

発電機の応動遅れを考慮したLFC制御ロジックの改善

山田 義徳^{*1}

1. はじめに

当社を含めた各電力会社では、時々刻々と変化する電力需要に対し、需要と供給のバランスを保つよう水力・火力・原子力などの供給量を調整している。

負荷周波数制御(LFC)とは、数分から十数分程度までの需要変動の短周期成分(フリンジ成分)を対象とした需給バランス制御であり、中央給電指令所の自動給電システム(計算機)で必要な調整量(AR:地域要求量=需要と供給のアンバランス量)をリアルタイムで計算し、調整対象の各発電機に出力指令値として配分するものである。

これまでのLFC制御では、負荷の短周期成分の変動に対して、発電機応答遅れ等により、逆にAR変動を助長(悪化)させていたため、AR変動低減に向けたLFC制御ロジックの改善を行ったので、ここに報告する。

2. LFC制御の概要と問題点

(1) LFC制御の概要

当社のLFC制御は、火力機および主要水力機を対象に30秒間隔で行われている。その概要は以下の3ステップから成る。

調整必要量(SDP)の算出:

2秒間隔でサンプリングされたARを30秒間平均(合計15点)し、その制御周期における調整必要量とする。

LFC対象機への配分量の算出:

LFC対象機としてモード選択されている発電機へ、上記の調整必要量を、その出力変化速度(MW/分)に応じて配分する。

LFC対象機のP0指令値の決定:

算出された配分量を、前回までのP0指令値に加算し、新たなP0指令値として出力を決定する。(P0指令値=前回指令値+配分量)

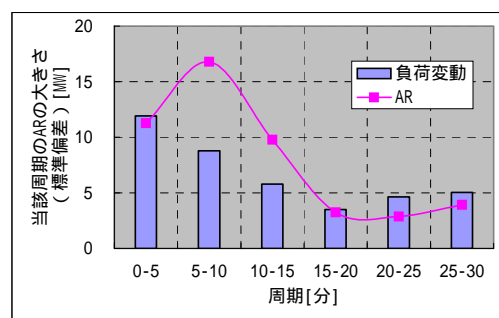
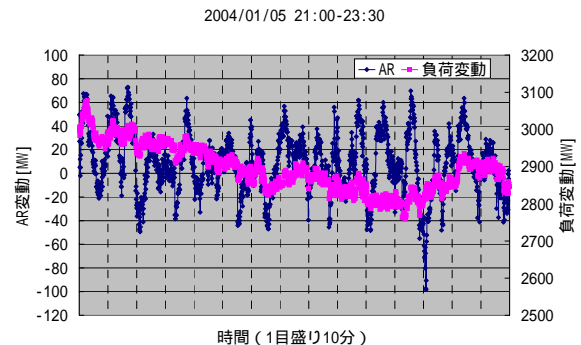
ここで、決定されたP0指令値が設備上下限制約にかかる場合には、再度配分計算をやり直し、調整必要量を解消するよう繰返し決定する。

(2) LFC制御の問題点

LFC制御が適切に機能していれば、負荷の変動に対して供給力の調整が適切に行われ、負荷変動量よりもAR変動が小さくなる。LFC制御仕上がりであるARの変動状況について、これまでの制御結果を評価した。

第1図に、ある時間帯の負荷変動およびAR変動の一例を示す。また、それらの変動の大きさを周期成分ごとに成分分析を行い、両者を比較した。

この結果から、特に5-10分周期程度の短周期成分(速い変化)に対して、負荷変動の大きさ以上にAR変動を作り出していることがわかる。すなわち、これまでのLFC制御では、短周期の負荷変動に対して逆にAR変動を悪化させていた。



第1図 負荷変動とAR変動の一例(上)
その変動周期ごとの大きさ(下)

*1 中央給電指令所

(2) 原因分析

このような不適切な LFC 制御の原因は、発電機の応動遅れに起因するものである。このことについて、以下に分析する。

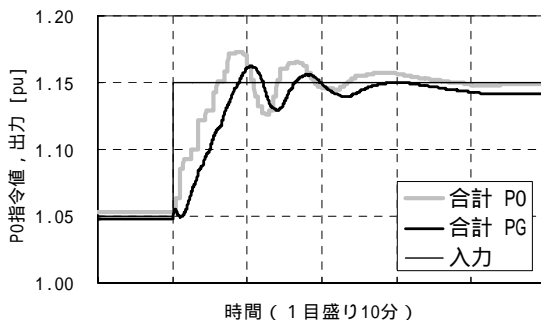
第 2 図にステップ状の負荷変動を与えた場合の、LFC 制御系の応動と、発電機出力の応動のシミュレーション結果を示す。なお、本シミュレーションでは、七尾大田火力 1,2 号機を LFC 対象機としている。この図から、LFC 制御から与えられた P0 指令値に対して、発電機出力 (PG) の追従が遅れていることがわかる。また、それらはオーバーシュートしており、収束性が悪い。

