戻る

7．再生可能エネルギーと周波数安定度

周波数安定度問題は水力単独系統についてのみ発生する。しか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い。本書でも省略しようかと考えたが，著者が奉職した会社は水力王国で，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いる。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る。出てくる用語も一般の電力技術者には馴染みが薄い。解析技術として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，解説しておく。

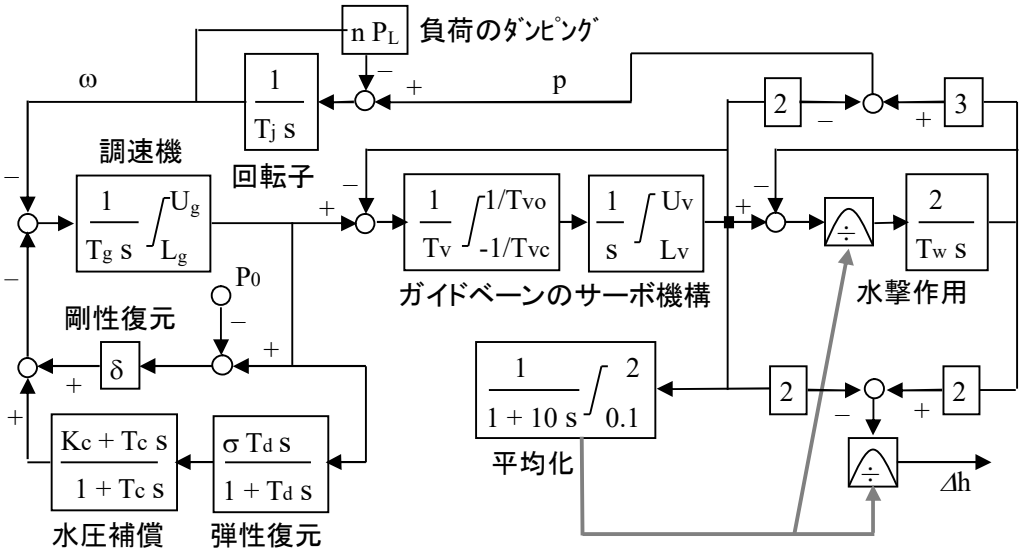

図 7.1　水力単独系統の周波数不安定を扱うための最小モデル

水撃作用

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

物理変数は次の記号で表現する。添字 “0” は定格出力運転時の値を意味する。小文字は部分出力運転時の値を単位法（定格出力時を 1 として比率で表現する手法）で表記したものである。よって例えば流量は $Q = Q_0\, q$ のように表現する。

ガイドベーン開度：A (m^2)　　鉄管断面積：Ap (m^2)　　水量：Q (m^3/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る。ここに “g” は重力の加速度である。

$$Q_0\, q = Q = A\,(2\,g\,H)^{1/2} = A_0\, a\,(2\,g\,H_0\, h)^{1/2}$$

$$Q_0 = A_0\,(2\,g\,H_0)^{1/2}$$

$$q = a\,h^{1/2} \qquad (7.1)$$

鉄管流速は次のように表現される。

$$Q_0\, q = Q = A_p\, V = A_p\, V_0\, p$$

$$Q_0 = A_p\, V_0$$

$$q = v \qquad (7.2)$$

水車出力は次のように表現される。

$$P_0\, p = P = Q\, g\, H = Q_0\, q\, g\, H_0\, h$$

$$P_0 = Q_0\, g\, H_0$$

$$p = q\, h \qquad (7.3)$$

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

$$H_0\,(h-1) = H - H_0 = H_0 - \frac{L}{g}\, s\, V = -\frac{L}{g}\, s\,(V_0\, v)$$

$$h - 1 = -\frac{L\, V_0}{g\, H_0}\, s\, v$$

ここに L は鉄管の長さ(m)である。次のように定義される水管時定数：T_w を導入する。

$$Tw = \frac{L\, V_0}{g\, H_0}$$

これにより水撃作用は次のように表現される。

$$h - 1 = -Tw\, s\, v \qquad (7.4)$$

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る。本稿で関係するいくつかの平均物理量には次の関係がある。

