

Design of QFT controller of superconductor flywheel energy storage system for load frequency control

J. P. Lee^{*a} and H. G. Kim^a

^a Kyungnam College of Information & Technology, Busan, Korea

(Received 28 February 2013; revised 12 March 2013; accepted 18 March 2013)

Abstract

In this paper, the Superconductor flywheel energy storage system (SFESS) was used for the load frequency control (LFC) of an interconnected 2 area power system. The robust SFESS controller using quantitative feedback theory (QFT) was designed to improve control performance in spite of parameter uncertainty and unexpected disturbances. An overlapping decomposition method was applied to simplify SFESS controller design for the interconnected 2 area power system. The model for simulation of the interconnected 2 area power system included the reheat steam turbine, governor, boiler dynamics and nonlinearity such as governor deadband and generation rate constraint (GRC). To verify robust performance of proposed SFESS controller, dynamic simulation was performed under various disturbances and parameters variation of power system. The results showed that the proposed SFESS controller was more robust than the conventional method

Keywords : Superconductor flywheel energy storage system (SFESS), Load frequency control (LFC), Quantitative feedback theory (QFT)

1. 서 론

최근 전력시스템은 태양광, 풍력 등 신재생에너지원과 같은 다양한 분산전원이 연계되어 있고 또한 부하의 종류도 다양해지고 대용량화 됨으로써 연계된 계통간에 장주기 진동특성을 갖는 전력동요가 발생함에 따라 전력시스템에 대한 제어의 역할이 매우 커지고 있는 실정이다. 특히 전력시스템의 부하의 갑작스런 변동으로 인하여 발전기의 기계적인 입력이 부하와 평형을 이루지 못할 경우에는 전력계통의 주파수가 변화하게 되는데, 이를 신속하게 제어하지 못하면 주파수에 관계되는 정밀기의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 발전소 및 기타 전력설비에 악영향을 미치며 수명 또한 단축시키는 원인이 된다. 또한 각 지역을 연결하는 연계선 전력조류는 주파수의 변동에 대해 매우 민감하기 때문에 이를 신속히 제어하지 못하면 상시 변동 조류가 대단히 크거나 조류의 동요가 심하게 되어 전력시스템의 안정도가 저하된다. 특히 전력시스템에서 부하는 항상 일정하지 않고 지속적으로 변화하고 있기 때문에 이와 같은 부하 변화에 대해 지속적으로 전력수급 조절하여 전력시스템의 주파수 및 연계선 조류편차를 허용치 이내로 유지하기 위한 부하주파수제어(Load frequency control : LFC)가 반드시 필요하며 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[1~9].

이를 위하여 기존에는 조속기(Governor) 시스템의 제어를 통하여 발전기 출력을 조절할 수 있는 제어기 설계방법이 제안 되었다. 최적제어[1], PID (Proportional integral derivative)제어와 같은 피드백 제어[2]와 적응제어[3], 신경회로망(Neural network) 및 퍼지(Fuzzy)와 같은 지능제어[4] [5], 최근 들어서는 강인제어 이론[6] [7]을 도입하여 많은 제어기 구성에 대한 연구가 진행되어왔으며 성능이 지속적으로 향상되어 왔다. 그러나 근본적으로

조속기 시스템의 제어는 실제 물리적인 제약에 의해 발전기의 유효전력 출력속도가 제한이 있기 때문에 급격한 부하변동에 대해서는 제어에 한계가 있을 수 밖에 없다.

이와 같이 발전기의 낮은 출력특성을 근본적으로 해결할 수 있는 방법은 에너지 저장장치(Energy storage system : ESS)를 이용하는 것이다. 최근 전력전자기술의 발전과 에너지 저장장치들의 급격한 발전을 통해 대용량의 전력을 신속하게 저장할 수 있고 신속하게 출력할 수 있게 되어 발전기계의 조속기 시스템에 무리를 주지 않고 전력수급의 평형을 맞출 수가 있다. 특히 고온 초전도체(High temperature superconductor: HTS)를 이용한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(Superconductor flywheel energy storage system: SFESS)는 고온 초전도체의 독특한 현상인 자기 공중 부양력 및 자기 고정력을 이용한 초전도 베어링을 사용하기 때문에 다른 방식의 베어링과는 달리 기계적인 마찰로 인한 손실이 거의 없기 때문에 저장효율이 매우 높으며 에너지 저장밀도가 높다[10]. 이와 같은 SFESS는 현재 국내에서는 순간출력 350 kW출력이 가능한 35 kWh급까지 개발되었고[11], 이를 에너지 저장단지로 구성하면 MW급의 출력을 낼 수 있어 전력시스템의 신속한 부하주파수 제어를 위해 사용 가능하다.

