

1 線式 PLC による信号中継システムの提案

Proposal of Signal Repeater by One Wire PLC system

愛媛大学
四国電力

都築 伸二
松井 隆

Shinji TSUZUKI
Takashi MATSUI

Non Member
Member

Abstract: The conventional narrowband power-line communication (NB-PLC) is a two-wire system, that have transmitted its signal between wires with a capacitive coupler. When performing communication between floors at a large-sized building, the signal has to travel over long-distances across a switchboard which supplies electricity to distribution boards. Moreover, the signal is attenuated also at the switchboard and distribution boards. Then signal amplifiers have had to be installed at the boards.

In this paper, a single wire PLC solution has been proposed to reduce the communication distance and avoid the attenuation due to the boards by taking a shortcut. It has been described experimentally that the earth could be used as its signal returning path to a source. An inductive coupler suitable to this system has been also proposed. The signal attenuation of the proposed system was 30dB better than that of the conventional two wire system according to our scenario.

Keywords: Narrowband PLC (NB-PLC), Smart grid, Single phase three wire distribution system, Capacitive coupler, Inductive coupler, Common-mode transmission system

1. はじめに

電力線通信(Power-Line Communication; PLC)システムは、既存の電力線を通信線としても使う合理的な方式である。日本で許可されている周波数は、10k~450kHz (kHz 帯と呼ぶ) および 2M~30MHz (MHz 帯)である。前者は低速であるが屋外でも利用できるためスマートグリッドへの応用が期待されている[1]。一方、後者の MHz 帯 PLC は最大 500Mbps (physical data rate. 日本の電波法の制約下では 200Mbps 程度) の通信が可能であり、ホームネットワーク用として実用化されている[2]。

いずれの周波数帯でも、Live (L) 線と Neutral (N) 線との間に PLC 信号を電圧印加する 2 線式が一般的に使われている。そのため、フロア毎に分電盤があるような大型ビルにおいてフロア間通信を行う場合、分電盤に電気を供給している配電盤、あるいはその先に接続されているトランスを経由するため長距離経路となる。また、配電盤および分電盤内でも信号が減衰するため、信号電圧を増幅するための中継装置を、分電盤や配電盤に設置する必要がある。中継装置の設置に当たっては盤内から給電

用のコンセント工事、中継器自身を設置するための工事、あるいは場合によっては一時的にビルの停電を伴うこともあり、これらのコストが課題となっている。

本稿では、このフロア間通信時の信号減衰を軽減する方策として、EPS (Electric Pipe Space)内で、フロア間を貫いて配線されている電力ケーブルを利用する方法を提案する。提案法が適用できるのは、電力ケーブルに限らず、縦方向に配線されているのであればグラウンド線などでもよい。なお、従来の PLC では電線を 2 本必要としていたが、提案法では 1 本でよい (1 線式 PLC 方式と呼ぶ) ことから工事が容易であり、また受動素子のみで構成できるので無給電の中継器が、低コストで実現できる。

本稿の対象周波数は kHz 帯、対象電力線は単相三線式の低圧電灯配電線である。本稿の構成は次のとおりである。2 章では従来型 2 線式 PLC システムの課題を述べたあと、提案するインダクティブカップリング方式とそれを用いた 1 線式 PLC による信号中継システムを提案する。3 章では、大学内 8 階建て研究棟ビルと 6 階建てのオフィスビルとで行った提案方式の検証実験の結果を述べる。4 章はまとめと今後の課題である。

2. 1 線式 PLC による信号中継システム

2.1 従来型 2 線式 PLC システム

従来の PLC システムでは、Fig. 1 に示すように、L 線と N 線の 2 線間に電圧印加することによって通信信号の伝

連絡先: 都築伸二、〒790-8577 松山市文京町 3、愛媛大学工学部、E-mail: tsuzuki@ee.ehime-u.ac.jp; 松井隆、〒7900-012 松山市湊町 6 丁目 1-2、四国電力原子力本部 原子力保安研修所、E-mail: matsui09641@yonden.co.jp

