

コモンモード電流による規制を 提案する理由

高速電力線搬送通信設備作業班 事務局

屋外PLCの漏えい電磁界を知るには、何を知ればいいのか

電力線路に高周波信号電流が流れると、電磁界が発生する。

線路を流れる電流が分かると、電磁界は数学演算を行うことで求めることが出来る。

すなわち、**電流と電磁界とは直接対応**していると言える。

参考

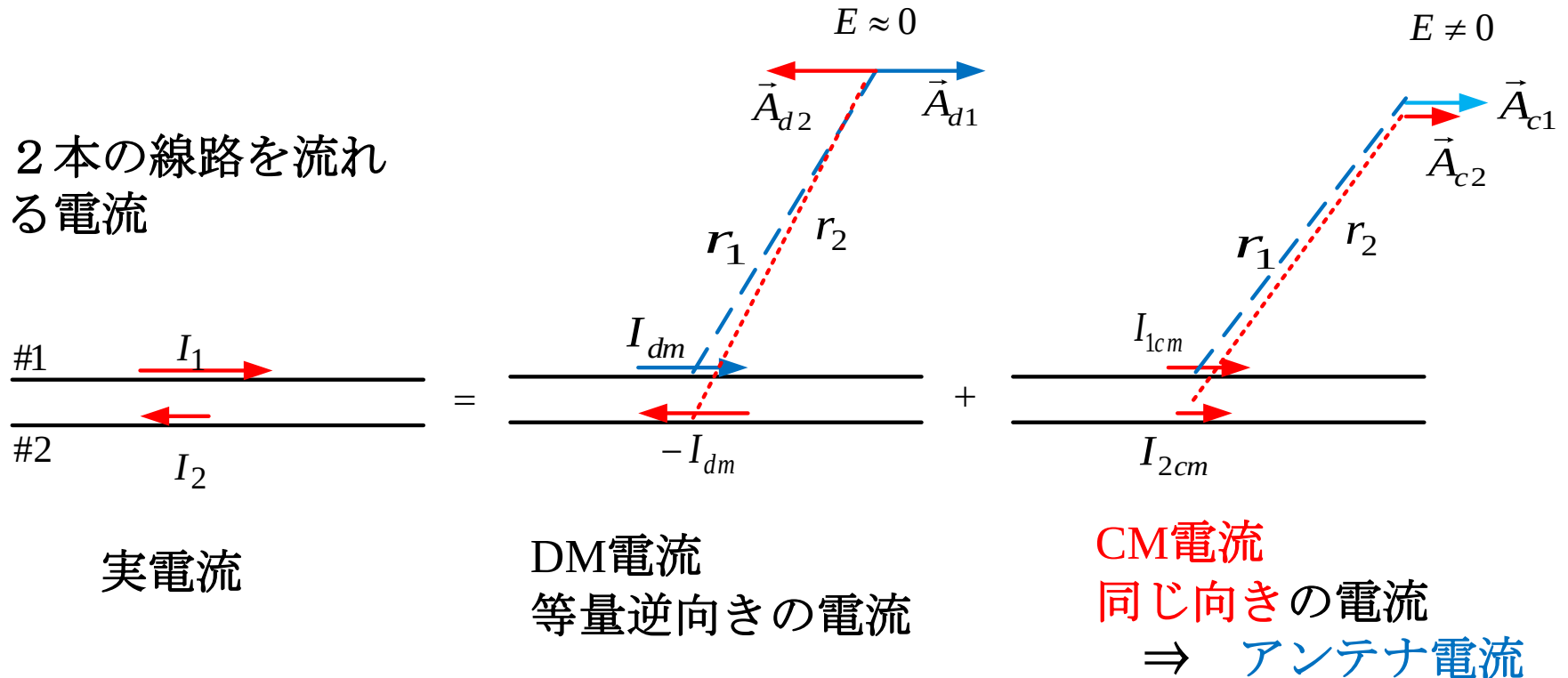
- ✓ 線路を流れる電流が分かると、ベクトルポテンシャルが求まる。
- ✓ ベクトルポテンシャルは、磁界との関係(ベクトル演算)で直接定義され、さらに電界に関しても求められる。

電流分布が分かると、ベクトルポテンシャルが求まる
$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{\vec{J} e^{-jkr}}{r} dl$$

