2.7 送電線の等価回路

送電線のインピーダンス定数*

抵抗：銅線やアルミ線を撚り合わせて使用

架空送電線：0.01～0.05　Ω/km

地中ケーブル：0.01～0.03　Ω/km

漏れコンダクタンス：無視できる

（*　電力システム工学, オーム社参照）

インダクタンス

架空送電線：0.8～1.35　mH/km

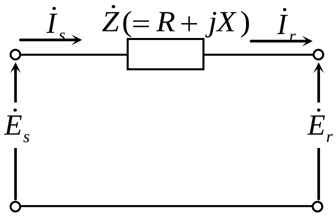
地中ケーブル：0.1～0.4　mH/km

静電容量

架空送電線：0.008～0.015　μF/km

地中ケーブル：0.3～0.6　μF/km

短距離送電線（30 km 程度まで）集中定数表示



$$\begin{bmatrix}\dot{E}_s\\ \dot{I}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{A} & \dot{B}\\ \dot{C} & \dot{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_r\\ \dot{I}_r\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \dot{Z}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_r\\ \dot{I}_r\end{bmatrix}$$

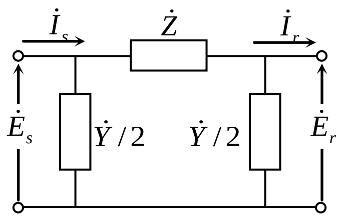
$\dot{A}=(\dot{E}_s/\dot{E}_r)_{\dot{I}_r=0}$　開放送受電端電圧比

$\dot{B}=(\dot{E}_s/\dot{I}_r)_{\dot{E}_r=0}$　短絡伝達インピーダンス

$\dot{C}=(\dot{I}_s/\dot{E}_r)_{\dot{I}_r=0}$　開放伝達アドミタンス

$\dot{D}=(\dot{I}_s/\dot{I}_r)_{\dot{E}_r=0}$　短絡電流比

中距離送電線（100 km 程度まで）



$$\begin{bmatrix}\dot{E}_s\\ \dot{I}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}+1 & \dot{Z}\\ \dot{Y}\left(1+\dfrac{\dot{Z}\dot{Y}}{4}\right) & \dfrac{\dot{Z}\dot{Y}}{2}+1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_r\\ \dot{I}_r\end{bmatrix}$$

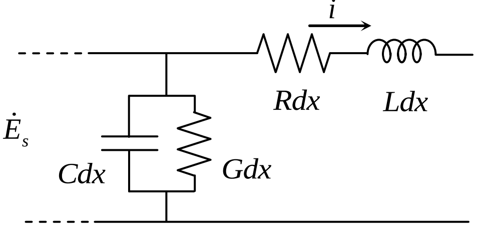
可逆回路では $\dot{A}\dot{D}-\dot{B}\dot{C}=1$ の関係がある。

（F パラメータ参照のこと）

00 $\dot{Z}=R+jX$，$R=r\ell$，$X=x\ell$，（r [Ω/km]，　$x=\omega L=2\pi fL$ [Ω/km]，ℓ [km]）

長距離送電線路の等価回路（100 km 以上）

分布定数回路で表す



$\dot{z}=R+\mathrm{j}\omega L,\ \ \dot{y}=G+\mathrm{j}\omega C$

$$\begin{bmatrix}\dot{E}_s\\ \dot{I}_s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{A} & \dot{B}\\ \dot{C} & \dot{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_r\\ \dot{I}_r\end{bmatrix}$$，$\dot{A},\dot{B},\dot{C},\dot{D}$ 四端子定数

$\dot{A}=\dot{D}=\cosh\dot{\gamma}\ell$

$\dot{B}=\dot{Z}_w\sinh\dot{\gamma}\ell,\ \dot{C}=(\sinh\dot{\gamma}\ell)/\dot{Z}_w$

$\dot{A}\dot{D}-\dot{B}\dot{C}=\cosh^2\dot{\gamma}\ell-\sinh^2\dot{\gamma}\ell=1$

$\dot{Z}_w=\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$ ：送電線の波動インピーダンス

$\dot{\gamma}=\sqrt{\dot{y}\dot{z}}$ ：送電線の伝搬定数

2.8 単位法（PU 法：per-unit method）

・定格の異なる機器の，電圧・電流・電力・インピーダンスなどを，系統に適した基準値（$_{\mathrm{B}}$：ベースの添え字をつける）に対する比として無次元化
・複雑な電力回路の解析に便利
・系統電圧が 500 kV のとき，基準電圧V_{B}を 500 kV とすると系統電圧は 1.0 pu。電圧 600 kV は 600/500＝1.2 pu

・pu 値は基準値を用いた pu 表示のことで，任意の容量S [VA]，電圧$\dot{E}$ [V]，電流$\dot{I}$ [A]などは

$$S_{\mathrm{pu}}=\frac{S}{S_{\mathrm{B}}},\ E_{\mathrm{pu}}=\frac{\dot{E}}{E_{\mathrm{B}}},\ I_{\mathrm{pu}}=\frac{\dot{I}}{I_{\mathrm{B}}}\quad \mathrm{pu}$$

