

周波數制御를 위한 比例制御機構의 最適設計에 關한 研究

論 文
26~2~8

A Study of Optimal Design of the Proportional Load-Frequency Controller for a Self-service Power Station.

張 世 勳* 任 化 永**
(Se Hoon Chang, Hwa Young Im)

Abstract

The object of this work is to study an optimal design problem of the proportional load-frequency controller for the single-control area power system. The selfservice power station is still a popular means as a power supplying source on ships or in a certain manufacturing area. The power system of this kind can be formulated as a single control-area system and it attracts a certain academic interest in controlling the system frequency under disturbances.

In this paper, the single control-area system is mathematically formulated as a linear, time-invariant system in state-space under certain assumptions.

The optimal proportional control law and the realization of the controller in closed loop-version is studied so that the final system designed can attain the system frequency to the nominal stationing value after the small load-disturbance.

As in general cases of optimal design problems, the performance index is assumed to be quadratic in states and the control effort, and the infinite time control process is assumed in this work.

The final control system realized depicts certain improvements in case study; in stability, transient responses and in steady-state frequency deviation, even though the steady state error did not attain the zero value.

1. 序 論

電力系統의 周波數 制御는 時時刻刻 變化하는 需要 變動에 追從하여 一定周波數를 維持하는 것이 目的이다.

一般의으로 電力系統의 最適制御 問題는

1) 電力系統의 經濟的 運營(運轉 및 給電)上의 最適化를 다루는 問題와

2) 最適화된 運轉狀態를 如何히 잘 維持하도록 系統을 制御하는 問題

3) 더 一般의으로는 이 두가지를 同時에 併合考慮하는 一般的 最適化問題로 區別할 수 있다. 어느 경우

이들 系統內의 有效 및 無效電力潮流의 最適化 制御를 目的으로 하나 첫째의 경우에는 最適化를 위한 目的이 良質의 電氣供給(一定周波數의 維持, 一定供給電壓의 維持, 電力供給의 信賴性)을 위한 系統의 經濟的 運轉 合理化를 最適化達成의 評價尺度로 하는데 比하여 둘째의 경우는 良質의 電氣供給이否가 主眼視되는 最適條件의 評價尺度가 됨이 다르다고 할 것이다. 이 論文에서는 電力系統이 最適狀態로 定態運轉되고 있어서 系統制御量(系統周波數와 母線電壓)이 希望值로 維持되어 오다가 系統周波數가 定規值(nominal value)에서 微小變動되었을 때 이를 制御하여 許用範圍內의 周波數值로 복귀시키는데 필요한 閉 loop制御系의 構成에 關한 最適制御條件을 究明하고 이 制御를 담당할수 있는 制御系를 具現시키는 問題로 制約시켜 다룰 것이므로 위의 두번째 分類에 屬하는 電力系統의 最適化

* 正會員: 漢陽大工大 電氣工學科教授(工博)
** 正會員: 韓電 技術開發研究所·漢陽大 大學院
接受日字: 1977年 2月 7日

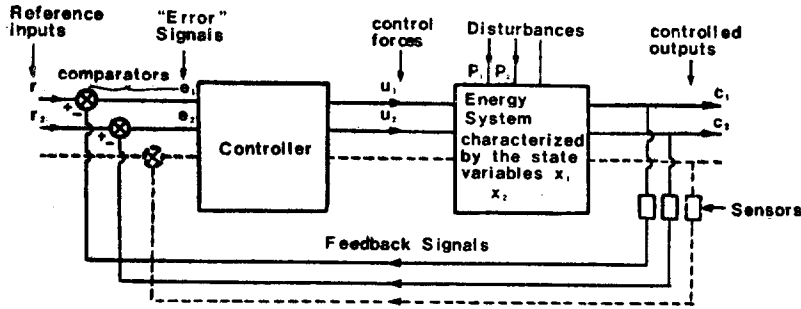


그림 1. 制御系統이 블럭 線圖
Fig 1. Block diagram of the control system.

問題로 볼수 있다.

그림 1.은 이 논문에서 다루려는 制御系의 block線圖이다.

