

플라이휠 에너지 저장장치를 이용한 강인한 댐핑 제어기 설계

이정필*, 한상철*, 한영희*, 허동렬**
*한전 전력연구원, **(주)에너지코리아

Design of robust damping controller using flywheel energy storage system

Jeong-Phil Lee*, Snag-Chul Han*, Young-Hee Han*, Dong-Ryol Hur**
Korea Electric Power Research Institute*, Energy Korea Inc.

Abstract - 본 논문에서는 전력 시스템의 저주파 진동을 효율적으로 억제하기 위하여 기존의 PSS를 이용하는 방법 대신 FESS를 적용하는 방법을 제시하였다. FESS PID 제어기의 최적 파라미터를 선정하기 위하여 GA를 이용한 방법을 제시하였다. 최적화 파라미터 선정시 사용되는 평가함수를 2가지로 선정하여 선정된 파라미터를 이용하여 FESS PID 제어성능을 평가하였다. 다양한 동작 조건하에 몇 가지 외란이 발생한 경우 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 PSS를 이용한 방법과 동특성을 비교 고찰하였다.

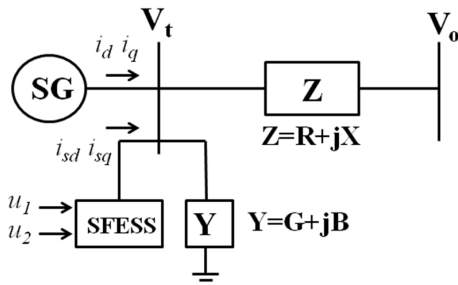
1. 서 론

플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage System : FESS)는 전기에너지를 회전운동에너지로 저장하였다가 필요시 저장된 회전 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 재 사용가능한 에너지 저장 장치이다. 플라이휠 에너지 저장장치는 데이터 센터, 병원의 비상시 사용할 수 있는 UPS, 태양광, 풍력등과 같은 분산형 전원의 전력 저장, 엘리베이터, 크레인 전철 등에서 발생되어 버려지는 회생전력을 저장하여 재사용 하기 위해 많은 연구개발이 진행되어 왔다[1][2]. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 전력의 불평형이 발생하면 이를 저장하거나 다시 회생하여 전력조류를 신속히 제어 가능하기 때문에 전력계통의 안정도를 향상시킬 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 전력계통의 안정도를 향상시키기 위한 플라이휠 에너지 저장장치의 적용을 제안하였으며 플라이휠 에너지 저장장치를 효율적으로 제어하기위한 PID 제어기를 설계하였다. 이때 PID 제어기의 파라미터는 지능형 탐색 기법 (Intelligent Search Technique)방법 중의 하나인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)를 이용하였다. PID 제어기의 파라미터의 선택은 GA의 평가함수를 어떻게 선정하느냐에 따라 제어성능은 크게 달라지게 된다. 본 연구에서는 GA의 평가함수 선정에 따른 제어효과 및 성능을 평가 하였다. 제안한 설계 방법을 통하여 초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 전력계통의 안정도 향상에 크게 기여함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 발전기 및 여자기 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 1기 무한대 모선의 전력시스템 모델은 그림 1과 같다. 발전기 모선에 지역 부하(local load) 어드미턴스 Y를 가지며 전송선로 임피던스 Z를 가진다. 그림 1에 나타난 것처럼 FESS는 발전기 모선에 설치 되어 있다.



<Fig. 1> one machine infinity power system including FESS

발전기는 전기 기계적인 동요 방정식(swing equation)과 발전기 내부 전압 방정식으로 구성된 3차 모델로 표현하였다. 발전기의 동요 방정식, 발전기 내부전압 및 IEEE type-ST1 여자 시스템 방정식은 식(1)~(4)와 같다.

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

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

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

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

여기서, ω 는 각속도, ω_b 는 기준 각속도, δ 는 회전자 각이며, M 은 관성정수, D 는 댐핑 계수이다. 발전기의 기계적 입력 전력 P_m 은 일정하다고 가정하며, 전기적 출력 전력 P_e 는 식(3)과 같이 표현된다. E_{fd} 는 발전기 여자전압, T_{d0}' 발전기 과도 시정수 이다. $v_i = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2}$ 이며, $v_d = x_q i_q$, $v_q = E_q - x_d' i_d$ 이다.