送を行ってきた。このとき、商用周波数成分を遮断するためにコンデンサを用いることからキャパシティブ・カップラ方式とも呼ばれている[3]。通信経路の途中で低インピーダンスの電気機器が並列接続されていると、図中に示すように送信器(Tx)出力電力の一部が吸収され、信号減衰が生じる。この減衰は Fig. 2 で示すように分電盤以降の支線で起こるため、支線内減衰と呼ぶ。MHz 帯 PLC の場合 20 dB 程度とされている[4]。またこれらの機器の電源回路からは雑音出力されるため、PLC 受信器(Rx)での SNR(Signal to Noise Ratio)の劣化が大きいという問題がある。

なお、この電気機器による影響を避けるためには、N-L 線間に信号を注入しなければいけなわけであり、MHz 帯ではコモンモード伝送方式[5]が、kHz 帯では N-PE 伝送方式[6]が提案されている。

さらに、フロア毎に分電盤があるような大型のビルにおいて、フロア間通信を 2 線式で通信する場合、分電盤に電気を供給している配電盤を経由するため長距離伝送となり、信号がさらに減衰するという問題がある。例えば Fig. 2 に示すような配電であれば、1-2 階間または 3-4 階間でかつ同相 (L_1 どちらまたは L_2 どちら) 通信であれば、通信経路は 2 つに分電盤を経由するのみである。

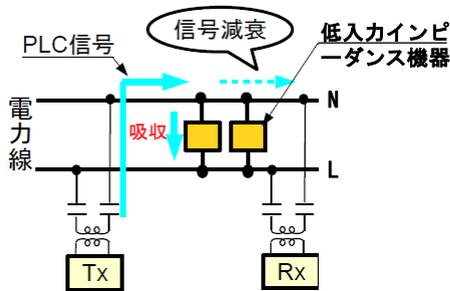


Fig.1 Conventional PLC system by capacitive coupler.

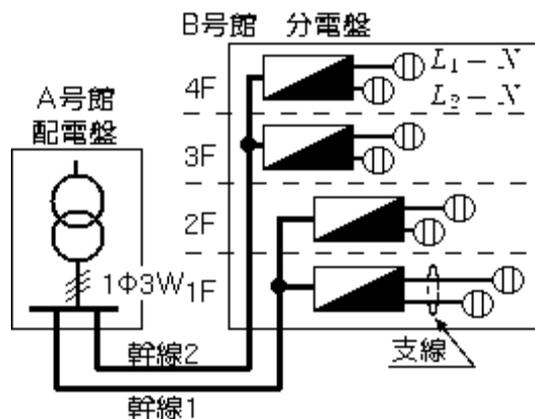


Fig.2 Example of a low voltage distribution system in a large building.

しかし同相でも、配電盤からの幹線が異なる (Fig. 2 において 2-3 階間で通信を行う場合) と配電盤のある A 号館を経由するため、通信距離が長くなってしまふ。異相 (L_1 - L_2) 間通信の場合は、階数に関わらず常に配電盤およびその先につながっている変圧器を経由する。

また、配電盤内や分電盤内でもその分岐回路数に比例して信号が減衰する。MHz 帯 PLC かつ、商用ビルの実測値の場合、上述の支線内減衰に加えて、分電盤を経由することで同相通信では 25dB、異相通信では 35dB さらに減衰量が増えることが文献[4]に報告されている。

本稿で対象とする kHz 帯 PLC では、ケーブル間の結合による PLC 信号のクロストーク効果が期待できないため、これらの値以上に信号が減衰する。このため従来の 2 線式 PLC では、信号電圧を増幅するための中継装置を、分電盤や配電盤に設置せざるを得なかった。

2.2 インダクティブカップラ型 2 線式 PLC システム

Fig. 1 に示したキャパシティブカップラが従来からよく用いられてきたが、Fig. 3 に示すように、低インピーダンス機器によってループ回路が形成される場合はインダクティブカップラのほうが有用である[3]。ただし、Fig. 1 に示したような PLC 信号の減衰は生じないものの、ループ回路が存在する場合は限定されるため、あまり一般的には用いられてこなかった。

文献[7]では太陽光発電パネル回路に、文献[3]では低インピーダンス機器の代わりにコンデンサを挿入して強制的にループ回路を形成して、インダクティブカップラを適用している。

2.3 提案するインダクティブカップリング方式

提案する 1 線式 PLC システム用のカップリング方法を、Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) が基本形であり、 L_1 と L_2 の両方の線を同一のフェライトでクランプする。PLC モデムからの信号線をフェライトに貫通あるいは複数回巻きつける

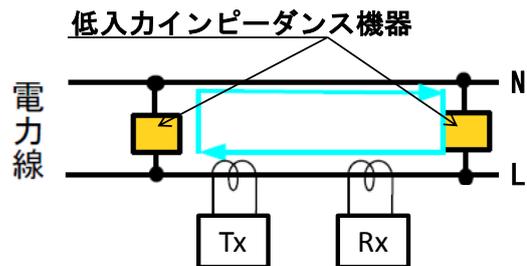


Fig.3 Conventional PLC system by inductive coupler.

