



| | |
|--------------|---|
| Title | インピーダンス安定化回路網を用いた広帯域電力線搬送通信設備の伝導妨害波測定の盲点 |
| Author(s) | 北川, 勝浩 |
| Citation | 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学. 2009, 108(482), p. 7-12 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/77661 |
| rights | copyright©2009 IEICE |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

インピーダンス安定化回路網を用いた広帯域電力線搬送通信設備の 伝導妨害波測定の盲点

北川 勝浩[†]

† 大阪大学大学院基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
E-mail: †kitagawa@es.osaka-u.ac.jp

あらまし 屋内広帯域電力線搬送通信設備 (PLC) によって生じる漏洩電磁界は、電力配線上に流れるコモンモード (CM) 電流によるものと考えられる。この CM 電流には、PLC モデム自身の不平衡性によって生じるものと、PLC モデムからコンセントに供給された差動モード (DM) 信号が電力配線上に存在する不平衡性によって CM に変換されたものがある。我が国の PLC の技術基準では、コンセントで測定した縦電圧変換損 (LCL) に基づいて電力配線の不平衡性を模した $LCL=16\text{dB}$ 、DM インピーダンス $100\ \Omega$ 、CM インピーダンス $25\ \Omega$ のインピーダンス安定化回路網 (ISN) を PLC モデムに接続して、電流プローブで CM 電流を測定し、その値に対して許容値を定めている。ところが、その許容値を満たし型式指定を受けて市販されている PLC モデムを実際に一般家庭で使用すると、許容値策定時の目標値を 20dB 以上も上回る非常に強い漏洩電磁界を発生する。この直接の原因は、PLC の DM 信号電流が過大なことである。本報告では、ISN を用いた CM 電流測定が、なぜ過大な DM 信号を許すのか、その原因を明らかにする。

キーワード 広帯域電力線搬送通信 (PLC), 漏洩電磁界, 伝導妨害波, コモンモード, 差動モード, 不平衡, モード変換, 縦電圧変換損 (LCL), インピーダンス安定化回路網 (ISN)

Loophole in the Measurement of Conducted Emission from Broadband Power-Line Communications using Impedance Stabilization Network

Masahiro KITAGAWA[†]

† Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan
E-mail: †kitagawa@es.osaka-u.ac.jp

Abstract The radiated emission due to the in-house broadband power-line communications (PLC) is caused by the common-mode (CM) currents on the power-line network. There are two origins of the CM currents; The one is caused by the unbalance of the PLC modem itself and injected from the modem to the outlet. The other is converted from the DM signal current at the unbalanced elements on the power-line network. Japanese PLC regulation restricts the CM current measured using the impedance stabilization network (ISN) with the DM impedance of $100\ \Omega$, CM impedance of $25\ \Omega$, and the longitudinal conversion loss (LCL) of 16dB , which is determined from the LCL measured at the outlets and intended to emulate the in-house power-line network. However, the PLC modems which are type-approved under the regulation and available in the market cause the radiated emission more than 20dB larger than intended. The direct cause of the excessive emission is the excessive DM signal of the PLC modems. Why the CM current measurement using the ISN allows the excessive DM signal is clarified.

Key words power-line communications (PLC), radiated emission, conducted emission, common mode, differential mode, unbalance, mode conversion, longitudinal conversion loss (LCL), impedance stabilization network (ISN)