インピーダンスは

$$Z_{\mathrm{pu}}=\frac{\dot{Z}}{Z_{\mathrm{B}}}=\frac{I_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}\dot{Z}=\frac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}{}^{2}}\dot{Z},\ Y_{\mathrm{pu}}=\frac{1}{Z_{\mathrm{pu}}}=\frac{E_{\mathrm{B}}{}^{2}}{S_{\mathrm{B}}}\dot{Y}$$

pu 値は基準値をかけて元の単位に戻す

pu 電圧の表し方

電力系統の定格電圧V_{B}，E_{B}を基準値とするとある線間電圧Vと，相電圧E の pu 値は

$$E_{\mathrm{pu}}=\frac{E}{E_{\mathrm{B}}}=\frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{3}V_{\mathrm{B}}}=\frac{V}{V_{\mathrm{B}}}=V_{\mathrm{pu}}$$，となり

単位法では線間電圧と相電圧は等しい

基準値は。「容量」，「電圧」，「電流」，「インピーダンス」の 4 つより 2 つを選択する。例えば基準値を，1相分容量S_{B} [VA] と相電圧E_{B} [V]とすると，他の量は

基準電流：$I_{\mathrm{B}}=\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}$ [A]

基準インピーダンス：$Z_{\mathrm{B}}=\dfrac{E_{\mathrm{B}}}{I_{\mathrm{B}}}=\dfrac{E_{\mathrm{B}}{}^{2}}{S_{\mathrm{B}}}$ [Ω]

3相回路での基準値

通常3相分容量と線間電圧を基準値にする
①基準電圧：線間電圧V_{B} [V]
②基準容量：3相分容量$S_{3\mathrm{B}}=3S_{\mathrm{B}}$ [VA]

$V_{\mathrm{B}}=\sqrt{3}E_{\mathrm{B}}$より，

③基準電流：$I_{\mathrm{B}}=\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}=\dfrac{S_{3\mathrm{B}}/3}{V_{\mathrm{B}}/\sqrt{3}}=\dfrac{S_{3\mathrm{B}}}{\sqrt{3}V_{\mathrm{B}}}$ [A]

④基準インピーダンス：$Z_{\mathrm{B}}=\dfrac{E_{\mathrm{B}}}{I_{\mathrm{B}}}=\dfrac{E_{\mathrm{B}}{}^{2}}{S_{\mathrm{B}}}=\dfrac{V_{\mathrm{B}}{}^{2}}{S_{3\mathrm{B}}}$ [Ω]

インピーダンス$\dot{Z}$の pu 値は

$$\dot{Z}_{\mathrm{pu}}=\frac{\dot{Z}}{Z_{\mathrm{B}}}=\frac{S_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}{}^{2}}\dot{Z}=\frac{3S_{\mathrm{B}}}{\left(\sqrt{3}E_{\mathrm{B}}\right)^{2}}\dot{Z}=\frac{S_{3\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{B}}{}^{2}}\dot{Z}$$

3相回路でV_{B}と$S_{3\mathrm{B}}$を基準値にすると単相分と同じかたち。
3相の有効電力 P[W]，無効電力 Q[var]， 皮相電力 S[VA]は：

$$P_{\mathrm{pu}}=\frac{P}{S_{3\mathrm{B}}},\ Q_{\mathrm{pu}}=\frac{Q}{S_{3\mathrm{B}}},\ S_{\mathrm{pu}}=\frac{S}{S_{3\mathrm{B}}}$$

パーセント法

pu 値を 100 倍した値で，単位法と同様[VA][V]の単位無しに計算できる。発電機や変圧器などの電力機器（銘板に）は，定格容量，定格電圧を基準としたパーセント法で値を表示。
インピーダンス$\dot{Z}$ [Ω]の％インピーダンスは

$$\dot{Z}_{\%}=\dot{Z}_{\mathrm{pu}}\times 100=\frac{\dot{Z}I_{\mathrm{B}}}{E_{\mathrm{B}}}\times 100=\dot{Z}\frac{S_{3\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{B}}{}^{2}}\times 100\ [\%]$$

逆に％インピーダンスから実値は$\dot{Z}=\dfrac{\dot{Z}_{\%}}{100}\times\dfrac{V_{\mathrm{B}}{}^{2}}{S_{3\mathrm{B}}}$