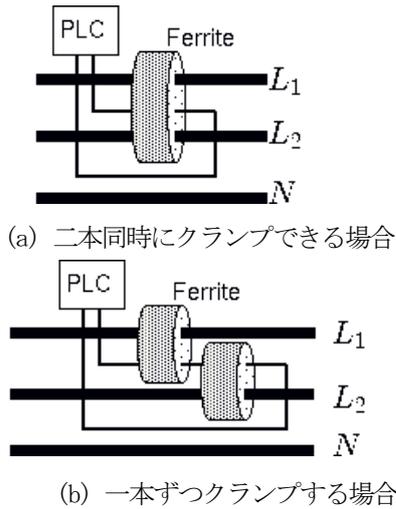


Fig.4 Proposing inductive coupling method. ($n_1:n_2=1:1$)

ことによって、巻き線比を調整する。本稿では、電力線をカプラの一次側、PLC側を二次側と呼ぶ。巻き線比は $n_1:n_2$ であり、図の場合は $n_1=1$ (固定)、 $n_2=1$ (可変) である。受信側も同じカプラを用いて、 L_1 と L_2 の両方の線に対してコモンモードで PLC 信号を送送する。

ここで、N線を使わず、 L_1 と L_2 の両方の線をクランプするのは、商用電源に重畳されたディファレンシャルモードノイズを抑圧し、また磁気飽和によるインダクタンスの低下を防ぐためであり、提案方式の特長である。

配電線の電線径が大きい場合 L_1 , L_2 の 2 本を同時にクランプできるようなフェライトの入手が困難である場合は、Fig. 4(b) に示すようにクランプしても図(a) と同等な効果が得られる。以下に述べる実験において、2 本クランプしている場合は、いずれも図(b) の方式である。

2.4 提案する信号中継システム

提案する 1 線式 PLC 方式、およびそれを用いた信号中継システムを Fig. 5 に示す。図中のトランス Tr_{11} および Tr_{12} が Fig. 4 に示したインダクティブカプラであり、 L_1 と L_2 の線に対してコモンモードで信号伝送を行う。従来のインダクティブカプリングであれば、PLC 信号の帰路用にもメタル線を使う。Fig. 3 の場合であれば N 線を使うが、 L_1 - L_2 線と N 線間のインピーダンスを小さくするためにコンデンサを挿入する等の工事を行う必要がある。

そこで、帰路には大地を用いる 1 線式を検討した。kHz 帯において電力線と大地間とは良好に静電結合していることが知られており、この特性を用いた例として非接触型接地抵抗計が実用化されている [8]。なお、関連特許 [9] によると、「線路のインダクタンスと大地との静電容量との共振現象を利用する」という説明になっているが、後

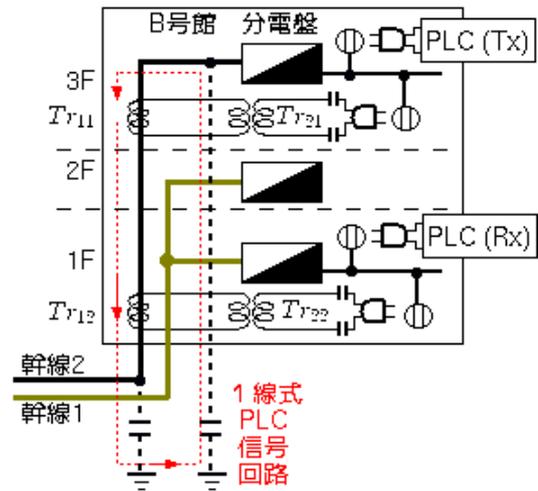


Fig.5 Signal repeating system using one wire PLC method.