負荷変化 (入力) に対して発電機出力 (PG) の差分は、AR 変動そのものであり、このように AR 変動を助長させる原因となっている。

これは、発電機の応答遅れに起因するものであり、以下のように解説できる。

- ・LFC では、必要な配分量を、LFC 計算周期 (30 秒) ごとに、前回 P0 指令値に加算・累積していく。
- ・発電機の応答遅れが大きい場合、指令を受けてから発電機出力が追従するまで時間を要す。
- ・この間、発電機の出力が追従するまで、30 秒周期で配分計算は継続しているため、配分量を累積し続ける。その結果、過制御 (オーバーシュート) が発生する。

すなわち、発電機の応動速度よりも短い周期の負荷変動に対しては、過制御により負荷変動の大きさ以上の AR 変動を発生させる原因となる。



第 2 図 ステップ状の負荷変化 (入力) に対する LFC 制御系 (P0) と発電機 (PG) の応動

3.LFC 制御性能の改善

(1)LFC 制御に求められるもの

このように、従来の LFC 制御では、発電機の応答遅れに起因して、負荷の短周期変動成分に対して、LFC 全体として不適切な制御を行っていた。

発電機の応動遅れは、プラントの性質上必然的に生じるものであり、そのことを十分に考慮した、LFC 制御側での対応策を検討すべきである。

ここで LFC に求められる性能を整理すると、

長周期変動成分 (遅い動き) に対する追従性を確保する。

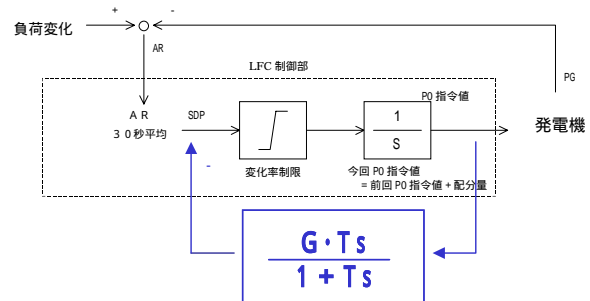
発電機そのものの応動遅れが大きいため、短周期変動成分 (速い動き) に対して過剰に応動しない。

の両者を両立させることが必要である。

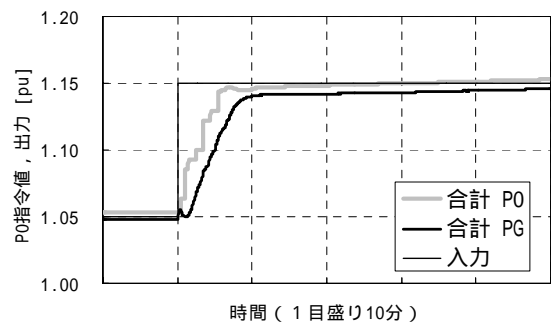
(2)改善策

a.弾性復元 (ダンピング)

水力発電機は、鉄管からの導水の時間的な遅れにより、ガイドベーンを開閉してもすぐには発電機出力が変化しない。鉄管が長いほどこの現象は



第 3 図 LFC 制御系の伝達関数表現 (ダンピングの付加)



第 4 図 ステップ状の負荷変化 (入力) に対する LFC 制御系 (P0) と発電機 (PG) の応動 (ダンピングあり)

顕著となり、その結果、ガバナ制御の不安定をもたらす。このため、水力発電機のカバナには弾性復元（ダンピング回路）が設けられており、速い変動周期でのガイドベーンの開閉を抑制している。

