

전력시스템에서 수력발전소에 대한 최적 피이드포워드 주파수 제어

* 탁헌수, * 류창선, * 안태진, ** 이종범
* 원광대학교 공과대학 제어계측공학과, ** 원광대학교 공과대학 전기공학과

Optimal Feedforward Frequency Control for Hydro-Power Stations
In Power Systems

* Hyun soo Tak, * Tea chon Ahn, * chang sun Ryu, ** Jong bum Lee
* Wonkwang Univ., ** Wonkwang Univ.

Abstract

In this paper, the design of optimal feedforward regulators with the optimal feedforward filters for improving power frequency deviations in an interconnected system, using a polynomial LQG approach, is proposed.

The performances of the regulators with the optimal feedforward filters were compared with the frequency feedback regulator only in power system by simulation. The results show that the optimal feedforward regulators reduce the power frequency standard deviation by 25%-60% in the white noise load and the peak deviation in the step load by 8%-27%.

I. 서 론

전력 시스템에서 부하가 증가하면 시스템의 주파수가 감소한다. 이것은 일시적인 현상으로 약간의 유동후 전력 주파수 궤환 레귤레이터와 발전기 회전 에너지의 도움으로 안정을 되찾게 된다. 즉 급격한 변화가 아닌 약간의 비 정상적인 상태에서는 전력 주파수는 주파수 궤환 제어를 사용하는 것만으로도 허용값내로 유지될 수 있다는 것이다. 그러나 발전 용량이 작고, 큰 터빈 시정수를 갖는 수력 발전소가 큰 비율을 차지하는 시스템에서는 궤환 제어만으로는 적합하지 않다. 그래서 이 문제를 해결하기 위해서 전력 주파수 궤환 레귤레이터를 보완하는 최적 피이드포워드 필터를 도입한 레귤레이터를 설계하려 한다.

산업 공정 제어에서 효과적인 외란 소거와 과도 응답 특성의 개선을 위하여 도입하는 피이드포워드 제어는 다양한 설계 기법이 연구 제안 되었다. 본 논문에서는 Kucera등^{[3]-[4]}에 의하여 제안된 다항식 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 설계 기법에 인접 방정식 및 스펙트럼 분할법을 도입하여 새로운 최적 피이드포워드 필터를 설계한다. 또한 설계된 최적 피이드포워드 필터를 이용하여 측정 가능한 외란을 소거하고, 보상할 수 있는 최적 피이드포워드 레귤레이터를 설계한다. 이를 수력과 화력이 연계된 전력 시스템에 적용하고 컴퓨터 시뮬레이션하여 궤환 제어 및 부최적 피이드포워드 레귤레이터의 성능 특성과 비교한다. 그리고 최적 피이드포워드의 주파수 제어의 우수성을 고찰하였다.

II. 최적 피이드포워드 레귤레이터의 설계

II-1. LQG 접근방법

우선 레귤레이터 설계를 위해 식(1)와 같은 다항식 LQG로 구성된 선형 시스템을 가정한다.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + q^{-d}D(q^{-1})w(t) \quad (1)$$

여기서 $y(t)$ 는 출력, $u(t)$ 는 입력, $w(t)$ 는 측정 가능한

외란이다. A , B 및 D 는 후방 이동 연산자(Backward shifting operator) q^{-1} 을 갖는 다항식으로서 각각의 차계수는 $k > 0$, $d \geq 0$ 및 $k > d$ 를 만족한다. 또한 $A(q^{-1})$ 는 안정한 모닉(mononic)다항식이고, $B(q^{-1})$ 는 불안정한 다항식이다. 외란 $w(t)$ 을 동가 스토캐스틱(stochastic) 모델로 쓰면 다음과 같다.

$$w(t) = \frac{G(q^{-1})}{H(q^{-1})} v(t) \quad (2)$$

여기서 H 와 G 는 안정한 모닉(mononic) 다항식이다. $v(t)$ 는 백색 불규칙 외란으로 평균값이 0이고 분산이 Λ_v 이다. 이를 위해 피이드 백과 피이드포워드가 결합된 레귤레이터를 고려하고 매개변수화하여 표시하면 식(3)가 된다.

$$R(q^{-1})u(t) = -\frac{Q(q^{-1})}{P(q^{-1})} w(t) - S(q^{-1})y(t) \quad (3)$$

여기서 다항식 P 와 Q 는 모닉(mononic)이고, 특히 P 는 안정하여야 한다. 궤환 다항식 R 와 S 는 일정하여 이미 알고 있는 값이다.