制御量을 系統周波數 f 로 보고 系統負荷의 變動 또는 外亂信號의 系統進入으로 因하여 생긴 Δf 를 比較器에서 檢出하여 Δf 의 變化(또는 이들의 函數)抑制를 最適化 시키는 操作量을 發生하도록 比例調節器를 갖는 閉loop制御系를 設計하여 보려는데 이 論文의 目的이 있다.

一般의 通常狀態下의 電力系統에 있어서 i 번째 母線에 供給되는 有效電力의 定態變分(static change) ΔP_i 는 母線電壓의 位相角 $\Delta \delta_i$ 를 變動시키므로 周波數 變動을 이르게 되나 母線電壓의 크기 $|V_i|$ 에는 거의 變動影響을 미치지 못한다. 한편 母線의 無效電力分의 定態變分 ΔQ_i 는 本質의 由로 $\Delta |V_i|$ 에만 影響을 미치고 δ_i 의 크기에는 큰 影響力이 없으며, 또한 $|V_i|$ 이외의 母線電壓에는 微少한 影響力 外에 미치지 못한다.

이러한 ΔQ_i , ΔP_i 間의 定態感度聯關性을 淸查하여 電力系統의 制御機構는 두개의 制御 channel을 採用하여 系統電壓 및 系統周波數를 獨立의 由로 制御하는 것이 常例이다.

周波數制御 channel의 目的은 系統의 i 母線 周波數의 變動 Δf_i 를 檢出하여 發電機의 有效發電電力 ΔP_{Gi} 를 制御하므로써 系統周波數의 變動을 抑制하려는 것이다. Δf_i 와 隣接系統에서 連繫線(tie-line)을 通하여 흘러 들어오는 有效電力의 變分 ΔP_{Li} 가 周波數制御 channel의 調節器에서 比較, 增幅, 變換되어 有效電力 潮流의 變分命令信號 ΔP_{Ci} 를 마련하고 이 信號가 原動機에 印加되어 周波數制御에 所要되는 驅動回轉力의 所要變分量을 發生시켜 ΔP_{Gi} 를 얻게끔 機構가 마련되어 있다.

電壓制御 channel은 母線電壓의 크기를 制御함

그 目的으로써 母線電壓의 變動值 $\Delta |V_i|$ 가 檢出되어 QV調節器에 依한 發電電力의 命令變分信號 ΔQ_{Ci} 를 發生시키게 되고 이 信號가 勵磁磁束을 變化시킴으로써 母線電壓을 制御하는데 所要되는 無效分 發電電力의 所要增分 ΔQ_{Gi} 를 얻게끔 制御機構가 마련되어 있다.

系統內의 有效分 電力潮流의 平衡維持는 系統周波數가 定值維持되고 있음을 保障하며 無效分의 發電電力과 消費負荷電力間의 平衡狀態維持가 系統內의 電壓定值維持를 뜻한다. 一般의 由로 有效負荷電力 P_D 의 變動은 系統電壓의 變動에는 큰 影響을 미치지 않으나, 無效負荷電力 Q_D 의 變動은 거의 比例的으로 系統電壓의 變動要因이 된다.^{7,8)} 이러한 電力系統의 動態制御 問題를 다루는 데에는 數十 또는 數百 以上되는 狀態變數가 介入되어 淸 다루기에 複雜하게 되는 것이 常例이어서 이 論文에서는 다음과 같은 假定을 두어 다루는 系統을 簡易化 하였다.

- 1) 負荷周波數制御 channel과 母線電壓制御 channel과의 相互傳達結合은 疏한 것으로 생각한다.
- 2) 獨立된 母線에 對한 電壓制御 channel間의 相互傳達結合은 疏한 것으로 생각한다.
- 3) 各各의 獨立된 母線間의 電氣의 結合은 密한 것으로 생각하여 各 母線의 周波數 變動은 同一한 것으로 생각한다.
- 4) 電力系統은 定態安定限界를 벗어나지 않는 범위 내에서 恒時 動作되는 것으로 생각하고, 過渡安定度 問題는 고려하지 않는다.
- 5) $\Delta \delta$ 의 變動은 微少하여 一次近似化가 可能한 範圍內의 動的變化만을 고려한다.
- 6) 다루는 電力系統은 平衡된 三相電力系로 생각하였으며 系統 model은 線型, 時不變인 것으로 假定한다.

