

Damping of Low Frequency Oscillation in Power System using Robust Control of Superconductor Flywheel Energy Storage System

J. P. Lee^{*}, H. G. Kim

Kyungnam College of Information & Technology, Busan, Korea

(Received 1 August 2012; revised 14 August 2012; accepted 16 August 2012)

초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 강인제어를 이용한 전력계통의 저주파진동 억제

이정필^{*}, 김한근

Abstract

In this paper, the robust superconductor flywheel energy storage system(SFESS) controller using H_{∞} control theory was designed to damp low frequency oscillation of power system. The main advantage of the H_{∞} controller is that uncertainties of power system can be included at the stage of controller design. Both disturbance attenuation and robust stability for the power system were treated simultaneously by using mixed sensitivity H_{∞} problem. The robust stability and the performance for uncertainties of power system were represented by frequency weighted transfer function.

To verify control performance of proposed SFESS controller using H_{∞} control, the closed loop eigenvalue and the damping ratio in dominant oscillation mode of power system were analyzed and nonlinear simulation for one-machine infinite bus system was performed under disturbance for various operating conditions. The results showed that the proposed H_{∞} SFESS controller was more robust than conventional power system stabilizer (PSS).

Keywords : Superconductor flywheel energy storage system(SFESS), Robust control, Power system, Low frequency oscillation, Power system stabilizer (PSS), H_{∞} control

I. 서론

전력시스템은 비선형적이고 시변 요소들을 포함하는 매우 복잡한 시스템으로써 저주파 진동(Low frequency oscillation)과 같은 특유의 불

안정 특성을 가지고 있다. 이와 같은 전력시스템의 불안정성을 해결하고 안정도를 향상시키기 위해 지난 수십년 동안 다양한 방법에 관한 연구가 진행되어 왔다 [1-10]. 대표적인 방법으로 크게 분류하면 초고압직류송전(High voltage direct current : HVDC), 싸이리스터제어 직렬보상기(Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC), 정지형 무효전력보상기(Static Var Compensator : SVC)등과 같은 유연송전시스템(Flexible AC

^{*}Corresponding author. Tel : +82 51 320 1492

e-mail : jeong-pil@eagle.kit.ac.kr

Transmission System : FACTS) [7-9]처럼 추가적인 장치의 개발과 설치에 관한 연구와 발전기 여자 시스템에 제동 능력을 향상시키기 위한 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)의 적용을 통한 보조여자제어(Supplementary excitation control) 방식 [1-6]으로 나눌 수가 있다. FACTS를 이용한 방식은 비교적 최근 도입이 되었고 우수한 특성을 보이고 있지만 경제적이 측면에서 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 반면 PSS는 진/지상(lead/lag) 보상기 형태로써 구조가 간단하고 전력시스템의 안정도를 향상시키며 구현이 쉽기 때문에 현대 전력시스템에 가장 보편적으로 사용되고 있다.

최근 전력 수요가 급증하여 전력 공급의 부족으로 인한 대규모의 정전이 발생하고, 각종 천재지변 등 발전소 사고로 인한 전력공급의 차질이 불가피한 상황이 빈번하게 발생함으로써 에너지저장장치(Energy Storage System : ESS)에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 ESS 기술은 전력 공급과 소비자가 정보를 교환하여 에너지 이용 효율을 높일 수 있는 스마트 그리드의 핵심 요소이며 실시간 전력 거래를 위한 핵심기술로 인식되고 있다. 대용량 ESS기술은 양수발전, 압축공기저장, NaS전지, Flow전지, 슈퍼커패시터(ELDC), 초전도 자기에너지 저장장치(Superconductor Magnetic Energy Storage : SMES) 및 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor Flywheel Energy Storage System : SFESS)등으로 분류할 수 있다. 이 중에서 SFESS는 화학전지와 SMES 등에 비하여 에너지 저장밀도가 크고, 화학전지에서 발생하는 화학물질이 거의 배출되지 않으며, 환경친화적이고 수명이 길며 에너지의 충전량을 회전속도를 통하여 쉽게 측정할 수 있다 [10]. 또한 초전도 자기부상현상을 이용하기 때문에 회전마찰에 의한 에너지 손실을 최소화 할 수 있는 장점이 있다 [11-13]. 그리고 최근의 전력 전자 기술과 제어 기술의 발전으로 SFESS는 전력시스템의 외란 발생에 대하여 몇 사이클 이내에 전력 입출력이 가능하여 속응성이 매우 높다 [10]. 따라서 전력의 불평형이 발생하면 이를 저장하거나 다시 회생하여 신속한 전력조류 제어가 가능하기 때문에 전력계통에서 발생하는 저주파 진동 억제력을 통하여 안정도를 향상

