

7. 周波数安定度と RE の設計

この問題は水力単独系統についてのみ発生し、水力系統は復旧が速いので一旦停電して復旧することが多く、従って問題として顕在化しにくく、本書でも省略しようかと考えました。しかし著者が奉職する会社は水力王国で、単独になれば周波数不安定になってもおかしくない系統が 4 箇所あり、うち 2 箇所では現実に周波数不安定が発生しております。他の電力会社では稀なことゆえ、著者が記録に残しておかないと技術が散逸してしまうのではないかと考え直し、最低限の記述だけは残しておきます。

水力単独系統の周波数不安定を扱うための最小モデルは図 7.1 のように、かなり複雑なものになります。出てくる用語も一般の電力技術者には馴染みの薄いものばかりです。この解析技術は古典的なものであり、著者を除いてはもう知る人もいなくなったのではないかと思うので、章を立てて詳細に解説しておきます。

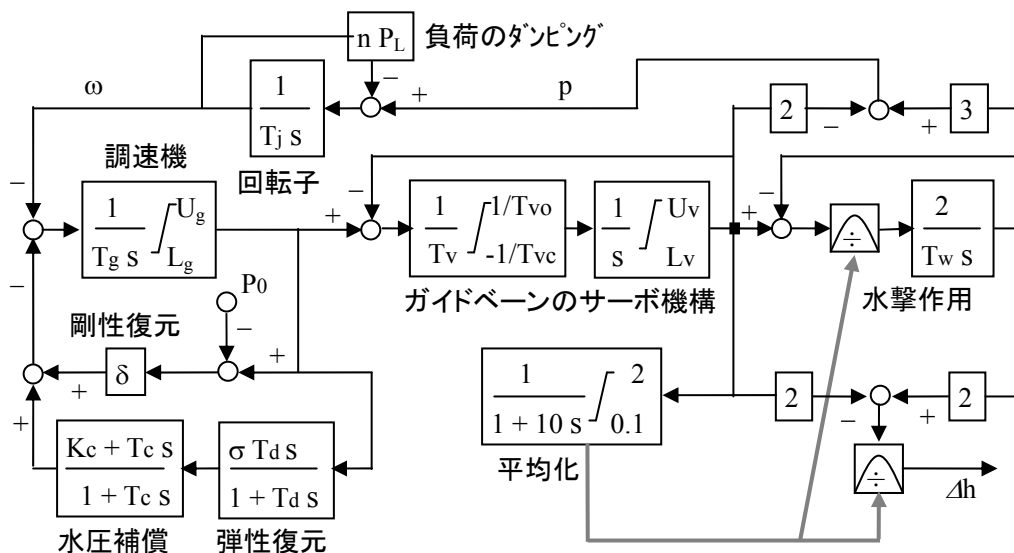


図 7.1 水力単独系統の周波数不安定を扱うための最小モデル

水撃作用

水車のガイドベーン（火力の加減弁に相当する）が動いて開度が変わると、水車出力は最終的には開度に見合った量になりますが、過渡的には鉄管内部の水の慣性の影響を受けます。これを水撃作用と言ひ、周波数安定度を損ねます。水撃作用は負荷遮断試験における水圧上昇として観測されます。

物理変数は次の記号で表現します。添字“0”は定格出力運転時の値を意味します。小文字は部分出力運転時の値を単位法（定格出力時を 1 とし比率で表現する手法）で表記したものです。ですから例えば流量は $Q = Q_0 q$ のように表現します。

ガイドベーン開度：A (m²) 鉄管断面積：Ap (m²) 水量：Q (m³/sec.)

鉄管流速：V (m/sec.) 落差：H (m) 水車出力：P (W)

水車の水量は次のように表現されます。ここに“g”は重力の加速度です。

$$\begin{aligned} Q_0 q = Q = A (2 g H)^{1/2} &= A_0 a (2 g H_0 h)^{1/2} \\ Q_0 &= A_0 (2 g H_0)^{1/2} \\ q &= a h^{1/2} \end{aligned} \quad (7.1)$$

鉄管流速は次のように表現されます。

$$\begin{aligned} Q_0 q = Q = A_p V &= A_p V_0 p \\ Q_0 &= A_p V_0 \\ q &= v \end{aligned} \quad (7.2)$$

水車出力は次のように表現されます。

$$\begin{aligned} P_0 p = P = Q g H &= Q_0 q g H_0 h \\ P_0 &= Q_0 g H_0 \\ p &= q h \end{aligned} \quad (7.3)$$

水撃作用は次のように表現されます。ここに“s”はラプラス演算子を意味します。

$$\begin{aligned} H_0 (h - 1) = H - H_0 &= H_0 - \frac{L}{g} s V = - \frac{L}{g} s (V_0 v) \\ h - 1 &= - \frac{L V_0}{g H_0} s v \end{aligned}$$