따라서 본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력시스템의 부하주파수 제어를 위해 SFESS를 적용하였으며, 이 SFESS를 제어하기 위해 강인 제어이론인 QFT (Quantitative feedback theory) 제어 이론[12] [13]을 이용하여 제어기를 설계하였다. 2지역으로 연계된 전력시스템의 상태 방정식은 2 입력 제어기가 되기 때문에 설계의 간단화를 위하여 중복분해(Overlapping decomposition) 기법을 이용하여 1입력 제어기를 설계하였고, 제어기의 입력은 주파수 편차만을 이용하여 설계하였다. 설계된 SFESS 제어기를 적용하여 다양한

* Corresponding author: jeong-pil@eagle.kit.ack.kr

외란이 발생한 경우와, 전력시스템의 파라미터 변동과 같은 시스템의 불확실성이 존재하는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행 하였으며, 기존의 제어기와 성능을 비교 평가 하였으며, SFESS의 적용을 통해 전력시스템의 부하주파수 제어에 매우 강인함을 확인 하였다.

2. 지역 모델 계통 방정식

2.1. 초전도 플라이휠 시스템

SFESS는 전기에너지가 회전 운동에너지로 저장되는 회전체인 플라이휠과 이 플라이휠을 부양시키기 위해 초전도 벌크와 영구자석으로 구성된 초전도 자기 베어링(Superconducting magnetic bearing : SMB), 에너지의 입출력을 담당하는 전동발전기(Motor / Generator) 및 에너지변환을 위한 전력변환장치(Power conditioning system : PCS)로 구성된다. Fig. 1은 PCS를 포함한 SFESS를 나타낸다. SFESS는 화학전지에 비하여 에너지 저장밀도가 크며 환경친화적이며, 초전도 자기부상현상을 이용하기 때문에 회전마찰에 의한 에너지 손실을 최소화 할 수 있으며, 플라이휠의 회전속도 측정을 통하여 에너지의 충전량을 쉽게 측정 가능하다.

전력 전자 기술과 제어 기술의 발전으로 SFESS는 전력 시스템의 외란 발생에 대하여 몇 사이클 이내에 전력 입출력이 가능하여 속응성이 매우 높다. 따라서 전력시스템의 부하변동에 의한 전력 수준의 불평형이 발생하여 전력시스템의 주파수가 변동하면 불평형 전력을 저장하거나 다시 회생하여 신속한 전력조류 제어가 가능하기 때문에 신속한 주파수 제어가 가능하다. SFESS는 유효전력(Active power) 및 무효전력(Reactive power)를 독립적으로 제어 가능하지만 본 연구에서는 효과적인 주파수제어를 위하여 유효전력만을 제어하도록 하였으며, SFESS에서 출력되는 전력은 식 (1)과 같이 1차 미분방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{P}_{SFESS} = (-\Delta P_{SFESS} + \Delta u_{SFESS}) / T_{SFESS} \quad (1)$$

2.2. SFESS를 포함한 2지역 연계시스템

본 논문에서 고찰하고자 하는 2지역으로 연계된 시스템의 지역 1과 지역 2의 발전 시스템의 출력용량은 동일 하며 각각 SFESS가 설치되어 있다. 기존의 방법과 같이 조속기 시스템의 제어기를 설계할 경우에는 조속기 터빈의 모델링이 전부 필요로 하지만 본 연구에서와 같이 SFESS의 전력 입출력 특성은 조속기 시스템보다 전력 입출력 특성이 매우 빠르므로 제어기 설계 단계에서는 제어기 설계의 간단화를 위해 조속기 시스템을 무시하였다. 이를 블록선도로 나타내면 Fig. 2와 같다.

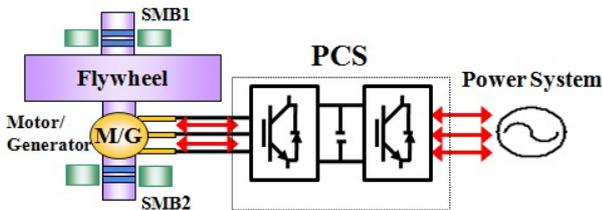


Fig. 1. Superconductor flywheel energy storage system with PCS.