ベクトルポテンシャルが知れると、電磁界が求まる

$$\begin{array}{ll} \text{磁界: } \vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} & \text{電界: } \vec{E} = -j\omega \vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \nabla \cdot \vec{A} \end{array}$$

電力線からの漏えい電磁界はCM電流が主流



2本線路を流れる信号電流は、等量逆向きに流れる成分(DM電流)と、同じ向きに流れる成分(CM電流)とに分解できる。
それぞれの線を流れるDM電流成分が作る電磁界成分は、逆向きであるためにキャンセルされる。
CM電流成分が作る電磁界成分は加算される。アンテナ電流もこの成分である。

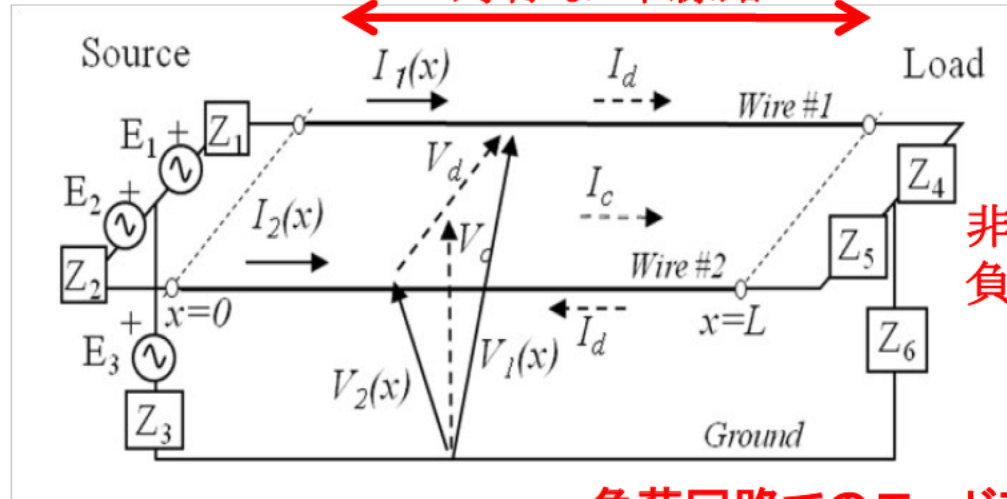
C.R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Chap. 6 & 8, John Wiley & Sons, 1992.