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

微小変化量の間には次の関係がある。

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

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

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

$$\Delta h = -Tw\, s\, \Delta v = -Tw\, s\, \Delta q \qquad (7.4')$$

(7.4’)式を(7.1’)式に代入して Δh を消去し，次の関係を得る。

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

$$\Delta q = \frac{1}{1 + (1/2)\, a\, Tw\, s}\, \Delta a \qquad (7.5)$$

(7.4’)式を(7.3’)式に代入して Δh を消去し，次の関係を得る。

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

(7.5)式を用いれば上式は次のように表現できる。

$$\Delta p = \frac{1 - a\,Tw\,s}{1 + (1/2)\,a\,Tw\,s}\,\Delta a \qquad (7.6)$$

(7.5)式を(7.4')式に代入して次の関係を得る。

$$\Delta h = \frac{-Tw\,s}{1 + (1/2)\,a\,Tw\,s}\,\Delta a \qquad (7.7)$$

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)式で表現できた。これらの式は次のことを意味する；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する。これが水撃作用である。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る。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る。ここで紹介した理論は「剛体理論」といい，鉄管の弾性などを無視している。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」を用いるが，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る。

調速機整定の矛盾 (1)(2)

ここでは調速機系の標準定数を次のように仮定する。

$Tg = 0.1$ sec　$Ug = 1.5$　$Lg = -0.5$　$\delta = 0.03$　$\sigma = 0.17$　$Td = 10$ sec　$Kc = 1$　$Tc = 1$ sec
$Tv = 0.1$ sec　$Tvo = 10$ sec　$Tvc = 5$ sec　$Uv = 1.1$　$Lv = -0.1$
$a = 0.9$　$Tw = 2$ sec　$n = 1.5$　$Tj = 7$ sec　$P_L = 0.9$

一見して Tw 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する。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する。Kc = 1 とは水圧補償を用いていないということである。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 である。0.05Hz 以上の周波数領域で水力の位相遅れが火力のそれより非常に大きく，周波数によっては 90 度もの位相遅れの違いがある。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る。

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

なお，水力発電所には試送電という任務を負うものがある。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ぐ。水力の多くはフランシス水車を使っており 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ある。しかし負荷は多すぎてもよくなく，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る。

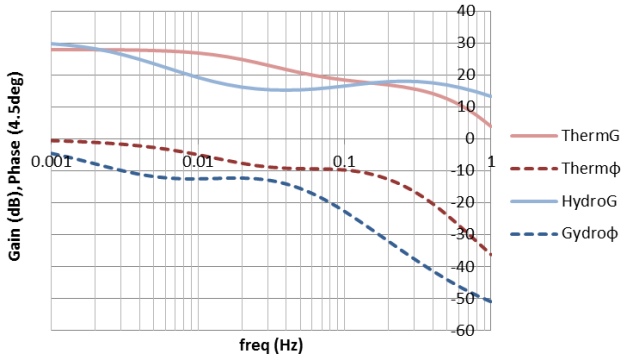

図 7.2　火力機と水力機の調速機系の相違

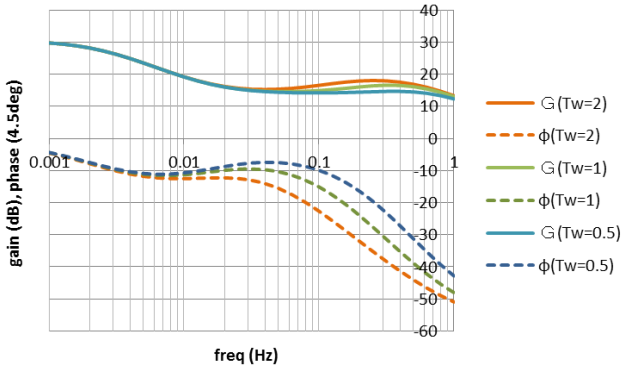

図 7.3　水撃作用の大きさと調速機系の応答

負荷は機械的トルクが回転数の 2 乗に比例する誘導機 50%と定インピーダンス 50%の混合と仮定する。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 となる。 弾性復元 σ を変えての Nyquist 軌跡を図 7.4 に示す。単独系周波数は，基本ケース（σ = 0.17）は不安定，σ = 0.27 のケースは安定，σ = 0.07 のケースは非常に不安定である。 シミュレーション結果を図 7.5 に示す。基本ケース（σ = 0.17）では動揺拡大が止まって安定のように見えるが，周波数変動は通常許される限度±3Hz 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，不安定と判断する。σ = 0.27 のケースだけが安定でである。