시킬 수가 있다.

본 연구에서는 전력계통의 안정도를 향상시키기 위한 SFESS의 적용을 제안 하였다. 전력시스템의 발전조건, 전송조건 및 부하조건에 따른 지속적인 동작조건 변화에도 불구하고 강인한 제어성능을 달성할 수 있도록 H_{∞} 제어 기법 [14, 15]을 이용하여 강인한 SFESS 제어를 설계 하였다. 본 연구에서 사용된 H_{∞} 제어 방식은 외란 억제성능과 강인 안정도를 동시에 고려한 혼합감도(mixed sensitivity) 문제를 다룬다.

본 논문에서는 1기 무한대 모션 모델에 대한 동특성 모델을 선정하고, SFESS를 포함한 선형화 모델을 유도하여 제어기 설계 단계에서 불확실성을 포함한 H_{∞} 제어를 설계하였다. 선형화 모델을 이용하여 전력시스템의 주요 동요 모드(dominant oscillation mode)에 대한 참여율을 분석 [16, 17]하여 제어기 설계에 적합한 상태 변수를 결정하였다. 제안된 H_{∞} 제어를 이용한 SFESS의 성능을 평가 하기 위해서 기존에 설계된 두 가지 PSS(Conventional PSS : CPSS) [4, 5]와 비교 평가하여 고찰하였다. 또한 기존의 CPSS 및 제안한 SFESS를 가진 경우 각각의 경우에 대한 주요 동요 모드에 대한 페루프의 고유치와 제동비(Damping ratio)를 비교 고찰하여 평가하였다. 그리고 각각의 경우에 대하여 페루프 시스템의 특이값 보드선도(bode diagram)를 통하여 외란 억제 성능을 비교 고찰하였다.

제안한 SFESS 제어기의 강인 성능을 고찰하기 위하여 전력시스템의 불확실성을 나타낼 수 있는 다양한 동작조건에 대해 다양한 외란이 발생한 경우에 대하여 시간영역에서 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통하여 각각의 제어 방식에 대한 전력시스템의 저주파 진동 억제효과 및 강인성에 대해 비교 고찰하였다.

II. SFESS를 포함한 전력시스템 모델

1. 발전기 및 여자기 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 1기 무한대 모션의 전력시스템 모델은 Fig. 1과 같다. 발전기 모션에 지역 부하(local load) 어드미턴스 Y를

가지며 전송선로 임피던스 Z 를 가진다. Fig. 1에 나타난 것처럼 SFESS는 발전기 모선에 설치되어 있다.

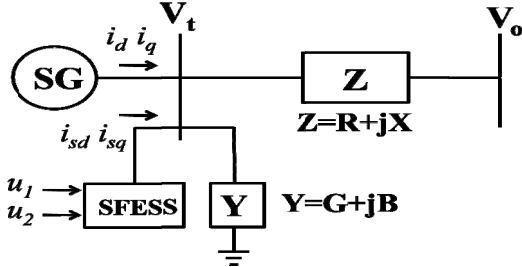


Fig. 1. one-machine infinite bus power system including SFESS.