2.2 FESS 모델링

FESS는 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 계속하여야 하며 신속한 제어를 통하여 유효 전력의 보상이 수행 되어야 한다. 따라서 SFES에서 출력되는 유효전력과 무효전력 출력은 식 (5)~(6)과 같이 1차 미분 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{d}{dt} Q_{sfess} = K_{sfess} (-Q_{sfess} + u_1) / T_{sfess} \quad (6)$$

여기서, P_{sfess} 는 SFES의 유효 출력 전력, Q_{sfess} 는 FESS의 무효 출력 전력이며, u_1 , u_2 는 각각 FESS의 유효/무효 전력 제어 신호이다. T_{sfess} 와 K_{sfess} 는 각각 FESS의 시정수 및 게인을 나타낸다.

본 연구에서는 전력 시스템의 저주파 진동 의 효과적인 억제를 위해 유효 전력만을 제어 하도록 하였다. 따라서 FESS에 의해서 주입되는 전력은 식(7)~(8)과 같다.

$$P_{sfess} = v_d i_{sd} + v_q i_{sq} \quad (7)$$

$$Q_{sfess} = v_q i_{sd} - v_d i_{sq} \quad (8)$$

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

위의 식 (7)~(8)를 이용하여 FESS에 의해서 주입되는 전류는 다음 식 (9)~(10)과 같다.

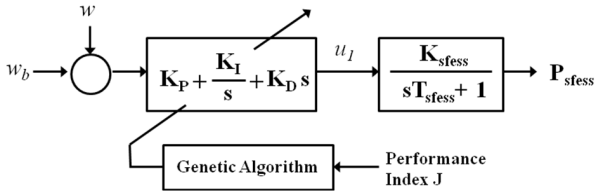
$$i_{sd} = (v_d P_{sfess} + v_q Q_{sfess}) / (v_d^2 + v_q^2) \quad (9)$$

$$i_{sq} = (v_q P_{sfess} - v_d Q_{sfess}) / (v_d^2 + v_q^2) \quad (10)$$

2.3. 제안한 FESS PID 제어기 설계 방법

본 장에서는 전력 시스템의 저주파 진동 억제를 통한 안정도 향상을 위하여 FESS를 기반으로 한 안정화 장치의 설계 방법을 제시 하고자 한다. 저주파 진동의 억제를 위하여 더욱 효율적인 방법인 FESS의 유효 전력만을 제어하도록 하였다. 본 연구에서 사용되는 PID 제어기는 전력 시스템에서 발생하는 주파수 편차량을 입력으로 하여 FESS의 유효전력을 직접적으로 제어할 수 있도록 그림 2과 같이 구성하였다. 전력 시스템이 원하는 응답 성능을 가질 수 있도록 PID 파라미터를 결정하기 위해 GA를 이용하여 제어효과를 극대화 할 수 있는 방법을 제시 하였다.

결정되는 PID 파라미터 K_p , K_i , K_d 는 설정하는 평가함수(Performance Index)에 따라 특정한 값에 수렴하지 않고 다양한 값을 가질 수 있다.



[Fig. 2] Block diagram for selecting PID parameters

2.4 평가함수의 선정

GA를 이용하여 FESS PID 제어기의 파라미터를 선정함에 있어 평가함수의 선정에 따라 제어성능 및 강인성능에 많은 영향을 미치기 때문에 평가함수의 선정은 매우 중요하다. 본 연구에서 사용한 평가함수는 식 (11)~(12)와 같다. 여기서 α , β 는 주파수 편차의 합의 영향과 제동비의 영향을 반영할 수 있는 가중치이며, ζ_{ave} 는 페루프 시스템의 평균 제동비이다.

$$J_A = \int_{t=0}^{t=T_e} |t\Delta\omega| dt \quad (11)$$

$$J_B = \alpha \int_{t=0}^{t=T_e} |t\Delta\omega| dt + \beta \frac{1}{\zeta_{ave}} \quad (12)$$

이러한 평가함수를 이용하여 진화 연산을 수행하기 위한 GA 연산자는 토너먼트 선택 (Tournament selection), 산술 교차(Arithmetic crossover) 및 비균일 돌연변이(non-uniform mutation)을 이용하였다.

2.5 결과 및 고찰

설계된 FESS PID제어기의 성능을 검증하기 위해 1기 무한대 모션제동의 시스템 운용조건을 정상 부하시, 중 부하시에 대하여 기계적 입력 전력이 10% 증가한 경우와 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존의 PSS 방식과 그 동특성을 비교 고찰 하였다. 시뮬레이션을 위해 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기, 선로정수, FESS 정수 및 전력시스템의 초기 상태는 표 1과 같다.

