電力システム解析論

第12回　潮流計算3

平成23年1月21日

ニュートンラフソン法復習

- 2変数の2関数
  - 変数x_1,x_2,関数f_1,f_2,定数K_1,K_2
  - テーラー展開の二階以上の項を無視

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = K_1 \\ f_2(x_1, x_2) = K_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) \\ K_2 - f_2\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)-1} \begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\ x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \end{cases}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標 1

- 極座標での潮流計算
  - 電圧・アドミタンス

$$\begin{cases} \dot{V}_k = V_k \angle \delta_k \\ \dot{V}_m = V_m \angle \delta_m \end{cases} \qquad \begin{aligned} \dot{Y}_{km} &= Y_{km} \angle \theta_{km} \\ \dot{I}_k &= \sum_{m=1}^{N} \dot{Y}_{km} \dot{V}_m = \sum_{m=1}^{N} Y_{km} V_m \angle \theta_{km} + \delta_m \end{aligned}$$

  - 電力

$$P_k + jQ_k = \dot{V}_k \bar{\dot{I}}_k = V_k \angle \theta_k \sum_{m=1}^{N} Y_{km} V_m \angle -\theta_{km} - \delta_m = \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \angle \delta_k - \delta_m - \theta_{km}$$

$$\begin{cases} P_k = \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \\ Q_k = \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \end{cases}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標2

- 修正方程式
  - 指定値P_k,Q_kと計算値$P_{k,calc}$,$Q_{k,calc}$の誤差 ΔP_k, ΔQ_k

ヤコビアン
（いまから求める）

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \cdots \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \\ & & & & \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \cdots \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標3

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial}{\partial \delta_l} \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項l≠k

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = V_k V_l Y_{kl} \sin(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項l=k

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_l} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{N} V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標4

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial}{\partial \delta_l} \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項l≠k

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = -V_k V_l Y_{kl} \cos(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項l=k

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_l} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = -\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{N} V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標５

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = \frac{\partial}{\partial V_l} \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項l≠k

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = V_k Y_{kl} \cos(\delta_k - \delta_l - \theta_{kl})$$

– 対角項l=k

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_l} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{N} V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + 2V_k Y_{kk} \cos\theta_{kk}$$

ニュートンラフソン法の適用 極座標6

- 修正方程式の係数

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = \frac{\partial}{\partial V_l} \sum_{m=1}^{N} V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km})$$

– 非対角項l≠k

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = V_k Y_{kl} \sin(\delta_k - \delta_l - \theta_{km})$$

– 対角項l=k

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_l} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{N} V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + 2V_k Y_{kk} \sin\theta_{kk}$$

ニュートンラフソン法の適用
極座標7

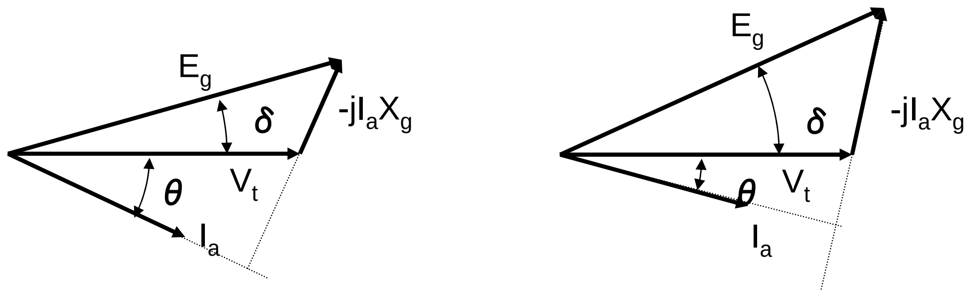
- 潮流計算へのニュートンラフソン法の適用
  - PV指定母線
    - 電圧は与えられているので求める必要が無い
    - 位相角のみ求める
      - 位相角の収束計算は不要
- 極座標表示と直交座標表示
  - 極座標表示では，P_kとδ_k，Q_kと$|V_k|$の関係が明示的に現れる

潮流計算の利用

- 潮流計算結果
  - 母線電圧（振幅，位相），母線電力
  - 線路潮流
- 利用方法
  - 未建設の電力システムの運用状態の検討
  - 既設電力システムにおける制御効果の検証
    - 変圧器のタップ変更
      - 各母線の電圧を許容範囲内に維持可能か
        維持できない場合はタップ変更し，再度潮流計算
    - 系統間連系時の連系線潮流の維持
      - 規定値内に収めるための発電量の調整