1. はじめに

広帯域電力線搬送通信 (PLC) は、電力配線に本来想定していない高周波信号を通して通信を行うため、それによって生じる電磁界により放送や無線通信に混信を与えるおそれがある。PLC に 2~30MHz の周波数を開放せよとの規制緩和要求があり、糸余曲折 [1]~[9] の末 2006 年 10 月に技術基準が定められた。[10]~[12] その技術基準は、放送や無線通信に妨害を与えないように離隔距離 10m において漏洩電界を周囲雑音以下にするという前提で定められた。[3], [4], [13] 総務省情報通信審議会 CISPR 委員会は、漏洩電界の原因がコモンモード (CM) 電流であるとして、それから発生する漏洩電界が離隔距離 10m で、独自に採用した周囲雑音レベル、28dB μ V/m (2~15MHz)、18dB μ V/m (15~30MHz)、以下となるように、通過帯域幅 9kHz での CM 電流を平均値で 20dB μ A (2~15MHz)、10dB μ A 以下 (15~30MHz) と定めた。CISPR 委員会はまた、CM 電流発生の原因となる屋内電力配線の不平衡性を、コンセントで測定した [14] 縦電圧変換損 (LCL, longitudinal conversion loss) [15], [16] に基づいて決定した。そして、それを擬似するインピーダンス安定化回路網 (ISN, impedance stabilization network) [17] の性質を、差動モード (DM) インピーダンス、 $DMZ=100\ \Omega$, CM インピーダンス $CMZ=25\ \Omega$, $LCL=16dB$ と定め、図 1 [5], [12] のように PLC モデムをその ISN に接続して測定した CM 電流が許容値を満たすことを技術基準とした。

ところが、この技術基準に基づいて型式指定を受け市販されている各種の PLC モデムを、実際に一般住宅で使用し、CM 電流と漏洩電界を測定した結果、図 2~4 に示すように、CM 電流が許容値を満たしていても漏洩電磁界強度が周囲雑音レベルどころか目標値を 20dB 以上も上回ることが判明した。[18]~[20] さらに、その原因を解明するために、DM 電流を測定したところ、図 2~4(下) に示すように、CM 電流許容値よりも概ね 40dB 大きいことが判明した。[19], [20] 本報告では、なぜ技術基準で定められた ISN を用いた CM 電流測定値に対する許容値が、このように過大な DM 電流を許してしまうかを解明する。さらに、この問題を解決する方法を提案する。

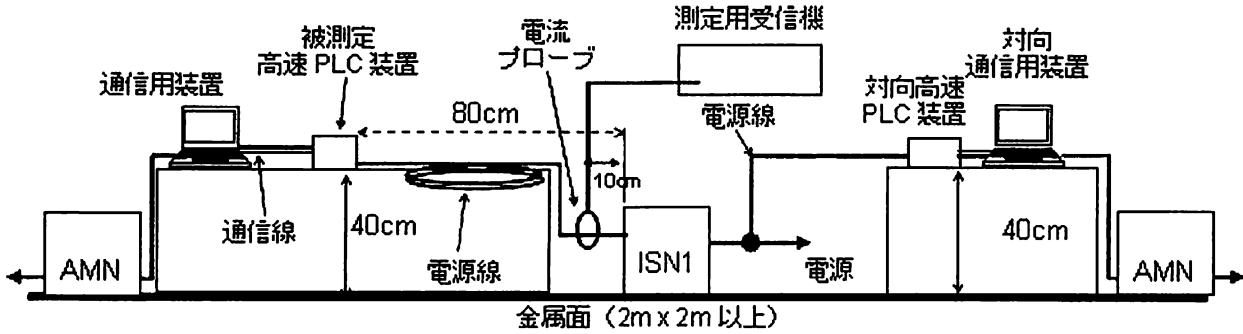


図 1 PLC の伝導妨害波電流の測定法 [5]

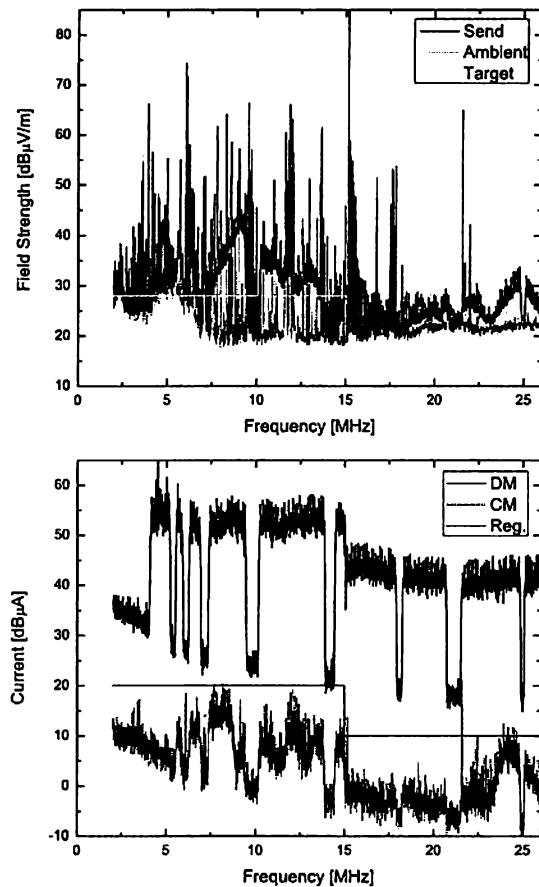


図 2 モデム P(HD-PLC) の漏洩電界強度 (上)、DM 電流、CM 電流 (下)