これは、LFC 制御指令と発電機の応答遅れの関係と同類なものであり、様々な対策案の検討の中から、この弾性復元のアイデアを LFC 制御に適用することを検討した。

b.LFC 制御への適用

第 3 図に、ダンピングを付加した LFC 制御系全体（発電機部分は省略）を伝達関数表現した線形ブロック図を示す。

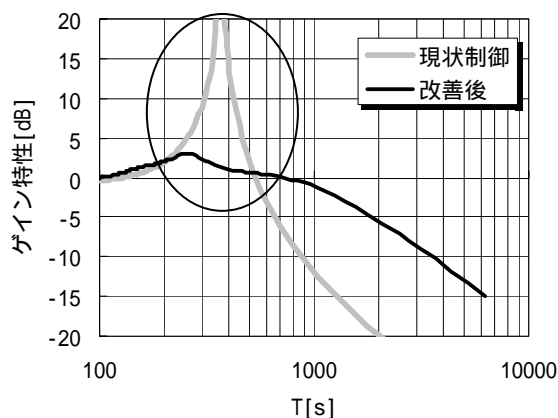
このダンピング部分に相当する伝達関数は、「不完全微分」と呼ばれ、定常状態（入力変化がない状態）では、出力は 0（ゼロ）となる。すなわち、速い変化に対してのみ負のフィードバックを与え、応動を抑制するものである。

c.ダンピングの効果

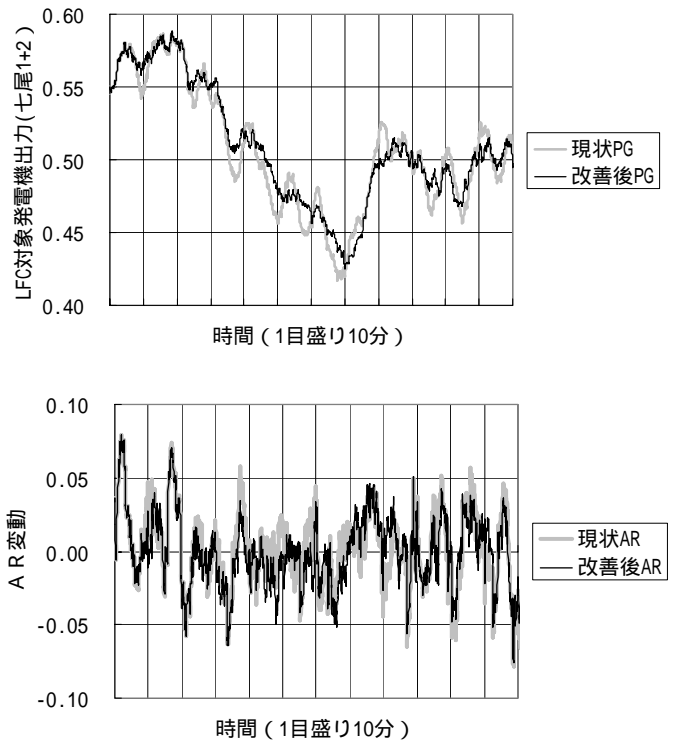
先と同様なステップ状の負荷変化を与えた場合、ダンピングを考慮した LFC シミュレーション結果は第 4 図のとおりとなり、第 2 図と比較してオーバーシュートが抑制されていることがわかる。

また、発電機を含む LFC 制御系全体の線形ブロック図から、閉ループのゲイン特性を算出した（第 5 図）。なお、横軸は入力（負荷変動）周期、縦軸は出力（AR 変動）である。

このように、ダンピングの付加により、これまで問題となっていた 10 分周期程度の負荷変動に対するゲインピークを著しく抑制（改善）し、LFC 制御性能を向上させることが可能となった。



第 5 図 発電機を含む LFC 制御系全体のゲイン特性



第 6 図 シミュレーションによる LFC ロジック改善効果の確認例（上：発電機出力，下：AR 変動）

(3)自動給電システムでの具体的実現方法

このようなダンピング制御を、自動給電システム（LFC）へ適用する上で、以下のソフトウェア改修を実施した。

P0 指令値の過去 10 点（300 秒）平均を算出する。（P0 指令値の長周期変化成分を抽出）

現在の P0 指令値と の差分を算出する。

（P0 指令値の短周期変動成分を抽出）

調整必要量から を差引きし、新たな調整必要量とする。

なお、における平均時間の 300 秒については、前述の不完全微分の時定数に相当し、別途検討した上で決定したものである。

第 6 図に、上記のロジックを織り込んだ LFC シミュレーション結果を示す。この結果から、本対策により、発電機の不必要な応動が抑制され、AR 変動の大きさが低減されていることがわかる。

よって、十分な効果が確認されたため、LFC ロジック改修を実施し、平成 17 年 3 月より実機に反映した。

4.改善効果の検証

実際の運用による改善効果の確認の例として、平成 16 年 9 月 16 日（改善前）と平成 17 年 10 月 15 日（改善後）における、AR 変動の大きさおよび発電機出力の比較結果を第 7 図に示す。

