電力システム解析論

第2回　送電線路のモデルと
インダクタンス1
平成22年10月08日

線路モデル

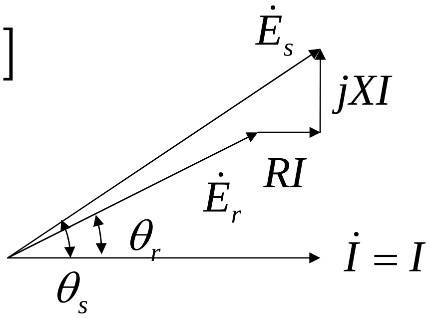
- 50km以下(短距離送電線路)
  – C,g無視
  – R,Lの直列インピーダンス回路
- 50km～100km(中距離送電線路)
  – G無視
  – T,π型等価回路
- 100km以上(長距離送電線路)
  – 分布定数回路

前回

短距離送電線路 (50km以下)

- 線路インピーダンス $R[\Omega], X[\Omega]$
- 送･受電端電圧 $\dot{E}_s[V], \dot{E}_r[V]$
- 送･受電端電流 $\dot{I}_s[A], \dot{I}_r[A]$ $\quad \dot{I}_s = \dot{I}_r = \dot{I}$
- 送･受電端力率 $\cos\theta_s, \cos\theta_r$
- 電力 $P_s[W], P_r[W]$

線路の絵



短距離送電線路 (50km以下)

- 送受電端電圧の関係

$$\dot{E}_s = E_r\cos\theta_r + IR + j\left(E_r\sin\theta_r + IX\right)[V]$$

$$E_s = \sqrt{\left(E_r\cos\theta_r + IR\right)^2 + \left(E_r\sin\theta_r + IX\right)^2}\,[V]$$

- 送電端電力

$$P_s = \left(E_r\cos\theta_r + IR\right)I[W]$$

$$Q_s = \left(E_r\sin\theta_r + IX\right)I[W]$$

  – 力率 $\cos\theta_s = \dfrac{E_r\cos\theta_r + IR}{\sqrt{\left(E_r\cos\theta_r + IR\right)^2 + \left(E_r\sin\theta_r + IX\right)^2}}$

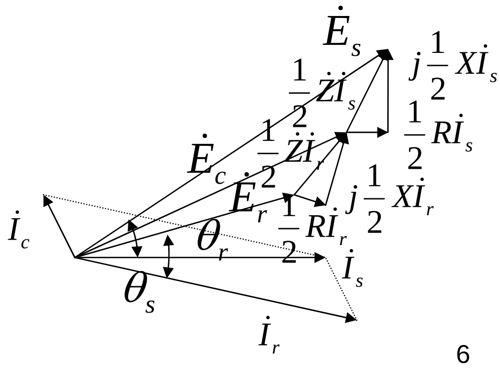
中距離送電線路 (50～100km)

- T型等価回路とπ型等価回路の違い
  - 対地静電容量への充電電流の影響

中距離送電線路 (50～100km)

- T型等価回路
  - 線路インピーダンス $\frac{1}{2}\dot{Z} = \frac{1}{2}(R + jX)[\Omega]$
    - 線路中央に集中並列アドミタンス $\dot{Y} = j\omega C[S]$
  - 送･受電端電流 $\dot{I}_s[A], \dot{I}_r[A]$ $\dot{I}_s \neq \dot{I}_r$
  - 送･受電端電圧 $\dot{E}_s[V], \dot{E}_r[V]$
    - 中点電圧 $\dot{E}_c = \dot{E}_r + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_r$
    - 中点電流 $\dot{I} = \dot{Y}\dot{E}_c$

線路の絵



中距離送電線路 (50～100km)

- T型等価回路
  - 送･受電端電流の関係

$$\dot{I}_s = \dot{I}_r + \dot{I}_c = \dot{I}_r + \dot{Y}\dot{E}_c = \dot{I}_r + \dot{Y}\left(\dot{E}_r + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_r\right) = \dot{Y}\dot{E}_r + \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{I}_r$$

  - 送･受電端電圧の関係

$$\dot{E}_s = \dot{E}_c + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_s = \left(\dot{E}_r + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{I}_r\right) + \frac{1}{2}\dot{Z}\left\{\dot{Y}\dot{E}_r + \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{I}_r\right\}$$

$$= \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{E}_r + \frac{1}{2}\dot{Z}\left\{1 + \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\right\}\dot{I}_r$$

$$= \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{E}_r + \dot{Z}\left\{1 + \frac{1}{4}\dot{Z}\dot{Y}\right\}\dot{I}_r$$

中距離送電線路 (50～100km)