2. コモンモード電流の二つの起源

PLC を使用した場合に電力配線上に CM 電流が生じるメカニズムを図 5 に示す。矢印は波の進行方向を示す。電力配線上に流れる CM 電流には、二つの起源がある。一つは、モード自身の不平衡性によってモードで発生し、モードからコンセントに CM 電流として供給されるものであり、図 5 の破線のように

PLC を使用した場合に電力配線上に CM 電流が生じるメカニズムを図 5 に示す。矢印は波の進行方向を示す。電力配線上に流れる CM 電流には、二つの起源がある。一つは、モード自身の不平衡性によってモードで発生し、モードからコンセントに CM 電流として供給されるものであり、図 5 の破線のように

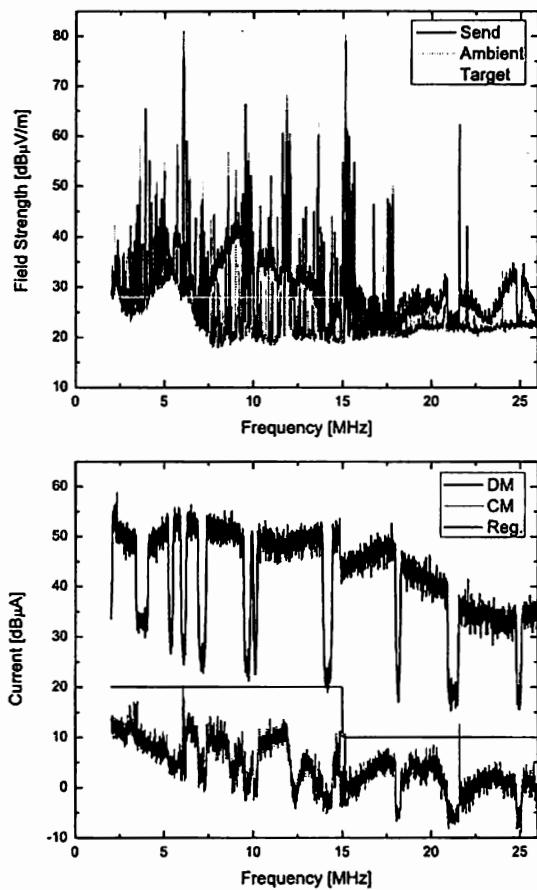


図3 モデムS(HomePlug AV 1.1)の漏洩電界強度(上)、DM電流、CM電流(下)

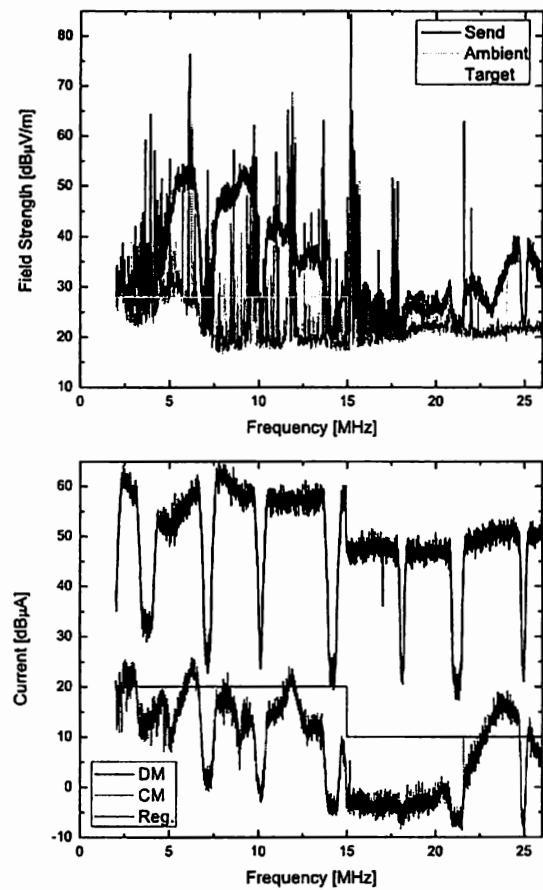


図4 モデムL(UPA)の漏洩電界強度(上)、DM電流、CM電流(下)