식(3)을 블록선도도 표시하면 그림 2.1과 같다.

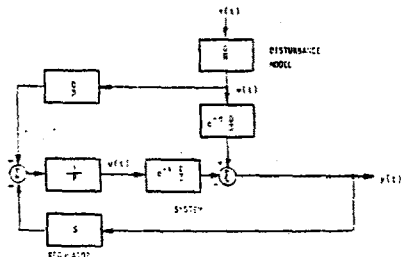


그림 2.1 모델 구조와 피이드포워드 레귤레이터 구조
Fig. 2.1 The model structure and the feedforward optimal regulator structure.

II-2. 최적 피이드포워드 필터

최적 피이드포워드 필터를 구하기 위해 식(4)와 같은 스펙트럼 분할법^[3]을 도입한다.

$$\gamma\beta\beta^* = BB^* + D\Delta\Delta^*A^* \quad (4)$$

여기서 γ 는 양의 실수, β 는 스펙트럼 인수인데, q^{-1} 의 다항식으로서 안정하고 모닉(mononic)인 다항식이고 차수는 식(5)이다.

$$n_\beta = \begin{cases} n_b & \rho = 0 \\ \max(n_b, n_a + \text{deg} \Delta) & \rho > 0 \end{cases} \quad (5)$$

다항식 B는 단위 원주상에 영점을 갖지 않는다고 가정 하였으므로, β 는 $0 < \rho < \infty$ 인 구간에서 결내 안정하다. B는 식(6)과 같이 분할된다.

$$B = cB_0 B_u \quad (6)$$

여기서 c는 상수이고, B_0 는 안정한 모닉(mononic) 다항식, B_u 는 안정한 모닉(mononic) 다항식 B_u 를 갖는 불안정한 다항식이다.

특히 $\rho=0$ 인 경우, 즉 최소 분산 제어[5]에서 스펙트럼 인수 β 는 다음으로 된다.

$$\beta = B_0 \bar{B}_u \quad (7)$$

식(3)의 레귤레이터에서 이미 알고있는 피드백 다항식 R과 S를 제외한 피드포워드 필터 P와 Q를 최적화 하기로 한다. 이때 식(3)의 레귤레이터 구조 및 매개변수는 변하여 식(8) 및 식(9)와 같다.

$$u(t) = - \frac{Q(q^{-1})}{P(q^{-1})} w(t) \quad (8)$$

$$\theta_{ff} = (P_1, \dots, P_{np}, Q_0, \dots, Q_{nq})^T \quad (9)$$

최소화하기 위한 피드포워드 필터 P는 다음의 방정식을 만족하여야 한다.[3]

$$P = \beta G \quad (10)$$

여기서 β 는 식(4)의 안정한 스펙트럼 인수이다. 피드포워드 필터 Q와 최소 평가지수 다항식 L은 식(11)의 만족하는 해이다.

$$(BR_* - \rho q^k A \Delta \Delta_* S_*) q^{-d+k} D_* G_* = \gamma D_* Q_* + q^{-1} H_* \omega_* L \quad (11)$$

여기서 최소 차수 조건은 다음과 같다. $n_q = \max(n_a + n_h - 1, n_d + n_g + d - k + n_r)$, 만약 ρ 와 S가 0이 아니면

$$n_q = \max(n_a + n_h - 1, n_d + n_g + d - k + n_r, n_d + n_g + d + n_s + \text{deg} \Delta) \quad (12)$$

$$n_l = \max(n_\beta, n_b - d + k) - 1$$

$P = \beta G$ 를 이용하여 식(8)의 레귤레이터에 의하여 최소화된 평가지수는 다음으로 된다.

