

기울기 방법을 이용한 시분할 PI 전력계통 안정화 장치

정해원, 백영식
경북대학교 전기공학과

Time Division Proportional-Integral Power System Stabilizer Using The Gradient Method

Hae-Won Jung, Young-Sik Baek

Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University

Abstract - Stabilization of power systems is investigated using a proportional-integral power system stabilizer(PI PSS). Time division PI PSS is examined in this paper. Two approaches are presented for determining the optimal stabilizer gains of the proposed PI PSS. Simulation results show that the proposed PI PSS yields better system dynamic performance and stability than the sub-optimal stabilizer in the sense of having greater damping in response to a step disturbance.

(suboptimal regulator)를 이용한 PI 안정화 장치인데[5], 선형 최적 안정화 장치보다는 성능과 안정성이 떨어지지만, PI 제어기는 현재 가장 널리 사용되고 있고 간단하기 때문에, 실제로 구현하기가 쉽다.

본 연구에서 설계한 전력계통 안정화 장치는 PI 안정화 장치를 기울기 방법과 시분할 기법을 접목하여 구성하고 제안한 전력계통 안정화 장치와 다른 전력계통 안정화 장치를 비교하여 성능과 안정성을 개선하고자 하였다.

1. 서 론

최근 발전계통의 안정적 운영을 위하여 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer, PSS)에 대한 다양한 연구가 수행되고 있고, 여러 가지 방법들 제안되어 왔다[1]-[5]. 이러한 PSS의 설계 목적은, 부하 변동이나, 지락 사고와 단락 사고 같은 송전 선로의 상태 변화로 고속의 여자계통(excitation system)에 의해 발생하는 기계적인 제동 토크의 부족으로 저주파 진동이 발생하게 되는데, 이 제동 토크의 부족을 보상하고, 변화된 동작점에 대해서도 적절한 성능과 안정성을 유지하도록 강인성(robustness)을 극대화하는 것이다. 전력계통 안정화 장치의 설계 방법으로는 초기에 제안되었던 토크 사이의 지상을 보상하는 회로를 통하여 토크를 증대시키도록 변수를 결정하는 방법, 최적 제어 이론을 이용해 상태 변수를 제어하는 방법, 전력계통의 고유치를 원하는 위치에 설정하는 방법 등이 있으며, 최근에는 슬라이딩 모드 제어와 H_2/H_∞ 제어 이론을 적용한 방법들이 발표되고 있다[3]-[5]. 본 연구에서 비교하고 있는 선형 최적 안정화 장치(Linear Optimal PSS)는 성능과 안정성이 뛰어나지만, 모든 상태 변수를 관측하여 제어해야 하기 때문에 실제 상황에 적용하기가 난해하다. 이런 단점을 보완하여 설계한 것이 준 최적 레귤레이터

2. $K_I \cdot K_P$ 의 설정

본 연구에서는 각주파수($\Delta\omega$)의 저주파 진동을 최소화하기 위해 K_I , K_P 를 미소증분시켜 $|\Delta\omega(t)|$ 의 면적을 이용해 기울기를 구하는 방법을 적용하여 최적의 K_I 와 K_P 를 구하는 시분할 기법을 이용한 PI 안정화 장치를 제안하였다.

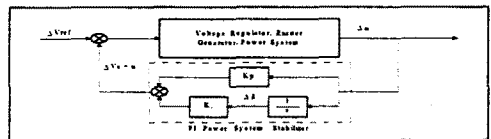


그림 1. PI PSS의 블록 다이어그램

2.1 기울기 계산

$t = 0$ 에서 $t = \infty$ 까지 $|\Delta\omega(t)|$ 의 면적을 S 라고 한다면, S 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$S = \int_0^{\infty} |\Delta\omega(t)| dt \quad (1)$$

S 를 $f()$ 의 함수로 표현한다면,

$$S = f(K_I, K_P) \quad (2)$$

으로 나타내어지므로, S_ϵ 를 표현하면,

$$S_\epsilon = f(K_I + \epsilon, K_P) \text{ 또는 } f(K_I, K_P + \epsilon) \quad (3)$$