- π 型等価回路
  - 線路インピーダンス $\dot{Z} = R + jX\,[\Omega]$
    - 線路両端に並列アドミタンス(0.5) $\frac{1}{2}\dot{Y} = j\frac{1}{2}\omega C\,[S]$
  - 送･受電端電流 $\dot{I}_s[A], \dot{I}_r[A]$ $\dot{I}_s \neq \dot{I}_r$
    - 線路電流 $\dot{I}_L[A]$
    - シャント電流 $\dot{I}_{cs}[A], \dot{I}_{cr}[A]$
  - 送･受電端電圧 $\dot{E}_s[V], \dot{E}_r[V]$

$$\dot{I}_L = \dot{I}_r + \dot{I}_{cr} = \dot{I}_s - \dot{I}_{cs}$$

$$\dot{I}_{cs} = \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_s, \dot{I}_{cr} = \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_r$$

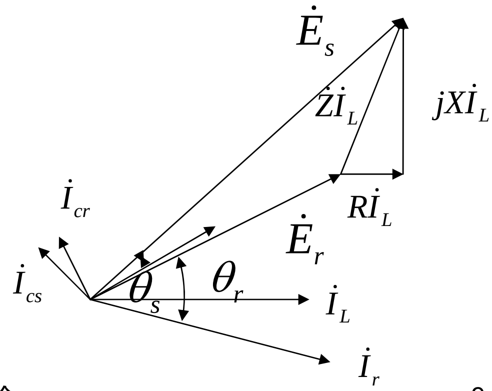
線路の絵

中距離送電線路 (50～100km)

- π 型等価回路
  - 線路電流 $\dot{I}_L = \dot{I}_r + \dot{I}_{cr} = \dot{I}_s - \dot{I}_{cs} = \dot{I}_r + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_r = \dot{I}_s - \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_s$
  - 送･受電端電圧

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I}_L = \dot{E}_r + \dot{Z}\left(\dot{I}_r + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_r\right)$$

$$= \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I}_r$$



中距離送電線路 (50～100km)

- π 型等価回路
  - 送･受電端電流

$$\dot{I}_s = \dot{I}_L + \dot{I}_{cs} = \left(\dot{I}_r + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_r\right) + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_s$$

$$= \left(\dot{I}_r + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{E}_r\right) + \frac{1}{2}\dot{Y}\left\{\left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{E}_r + \dot{Z}\dot{I}_r\right\}$$

$$= \dot{Y}\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{2}\dot{Z}\dot{Y}\right)\right\}\dot{E}_r + \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{Z}\right)\dot{I}_r$$

$$= \dot{Y}\left(1 + \frac{1}{4}\dot{Z}\dot{Y}\right)\dot{E}_r + \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{Z}\right)\dot{I}_r$$

電力システム

- 何で三相交流？
- 送電線のLC(線路定数)
  - 架空送電線
  - ケーブル線路
- 三相交流回路と対称座標変換
  - 三相交流回路
  - 対称座標系
    - 正相分による表示
- 単位法

線間電圧を基準に取る

なんで三相交流？

- 伝送容量の比較（Vは線間電圧実効値）

比率

- 単相二線式
  - 伝送容量 $VI\cos\theta$
  - 条数2 → 一条当りの伝送容量 $\frac{1}{2}VI\cos\theta$　　1
- 単相三線式
  - 伝送容量 $2VI\cos\theta$
  - 条数3 → 一条当りの伝送容量 $\frac{2}{3}VI\cos\theta$　　4/3
- 三相三線式
  - 伝送容量 $\sqrt{3}VI\cos\theta$
  - 条数3 → 一条当りの伝送容量 $\frac{1}{\sqrt{3}}VI\cos\theta$　　$2/\sqrt{3}$
- 三相四線式
  - 伝送容量 $\sqrt{3}VI\cos\theta$
  - 条数4 → 一条当りの伝送容量 $\frac{\sqrt{3}}{4}VI\cos\theta$　　$\sqrt{3}/2$
- 対称n相n線式
  - 伝送容量 $\frac{n}{2}VI\cos\theta$
  - 条数n → 一条当りの伝送容量 $\frac{1}{2}VI\cos\theta$　　1
- 直流方式
  - 伝送容量 VI
  - 条数n → 一条当りの伝送容量 $\frac{1}{2}VI$　　1

但しACは実効値なので実質的に2

送電線(多相交流回路)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(多相交流回路)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 $$\Psi = LI$$

    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
$$V = j\omega LI$$
$$= j\omega\Psi$$

送電線(多相交流回路)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

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_2}$$

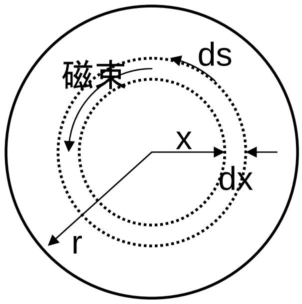
I2:回路2に流れる電流のフェーザ，Ψ12:回路2に流れる電流により生じる回路1の鎖交磁束のフェーザ

    - 回路2の鎖交磁束による回路1に生じる電圧降下

$$V_1 = j\omega M_{12} I_2 = j\omega \Psi_{12}$$

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Ix(A)による磁界強度Hx(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Ix(A)の割合

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

– 全電流に対するHx(AT/m)

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

– Hxに対する磁束密度Bx(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 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Bx(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ψint(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μ0=4π×10-7H/m

$$\Psi = LI$$

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