このように、実機においても、発電機の変動を抑制し、AR の 10 分周期程度の変動を低減していることが確認できた。

また、長期レンジで評価するため、AR 変動および負荷変動を 1 ヶ月間通してパワースペクトル解析し、そのスペクトル密度を、改善前と改善後で比較したものを第 8 図に示す。この結果より、短周期変動成分に対する AR 変動の抑制効果は明らかである。

なお、この 1 ヶ月間の 20 分周期以下の AR 変動の大きさ（標準偏差）を比較すると、

改善前 =19.4MW

改善後 =17.5MW

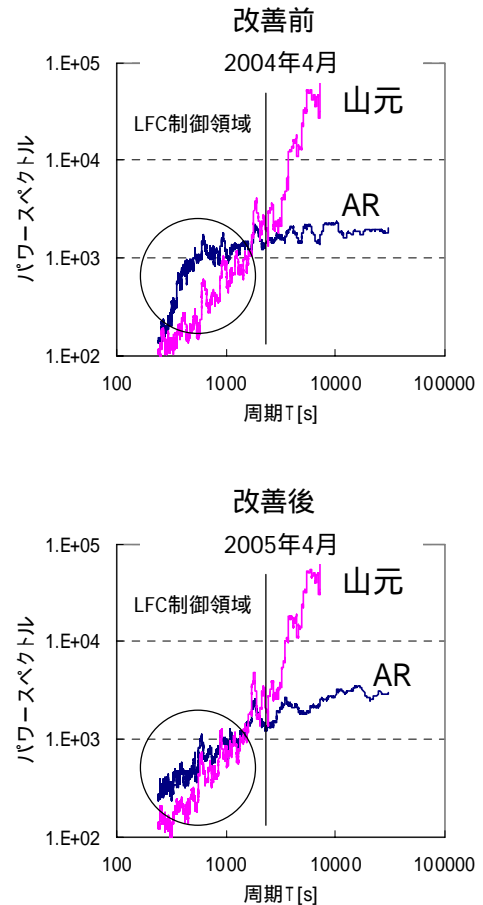
となり、AR 変動を約 10%低減している。

5.まとめ

従来の LFC 制御では、発電機の応答遅れにより、短周期成分の AR 変動を逆に悪化させていた。その対策として、今回、ダンピング要素を LFC 制御に組み込むためのロジック改修を行った。

その結果、応動遅れの大きな発電機の LFC 制御による過剰な出力変動を大幅に抑制し、LFC 制御仕上がりの向上 (=AR 変動の低減) を実現した。

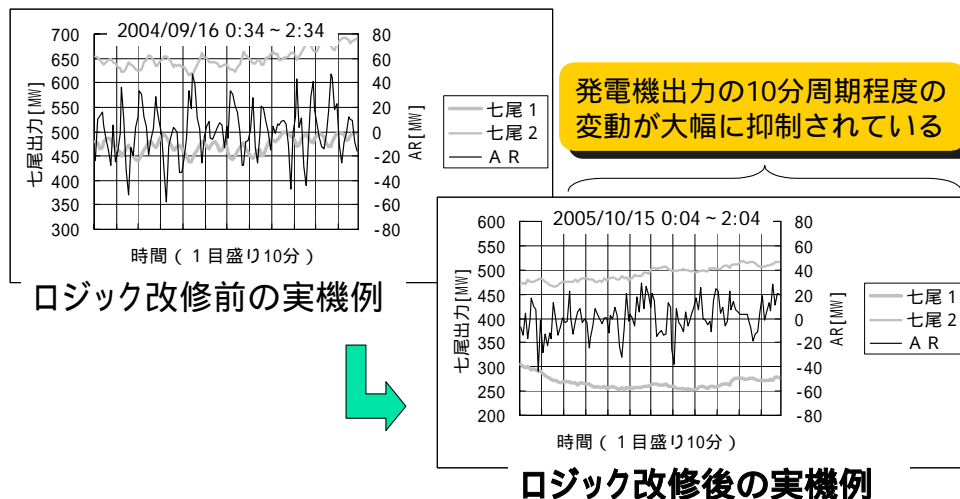
この効果は、中西 60Hz 系全体の周波数安定化にも寄与するものであり、電力品質のさらなる向上が図られたものとする。



第 8 図 AR 変動および負荷変動のパワースペクトル解析結果

参考文献

- (1) 電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会：「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」，電気学会技術報告 第 869 号 (2002 年)



第 7 図 LFC ロジック改善効果の実機確認例（発電機出力）