발전기는 전기 기계적인 동요 방정식(swing equation)과 발전기 내부 전압 방정식으로 구성된 3차 모델로 표현하였다. 발전기의 동요 방정식은 식 (1)~(3)와 같다.

$$\frac{d}{dt}\omega = P_m - P_e - P_{sfess} - D(\omega - 1) / M \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\delta = \omega_b(\omega - 1) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}E_q' = (E_{fd} - (x_d - x_d')i_d - E_q') / T_{d0}' \quad (3)$$

여기서, P_m 은 기계적 입력전력, P_e 는 전기적 출력전력, P_{sfess} 는 SFESS의 유효 출력전력, ω 는 각속도, ω_b 는 기준 각속도, δ 는 회전자 각이며, M 은 관성정수, D 는 댐핑 계수, T_{d0}' 는 발전기 과도 시정수, E_q' 는 발전기 내부전압, E_{fd} 는 발전기 여자전압이다.

본 연구에서 사용된 여자 시스템은 IEEE Type-ST1 type이며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt}E_{fd} = (K_A(V_{ref} - v_t + u_E) - E_{fd}) / T_A \quad (4)$$

여기서, v_t 는 발전기단자전압, T_A 는 여자기 시정수, K_A 는 여자기 이득 u_E 는 PSS 입력이다.

2. SFESS 모델링

SFESS는 전력 시스템의 유효 전력(Active power)과 무효 전력(Reactive power)을 독립적으로 제어가 가능하다. 전력 시스템의 안정도 향상을 위해서는 전력 시스템에서 발생된 불평형 전력을 신속하게 계측 하여야 하며 신속한 제어를 통하여 유효 전력의 보상이 수행 되어야 한다. 전력 시스템 불평형 전력 동요의 주기는 수 초 이내이므로 SFESS의 전력전자 장치와 효과적인 제어 알고리즘을 통하여 제어가 가능하다. 본 연구에서는 전력 시스템의 저주파 진동의 효과적인 억제에 위해 유효 전력만을 제어 하도록 하였다. 따라서 SFESS에서 출력되는 유효전력 출력은 식 (5)와 같이 1차 미분방정식 형태로 나타낼 수 있다 [18].

$$\frac{d}{dt}P_{sfess} = K_{sfess}(-P_{sfess} + u_1) / T_{sfess} \quad (5)$$

여기서, u_1 은 SFESS의 유효 전력 제어 신호이며, T_{sfess} 와 K_{sfess} 는 각각 SFESS의 시정수 및 게인을 나타낸다. 그리고 SFESS에 의해서 주입되는 전력은 식 (6)과 같다.

$$P_{sfess} = v_d i_{sd} + v_q i_{sq} \quad (6)$$

여기서, i_{sd} , i_{sq} 는 각각 SFESS에 의해서 주입되는 d축, q축 전류이다.

3. Conventional PSS(CPSS) 구조

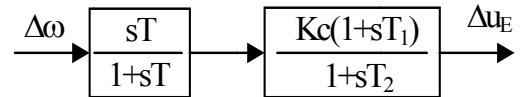


Fig. 2. PSS with one lead compensator.

전력시스템의 저주파 진동억제를 위해 사용되며 현재 가장 많이 채용되고 있는 기존의 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용하는 PSS이다. Fig. 2는 고성능 여자기의 경우에 1개의 진상 보상기가 연결된 형태의 PSS이며 전달 함수는 식 (7)과 같다.

알 수 있다. 따라서 1기 무한대 모션 계통에서 동요 억제제를 위한 제어는 주요 동요 모드를 제어해야 하는데 이를 위해서 이 주요 동요 모드에 가장 많은 참여를 보이는 $\Delta\omega$ 와 $\Delta\delta$ 를 신속하게 제어해야 함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 설계를 위한 제어기 입력 변수로 $\Delta\omega$ 를 이용하였다.

Table 1. Power system parameters.