虫明康人, アンテナ・電波伝搬, 4章, コロナ社, 電子通信大学講座

一般的な2本線路系システムにおけるモード変換

一般的な
非対称な
電源回路

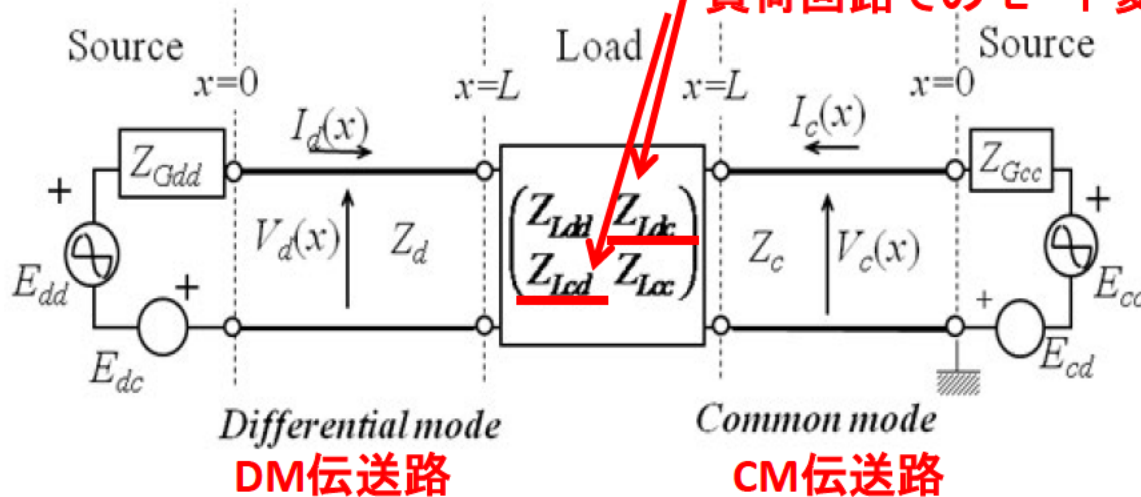
対称な2本線路



非対称な
負荷回路

モード変換

負荷回路でのモード変換⇒等価電源



Launched
CM成分

Differential mode

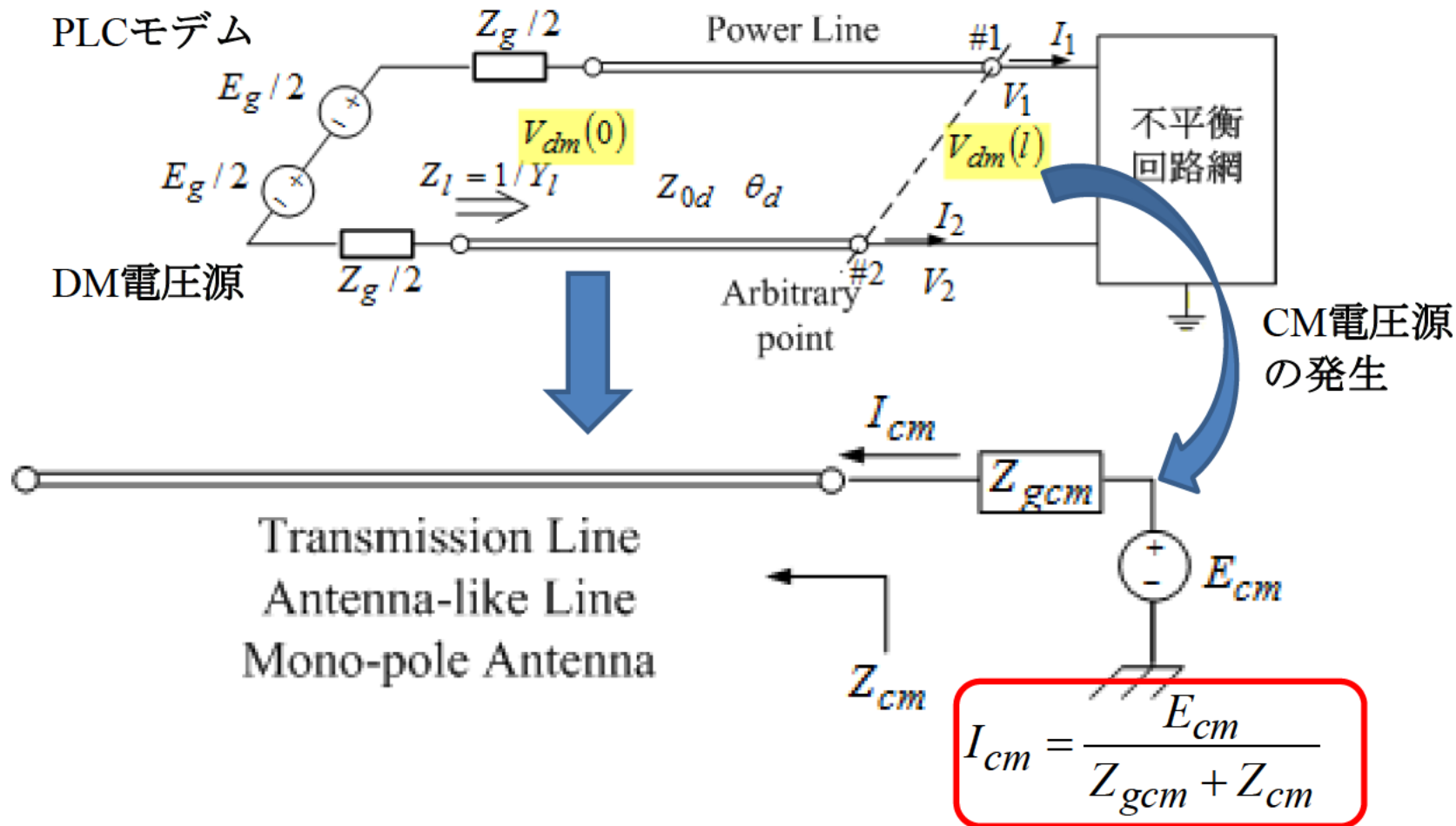
DM伝送路

Common mode

CM伝送路

A. Sugiura, Y. Kami, "Generation and propagation of common-mode currents in a balanced two-conductor line," IEEE Trans. EMC, in press.