2. pf 制御系の 動特性

지금 制御區域 i 에서의 pf制御系の 動特性 model을 作成하기 위하여 이 區域內에 ΔP_{D_i} [MW]의 負荷電力 變動이 있었다고 하면 이 負荷變動에 應動해서 i 區域 內의 發電機制御機構는 ΔP_{G_i} [MW]의 有效 發電電力의 增加를 초래하게 될 것이므로($\Delta P_{G_i} - \Delta P_{D_i}$)[MW]에 해당되는 系統內의 有效電力의 増分量이 생기게 되며 이중 一部는 系統內의 運動 energy를 增加시키는데, 또 다른 一部는 系統內의 周波數變化로 因해 增加된 有效負荷分의 電力供給에, 또한 다른 一部는 人接 制御區域과의 連繫線(tie-line)을 통한 有效潮流分의 供給에 配分될 것이므로

$$\Delta P_{G_i} - \Delta P_{D_i} = \frac{dt}{d} W_{kin, i} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie, i} \quad (1)$$

여기서 D_i 는 i 制御區域電力系の 系統制動을 나타내는 量으로서

$$D_i = \partial P_{D_i} / \partial f_i \text{ [MW/HZ]}$$

로 정의된다. 또한

$$W_{kin, i} = \left(\frac{f_i}{f^0} \right)^2 W_{kin, i}^0 \text{ [MW/sec]} \quad (2)$$

여기서 $W_{kin, i}^0$ 는 f^0 에서의 i 區域系の 運動 energy이다. 그런데 $f_i = f^0 + \Delta f_i$ 이므로

$$W_{kin, i} = \left(\frac{f^0 + \Delta f_i}{f^0} \right)^2 W_{kin, i}^0 \approx \left[1 + 2 \frac{\Delta f_i}{f^0} \right] W_{kin, i}^0 \quad (3)$$

따라서

$$\frac{dt}{d} W_{kin, i} = \frac{2W_{kin, i}^0}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f_i \text{ [MW]} \quad (4)$$

만일 線路損失을 無視하고, i 制御區域과 連結된 다른 隣接制御區域을 1, 2, ...까지 이르는 것으로 하면

$$\Delta P_{tie, i} = \sum \Delta P_{tie, i} = \sum T_{\nu}^0 (\Delta \delta_i - \Delta \delta_{\nu}) \text{ [MW]} \quad (5)$$

여기서 T_{ν}^0 는 同期係數로서

$$T_{\nu}^0 = P_{max, \nu} \cos(\delta^0_{\nu} - \delta^0_{\nu}) \quad (6)$$

여기서 $\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta \delta_i$, $\Delta f_{\nu} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta \delta_{\nu}$ 이므로

式(5)는

$$\Delta P_{tie, i} = 2\pi \sum_{\nu} T_{\nu}^0 (\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_{\nu} dt)$$

$$\text{혹은 } \frac{d}{dt} \Delta P_{tie, i} = 2\pi \sum_{\nu} T_{\nu}^0 (\Delta f_i - \Delta f_{\nu}) \quad (7)$$

인 關係式을 얻는다.

