# 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26年10月07日

# 電力系統の構成

- 発電機（発電所）
- 負荷
- 変圧器（変電所）
- 送電線（送電・配電）
  - 架空線
  - ケーブル
    - 地中
    - 海底
    - ガス管路

# 送電線

- 要素
  - 抵抗
  - インダクタンス
  - キャパシタンス
  - コンダクタンス
- 材料の変化
  - 銅→アルミニウム
    - コスト
    - 重量
    - 同抵抗で断面積大
      - 硬銅97.3%,Al61%
      - 撚りにより1～2%増
    - 導体表面での電界強度低くなる
    - コロナ放電がおきにくい

# 架空送電線

- AAC: All Aluminum conductors
- AAAC: All Aluminum Alloy conductors
- ACSR: Aluminum conductor, steel reinforced
- ACAR: Aluminum conductor, alloy reinforced
- 表皮効果があるので芯線の抵抗の影響小

# 送電線の抵抗

- 直流抵抗
  - $R_0 = \frac{\rho l}{A}\Omega$
    - $\rho$:導体の抵抗率，$l$ :導体長，$A$ :導体断面積
  - 交流抵抗は異なる
    - 表皮効果，近接効果
- 温度特性
  - $\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1}$
    - $R_1$, $R_2$:温度$t_1$, $t_2$の導体抵抗，$T$:温度

# 電磁気現象

- Maxwellの方程式(微分表示)

$$
\begin{cases}
\nabla \times E = -\mu_0 \dfrac{\partial H}{\partial t} \\
\nabla \times H = J + \varepsilon_0 \dfrac{\partial E}{\partial t} \\
\nabla \cdot \varepsilon_0 E = \rho \\
\nabla \cdot \mu_0 H = 0
\end{cases}
$$

$\Rightarrow$

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)

# 分布定数回路

- 過渡回路と交流回路
  - 単位長あたり
    抵抗:R[Ω], 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

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

交流回路

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

ただし，交流の角周波数:ω[rad/s]

# 集中定数回路

- 単位長あたり
  - 直列インピーダンス[Ω/km]

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

  - 並列アドミタンス[S/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
    - 磁気回路は一定の透磁率を持つ

$$L = \frac{\tau}{i}$$

# 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
    電流に対する鎖交磁束

    $$\tau = Li$$

    - 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

    $$\begin{aligned}\dot{V} &= j\omega\dot{\Psi} \\ &= j\omega L\dot{I}\end{aligned}$$

# 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

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

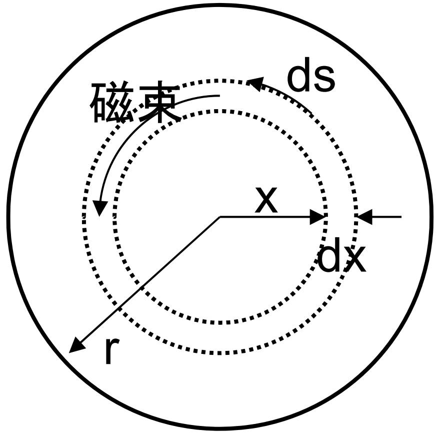
$I_2$:回路2に流れる電流のフェーザ，$\Psi_{12}$:回路2に流れる電流$I_2$により生じる回路1の鎖交磁束のフェーザ

    - 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/m^2)

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

ただしμは導体の透磁率

# 送電線のインダクタンス<br>内部鎖交磁束

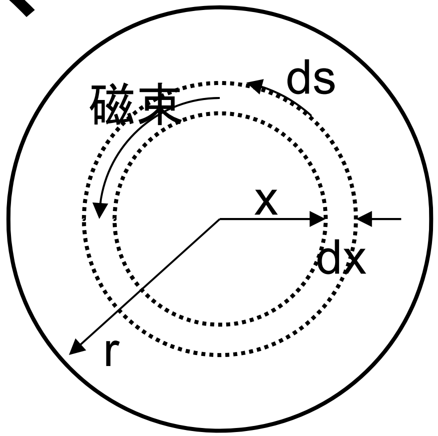
- 厚さdx(m)の円筒導体の磁束dφ(Wb/m)
  - 磁束密度$B_x$(Wb/m$^2$)と磁力線の法線方向dx(m)積

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

- 円筒内部の電流に鎖交する単位長当たりの鎖交磁束dψ(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$\psi_{int}$(WbT/m)
  - 半径方向に積分

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

- 空気の比透磁率1
- 真空の透磁率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m

$$\Psi = LI$$

$$\psi_{\mathrm{int}} = \frac{I}{8\pi}4\pi\times10^{-7} = \frac{I}{2}\times10^{-7} \Rightarrow L_{\mathrm{int}} = \frac{1}{2}\times10^{-7}$$

内部インダクタンス

導体径には関係しない