} (R/Z_0 + GZ_0) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 Z_0 ：配電線の特性インピーダンス(Ω)

R ：配電線の抵抗(Ω/m)

G ：配電線のコンダクタンス(S/m)

式(1)における R は式(2)で示すことができる。ただし、比較的使用周波数が高い場合、電流が流れる導体面積 $S(m^2)$ を考える場合、電流は表皮効果により導体表面にしか流れないため、その分を考慮して面積を計算する必要がある。電流が流れる導体表面からの深さを表皮深さと言い、式(3)で示すことができる。表皮深さは周波数によって変わるので、結果として R は周波数の関数になる。

$$R = \frac{1}{\sigma S} (\Omega/m) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 σ ：導電率(S/m)

S ：導体面積(m^2)

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots(3)$$

f ：周波数(Hz)

μ ：透磁率(H/m)

式(1)における G は式(4)で示すことができ、式(4)の C は配電線間の静電容量(F/m)で、式(5)で計算できる。 G も周波数の関数なので、減衰定数 α は周波数によって異なる。

$$G = 2\pi f C \tan \delta (S/m) \dots\dots\dots(4)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln(d/a)} (F/m) \dots\dots\dots(5)$$

$\tan \delta$ ：誘電正接

ϵ_0 ：真空中の誘電率(F/m)

ϵ_r ：比誘電率

a ：導線の半径(m)

d ：導線中心間距離(m)

次に特性インピーダンスの違いによる反射損について考える。特性インピーダンスは、配電線の構造や導線周りの絶縁被膜による実効比誘電率などで決定され、線種によって数十 Ω から数百 Ω まで変動する。

反射損は特性インピーダンスの値によって決まり、例えば、特性インピーダンスが Z_a の配電線と Z_b の配電線間の反射損は反射係数 Γ を用いて式(6)で表すことができる。

$$20\log|\Gamma| = 20\log \left| \frac{Z_a - Z_b}{Z_a + Z_b} \right| \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 Z_a 、 Z_b ：配電線の特性インピーダンス(Ω)
 反射損から伝送ロスを計算するには反射係数 Γ を用いて式(7)で示される。

$$20\log|1-\Gamma^2| \dots\dots\dots(7)$$

以上のように、配電線パラメータから導体損、誘電損、反射損を計算する手法を示した。これらの損失を計算することで、配電線区間における伝送ロスを計算で求めることができる。

2.2 実測結果との比較

配電線モデルの検証を行うため、配電線のみの模擬配電システムにおける伝送ロス実測結果と、実測した配電系に使用されている配電線をモデル化し計算によって求めた伝送ロスと比較する。今回モデル化を行うに当たって、図1に示す模擬配電システムを使用して伝送ロス等の測定を行った。使用したシステムは図に示す模擬配電システム①②である。

図2、図3に測定した模擬配電システムの外観を示す。図2が一本のVV-F^(註1)(三心ケーブル)のみの系で、図3がVV-FとOW^(註2)(単心ケーブル)が混在する系である。

図2の系について、伝送ロスの実測結果と配電線モデルから計算した伝送ロスを図4に示す。実測系の入出力インピーダンスは50 Ω である。配電線の特性インピーダンスが50 Ω ではないので、配電線の入出力部で信号は反射する。その影響で伝送ロスが振動している。

図4から伝送ロス実測結果と計算結果はほぼ一致することが分かる。すなわち、導体損、誘電損、反射損を計算することで配電線一本の簡易なシステムの伝送ロスは計算できる。同様に、図3の系について、伝送ロスの実測結果と配電

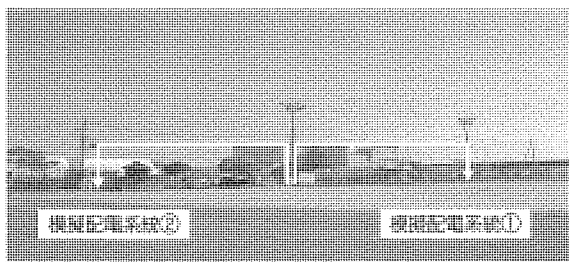


図1. 模擬配電システム

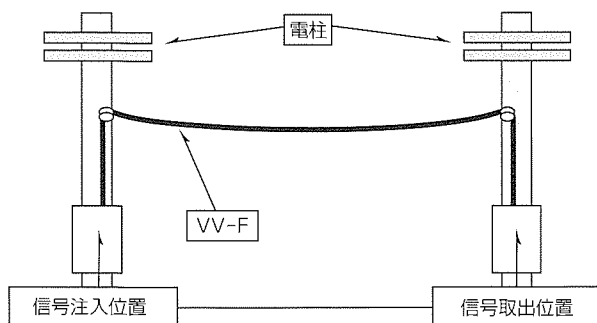


図2. 模擬配電システム①

線モデルによる伝送ロス計算結果を図5に示す。図5においても伝送ロス実測結果と計算結果はほぼ一致する。図3のような線種が異なる配電線が混在するシステムにおいても、配電線特性から伝送ロスを計算できる。

以上のように、簡易システムにおける信号の伝送ロスは配電線の導体損、誘電損、異種配電線間における反射損を計算することで求めることができ、構築した配電線モデルの妥当性を検証することができた。

2.3 実システムへの適用

次に、実際の配電システムに対して、配電線をモデル化する

(注1) VV-Fは、PVC(Polyvinyl Chloride)insulated PVC sheathed cable-Flat typeの略

(注2) OWは、Outdoor Weather proof PVC insulated wireの略

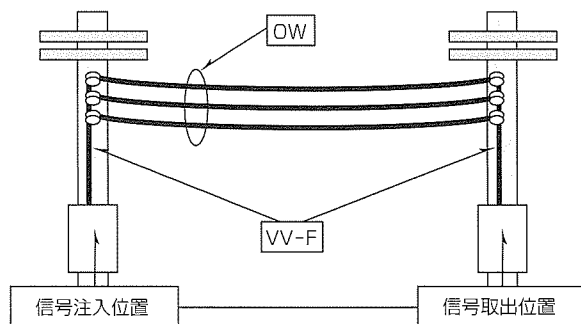


図3. 模擬配電システム②

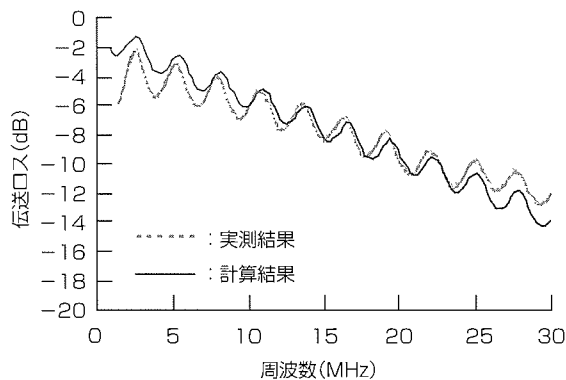


図4. 伝送ロス実測結果と計算結果(模擬配電システム①)

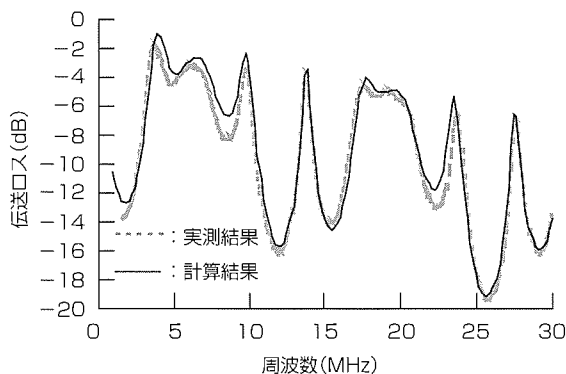


図5. 伝送ロス実測結果と計算結果(模擬配電システム②)

ことで伝送ロスを計算した結果について示す。

図6は配電系統の例を示した図で、OHはOver Headline, CはCableを意味しており、その次の数字はそれぞれ配電線の長さを示している。配電線の間にあるキャパシタンスは変圧器をモデル化したものである。

図6のような実際の配電系統は、配電線の分岐等が複雑で反射損を計算することが困難であること、配電系統は配電線のみではなく変圧器等の配電用機器の影響を考慮する必要があることから、図6の系統における伝送ロス計算では回路解析手法を用いる。回路解析手法により、配電線を伝送線路モデルで置き換えることができる。

一般的に、回路解析には時間領域での解析と周波数での解析手法がある。時間領域での解析手法で一般的なのが回路シミュレータであるSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)を用いた手法である。周波数領域での解法としては、ハーモニックバランスによる解析手法や4端子行列を用いた手法が考えられる。

今回の解析では、一般的に使用されている回路シミュレータであるSPICEを用いる。実配電線の系統をSPICEの伝送路モデルや等価回路モデルによって置き換えることで、系統をモデル化する。

SPICEを用いて、モデル化した図6の系統における受信点1, 2での伝送ロスを計算する。得られた伝送ロスを図7に示す。受信点1は分岐点から210m伝送した後の点、受信点2は二つ目の分岐点から670m伝送した後の点である。

一般に導体損や誘電損は、伝送距離が長いとロスが大きくなる。また、分岐点ではインピーダンス不整合により反射が起きるので、信号の注入点から受信点までの伝送路に分岐が多いほどロスは大きくなる。このことから、図7に示した伝送ロス計算結果は妥当な結果と言える。

まず、導体損や誘電損の影響が少ない低周波領域で、受信点2での伝送ロスが受信点1よりも大きいのは、反射損に起因する。受信点1と信号注入点の間には分岐が一つしかないが、受信点2と信号注入点の間には受信点1に向かう分岐と受信点2に向かう分岐の計2つの分岐があるので、反射損は受信点2の方が大きくなる。

また、伝送距離は明らかに信号注入点から受信点2までの方が長く、誘電損や導体損は前に示したように長さ按比例し、伝送ロスの傾きの大きさに反映される。そのため受信点2での伝送ロスの傾きの方が受信点1での伝送ロスの傾きより大きい。

3. 通信可否判定支援ツール

3.1 機能の概要

通信可否判定支援ツールは、PLCを用いたインターネットサービス事業者(Internet Service Provider : ISP)がPLCモデムの使用周波数帯(動作モード)の選定や信号の通らない箇所のピックアップ及びそれに対する信号中継装置やバイパスツールの設置箇所の選定などを机上で検討するためのツールであり、PLCネットワークの設計・運用における効率化が期待できる。また、PLC加入(希望)者からサービス事業者のコールセンターへの問い合わせに対しサービス可否又は通信速度推定値の情報を提供することにより、新規加入者の獲得に対して有効であると考えられる。

通信可否判定機能の概要を図8に示す。図のように、配電線特性解析によって得られた配電線モデル、ノイズモデル、アクセサリモデルを入力として、伝送特性シミュレーションを行うことによって周波数領域での伝送特性を求め、PLCモデムの動作特性を考慮することによって推定伝送速度を計算する。

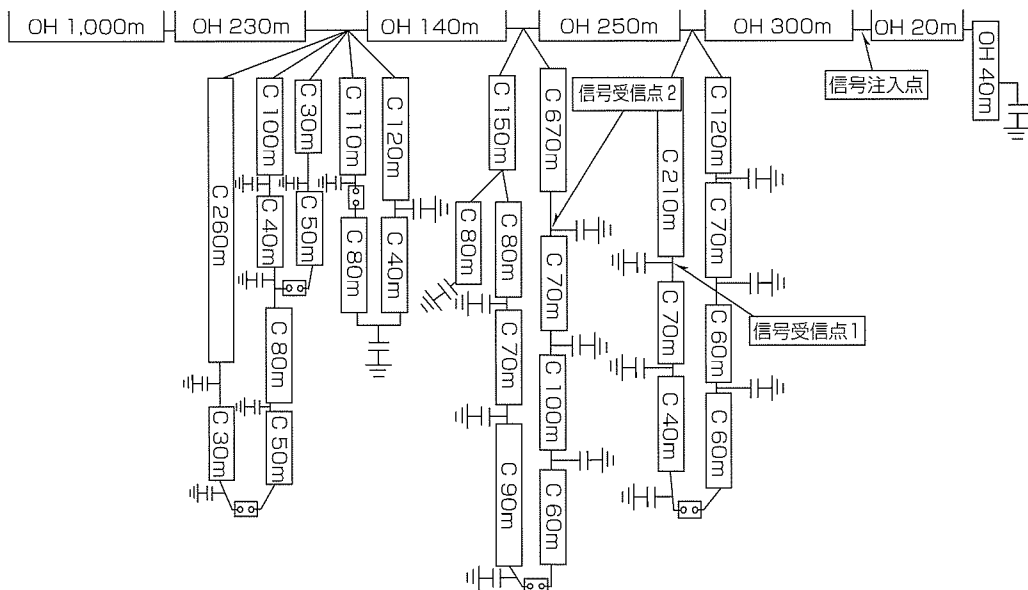


図6. 実配電系統の例

この中で最も重要な部分は伝送特性シミュレーション部であり、PLCで用いる周波数帯域における配電線モデルをいかにして作成するかがポイントとなる。

3.2 伝送特性シミュレーション機能

通信可否判定支援ツールにおける伝送特性シミュレーションは、PLCにおける伝送路を構成するインフラ設備又は複数の設備の電気回路特性を表現するコンポーネントとしてモデル化し、信号注入位置から信号取出位置までのコンポーネントを組み合わせることによって伝送特性を計算するシミュレーション方法であり、設備のコンポーネントを用いることから、CBSと呼んでいる。

伝送特性シミュレーションにCBSを用いるメリットを以下に示す。

- (1) SPICEシミュレーションでは等価回路そのものをデータとして管理する必要があるが、CBSではコンポーネントごとにパラメータを管理すればよい。
- (2) CBSではコンポーネント単位にデータ管理するため、コンポーネントモデルを格納するデータベースとのリンクがSPICEなどの等価回路モデルより容易である。
- (3) CBSではコンポーネントモデルの実測データ(伝送特性)から作成したコンポーネントパラメータをシミュレーションで利用できる。
- (4) SPICEによる回路シミュレーションは節点解析法など

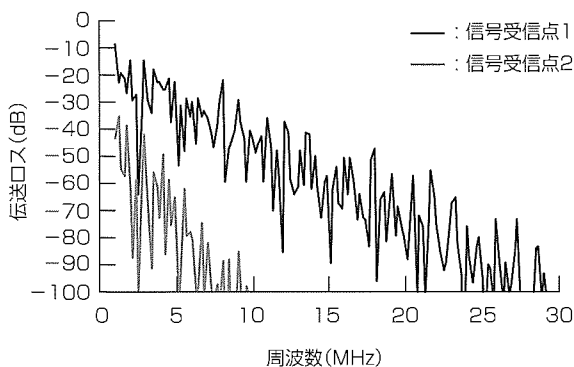


図7. 伝送ロス計算結果

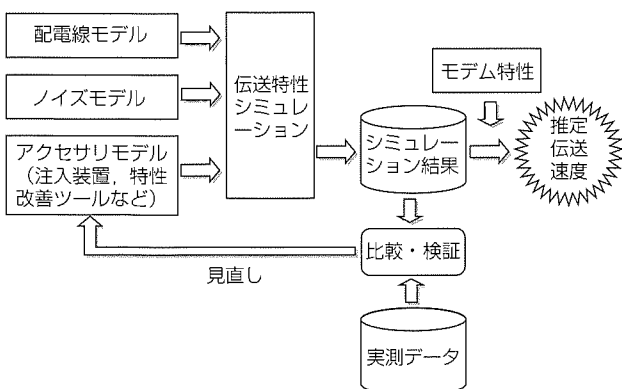


図8. 通信可否判定機能の概要

の回路方程式を解く方法を用いているが、CBSでは、コンポーネントの組み合わせの演算のみでシミュレーションが可能であるため、計算量が少なくすむ。

3.3 コンポーネントモデル

コンポーネントモデルとは、機器又は機器群の電気的特性を表現したモデルであり、図9のように2端子対回路で表現した場合、各端子対の電圧・電流の関係は、式(8)のように4端子行列で表現することができる。4端子行列は等価回路モデルから一意に求めることができるため、電気的特性を表現するモデルとしては適当である。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