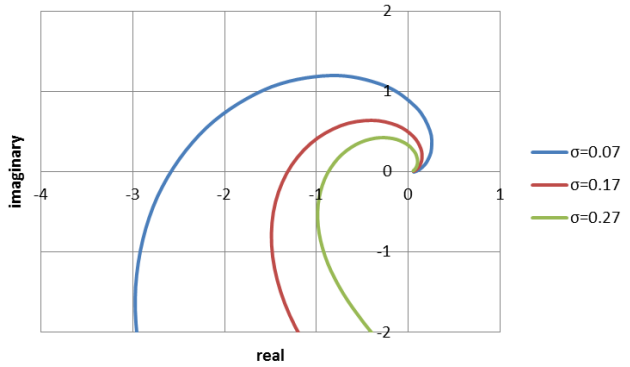

図 7.4　弾性復元σ と Nyquist軌跡

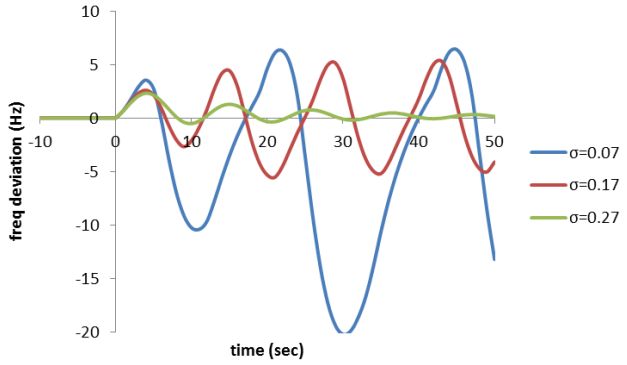

図 7.5　弾性復元σとシミュレーション

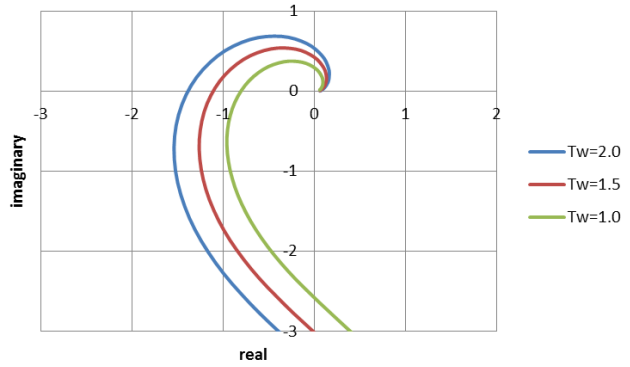

図 7.6　水撃作用 T_w と Nyquist 軌跡

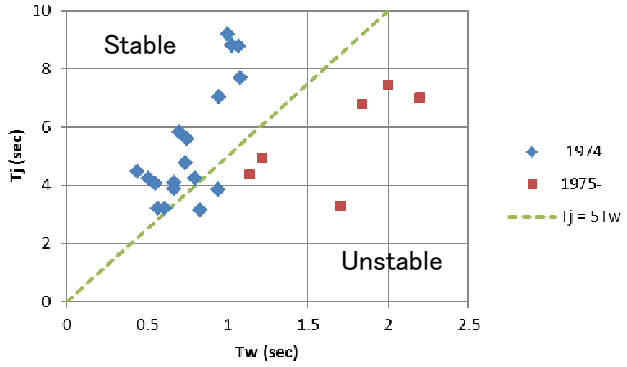

図 7.7　実在発電機の慣性 T_j と水撃作用 T_w

a = 1 （定格出力）のとき，Tw と周波数安定度の関係は図 7.6 のようになる。安定限界の Tw は 1.3 秒ほどである。

実在する水力発電所の慣性 Tj と水撃作用 Tw を調べた結果を図 7.7 に紹介する。明らかに 1975 年以後の水力発電所は大きな Tw になっている。大きな Tw は経済性のため鉄管を細長く作ったことに由来する。1975 年より少し前に材料と設計の技術進歩があったこと，水力の役目が kWh 供給から調整力へと変化したこと，などが理由として考えられる。

大きな Tw の近代的水力発電所は，もし水力単独系統を維持する必要があれば，調速機を鈍く（σ を大きく）整定する必要がある。

水力発電所の LFC 制御は，最も大きな反応遅れ要素である調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る。