述のように伝達関数を実測した限りでは鋭い共振現象は観測されず、平坦な周波数特性であった。

この 1 線式 PLC 方式を、フロア間通信に適用するために使用中継器が、Fig. 5 に示すトランス Tr_{21} , Tr_{22} である。PLC モデムの信号をキャパシティブカップリングで抽出し、インピーダンス整合を行うために巻き線比を調整した Tr_{21} または Tr_{22} を経由して 1 線式 PLC 用インダクティブカプラへ中継する。支線内の PLC モデムの信号伝送方式は、筆者らが別途提案している N-PE 方式 [6] がよいと考えているが、Fig. 3 に示した N-L 方式でもよい。

この中継器により、(1) 配電盤までの長距離伝送を行うことなく最短距離で、かつ (2) 分電盤と配電盤をバイパスできるため、これらによって生じていた信号減衰を改善できる。また、すべて受動素子で構成しているため省エネであり、 Tr_{11} および Tr_{12} をクランプ式とすれば活線状態でも手軽に設置できる、といった特長がある。

以下では、1 線式 PLC 方式の実証実験の結果を述べる。 Tr_{21} および Tr_{22} を含む中継器の評価については別途報告する。

3. 1 線式 PLC 方式の実証実験の方法と結果

1 線式 PLC 方式の実証実験を、大学内 8 階建て研究棟ビルおよび 6 階建てオフィスビルにて実施した。

3.1 大学内 8 階建て研究棟ビルの場合

クランプするケーブルの直径に応じて Table 1 に示す 2 種類のカプラ A_1 , B_1 を製作した。また、カプラの等価回路を Fig. 6 に示す [10]。等価回路の定数を求める際には、1 次側を解放したときと短絡したときのインピーダンスか

ら L_1 (励磁インダクタンス) と L_0 (漏れインダクタンス)以外の値を求め、SPICEによりシミュレート値と実験値が一致するように L_1 と L_0 を調整した。図中に $n_2=2$ のときの等価回路定数を例として示す。

Table1 Parameters of the coupler A₁ and B₁

カプラ	A ₁	B ₁
用途	細線用	太線用
フェライト内径	13mm	32mm
L ₁₁	23 μH	45 μH

L₁₁:自己インダクタンス (1 ターンの場合)

以下のインピーダンス及び伝達関数の測定には、岩通計測社 PSM1735 を用いた。なお、紙面の都合上 A₁カプラの結果は省略するが、同様に良好な結果が得られている。

当該ビルの単相3線電力の配電系統はFig. 2のとおりであり、配電盤のある建屋とは直線で40m離れている。2フロアにつき幹線ケーブルが一本あり、下のフロアで分岐してから分電盤に接続されている。本稿では、7-8階用幹線ケーブルを用いて以下の測定を行った。ケーブル(CVT)の直径は21mm、文献[8]に紹介されている接地抵抗計 MET2 で測定した当該ケーブルの接地抵抗は0.67Ωであった。使用したカプラは太線用のB₁である。

Fig. 7に、二次側巻き線数 n_2 と伝達関数との関係を示す。所望の帯域で最良の特性となった $n_2=2$ を以後の測定では用いている。このときの等価回路定数はFig. 6に示したとおりである。