コンポーネントモデルを組み合わせ、以下の手順で注入位置から取出位置までの伝送特性を求める。

- (1) コンポーネントモデルを組み合わせるには、負荷側から順に入力インピーダンスを計算し、取出位置から負荷側を見たインピーダンスを計算する。
- (2) 取出位置からコンポーネントモデルを行列演算によって組み合わせ、伝送特性まで電源側へさかのぼることによって、注入位置から取出位置までのコンポーネント特性を求める。コンポーネントが従属接続されている場合には、それぞれの4端子行列を乗じることによって求められる。分岐のように並列接続されている場合には、分岐点から見たインピーダンスが並列に接続されていることになるので、図10のように表される。
- (3) 注入位置から取出位置までの伝送特性は、以下の式で与えられる。

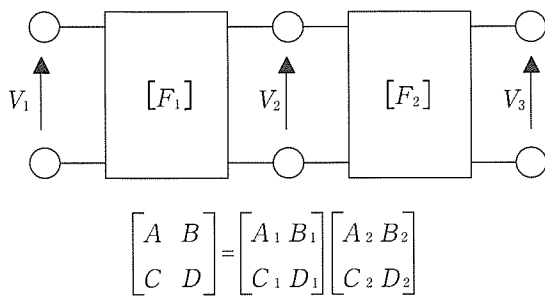
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_L}{AZ_L + B} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 V_{in} 、 V_{out} はそれぞれ注入位置、取出位置での電圧、 A 、 B は注入位置から取出位置までの4端子パラメータ、 Z_L は取出位置から負荷側を見たインピーダンスである。

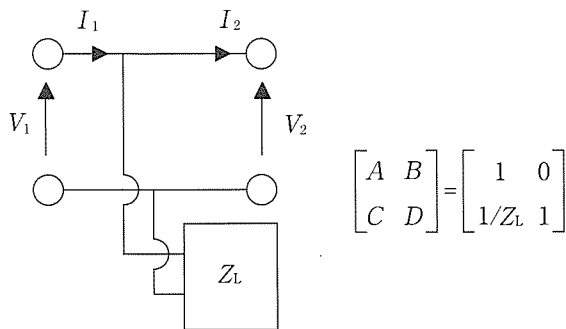
例として、図11のように無損失線路をインピーダンスで終端した場合を考える。無損失線路の4端子行列は式(10)のように与えられる。



図9. コンポーネントの定義



(a) 従属接続



(b) 並列接続

図10. コンポーネントの接続

$$F = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_c \sin \beta l \\ j \sin \beta / Z_c & \cos \beta l \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 β は位相定数、 l は線路長、 Z_c は線路の特性インピーダンスを表す。式(10)から、伝送特性は次式のように表される。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_L}{Z_L \cos \beta l + j Z_c \sin \beta l} \dots\dots\dots (11)$$

3.4 通信速度推定機能

CBSによって注入位置から取出位置までの伝送特性を求

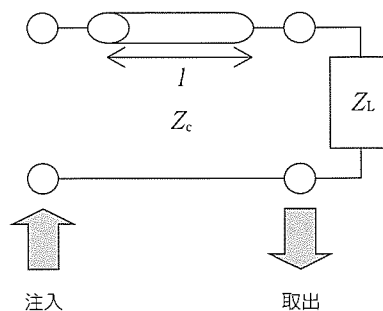


図11. 無損失線路の伝送特性

めた後、PLCモデムの使用する周波数帯域の周波数特性からキャリア周波数間隔で各キャリアのビット数を求め、キャリア当たりの送信シンボル数を乗じることによって推定伝送速度を求めることができる。

4. む す び

本稿では、配電線を通信路としてみたときの伝送特性を把握するための配電線解析及び得られた知見に基づいて通信速度を推定することを目的とした通信可否判定支援ツールについて述べた。ツールは現在開発を進めている段階であり、今後ツールの評価・検証を行って実フィールドへの適用を図る予定である。

参 考 文 献

- (1) 後藤憲一，ほか：詳解電磁気学演習，共立出版（1970）
- (2) 平山 博，ほか：電気回路論[2版改訂]，オーム社（2002）
- (3) Dostert, K., et al. : Powerline Communications, Prentice-Hall（2001）
- (4) 原 和正，ほか：電力線用ケーブルの伝搬特性のモデル化，2002年電子情報通信学会総合大会，B-8-30（2002）

信号結合装置とバイパス装置

村田雄一郎* 下村哲朗***
田邊信二*
木村 亨**

Inductive Coupling Unit and Bypass Tool for Power Line Communications

Yuichiro Murata, Shinji Tanabe, Toru Kimura, Tetsuro Shimomura

要 旨

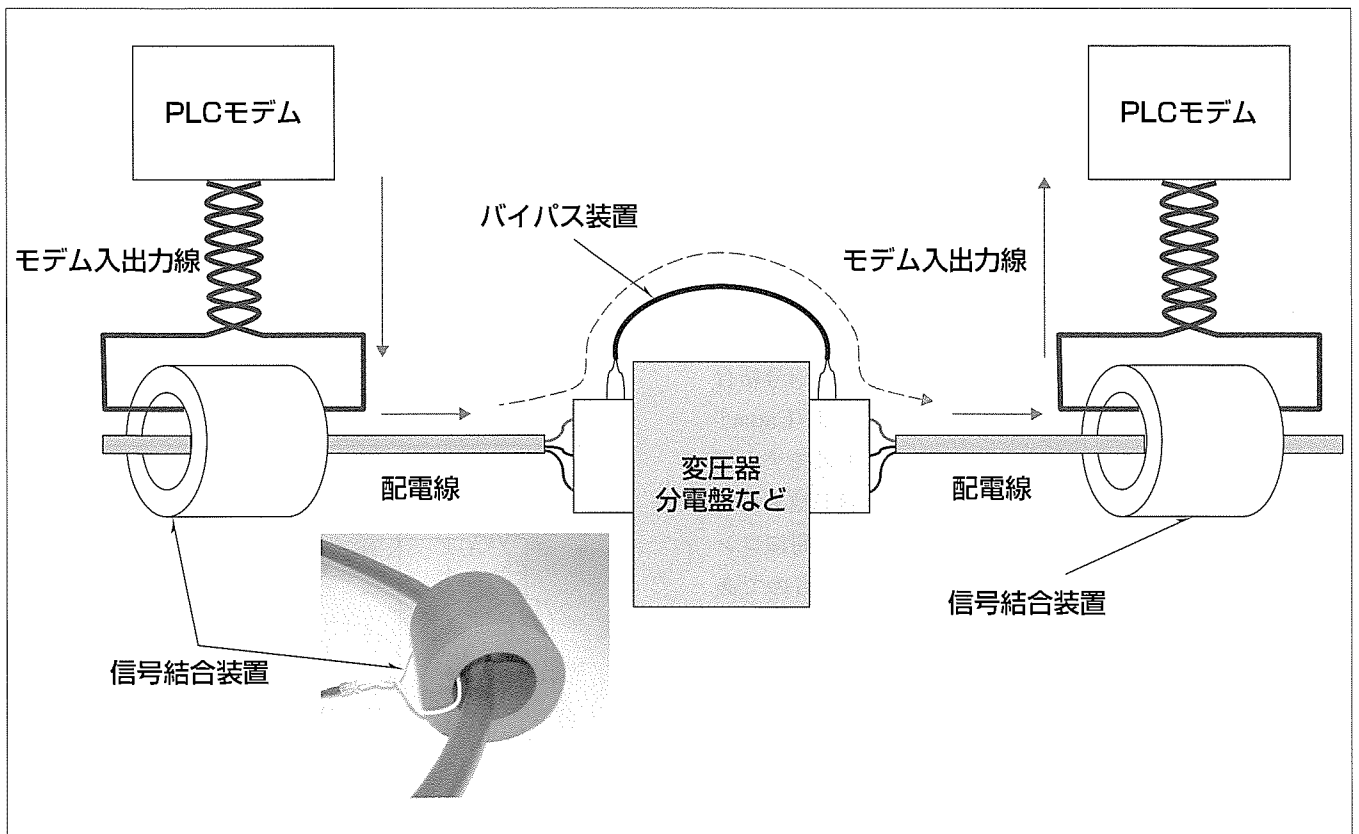
高速の電力線通信 (Power Line Communication : PLC) システムでは、中圧・低圧配電システムを通信ネットワークとして用いる。電力伝送用に設計された配電システムを通信線路に用いる場合、配電線に通信信号を結合する信号結合装置と配電線の通信特性を改善させるコンディショニング装置は、重要なハードウェアである。本稿では、信号結合装置とバイパス装置について取り上げる。

信号結合装置は、2～30MHzのPLCモデムの通信信号を配電線に結合するための装置である。中圧配電線には6.6～22kVの電圧が印加されているため、電磁結合を利用した結合方式を開発した。モデム出力線と配電線との相互インダクタンスを利用して信号結合を行うICU (Inductive Coupling Unit) は、非接触で配電線に信号を印加でき

る。通常、磁気コアを用いることにより結合効率を向上している。このとき、配電線を通る電力電流による磁気コアの飽和を防止するとともに、2～30MHzの通信信号を効率良く結合することが技術的課題である。

バイパス装置は、配電線を通信線路として使用するときの伝送特性を改善するための装置である。既設の配電機器において通信信号の減衰が大きい場合、この機器を迂回 (うかい) させて通信路を形成する必要がある。この迂回路を形成する装置がバイパス装置であり、高周波分離回路とバイパスケーブルで構成される。バイパス装置は、配電機器の影響を受けずに効率良く通信信号を迂回させることが技術的課題である。

本稿では、これらの装置の開発結果について述べる。



信号結合装置とバイパス装置

この図は、高速PLCネットワークシステムに必要なハードウェア装置を説明する図である。信号結合装置はPLCモデムの通信信号を配電線に結合するための装置であり、バイパス装置は通信信号の減衰が大きな配電機器を迂回するための装置である。図中の写真は、開発した信号結合装置である。

1. ま え が き

アクセス系高速PLCシステムでは、中圧・低圧配電システムを通信ネットワークとして用いる。配電システムを通信線路に用いる高周波帯電力線通信において、信号結合装置とコンディショニング装置は重要なハードウェアである。信号結合装置はPLCモデムの通信信号を配電線に結合するための装置である。コンディショニング装置は配電線の通信特性を改善するための装置であり、バイパス装置やフィルタ装置などがある。バイパス装置は通信信号の減衰が大きな配電機器を迂回させるためのものであり、フィルタ装置は不要系統への通信信号の伝送を防止するためのものである。

配電系統の特性や設置場所に応じた信号結合装置やコンディショニング装置は、PLCビジネスを展開するには必要不可欠である。また、これらの装置のコンポーネントモデルを用意することにより、通信可否判定支援ツールを用いて、配電系統の特性改善を計算機上で容易に実施することができる。

また、このようなハードウェア装置は、ヨーロッパにおける共同研究プロジェクトであるOpera (Open PLC European Research Alliance)での検討課題の一つであり、高性能性及び既存配電線への設置の容易性などが検討されている。

本稿では、信号結合装置とバイパス装置について、三菱電機における開発結果について述べる。

2. 信号結合装置

2.1 信号結合方式

信号結合装置は、2～30MHzの通信信号を配電線に印加するための装置であり、PLCシステムにおけるキーデバイスである。中圧配電線には6.6～22kVの電圧で数百Aの電流が印加されているため、電磁結合を利用した間接的な結合方式が用いられる。結合方式の違いにより、信号結合装置には、ICU (Inductive Coupling Unit) とCCU (Capacitive Coupling Unit) の2種類が存在する。ICUはモデム出力線と配電線間の相互インダクタンスによる磁気結合を用いるものであり、CCUはモデム出力線と電力線間にコンデンサを介したコンデンサカップリングを行うものである。表1にICUとCCUの比較を示す。ICUは、非接触で電力線に信号結合を行うことができるため信頼性が高く既存配電線への設置が容易であり、PLCシステムでは広く用いられている。以降、ICUの特性について述べる。

2.2 ICUの等価回路とその特性

図1にモデム出力線と電力線間に接続されたICUとその等価回路を示す⁽¹⁾。図において、

- R_o : モデムの出力インピーダンス
- R_t : 終端抵抗
- R_w : 巻き線抵抗 (銅損)

- L : 自己インダクタンス
- L_1 : 漏れインダクタンス ($L_1 = (1 - k)L$)
- R_c : 漏れインダクタンスに対する鉄損 ($R_c = \omega L_1 / Q$)
- M : 相互インダクタンス ($M = kL$)
- R_M : 相互インダクタンスに対する鉄損 ($R_M = \omega MQ$)
- k : 結合係数
- Q : コアのQ
- E_s : モデム出力電圧

である。ICUがない場合、終端抵抗に生じる電圧は $E_s R_t / (R_t + R_o)$ となるため、この値と比較することによりICUの結合効率 K を求めることができる。巻き線抵抗やコアのロスを見捨てると、結合効率 K は近似的に次式で求めることができる。

低周波領域 ($\omega kL \ll R_t$):

$$K = \frac{j\omega M // R_t}{j\omega M // R_t + R_o} \frac{R_t + R_o}{R_t} \dots\dots\dots(1)$$

高周波領域 ($\omega kL \gg R_t$):

$$K = \frac{R_t}{R_o + R_t + 2j\omega L_1} \frac{R_t + R_o}{R_t} \dots\dots\dots(2)$$

ただし//は並列接続された素子の合成インピーダンスを示す。低周波領域では、相互インダクタンス M によるインピーダンス ωM が終端抵抗 R_t より小さくなるために、結合効率は低下する。高周波領域では、漏れインダクタンス L_1 によって結合効率は低下する。したがって、ICUの結合効率はある周波数で最大値を示す。

表1. 信号結合装置の比較

項目	ICU	CCU
結合原理	相互インダクタンス	コンデンサ結合
結合方式	非接触	接触
施工性	容易	困難
サイズ	小	大

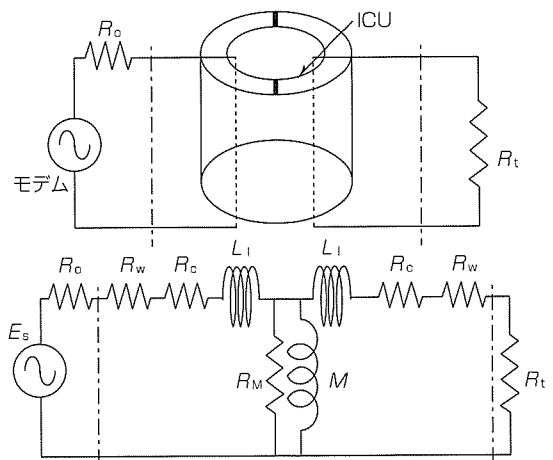


図1. ICUとその等価回路

図2に結合係数と結合効率の関係の計算例を示す。自己インダクタンスは1,500nHとした。結合係数が大きいほど結合効率は良くなる。また、結合係数は10MHz以上の高周波領域の結合効率に影響を与える。