屋外PLCにおけるモード変換メカニズム



DMのPLCモデムが屋外の平衡電力線を励振(通信)すると、電力線に存在する不平衡な回路(今回の場合は殆どが屋内に存在)でCM成分が発生する。その結果、電力線にCM電流が流れ、電力線がアンテナと同様な働きをする。

PLCモデムのDM電力で規定することは

一般に電源回路(送信機)の電力を測定することは、電源回路から見ると、**供給電力を最大**にすることであり、負荷回路からみると**消費電力を最大**にすることである。

この条件は**共役整合**のときであり、電源回路の内部(出力)インピーダンスと負荷回路のインピーダンスが共役複素数の関係にあることである。
すなわち、**実部(抵抗成分)は等量で、虚部(リアクタンス成分)は等量異符号**の条件である。

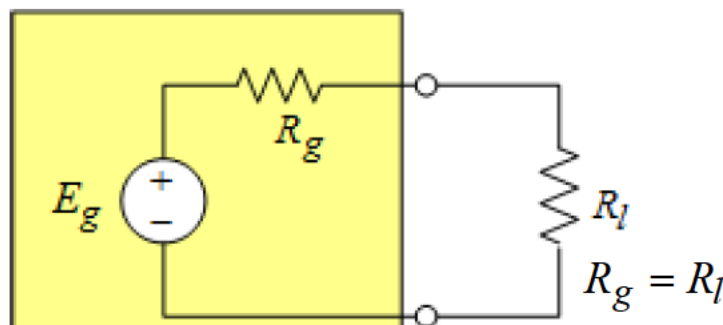
電源内部インピーダンス $Z_g = R_g + jX_g$

負荷インピーダンス $Z_l = R_l + jX_l$

整合条件



$$\begin{aligned} R_g &= R_l \\ X_g &= -X_l \end{aligned}$$



モデムの最大電力

$$P_g = \frac{|E_g|^2}{4R_g}$$



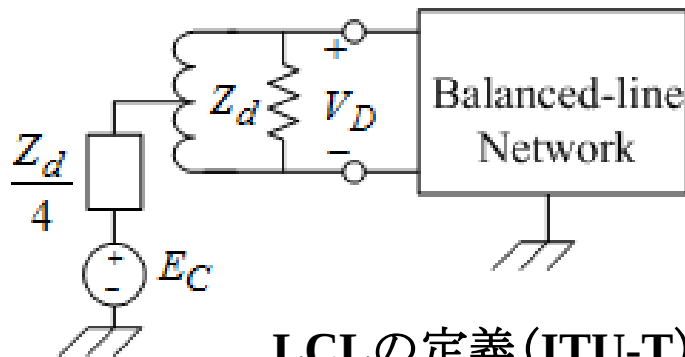
モデムの電圧源電圧 $|E_g| = 2\sqrt{R_g P_g}$

整合時の等価電圧源回路

- ✓ モデムのDM電力で規定することは、周波数を変化させながら、整合条件を見つけ出し、そのときの電力を測定する必要がある。
 - ✓ 電力と抵抗値が分かると**電源電圧の大きさ**が分かる。
- すなわち、**DM電力**で規定することは**DM電圧**で規定することにつながるが、これが直接漏えい電磁界を規定していることではない。

モード変換メカニズム DM電圧からCM電圧への変換

ITU-Tにおいては、平衡回路網に存在する不平衡な部分において発生するモード変換の度合いをLCLで定義している。この定義は、図に示すように平衡回路網にCM電圧源を印加したときに発生するDM電圧との逆比で定義されている。