ここに L は鉄管の長さ(m)です。次のように定義される水管時定数： T_w を導入します。

$$T_w = \frac{L V_0}{g H_0}$$

これにより水撃作用は次のように表現されます。

$$h - 1 = - T_w s v \quad (7.4)$$

あらゆる物理量は運転状態での平均値と、その周りの微小変化量（記号 Δ を付す）の和として表現できます。その平均値には次の関係があります。

$$a = q = v = p \quad h = 1$$

微小変化量の間には次の関係があります。

$$\Delta q = h^{1/2} \Delta a + (1/2) a h^{-1/2} \Delta h = \Delta a + (1/2) a \Delta h \quad (7.1')$$

$$\Delta q = \Delta v \quad (7.2')$$

$$\Delta p = h \Delta q + q \Delta h = \Delta q + q \Delta h = \Delta q + a \Delta h \quad (7.3')$$

$$\Delta h = - T_w s \Delta v = - T_w s \Delta q \quad (7.4')$$

(7.4')式を(7.1')式に代入して Δh を消去し、次の関係を得ます。

$$\Delta q = \Delta a - (1/2) a T_w s \Delta q$$

$$\Delta q = \frac{1}{1 + (1/2) a T_w s} \Delta a \quad (7.5)$$

(7.4')式を(7.3')式に代入して Δh を消去し、次の関係を得ます。

$$\Delta p = \Delta q - a T_w s \Delta q = (1 - a T_w s) \Delta a$$

(7.5)式を用いれば上式は次のように表現できます。

$$\Delta p = \frac{1 - a T_w s}{1 + (1/2) a T_w s} \Delta a \quad (7.6)$$

(7.5)式を(7.4')式に代入して次の関係を得ます。

$$\Delta h = \frac{-T_w s}{1 + (1/2) a T_w s} \Delta a \quad (7.7)$$

これで原因： Δa により引き起こされる結果： Δq , Δp , Δh が(7.5), (7.6), (7.7)式で表現できました。これらの式は次のことを意味します；ガイドベーン開度が減少すると、流量は時間遅れを伴って減少し、水車出力は一時的な増大の後に減少し、水圧は一時的に増大します。これが水撃作用です。水撃作用は開度が1に近い高出力運転の場合に顕著になります。安全側の評価をするには定格出力運転のときの値を用います。ここで紹介した理論は「剛体理論」といい、鉄管などの弾性を無視していることです。もっと詳細な解析においては、これらの弾性を考慮に入れた「弾性理論」を用いますが、周波数安定度解析においては剛体理論で十分と著者は考えます。

調速機整定の矛盾⁽¹⁾

ここでは調速機系の標準定数を次のように仮定します。

$$\begin{aligned} T_g = 0.1 \text{ sec} \quad U_g = 1.5 \quad L_g = -0.5 \quad \delta = 0.03 \quad \sigma = 0.17 \quad T_d = 10 \text{ sec} \quad K_c = 1 \quad T_c = 1 \text{ sec} \\ T_v = 0.1 \text{ sec} \quad T_{v0} = 10 \text{ sec} \quad T_{vc} = 5 \text{ sec} \quad U_v = 1.1 \quad L_v = -0.1 \\ a = 0.9 \quad T_w = 2 \text{ sec} \quad n = 1.5 \quad T_j = 7 \text{ sec} \quad P_L = 0.9 \end{aligned}$$

一見して T_w が非常に大きいのは経済設計された最近の水力発電所であることを意味します。 σ がかなり大きいのは調速機の整定を鈍くしてあることを意味します。 $K_c = 1$ とは水圧補償を用いていないということです。この標準定数による水力の調速機系の周波数応答を標準的な火力と比較したのが図 7.2 です。0.05Hz 以上の周波数領域で水力の位相遅れが火力のより非常に大きく、周波数によっては 90 度もの位相遅れの違いがあります。この違いは勿論、水撃作用によるもので、フィードバック系の安定性を大いに損ね、周波数安定度が悪くなります。

1960 年代のまで水力発電所では T_w が 1 秒かそれ以下です。 T_w が 2 秒になった 1970 年代以降との比較を図 7.3 に示します。水撃作用 T_w が小さくなると位相遅れが顕著に小さくなり、 $T_w = 0.5$ 秒では火力と遜色なくなります。

なお、水力発電所には試送電という任務を負うものがあります。これは系統全部が停電したと

き最初に電気を送る役目で、火力の所内電源を優先的に確保し、火力の戦列復帰を急ぎます。水力の多くはフランス水車を使っており、これは30%以下の出力では磨耗が著しくなるので、ある程度の負荷が必要です。しかし試送電の際には出力を50%ほどに抑制すべしというのが水撃作用による周波数不安定を回避するための系統運用の重要なノウハウになっています。