発電機制御と電力潮流

- 母線電圧Vtと発電機起電力Egの関係を表すフェーザ図



  – 起電力Eg一定(界磁一定)で，原動機入力を大きくすると，EgとVtの角度差・Iaが増大，力率角減少

電力方程式

- 母線電圧 $V_t = |V_t|\angle 0°$
- 発電機内部電圧 $E_g = |E_g|\angle \delta$
- 発電機内部リアクタンス X_g
- 発電機端子電流 $I_a = \dfrac{|E_g|\angle\delta - V_t}{jX_g}$
- 発電機出力電力

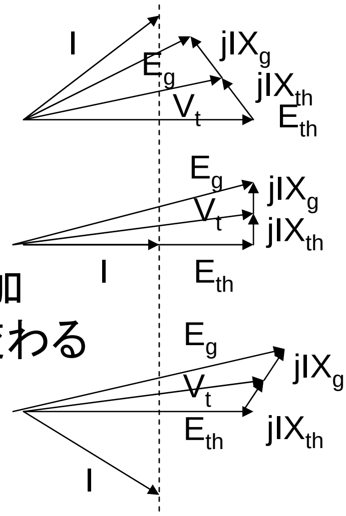
$$P + jQ = V_t \bar{I}_a = \frac{|V_t||E_g|\angle -\delta - |V_t|^2}{-jX_g}$$

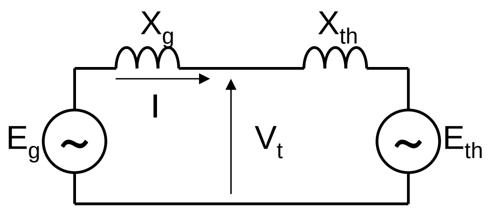
  – 有効電力
  – 無効電力

$$P = \frac{|V_t||E_g|}{X_g}\sin\delta \qquad Q = \frac{|V_t|}{X_g}\left(|E_g|\cos\delta - |V_t|\right)$$

母線電圧の制御
発電機の界磁制御

- 発電機母線→PV指定
  - Qは潮流計算で求まる
  - フェーザ図
    - P一定，Eth一定
    - Vt大→Eg大→発電機の励磁増加
      電流Iの位相遅れる→無効電力増加
      ←界磁によりQ調整すると電圧も変わる





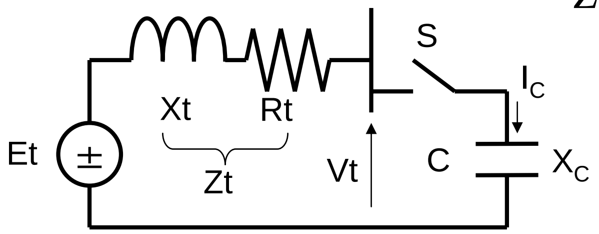
電力用コンデンサによる電圧調整

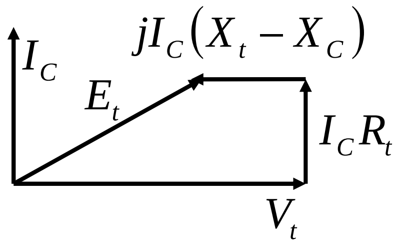
- 電力用コンデンサによる無効電力供給
  - 送配電線，変電所，負荷に設置
    - 投入しっ放し(配電用に多い)→夜間軽負荷時の電圧上昇
    - 負荷に応じたON/OFF→電圧調整可
      - タイマー動作，電圧フィードバック操作
  - 遅れ無効電力負荷(誘導機等)に設置
    - 線路電流低減→線路電圧降下の低減
  - 発電機の無効電力出力減少
    - 有効電力出力容量として使用可

