

電力システム解析論

第1回 送電線路のモデルと インダクタンス1 平成23年10月07日

2011/10/07

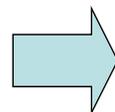
電力システム解析論

1

電磁気現象

- Maxwellの方程式(微分表示)

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \cdot \varepsilon_0 E = \rho \\ \nabla \cdot \mu_0 H = 0 \end{array} \right.$$



FDTD (Finite-difference time-domain)法
などで解く
(空間・時間領域での
差分方程式に展開して
逐次計算をすることで、
電場・磁場を求める)

2011/10/07

電力システム解析論

2

分布定数回路

- 過渡回路と交流回路

- 単位長あたり

- 抵抗: $R[\Omega]$, インダクタンス: $L[H]$,

- 静電容量: $C[F]$, 漏れコンダクタンス: $G[S]$

過渡回路

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial x} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t} \\ \frac{\partial I}{\partial x} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t} \end{cases}$$

交流回路

$$\begin{cases} \frac{d\dot{V}}{dx} = -(R + j\omega L)\dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dx} = -(G + j\omega C)\dot{V} \end{cases}$$

ただし, 交流の角周波数: $\omega[\text{rad/s}]$

集中定数回路

- 単位長あたり

- 直列インピーダンス $[\Omega/\text{km}]$

$$\dot{Z} = R + j\omega L$$

- 並列アドミタンス $[S/\text{km}]$

$$\dot{Y} = G + j\omega C$$

- 長さ X の線路のインピーダンス, アドミタンス

$$X\dot{Z}, X\dot{Y}$$

- T型, π 型等価回路で模擬

送電線のインダクタンス

- 誘導電圧 $e = \frac{d\tau}{dt}$
- e:誘導電圧(V), τ :鎖交磁束 (Wbt)
 - Wbt:磁束(Wb)と鎖交する回路のターン数tの積
 - 二導体回路では各導体の外部磁束は他の回路に一回鎖交する
 - 透磁率一定の場合, 鎖交磁束は電流に比例
 - 誘導電圧は電流変化率に比例
$$e = L \frac{di}{dt}$$
- L:比例定数・回路のインダクタンス(H), di/dt:電流変化率(A/s) $L = \frac{d\tau}{di}$
- 線形システムの場合
 - 鎖交磁束は電流に比例 $L = \frac{\tau}{i}$
 - 磁気回路は一定の透磁率を持つ

送電線のインダクタンス

- 交流回路(正弦波電流)
 - 自己インダクタンスの定義 $\tau = Li$
電流に対する鎖交磁束
 - 鎖交磁束のフェーザ表示 $\dot{\Psi} = L\dot{I}$
- Ψ :鎖交磁束のフェーザ, I:電流のフェーザ
- 鎖交磁束による電圧降下 $\dot{V} = j\omega\dot{\Psi}$
 $= j\omega L\dot{I}$

送電線のインダクタンス

- 交流回路(正弦波電流)

- 相互インダクタンスの定義

他の回路に流れる電流に起因する鎖交磁束

- 鎖交磁束のフェーザ表示

$$\dot{M}_{12} = \frac{\dot{\Psi}_{12}}{\dot{I}_2}$$

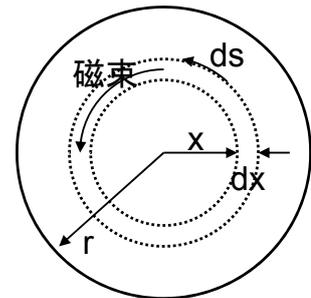
\dot{I}_2 : 回路2に流れる電流のフェーザ, $\dot{\Psi}_{12}$: 回路2に流れる電流 \dot{I}_2 により生じる回路1の鎖交磁束のフェーザ

- 回路2の鎖交磁束による回路1に生じる電圧降下

$$\dot{V}_1 = j\omega M_{12} \dot{I}_2 = j\omega \dot{\Psi}_{12}$$

送電線のインダクタンス 内部鎖交磁束

- 送電線は太い中実導体
- 電線外部の鎖交磁束だけでなく, 電線内部の鎖交磁束を考える必要あり
 - 送電線を円柱導体として考える
 - 帰路は十分離れていると仮定
 - 磁束は同心円状に分布すると仮定
 - 起磁力は電流経路のATに比例



$$mmf = \oint H \cdot ds = I$$

H: 磁界強度(AT/m), s: 経路(m), I: 電流(A)