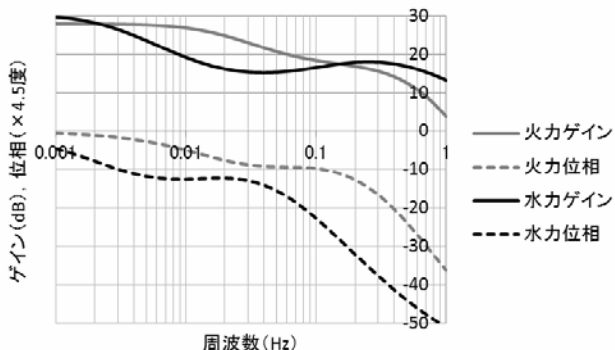


図 7.2 火力機と水力機の調速機系の相違

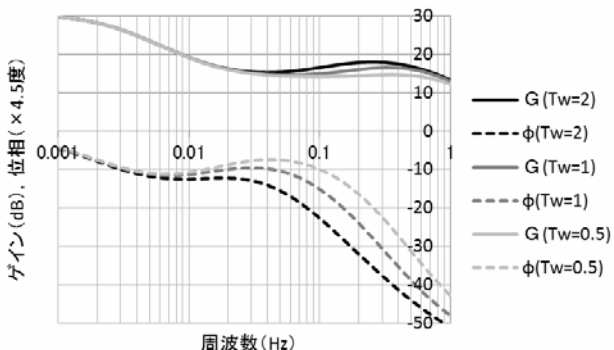


図 7.3 水撃作用の大きさと調速機系の応答

負荷は機械的トルクが回転数の2乗に比例するモーター50%と定インピーダンス50%の混合と仮定します。有効電力の周波数感度はモーターで3、定インピーダンスで0、総合で1.5となります。弾性復元 σ を変えての Nyquist 軌跡を図 7.4 に示します。基本ケース ($\sigma = 0.17$) は不安定、 $\sigma = 0.27$ のケースは安定、 $\sigma = 0.07$ のケースは非常に不安定です。シミュレーション結果を図 7.5 に示します。基本ケース ($\sigma = 0.17$) では動揺拡大が止まって安定のように見えますが、周波数変動は通常許される限度 $\pm 3\text{Hz}$ を超過しており、ガイドベーンが上下限に達した非線型効果によって拡大が止まっているものと思われ、不安定と判断します。 $\sigma = 0.27$ のケースだけが安定です。