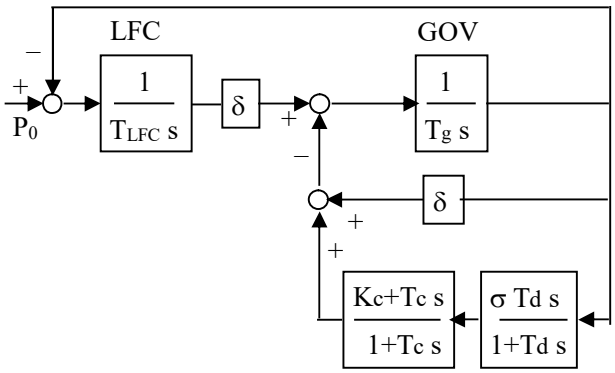

図 7.8　水力発電所の LFC 制御

この系の閉ループ利得は次式のように表現される。

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

単独系の周波数安定度が良くなる大きな値の 1 ＋ σ / δ ではこの閉ループ系の周波数応答にピークを形成する。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する。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 に示す。基本ケース（σ = 0.17）とσ = 0.27 のケースではピークが生じる。反対にσ = 0.07 のケースではピークが目立たなくなり，更に Td を 5 秒に短縮すればピークは消滅する。よって LFC 応答を円滑にしたければ調速機を敏感に（σ を小さく）整定することになる。

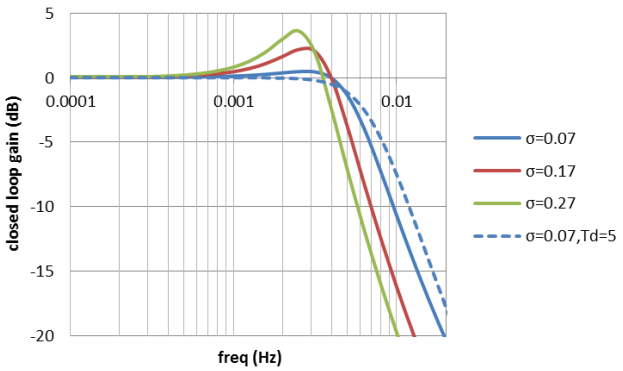

図 7.9　調速機整定と LFC 応答

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，調速機の整定において互いに矛盾する。この矛盾は Tw の大きい近代的水力発電所において大きくなる。通常，LFC 応答は現地試験で確認される。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ない。従って現実の調速機の整定では 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る。こういう事情で現実に単独系統の周波数不安定が生じるに至る。

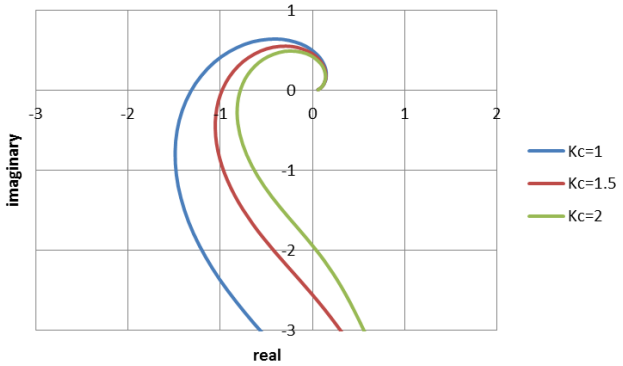

図 7.10　水圧補償使用時の Nyquist 軌跡

改善のための補助手段

この矛盾を調速機整定だけで解決することはできない。まず伝統的手法には水圧補償という手段がある。これは図 7.1 に示したように，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あ

る。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る。

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する。

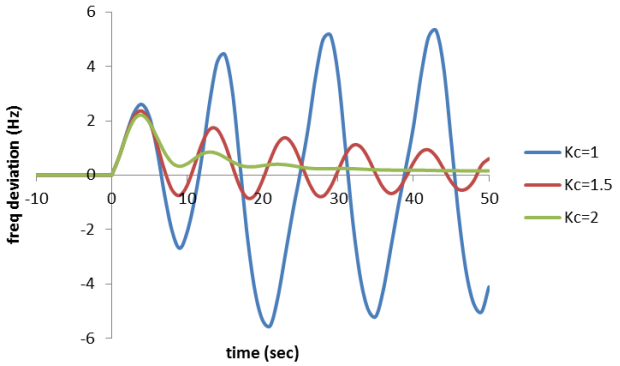

図 7.11　水圧補償使用時のシミュレーション

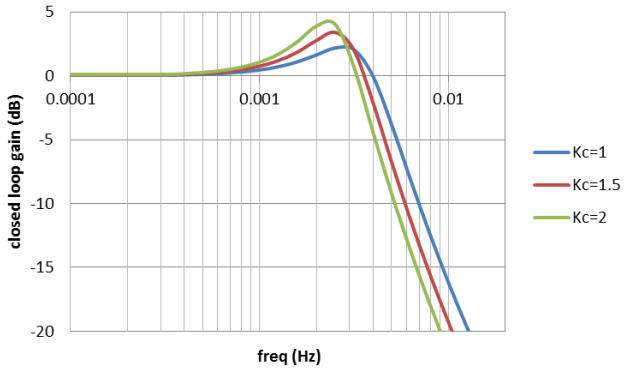

図 7.12　水圧補償使用時の LFC 応答

しかし LFC 応答は図 7.12 のようになる。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る。これは一種，仕方のないことである。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，調速機を鈍くすることであり，従って LFC 応答が悪化する。