발전기정수	$M=9.26, D=0, T_{do}'=7.76,$ $x_d=0.973, x_d'=0.19, x_q=0.55$
여자기정수	$K_A=50, T_A=0.05$
선로정수	$R=-0.034, X=0.997, G=0.249, B=0.262$
SFESS 정수	$K_{sfess}=1, T_{sfess}=0.2$
초기상태	$P_{e0}=1.0, Q_{e0}=0.0115, V_{t0}=1.05$

Table 2. Eigenvalues and participation factor of one machine infinite bus system.

mode	Damping ratio	Freq. (rad/sec)	Participation factor			
			$\Delta\omega$	$\Delta\delta$	$\Delta E_q'$	ΔE_{fd}
0.2951 $\pm j4.9596$	-0.00594	4.97	0.4706	0.4706	0.0542	0.0156
-10.3930 $\pm j3.2837$	0.954	10.9	0.0465	0.0465	1.4559	1.5393

제안된 H_∞ 제어를 이용한 SFESS의 성능을 평가 하기 위해서 기존에 설계된 두 가지 PSS(Conventional PSS : CPSS)와 비교 평가하여 고찰하였다. Table 3은 기존의 CPSS의 파라미터를 나타낸다.

Table 4는 CPSS를 가진 경우와 제안한 SFESS를 가진 경우 각각에 대하여 주요 동요 모드에 대한 페루프의 고유치 및 제동비(Damping ratio)를 계산하여 나타내고 있다. 제안한 SFESS 제어기의 경우 기존의 CPSS보다 우수한 진동 감쇠 특성을 가짐을 알 수 있다.

Table 3. CPSS parameters.

CPSS	K_C	T	T_1	T_2
Reference[4]	7.090	3.000	0.685	0.100
Reference[5]	6.620	19.290	1.450	0.250

Table 4. Eigenvalue and Damping ratio of dominant oscillation mode.

	주요동요모드 고유치	제동비%
CPSS(Ref. 4)	-1.12 $\pm j$ 4.35	25.0
CPSS(Ref. 5)	-1.94 $\pm j$ 7.04	26.5
Proposed	-3.73 $\pm j$ 4.24	66.0

Fig. 4는 각각의 제어기를 가지는 경우에 대하여 외란 억제 능력에 대한 해석을 위하여 페루프 시스템의 특이값 보드선도(bode diagram)를 나타내었다. 시스템의 주요 동요 모드는 Table 2에서 보여지는 바와 같이 약 5 rad/sec 즉, 0.8 Hz 부근에 존재하는데, 제안한 SFESS 제어기는 기존의 CPSS보다 주요 동요 모드에서의 피크치가 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 이를 통하여 제안한 SFESS 제어기는 CPSS보다 전력시스템 외부 외란으로부터 발생하는 시스템의 진동을 더욱 억제할 수 있음을 알 수 있다.

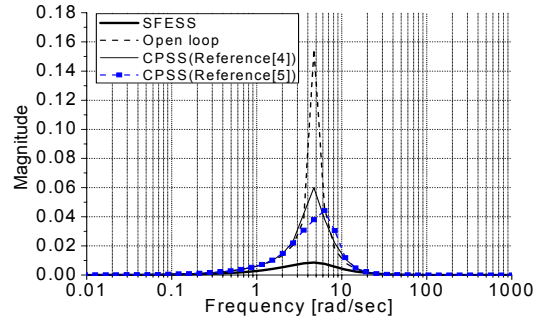


Fig. 4. Singular-value bode plots of $G_0(S)/(I+G(S)K(S))^{-1}$.

제안한 SFESS 제어기의 강인 성능을 고찰하기 위하여 전력시스템의 불확실성을 나타낼 수 있는 다양한 동작조건에 대해 다양한 외란이 발생한 경우에 대하여 시간영역에서 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통하여 각각의 제어 방식에 대한 전력시스템의 저주파 진동 억제효과 및 강인성에 대해 비교 고찰하였다.

본 논문에서는 정상 부하시(normal load)에 대하여 회전자각의 초기치를 0.1 rad 만큼 변화시킨 경우와 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속하다 계통 구성변경 없이 제거

되는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 선로 정수가 주어진 조건에서 30 % 증가한 경우와 시스템의 관성정수가 주어진 조건에서 ± 30 % 변동한 경우 회전자각의 초기치를 0.1 rad 만큼 변화 시킨 경우에 대해서도 동특성을 비교 고찰하였다. 이러한 경우는 실제로 발생하지 않지만 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 최악의 계통특성이 변했을 경우를 가정한 것이다.