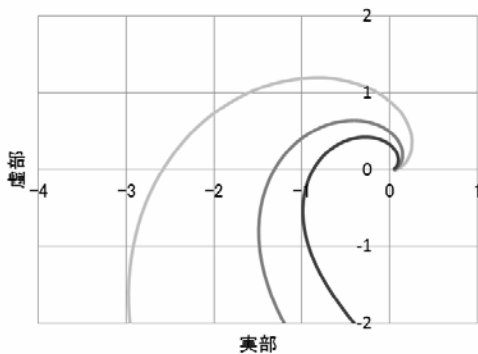


図 7.4 弾性復元 σ と Nyquist 軌跡

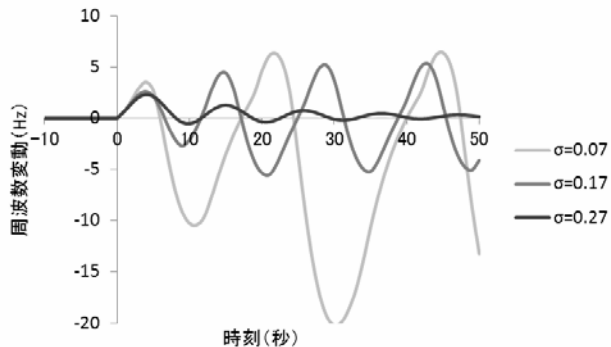


図 7.5 弾性復元 σ とシミュレーション

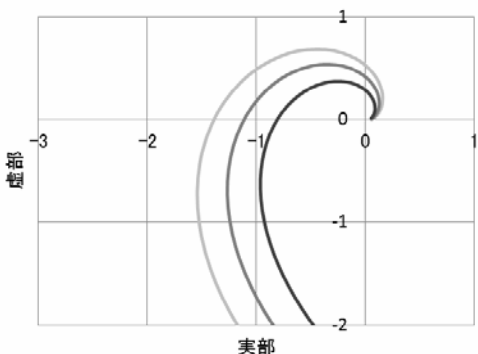


図 7.6 水撃作用 T_w と Nyquist 軌跡

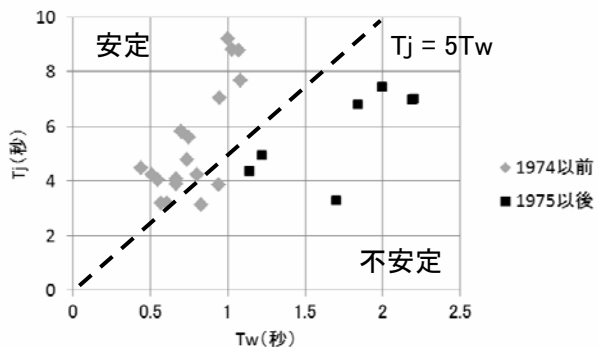


図 7.7 実在発電機の慣性 T_j と水撃作用 T_w

$a = 1$ (定格出力) のとき、 T_w と周波数安定度の関係をは図 7.6 のようになります。安定限界

の T_w は 1.3 秒ほどです。

実在する水力発電所の慣性 T_j と水撃作用 T_w を調べた結果を図 7.7 に紹介します。明らかに 1975 年以後の水力発電所は大きな T_w になっています。大きな T_w は経済性のため鉄管を細長く作ったことに由来します。1975 年より少し前に材料と設計の技術進歩があったのかもしれませんが。大きな T_w の近代的な水力発電所は、もし水力単独系統を維持する必要があるならば、调速機を鈍く (σ を大きく) 整定する必要があります。

水力発電所の LFC 制御は、最も大きな反応遅れ要素である调速機だけを考慮すると、図 7.8 のようなフィードバック系になります。

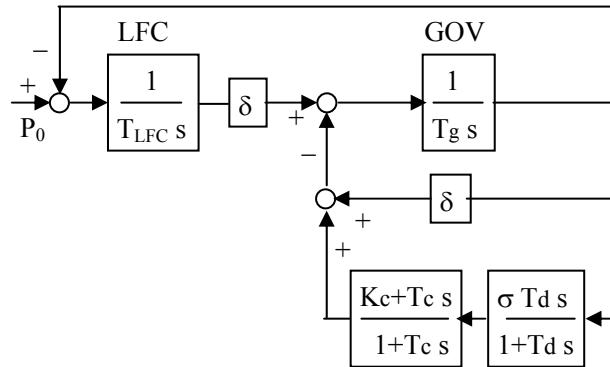


図 7.8 水力発電所の LFC 制御

この系の閉ループ利得は次式のように表現されます。

$$G_{closed} \doteq \frac{1}{1 + (T_d + T_{LFC})s + (1 + \sigma/\delta) T_d T_{LFC} s^2} \quad (7.8)$$

単独系の周波数安定度が良くなる大きな値の $1 + \sigma/\delta$ ではこの閉ループ系の周波数応答にピークを形成します。これはステップ応答でオーバーシュートを生じることを意味します。 $T_{LFC} = 30$ 秒と仮定して閉ループ系の周波数応答を計算した結果を図 7.9 に示します。基本ケース ($\sigma = 0.17$) と $\sigma = 0.27$ のケースではピークが生じます。反対に $\sigma = 0.07$ のケースではピークが目立たなくなり、更に T_d を 5 秒に短縮すればピークは消滅します。よって LFC 応答を円滑にしたければ调速機を敏感に (σ を小さく) 整定することになります。

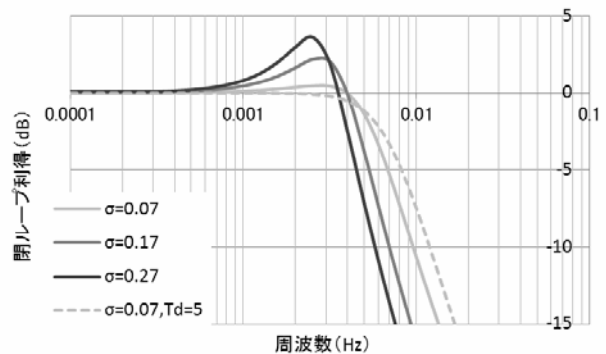


図 7.9 调速機整定と LFC 応答

これら 2 つの要求 ; 水力単独系統の周波数安定度と、円滑な LFC 応答は、调速機の整定において互いに矛盾します。この矛盾は T_w の大きい近代的な水力発電所において大きくなります。通常、LFC 応答は現地試験で確認されます。他方、水力単独系統の周波数不安定は単独系統が生じなければ確認できません。従って現実の调速機の整定では LFC 応答は重視されるが、水力単独系統の周波数安定度は看過されます。こういう事情で現実に単独系統の周波数不安定が生じます。

改善のための補助手段

この矛盾を调速機整定だけで解決することはできません。まず伝統的手法には水圧補償という手段があります。これは図 7.1 に示すように弾性復元に周波数特性を持たせた増幅要素を持ち込むものです。Kc = 1 が水圧使用不使用に相当し、Kc を増大するほど強化されます。