$$2J_{min} = \frac{\lambda_v}{2\pi i} \oint \frac{LL_*}{\gamma \beta \beta_*} \frac{dz}{z} + \frac{\rho \lambda_v}{2\pi i} \oint \frac{GG_* DD_* \Delta \Delta_*}{\gamma \beta \beta_* H H_*} \frac{dz}{z} \quad (13)$$

앞으로 전개될 수·화력 연계 시스템에 대한 레귤레이터 구조를 분석한다. 궤환 레귤레이터의 이산치화 모델을 식(14)와 같다.

$$R(q^{-1})u(t) = S(q^{-1})(-y(t)) \quad (14)$$

여기서 $\Delta(q^{-1}) \stackrel{\Delta}{=} 1 - q^{-1}$ 라 놓고 근사값 $R \approx \Delta$, $\Delta \approx \Delta$ 그리고 $H \approx \Delta$ 및 $G=1$ 을 식(11)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$(B(1-q) - \rho q^k A(1-q^{-1})(1-q)S_*) q^{-d+k} D_* = \gamma \beta Q_* + (\alpha_* (1-q)) q^{-1} L \quad (15)$$

$1-q$ 가 다른 세항의 인수이므로 $\gamma \beta Q_*$ 의 인수이다, 안정한 β 의 인수는 아니다. 결론적으로 식(15)이 된다.

$$Q_*(q) = Q_1(q)(1-q) \quad (15)$$

다항식 (11)은 식(16)과 같게 되고

$$(B - \rho q^k A \Delta S_*) q^{-d+k} D_* = \gamma \beta Q_1_* + \alpha_* q L \quad (16)$$

여기서 차수 조건은 다음과 같다.

$$n_{Q_1} = n_Q - 1 = \max(n_a - 1, n_d + d - k, n_d + d + n_s) \quad (17)$$

$$n_L = \max(n_\beta, n_b - d + k) - 1$$

레귤레이터 식(3)에 식(10)의 $P = \beta G$ 및 $R = \Delta$ 와 $Q = Q_1(1-q^{-1})$ 을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$(1-q^{-1})u(t) = - \frac{Q_1(q^{-1})(1-q^{-1})}{\beta(q^{-1})} w(t) - S(q^{-1})y(t) \quad (18)$$

피드포워드 경로의 공통 인수 $1-q^{-1}$ 를 소거하면 최적 피드포워드 레귤레이터 구조는 식(19)과 같다.

$$u(t) = - \frac{Q_1(q^{-1})}{\beta(q^{-1})} w(t) - \frac{S(q^{-1})}{R(q^{-1})} y(t) \quad (19)$$

III. 시스템 모델화

III-1. 수력 발전소와 조속기

그림 3.1에 도시한 것과 같은 수력 터보 발전기를 고려한다.

전력 주파수 제어는 주파수 궤환에 의해 발생 및 소비 전력을 평형 시키는 것이다. 이 발전기는 시정수가 3s~3000s에 상당한 범위에서 있는 시스템으로 선형 1계 미분 방정식(16)에 의해 나타낼 수 있다. 이 시스템은 다음과 같은 전력 평형, 수력 동특성 및 제어기로 구성된다.

전력 평형 $P_w - P_o = T_w \omega$ (20)

수력 동특성 $P_w = \frac{1-sT_w}{1+s(\lambda T_w/2)} u$ (21)

속도 제어기 $u = \frac{1}{E_H} \frac{(1+sT_I)}{(1+sT_I')} \Delta \omega$ (22)

$$\bar{u} = u + \lambda \quad ; \quad \Delta \omega = \omega - \omega_0$$

여기서

- P_w : 공칭 동작점 부터 터빈 전력 편차 [pu].
- λ : 동작점 (1=전부하).
- P_o : 부하 편차 [pu].
- ω : 시스템 주파수(터빈 속도) [Hz]
- $\Delta \omega$: $\Delta \omega = \omega - \omega_0 = -(\omega - \omega_0)$ 로 기준 ω_0 로 부터 편차 [pu].
- T : 시스템 관성 [s].
- \bar{u} : 동작점 λ 로 부터 전체적인 제어 신호 u의 편차 [pu].
- \bar{u} 는 급수 게이트 서보용 위치 설정점.
- T_w : 수력 시정수(물이 출발하는 시간) [S].
- T_I : 화력 발전기 시정수 [s].
- $1/E_H, 1/E_T$: 수력과 화력의 레귤레이터 이득 [pu].