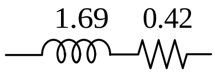
ただし電圧×電流は，10^2の係数がかかり煩雑

単位法：$E_{\mathrm{pu}}I_{\mathrm{pu}}=\dfrac{E}{E_{\mathrm{B}}}\dfrac{I}{I_{\mathrm{B}}}=\dfrac{S}{S_{\mathrm{B}}}=S_{\mathrm{pu}}$

$$E_{\%}\cdot I_{\%}=E_{\mathrm{pu}}\times 100\cdot I_{\mathrm{pu}}\times 100$$
$$=\left(\frac{E}{E_{\mathrm{B}}}\times 100\right)\left(\frac{I}{I_{\mathrm{B}}}\times 100\right)$$
$$=\frac{S}{S_{\mathrm{B}}}\times 10^{4}=S_{\mathrm{pu}}\times 100\times 10^{2}=S_{\%}\times 10^{2}$$

例題：抵抗 10 Ω, リアクタンス 40 Ω, 線間電圧 154 kV の送電線がある, いま, 基準容量 10 MVA, 基準電圧 154 kV として, 送電線の％インピーダンスを求め, ％インピーダンス図を描け。

$$Z_{\mathrm{pu}} = \frac{S_{\mathrm{B}}}{{V_{\mathrm{B}}}^2}\dot{Z}\ \text{より}\ 10\frac{10\mathrm{M}}{(154\,\mathrm{k})^2}\times 100 = 0.42\ \%,\ 40\frac{10\mathrm{M}}{(154\,\mathrm{k})^2}\times 100 = 1.69\ \%,\ \text{よって，}\ Z_{\%} = 0.42 + \mathrm{j}1.69$$



%インピーダンスの基準値の変換

電力系統は, 定格の異なった機器が接続されるので, 単位法で表すために基準値を変換する。容量, 電圧, 電流の定格値が, S_{R}, E_{R}, I_{R} の機器のインピーダンス値のパーセント表示は

$$\dot{Z}_{\mathrm{R}\%} = \dot{Z}_{\mathrm{pu}}\times 100 = \frac{\dot{Z}I_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{R}}}\times 100 = \dot{Z}\frac{S_{\mathrm{R}}}{{E_{\mathrm{R}}}^2}\times 100\,[\%]$$

これを基準値が容量 S_{B} [MVA]，電圧 E_{B} [kV]の系統で使用した場合の％インピーダンスは

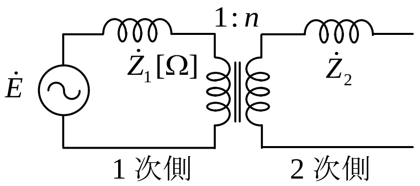
$Z_{\mathrm{B}\%} = \dot{Z}\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{{E_{\mathrm{B}}}^2}\times 100$ だから， $Z_{\mathrm{R}\%}$ とは，

$Z_{\mathrm{B}\%} = Z_{\mathrm{R}\%}\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{S_{\mathrm{R}}}\left(\dfrac{E_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{B}}}\right)^2$。

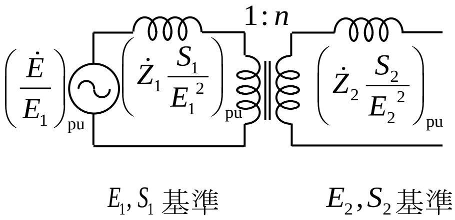
pu 表示でも同様に $Z_{\mathrm{Bpu}} = Z_{\mathrm{Rpu}}\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{S_{\mathrm{R}}}\left(\dfrac{E_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{B}}}\right)^2$。

定格電圧を同じ（$E_{\mathrm{R}} = E_{\mathrm{B}}$）にすれば, 電圧換算不要で $Z_{\mathrm{Bpu}} = Z_{\mathrm{Rpu}}\dfrac{S_{\mathrm{B}}}{S_{\mathrm{R}}}$ となり, 容量倍で良い。

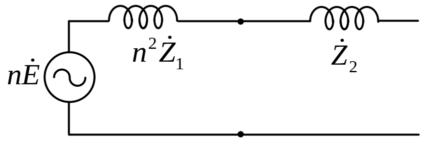
変圧器を含む回路での基準値の選び方



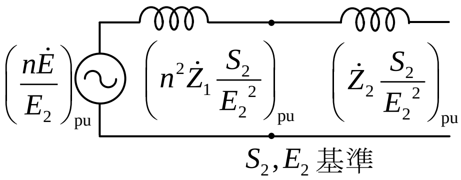
(a) 巻数比 n の変圧器



(b) pu インピーダンス図



(c) 図(a)を 2 次側に換算した図



(d) 図(c)の pu インピーダンス図

$E_2 = nE_1,\ S_1 = S_2$ とおけば, (b)と(d)は等しい。つまり1次2次毎に pu インピーダンス図求め, その後直接接続すればよい。

例：1次系統が 500 kV, 2次系統が 275 kV の系統が 300 MVA, 500/275 kV の変圧器で接続されているとき, pu インピーダンス図は, 1次側を 300 MVA, 500 kV, 2次側を 300 MVA, 275 kV として pu インピーダンスを求めて, 接続すると全体の pu インピーダンス図になる。