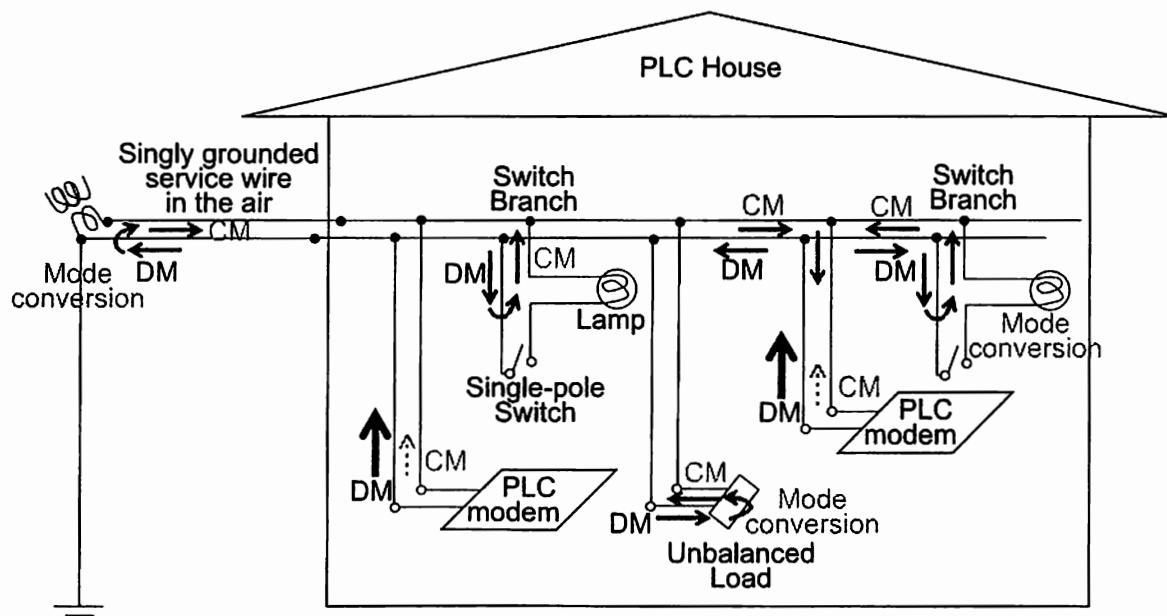


図5 PLCによるCM電流発生メカニズム

進行する。もう一つは、モデムからコンセントに供給されたDM信号電流が、電力配線上に存在する不平衡要素によってモード変換されたものであり、図5の実線のように進行する。

後者の一部は、モデムで反射されて、破線のように進行する。従って、図5の破線には、二つの起源のCM電流が含まれる。いずれにしても、CM電流には、破線の向きに進行するものと、実線の向きに進行するものがある。屋内配線の長さは数十m程度はあるので、PLCの2~30MHz(波長10~150m)のCM電流については、互いに逆向きに進行する進行波同士が打ち消し合うことは無い。従って、どちらのCM電流進行波も漏洩電磁界の原因となり、規制する必要がある。

