電力システム解析論

第12回　電力系統の安定性

平成26年01月24日

電力系統の安定性

- 安定性
  - 通常運転状態にある同期回転機に対して擾乱を与え，再び通常運転状態に戻る能力
  - 現象例
    - 発電機入力トルクの変動→回転速度の周期変動→電圧・周波数の周期変動→固有周波数に一致すると脱調
    - 発電機の電機子電流による回転磁界と回転子の相対運動により，ダンパ巻線に生じる電流により振動の減衰作用が働く

電力系統の安定性の種類

- 過渡安定性
  - 電気-機械系の動的な振る舞い
    大擾乱下における同期運転の継続性
  - 第1波脱調
    - 擾乱発生後そのまま脱調
    - 制御系を含まない簡略モデルで可能
  - 第n波脱調
    - 擾乱発生後，動揺が大きくなり脱調
    - 励磁，調速制御系考慮

電力系統の安定性の種類

- 動態安定性，定態安定性
  - ゆっくりとした小さい変動
  - 動作点の安定性
    - 非線形微分方程式を線形化して評価
  - 動態安定性
    - 空隙磁束変化の考慮可能な発電機モデル+励磁・調速制御
  - 定態安定性
    - リアクタンス背後電圧一定発電機モデル。制御系無

電力系統の安定性の解析

- 解析に用いる仮定
  - 同期周波数の電圧・電流成分のみを対象
    - フェーザで解析
    - 直流成分，高調波成分は無視
  - 不平衡故障は対称成分に分解して評価
  - 発電機の電圧は回転速度の変化の影響を受けない

同期回転機の運動方程式

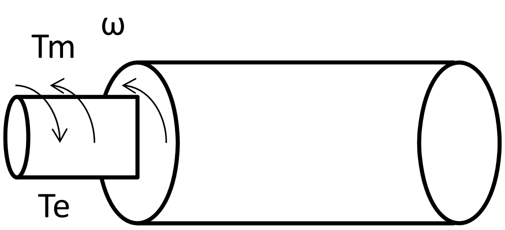
- 同期機の回転の振る舞いを表す
  - 加速トルクは回転子の慣性モーメントと回転角加速度の積
    - $J\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$
    - J[kgm2]:回転子質量による慣性定数(原動機含む)
    - Θm:回転子角度(静止座標系)
    - T:時間
    - Tm(Nm)>0:原動機からの入力機械トルク(回転損を除く)
    - Te(Nm)>0:電気(電磁気)トルク
    - Ta(Nm):加速トルク

同期回転機の運動方程式

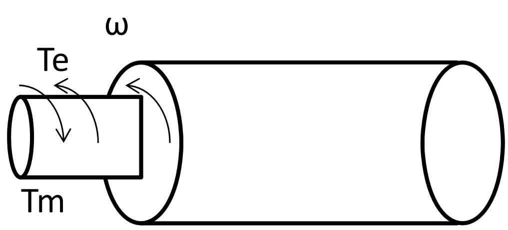
- Tmは回転軸をθmの正の方向に回転加速する力
  - 定常状態ではTmはTeと等しい→加速トルクTa=0
    - 回転子の加減速が無く，一定の同期速度で回転
→電力系統の他の回転機との同期運転と呼ぶ
  - 原動機→水車，蒸気タービン
  - ガバナ(調速機)の動作は，回転子の動特性による安定性の解析で扱う時間領域では，反応が無視できる。
→Tmは一定と扱える
- Teは発電機出力と電機子銅損|I|2Rを含む空隙磁束の電力

同期回転機の運動方程式

- 同期電動機の電力方向は発電機の逆
  - トルクの符号が逆
  - Te:電源から電動機を駆動する空隙磁束電力
  - Tm:回転負荷トルクと回転損失の和



発電機



電動機

同期回転機の運動方程式

- θ_m:固定子の静止座標系に対する角度
  - 時間とともに増加
  - 同期回転速度にたいする回転子速度が問題
    →同期回転速度で回転する座標系で表す
    - $\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m$
      - ω_{sm}:同期角速度
      - δ_m:回転子の位相差
    - 時間微分
      - $\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt}$ → $\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2}$
      - $\frac{d\delta_m}{dt}$ → 同期回転速度からのずれを表す

同期回転機の運動方程式

- 回転座標系での動揺方程式
  - $J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$ (Nm)
  - 回転子の角速度$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$
  - 動揺方程式を電力で表す
    - $J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$ (W)
      - Pm:回転子への入力電力-回転損失(損失を無視すると原動機からの入力電力)
      - Pe:空隙磁束の電力（電気出力）
      - Pa:加速電力