図3に自己インダクタンスと結合効率の関係を示す。結合係数 k は0.9とした。低周波領域の結合効率は自己インダクタンスが大きいほど良いが、高周波領域の結合効率は自己インダクタンスが小さいほど良くなる。

図4にコア損失と結合効率の関係を示す。コア材料の Q と結合効率の関係を求めた。コア材料の透磁率の実部 μ' と虚部 μ'' の比を $Q(=\mu'/\mu'')$ と呼び、コアの高周波損失の目安として用いられる。コア損失は低周波領域と高周波領域の両方の結合効率を低下させる。また、結合係数が小さいほどコア損失による結合効率の低下は大きくなる。

したがって、ICUの特性は、結合係数、自己インダクタンス、コアの損失によって決まることが分かる。

2.3 ギャップによる磁気飽和の防止

ICUの結合効率を増加させるため、磁気コアを用いる。配電線を通る電力電流による磁気コアの飽和を防止するため、磁気コアにはギャップが設けられる。図5にギャップ付きコアとそのBH(磁束密度： B 、磁界： H)カーブを示す⁽²⁾。

外部磁界 H_0 で磁化されている磁気コアの内部磁界 H は、ギャップによる反磁界 H_d の作用を受けて、次式のようになる。

$$H = H_0 - H_d \quad \dots\dots\dots(3)$$

すなわち、コアの内部磁界 H は、外部磁界 H_0 より小さくなるため、磁気飽和の影響を低減することができる。ギャップ長を広くすると、反磁界 H_d が増加するため、磁気飽和の影響を低減することができる。しかしながら、コアの結合係数 k も低下するため、ICUの結合効率が低下する。このため、磁界解析によりコア形状の最適化を行っている。

2.4 ICU開発品の特性

図6に開発したICUを示し、また、図7にその特性を示す。結合効率は9MHzで最大値を示し、ICUが図1に示した等価回路で表現できることを確認した。

今後、ICUのコンポーネントモデルを作成し、通信可否判定ツール(前記事参照)に適用していく予定である。また、既存配電線への設置性を考慮した製品化検討を行うとともに、コア形状や材料特性の見直しによる小型化と高効率化を行う予定である。

3. バイパス装置

バイパス装置は、配電線を通信路に用いる高周波帯電力

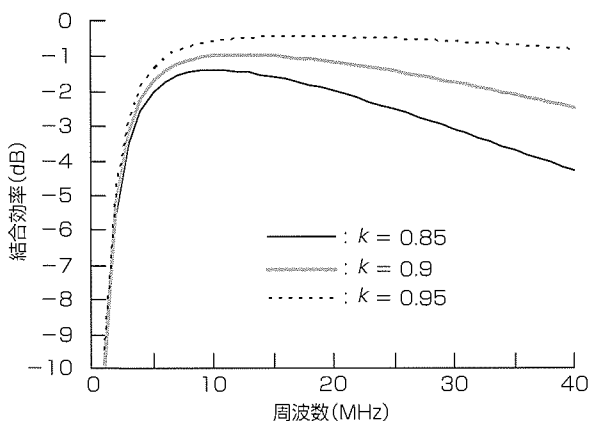


図2. 結合係数と結合効率

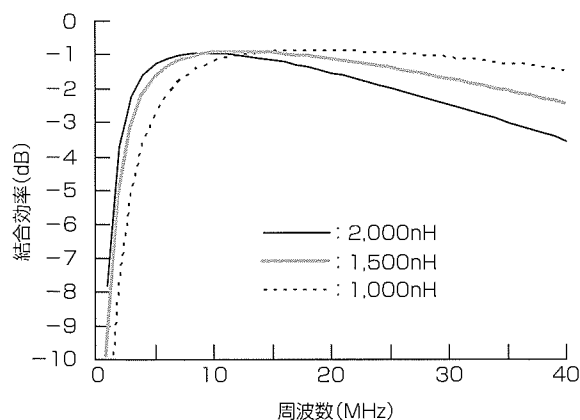


図3. 自己インダクタンスと結合効率

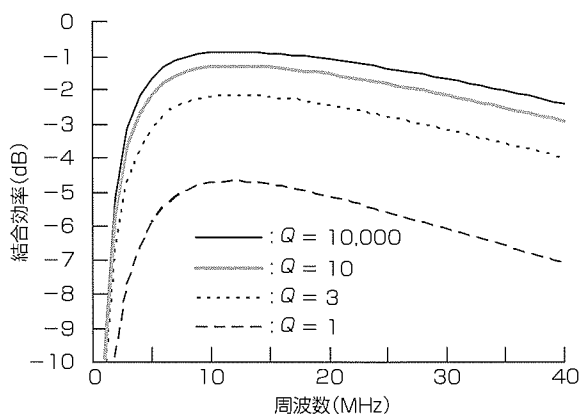


図4. コア損失と結合効率

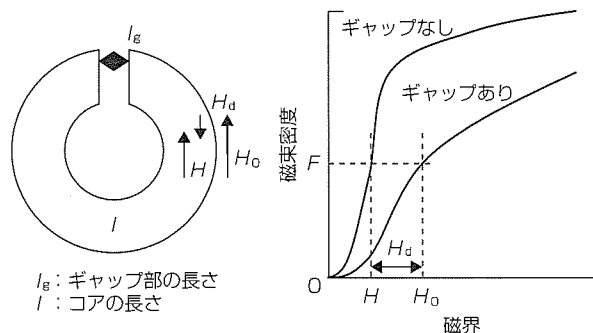


図5. ギャップ付きコアとそのBHカーブ

線通信において、モデム通信性能を劣化させる配電機器（変圧器、分電盤、電圧調整器など）付近に設置することで、配電線の伝送路特性を改善し、モデム通信性能を向上させる装置である。ここでは当装置の開発結果について述べる。

3.1 開発の背景

アクセス系高速PLCモデムによる高速で安定した通信を実現するためには、通信信号を効率良く伝搬させる必要がある。アクセス系高速PLCモデムの伝送路となる低圧配電線や中圧配電線、宅内電灯線には、配電機器による信号減衰などの現象がある。配電機器には変圧器や分電盤、電圧調整器などがあるが、これら配電機器がPLCモデムの通信経路に存在している場合、配電機器によって伝送路特性が劣化し、PLCモデムにとって速度低下又は通信不可能となる現象が発生する。このように通信性能を劣化させる配電機器が存在している場所において高速PLCモデムが高速で安定した通信を行うために、配電機器の周辺にPLCリピータ装置を設置し、配電機器を避けて通信信号を中継して送信し直すことが行われている。ところが、このPLCリピータ装置を使用すると、装置自体の費用を始め、装置の設定やメンテナンスにかかる費用が発生し、コスト高になるという課題がある。

そこで、PLCリピータ装置を使用せずに配電機器による伝送路特性劣化を改善して高速PLCモデムの通信性能を向

上させる、低コストかつ簡易設置可能な装置が要求されている。バイパス装置はその要求にこたえるために開発を開始したものである。

3.2 装置の概要

当社が現在開発中のバイパス装置には以下の特長がある。

- (1) 配電線を通信路に用いる高周波電力線通信において、モデム通信性能を劣化させる配電機器（変圧器、分電盤、電圧調整器など）付近にバイパス装置を設置することで、配電線の高周波減衰特性を改善し、モデム通信性能を向上させる。
- (2) 配電機器により信号減衰の大きい配電線に設置されるPLCリピータ装置をバイパス装置に代替することで、装置／設置コスト低減と設置スペース低減を実現する。

図8はバイパス装置の設置構成を示したものである。図において、配電システムの途中に変圧器、分電盤、電圧調整器などの配電機器が存在している。バイパス装置は、この配電機器を挟んで設置される。この装置の構成要素の一部である高周波分離回路は、配電機器の両端の配電線との接続箇所それぞれに設置される。これら高周波分離回路同士は、この装置の一部であるケーブルによって接続される。このようにこの装置は、高周波分離回路とケーブルから構成されている。

このような構成の上で、図の左側にある一方の配電線上に重畳されて伝送される高速PLCモデムの高周波通信信号は、高周波分離回路によって商用周波数の電力と分離され、高周波通信信号がケーブルに抽出される。分離して抽出された高周波通信信号は、ケーブルを経由して、図の右側に示したもう一方の配電線に結合される。これより、高速PLCモデムの高周波通信信号は、配電機器を通らずにこの装置によってバイパスされる。以上は通信信号の方向が左方向の場合について述べたが、右方向の場合についても動作は同じである。また、高周波分離回路には、高周波通信信号を分離して抽出する機能のみならず、配電線上の高周波通信信号に対する配電機器からの影響を遮断する機能も併せ持っている。これらの機能において、商用周波数の電力には影響を与えないようになっている。

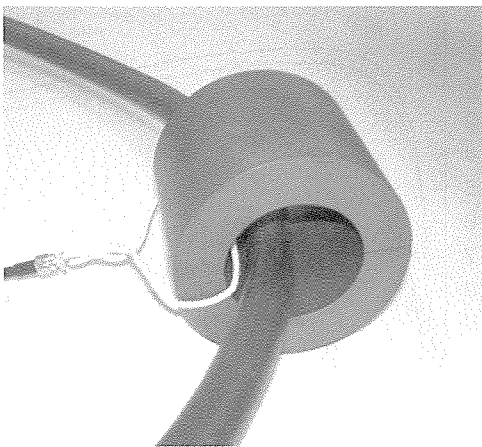


図6. ICU開発品

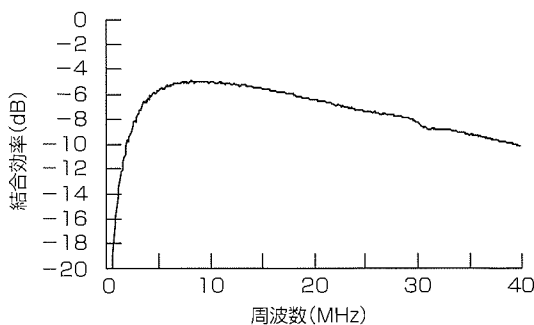


図7. ICUの結合効率

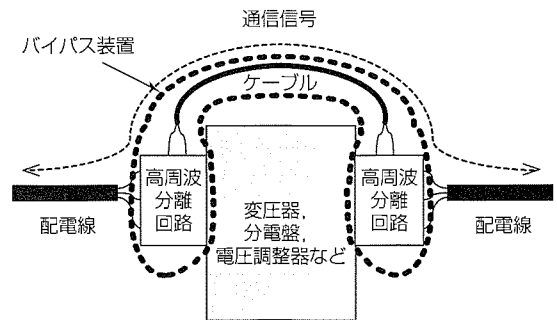


図8. バイパス装置の設置構成

3.3 原理実証実験

バイパス装置の原理的効果を確認するための原理実証実験を当社実験室において行った。配電機器としては、分電盤の一種であるBusBarを模擬した装置を製作して使用した。擬似伝送路を2通り作り、これらを使用して実験を行った。バイパス装置を使用しない場合と使用した場合について、それぞれ減衰特性を測定し差異を見た。

まず、2通りの擬似伝送路のうちの一つである伝送路1における実験を示す。図9に伝送路1の構成図を示す。BusBarを模擬した装置に分岐線が11本ある。そのうちの1本を信号注入点とし、これと違う1本を信号受信点としている。この装置適用方法として、この信号注入用の1本の線のBusBar接続点と、信号受信用の1本の線のBusBar接続点にそれぞれ高周波分離回路を設置し、それらをケーブルによって接続している。

伝送路1における減衰特性測定結果を図10に示す。図において、横軸は周波数[MHz]、縦軸は減衰特性[dB]であり、黒線がこの装置を使用した場合の減衰特性、灰色線がこの装置を使用しない場合の減衰特性である。まず、装置を使用しない場合の減衰特性(灰色線)を見ると、周波数帯域全域にわたって-35dB前後を中心とし、-30~-45dBのノッチが見られる。これらノッチは、BusBar模擬装置部からの分岐線のうち注入と受信に使用していない9本の線のオープン端からの反射に起因するものである。次に、この装置を使用した場合の減衰特性(黒線)を見ると、装置を使用しない場合に見えていたノッチが消滅し、全体として-20dB前後の値となっている。これより、減衰特性のノ

ッチを消滅させて減衰特性を改善するというこの装置の効果が確認できた。

次に、2通りの擬似伝送路のうちのもう1つである伝送路2における実験を示す。図11に伝送路2の構成図を示す。伝送路1との違いは、11本の分岐線のうち4本の分岐線を1.3mと短くして長さを統一していることである。このことは、意図的に深い減衰ノッチを作るために行っている。その他の構成は伝送路1と同様である。

伝送路2における減衰特性測定結果を図12に示す。図12における減衰特性表示方法は伝送路1の場合の図10と同様である。まず装置を使用しない場合の減衰特性(灰色線)を見ると、周波数25.5MHzの位置に-95dBの深さのノッチが見られる。このノッチは、BusBar模擬装置部からの分岐線のうち注入と受信に使用していない9本のうち、伝送路1から変更した4本の線のオープン端からの反射に起因するものである。次に、この装置を使用した場合の減衰特性(黒線)を見ると、周波数25.5MHzの位置のノッチは消滅している。これから、この装置における-90dB級の深い減衰特性のノッチ消滅効果が確認できた。

上記のとおり、バイパス装置の原理実証実験により、原理実験レベルでこの装置の効果を確認することができた。今後は、この装置の実用化に向けて製品を睨(にら)んだ設計と評価検証に取り組んでいく予定である。