潮流計算における電力コンデンサ

- 電圧（PV）指定できるのは，無効電力源がある母線のみ
  - 電力コンデンサの使用で負荷母線で電圧指定可能
  - 電力コンデンサの投入による母線電圧変化
    - コンデンサ電流

$$I_C = \frac{E_t}{Z_t - jX_C}$$

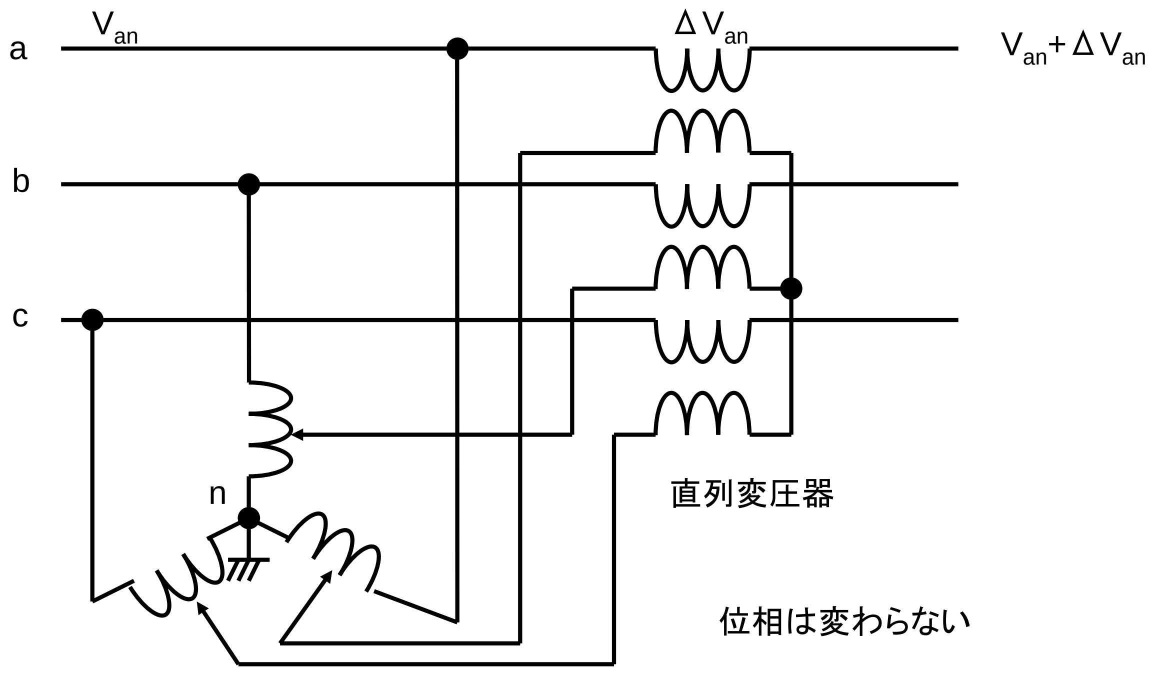




変圧器による潮流制御

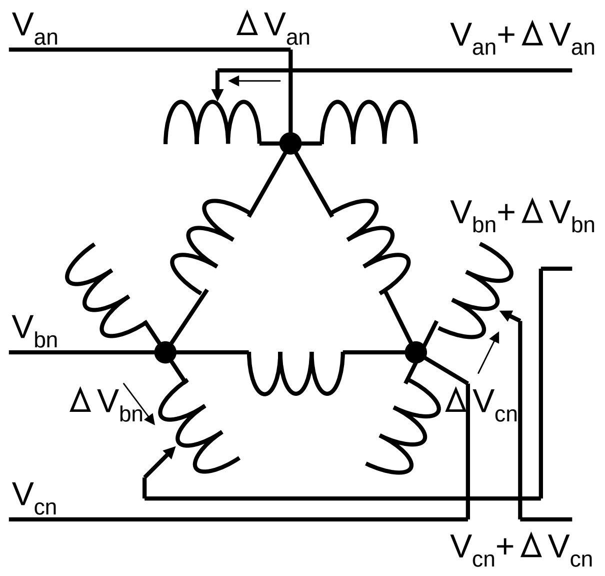
- 変圧器の機能
  - （母線）電圧レベルの変換
  - 有効電力・無効電力の制御
    - 電圧の微調整（±10%）
    - 位相の調整
    - 電圧・位相の両方の調整
  - タップ比
    - 巻数比の変更
      - 非荷電時
      - 負荷時タップ比制御(LTC: Load Tap Changing)