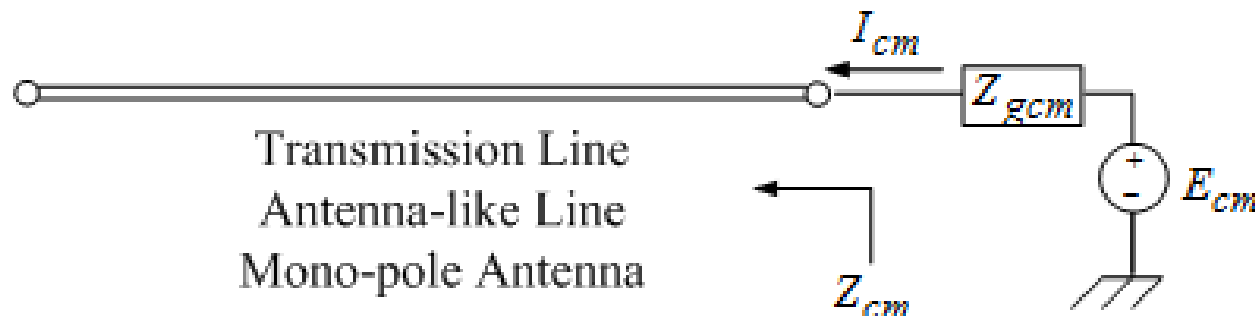
LCLの定義 (ITU-T)

$$LCL = 20 \log \left| \frac{E_C}{V_D} \right| = 20 \log k$$

LCL: longitudinal conversion loss

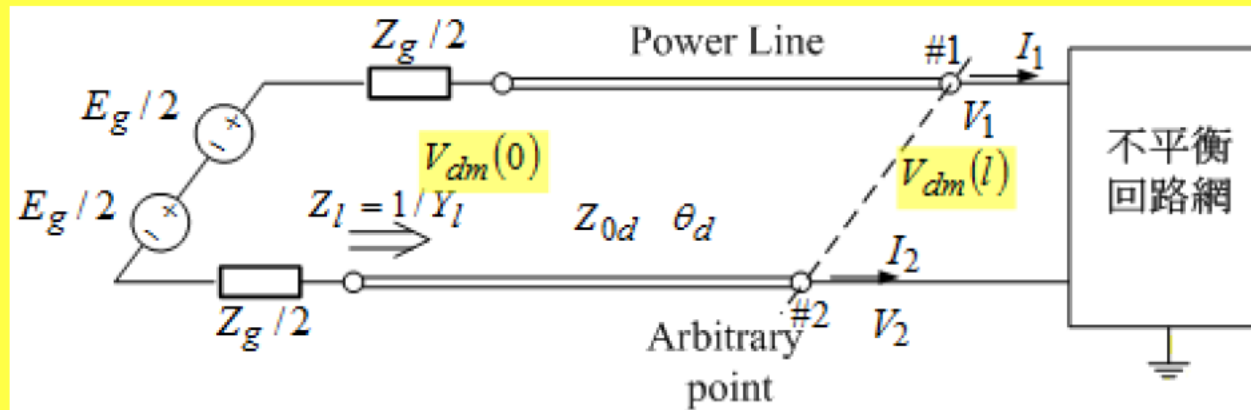
受動回路網の相反(可逆)定理(逆が成立する性質)から、PLCモデムが平衡度の高い電力線をDM信号電圧源で励振すると、平衡度の崩れる個所でモード変換が発生し、この点のDM電圧が V_{dm} であると等価CM電圧源 E_{cm} が発生する。

相反(可逆)定理から $\Rightarrow |E_{cm}| \approx \frac{1}{k} |V_{dm}|$



$$I_{cm} = \frac{E_{cm}}{Z_{gcm} + Z_{cm}}$$

屋外PLCにおけるDM電圧から等価CM電圧源へは



$$\theta_d = 2\pi \frac{l}{\lambda_d}$$

モデムのDM最大電力から、DM電源電圧の大きさが分かる： $|E_g| = 2\sqrt{R_g P_g}$
 モデムの電源電圧と不平衡回路網間に成立する式は、

$$\begin{bmatrix} V_{dm}(0) \\ I_{dm}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & jZ_{0d} \sin \theta_d \\ j(1/Z_{0d}) \sin \theta_d & \cos \theta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d(l) \\ I_d(l) \end{bmatrix}$$