2.1 モデムの不平衡性

PLCモデムの不平衡性によって生じるCM電流の性質を明らかにするために、図5の等価回路で

$$Z_3 = Z_0/2 - \delta \quad (1)$$

$$Z_4 = Z_0/2 + \delta \quad (2)$$

として、不平衡性を δ で表す。ただし、 δ は $Z_0/2$ からのずれであり、 $|\delta| \leq Z_0/2$ とする。このモデムにDM特性インピーダンス Z_0 の電力線を接続すると、モデムから

$$i_{dm} = E_S/2Z_0 \quad (3)$$

のDM電流進行波が供給される。モデムの不平衡性 δ に起因するCM電流を定量化するために、図6に示すように負荷で終端する。ここで、この負荷をDMが Z_0 に整合した完全平衡負荷

$$Z_1 = Z_2 = Z_0/2 \quad (4)$$

として、CM電流を求める。

$$i_m = i_{dm} \frac{2\delta}{2Z_m + Z_0 - \delta^2/Z_0} \quad (5)$$

となる。ここで、 $|Z_m| \gg Z_0$ の場合、 $|\delta| \leq Z_0/2$ より $|Z_m| \gg |\delta|$ なので、下記の近似が成立する。

$$i_m \approx i_{dm} \frac{\delta}{Z_m}. \quad (6)$$

以上のことから、モデムの不平衡性に起因するCM電流 i_m を減らすには、

- モデムのDM信号電流 i_{dm} を小さくする
- モデムの不平衡性 $|\delta|$ を小さくする
- モデムのCMインピーダンス $|Z_M|$ を大きくする

ことが有効である。ただし、モデムのCMインピーダンスは、

$$Z_M = Z_m + Z_3/Z_4 = Z_m + \frac{Z_0}{4} - \frac{\delta^2}{Z_0} \quad (7)$$

であり、下記の近似が成立する。

$$Z_M \approx Z_m + Z_0/4 \quad (|\delta| \ll Z_0/2) \\ \approx Z_m \quad (|Z_m| \gg Z_0/2)$$

図6のCM等価回路は、図7のようになる。ここで、等価CM電圧源は、

$$e_m = i_m (Z_M + Z_1/Z_2)$$

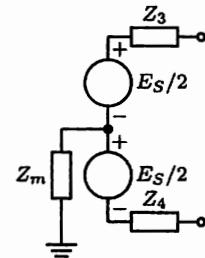


図5 モデムの等価回路

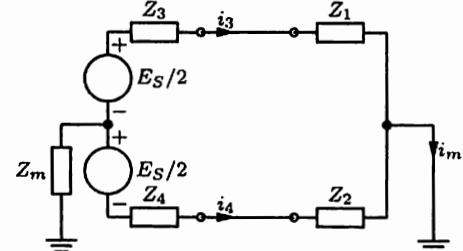


図6 モデムの不平衡性によるコモンモード電流

$$= i_{dm} \delta \left(1 - \frac{\delta^2}{2Z_m Z_0 + Z_0^2 - \delta^2} \right) \quad (8)$$

$$\approx i_{dm} \delta \quad (|\delta| \ll Z_0, |Z_m|) \quad (9)$$

である。従って、モデムのCM等価回路は図8で表される。

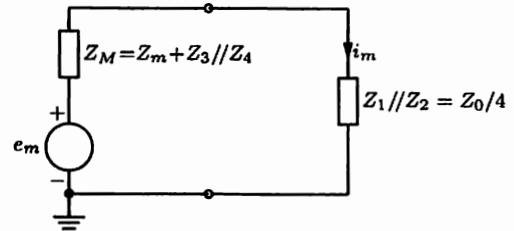


図7 モデムの不平衡性によるCM電流(CM等価回路)

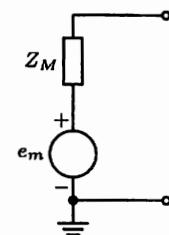


図8 モデムのCM等価回路

2.2 電力配線上の不平衡性

電力配線上の主要な不平衡要素としては、図5に示したように、

- コンセントに接続された負荷(家電製品)の不平衡性
- 照明器具と壁スイッチからなるスイッチ分岐
- 片側接地された引込線

などがある。ここで注意しなければならないのは、これらは全て、DM電流の供給源であるPLCモデムから離れたところにあるということである。これらの間の電力配線の長さは数mから数十mであり、2~30MHzの信号については分布定数回路