으로 나타나게 된다. S 는 임의의 K_I , K_P 에 대한 면적이고, S_ϵ 는 K_I 또는 K_P 에 ϵ 를 더하여 구한 면적이므로, 기울기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{S - S_\epsilon}{\epsilon} \quad (4)$$

D : 기울기 , $0 < \epsilon < 1$

2.2 KI · KP의 계산

KI와 KP 값을 계산하기 위해서 식(1), (4)를 이용하여 기울기를 계산하므로써 KI와 KP의 변화량과 진행방향을 결정할 수 있다.

먼저 KI를 구하는 식을 표현하면,

$$K_I^{n+1} = K_I^n - \delta \quad (5)$$

으로 나타난다. 변화량 δ 는 변화량과 진행방향을 포함하고 있고, KI가 최소극점을 지난 경우와 지나지 않은 경우에 따라 δ 을 다르게 구하게 된다.

최소극점을 지나지 않은 경우에 δ 의 값은 다음의 조건에 따라 구하여진다.

$$\delta = \begin{cases} \Delta K_I \cdot \frac{D}{|D|} & , |D| < i \\ \Delta K_I' \cdot \frac{D}{|D|} & , i \leq |D| < j \\ \Delta K_I'' \cdot \frac{D}{|D|} & , |D| \geq j \end{cases} \quad (6)$$

$\Delta K_I, \Delta K_I', \Delta K_I''$ 은 KI의 변화량을 조절하기 위해 설정되어지는 상수이다.

최소극점을 지나친 경우, 최소면적을 가지는 KI 값을 지나친 것이므로, 세밀하게 극점을 찾아가도록 δ 의 값을 미소증분시켜 정확한 KI 값을 구하게 되고, δ 값은 다음의 식(7)에 의해 구하여진다.

$$\delta = \sigma \times \frac{D}{|D|} \quad (7)$$

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta K_I \quad , \quad 0 < \alpha < 1$$

α 값이 0에 가까워질수록 더 정확한 값을 구할 수 있으나 계산시간이 증가되므로 적당한 값을 설정해야 한다.

KP도 같은 과정으로 구하여 진다.

2.3 시분할 방법

이전에는 0에서 ∞ 시간까지 전체에 대해 가중 행렬을 적용하여 최적의 이득을 설정하였지만, 전체가 최적이라고 해서 어떤 특정 부분까지 최적이라고 할 수 없다. 이런 점을 개선하고자 시간을 분할하여, 각 구간별의 $|\Delta\omega|$ 의 면적을 최소화하여 시스템의 저주파 진동을 억제하려 한다. 여기서 해당 구간에 대해서만 최적의 제어기 이득을 구하는 각 구간 최적화법(제안1)과 해당 구간과 나머지 구간에 미치는 영향을 고려하여 제어기의 이득을 구하는 방법(제안2), 이 두 가지 경우에 대해서 다루었다. 1개의 구간으로 시분할을 하였다고 가정하자.

제안1

i번째 구간의 최소면적을 S_i 이라고하면, S_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = f_i(\langle K_I, K_P \rangle_k)$$

$$= \min[f_i(\langle K_I, K_P \rangle_1), f_i(\langle K_I, K_P \rangle_2), \dots, f_i(\langle K_I, K_P \rangle_n), \dots] \quad (8)$$

$$f_i(\langle K_I, K_P \rangle_k) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |\Delta\omega(\langle K_I, K_P \rangle_k)| dt \quad (9)$$

식(9)에서 t_i 는 i번째 구간의 끝 시간이 되고, t_0 는 0 초를 가리킨다. 이렇게 각 구간의 최적 제어기 이득을 구하면 총 면적을 구할 수 있다.

$$S_{total} = \sum_{i=0}^n S_i \quad (10)$$

제안2

i번째 구간의 최소면적 S_i 은 다음과 같다.