上記の回路網での左側の端子条件

$$I_{dm}(0) = E_g / Z_g - V_{dm}(0) / Z_g$$

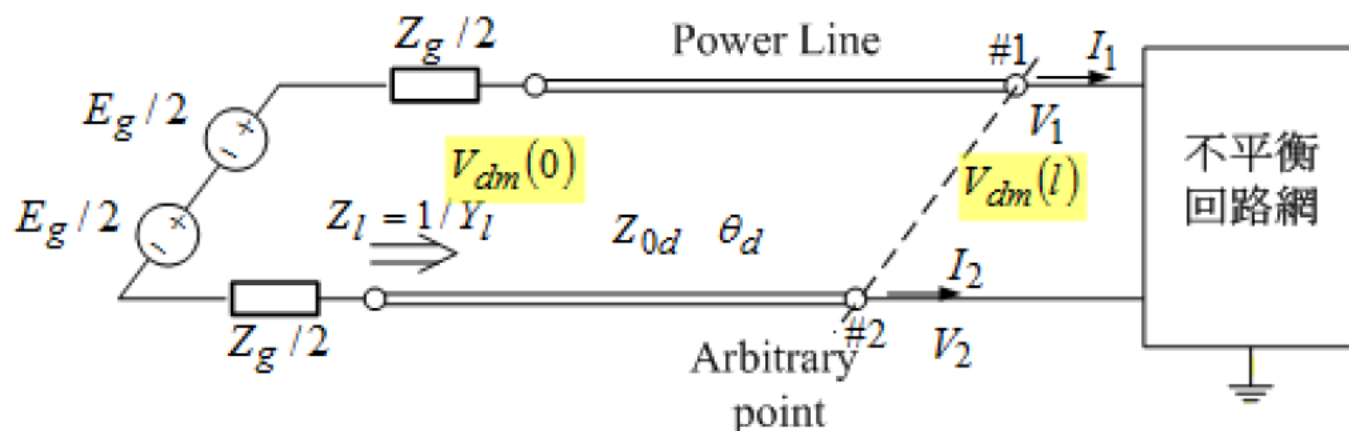
上記の回路網での右側の端子条件

$$I_{dm}(l) = V_{dm}(l) / Z_l$$

この条件を代入して

$$V_{dm}(l) = - \frac{E_g}{(1 + Z_g / Z_l) \cos \theta_d + j(Z_{0d} / Z_l + Z_g / Z_{0d}) \sin \theta_d}$$

屋外PLCにおけるDM電圧から等価CM電圧源へは



モデムのDM最大電力から、DM電源電圧が分かる： $|E_g| = 2\sqrt{R_g P_g}$

モデムに接続された電力線の線路から、電気角 $\theta_d (= 2\pi l / \lambda)$ での不平衡な個所に発生するDM電圧の大きさは、

$$|V_{dm}(\theta_d)| = \left| \frac{2\sqrt{R_g P_g}}{(1 + Z_g / Z_l) \cos \theta_d + j(Z_{0d} / Z_l + Z_g / Z_{0d}) \sin \theta_d} \right|$$