Fig. 8には、ケーブルを1本のみ(N線)クランプした場合と、2本(L₁, L₂)同時にクランプしたときのノイズ電力

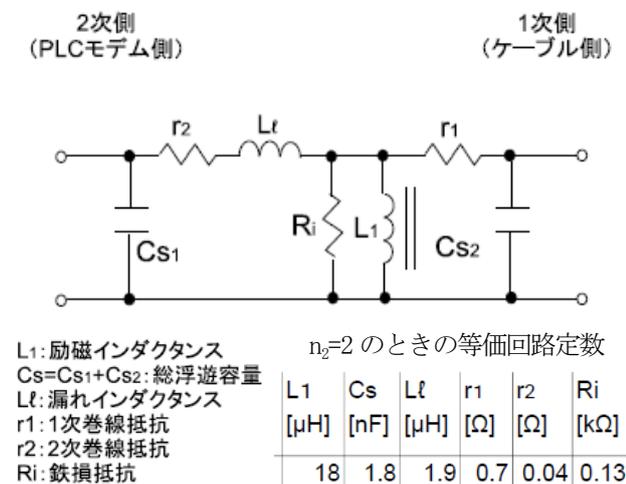


Fig.6 Equivalent circuit of the inductive coupler

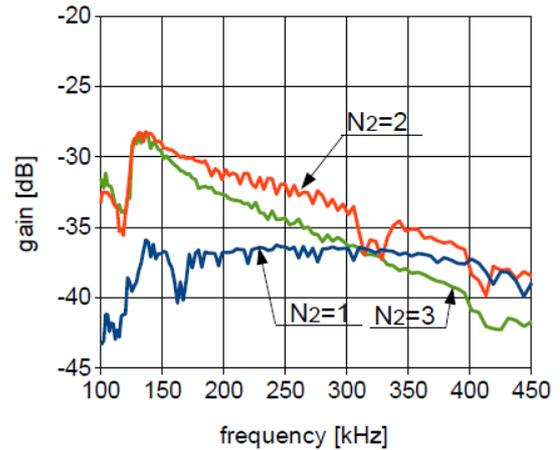


Fig.7 The number of turns of the secondary (n₂) and its achieved transfer function

を比較している。後者のほうは商用電流が互いに逆向きに流れ誘導起電力をキャンセルしあうため、15 dB程度ノイズを抑圧できていることが分かる。

受信器を1階に固定し、送信器は1~7階まで移動したときの伝達関数をFig. 9に示す。所望の通信帯域(130k~450kHz)においてフロア差に関わりなくほぼ同様の減衰特性が得られた。

比較のために、従来の2線式キャパシティブカプラを用いた場合の伝達関数をFig. 10に示す。幹線ケーブルが異なる分電盤かつ異相、つまり最悪の条件であるコンセントペア8ケの特性である。各周波数毎に伝達関数値の累積分布(CDF)を求めて、10%毎の等高線を表示している。例えばCDF値が50%かつ450kHzのときに、約90dB減衰している。このうち支線内減衰を20dBと見積もると70dBの減衰が、Fig. 9に示したように約40dBの減衰に軽減できたことになる。言い換えると提案法による改善は30dBであったと言える。

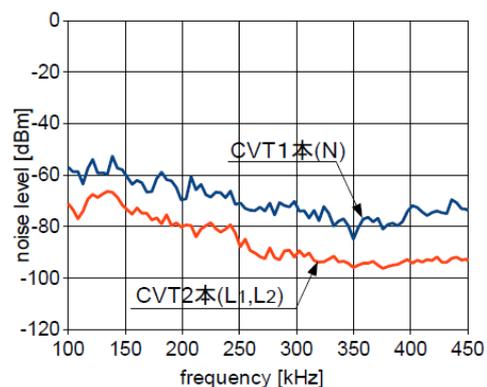


Fig.8 Noise power comparison when the number of cramped cables was one and two

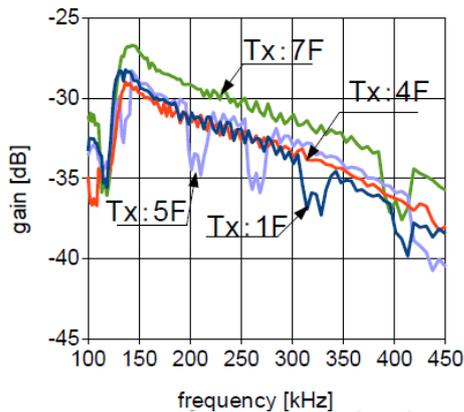


Fig.9 Transfer functions when the floor of transmitter side (Tx) coupler was changed, where the receiving side coupler was fixed on the first floor.