(伝送線路) として扱う必要がある。この理論については、既に詳細に報告している[21], [22] ので、ここでは省略する。

重要なポイントは、不平衡要素で DM 電流からモード変換によって生成された CM 電流は、そこから CM の伝搬損失を受けながら PLC モデムに向かって伝搬し、モデムに到達したときには既に減衰しているということである。モデムを接続したコンセントで測った LCL から見積られるのは、その既に減衰した後の CM 電流であって、実際に不平衡要素で発生した CM 電流ではない。PLC モデムがコンセントから供給する DM 電流から不平衡要素で発生する CM 電流への変換損失は、コンセントから不平衡要素までの DM 伝搬損失と不平衡要素でのモード変換係数から成り、それはコンセントで測定した LCL から CM 伝搬損失を除外したものである。すなわち、有効な LCL はコンセント LCL よりもかなり小さい。[21], [22]

さらに、スイッチ分岐におけるモード変換とアンテナ電流の解析によれば、スイッチ分岐には電力配線の幹線には現れない「隠れたアンテナ電流」が存在し、その大きさは最大でスイッチ分岐に入射する DM 電流の 2 倍に達する。[23] この隠れたアンテナ電流は、コンセントに現ないので、コンセント LCL には反映されない。このように、コンセント LCL はそもそも電力配線上に存在するアンテナ電流の指標にはなり得ない。

敢えて電力配線上のアンテナ電流を LCL という指標で表現するとすれば、スイッチ分岐の LCL=−6dB と PLC を接続したコンセントからスイッチ分岐までの DM 損失の和となり、数 dB 程度と見積られる。[23] 多くの EMC 関係者が LCL=6dB を妥当な値と考えているようである。

もう一つ重要なポイントは、不平衡要素で発生した CM 電流が PLC モデムに到達した際に、PLC モデムの CM インピーダンスが非常に高ければ −1 に近い反射率 Γ で反射され、モデム端の端子電流は進行波 CM 電流の $|1-\Gamma| \ll 1$ 倍に減少する。つまり、漏洩電磁界の原因となる CM 進行波電流は、CM 電流プローブで測定した CM 端子電流よりも遥かに大きい可能性がある。[21], [22] 本報告では、これが ISN を用いた CM 電流測定の盲点となることを、分布定数回路理論を用いない初等的な方法で明らかにする。

3. インピーダンス安定化回路網を用いたコモンモード電流測定

我が国の技術基準では、電力配線の不平衡性をコンセントで測定した LCL [14] に基づいて LCL=16dB とし、それによって発生する CM 電流を擬似するインピーダンス安定化回路網 (ISN) を用いて CM 電流を測定し、その測定値に対して許容値を定めている。[5], [12], [13] LCL の値の適否を別にして、この ISN を用いた測定法について解析する。

ISN に DM 電流が i_{dm} 流れたときに、CM 電流

$$i_N = i_{dm}/k \quad (10)$$

が発生する。ここで、 k は LCL の真値に相当する不平衡性を表す正のパラメータで、 k が小さいほど不平衡性が大きい。ISN の CM インピーダンスを $Z_N > 0$ とし、同じ CM イ

ンピーダンスで終端されたときに i_N の CM 電流を出力するように ISN の CM 等価回路を構成すると、図 9 のようになり、等価 CM 電圧源は次式で表される。

$$e_N = 2Z_N i_N = i_{dm} 2Z_N/k. \quad (11)$$

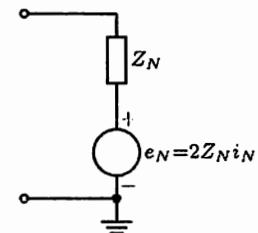


図 9 ISN の CM 等価回路

PLC モデムをこの ISN に波長よりも十分短い電源ケーブルで接続した場合の CM 等価回路は、図 10 となる。

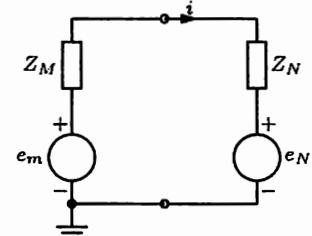


図 10 モデムと ISN を接続した場合の CM 等価回路

この回路に流れる CM 電流は、

$$i = \frac{e_m - e_N}{Z_M + Z_N} = \hat{i}_m - \hat{i}_N \quad (12)$$

$$\hat{i}_m = e_m/(Z_M + Z_N) \quad (13)$$

$$\hat{i}_N = e_N/(Z_M + Z_N) \quad (14)$$

となる。 \hat{i}_m はモデムの不平衡性による CM 電流、 \hat{i}_N は ISN の不平衡性による CM 電流であり、この方法で測定される CM 電流は一般にこれら両方を含むため、何を測っているのか分らない。そこで、これらの大きさの比を η とする。モデムの平衡性がある程度高く、 $|\delta| \ll Z_0, Z_M$ の場合は、式 (9), (11) より、