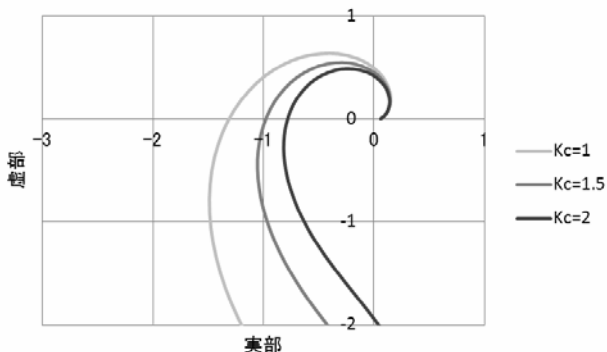


図 7.10 水圧補償使用時の Nyquist 軌跡

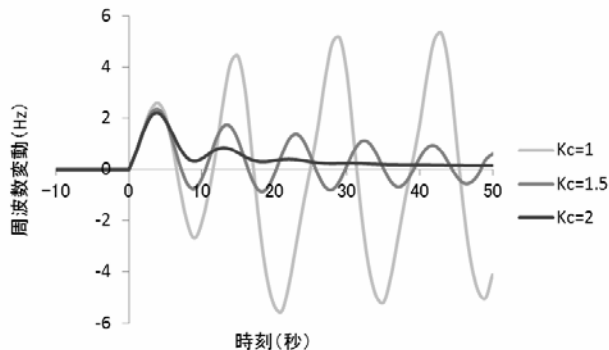


図 7.11 水圧補償使用時のシミュレーション

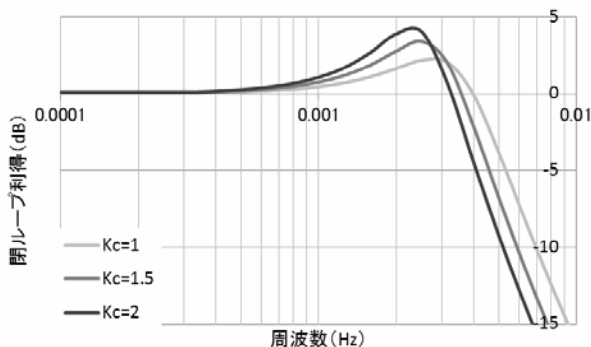


図 7.12 水圧補償使用時の LFC 応答

解析結果を図 7.10 に、シミュレーション結果を図 7.11 に、それぞれ示します。水圧補償は周波数安定度を改善します。

しかし LFC 応答は図 7.12 のようになります。水圧補償を強めるにつれて LFC の周波数応答のピークが高くなっていきます。これは一種、仕方のないことでしょう。つまり水圧補償は弾性復元に周波数特性を持たせた増幅を入れることであるからには、调速機を鈍くすることであり、従って LFC 応答が悪化します。

図 7.13 に示す励磁装置を仮定します。この励磁装置は近代的な水力発電所に多く用いられているサイリスタ式で、 Δf 型 PSS を装備しています。

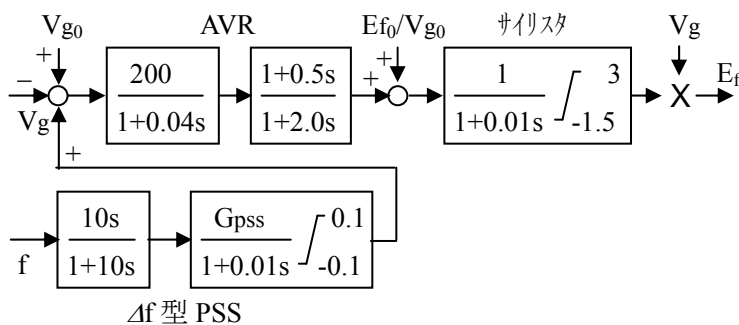


図 7.13 Δf 型 PSS を有する励磁装置

Δf 型 PSS は負荷有効電力の電圧感度を周波数感度に変換する効果を持ち、従って、LFC 応答を悪化させずに水力単独系統の周波数安定度を改善できます。サイリスタ式励磁装置の感度は十分高いので発電機電圧はほぼ $1+\Delta f$ になり、 Δf 型 PSS により増大する負荷の周波数感度： n^+ は次のように計算されます。

$$n^+ = \alpha_z K_z G_{pss}$$

ここに α_z は定インピーダンス負荷の電圧感度（つまり 2）、 K_z は定インピーダンス負荷の割合（ここでは 50%）、 G_{pss} は Δf 型 PSS のゲインです。例えば $\alpha_z = 2.0$ 、 $K_z = 0.5$ のとき、負荷の周波数感度の増分は $n^+ = 1.0 G_{pss}$ になります。