注：これは、CM電流が流れている電力線の任意点でも同様に成立する。

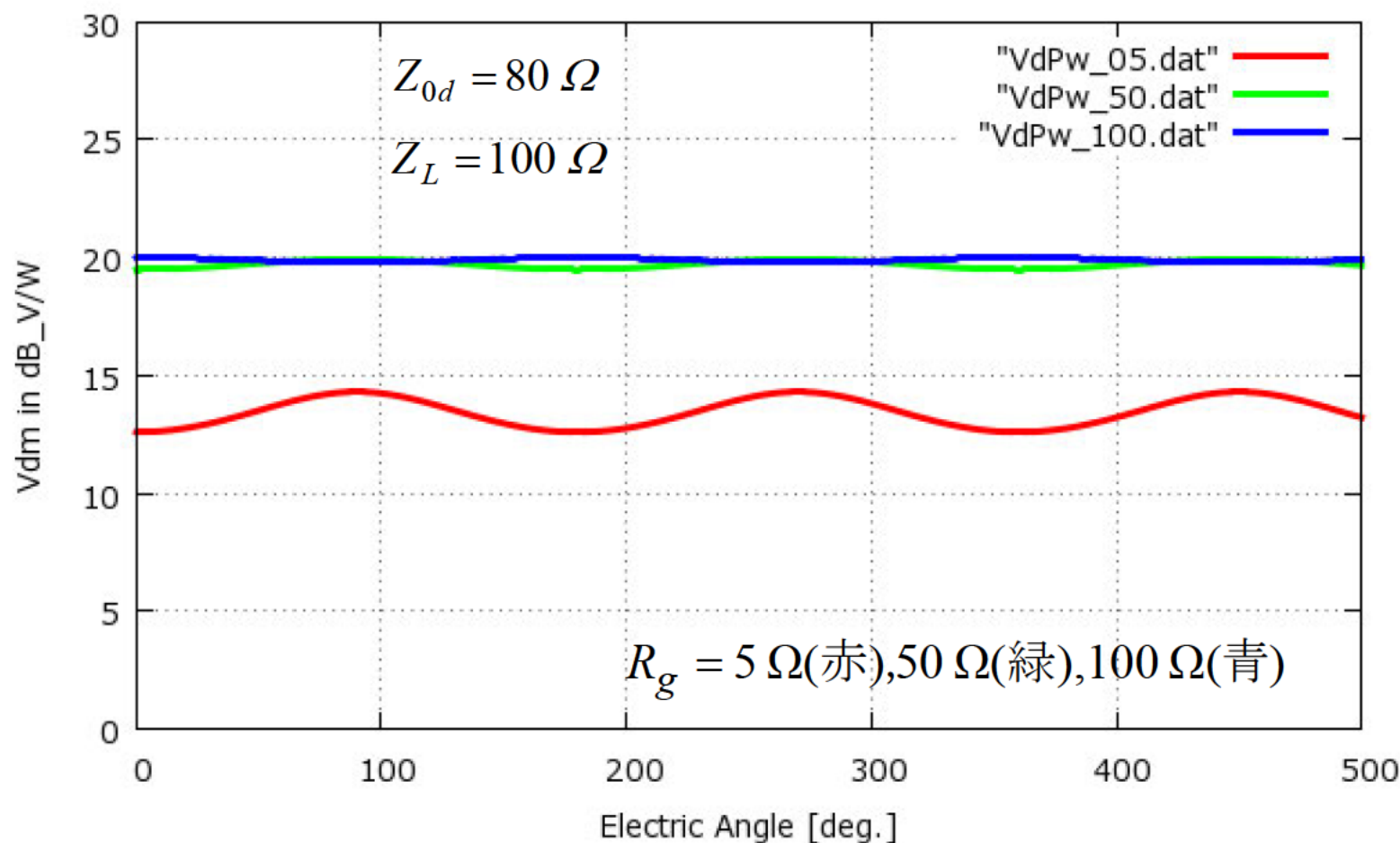
➡ 等価CM電圧源が発生する $|E_{cm}| \approx \frac{1}{k} |V_{dm}(\theta_d)|$

注：モデムの内部抵抗が小さいとコモンモード成分が大きく発生するわけではない。(次図参照)

屋外PLCにおけるDM電圧

$Z_g = R_g$ のとき

$$|V_{dm}(\theta_d)| = \left| \frac{2\sqrt{R_g P_g}}{(1 + R_g / Z_l) \cos \theta_d + j(Z_{0d} / Z_l + R_g / Z_{0d}) \sin \theta_d} \right|$$



縦軸は、1 Wのモデム出力電力のときに発生するDM電圧(dBV)を意味している¹⁰

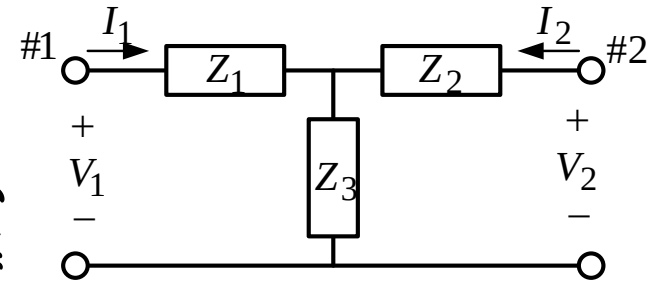
DM電圧とCM電流が不変

電力線にCM電流が流れていることは、その点で見た等価回路は、T形(あるいはπ形)回路で表現できる。図の非対称T形回路では、#1と#2はそれぞれの線路に対応しており、その時のモードインピーダンスは

$$Z_{dm} = Z_1 + Z_2$$

$$Z_{cm} = Z_1 // Z_2 + Z_3 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3$$