図 7.13 に示す励磁装置を仮定する。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 を装備している。

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る。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+Δf 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る。

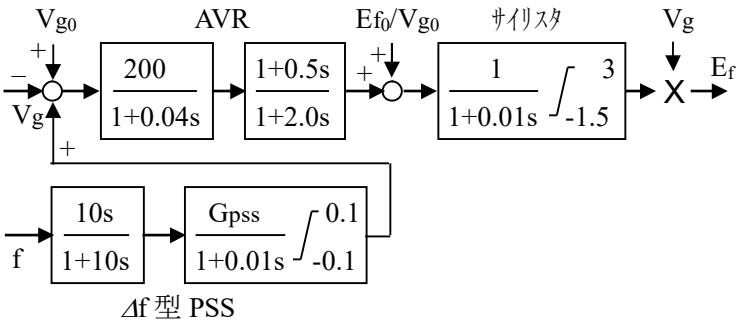

図 7.13　Δf 型 PSS を有する励磁装置

$$n^+ = \alpha z\ Kz\ Gpss$$

ここに αz は定インピーダンス負荷の電圧感度（つまり 2），Kz は定インピーダンス負荷の割合（ここでは 50%），Gpss はΔf 型 PSS のゲインである。例えば αz = 2.0，Kz = 0.5 のとき，負荷の周波数感度の増分は n+ = 1.0 Gpss になる。

基本ケースの調速機整定における解析結果を図 7.14 に示す。Gpss = 1 では安定化効果がやや不足である。Gpss = 2 では安定限界くらいになっている。シミュレーション結果を図 7.15 に示す。Nyquist 軌跡による解析結果より若干楽観的な傾向を示す。こ

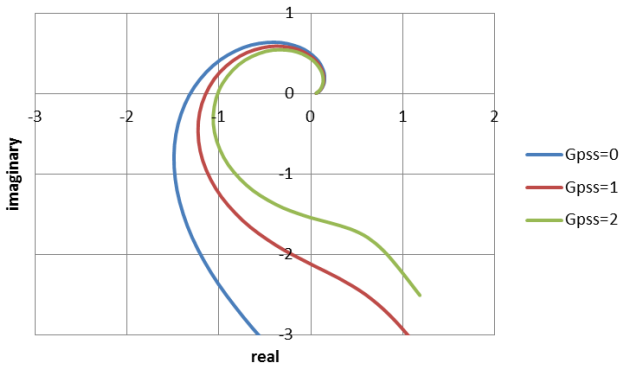

図 7.14　Δf 型 PSS 使用時の Nyquist 軌跡

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る。

調速機整定がσ = 0.07，Td = 5 秒のとき LFC 周波数応答からピークが消えた。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た。しかし周波数安定度を⊿f 型 PSS で確保すれば周波数安定度と良好な LFC 応答が両立できる。解析結果を図 7.16 に示す。Gpss は 7 以上必要となる。シミュレーション結果を図 7.17 に示す。こちらは若干楽観的な結果を示しす。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る。