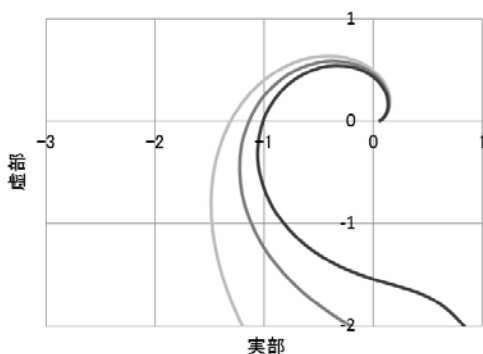


図 7.14 Δf 型 PSS 使用時の Nyquist 軌跡

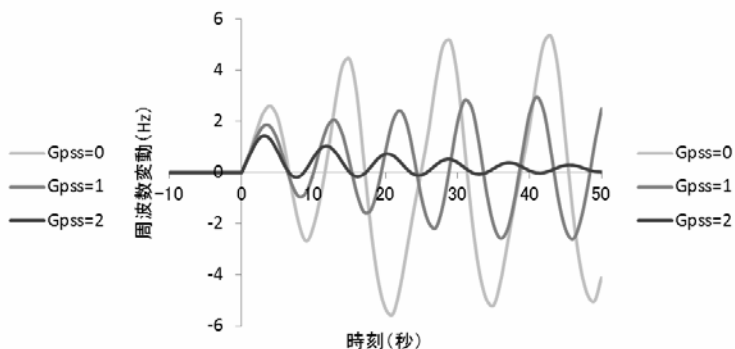


図 7.15 Δf 型 PSS 使用時のシミュレーション

基本ケースの調速機整定における解析結果を図 7.14 に示します。 $G_{pss} = 1$ では安定化効果がやや不足です。 $G_{pss} = 2$ では安定限界くらいになっています。シミュレーション結果を図 7.15 に示します。Nyquist 軌跡による解析結果より若干楽観的な傾向を示します。これは、モーター負荷にも機械的負荷のトルク速度特性に由来する若干の有効電力の電圧感度があるためと思われます。

調速機整定が $\sigma = 0.07$ 、 $T_d = 5$ 秒のとき LFC 周波数応答からピークが消えました。この調速機整定は周波数安定度が保てないとして諦めていました。しかし周波数安定度を Δf 型 PSS で確保すれば周波数安定度と良好な LFC 応答が両立できます。解析結果を図 7.16 に示します。 G_{pss} は 7 以上必要となります。シミュレーション結果を図 7.17 に示します。こちらは若干楽観的な結果を示します。これは前述の通り、モーター負荷有効電力の若干の電圧感度によるものと思われます。

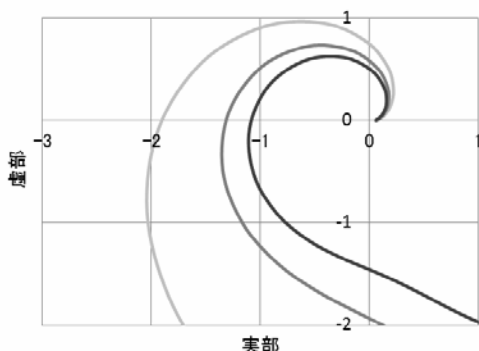


図 7.16 敏感な調速機 + Δf 型 PSS の Nyquist 軌跡

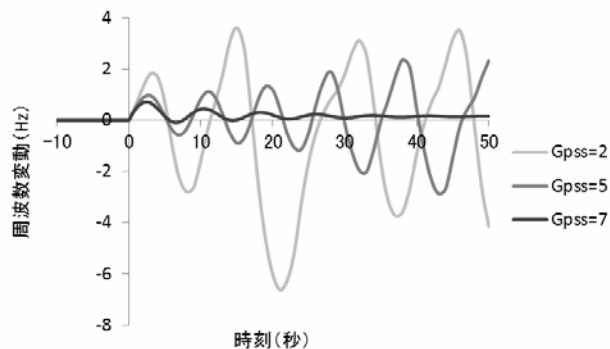


図 7.17 敏感な調速機 + Δf 型 PSS のシミュレーション

Δf 型 PSS と $\Delta \omega$ 型 PSS のゲインは通常 10 程度以下に設定されます。ゆえに Δf 型 PSS もしくは $\Delta \omega$ 型 PSS を用いることで良い LFC 応答を得ることは十分可能と思われます。しかしゲインの高い Δf 型 PSS は大きな電圧変動を惹起することを忘れてはならないでしょう。尤も、単独系統の

周波数安定度が失われるか否かというときに若干の電圧変動を気にする必要ないとも言えますが、 $\Delta\omega$ 型 PSS は火力には容易に装備できますが水力には難しいそうです。それに価格もかなりのものです。これに反し Δf 型 PSS は、電力動揺抑制効果は $\Delta\omega$ 型に劣りますが、水力にも容易に装備可能であり、価格も安いので、魅力的な補助手段です。