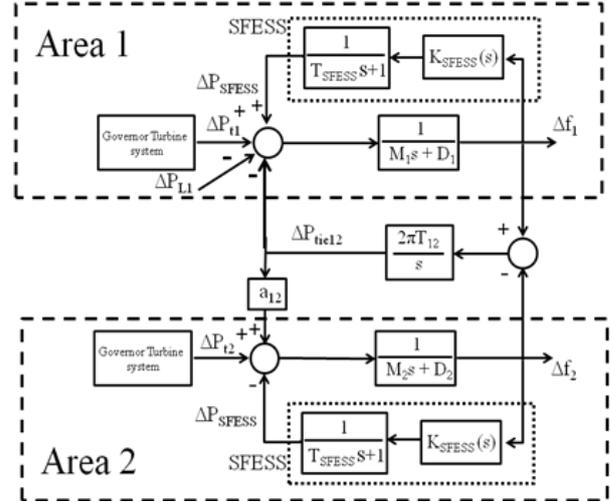


Fig. 2. Block diagram for interconnected 2-area power system with SFESS and controller.

Fig. 2 에서 나타난 바와 같이 본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력시스템의 부하주파수를 제어하기 위하여 SFESS의 출력 ΔP_{SFESS} 를 제어하기 위한 강인한 제어기 $K_{SFESS}(s)$ 를 설계하는 문제이다. 이를 위해서 Fig. 2에서 조속기 터빈 및 SFESS를 제외한 제어대상인 전력시스템의 선형화된 상태방정식은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -D_2/M_1 & -1/M_1 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & -2\pi T_{12} \\ 0 & a_{12} & -D_2/M_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/M_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1/M_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta x = [\Delta f_1, \Delta P_{tie12}, \Delta f_2]^T, \quad \Delta u = [\Delta P_{SFESS1}, \Delta P_{SFESS2}]$$

여기서 M_i 는 i 지역의 관성계수, D_i 는 계통계수, a_{12} 는 1,2지역 사이의 지역용량 비, T_{12} 는 1, 2지역 사이의 연계선 동기화계수, Δf_i 는 i 지역의 주파수편차, ΔP_{tie12} 는 1, 2지역의 연계선 조류 편차, ΔP_{SFESSi} 는 i 지역의 SFESS 출력전력을 나타낸다.

위의 식 (2)는 입력이 두 개인 MIMO (Multi-input multi-output) 시스템으로서 각각 지역에 대한 제어기 설계가 매우 복잡하므로 중복분해(Overlapping decomposition) 기법을 [14] 이용하여 SISO (Single input single output) 형태의 각 지역별 1입력 상태방정식을 구하고 지역별 SFESS 제어기를 설계하였다. 자세한 중복분해 기법은 문헌 [9] [14]에 자세히 나타나 있으므로 생략한다. 연계선 조류편차량 ΔP_{tie12} 를 중복변수로 처리하면 각 지역에 대한 SISO 상태방정식을 구할 수 있으며 여기에 SFESS 제어입력을 포함하면 각 지역별 상태 방정식은 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{tie12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & -1/M_1 \\ 2\pi T_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{tie12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/M_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_{SFESS1} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{tie12} \\ \Delta \dot{f}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -2\pi T_{12} \\ a_{12}/M_2 & -D_2/M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{tie12} \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/M_2 \end{bmatrix} \Delta P_{SFESS2} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에 식 (1)의 SFESS 전달함수를 포함하면 식 (3)과 식 (4)는 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{tie12} \\ \Delta \dot{P}_{SFESS1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_1/M_1 & -1/M_1 & -1/M_1 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{SFESS1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{tie12} \\ \Delta P_{SFESS1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_{SFESS1} \end{bmatrix} \Delta u_{SFESS1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{tie12} \\ \Delta \dot{P}_{SFESS2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_2/M_2 & -a_{12}/M_2 & -1/M_2 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{SFESS2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie12} \\ \Delta P_{SFESS2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_{SFESS2} \end{bmatrix} \Delta u_{SFESS2} \quad (6)$$

여기서, Δu_{SFESS1} , Δu_{SFESS2} 는 각각 1지역 및 2지역 SFESS의 출력을 제어하기 위한 제어입력신호이고 T_{SFESSi} 는 i 지역의 SFESS 시정수이다. 따라서 위의 식 (5)와 (6)을 이용하여 각 지역의 제어기를 쉽게 설계가능하다. 본 연구에서는 1지역과 2지역의 시스템 파라미터가 동일하므로 1지역의 제어기 1개만을 설계한 후 2지역에 바로 적용이 가능하다.