4. む す び

本稿では、PLCビジネスを展開するために必要不可欠である信号結合装置とバイパス装置を取り上げ、当社にお

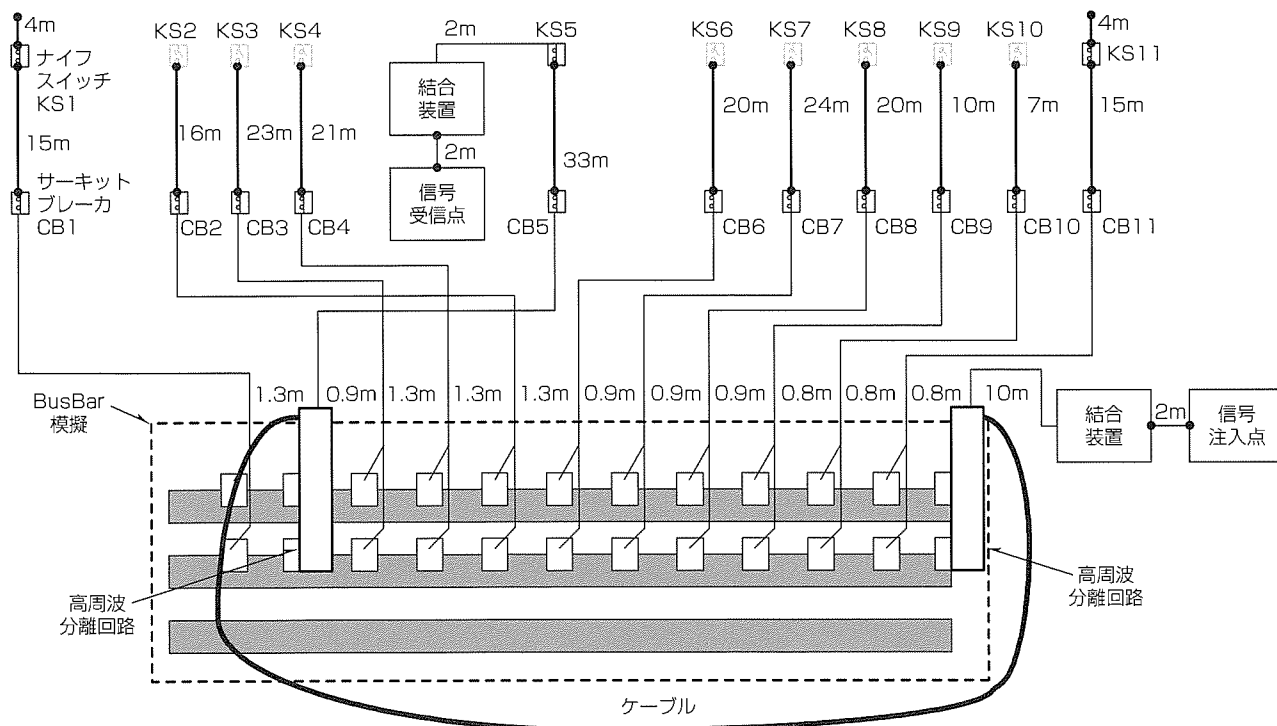


図9. 原理実証実験 伝送路構成図(伝送路1)

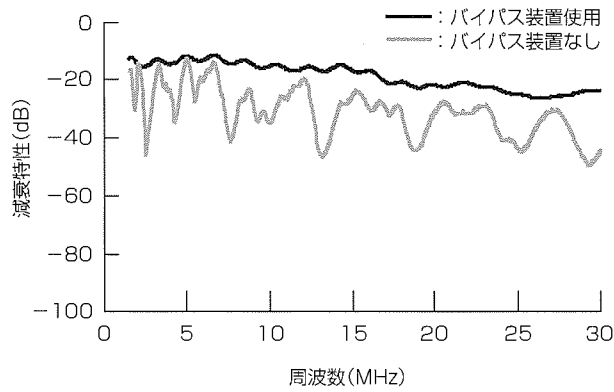


図10. 原理実証実験 減衰特性測定結果(伝送路1)

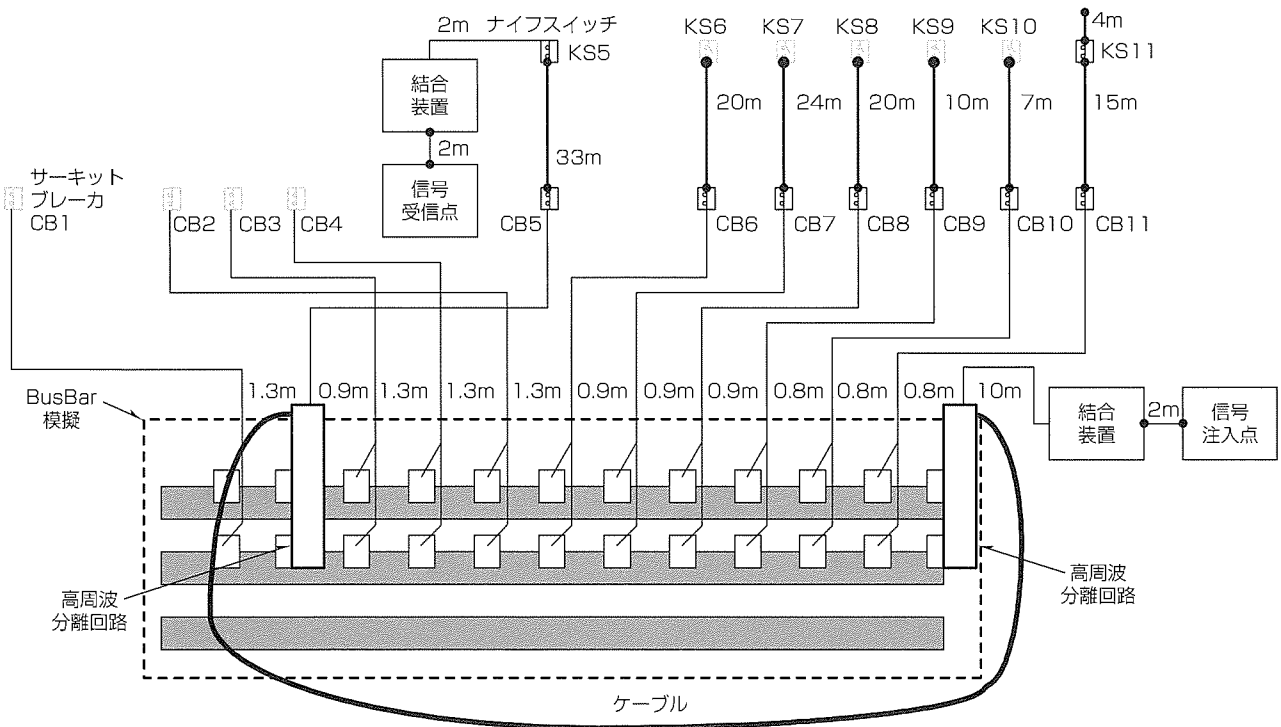


図11. 原理実証実験 伝送路構成図(伝送路2)

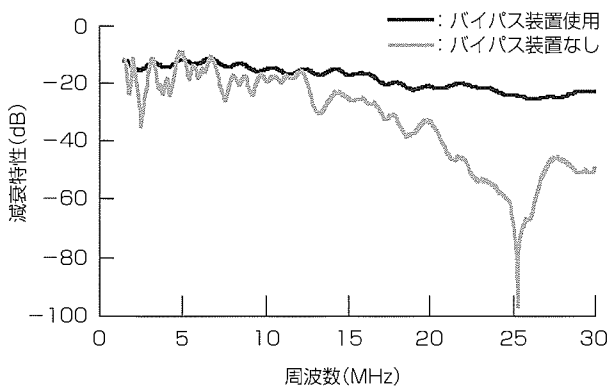


図12. 原理実証実験 減衰特性測定結果(伝送路2)

る開発結果について述べた。今後、既存配電線への設置性を考慮した製品化検討を行うとともに、装置のコンポーネントモデルを作成し、通信可否判定支援ツールを用いて配電系統の特性改善を計算機上で容易に実施できるシステムの構築を行う。

参考文献

- (1) 山村英穂：トロイダルコア活用百科，CQ出版社（1983）
- (2) 山田 一：基礎磁気工学，学献社（1975）

低密度パリティ検査符号技術

松本 渉*

Low-Density Parity-Check Codes

Wataru Matsumoto

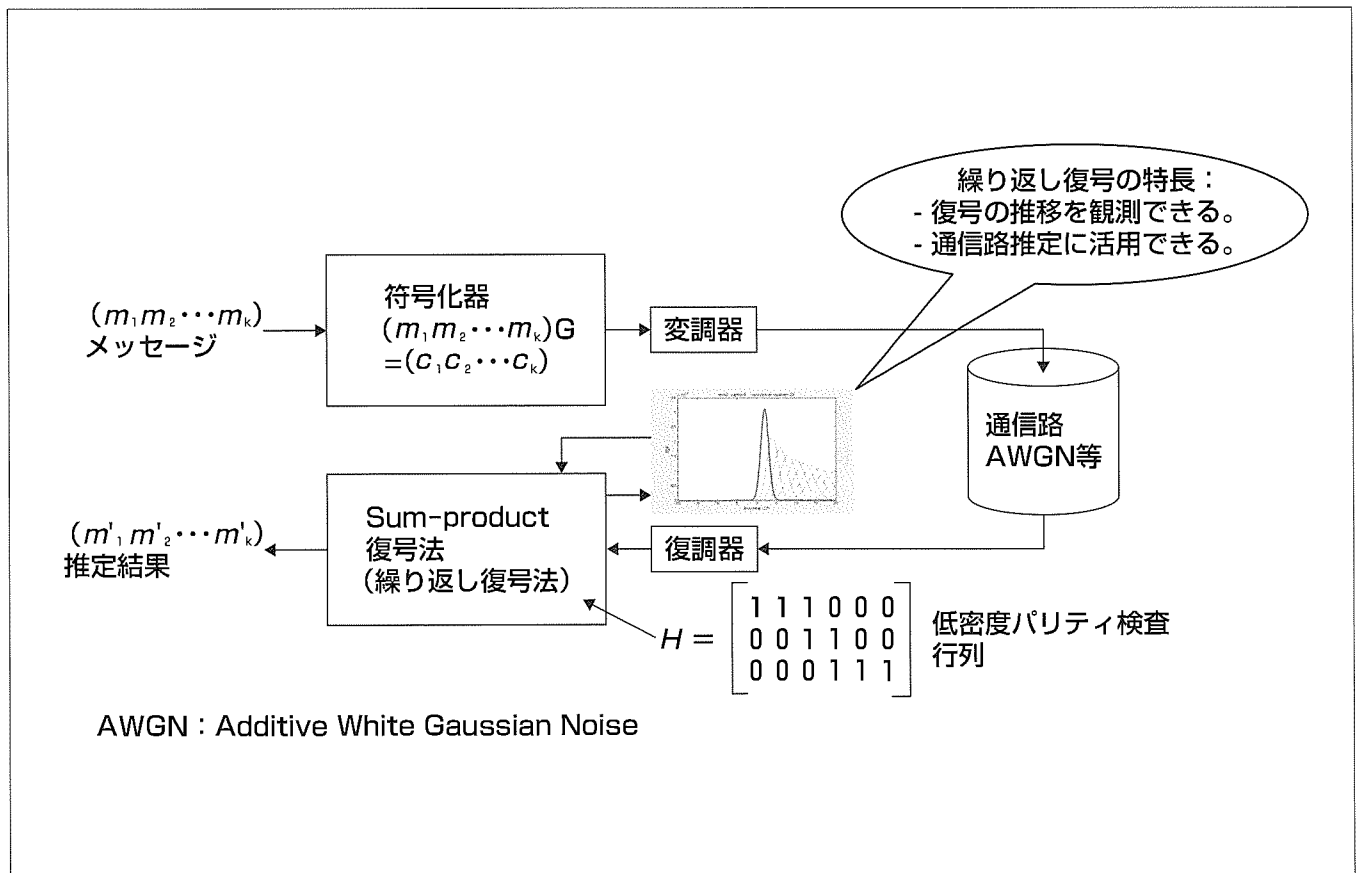
要 旨

有線、無線を問わず通信システムにおいて妥当な複雑さの下で、高速かつ信頼性の高い情報伝達ができることが望ましい。この要求にこたえる有効な手段として、高い性能を示す誤り訂正符号の適用が挙げられる。通信に適用される誤り訂正符号はより符号化利得の高いものに進歩してきており、携帯電話においては通信路容量に接近するターボ符号の適用が実現している。また、同様に通信路容量に接近する符号として低密度パリティ検査(LDPC)符号が注目され、主に無線通信の標準化会議(IEEE802.11等)で提案されるようになってきている。しかしながら、これらの高性能な誤り訂正符号の適用によって容易に通信システムの高速化や高信頼性を実現できるわけではない。実装時の

課題として以下の2点が挙げられる。

- (1) 符号化復号器の処理能力(Throughput)が通信速度以上であること。
- (2) 高い誤り訂正能力を発揮する前提条件として周辺回路の完全性(極端に高い性能)が求められる。

特に近年の100Mbps超のブロードバンド通信への適用は誤り訂正の符号化復号、及びそれを実装する通信システムにとって多くの難解な問題に対するブレイクスルーが必要であり、各機能部位の専門家同士のコラボレーションをもって解決を目指すことが不可欠となる。本稿では、上記問題に対して検討されている方式の一部の解説と残課題に対するアプローチの一つの方向性を紹介するものである。



LDPC符号化復号のブロック図

図はLDPC符号化復号のブロック図を示している。上部に送信側に搭載する符号化ブロックを示し、下部に受信側に搭載する復号ブロックを示している。

1. ま え が き

近年通信路容量に接近する誤り訂正符号として注目されている低密度パリティ検査符号(以下“LDPC符号”という。)に関し、その概要を述べるとともに、問題点とその解決方法の一部を解説する。

2. LDPC符号の概要

LDPC符号は非常に疎な検査行列により定義される線形符号である。疎な行列とは、行列内の非零要素の数が非常に少ない行列を指す。本稿で扱う2元の有限体 $\{0, 1\} \in F_2$ 上の場合行列内の“1”の数が少ない行列を指す。

図1にLDPC符号を利用した通信システムの概略ブロック図を示す。図は簡略化した図であるため、実際の無線・有線通信システムでは通信路は各種フェージング通信路を仮定する必要がある。また、変調器及び復調器のペアは、そのフェージング通信路上で安定した通信を実現するために、同期回路、等化回路、反射波のキャンセラ回路等が標準的に含まれると考えた方がよいことを注記しておく。

それでは、特にLDPC符号の符号化復号のみに焦点を当て、簡単化のため通信路にAWGN(加法的ガウス雑音)通信路を仮定した手順の概略を以下に示す。

<符号化復号手順>

- (1) 行列内の“1”の密度が低いパリティ検査行列 H を準備する。
- (2) $GH^T = 0$ を満たす生成行列 G を求める。
- (3) $mG = C$ よりメッセージ m から符号語 C を生成し変調をかけた送信する。
- (4) 受信側で復調し、Sum-product復号を行う。
- (5) 推定値 m' を出力する。

ここで、 $m := (m_1, m_2, \dots, m_k) \in F_2^k$, $C := (c_1, c_2, \dots, c_n) \in F_2^n$, $H \in M((n-k) \times n, F_2)$, $G \in M(n \times k, F_2)$, $m' := (m'_1, m'_2, \dots, m'_k) \in F_2^k$ である。ただし、 F_2 は2元の有限体、 $M(n \times k, F_2)$ は2元の $n \times k$ 行列を示す。

以上がLDPC符号の符号化復号手順の概要である。

LDPC符号の発明者であるGallager⁽¹⁾のH構成法はランダムな処理が含まれており、構成が確定的(少ない諸元と簡易なルールで常に同一ものが構成できる)ではなかった。この方法は現実の通信システムに好ましくない。

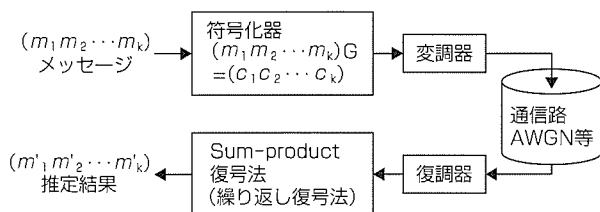


図1. LDPC符号を利用した通信システム

また、符号化に用いる $GH^T = 0$ を満たす G を算出する際のガウス消去法の計算量及び G を表現するデータを保存するメモリ量が比較的大きくなる問題がある。