負荷の周波数感度の影響

モーター (IM) と定インピーダンス (CZ) の混合比が変われば負荷の周波数感度が変わり、従って周波数安定度も変わります。周波数安定度のために調速機を鈍くした場合 ($\sigma = 0.27$) と Δf 型 PSS を採用した場合 ($G_{pss} = 1.5$) について、IM 比率を 0%, 50%, 100% と変えて計算してみます。調速機を鈍くした $\sigma = 0.27$ の場合、図 7.18 に示すように、モーター比率が高いほど周波数安定度は良くなります。

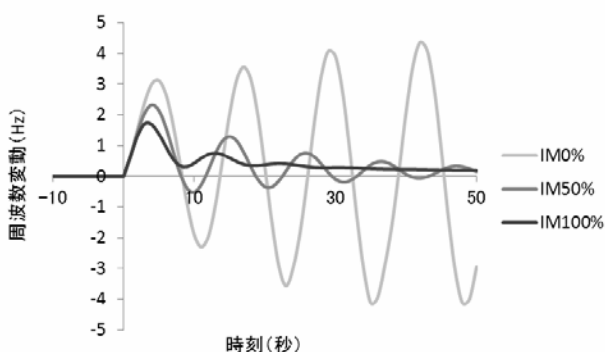


図 7.18 モーター比率と周波数安定度 ($\sigma = 0.27$)

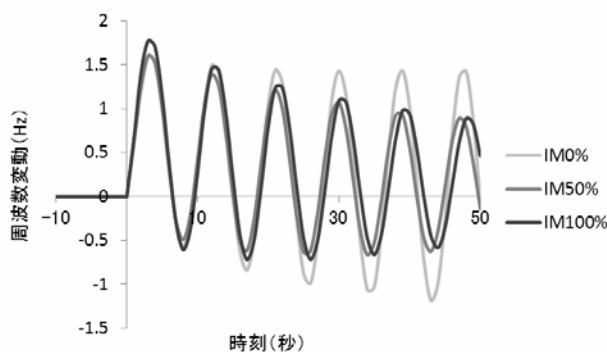


図 7.19 モーター比率と周波数安定度 ($G_{pss} = 1.5$)

Δf 型 PSS を採用した $G_{pss} = 1.5$ の場合、等価的な負荷の制動効果は次のように計算されます。

$$\text{IM0\%: } neq = 0.0 \times 3 + (1 - 1.0) \times 2 \times (G_{pss} = 1.5) = 3.0$$

$$\text{IM50\%: } neq = 0.5 \times 3 + (1 - 0.5) \times 2 \times (G_{pss} = 1.5) = 3.0$$

$$\text{IM100\%: } neq = 1.0 \times 3 + (1 - 0.0) \times 2 \times (G_{pss} = 1.5) = 3.0$$

つまり負荷の制動効果はモーター比率に左右されません。シミュレーション結果も図 7.19 に示すように、モーター比率の影響は大きくありません。 Δf 型 PSS は負荷の特性に関係なく一定の効果を生むので、好ましい補助手段であると言えます。

RE 設計の影響

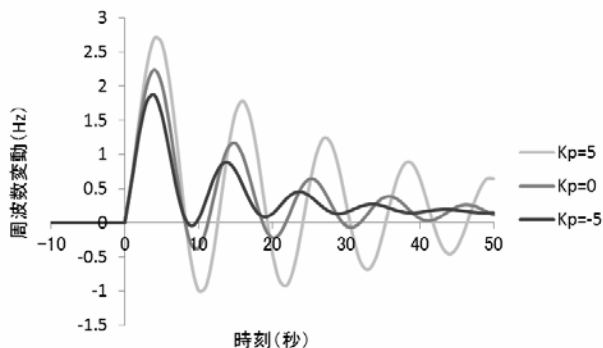
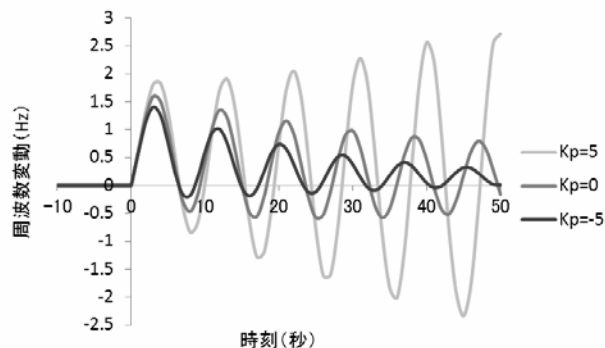
負荷が 125% に増え、負荷の 20%、当初負荷の 25% を再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) が供給していると仮定します。発電機から見た負荷の量 (負荷 - RE 出力) は変わりません。ここでは現実のものとなりそうな 2 つの可能性を検討します。