Turbine發電機의 線型化 傳達特性은 여러개의 模型이 이미 發表되어 있고 再熱係數 및 再熱部의 再熱時間이 매우 짧아 再熱部의 時定數가 매우 적은 것으로 假定하면 再熱터빈發電機에 대한 傳達函數는 다음과 같이 주어진다.

$$G_T(S) = \frac{\Delta P_G(S)}{\Delta X_E(S)} = \frac{K_T}{1 + ST_T} \quad (8)$$

여기서 $X_E(S)$ 는 터빈에서 流入蒸汽量을 制御하는 制御발브의 角變位の 크기(opening 調整을 위한)를 나타낸다. 한편 부속된 터빈速度의 制御를 위한 speed governor 機構의 傳達關係는

$$\Delta X_E(S) = \frac{K_G}{1 + ST_G} \left[\Delta P_G(S) - \frac{1}{R} \Delta F(S) \right] = G_G(S) \left[\Delta P_G(S) - \frac{1}{R} \Delta F(S) \right] \quad (9)$$

여기서 R ; speed governor 機構의 speed "regulation"

K_G ; 이 機構의 static 利得定數

T_G ; 이 機構의 時定數

이다. 式(1), 式(4), 式(7), 式(8), 및 式(9)를 정리하여 i 制御區域에 대한 動的狀態 Model은 다음과 같이 整理할 수 있다.

즉

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta f_i &= \frac{f^0}{2W_{kin, i}^0} [-D_i \Delta f_i - \Delta P_{tie, i} + \Delta P_{G_i} - \Delta P_{D_i}] \\ \frac{d}{dt} \Delta P_{tie, i} &= 2\pi \sum_{\nu} T_{\nu}^0 (\Delta f_i - \Delta f_{\nu}) \\ \frac{d}{dt} \Delta P_{G_i} &= \frac{K_{T_i}}{T_{T_i}} \Delta X_{E_i} - \frac{1}{T_{T_i}} \Delta P_{G_i} \\ \frac{d}{dt} \Delta X_{E_i} &= \frac{K_{G_i}}{T_{G_i}} \Delta P_{G_i} - \frac{K_{G_i}}{T_{G_i} R} \Delta f_i - \frac{1}{T_{G_i}} \Delta X_{E_i} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3. 基本理論

制御對象인 電力系統의 狀態 model은 適切한 假定下에 다음과 같은 正規型으로 表現됨을 증명할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

또는 外亂入力을 分離시켜 표현하면

$$\dot{X} = AX + B'U' + B''U'' \quad (12)$$

여기서

X ; $(n \times 1)$ 의 狀態 vector

A ; $(n \times n)$ 의 系の 同伴行列

B ; $(n \times m)$ 의 驅動行列

B' ; 入力驅動行列

B'' ; 外亂驅動行列

U ; 制御 vector

U'' ; 外亂 vector

이다.

이를 Block 線圖로 나타내면 그림 2와 같다.

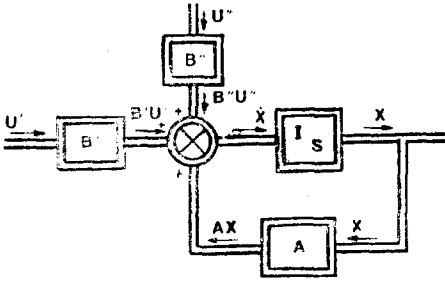


그림 2. 다루는 電力系統의 블럭 線圖
Fig. 2. Block diagram of the power system.

電力系統에서의 周波數 制御問題를 다루는데 있어서 最適化를 위한 制御機構의 評價尺度는 여러가지 型態로 표현될 수 있으나 여기서는 다음과 같은 最適化의 評價基準를 마련한다. 平衡狀態로 運轉되고 있던 系統이 階段狀 外亂을 받았을때 이에 뒤따른 過渡의인 系統內의 周波數變動이 되도록이면 그 持續時間과 變動 크기가 抑制되기를 希望한다고 생각한다. 이러한 最適化評價條件의 數式的 表現으로는 다음과 같은 ISE 判別函數가 널리 使用된다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T F X + U^T G U) dt \quad (13)$$

(여기서 F 및 G 는 實數型的 對稱 positive-definite 行列임.)

이다.

이제 最適化 問題는 式(11)로 표현되는 制御對象을 式(13)의 評價函數를 最少로 할수 있는 閉 loop系를 設計하는 問題로 規約된다.