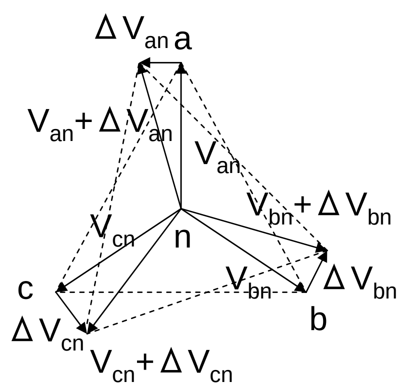
電圧調整用変圧器



位相は変わらない

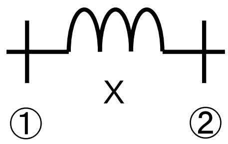
位相調整用変圧器

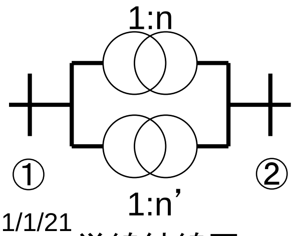




調整用変圧器が入った場合の系統（Y,Z）行列の作り方

- 変圧器で接続された2母線
  - 変圧比が2つの母線電圧ベースの比と同じ
    - 変圧器の漏れインピーダンス(pu値)
  - 巻数比の異なる変圧器の並列接続
    - 1:n変圧器→インピーダンス(pu値)
    - 1:n’変圧器→インピーダンス(pu値)+1:a理想変圧器（基準外変圧比変圧器を表す）

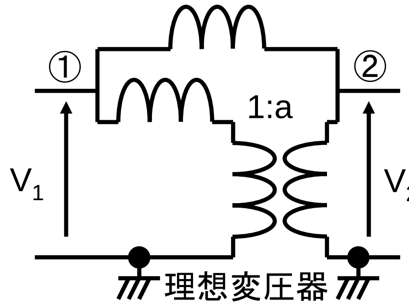




単線結線図

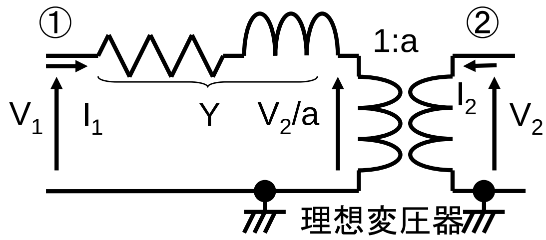
a=n’/n

単位法表示



基準外巻数比変圧器のアドミタンス表現1

- 変圧器
  - アドミタンスY
  - タップ比a
    - 電圧調整用変圧器a→実数(変圧比)
    - 位相調整用変圧器a→複素数(jexpδ)
  - リアクタンス(pu値)と理想変圧器による等価回路



基準外巻数比変圧器のアドミタンス表現2

- アドミタンス行列を求める
  - ノード①から理想変圧器への入力電力 $S_1 = \dfrac{V_2}{a}\bar{I}_1$
  - ノード②から理想変圧器への入力電力 $S_2 = V_2\bar{I}_2$
  - 理想変圧器の条件 $S_1 = -S_2$

$$\frac{V_2}{a}\bar{I}_1 = -V_2\bar{I}_2 \;\Rightarrow\; \frac{\bar{I}_1}{a} = -\bar{I}_2 \;\Rightarrow\; \bar{I}_1 = -a\bar{I}_2 \;\Rightarrow\; I_1 = -\bar{a}I_2$$

  - ノード①電流の別表現

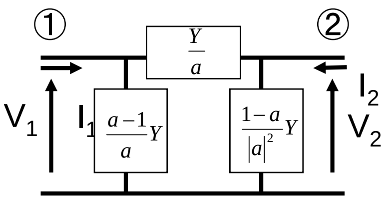
$$I_1 = Y\left(V_1 - \frac{V_2}{a}\right) = YV_1 - \frac{Y}{a}V_2$$

基準外巻数比変圧器のアドミタンス表現3

- アドミタンス行列を求める続き
  - ノード②電流

$$I_2 = -\frac{I_1}{\bar{a}} = -\frac{1}{\bar{a}}Y\left(V_1 - \frac{V_2}{a}\right) = \frac{Y}{\bar{a}}V_1 - \frac{Y}{\bar{a}a}V_2 = \frac{Y}{\bar{a}}V_1 - \frac{Y}{|a|^2}V_2$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -\dfrac{Y}{a} \\ \dfrac{Y}{\bar{a}} & \dfrac{Y}{|a|^2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$



aが実数のときY21=Y12となり，π形回路で表せる
YにRがあると負抵抗となり実際の回路としては表せない