まず RE 有効電力の電圧感度です。次のように仮定します。

$$P_{RE} = P_{RE0} (f / f_0)^{K_p}$$

この仮定は RE がある種の単独防止機能を搭載している場合に考えられます。 K_p が正ならば周波数上昇時に RE 出力が増大し、周波数は益々上昇します。これを利用して単独検出します。 K_p が負ならばその逆で、調速機の役割を演じます。周波数安定度確保のため調速機を鈍く整定している場合 ($\sigma = 0.27$) のシミュレーション結果を図 7.20 に示します。 $K_p = 5$ では周波数安定度は

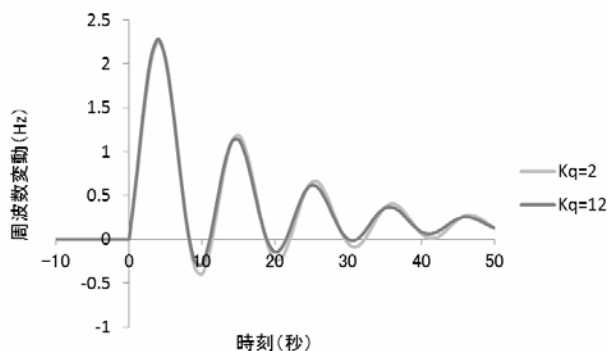
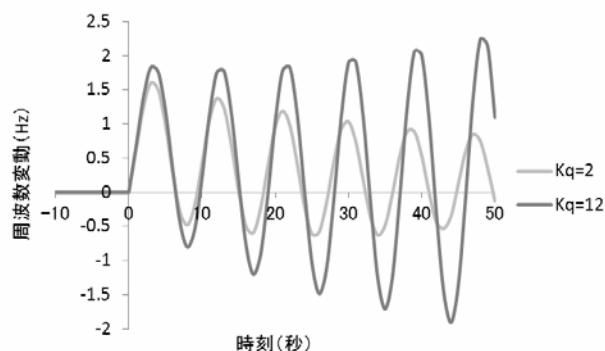
悪化しますが、不安定にまでは至りません。周波数安定度確保のために Δf 型 PSS を採用している場合 ($G_{pss} = 1.5$) のシミュレーション結果を図 7.21 に示します。 $K_p = 5$ では周波数が不安定になっています。これは困ったことです。 Δf 型 PSS は周波数安定度と LFC の良好な応答を両立できる決め手とされていたのに、ある種の RE の単独防止機能がその効果を奪ってしまいます。

図 7.20 RE の K_p の影響 ($\sigma = 0.27$)図 7.21 RE の K_p の影響 ($G_{pss} = 1.5$)

次に RE 無効電力の電圧感度です。次のように仮定します。

$$Q_{RE} = P_{RE0} \{ (V/V_0)^2 - (V/V_0)^{Kq} \}$$

この仮定は RE が DVS (Dynamic Voltage Support, 動的電圧支持) 機能を装備するとき、 K_q が 2 より大きな値をとり、現実のものになります。周波数安定度確保のため調速機を鈍く調整している場合 ($\sigma = 0.27$) のシミュレーション結果を図 7.22 に示します。 $K_q = 12$ となっても周波数安定度には影響しません。周波数安定度確保のために Δf 型 PSS を採用している場合 ($G_{pss} = 1.5$) のシミュレーション結果を図 7.23 に示します。 $K_q = 12$ では周波数不安定になっています。これは DVS 型 RE が SVC と同様に系統電圧を一定に維持しようとするので、 Δf 型 PSS が電圧を変えようとしてもそれが阻止されてしまうからです。RE の DVS 機能は系統の電圧安定度、同期安定度、動揺安定度を確保する決め手とされていたのに、周波数安定度を損ねるという欠点があります。

図 7.22 RE の K_q の影響 ($\sigma = 0.27$)図 7.23 RE の K_q の影響 ($G_{pss} = 1.5$)

しかしものは考えようで、もし流通設備に地元水力電源に頼らずに負荷全量に送電できるだけの力があるなら、水力単独系統を一旦全部停電して、負荷だけをまず上位系統から送電するという次善の策をとることができます。その水力単独系統が、どうしても維持しなければならないものかどうか、一度冷静に考えてみるのも良いかもしれません。

以上、著者が奉職する電力会社で RE 大量普及が現実のものとなったとき、これまでとってきた水力単独系統維持のドクトリンをどうするのか考えるための資料として本章を残しておく

ます。

文献

- (1) 落合, 老田, 松井, 駒見: 「自流式水力発電所のガバナフリー運転と緊急予備力発動装置の開発」, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 23, 1995
- (2) 老田, 高松, 柳田, 駒見: 「水力単独系統における $\Delta\omega$ 型 PSS の周波数安定化効果」, 平成7年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 24, 1995