さらに、Throughputの点から支配的な計算量を示すのは繰り返し復号法という手法に基づくSum-product復号法である。直接的にはこの復号法を搭載した際の処理能力が通信システム全体の通信速度を制限してしまう場合がある。

最も困難な点は、高い誤り訂正能力を発揮する前提条件として周辺回路の完全性(極端に高い性能)が求められることである。

以上の背景から、重要な技術テーマとして以下が挙げられる。

- (1) 高い誤り訂正能力を示す確定的な H の構成法
- (2) 簡易な符号化法
- (3) 簡易で高性能な復号法
- (4) 周辺回路の高性能化

本稿では、(1)、(2)に対する解決法として現在筆者が検討している H の構成法及び符号化法を3章に、(3)に対する解決法として最近の復号法に関する研究動向を4章に、(4)に対するアプローチ法の一方方向性を5章で紹介する。

3. パリティ検査行列の構成法及び符号化法

まず最初に、レギュラLDPC符号を定義する。 H のどの列の“1”の数(列重みと呼ぶ)も j であり、どの行の“1”の数(行重みと呼ぶ)も l であるとする。このようなLDPC符号を (j, l) -レギュラLDPC符号と表記する。一方、各列各行の重みが一定でないLDPC符号をイレギュラLDPC符号と呼ぶ。良い列重み分布、行重み分布(次数分布と呼ぶ)を持つイレギュラLDPC符号はレギュラLDPC符号よりも優れた復号ビット誤り率特性を与えることが知られている。また、Richardsonらは、密度発展法により最適な次数分布を導出する方法を提案している⁽²⁾。

レギュラLDPC符号に関しては幾つかの確定的符号構成法が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、イレギュラLDPC符号に関しては確定的符号構成法は散見される程度であり、実用的な方法とはまだ言いがたい⁽⁵⁾。しかしながら、参照した論文(3)(4)(5)はいずれも簡易な符号化を実現する手法を併せて提案している。(3)(4)は巡回符号構造を利用して幾つかの生成多項式で符号語を生成する手法であり、(5)は冗長部を帰還多項式による畳み込みで生成するものである。

また、(6)で解説されているように、一般論として H の構造を右上三角が0であるようにした場合(図2)、後退代入(連立一次方程式)を繰り返すことにより H のみを用いて符号化が可能となる。

筆者は、この右上三角が0である制約を課しつつ確定的なイレギュラLDPC符号のパリティ検査行列の設計法を検

討している。特に差別化機能として、RC-LDPC符号 (Rate-Compatible LDPC符号: メッセージ長を変えずに符号化率を可変にするLDPC符号)としての機能も含まれている。例えば図3に示すように、一つの検査行列の中に符号化率 $r_1=(n_1-m_1)/n_1$, $r_2=(n_2-m_2)/n_2$, $r_3=(n_3-m_3)/n_3$ の検査行列が構成できるようにしたものであり、各符号化率を実行するための検査行列 $m_1 \times n_1$, $m_2 \times n_2$, $m_3 \times n_3$ はそれぞれ密度発展法により最適化されている。この手法により、複数の符号化率において良好な性能を示すRC-LDPC符号を実現できる。これらの詳解は紙面の都合上文献(7)に委ねたい。

4. 復号法の研究動向

LDPC符号の復号法は、Sum-product復号法かBP (Belief Propagation)復号法と呼ばれる方法で復号される。計算手順で表現するかグラフ上の確率推論問題の視点で表現するかの違いはあるが、基本的に同じものである。

まずは基本的なBP復号法の手順を以下に示す。

<BP復号法>

2元 M 行 N 列のパリティ検査行列 H の m 行 n 列目要素を h_{mn} と表記する。集合 $[1, N]$ の部分集合 A_m, B_n を次のように定義する。

$$A_m := \{n : h_{mn} = 1\} \quad B_n := \{m : h_{mn} = 1\}$$

また、送信した符号語を $x := (x_1, x_2, \dots, x_N)$ とし、そ

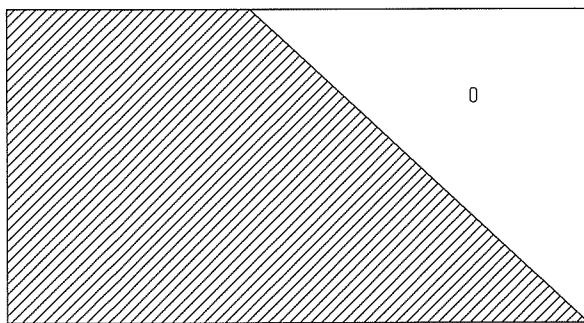


図2. 右上三角が0である検査行列

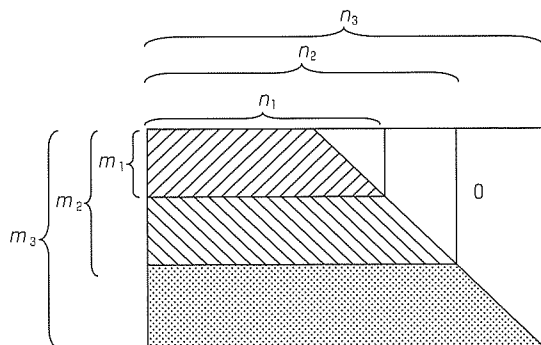


図3. RC-LDPC符号のための検査行列

の受信語を $y := (y_1, y_2, \dots, y_N)$ とする。また、通信路はAWGN通信路とし、信号点 $1, -1$ の2値変調化しているものと仮定する。

STEP 1(初期化): 第 n シンボルの対数尤度(ゆうど)比 $\lambda_n = 2 y_n / \sigma^2$ を設定する。ここで σ^2 はガウス雑音の分散値である。

STEP 2(列処理): $h_{mn} = 1$ を満たすすべてに、組 (m, n) に対し対数事前値比 $\beta_{mn}^{(l)}$ を以下の更新式により更新する。

$$\beta_{mn}^{(l)} = \lambda_n + \sum_{m' \in A_m \setminus n} a_{m'n}^{(l-1)} \quad (\text{初期値 } a_{mn}^{(0)} = 0) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $a_{mn}^{(l)}$ は対数外部値比であり、 (l) は $l \in [0, l_{\max}]$ 番目の繰り返し回数の処理であると定義する。 l_{\max} は最大繰り返し回数。

STEP 3(行処理): $h_{mn} = 1$ を満たすすべてに、組 (m, n) に対し対数外部値比 $a_{mn}^{(l)}$ を以下の更新式により更新する。

$$a_{mn}^{(l)} = 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in A_m \setminus n} \tanh \left[\frac{\beta_{mn'}^{(l-1)}}{2} \right] \right] \quad \dots \dots \dots (2)$$

STEP 4(パリティ検査処理): 一時推定語 $\hat{x} := (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N)$ を以下の判定式 $\hat{x}_n = 1$ if $\beta_{nn}^{(l)} > 0$, $\hat{x}_n = 0$ otherwiseにより生成する。これが $\hat{x} H^T = 0$ を満たせば終了。満たさなければSTEP 2を実行(アルゴリズム終わり)。

これに対し、計算量を約 $1/(\text{平均行重み})$ 程度(例えば平均行重みが8であれば $1/8$)に削減でき、かつ性能劣化を $0.1 \sim 0.2$ dB程度に抑えられる方法として注目されているのが、normalized BP復号法である⁽⁸⁾。

この方式は主に計算量の大きい積回路で構成される式(2)を以下の式で簡易化することで計算量の削減を行っている。

$$\begin{aligned} a_{mn}^{(l)} &= 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in A_m \setminus n} \tanh \left[\frac{\beta_{mn'}^{(l-1)}}{2} \right] \right] \\ &= 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in A_m \setminus n} \text{sgn} \left[\beta_{mn'}^{(l-1)} \right] \cdot \prod_{n' \in A_m \setminus n} \tanh \left[\frac{|\beta_{mn'}^{(l-1)}|}{2} \right] \right] \\ &= \prod_{n' \in A_m \setminus n} \text{sgn} \left[\beta_{mn'}^{(l-1)} \right] \cdot 2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in A_m \setminus n} \tanh \left[\frac{|\beta_{mn'}^{(l-1)}|}{2} \right] \right] \\ &\approx \frac{1}{a} \prod_{n' \in A_m \setminus n} \text{sgn} \left[\beta_{mn'}^{(l-1)} \right] \cdot \min_{n' \in A_m \setminus n} |\beta_{mn'}^{(l-1)}| \end{aligned} \quad \dots \dots (3)$$

ここで a は正規化定数であり、以下の式により求める。

$$\begin{aligned} &\text{For } i \in [1, N] \\ a &= \frac{E(|L_2|)}{E(|L_1|)} \\ E(|L_2|) &= E \left[2 \tanh^{-1} \left[\prod_{n' \in A_m \setminus n} \tanh \left[\frac{|\beta_{mn'}^{(l-1)}|}{2} \right] \right] \right] \\ E(|L_1|) &= E \left[\min_{n' \in A_m \setminus n} |\beta_{mn'}^{(l-1)}| \right] \end{aligned} \quad \dots \dots (4)$$

式(4)は対数外部値比 $a_{mn}^{(l)}$ を算出する際の支配的な対数事前値比 $\beta_{mn}^{(l)}$ (最小の $\beta_{mn}^{(l)}$)のみで計算しようとするもので、このときの算出された対数外部値比 $a_{mn}^{(l)}$ が元になるBP復

号法の結果に近くなるよう正規化定数 a で補正するものである。この計算法により最小の対数事前値比のみの計算になるため基本的に積算が不要になり、大幅な計算量削減ができる。

5. 周辺回路の高性能化

周辺回路の高性能化を要求する一例として同期回路に関する要求条件を示す。

LDPC符号を用いた場合、AWGN通信路を仮定し完全な同期が行われた際に符号化率0.5でCNR(搬送波対ノイズ比) = 2.0dBにおいてBER(ビット誤り率) = 10^{-4} 以下を達成できることが確認されている⁽⁹⁾。同期における最尤位相誤差推定の理論上の下界を図4に示す。

この図に示すようにCNR = 2.0dBの際に必要な位相推定の許容誤差から見てプリアンブル(既知信号)長は137シンボル必要であり、非常に長い既知信号が必要であることが分かる。つまり、高い誤り訂正能力を発揮するために冗長な既知信号が周辺回路のために必要となり、情報の期待値が大幅に低下する問題を引き起こす。この問題に対する解決策として、筆者らは、LDPC符号の繰り返し復号から出力される軟判定情報を用いて繰り返し回数ごとに誤差量を推定し、その補正を行うことによりプリアンブルを用いずに同期を行う提案を行っている⁽⁹⁾。この方法は、Hagenauerらが提唱したターボ原理⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾をLDPC符号を用いて応用したものであり、この手法が周辺回路の高性能化を実現する一つのアプローチ法と考える。

しかしながら、これらの方法により計算量は誤り訂正符号単体の場合に比べ大幅に増加するため、実システムの実装の際にはこれらの問題の解決が不可欠となる。

6. む す び

以上の現状によりLDPC符号には期待できる性能向上の可能性は大きいものの実システムにおける課題も多く、これらの課題をStep by Stepで解決していく必要がある。しかしながら、近年LDPC符号への注目度が高まる中、多方面からの研究が活発化しており、“通信路容量に接近する通信システム”の実用化へ向け着実に前進している。

参 考 文 献

(1) Gallager, R. G. : Low-density parity-check codes, IRE Trans. Inform. Theory, **IT-8**, 21~28 (1962- 1)
 (2) Richardson, T. J., et al. : The capacity of low-densi-

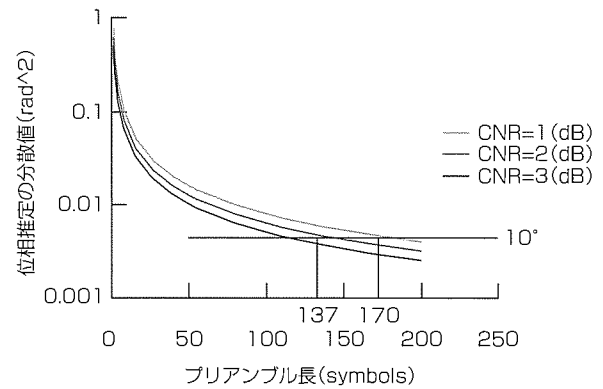


図4. 最尤位相誤差の分散値vs.プリアンブル長

ty parity-check codes under message-passing decoding, IEEE Trans. Inform. Theory, **47**, No.2, 599~618 (2001- 2)

(3) Kou, Y., et al. : Low Density Parity Check Codes Based on Finite Geometries : A Rediscovery, ISIT 2000, Sorrento, Italy, 200 (2000-6)
 (4) Fossorier, M. : Quasi-Cyclic Low Density Parity Check Codes, ISIT2003, Yokohama, Japan, 150 (2003-6, 7)
 (5) Yang, M., et. al. : Lowering the Error-Rate Floors of Moderate-Length High-Rate Irregular LDPC Codes, ISIT 2003, 237 (2003-6, 7)
 (6) 和田山正 : LDPC符号の基礎とその復号法, トリケブス社 (2002)
 (7) Matsumoto, W., et al. : LDPC Coded Hybrid Type II ARQ System, WPMC2003, Yokosuka, Japan, V1-109~V1-112 (2003-10)
 (8) Chen, J. : Reduced Complexity Decoding Algorithms for Low-Density Parity-Check Codes and Turbo Codes, Ph.D thesis (2003-12)
 (9) 松本 渉, ほか : 低密度パリティ検査(LDPC)符号を用いたブラインド同期方式, 電子情報通信学会論文誌(B), **J86-B**, No.10 (2003-10)
 (10) Hagenauer, J. : The Turbo Principle ; Tutorial and State of the Art, Proceedings International Symposium on Turbo Codes and Related Topics, Brest, France, 1~11 (1997- 9)
 (11) Hagenauer, J. : The Turbo Principle in Mobile Communications, Invited Plenary Talk at the 2002 ISITA, XI' AN, Peoples Republic of China (2002)

IHクッキングヒーターのキー技術

Developing Key Technology of IH Cooking Heater

Kunihiko Kaga, Ikuro Suga, Masao Morita, Noriyuki Matsubara, Jun Bunya, Satoshi Nomura