<표 1> 전력시스템의 파라미터

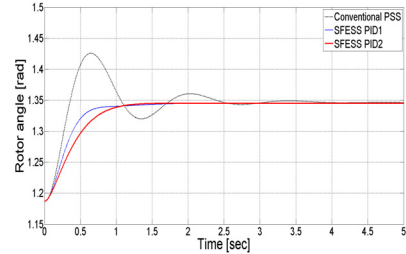
발전기정수	M=9.26, D=0, $T_{do}' = 7.76$, $x_d = 0.973$, $x_d' = 0.19$, $x_q = 0.55$
여자기정수	$K_A = 50$, $T_A = 0.05$
선로정수	R=-0.034, X=0.997, G=0.249, B=0.262
FESS 정수	$K_{sfess} = 1$, $T_{sfess} = 0.2$
초기상태	$P_{e0} = 1.0$, $Q_{e0} = 0.0115$, $V_{t0} = 1.05$

표 1에서 나타난 정상 부하 상태에서 GA를 이용하여 FESS PID의 최적 파라미터 값을 탐색 하였다. 평가함수를 식 (11)와 같이 설정한 경우 PID의 최적 파라미터는 각각 $K_p=118.57$, $K_i=0.0816$, $K_d=12.34$ 로 구해졌으며, 평가함수를 식 (12)와 같이 설정한 경우 PID의 최적 파라미터 값은 $K_p=142.19$, $K_i=0.0374$, $K_d=1.034$ 로 구해 졌다.

제안한 FESS PID 제어기의 성능을 평가하기 위해 정상 부하시 $P_{e0} = 1.0$ [p.u.] $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.]인 경우 기계적 토크 입력을 10% 증가시킨 경우 및 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 발생한 경우에 대

한 비선형 시뮬레이션을 수행하여 기존의 PSS를 설치한 경우 및 제안한 FESS PID를 적용한 경우에 대하여 동특성 응답을 비교 고찰하였다. 이때 기존의 PSS 제어 신호는 0.2 [p. u.]로 제한하였고, FESS의 전력은 0.5 [p. u.]로 제한 하였다.

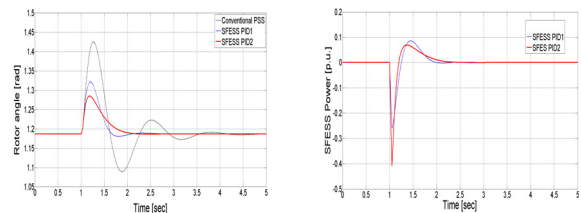
그림 3은 정상 부하시 발전기의 기계적 입력 전력을 10%만큼 증가 시켰을 경우 기존의 PSS를 설치한 경우 및 제안한 FESS PID 제어기를 이용한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 각속도에 대한 동특성 응답을 나타내었다.



(a) Rotor angle

<Fig. 3> Responses to 10 % increment of Tm in normal load

그림 4는 정상 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 기존의 PSS를 설치한 경우 및 제안한 FESS PID제어기를 이용한 경우 발전기의 위상각 및 FESS의 전력 출력에 대한 동특성 응답을 나타내었다. 제안한 FESS PID 제어기의 경우가 기존의 PSS 제어기보다 제어성능이 우수함을 알 수 있다. 그림 4(b)는 FESS의 전력을 나타내었는데, 무한대 모션에 단락이 발생한 경우 전력전송이 제한되어 기계적 입력 전력과 전기적 전력 출력의 불일치 되어 남게 되는 전력을 신속하게 저장하여 전력 불평형을 신속히 제어하고 있음을 알 수 있다.



(a) Rotor angle

(b) FESS power

<Fig. 4> Responses to three-phase fault in normal load

3. 결 론

본 논문에서는 전력 시스템의 저주파 진동을 효율적으로 억제하기 위하여 기존의 PSS 를 이용하는 방법 대신 FESS를 적용하는 방법을 제시 하였다. FESS PID 제어기의 최적 파라미터를 선정하기 위하여 GA를 이용한 방법을 제시하였다. 최적화 파라미터 선정시 사용되는 평가함수를 2가지로 선정하여 선정된 파라미터를 이용하여 FESS PID 제어성능을 평가하였다. 다양한 동작 조건하에 몇 가지 외란이 발생한 경우 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 PSS를 이용한 방법과 동특성을 비교 고찰하였다. 평가함수 J_A 를 이용한 경우보다 J_B 를 이용한 경우가 제동비의 향상을 통하여 제어 성능이 우수한 것으로 나타났다. 제안한 FESS PID제어기는 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 전력시스템의 안정도를 향상시키는데 크게 기여함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] 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
 [2] 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.