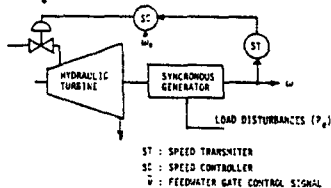


그림 3.1 전력 주파수 제어
Fig. 3.1 Power frequency control.

방정식 (21)는 선형화된 수력 동특성을 표시한 고전적 모델로써 역 응답을 갖는 비 초소 위상 시스템이다. 주 급수 게이트의 개방은 초기에 터빈 전력의 감소를 조대하는 시스템이다. 이 시스템의 동 특성은 터빈과 부하 자기 조절이 무시된 상태에서 동작점 λ 에 의존한다고 가정한다. 또한 게이트 서보 모터는 빠른 응답 특성을 가지므로 게이트 위치가 서보 입력 u에 의해 지연없이 응답한다고 가정한다.

III-2. 상호 연계시스템의 모델화

상호 연계된 전력 시스템의 모델화를 위해 수력 발전소

을 식(22)의 조속기를 갖는 식(21)과 같은 하나의 동가 시스템으로 취급한다. 이것은 시정수, 부하계수, 레귤레이터 매개변수들이 모든 수력 발전소에서 비슷하기 때문에 적당하다. 한편 자체 전력 주파수 레귤레이터를 가지는 화력 발전소도 하나의 동가 동특성을 갖는 시스템으로 1개 저역 필터로 모델화할 수 있다.^[9] 그리고 이들 발전소는 서로 연계되어 있어, 주파수의 동적 상태 뿐만 아니라 정적인 상태에서도 같다고 가정할 수 있다.

이상을 고려하여 전부하 전력이 4000[MW]급이고 주파수가 60[Hz]인 수·화력 연계 시스템을 시뮬레이션의 기본 모델로 선정하였다.^[11] 블록선도를 나타내면 그림 3.3과 같고, 표 1은 이 모델의 매개변수 값이다.

표 1 매개변수 값
Table 1 Parameter values.

$E_H : 0.04 [pu]$	$E_T : 0.3 [pu]$
$T_I : 10s$	$T_r : 0.35s$
$T_f : 135s (K_c = 2)$	$T : 10s$
$T_w : 4s$	$a_H : 0.6$
$\lambda : \text{범위 } [0.4, 1] \text{에서 변화}$	$a_T : 0.4$

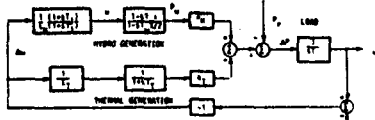


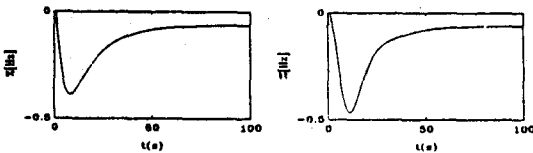
그림 3.3 $a_H + a_T = 1$ 을 가진 상호 연계 시스템에서 전력 주파수 편차를 도시한 모델

Fig. 3.3 A model describing the power frequency deviations in the interconnected system with $a_H + a_T = 1$.

그림 3.4는 계단 부하 외란을 얼마나 배제 하는지를 도시한 것이다. 그림 3.4는 계단 부하 외란 P_0 를 입력으로, 주파수 편차 $\omega - \omega_0$ 를 출력으로 계단 응답을 도시한 것이다.

그림 3.4에서 계단 부하 변화는 처음에서 30s 동안 큰 과도 주파수 편차를 야기 시킨다. 이런 부하 외란 계단 응답은 전력 시스템에서는 전형적인 형태이다.

화력 발전기는 외란 배제를 개선하는데 사용할 수 없다. 보일러에 충분한 증기를 갖고 있는 상태와 화력 발전기의 짧은 시정수 $T_r = 0.35s$ 는 일시적으로 외란배제를 가능케 할 수 있으나 보일러에 저장된 증기만으로는 계속되는 부하의 변동을 지탱할 수 없다. 이를 대처하려면 증기 발생량을 변화시키는 수 밖에 없는데, 이 과정은 수분의 시정수를 갖는 매우 느린 공정이다.