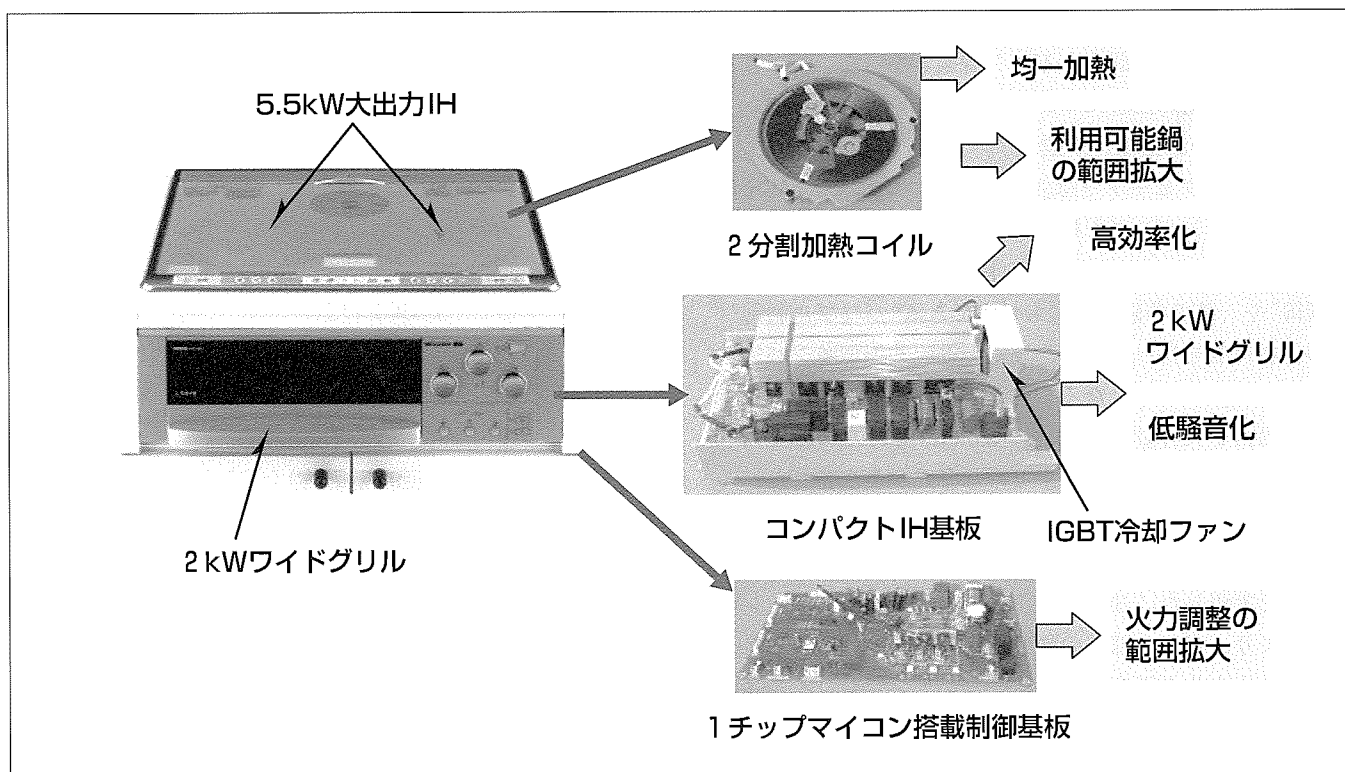
要 旨

三菱電機が2003年9月から順次発売した新型のビルトインIH(Induction Heating)クッキングヒーターCS-G3203シリーズは、様々な要素技術を投入して、業界ナンバーワンの2kWワイドグリルロースターとトータル5.5kWの大容量化(IHヒーター部)を実現した。また、利用可能鍋(なべ)の範囲や火力調整幅の拡大、均一加熱の実現、低騒音化といった機能・性能の拡充も図った。

ワイドグリル実現のため、インバータ回路基板においては、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)周辺の大電流パターンの解析によるパワー部品の高集積化などにより、従来の2枚基板を1枚基板に収め、従来面積比44%という大幅な小型化を達成した。同時に、IGBT回路を基板中央に集中させ冷却を効率的に行うとともに、筐体(きょうたい)換気ファンをシロッコファンからプロペラファンに変

更し低騒音化も実現した。また、高速処理16ビットマイコンを採用してマイコンを従来の3つから1つに集約し、1つのマイコンからダイレクトにHVIC(High Voltage Integrated Circuit)を制御することにより回路簡素化と大幅な部品点数の削減を実現した。

加熱制御の高度化については、IGBTのターンオン時に零電圧スイッチング技術を適用し、IGBTのスイッチング損失を低減し高効率化を図るとともに、湯沸かしモードとして3kWの最大火力を得るため新規のPWM(Pulse Width Modulation)制御方式を採用した。また、IH回路と加熱コイルの仕様最適化により利用可能鍋の範囲を拡大し、さらに、電磁界解析や伝熱解析技術を駆使し、加熱コイルの分割最適化による均一加熱の実現を図った。



2 kWワイドグリルIH実現のための要素技術

今回開発したIHクッキングヒーターでは、IH基板のコンパクト化と1チップマイコン搭載制御基板の採用によりグリルの実装スペースを確保し、業界初の2kWワイドグリル搭載を実現した。同時に、IGBT冷却方式の見直しによりファン騒音の低減を図った。また、加熱コイルの分割最適化により均一加熱を実現した。さらに、火力制御においても独自の方式を採用し、高効率化を図るとともに、利用可能鍋の範囲拡大や火力調整の範囲拡大を実現した。

1. ま え が き

IHクッキングヒーターは、炎を使わない安全性と清掃性が評価され、市場が急速に立ち上がってきている。2003年度では全需が約51万台(当社調べ)となっており、電力会社による“オール電化”戦略やキッチン的高级化に伴い、新規のシステムキッチンにおけるIHクッキングヒーターの装着率は約25%(当社調べ)となっている。特に、一体化して設置するビルトイン型(3口)は、IH需要全体の約80%を占めるまでになっている。当社としては市場を更に広げることと業界の中でしっかりした位置を占めるためにも一番のメインである3口のビルトイン機種をフルモデルチェンジし他社との大幅な差別化を図るため、“2kWハイパワーワイドグリル”と高い加熱効率(約88%)などIHの基本性能を向上させたビルトイン型IHクッキングヒーターを開発した。ワイドグリルは、水を張らない両面焼きヒータータイプであり、25cmの大型ピザも焼けるように幅約33cm×奥行約30cm×高さ約11cmと大型化し、ヒーター出力も上下ヒーター同時通電可能として、合わせて2kW出力に高火力化した。

2. 実装基板の小型化技術

今回、新たに開発したワイドグリル搭載IHクッキングヒーターの実現に当たっては、回路実装基板のコンパクト化が重要で、特にインバータ基板の小型化とマイコン回路の簡素化は避けて通れない不可欠課題となった。以下に、これらの取り組み内容について述べる。

2.1 インバータ基板の小型化

IHクッキングヒーターは、左右のIHコンロで5kWを超える大容量インバータを搭載した家電製品である。また、当社製IHクッキングヒーターの特長として、鍋の“均一加熱制御”や一部の非磁性鍋にも対応できる“パワフル制御”等の付加機能を持っており、通常の電流共振型インバータに比べて損失の大きくなるモードが存在する。さらに新機種では出力を大容量化(2.5kW→3.0kW)したため、インバータの発熱に対して、高効率な冷却方式が要求された。

このインバータ基板では、左右のインバータを同一基板上に構成し、熱源集中局部冷却方式を採用することで高効率冷却を実現した。また、IGBT周辺の大電流パターンの解析により、パワー部品の高集積化、インバータの低ノイズ化、低損失化を図るとともに、コンデンサやコイル等の大型受動部品は徹底した回路・熱解析による最適設計で小型化を実現した。IGBTドライブ回路には耐ラッチアップ特性に優れたHVICを採用し、高密度実装のほか、ドライブ条件のマッチングと保護システムの充実で信頼性をより一層高めるとともに、重量基板の反りを抑制した基板組立て技術の開発により、製品品質も大幅に向上させた。

これらの実施により、インバータ基板を従来の基板面積比44%に収めることに成功し(図1)、基板余剰スペースをグリルのワイド化に利用することで、新たな調理メニューの提供を可能とした。

2.2 マイコン回路の小型化

インバータ部や制御電源部、RH/RS(ラジエントヒーター/ロースター)制御部など複数の基板で構成されるIHクッキングヒーターは、基板ごとに制御マイコンを設けて信号のやり取りを行っていたが、高速処理16ビットマイコンを採用することによりマイコンを従来の3つから1つに集約し、かつインバータ駆動信号生成回路を始めとする信号生成回路を16ビットマイコンに取り込むことで、図2に示すように、マイコンからダイレクトにHVICを制御することが可能となり回路簡素化と大幅な部品点数の削減を実現した。また、16ビットマイコンの高速A/D処理により、電流センサ等とのインタフェース回路を削除することに成功した。

3. 低騒音化への取り組み

IHクッキングヒーターは、筐体内に蔵するIH基板や加熱コイルを冷却するために、筐体内部に冷却用空気を送る送風機を備えている。

この開発においては、2.1節に述べたようにワイドグリル搭載のために基板を1枚化して、最も発熱密度の大きいIGBT素子をIH基板上の1か所に集め、素子に固定されたヒートシンクを小型のファンにより一括して冷却する局所冷却方式を採用した。従来は、筐体内の左右に配置された

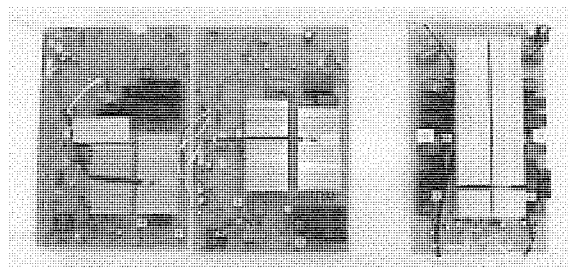


図1. 従来型IH基板(左)と開発基板(右)

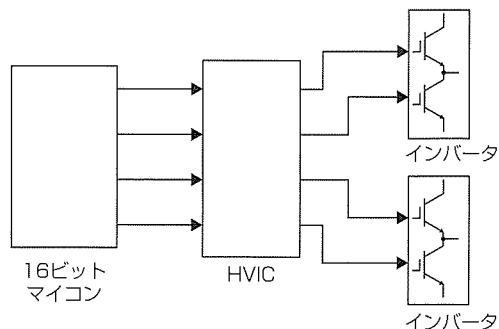


図2. IH主回路の構成

インバータ基板それぞれに冷却空気を供給する必要があるため、風路が複雑となり圧力損失も大きく、送風機としても圧力の高いシロッコファンを利用していた。今回、基板を1枚化し、素子冷却専用のファンを設置し風路が単純化できたため、筐体内の空気を入れ替える換気用のファンは、これまで用いていたシロッコファンに比べ圧力が低いが騒音の小さいプロペラファンに変更することが可能となった(図3)。また、ファンモータの電源をDC(Direct Current)化し、火力に応じてファンの回転数を変更する制御を行い、弱火モードで35dBを達成した。

4. 加熱制御の高度化

4.1 使用可能鍋と火力制御の範囲拡大

今回開発のIHクッキングヒーターは、図4に示すハーフブリッジ型電流共振インバータ方式を採用している。電力用スイッチング素子にはIGBTを用いており、共振回路は、共振コンデンサと加熱コイルと鍋とで決まるインダクタンスにより直列共振回路を形成し、電流共振モードで動作する。回路インダクタンスは、鍋の材質、鍋径、鍋位置、鍋底の形状や鍋底の反りなどにより変化したが、鍋径12cm以上の鍋であれば正常に動作するよう、インダクタンスの広い変化範囲に対応可能な加熱コイル巻き数と共振コンデンサ容量の組合せの最適化を行った。鍋検知により、12cmより小さい鍋やナイフやフォーク等の小物を誤って加熱しないようにした。使用可能な鍋においても、小さいサイズの鍋に対しては火力が入り過ぎないように制御した。また、高効率加熱を実現するために、IGBTのターンオン時に零電圧スイッチング(Zero Voltage Switching: ZVS)

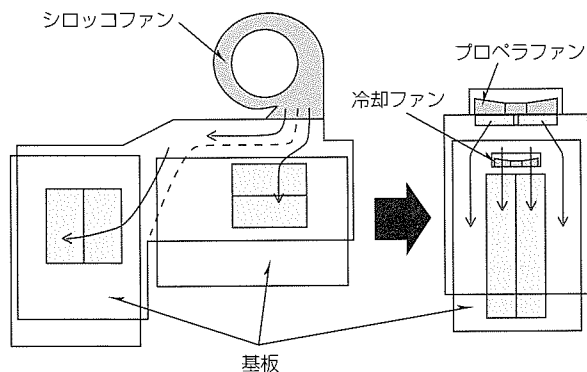


図3. 風路構成の改善模式図

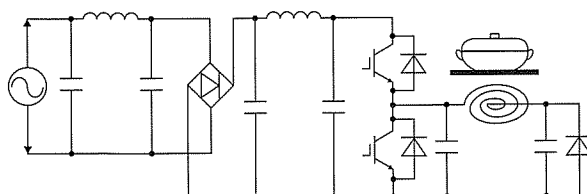


図4. IH主回路の模式図

技術を適用し、IGBTのスイッチング損失の低減を図った。

火力の制御は、高火力モード、通常火力モード、低火力モードの3つの制御モードをとり、高火力モードでは、右コンロにおいて湯沸かしモードとして3kWの最大火力アップを図るため、新規のPWM制御方式を考案した。これに加えて、左右のIHコンロ間で干渉音が発生しない制御方式を採用した。従来は最小300Wまで連続加熱であったが、120Wの低火力時にも焦げ付きを抑える連続加熱方式を実現した(図5)。これにより、煮込み調理においても鍋底が焦げ付き難くなった。

4.2 均一加熱技術

当社では、鍋底をなるべく均一に加熱するために、径方向に2分割した加熱コイルを採用している。コイルの設計には、三次元電磁界解析と、鍋内の伝熱解析を駆使した。加熱コイルの下側に放射状に配置したりターンヨーク(フェライト)を、周方向の均一加熱の観点から8本とした。

周方向の対称性を考慮し1/16モデルとして解析した。図6に均一加熱コイルを用いた場合の発熱密度分布を、図7に均一化されていない加熱コイルを用いた場合の発熱密度分布を示す。加熱コイルを径方向に2分割すると、分割しない場合と比べて鍋底の広い範囲が発熱している様子が分かる。ここで得られた発熱密度分布を用いて鍋内の伝熱解析を実施し、加熱コイルの配置が鍋の温度分布に与える影響を求め、加熱コイルの最適設計を行った。

均一加熱技術の採用により、鍋の局所発熱が低減され温度むらが小さくなり、ホットケーキや卵焼きに焼きむらが生じにくくなる。また、湯沸かし時に水泡が鍋底全体から発生し、食材を茹(ゆ)でる場合に違和感なく調理できる。

5. むすび

基板実装技術や制御方法の抜本的見直しと、風路、ファン、加熱コイル配置などの刷新を行い、2kWワイドグリルを搭載した大出力の新型ビルトインIHクッキングヒーターを開発した。

回路基板関係では、IGBT周囲の電流パターン解析に基づく部品配置最適化やドライブ回路の高密度実装化などにより従来の2枚基板を1枚化し、IH基板の占有面積44%化を達成するとともに、制御マイコンを従来の3チップか