1. 외란 억제 성능 평가

제안한 H_{∞} SFESS 제어기의 성능을 평가하기 위해 정상부하시 ($P_{e0}=1.0$ p.u., $Q_{e0}=0.015$ p.u.)에 두 가지 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 기존의 CPSS 제어신호는 0.2 p.u.로 제한 하였고, SFESS의 전력은 0.5 p.u.로 제한 하였다.

Fig. 5는 정상 부하시 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 증가시킨 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하여 기존의 CPSS를 설치한 경우 및 제안한 SFESS를 적용한 경우에 대하여 동특성 응답을 나타내고 있다.

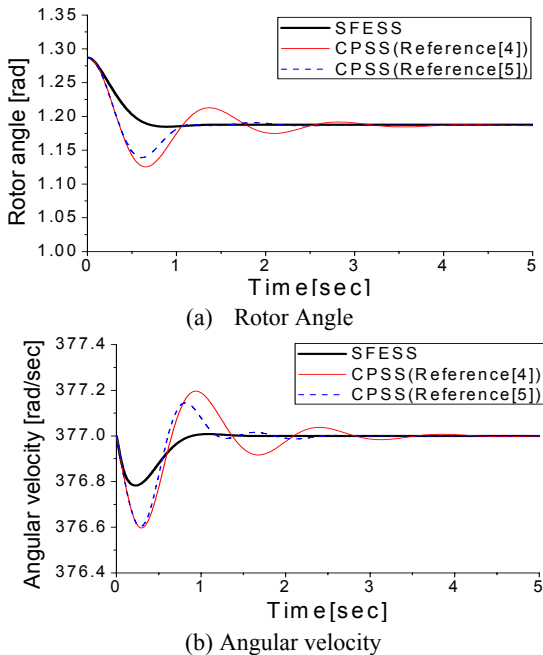


Fig. 5. Responses to increasing rotor angle in normal load.

Fig. 6은 정상부하시 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50 ms동안 지속하다 계통 구성변경 없이 제거되는 경우에 대하여 동특성 응답과 SFESS의 출력 전력을 나타내었다.

제안한 SFESS를 적용한 경우가 기존의 CPSS [4, 5]를 이용한 경우 보다 발전기의 위상각 및 각속도의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈터 면에서도 기존의 CPSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 CPSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

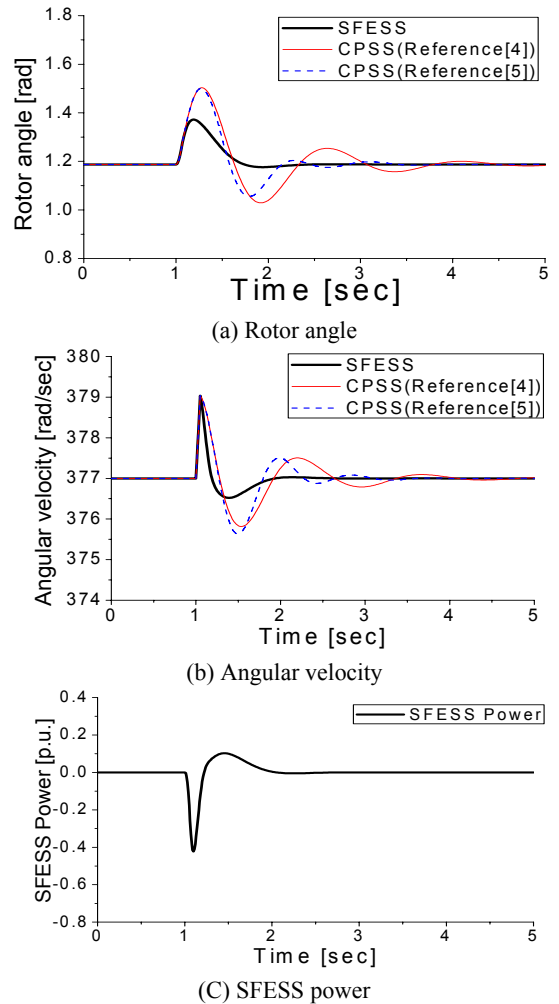
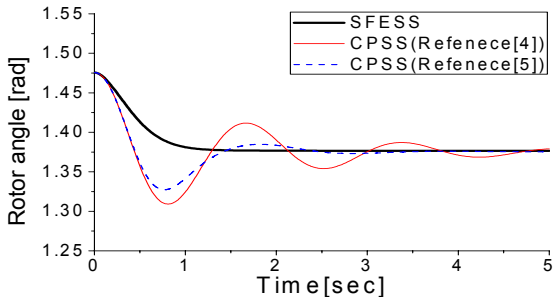