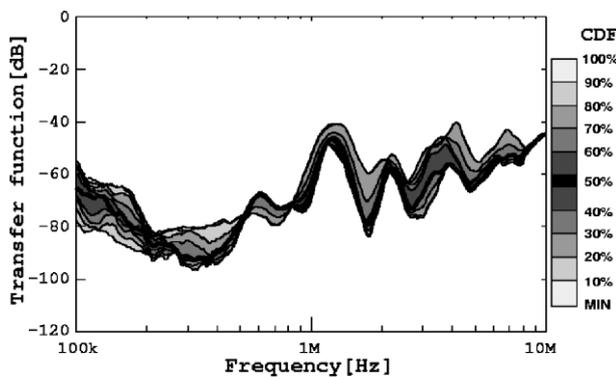


Fig.10 Transfer functions for the conventional capacitive coupler system

3.2 6階建てオフィスビルの場合

3.2.1 単相3線幹線ケーブルの場合

配電系統はFig. 2とは異なり、各フロアに分電盤があり、分電盤毎に幹線ケーブル(CVT)が接続されていた。配電盤は同じビル内1階にある。測定に使用したケーブルの直径は11mm(=100sq)である。使用したカプラは太線用のB₁である。Fig. 7と同様に、二次側巻き線数 n_2 と伝達関数との関係を調べた結果、同じく $n_2=2$ が最良であり、以後の測定は $n_2=2$ の結果である。

6階の分電盤用幹線ケーブルに対して、送信カプラ(Tx)及び受信カプラ(Rx)をクランプするフロアをそれぞれ移動したときの伝達関数をFig. 11に示す。フロアの組み合わせによって数dB程度変わるものの、ほぼ同様の減衰特性が得られた。Fig. 9と比較すると、Fig. 11のほうが特性がフラットであり減衰量も10dB程度良好であった。

3.2.2 グランド単線の場合

提案する1線式PLC方式は、電力線以外でも縦方向に配

線されていれば同様に適用できる。本ビルには、5.5sqおよび14sqのIV線がグランド用に5階まで配線されており、5階で2分岐してからさらに6階まで配線されていた。配線場所は、3.2.1節のCVTケーブルと同じEPS内である。使用したカプラは太線用のB₁である。Fig. 7と同様に、二次側巻き線数 n_2 と伝達関数との関係を調べた結果、同じく $n_2=2$ が最良であり、以後の測定は $n_2=2$ の結果である。

14sqのIV線を使って、Fig. 11と同じ場所で測定した伝達関数をFig. 12に示す。Fig. 11とほぼ同様な減衰特性が得られた。紙面の都合上省略するが、5.5sqのIV線の場合も同様である。

3.2.3 パケット受信成功率(PRR)

Fig. 4(b)と同様にして、PLCモデム(MAXIM社MAX2990 EV-KIT, ROBO mode, 130k~450kHz, Tx gain=-4dB)を用いて1000パケット送信した時のPacket Reception Rate (PRR)を測定した。Fig. 9に示したコンセントペアはいずれもPRR=1(100%受信)であった。

オフィスビルの結果をTable2に示す。いずれのケーブル

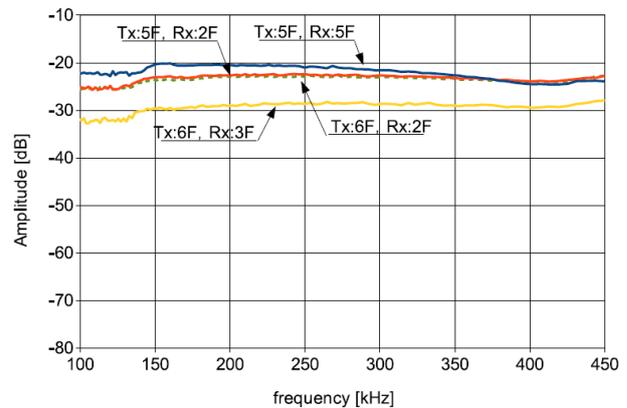


Fig.11 Transfer functions when a CVT cable of 100sq was used

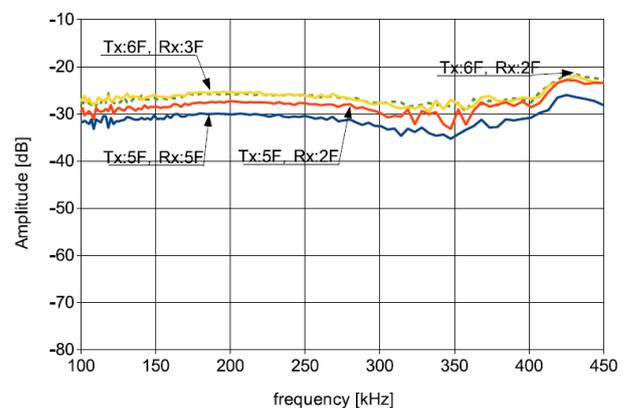


Fig.12 Transfer functions when a ground wire of 14sq was used

ルも MET2 による接地抵抗は 1Ω 以下であった。グラウンド線および 100sq の電力線はいずれも良好な結果を得た。60sq の電力線は白線 1 本のみのクランプでありノイズが大きかったため特性が悪いペアがあったと考えられる。3 相 3 線式の動力電源系統の場合は本稿では詳細な検討を行っていないが、Fig. 4(b)と同様にして 3 線とも同時にクランプすれば改善すると考えられるが、今後の課題である。