지금 Hamiltonian을

$$H(X(t), U(t), P(t), t) = \frac{1}{2} X^T F X + \frac{1}{2} U^T G U + P^T A X + P^T B U \quad (14)$$

라 하면 最適化를 위한 必要條件 및 系의 狀態方程式은

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}^* &= A X^* + B U^* \\ P^* &= -\frac{H}{X} = -A^T P^* - F X^* \\ \text{및 } 0 &= -\frac{H}{U} = G U^* + B^T P^* \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

또는 $U^* = -G^{-1} B^T P^*$

이들 결과로부터

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}^* &= A X^* - B G^{-1} B^T P^* \\ \text{및 } \dot{P}^* &= -A^T P^* - F X^* \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

이 制御機構가 制御可能하고, 또한 다루는 制御系가 時不變이어서 A, B' 및 F, G 行列들이 定數行列이면 式(16)의 解의 形態는

$$U^* = K X^* \quad (17)$$

로 된다.⁴⁾ 따라서 最適化機能을 갖춘 最終制御系는 그림 3과 같이 具現化 시키면 된다.

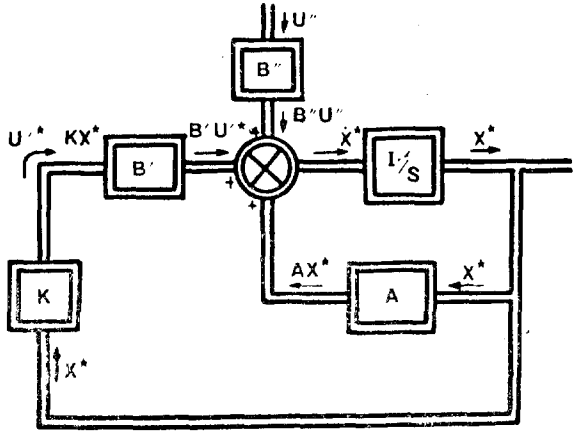


그림 3. 最適制御된 系統의 블럭 線圖
Fig. 3. Block diagram of the optimally controlled.

그림 3의 最適化 制御機構를 實質的으로 具現(Realization) 함에는 調節計의 利得行列 K 의 값을 求하여야 한다.

式(16)에서 adjoint行列 P^* 를 求하면 $U^* = -G^{-1} B^T P^*$ 에서 最適化를 위한 制御信號가 얻어지며, 이 결과를 式(17)에 代入하여 調節計의 利得行列 K 의 값이 다음과 같이 얻어진다.

$$K = U^* X^{*-1} = -G^{-1} B^T P^* X^{*-1} \quad (18)$$

그러나 式(16)은 2點境界值 問題를 풀어야 되는 번거로움이 있으므로 여기서는 다음의 方法을 擇하도록 한다.

評價函數가 式(13)과 같이 infinite-process 형태로 표현되고 다루는 系統이 時不變이면 또한 F, G 行列들이 實數型으로된 positive-definite 行列이면

$$K = -G^{-1} B' R \quad (19)$$

여기서 R 行列은 다음의 非線型 代數方程式을 만족하도록 선택하면 된다.

$$0 = -R A - A^T R - F + R B G^{-1} B^T R \quad (20)$$

일단 調節計의 利得行列 K 가 얻어지면 演算增幅器를 써서 다음 그림 4에서와 같이 最適制御信號를 發生시킬수 있는 調節計를 設計, 具現化 할수 있다.

여기서

$$U^* = K X^* = - \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & K_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (21)$$

이니까

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{f1}}{R_{11}} &= K_{11} \\ \frac{R_{f1}}{R_{12}} &= K_{12} \\ \frac{R_{f1}}{R_{ij}} &= K_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

되게 抵抗값들을 調整하면 된다.

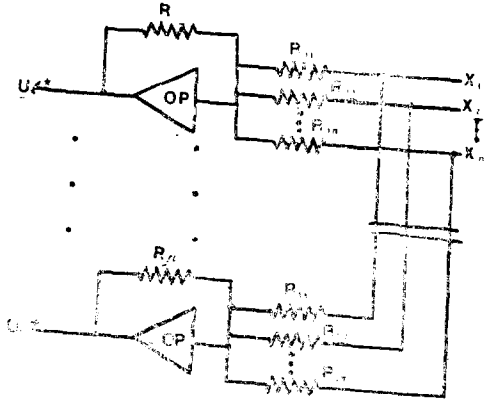


그림 4. 制御裝置의 實現化

Fig 4. Realization of the optimal control effort.