$$\eta = |\hat{i}_N/\hat{i}_m| = |e_N/e_m| \approx 2Z_N/k|\delta| \quad (15)$$

となる。つまり、どちらが支配的かは、 $Z_N, k, |\delta|$ だけで決まる。我が国の技術基準では、LCL=16dB より $k = 6.3$ 、 $Z_N = Z_0/4 = 25\Omega$ なので、

$$\eta \approx 7.9/\delta. \quad (16)$$

モデムの不平衡性による CM 電流を減らすために、 $|\delta| \ll Z_0/2=50\Omega$ としているはずなので、 $\eta > 1$ と考えられる。

$\eta \gg 1$ の場合、 \hat{i}_N が支配的であり、

$$i \approx -\hat{i}_N = -i_N \times 2 / \left(1 + \frac{Z_M}{Z_N}\right) \quad (17)$$

を測っていることになる。これは、本来測りたかった i_N とは異なることに注意する必要がある。 Z_N が小さいほど、 $|Z_M|$ が

大きいほど、 $|i|$ は小さくなる。特に、 $|Z_M| \gg |Z_N|$ ならば、

$$|i|/|i_N| \ll 1 \quad (18)$$

となって、例え k が電力配線の不平衡性を正しく反映する値を選ばっていても、それによって発生する CM 電流 i_N より遥かに小さな値しか測定されない。モデルの不平衡性による CM 電流を減らすために、 Z_M はできる限り高くしていると考えられるので、この問題は深刻である。この方法では、電力配線上の不平衡性によるモード変換によって生じる CM 電流を擬似した測定は不可能というべきである。

$\eta \ll 1$ の場合、 \hat{i}_m が支配的であり、

$$i \approx \hat{i}_m = i_m \left(1 + \frac{Z_N - Z_0/4}{Z_M} \right) \quad (19)$$

を測っていることになる。 Z_N が小さいほど $|i|$ は大きくなり、 $Z_N = Z_0/4$ のとき $i \approx i_m$ となって i_m が測定される。我が国の技術基準では $Z_N = Z_0/4$ なので、もしも、 η がこの領域ならばモデルの不平衡性による CM 電流を正確に測ることができる。しかし、式 (16) より、かなり平衡性の悪いモデルでないかぎり、この領域ではあり得ない。

もしも、この方法でモデルの不平衡性による CM 電流を正確に測定したければ、ISN の LCL を大きく (k を大きく) して平衡性を高くし、 $\eta \ll 1$ の領域にする必要がある。

4. どうすればこの問題を解決できるか？

4.1 応急処置

ISN の CM 端子電圧は、

$$V = e_N + Z_N i = 2Z_N (i_N + i/2) \quad (20)$$

である。 $\eta \gg 1$ かつ $|Z_M| \gg Z_N$ で $|i| \ll |i_N|$ となって $|i|$ から $|i_N|$ を知りえないような状況では、逆に、

$$V \approx 2Z_N i_N \quad (21)$$

となるので、ISN の CM 端子電圧を測定することによって、

$$|i_N| \approx |V|/2Z_N \quad (22)$$

から $|i_N|$ が求まる。従って、 $|V|$ に対する許容値を追加すれば、とりあえず抜け道を塞ぐことはできる。

4.2 根本治療

電力配線上に存在する不平衡性によって生じる CM 電流（隠れたアンテナ電流を含む）については、モデルからコンセントに供給される DM 電流からの変換係数を、コンセント LCL のように見かけの損失でなく、正しく見積る必要がある。

LCL あれ何であれ、この変換係数を想定するのであれば、わざわざ ISN を用いて CM 電流を擬似的に発生してそれを測定する必要はない。その変換係数から DM 電流許容値を決定し、DM 電流を測定すれば良い。