$$S_i = f^i - \int_{t_i}^{t_{i+1}} |\Delta\omega(\langle K_I, K_P \rangle_k)| dt \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f^i &= \sum_{m=1}^i f_m(\langle K_I, K_P \rangle_k) \\ &= \min[\sum_{m=1}^i f_m(\langle K_I, K_P \rangle_1), \\ &\quad \sum_{m=1}^i f_m(\langle K_I, K_P \rangle_2), \\ &\quad \dots, \sum_{m=1}^i f_m(\langle K_I, K_P \rangle_n), \dots] \end{aligned} \quad (12)$$

$$f_m(\langle K_I, K_P \rangle_k) = \int_{t_{m-1}}^{t_m} |\Delta\omega(\langle K_I, K_P \rangle_k)| dt \quad (13)$$

f^i 에 의해서 제어기의 이득을 결정하게 되고, $f_m(\)$ 은 m 번째 구간의 $|\Delta\omega(t)|$ 의 면적을 나타내는 함수이다.

제안2의 전체 면적은 제안1의 경우와 마찬가지로 식(10)을 이용하여 구할 수 있다.

제안한 과정의 알고리즘은 그림 2.와 같다.

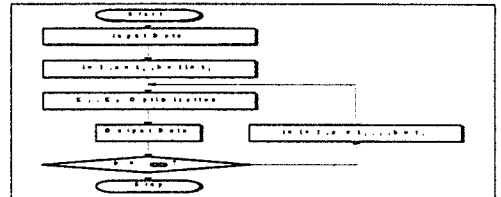


그림 2. 제안한 방법의 알고리즘

3. 발전기 모델링

본 연구에서 선택한 발전 계통은 여자기와 전력 계통 안정화 장치가 있는 동기기의 선형화 모델인 그림 3.과 같은 6차의 전력계통이다[5]. 플랜트는 여자기와 동기기로 구성되어 있으며, $\Delta\omega$ 를 출력으로 정의하고, PSS의 출력($\Delta V_s = u$)은 여자기의 보조 입력 단자를 통하여 입력된다.

시스템의 상태방정식은 다음처럼 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A X(t) + B U(t) \\ Y(t) &= C X(t) \end{aligned} \quad (14)$$

X는 상태벡터($X = [\Delta e_q, \Delta e_{FD}, \Delta V_A, \Delta V_F, \Delta \delta, \Delta \omega]^T$)이고, U는 제어 벡터이고, Y는 출력 벡터이고, A,

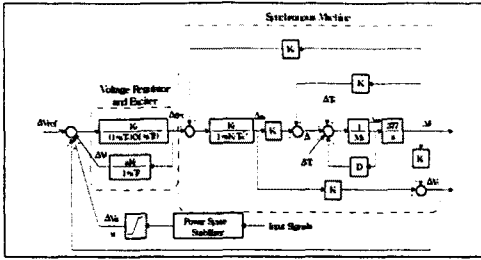


그림 3. 발전기시스템 블록 다이어그램
B와 C는 상수 행렬이다.
발전 계통의 여러 가지 상수들은 표 1.과 같은 값으로 나타난다.

M (=2H)	4.74	T _{do'}	5.9 s
D	0	x _o	1.640 pu
x _d	1.700 p	x _{d'}	0.245 pu
K _A	400	T _A	0.05 s
K _E	-0.17	T _E	0.95 s
K _F	0.025	T _F	1.0 s

표 1. 발전 시스템의 제정수

이 발전 계통의 상수에 의해서 K₁~K₆을 구할 수 있는데, 그 값은 다음과 같이 나타난다.