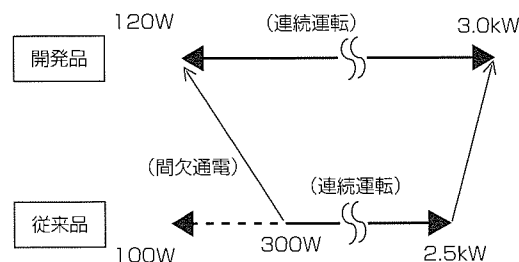


図5. 火力制御範囲の拡大模式図

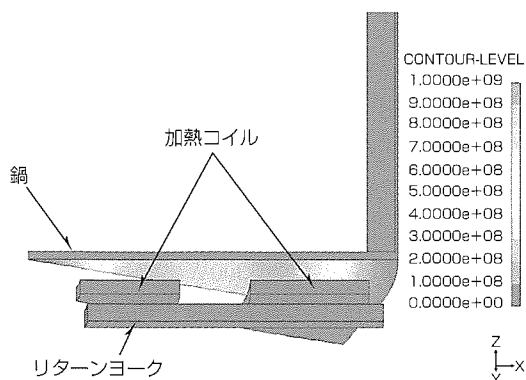


図6. 均一加熱コイルによる鍋の発熱密度分布

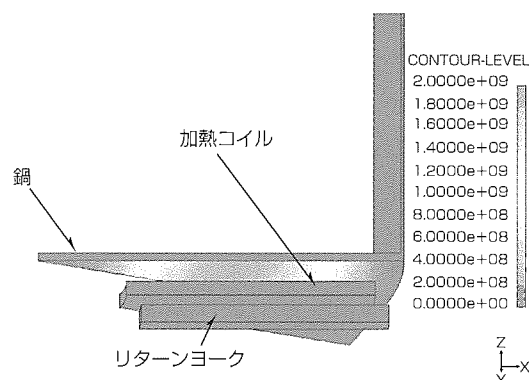


図7. 均一化されていない加熱コイルによる鍋の発熱密度分布

ら1チップにする回路簡素化を実現し、グリル実装スペースを確保した。また、IGBTの集中冷却と換気ファンの仕様変更により調理時の低騒音化を実現した。

加熱制御の関係では、PWM制御の採用により最大出力を増加させるとともに、連続運転可能な火力の調整範囲を拡大し、煮込み時の鍋の焦げ付きを防止した。さらに、加熱コイル巻き数や配置及び共振コンデンサ容量を最適化することで、形状寸法や材質が多様な鍋での利用が可能とな

った。また、三次元の電磁界解析及び伝熱解析を駆使して分割加熱コイルの設計を行い、調理時の焼きむらなどが生じにくい均一加熱を実現した。

参考文献

- (1) ビルトイン型IHクッキングヒーター, 三菱電機技報, 78, No.1, 22 (2004)

IHクッキングヒーターの新調理機能

中野真理子* 梶島山青***
木下広一** 前島成人†
中村 宏**

The New Functions of Induction Cooking Heater

Mariko Nakano, Hirokazu Kinoshita, Hiroshi Nakamura, Takaharu Kabashima, Shigeto Maejima

要 旨

三菱電機が2003年9月に発売した新型ビルトインクッキングヒーターCS-G3203シリーズでは、ユーザーの利便性向上のために様々な新機能を搭載した。主な機能の特長は次のとおりである。

(1) 天面操作

実ユーザーの意見を取り入れ、“腰をかかめずに火力調節が行え、インテリア性の高い天面操作”を実現した。

(2) お知らせ液晶

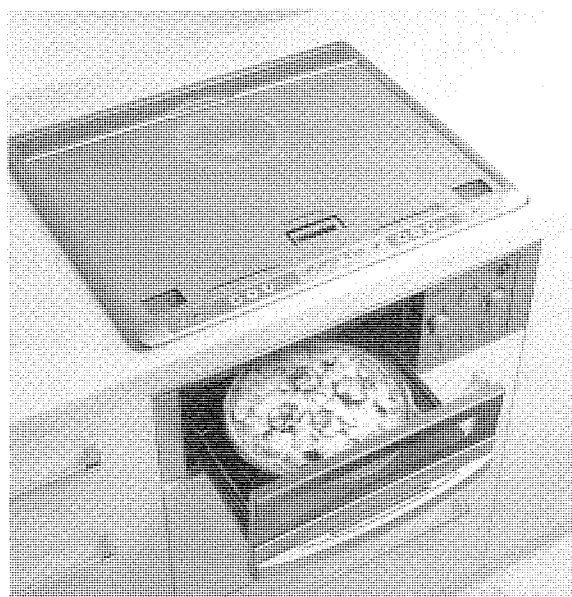
他社に先駆けて機器自体にメッセージ表示機能を搭載し、使用時の分かりやすさを向上させた。

(3) 温度プロファイル制御

油や水などの加熱により生じる物理現象とサーミスタ温度変化の相関検討結果に基づいた加熱制御方法を開発し、揚げ物制御の油温制御精度と湯沸かし制御の沸騰検知精度を向上させた。

(4) 無臭ワイドグリル(SC(Self Cleaning)コート)

新型IH(Induction Heating)クッキングヒーター用ロースターの内面コーティングに新たに触媒を含有する脱臭塗料を適用し、自動空焼き機能を設けることで、調理で付着する汚れと臭いを分解できるようにした。



ハイグレードタイプ(CS-G3203BDS)



スタンダードタイプ(CS-G3203BS)

IHクッキングヒーターの外観

今回開発したIHクッキングヒーターでは、天面に火加減調節とグリル調理操作機能、さらに初めてIHクッキングヒーターを使うユーザーにも分かりやすいお知らせ液晶を配置した。また、従来右IHのみに搭載されていた揚げ物制御を左右のIHに展開し、右IHに搭載された湯沸かし制御とともに検知精度を向上させた。さらに、2kWのハイパワーワイドグリルには脱臭塗料を塗布しグリル内の汚れや臭いの分解を可能にした。

1. ま え が き

IHクッキングヒーターは、火を使わないので高齢者にも安全であること、油の飛び散りが少なくフラットパネルで清掃が容易であることから、需要が拡大している調理機器である。調理機器としてはまだ新しく、ユーザーがより使いやすい機器となるように様々な機能開発を行っている。

本稿では、ユーザーの利便性向上のための新調理機能を紹介する。2章ではユーザーの使い勝手を向上させた天面操作、3章ではユーザーの操作と機器動作にかかわる内容を表示するお知らせ液晶、4章では機器動作のうちの左右IHに搭載された揚げ物機能と右IHに搭載された湯沸かし機能、5章ではグリルの油や臭いを分解する無臭ワイドグリルについて述べる。

2. 天面操作

2.1 天面操作への背景

新製品の開発に当たり、操作性の向上を図るため、従来前面にあったダイヤル火力調節を見直すこととした。現行製品の操作性評価により、“操作を天面で行うことは、腰をかがめて火力調節をする動作をなくして作業性・操作性を改善させると同時にインテリア性が高い”という結論を導きだし、これを目標として、設計・デザインを行った(図1)。

2.2 天面操作の仮説検証とレイアウト検討

(1) 一般主婦による現行製品での調理実験

火加減調節の頻度と調理に対する操作分析調査の結果、調理中に中火領域で頻繁な火力調節を行っており、中火領域の調節ピッチを細分化した。

(2) 動作モデルによる検証

IH調理器特有の使い方を調査した結果、火力表示と調節スイッチの連動性を高めたインタフェースが重要である

ことが分かり、パソコンを利用した動作シミュレーションで有効性を検証した。

(3) デザインモデルによるレイアウトの検討

火力調節手段であるプッシュスイッチとダイヤルの配置・組合せバリエーションモデルを作成し、調理作業に支障がなく清掃性の点からもフラットなプッシュスイッチの構成に決定した。

2.3 操作パネルの特長

(1) 天面スイッチレイアウト

火力調整スイッチを天板の中央前部に集約させ、調理中の頻繁な火力調節へ対応ができるようにした。また、各スイッチのグルーピングと印刷色の変化により使用頻度の高いものの分かりやすさを向上させた。このように設定・調節を天面で行えるようにしたことで高齢者にも優しい設計となった。

(2) 火力状態表示レイアウト

従来製品では印刷された火力レベルに対し発光ダイオードによる点状発光部の移動により火力の加減を可変表示していたが、新製品では、火力調節範囲をすべて発光させ、火力を上げると発光色を青から赤に変化させながら増幅する仕様とした。相対的に火力を表示させることにより、設定火力の視認性を高めることができた。

3. お知らせ液晶

ユーザーの大半がガスレンジから移行した人であるため、IHクッキングヒーター特有の動作や注意事項についてユーザーの抱くイメージと実際は異なることが多い。取扱説明書に説明が書かれていても実際に開いて確認するケースは少なく、また、正常動作であるにもかかわらず、製品の多機能化に伴い使用方法に関する問い合わせが年々増え続けている。このため、他社に先駆けて機器自体にメッセージを表示する機能を搭載し、使用時の分かりやすさを向上させた。

IHクッキングヒーターを使用する上で、ガスレンジとは異なる代表的な特徴は下記3点である。

- 鍋(なべ)を置かないと火力が入らない(鍋なし検知機能)。
- 機器の最大火力に上限がある(全ヒーターを最大火力で動作させることはできない。デマンド機能)。
- 一定時間操作されないと加熱を自動的に停止する(消し忘れ防止機能)。

いずれも安全に関連する機能である。過去のユーザーからの問い合わせや取扱説明書に記載する注意事項からキーワードを抽出し、誤解を招かないような表示内容を設定している。

一例を挙げると、アルミ鍋等、加熱に適さない鍋で加熱しようとした場合、火力レベル表示部が点滅表示になる。

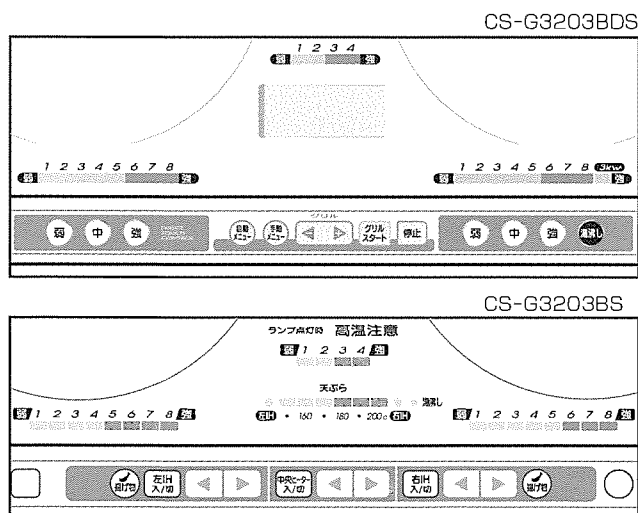


図1. 天面操作部の詳細

ユーザーが加熱できる鍋であると認識していた場合、この点滅表示は故障をイメージさせる。これを避けるため、お知らせ液晶に“なべが適していません”とIHヒーターの位置と一緒に表示するようにしている。図2に実際の表示例を示す。

4. 温度プロファイル制御

4.1 開発の背景

この制御は、サーミスタ検知温度変化のプロファイルを基に鍋底反り量と被加熱物である油や水の量を推定し、揚げ物制御や湯沸かし制御の補正手段を提供する。

4.2 シミュレーションによる検知方法検討

(1) シミュレーションモデル概要

IHクッキングヒーターの構成及び加熱動作を二次元熱回路網としてモデル化し、シミュレーションで伝熱現象を分析した。被加熱物、鍋、ガラス製トッププレート、コイル、台座、サーミスタ、また、鍋底に反りがある場合は鍋底とトッププレートの間にある空気層をモデル化した。コイルの発熱密度や台座への冷却風の影響など実機動作環境を組み込み、実機試作前に十分な事前検討を行うことができるように構成した。このモデルで被加熱物量、鍋底反り量などをパラメータとしてシミュレーションを行い、サーミスタ検知温度変化に対する鍋底反り量や被加熱物量の影響を検討した。

(2) 鍋底反り量検知

鍋底反り量によるサーミスタ検知温度の変化の差は、鍋底からサーミスタまでの熱伝導の差に起因する。同一反り量であれば、被加熱物量によらずサーミスタ温度変化傾向が同一となる区間が存在することを確認した。また、鍋底反り量を検知できる最適なタイミングは鍋反り量によらず一定だったので、鍋反り量の検知タイミングは1回で十分であることも確認した。

(3) 被加熱物量検知

被加熱物量によるサーミスタ検知温度変化の差は、被加熱物の熱容量の差に起因すると考えられる。鍋底反り量とは異なる領域で被加熱物量によるサーミスタ温度変化の差が明確に現れる区間があることを確認した。また、被加熱物量により最適な検知タイミングが異なっていたため、検知タイミングを複数回設けて検知精度を確保した。

(4) 温度補正

鍋底反り量と被加熱物量を検知すると、揚げ物制御と湯

沸かし制御のそれぞれに対して被加熱物の温度とサーミスタ検知温度の差から所定の温度(以下“制御温度”という)の補正量を算出し、各制御の補正を行う。

4.3 実機制御の特長

(1) 揚げ物制御

揚げ物制御の目的は、鍋底反り量や油量によらず油温を精度良く設定温度に到達させ(以下“予熱”という)、調理開始まで油温を維持することである。

従来は、鍋底反り量や油量の差異にかかわらずトッププレートの下に設置されているサーミスタ検出温度と制御温度との比較により火力レベルや加熱時間を制御していたため、油温が設定温度と異なる場合があった。温度プロファイル制御を行い精度良く設定温度に制御できるようになった。

また、左右どちらのIHでも揚げ物が行える仕様とするために、制御温度の補正量は、左右で独立して持たせ、左右個別又は左右同時に揚げ物を行っても適正な制御ができる。

(2) 湯沸かし制御

湯沸かし制御では、水量によらず湯が沸騰するとすぐユーザーに報知することが望ましい。

従来は、鍋に投入される火力とサーミスタ検知温度の変化に関係し水量によって変化する見掛けの熱容量により制御していたが、この値よりも先に検知される鍋反り量と水量検知を追加することで、特に水量が少ない場合や鍋の反り量が大きい場合の沸騰検知精度を向上させた。また、この推論によって安全上の問題がないことを確認した段階で火力レベルを最大値まで引き上げ、沸騰までの時間を短縮することも可能にした。

5. 無臭ワイドグリル(SCコート)

新型IHクッキングヒーター用ロースターの内面コーティングに、新たに触媒を含有する脱臭塗料を適用した。この脱臭塗料を塗布した試験片を用いて、アンモニアガスの脱臭性能及びサラダ油の分解性を測定した。

(1) 脱臭性能

試験片をガラス容器中に保管し、所定濃度になるように容器中にアンモニアを封入し、アンモニアの濃度変化を検知管を用いて測定した。試験結果を表1に示す。人間の嗅覚(きゅうかく)で感知できない濃度になれば脱臭できたと考え、アンモニア濃度の認知閾(しきい)値である0.1ppm⁽¹⁾

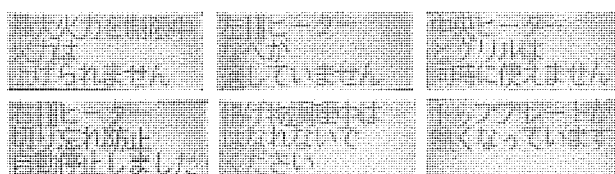


図2. お知らせ表示

表1. 試験片によるアンモニア分解性能

温度		270℃	300℃
初期濃度		180ppm	180ppm
時間	5分	20ppm	検知せず
	10分	1ppm	検知せず
	20分	検知せず	-

になる温度と時間の関係を検討した。その結果、塗装面温度が270℃以上であれば約10分でほぼ完全に除去できることを確認した。

また、試作調理器を用いた“さんま”40匹の連続調理後のアンモニア濃度は1ppm以下と低く、空焼きを行うことによってロースター庫内のアンモニア濃度は0.1ppm以下になることを確認した。