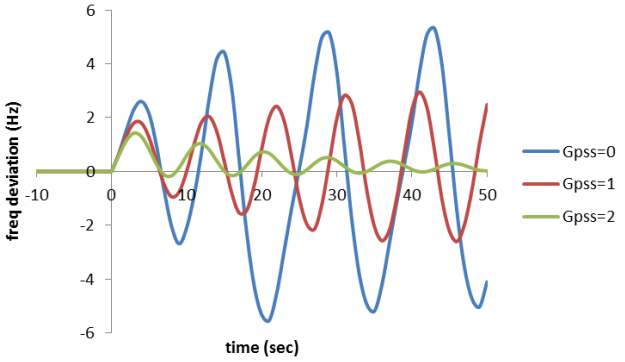

図 7.15　⊿f 型 PSS 使用時のシミュレーション

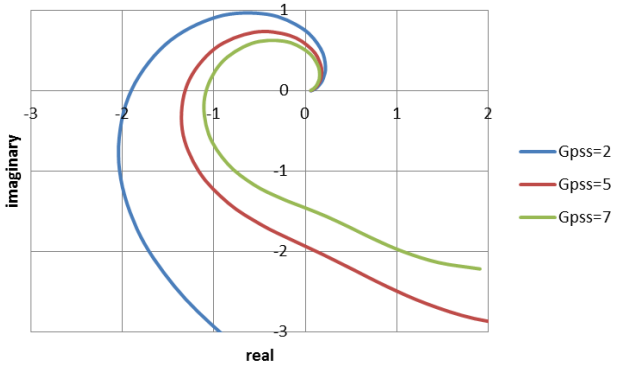

図 7.16　敏感な調速機＋⊿f 型 PSS の Nyquist 軌跡

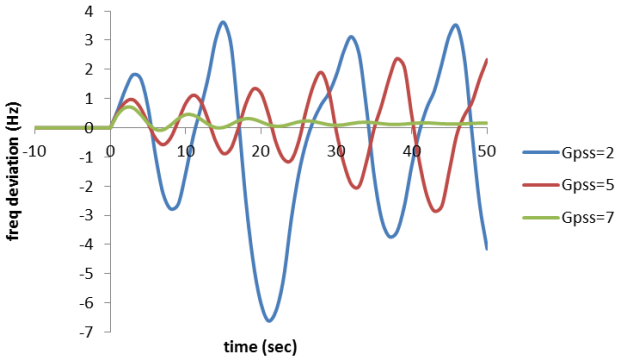

図 7.17　敏感な調速機＋⊿f 型 PSS のシミュレーション

⊿f 型 PSS と⊿ω型 PSS のゲインは通常 10 程度以下に設定される。ゆえに⊿f 型 PSS もしくは⊿ω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る。しかしゲインの高い⊿f 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。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るが。⊿ω型 PSS は火力には容易に装備できるが水力には難しいそうである。それに価格もかなりのものである。これに対し⊿f 型 PSS は，電力動揺抑制効果こそ⊿ω型に劣るが，周波数動揺抑制効果では遜色なく，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ある。

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る。周波数安定度のために調速機を鈍くした場合（σ = 0.27）と⊿f 型 PSS を採用した場合（Gpss = 1.5）について，IM 比率を 0%，50%，100%と変えて計算してみる。調速機を鈍くしたσ = 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る。

他方，⊿f 型 PSS を採用した Gpss= 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る。

IM0%:　　neq = 0.0×3 + (1 – 1.0)×2×(Gpss=1.5) = 3.0

IM50%:　　neq = 0.5×3 + (1 – 0.5)×2×(Gpss=1.5) = 3.0

IM100%:　　neq = 1.0×3 + (1 – 0.0)×2×(Gpss=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ない。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ない。⊿f 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る。

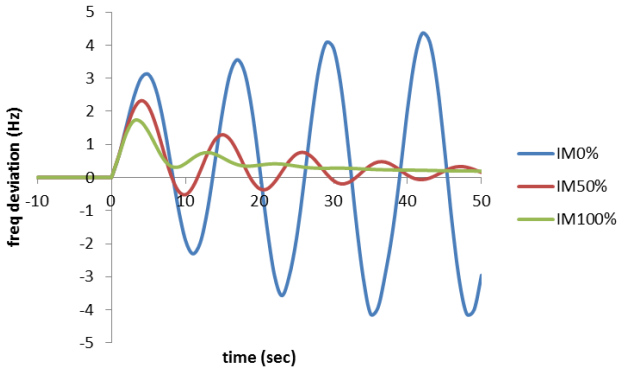

図 7.18　モーター比率と周波数安定度（σ＝0.27）

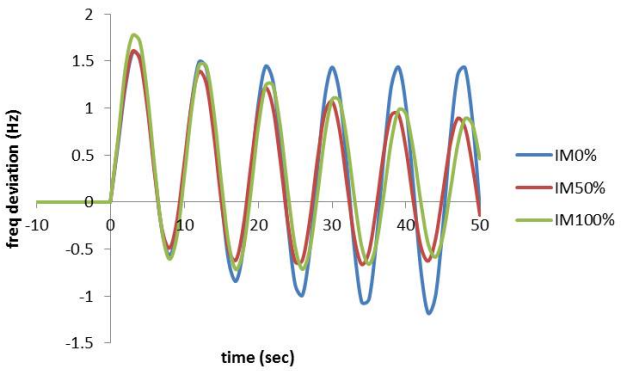

図 7.19　モーター比率と周波数安定度（Gpss = 1.5）

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する。発電機から見た負荷の量（負荷－RE 出力）は変わらない。ここでは現実のものとなりそうな 2 つの可能性を検討する。