Table2 PRR results at the office building

ケーブル	PRR				
	Tx	5F		6F	
	Rx	5F	2F	3F	2F
GND 線(IV 5.5sq)		1	1	1	1
GND 線(IV 14sq)		1	1	1	1
1φ3W, 440V (CVT, 100sq, 赤線と黒線をクランプ)		1	1	0.97	1
3φ3W, 220V (CVT, 60sq, 白線のみクランプ)		1	0.55	1	1

4. おわりに

kHz 帯 PLC はスマートメータ等への適用が期待されているものの、従来の 2 線式システムを大型ビル内のフロア間通信に適用した場合に、信号減衰が大き過ぎるために通信が困難であった。

本稿では、EPS に配線されている電力線あるいはグラウンド線を用いて、通信経路をショートカットすることにより、信号減衰を軽減する方法を検討した。長尺のケーブルは大地間と良好に静電結合している特徴を利用するために、信号カプラをインダクティブ方式とし、通信信号の帰路は大地とする 1 線式 PLC が有用であることを実験的に示した。提案法により概算で大学ビルでは約 30dB 信号減衰を軽減できた。また PRR の結果からも、提案法の有用性が確認できた。

カプラの挿入損が 15~30dB 程度あったため、カプラに使用するフェライトを再選定する必要がある。その後、提案した信号中継システムを実装して、本稿以外のビルでも同様な効果が得られることを調べるのが今後の課

題である。

謝辞 本研究の実験を遂行した、愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程 宇都宮 裕之氏(現在、株式会社エネルギー・コミュニケーションズ)に謹んで感謝する。

参考文献

- [1] 標準化活動例として、IEEE PROJECT, "P1901.2 - IEEE Draft Standard for Low Frequency (less than 500 kHz) Narrow Band Power Line Communications for Smart Grid Applications", (オンライン), <http://standards.ieee.org/develop/project/1901.2.html> (参照 2013-05-26).
- [2] 標準規格例として、IEEE STANDARD, "1901-2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications", (オンライン), 入手先 <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1901-2010.html> (参照 2013-05-26).
- [3] O. Bilal, E. Liu, Y. Gao, T.O. Korhonen, "Design of broadband coupling circuits for power line communication", Proc. ISPLC, 2004.
- [4] 小川、柴田、柳瀬、萩野、"高速電力線通信の構内 LAN への適用に関する検討", 平成 20 年電気学会電子・情報・システム部門大会、TC6-2, pp.163-168, 2008.
- [5] S. Tsuzuki, M. Yoshida, Y. Yamada, "Power-line Channel Modeling for Common-Mode Signal Transmission/Suppression", 9th International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC 2005), Vancouver, Canada, pp.210-214, April 6-8, 2005.
- [6] I. S. Areni, S. Tsuzuki, Y. Yoshizawa, et. al, "N-PE Transmission System for Narrow-Band PLC and Its Channel Properties", IEEE-ISPLC2013, pp.161-166, Johannesburg. South Africa, March 2013.
- [7] 宇都宮、二宮、都築、山田、"PV 電力線における kHz 帯 PLC 用インダクティブカプラの基礎検討", 平成 24 年度電気関係学会四国支部連合大会, p.12-38, 2012 年 9 月 29 日.
- [8] 桑原延行, "クランプ式接地抵抗計", 電気と工事, Vol. 42, No. 11, pp. 73-79, オーム社, 2001 年 10 月.
- [9] 各務, 桑原, "接地抵抗の測定方法", 特開 2001-242206, , 2001. 9. 7.
- [10] トランスの等価回路, 入手先 <http://ayumi.cava.jp/audio/pow/node3.html> (参照 2013-02-15).

(平成 25 年 5 月 31 日)