ただし、目標とする漏洩電磁界強度は、正しい周囲雑音レベルのデータに基づいて、慎重に設定する必要がある。

モデルの不平衡性による CM 電流については、平衡性の高い (LCL の大きい) ISN を用いて測定すればよい。

5. まとめ

我が国の広帯域電力線搬送通信設備の技術基準に定められた方法では、電力配線の不平衡性によって発生する CM 電流を ISN の LCL で擬似して測定することは出来ないことを明らかにし、その解決法を示した。

文 献

- [1] 総務省、電力線搬送通信設備に関する研究会報告書、http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020809_4.html, 2002.8
- [2] 総務省、「実験用高速電力線搬送通信設備の設置許可に係る方針の決定」、http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040121_1.html, 2004.1
- [3] 総務省、高速電力線搬送通信に関する研究会報告書、http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/pdf/051226_6_bt2.pdf, 2005.12
- [4] 総務省、情報通信審議会情報通信技術分科会 CISPR 委員会報告、http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/bunkakai/pdf/060629_3_1-2.pdf, 2006.6
- [5] http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/060629_3.html
- [6] 西本修一、総務省、電波監理審議会意見書（第 415 回 意見の聴取）http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/denpa_kanri/pdf/060823_2.pdf, 2006.9
- [7] 同上、別紙, pp.21-27 (北川意見)
- [8] 総務省、電波監理審議会（第 909 回）議事要旨, pp.1-2, http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/denpa_kanri/pdf/060913_2.pdf, 2006.9
- [9] 総務省、電力線搬送通信設備の技術基準等の整備に関する電波監理審議会答申及び意見募集の結果、http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/pdf/060913_9_7.pdf, 2006.9
- [10] 無線設備規則第 59 条第 1 項第 1 号、同第 2 項、第 60 条第 2 号
- [11] 電波法施行規則第 46 条第 1 項第 5 号、同条の 2 第 1 項第 5 号
- [12] 総務省告示第 520 号（平成 18 年 10 月 4 日）
- [13] 杉浦, 上, 雨宮, 山中, “我が国の高速 PLC 規格とその技術的背景,” 信学技報, EMCJ2007-36, 2007.7
- [14] 神宝, 西山, 前川, 石川, 稲田, 牧, “既設住宅における電力線の LCL とコモンモードインピーダンスの測定,” 信学技報, EMCJ2005-70, 2005.9
- [15] ITU-T, Recommendation G.117, “Transmission aspects of unbalance about earth,” 1996.2
- [16] ITU-T, Recommendation O.9, “Measuring arrangements to assess the degree of unbalance about earth,” 1999.3
- [17] 秋山, 山根, 桑原, “電力線搬送通信 (PLC) における機器試験用擬似通信回路網の検討,” 信学技報, EMCJ2003-12, pp. 71-75, 2003.4
- [18] 北川, 大石, “住宅環境における屋内広帯域電力線搬送通信からの漏洩電界とコモンモード電流の測定 I,” 信学技報, EMCJ2007-49, pp. 37-42, 2007.9
- [19] 北川, 大石, “住宅環境における屋内広帯域電力線搬送通信からの漏洩電界とコモンモード電流の測定 III,” 信学技報, EMCJ2007-117, pp.1-6, 2008.3
- [20] M. Kitagawa and M. Ohishi, “Measurements of the radiated electric field and the common mode current from the in-house broadband power line communications in residential environment,” in Proc. EMC Europe 2008, Hamburg, Germany, Sep. 2008, pp.433-438.
- [21] 北川, “コンセントで LCL を測っても電力線網に分布するモード変換は分らない ～コモンモード電流と LCL の伝送線路の取り扱い～,” 信学技報, EMCJ2008-10, pp.17-22, 2008.6
- [22] M. Kitagawa, “LCL and Common Mode Current at the Outlet Do Not Tell the Common Mode Current Generated at the Remote Unbalanced Element on the Power-line,” in Proc. EMC Zurich 2009, Zurich, Switzerland, Jan. 2009, pp.1-4.
- [23] 北川, “屋内電力配線における隠れたアンテナ電流” 信学技報, EMCJ2008-78, pp.21-26, 2008.11