$$K_1 = 1.4479, K_2 = 1.3174, K_3 = 0.3072$$

$$K_4 = 1.8050, K_5 = 0.0294, K_6 = 0.5257$$

K₁~K₆을 이용해 A와 B 행렬을 구하면

$$A = \begin{bmatrix} -0.5517 & 0.1695 & 0 & 0 & -0.3060 & 0 \\ 0 & 0.1789 & 1.0526 & 0 & 0 & 0 \\ -4205.6 & 0 & -20 & -8000 & -235.2 & 0 \\ 0 & 0.0045 & 0.0263 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 \\ -0.2779 & 0 & 0 & 0 & -0.3055 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = [0 \ 0 \ 8000 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (16)$$

4. 시뮬레이션

실험에서는 0.05p.u의 부하변동이 가해졌을 때 각 안정화 장치의 성능과 안정성을 비교하였다.

선형 최적 안정화 장치(linear optimal stabilizer)

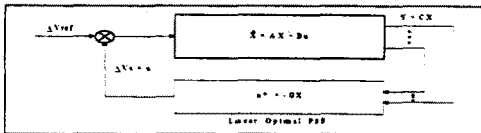


그림 4. 선형 최적 PSS의 구조

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t)] dt \quad (17)$$

Q(q₁₁=q₂₂=q₃₃=10⁻⁷, q₄₄=10⁵, q₅₅=10⁷, q₆₆=0)와 R(=10⁵)을 식(17)에 대입하여 G를 구한다[5].

G=[12.61 0.157 3.9×10⁻³ -0.935 4.66 -309.3]
Suboptimal regulator를 이용한 PI PSS

식(17)을 풀면,

$$F = [0.219 \quad 19.24]$$

로서 나타나므로, K_I는 -0.219, K_P는 -19.24 라는

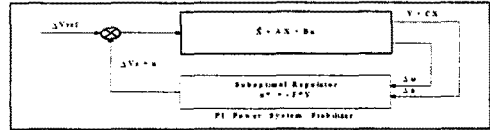


그림 5. 준최적 레귤레이터를 이용한 PI PSS
것을 알 수 있다.

제한한 방법을 이용한 PI 안정화 장치

시분할 간격은 제안1의 경우는 1초, 제안2의 경우는 0.5초로하여 각 구간의 최소 면적을 가지는 K_I, K_P를 2.절을 이용해 구하였다.

그 비교한 결과는 그림 6.과 같이 나타났다.

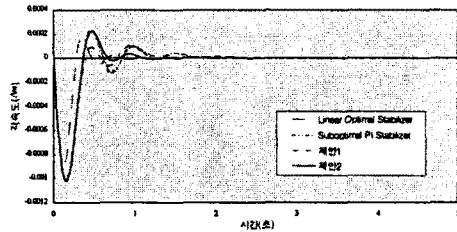


그림 6. 각속도(Δω) 응답 비교

5. 결 론

시뮬레이션을 통하여 관찰한 결과, 실제로 구현하기가 곤란한 선형 최적 안정화 장치를 변형한 준최적 안정화 장치보다 제안한 안정화 장치가 좋은 성능과 안정성을 보였고, 시간을 나누는 간격이 좁을수록, 제안1의 경우는 불안정할 수도 있지만, 제안2의 경우에는 개선되어 감을 알 수 있었다. 그러나, 시분할에 대한 확고한 수식화가 필요하고, 계산 시간의 개선이 필요하고, 각 상태변수에 대한 가중치의 고려가 필요할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [2] A. Ghosh, "Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques", IEEE Transactions on PAS, Vol. 103, No.8, pp. 1983-1988, 1984
- [3] 박영문, 김 욱, "이산 적용 슬라이딩 모드 제어를 이용한 전력계통 안정화 장치에 관한 연구", 전기학회논문지, 45~2~2, pp. 175-184, 1996
- [4] 민덕기, 조용석, 박기현, "H₂와 H_∞ 제어기법을 이용한 전력계통 안정기 설계", 전기학회논문지, 45~5~14, pp. 710-718, 1996
- [5] Yuan-Yih Hsu and Chung-Yu Hsu, "Design of Proportional-Integral Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRs-1, No.2, pp. 46-53, 1986