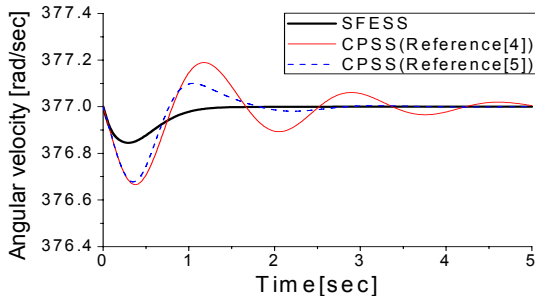
Fig. 6. Responses to 3-phase fault in normal load.

2. 강인 성능 평가

Fig. 7과 Fig. 8은 계통의 모델링 오차가 발생한 경우 제안한 SFESS 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 계통의 선로정수가 30 % 증가한 경우와 동기 발전기의 관성정수가 $\pm 30\%$ 변동한 경우에 발전기 회전자 각이 0.1 rad로 변화되었을 경우에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다. Fig. 7에서 선로 정수가 변동한 경우에는 기존의 CPSS는 정정시간이 매우 길어 졌으나 제안한 PSS의 경우는 상대적으로 큰 차이 없이 우수한 응답을 얻을 수 있었다. 그리고 Fig. 8에서 관성정수가 변동한 경우에 있어서도 제안한 SFESS 제어기는 관성정수의 변동에 대해서도 동특성 응답의 변화가 거의 없는 반면 기존의 CPSS의 경우 관성정수의 변동에 의해 계통의 진동이 매우 크게 변함을 알 수 있다. 따라서 제안한 SFESS 제어기는 기존의 CPSS 방법 [4, 5]보다 파라미터 변동에 대해 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보임을 알 수 있다.

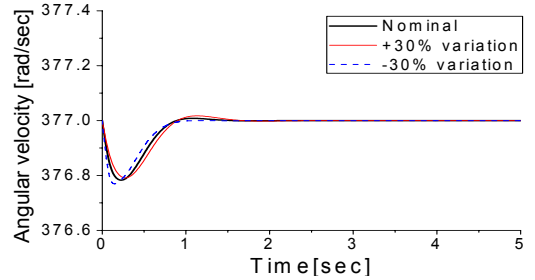


(a) Rotor angle

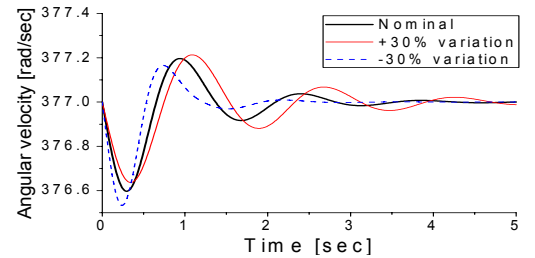


(b) Angular velocity

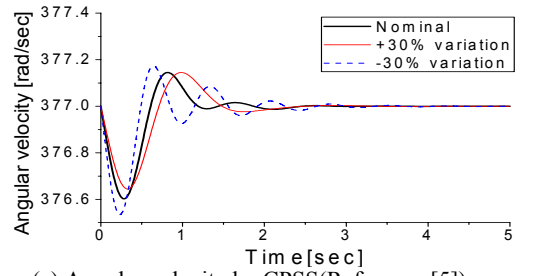
Fig. 7. Comparison of dynamic responses at 30 % variation of line parameter.



(a) Angular velocity by proposed SFESS



(b) Angular velocity by CPSS(Reference [4])



(c) Angular velocity by CPSS(Reference [5])

Fig. 8. Comparison of dynamic responses at $\pm 30\%$ variation of inertia constant.