(a) $\lambda=0.5$

(b) $\lambda=1$

그림 3.4 계단 부하 변화에 대한 주파수 응답
Fig. 3.4 Response of the frequency to step load change.

이상에서 기존의 수·화력 시스템의 주파수 제어의 문제점 기술하였다. 이 문제점은 수력 발전의 계단 부하외란과 화력 발전의 계단 제어로도 쉽게 해결할 수 없다. 그러나 이 문제점들은 수정할 수 있는 외란 신호 P_0 을 피드포워드 필터를 통하여 수력 발전기에 피드포워드 시키므로써 제어 성능을 개선시킬 수 있다. 여기서 화력 발전소는 전력 주파수 레귤레이터로서 적당하지 않기 때문에 피드포워드 제어를 할 수 없을 것이다.

피드포워드 필터를 사용하여 제어하는 연계된 전력 시스템의 블록선도는 그림 3.5와 같다. 표 1의 매개변수와 $a_H=0.6$, $a_T=0.4$ 의 전력 할당 비율을 가진 전력 시스템 모

델을 가지고 상태 방정식을 유도하면 식(23)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1333 & 0.060 \\ 0 & -1/2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.12 & -0.10 \\ 3/2\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \quad (23)$$

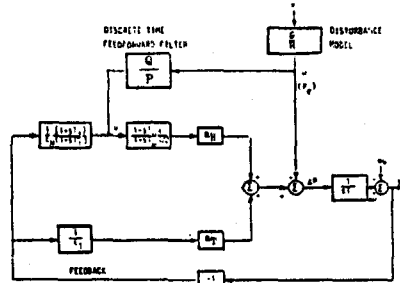


그림 3.5 수력 발전소와 피드포워드 필터의 결합
Fig. 3.5 Combination with the hydro power station and feedforward filter.

IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 설계한 최적 피드포워드 필터를 가진 레귤레이터의 제어 성능을 고찰하기 위하여 그림 3.5와 같은 시스템 모델을 선정하고 부하가 $\lambda=1$ 과 $\lambda=0.5$ 일때 컴퓨터 시뮬레이션 하였다.

샘플링 주기 1Hz를 가지고 이산화하여 $A(q^{-1})y(t) = q^{-1}B(q^{-1})u(t) + q^{-1}D(q^{-1})w(t)$ 구조의 입·출력으로 표현하면 식(24)와 식(25)와 같다.

(a) $\lambda=0.5$ 일 경우

$$(1 - 1.243q^{-1} + 0.322q^{-2})y(t) = (-0.04919 + 0.08470q^{-1})u(t-1) + (-0.09362 + 0.03444q^{-1})w(t-1) \quad (24)$$

이 모델은 0.875와 0.368에 극점이 있고, B는 단위원 밖인 1.72에 영점을 갖는다.

(b) $\lambda=1$ 일 경우

$$(1 - 1.482q^{-1} + 0.5308q^{-2})y(t) = (-0.07571 + 0.09781q^{-1})u(t-1) + (-0.09362 + 0.05678q^{-1})w(t-1) \quad (25)$$

이 모델에서는 0.875와 0.606에 극점이 있고, B는 단위원 밖인 1.29에 영점을 갖는다.

R과 S 다항식을 식(22)에 사용하면 최적 피드포워드 레귤레이터의 구조는 식(26)과 같다.

$$u(t) = - \frac{Q_1(q^{-1})}{\beta(q^{-1})} w(t) - \frac{(1.8518 - 1.66735q^{-1})}{(1 - 0.99262q^{-1})} y(t) \quad (26)$$

최적 피드포워드 레귤레이터의 성능을 비교하기 위하여 간단한 부최적 피드포워드 필터를 이용한 레귤레이터는 다음과 같다.

$$u(t) = - \frac{(1-P)1.667}{1-Pq^{-1}} w(t) - \frac{(1.8518 - 1.66735q^{-1})}{(1 - 0.99262q^{-1})} y(t) \quad (27)$$

여기서 극점 P는 매개변수처럼 사용되면, 계수 1.667은 정확한 정적이다. 그러므로 부하 계단 외란은 점근적으로 소거된다.