5. 結 論

1) 電力系統은 적절한 假定下에서 線型, 時不變型 狀態 model로 型식化 시킬수 있음을 보여준다. 制御性能 評價函數가 式(13)과 같이 狀態變數 및 制御量에 대해 二次型 函數로 주어졌을 때는 現代 最適制御理論을 適用 시키므로서 最適化를 위한 制御政策式이 쉽게 표시되나 二點境界(Two-point bounday value problem)를 數學的으로 處理하는데 必要한 數值解析上的 애로는 면할길이 없고 특히 評價函數의 積分上限이 無限대가 아닐 경우는 n 個의 行列 Riccati 微分方程式을 聯立시켜 풀어야 한다. 더욱이나 feedback 利得行列 K 는 時間函數로 되어 調節器의 具現化가 複雜하게 된다.

2) 이 論文에서 처럼 制御方法이 Infinite-time process인 경우에는 最適化政策을 求하기 위해서는 式(20)과 같은 非線型 代數方程式을 풀어야 될 必要가 있는데 이 또한 번거로운 計算處理 過程을 면하기 어렵다. 式(20)의 解集은 여러개가 있을수 있어서 이들 許容解集(Permissible solution set)을 모두 求하고 評價函數의 最少化 如否를 比較하여 最適化 制御政策을 가려낼이 바람직 하다.

3) 이 論文에서는 比例制御政策만을 採用 하였으나

積分制御 또는 比例 및 積分制御 혹은 이에 適切한 微分制御方式을 並行探擇 하였을 때의 系統周波數 制御效果의 檢討도 흥미로운 장래의 과제로 남는다.

4) 이 論文에서는 pf制御 channel과 QV制御 channel間的 相互傳達結合이 疏하고 또한 電力系統內的 周波數 動搖는 一律的으로 同一하게 變動되는 것으로 假定하였으나 pf와 QV制御 Channel間的 動的 連關性을 實質的으로 考慮한 電力系統의 動特性을 model로 하여 制御方式, 制御條件들을 究明하여 봄도 흥미로운 일일 것이다.

參 考 文 獻

1. Concordia, C., and L.K. Kirchmayer: Tie-line Power and Frequency Control of Electric Power Systems, AIEE Trans. Power Apparatus Systems, pt. IIIA, Vol. 72, pp. 562~572, 1953.
2. Ellis, H.M., J.E. Hardy, A.L. Blythe, and J.W. Skooglund: Dynamic Stability of the Peace River Transmission System, IEEE Trans. Power Apparatus Systems, Vol. 85, pp. 585~600 June, 1966.
3. Aggarval, R.P., and F.R. Bergseth: Dynamics of Loadfrequency Control Systems, IEEE Trans., Vol. PAS-87, No. 2, pp. 532~538. February, 1968.
4. Kalman, R.E.: Contributions to the Theory of Optimal Control, Bol. Soc. Mat. Mex. pp. 102~119, 1960.
5. Kirk, D.E.: Optimal Control Theory, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1970.
6. Aggarval, R.P., and F.R. Bergseth: Dynamics of Load-frequency Control Systems, IEEE Trans., Power Apparatus and Systems., Vol. PAS-87, No. 2, pp. 527~532, February, 1968.
7. Elgerd, O.J.: Electric Energy Systems Theory, McGraw-Hill Book Co., New York, 1971.
8. Elgerd, O.I.: Control System Theory, McGraw-Hill Book Co., New York, 1967.
9. Ogata, K.: State Space Analysis of Control Systems. Prentice-Hall Inc., New Tersey, 1967.
10. Ross, C.W.: Error Adaptive Control Computer for Interconnected Power Systems, IEEE Trans. Power Apparatus Systems, Vol. PAS-85 No. 7, July, 1966.