送電線のインダクタンス 内部鎖交磁束

- 中心から距離 x (m)の内側の電流 I_x (A)による磁界強度 H_x (AT/m)

$$\oint H_x ds = I_x \quad \Rightarrow \quad 2\pi x H_x = I_x$$

- 全電流 I (A)に対する I_x (A)の割合

$$I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I$$

- 全電流に対する H_x (AT/m)

$$H_x = \frac{1}{2\pi x} I_x = \frac{x}{2\pi r^2} I$$

- H_x に対する磁束密度 B_x (Wb/m²)

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x}{2\pi r^2} I$$

ただし μ は導体の透磁率

送電線のインダクタンス 内部鎖交磁束

- 厚さ dx (m)の円筒導体の磁束 $d\phi$ (Wb/m)
 - 磁束密度 B_x (Wb/m²)と磁力線の法線方向 dx (m)積

$$d\phi = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} dx$$

- 円筒内部の電流に鎖交する単位長当たりの鎖交磁束 $d\psi$ (WbT/m)

$$d\psi = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\phi = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} \frac{\mu x I}{2\pi r^2} dx = \frac{\mu x^3 I}{2\pi r^4} dx$$

送電線のインダクタンス 内部鎖交磁束

- 全内部鎖交磁束 ψ_{int} (WbT/m)
 - 半径方向に積分

$$\psi_{\text{int}} = \int_0^r \frac{\mu x^3 I}{2\pi r^4} dx = \frac{\mu I}{2\pi r^4} \left[\frac{x^4}{4} \right]_0^r = \frac{\mu I}{2\pi r^4} \frac{r^4}{4} = \frac{\mu I}{8\pi}$$

- 空気の比透磁率 1
- 真空の透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

$$\Psi = LI$$

$$\psi_{\text{int}} = \frac{I}{8\pi} 4\pi \times 10^{-7} = \frac{I}{2} \times 10^{-7} \quad \Rightarrow \quad L_{\text{int}} = \frac{1}{2} \times 10^{-7}$$

内部インダクタンス

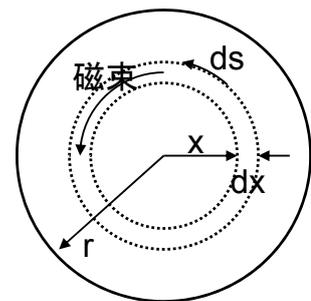
送電線のインダクタンス 内部鎖交磁束

- 送電線は太い中実導体
- 電線外部の鎖交磁束だけでなく、電線内部の鎖交磁束を考える必要あり

- 空気の比透磁率 1
- 真空の透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m
- 内部鎖交磁束

$$\psi_{\text{int}} = \frac{I}{8\pi} 4\pi \times 10^{-7} = \frac{I}{2} \times 10^{-7}$$

- 内部インダクタンス $L_{\text{int}} = \frac{1}{2} \times 10^{-7}$



導体外の二点間を鎖交する磁束

- 導体の外部鎖交磁束
- 導体の中心より距離D1,D2離れた点P1,P2間に鎖交する磁束
 - 磁束は同心円状に分布
 - 中心よりx(m)離れた場所の磁界強度Hx(AT/m)

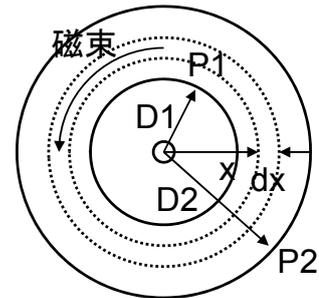
$$2\pi x H_x = I \quad \Rightarrow \quad H_x = \frac{I}{2\pi x}$$

- 磁束密度Bx(Wb/m²)

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu I}{2\pi x}$$

- 厚さdx(m)の円筒中の磁束dφ(Wb/m)

$$d\phi = \frac{\mu I}{2\pi x} dx$$



導体外の二点間を鎖交する磁束

- 導体外部の磁束は、導体中の電流を一度だけ鎖交する
 - 単位長当たりの鎖交磁束dψは磁束dφに等しい

$$d\psi = d\phi$$

- 点P1,P2間を鎖交する全磁束
 - D1,D2間の鎖交磁束

$$\psi_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu I}{2\pi x} dx = \frac{\mu I}{2\pi} [\log_e x]_{D_1}^{D_2} = \frac{\mu I}{2\pi} (\log_e D_2 - \log_e D_1) = \frac{\mu I}{2\pi} \log_e \frac{D_2}{D_1}$$

- 空気の比透磁率1として、真空の透磁率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m より

$$\psi_{12} = \frac{4\pi \times 10^{-7} I}{2\pi} \log_e \frac{D_2}{D_1} = 2 \times 10^{-7} I \log_e \frac{D_2}{D_1} \quad \Rightarrow \quad L_{12} = 2 \times 10^{-7} \log_e \frac{D_2}{D_1}$$

外部インダクタンス