(2) 油分解性

塗装試験片にサラダ油を10～20mg滴下し加熱試験前後での質量変化により油分解性を評価した結果を図3に示す。

270℃以上に加熱することにより数分で油分が分解・固化し、付着面から剥離(はくり)しやすい状態に変化する。以上の結果から、クッキングヒーターのセルフクリーニング機能を用いることにより庫内の清掃が容易になった。

6. む す び

ユーザー利便性向上として、新機能搭載や従来機能の性能を向上した新型ビルトインIHクッキングヒーターを開発した。

新しく搭載した機能お知らせ液晶は、ワイドグリルの操作メニュー表示を含め、調理器としての使いやすさや調理の楽しさを提供するようなユーザーインターフェースとして、

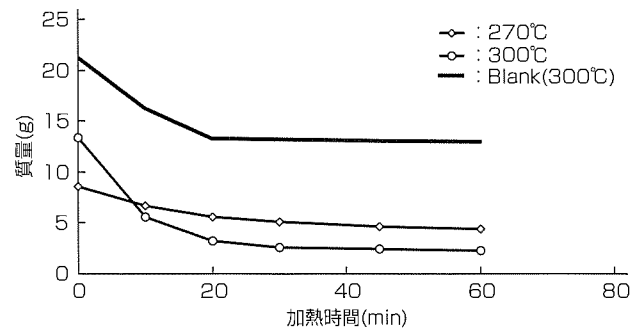


図3. 試験片によるサラダ油の分解性評価

市場からの要求に対応しながら発展するものとする。

また、従来機能の改良例である揚げ物制御では、ユーザーが火加減を調節する場合と違い、保温制御は急激に火力を増加しないため油温の上昇速度が緩やかであり、食品負荷を投入したときの油温の復帰が遅いという使用感がある。今後は、油温が低下し復帰するまでの時間を短縮させ油温復帰性能の向上を図り、より使用感の良い温度制御とした。

参 考 文 献

- (1) 悪臭法令研究会編, ハンドブック悪臭防止法, 三訂版, 424～425 (1999)



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

洗浄能力評価方法 特許第3031053号(特開平5-291225)

発明者 藤野直彦

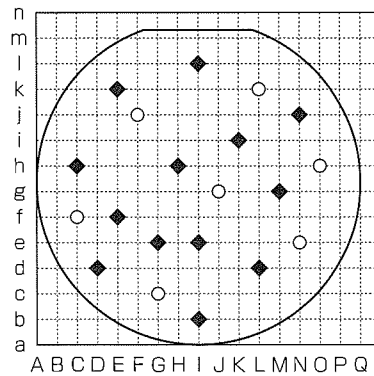
この発明は、光学式異物検査装置等を用いて半導体ウエハ等の基板洗浄の洗浄効果や不具合状況を定量的に評価する方法に関するものである。

従来の半導体ウエハ等の洗浄特性を評価する方法は、光学式異物検査装置を用いて、洗浄前後で同一ウエハ上に検出された異物の増減数で評価されていた。

ところが、ウエハ上に検出される個々の異物の洗浄に伴う変化の解析には不向きで、どの異物が洗浄されたか、洗浄されなかったか、又は、洗浄によって汚染されたかの判断ができなかった。

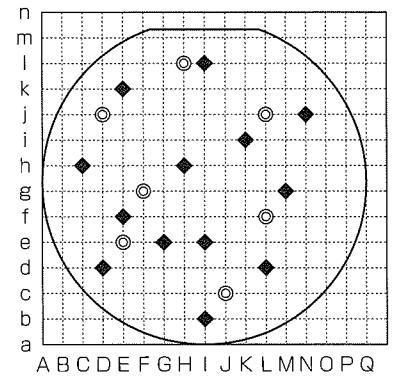
この発明は上記の欠点を解決するためになされた方法で、光学式異物検査装置を用いて、同一ウエハに対し図1、図2に示すような洗浄前後における異物マップを採取し、両異物マップ上の各異物の位置を比較することで、各異物に対する洗浄特性を評価するものである。①洗浄前の異物マップのみに検出された異物は洗浄された、②洗

浄前後で検出された異物は洗浄されなかった、③洗浄後にみに検出された異物は汚染された、と3種類の異物に分類できる。洗浄された異物の数と洗浄されなかった異物の数から洗浄効果が、汚染された異物の数から洗浄の不具合状況が定量的に把握できるのが分かる。



○：洗浄された異物
◆：洗浄されなかった異物

図1. 洗浄前の異物マップ



◆：洗浄されなかった異物
◎：汚染された異物

図2. 洗浄後の異物マップ

製品搬送用ハンド 特許第3002604号(特開平5-338794)

発明者 藤野直彦

この発明は、シリコンウエハに傷等のダメージを与えずに保持できるようにした搬送用ハンドの構成に関するものである。

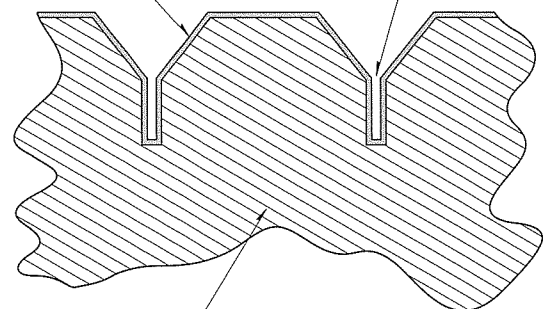
従来の搬送用ハンドは、モース硬度7の石英ガラスで構成されていた。ところが、石英ガラス製の搬送用ハンドは、モース硬度7のシリコンウエハをハンドリング(保持)する際の接触摺動(しゅうどう)に伴い、ウエハ表面に傷(マイクロクラック、結晶スリップ)を発生させるという課題があった。

この発明は上記の課題を解決するためになされたもので、図に示すように、少なくともシリコンウエハと搬送用ハンドの当接する溝部分の材質をモース硬度2のテフロン(デュボン社の登録商標であり、テトラフルオロエチレン樹脂、パーフロロアルコキシ樹脂、ふっ化エチレン樹脂とその混合物)又は、モース硬度7未満のボロンないし、りんをドーパした石英ガラスとしたものである。搬送用ハンドのシ

リコンウエハと当接する溝部分のモース硬度が7未満となったため、ハンドリングに伴う摺動が発生しても、モース硬度7のシリコンウエハ表面には、傷が発生しなくなる。

テフロン又はモース硬度7以下のボロンないし、りんをドーパした石英ガラスのコーティング層

シリコンウエハを保持する搬送用ハンドの溝部分



搬送用ハンドの支持材



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは
三菱電機株式会社 知的財産渉外部
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

半導体洗浄装置及び方法、ウエハカセット、専用グローブ並びにウエハ受け治具 特許第3110218号(特開平6-267919)

発明者 大森雅司

この発明は、半導体ウエハを洗浄するウエット洗浄装置における洗浄装置の小型化と、処理能力向上のための装置構成とその運用方法に関するものである。

従来の洗浄装置では、ウエハカセットの搬送の際、ウエハカセットの側壁ないし底部をカセットハンドで把持していた。ところが、ウエハカセットの側壁ないし底部を把持していたため、処理槽内にカセットハンドを挿入する必要があり、処理槽の小容積化等による装置の小型化には不向きであった。

この発明は上記の課題を解決するためになされたもので、図1に示すように、洗浄に供するウエハカセットの形状を

ウエハの直径より高い支持板に取っ手を形成した構造とし、ウエハカセットの把持に必要な作業空間を洗浄槽の外(上部)に設けたものである。これにより、カセットハンドを濡(ぬ)らすことなくウエハカセットの搬送ができ、従来必要であったカセットハンド専用洗浄槽及び乾燥槽、並びに処理槽内の作業空間を省略した。また、図2に示すように、ウエハカセットの設置可能箇所の1か所以上を空きとし、順次空き場所にウエハカセットを搬送することで、1台のカセットハンドでウエハカセットの移動を実現したものである。これらの方法により、小型で処理能力の優れた洗浄装置が実現される。

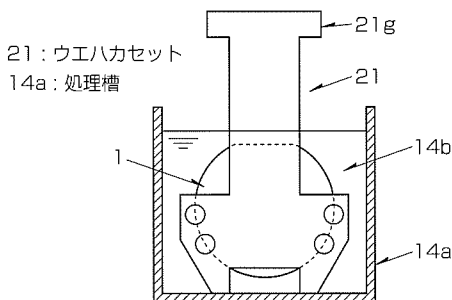


図1

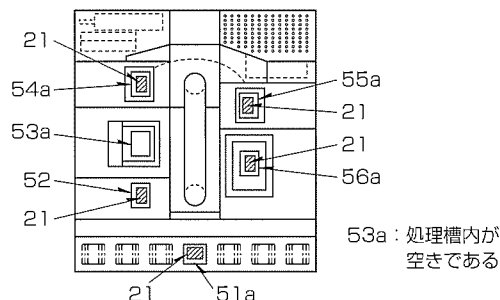


図2

〈本号記載の商標について〉

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.78 No.8 特集「物理セキュリティ」

三菱電機技報編集委員 委員長 三嶋 吉一 委員 小林 智里 長谷川 裕 堤 清英 榎原 幸志 村松 洋 松本 修 浜 敬三 藤原 正人 中川 博雅 瀬尾 和男 部谷 文伸 黒畑 幸雄 山本 比呂志 事務局 松本 敬之 本号取りまとめ委員 下村 哲朗	三菱電機技報 78巻7号 2004年7月22日 印刷 (無断転載・複製を禁ず) 2004年7月25日 発行 編集人 三嶋 吉一 発行人 松本 敬之 発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&サービス事業部 〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号 日本地所第一ビル 電話 (03)3288局1847 印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス 発売元 株式会社 オーム社 〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話 (03)3233局0641 定 価 1部735円(本体700円)送料別
URL http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/	三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.giho@ml.hq.melco.co.jp

〈訂正〉

第78巻6号(2004年6月)目次に掲載の「超微細ナノリソグラフィ」の筆者を右記のとおり訂正いたします。(正)炭谷博昭←(誤)岸谷博昭

スポットライト 配電線特性測定分析装置

高速電力線通信モデム装置は、配電線及び電灯線を伝送路として使用する有線通信装置です。

配電線及び電灯線には分岐が多数あり、ブレーカ等が設置され、中性線の不平衡配線も存在しています。このためインピーダンス不整合等が発生し、反射等による減衰が1～30MHzの間に30～60dBのレベルで現れることがあります。

このような伝送特性の通信路に適応した高速電力線通信モデムの開発を支援するために、配電線特性測定分析装置を開発しました。

図は、配電線特性測定分析装置の構成を示したものです。測定用波形発生プログラムを内蔵したパソコン、任意波形発生装置、信号注入用結合器、信号受信用結合器、デジタルオシロスコープ、データ分析&特性表示プログラムを内蔵したパソコンで構成され以下のような特長を持っています。

特長

(1) 注入点と受信点の距離が大きく離れた線路においても測定が容易

配電線特性測定分析装置では注入点側装置と受信点側装置がそれぞれ独立しており、注入点側と受信点側の間には測定対象伝送路以外の線を必要としません。つまり、ネットワークアナライザのように注入点側と受信点側をケーブルで引き回して1つの装置に同時接続する必要がありません。そのため、距離が

離れている場所間での測定、道路を越えた2点間での測定、ビル内の違うフロア間の測定など、ネットワークアナライザでの測定が困難な場所でも測定が可能です。

(2) 測定したその場での測定結果の確認が容易

測定した伝送線路特性をその場で処理して結果をグラフィカルに表示させます。そのため、ノイズ等の有無や測定結果の妥当性をその場で判断できます。また、Microsoft Excel^(注1)形式で結果を出力するので、出力形態の変更にも柔軟に対応できます。

(3) 伝送線路特性として、減衰特性、群遅延特性、インパルス応答の取得

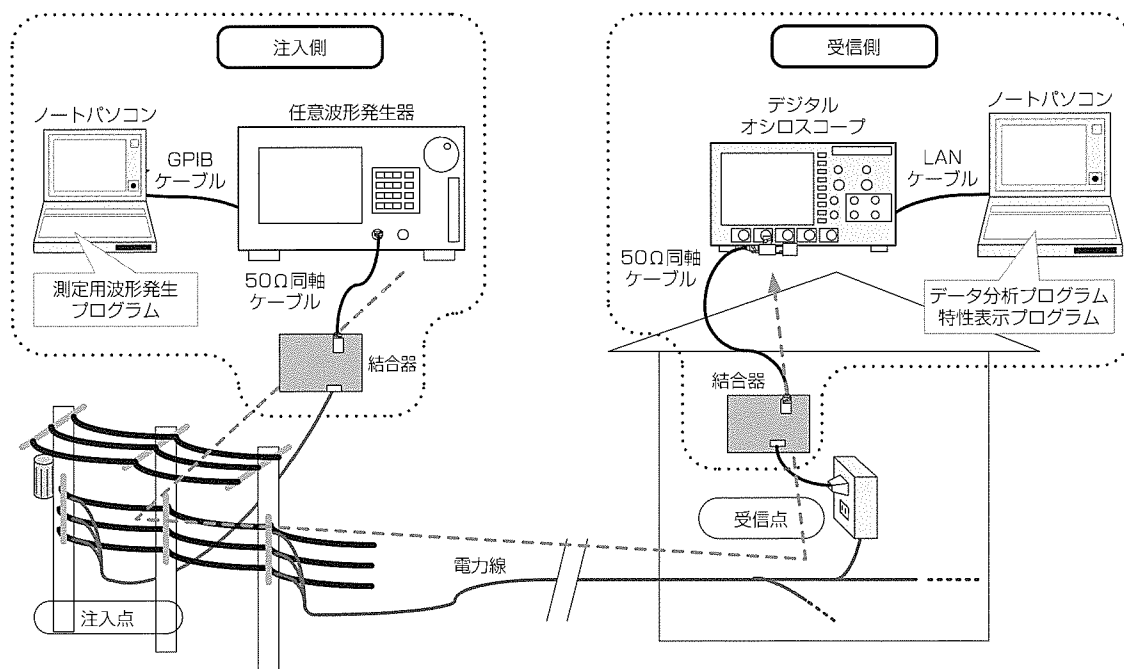
伝送線路特性として、減衰特性のほかに、群遅延特性、及びインパルス応答も同時に算出して得ることができます。

このような特長を持つこの装置により、複雑な電力線特性をフィールドで定量把握し、適切な通信周波数帯域の選定、及び性能改善のフィードバックを行い、高速電力線通信モデム開発に貢献しています。

(注1) Microsoft Excelは、米国Microsoft Corp.の米国及びその他の国における登録商標です。

配電線特性測定分析装置の仕様

測定周波数帯域	1.5～30MHz
測定周波数解像度	約60kHz
測定可能減衰特性下限値	最大80dB
測定対象	各種電力線、メタル線



配電線特性測定分析装置構成

住所：〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-2-3

会社名：三菱電機株式会社 お問い合わせ先：電力事業部電力情報通信部 TEL 03-3218-2610