우선 백색 잡음의 외란 부하에 대한 최적 피드포워드의 제어 특성을 조사해 본다. 입력 penalty ρ 를 변화시켜서 최적 피드포워드 필터에 포문 편차가 $\sigma_w=0.1$ 인 백색 잡음이 포함된 부하 외란 $w(t)=0.999w(t-1)+v(t)$ 를 인가하

고 1000s 동안 시뮬레이션하여 궤환 제어, 부최적 피드포워드 제어 및 최적 피드포워드 제어의 편차 σ_y 와 $\sigma_{\Delta u}$ 를 계산한다. 이를 전부하($\lambda=1$)와 반부하($\lambda=0.5$)로 구분하여 입·출력 편차, 제어입력 및 출력을 나타내면 표 2, 그림 4.1이다.

다음은 1%의 계단 부하 외란에 대한 최적 피드포워드의 제어 특성을 조사해 본다. $\lambda=0.5$ 와 $\lambda=1$ 일때 1%의 계단 부하 외란 P_{ω} 를 입력으로, 주파수 편차 $\omega-\omega_0=y$ 를 출력으로 도시한 그림 4.2은 $P=0.8$ 인 부최적 식(27)을 사용할 때 계단 부하 외란의 배제를 궤환만 사용할 때와 비교하였다.

그림 4.3에서 0.3-2범위의 입력 penalty ρ 를 가진 최적화된 피드포워드 필터의 사용은 현저하게 응답이 개선되었다. 또한, 바이어스도 제거되었고 회복시간 및 최대 편차도 감소 되었다. 이것은 궤환 제어보다는 최적 피드포워드 레귤레이터를 선택하는 이유가 될 것이다.

표 2 $\lambda=0.5$ 와 $\lambda=1$ 일때 입·출력의 표준편차
Table 2 Input and output deviations at $\lambda=0.5$ and $\lambda=1$.

(a) $\lambda=0.5$

ρ	최적 피드포워드 필터		suboptimal feedforward ($p=0.8$)	feedback only
	0	0.6		
$\sigma_y/\sigma_v[\%]$	0.81	1.17	1.38	1.89
$\sigma_{\Delta u}/\sigma_v[\%]$	6.85	0.90	0.96	0.50

(b) $\lambda=1$

ρ	최적 피드포워드 필터		suboptimal feedforward ($p=0.8$)	feedback only
	0	0.6		
$\sigma_y/\sigma_v[\%]$	0.36	0.72	1.38	1.87
$\sigma_{\Delta u}/\sigma_v[\%]$	4.86	0.80	0.81	0.44

이상의 컴퓨터 시뮬레이션에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 최적 피드포워드 레귤레이터는 궤환 제어만을 사용하는 경우보다 백색 잡음 부하에서 25-60%, 계단 외란 부하에서 8-27%정도 주파수 편차 σ_y 를 감소 시킨다.
2. 최적 피드포워드 레귤레이터는 0.3-2 범위의 입력 penalty ρ 를 사용하는 것이 적당하다.
3. 부하 λ 에 대해 설계된 최적 피드포워드 필터는 부하 조건에 관계없이 전 범위에 만족하게 작용한다. 즉 $\rho > 0.3$ 와 $\lambda=0.5$ 인 경우 설계된 필터들을 $\lambda=1$ 일 경우에 적용하여도 최적 제어 성능을 나타내었다.