と定義される。このことは図の実電圧と実電流からモード電圧とモード電流へ変換したときの関係式が次式で与えられる時である。



$$\begin{bmatrix} V_{dm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dm} \\ I_{cm} \end{bmatrix}$$

この関係が成立するためには、次の関係式が成立する。

$$\begin{bmatrix} V_{dm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ v & 1-v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dm} \\ I_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-v & -v \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$



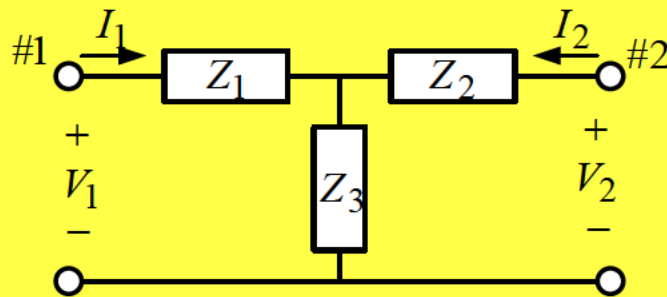
$$v = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_{dm} = V_1 - V_2$$

$$I_{cm} = I_1 + I_2$$

これは、**DM電圧**と**CM電流**だけが、回路網の非対称性と無関係に、すなわち平衡が崩れた時にも**独立**であるという性質！

DM電圧とCM電流が不変



実電圧、電流からモード電圧、電流に変換するモード変換行列を次のように選定する

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\nu & 1 \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dm} \\ V_{cm} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ -1 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dm} \\ I_{cm} \end{bmatrix}$$

$\nu = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$ とすれば、

$$\begin{bmatrix} V_{dm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_3 & 0 \\ 0 & \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dm} \\ I_{cm} \end{bmatrix}$$

逆行列をとると

このとき、対角要素がDMとCMインピーダンス

$$\begin{bmatrix} V_{dm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dm} \\ I_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

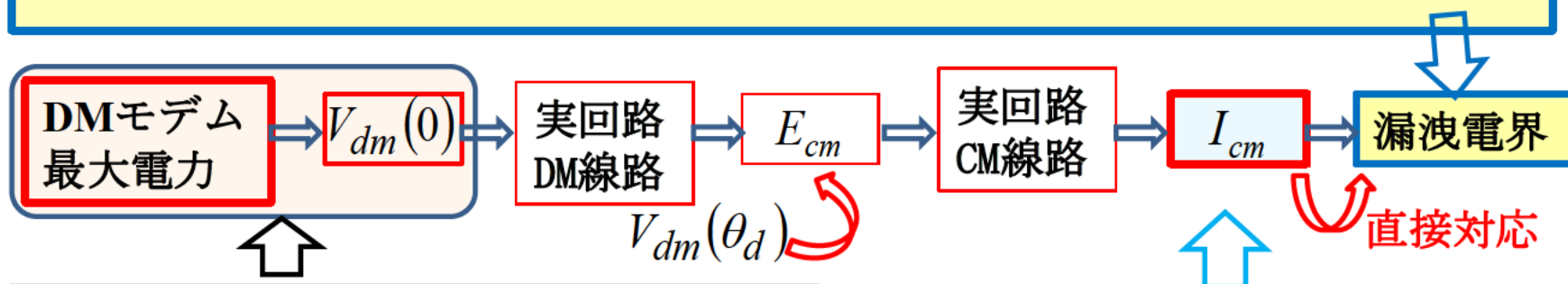
$$V_{dm} = V_1 - V_2$$

$$I_{cm} = I_1 + I_2$$

漏えい電磁界を規定する方法

1. 電界を直接測定する法

- ✓ 規定が難しい屋外の測定条件(配線レイアウト、実機の動作条件、大地条件、接続コンセント条件等々)
- ✓ 困難な測定と乏しい再現性



2. モデムのDM最大電力で規定する法

- ✓ 漏洩電磁界と直接対応していない (DM電圧を抑えても、電磁界に関する実回路部分に依存する)
- ✓ モデム自体のCM電流は測定不可
- ✓ 各周波数で共役整合条件を探し、電力を測定することは、非常に困難な作業を伴う

3. CM電流を規定する法

- ✓ 漏えい電磁界と直接対応
- ✓ 発生源を直接規定する
- ✓ 測定が容易で再現性が高い
- ✓ 従来の屋内PLCの場合と整合性有