まず RE 有効電力の電圧感度を次のように仮定する。

$$P_{RE} = P_{RE0}\,(f / f_0)^{Kp}$$

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る。Kp が正ならば，周波数上昇時に RE 出力が増大し，周波数は益々上昇する。これを利用して単独検出する。Kp が負ならばその逆で，負の調速機の役割を演じる。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 に示す。Kp = 5 では周波数安定度は悪化するが，不安定にまでは至らない。周波数安定度確保のためにΔf 型 PSS を採用している場合（Gpss = 1.5）のシミュレーション結果を図 7.21 に示す。Kp = 5 では周波数が不安定になっている。これは困ったことである。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思われていたのに，ある種の RE の単独防止機能がその効果を奪ってしまうからである。

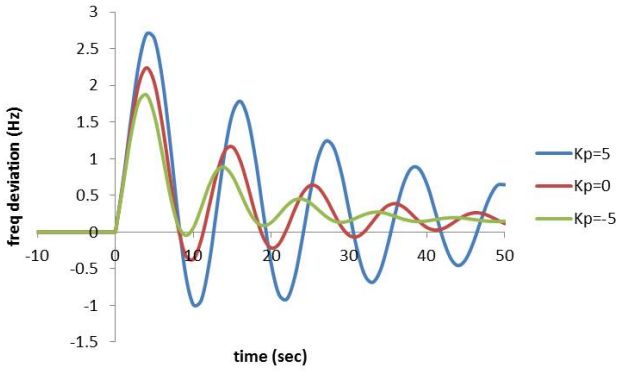

図 7.20　RE の Kp の影響（σ= 0.27）

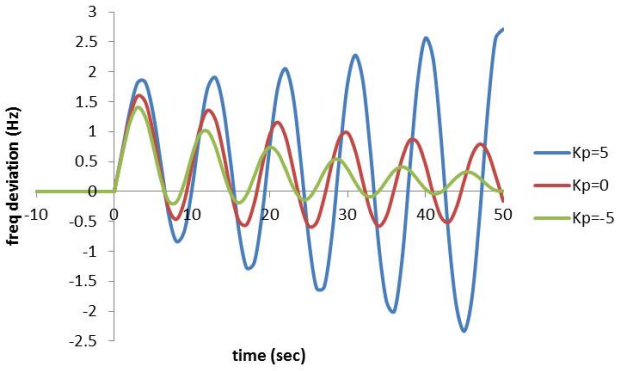

図 7.21　RE の Kp の影響（Gpss = 1.5）

次に RE 無効電力の電圧感度を次のように仮定する。

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

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，Kq が 2 より大きな値をとり，現実のものになる。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（σ = 0.27）のシミュレーション結果を図 7.22 に示す。Kq = 12 となっても周波数安定度には影響しない。周波数安定度確保のために*Δ*f 型 PSS を採用している場合（Gpss = 1.5）のシミュレーション結果を図 7.23 に示す。Kq = 12 では周波数不安定になっている。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，*Δ*f 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ある。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思われていたのに，周波数安定度を損ねるという欠点があるということがわかった。

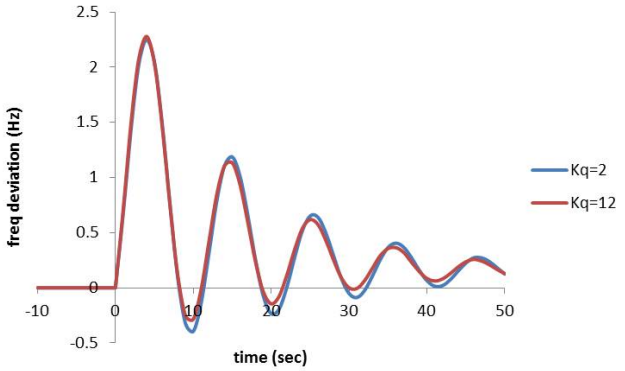

図 7.22　RE の Kq の影響（*σ* = 0.27）

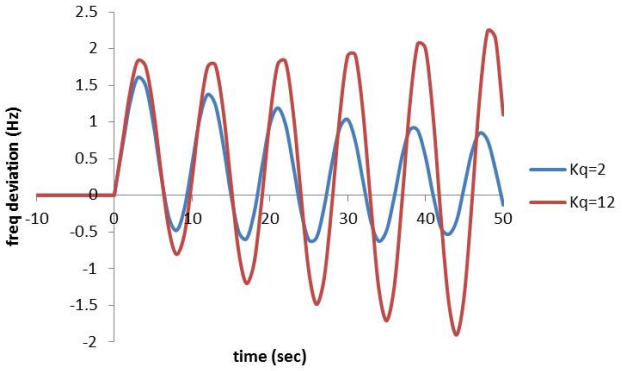

図 7.23　RE の Kq の影響（Gpss = 1.5）

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容量があるなら，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る。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ない。