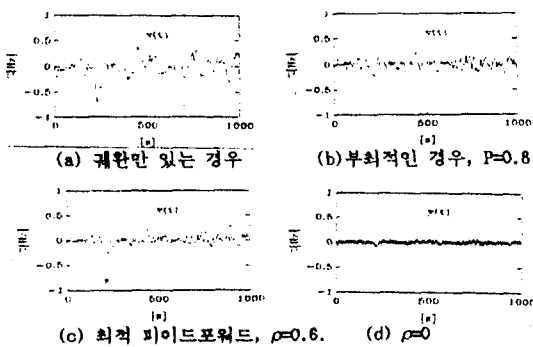
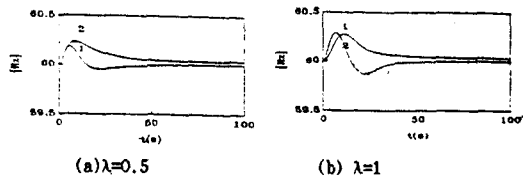
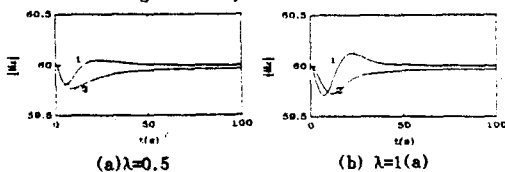
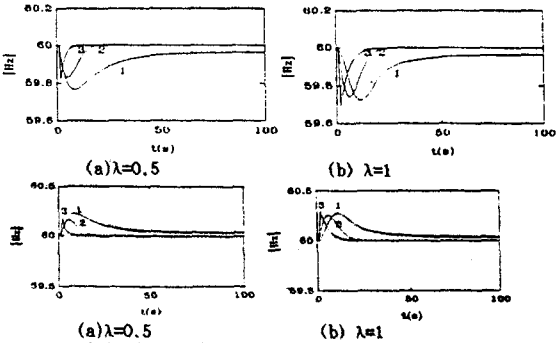


그림 4.1 $\lambda=0.5$ 일때 출력
Fig. 4.1 output at $\lambda=0.5$



1: 단지 궤환만 있는 경우
2: 부최적 피드포워드 필터 사용할 경우($P=0.8$)
1: With output feedback only.
2: With suboptimal feedforward($P=0.8$).
그림 4.2 $\lambda=0.5, \lambda=1$ 일때 부하 계단 응답
Fig. 4.2 Load step response for $\lambda=0.5$ and $\lambda=1$.



1: 단지 궤환만 있는 경우
2: $\rho=0.6$ 인 최적 피드포워드 필터
3: $\rho=0$ 인 최적 피드포워드 필터
1: Feedback only
2: Optimal feedforward for $\rho=0.6$.
3: Optimal feedforward for $\rho=0$.
그림 4.3 $\lambda=0.5, \lambda=1$ 일때 부하 계단 응답
Fig. 4.3 Response of the frequency at $\lambda=0.5$ and $\lambda=1$.

V. 결 론

최적 피드포워드 필터를 사용한 레귤레이터의 성능을 궤환 제어만 사용한 레귤레이터의 성능과 비교하면 전력 주파수 편차가 백색잡음 부하에서 25-60%, 계단부하에서 8-27% 감소 되었다. 간단한 부최적 피드포워드 필터를 사용한 레귤레이터의 성능과도 비교하면 최적 피드포워드 필터의 레귤레이터가 백색잡음 부하를 효율적으로 배제하였으며, 계단 부하의 응답특성도 향상 시켰음을 보였다. 따라서 간단한 부최적 피드포워드 필터 보다는 최적 피드포워드 필터 사용이 바람직함을 입증했다. 특히 외란 배제는 부하계수 λ 에 의존하나, 최적 피드포워드 레귤레이터의 성능은 λ 의 변화에 건실함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Fabian, E. and W. M. Wonham, "Decoupling and disturbance rejection", IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-19, pp 399-403, 1974.
2. Ng, T. S. and M. A. Magdy, "Representation and transient behaviour of self-tuning Controller for deterministic disturbances", Proc. IEE, Vol. 133, Pt. D, pp 285-288, 1986
3. Kucera, V., "Discrete Linear Control, Wiley, New York, 1979.
4. Kucera, V. and M. Sebek, "A note on stationary LQG Control", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-30, pp 1242-1245, 1985.
5. Astrom, K. J. and B. Wittenmark, "On self-tuning regulators", Automatica Vol. 9, pp 185-199, 1973.
6. Elgerd, O. I., "Electric Energy Systems Theory. McGraw-Hill, 1971.
7. Yu, Y-N., "Electrical Power System Dynamics", Academic Press, New York, 1983.