V. 결론

본 논문에서는 전력시스템에서 발생하는 불안정현상인 저주파진동을 억제하기 위하여 기존의 PSS 대신 초전도 플라이휠 에너지 저장 장치의 적용을 통하여 제어성능을 평가 하였다. 이를 위해 불확실성이 많이 존재하는 전력 시스템의 동작조건의 변화에도 불구하고 강인 안정성을 달성할 수 있도록 H_{∞} 제어 기법을 이용하여 강인한 SFESS 제어기를 설계 하였다. 제안한 H_{∞} SFESS 강인 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 다양한 동작조건하에서 비선형 시뮬레이션을 통하여 외란 억제 성능과 강인성에

대하여 고찰 하였다. 제안한 방식이 기존의 PSS보다 외란 억제 능력을 현저히 향상시킬 수 있음을 확인하였고, 전력계통의 시스템 파라미터에 변동에 대해서도 제어 강인성을 확보함을 확인하였다. 기존의 CPSS는 발전기의 여자제어를 통하여 발전기 출력을 제어하는 간접적인 방법이지만 SFESS의 경우는 유효전력 출력을 직접적으로 제어가능하기 때문에 제시한 SFESS 제어기는 전력시스템의 저주파 진동을 억제하는데 매우 효율적인 방안이 될 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20124010100020)

References

- [1] F. P. Demello and C. Concordia, "Concept of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 316-329, 1969.
- [2] P. Kundur, D. C. Lee and H. M. Zein El-Din, "Power system stabilizers for thermal unit : Analytical techniques and on-site validation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-1, pp. 81-95, 1981.
- [3] H. Othman, J. J. Sanchez-Gasca, M. A. Kale and J. H. Chow, "On the design of robust power system stabilizers", Proceedings of the 28th conference on decision and control, Tampa, Florida, pp. 1853-1857, 1989.
- [4] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS 1983.
- [5] M. R. Khaldi, A. K. Sarkar, K. Y. Lee, Y. M. Park, "The modal performance measure for parameter optimization of power system stabilizers", IEEE Trans. on EC, Vol. 8, No. 4, 1993.
- [6] P. Kundur, " power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [7] E. N. Dyalynas and N. C. Loskolos, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission system", IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, No. 2, pp. 872-878, 1994.
- [8] A.E. Hammad, "Analysis of power system stability enhancement by static var compensators", IEEE Trans. on power system, Vol. 1, No. 4, pp. 222-227, 1986.
- [9] 손광명, "전력 계통 동요 억제를 위한 TCSC의 제어," 서울대학교 박사학위 논문, 1996.
- [10] M. H. Wang and H. C. Chen "Transient stability control of multimachine power systems using flywheel energy injection", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 152, No. 5, 589-596, 2005.
- [11] J. P. Lee, N. H. Jeong, Y. H. Han, S. C. Han, S. Y. Jung, B. J. Park and T. H. Sung, "Assessment of the energy loss for SFES with rotational core type PMSM/G", IEEE Trans. on Applied superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 2087-2090, 2009.
- [12] A. C. Day, J. R. Hull et al, "Temperature and frequency effects in a high performance superconducting bearing", IEEE Trans. on applied superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2179-2184, 2003.
- [13] T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, I. Hirabayashi et al, "Application of superconducting magnetic bearings to 10 kWh-class flywheel energy storage system", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15. No. 2, pp. 2245-2248, 2005.
- [14] K. Glover, J. C. Doyle, " state-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ -norm bound and relations to risk sesitivity", Systems & Control Letters vol. 11, pp 167-172, 1988.
- [15] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, " state-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems", IEEE Trans., on AC, Vol. 34. No. 8, pp. 831-847, 1989.
- [16] P. Kundur, "Power system stability and control," McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [17] P. W. Sauer and M. A. Pai, "Power system dynamics and stability," Prentice Hall, 1998.
- [18] L. Cui, D. Li, J. Wen, and S. Cheng, "Application of superconducting magnetic energy storage unit to damp power system low frequency oscillations", Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT, pp. 2251 - 2257, 2008.