同期回転機の運動方程式

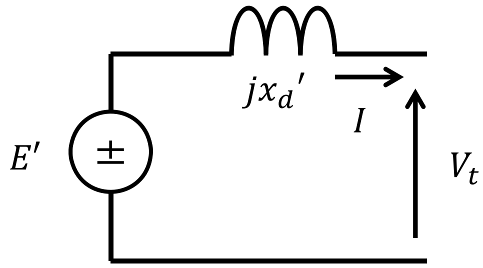
- $J\omega_m$:回転子の角運動量
  - $M = J\omega_{sm}$:回転機の慣性定数（同期回転速度）
  - 回転機の動作が安定な場合，トルクより電力を求める方が容易。$\omega_m = \omega_{sm}$として動揺方程式を扱う
    - $M\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$ (W)
  - Mの代わりにHを使うこともある
    - $H = \frac{\text{同期回転速度での運動エネルギー}}{\text{回転機の定格電力}}$

同期回転機の運動方程式

- $H = \frac{\frac{1}{2}J{\omega_{sm}}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_{mach}}$
  - S_{mach}:回転機の定格電力
  - $M = \frac{2H}{\omega_{sm}}S_{mach}$
- Hで動揺方程式を表す
  - $\frac{2H}{\omega_{sm}}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}}$
  - 単位法での表現
    - $\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$ p.u. $\quad \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$

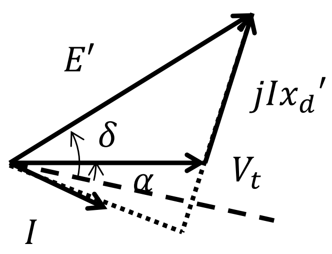
同期機の過渡安定性解析モデル

- P_m:一定を仮定(電力ネットワークの現象はガバナがタービンに作用するより早い)
- P_e:送配電線，負荷の状態で決まる
  - 負荷変動，送電線事故，遮断器動作
  - 回転子の加減速を決める
- 回転速度の起電力への影響は無視
- $x_d{}'$:過渡リアクタンス(定常状態では同期リアクタンスx_d)
- E':過渡内部起電力
- V_t:端子電圧
- 電機子抵抗は無視



同期機の過渡安定性解析モデル

- フェーザ図



- 発電機（母線1）が送電網を介して受電端（母線2）に送電するモデル
  - 電力回路網:送電線，変圧器，コンデンサ，発電機の過渡リアクタンス
  - $E_1{}'$:母線1の発電機の過渡内部起電力
  - $E_2{}'$:母線2の受電端の無限大母線または同期電動機の内部電圧

同期機の過渡安定性解析モデル

- 2母線(ノード)のアドミタンス行列

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

- 母線kの電力　$P_k + jQ_k = V_k \overline{\sum_{n-1}^{N} Y_{kn} V_n}$
  - 母線1の電力

$$P_1 + jQ_1 = E_1' \overline{(Y_{11} E_1{}')} + E_1{}' \overline{(Y_{12} E_2{}')}$$

$$E_1' = |E_1'| \angle \delta_1, E_2' = |E_2'| \angle \delta_2$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11}, Y_{12} = \left|Y_{12}\right| \angle \theta_{12}$$

    - $P_1 = |E_1'|^2 G_{11} + |E_1'||E_2'|\left|Y_{11}\right| \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})$
    - $Q_1 = -|E_1'|^2 B_{11} + |E_1'||E_2'|\left|Y_{12}\right| \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})$

同期機の過渡安定性解析モデル

- 母線1,2の位相差（電力相差角）$\delta = \delta_1 - \delta_2$,

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2}$$

  - $P_1 = |E_1'|^2 G_{11} + |E_1'||E_2'|\left|Y_{11}\right| \sin(\delta - \gamma)$
    - 発電機出力電力
  - $Q_1 = -|E_1'|^2 B_{11} + |E_1'||E_2'|\left|Y_{12}\right| \cos(\delta - \gamma)$
  - $P_c = |E_1'|^2 G_{11}, P_{max} = |E_1'||E_2'|\left|Y_{12}\right|$とすると
    - $P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma)$
    - 抵抗分が無視できるとき
      - $P_e = P_{max} \sin \delta, P_{max} = \frac{|E_1'||E_2'|}{X}$, x:母線1,2間の伝達リアクタンス