以上，著者が奉職した電力会社で RE 大量普及が現実のものとなったとき，これまでの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。

再エネによる周波数変化速度の増大[3]

「再生可能エネルギーには慣性がないから一人前の電源ではない」という批判をよく耳にする。しかし，慣性がないことによる悪さ定量的に解説した論文・記事は見かけない。第 5 章では過渡安定度面から再エネ大量連系による系統の慣性減少を論じた。原動機の制御速度が速ければ極小の慣性であっても過渡安定度が破れないことを示した。

その他にも上記批判を定量的に実証すべく努力してみたが，1 件を除き見当たらなかった。その 1 件とは系統故障で単独系統となったときの周波数変化速度が大きくなることである。北陸系統が受電状態で連系線を 6LO する。周波数は低下する。再エネなしの場合は 6 秒で最低値 59.07Hz まで低下したのち 59.20Hz に落ち着く。PV 大量連系により系統の慣性が 66.5%に減少した時は 6.5 秒で 58.68Hz まで低下したのち 58.81Hz に落ち着く。

周波数変化速度の増大に対応して各種の「系統安定化制御」の整定見直しが必要となる場合がある。しかし精査の結果，北陸系統では見直しは不要と判明した。再エネによる慣性の減少の影響は，高々この程度のものであり，巷間言うような致命的なものではない。

水位調整運転

自流式水力発電所は水槽が小さいので，任意に出力を変更するガバナフリー運転をすると，水槽水位

が大きく変動する。水位が上がれば溢水（水槽から余水吐を通って放流路へ流す）し，水位が下がれば鉄管が空気を吸い込む。そこで普通は水位調整運転を行い，水槽水位を一定範囲に保っている。

しかし調速機の機能を殺しているわけではない。図 7.24 に示す調速機整定（GOV）としている。60Hz のときはガイドベーン（GV）全開で 110%出力。周波数上昇時は調停率 5%で出力を絞る。63.3Hz で出力ゼロとなる。なお，5%という調停率は最も鈍いもので，水力では 3～4%が普通である。4%なら 62.7Hz で出力ゼロとなる。

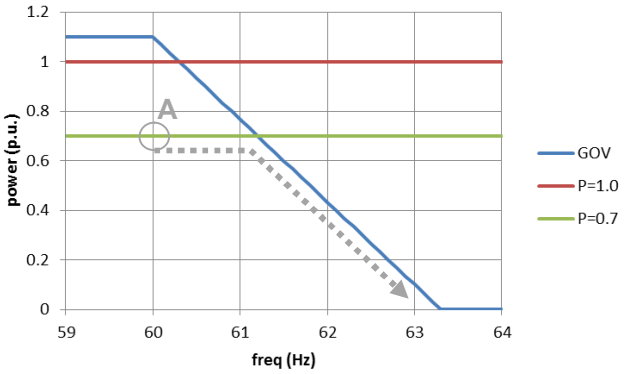

図 7.24　水位調整運転の調速機機能

そこへ流入量に見合った出力に保つよう，出力制限（Load Limiter，LL）をかける。たとえば 60Hz 時に出力 70%なら図中 A 点にある。もし周波数が上がれば灰色点線の経路をたどって出力を絞る。これが水位調整運転である。

このようにしているのは，単独系統になったときなど，系統の安定維持のためには最低限，周波数変動を 5%以内にしなければならないからである。自流式水力とはいえども，周波数上昇時には出力を絞り，系統周波数が決して 105%（63Hz）を超えないようにする仕組みがこれである。

再エネ大量連系により余剰が吸収しきれなかったときには周波数上昇するが，再エネに水位調整運転と同等の機能が備わっていれば，周波数上昇は緩和される。もし現在の 60Hz±0.2Hz などという過剰品質を放棄するなら，再エネの水位調整運転機能により，予防的出力抑制は随分減ずることができるだろう。

現にわが国以外の諸外国では，再エネに自流式水力の水位調整運転に相当する機能を義務付けている国が多い。わが国で建設された風力発電もこの機能は有しているのであるが，連系規程に記載されていないため，不使用にしている。もったいないことだ。

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，N0. 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

(3)　谷川，山田，駒見，園：「再生可能エネルギーの導入拡大に伴う「慣性」の減少に関する一考察」，平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No. 132，2014