3. SFESS용 QFT 제어기 설계

3.1. QFT 제어이론

QFT설계 과정은 설계하고자 하는 목표 사양을 QFT경계(boundary)로 나타내고, 이 QFT경계를 만족할 때까지 극점과 영점을 추가하는 과정으로 설계사양을 만족하는 제어기를 설계하는 주파수 영역에서의 설계 방법이다. 주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환[13] 하고 나면 이를 니콜스 선도 상에 나타내고 이 경계를 만족하도록 공칭 개루프(Open loop) 전달함수 $L_0(s) = G_0(s)K_{SFESS}(s)$ 를 식별해야 하는데 이 과정을 루프정형(Loop shaping)이라 한다. 이러한 루프정형방법을 통하여 Fig. 3과 같이 공칭 개루프(nominal open loop) 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT경계 바로 위에 놓여 있으면 최적의 QFT설계가 달성된다[12].

QFT 설계 절차는 다음과 같이 요약 될 수 있다.

STEP 1. 플랜트의 템플레이트 발생. 주어진 불확실성을 포함한 플랜트 $G(s) \in G$ 에 대하여, 플랜트의 특성과 사양에 따라서 일련의 주파수 $\omega_i (i=1,2,\dots,h)$ 을

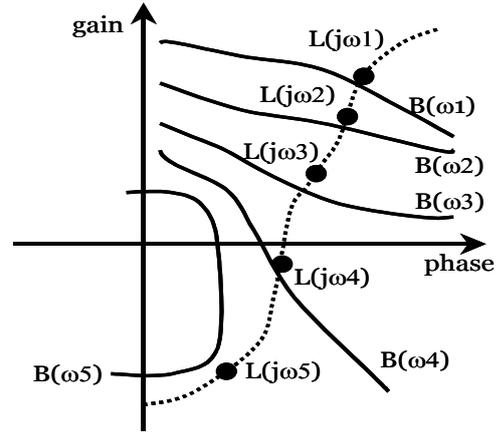


Fig. 3. QFT boundaries and $L_0(s)$

선택하고 복소 평면상에 모든 주파수 ω_i 에 대하여 플랜트 집합 $G(j\omega_i)$ 의 값을 계산한다. 이 플랜트 집합을 플랜트 템플레이트라 한다.

STEP 2. QFT 경계 계산. 플랜트 집합중에 임의의 플랜트를 선택하여 이를 공칭 플랜트로 선정한다. 그리고 각각의 주파수에 대하여 플랜트 템플레이트에 대한 강인 안정도 사양과 외란억제 성능 사양을 결합하여 공칭 플랜트에 대한 안정도 여유와 성능 경계를 계산한다. 각각의 주파수에서 계산 된 경계 중에 가장 나쁜 경계를 QFT경계로 선정한다. 이렇게 되면 모든 $G(s) \in G$ 에 대한 페루프 시스템의 사양이 개루프 공칭의 경우에 대한 사양으로 변환된다.

STEP 3. QFT 제어기에 대한 루프 정형. 모든 주파수 범위에서 QFT경계 조건이 만족되고 페루프 공칭 시스템이 안정할 때까지 루프 정형 방법을 이용하여 니콜스 선도상에 QFT 제어기를 설계한다.

STEP 4. 필터 F(s) 설계. 주파수 영역의 성능 사양을 만족시키도록 필터 F(s)를 설계한다.

3.2. SFESS용 QFT 부하주파수 제어기 설계

본 절에서는 앞 절에서 기술한 기본적인 설계절차를 이용하여 실제 SFESS용 부하주파수 제어기를 설계 방법을 나타내었다. 먼저 2지역으로 연계된 전력시스템을 Fig. 2 및 식 (2) 같이 수학적인 모델링 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 이용하여 플랜트의 템플레이트를 발생시켜야 한다. 본 연구에서는 2지역 전력시스템에서 발생할 수 있는 불확실성으로 관성계수 M, 제동계수 D 및 1지역과 2지역 사이의 연계선(tie line) 동기화계수 T_{12} 의 파라미터가 불확실성을 가진다고 가정하고 각각 $\pm 50\%$ 만큼 불확실성을 가진다고 설정하였다. 이 의미는 전력시스템 파라미터 M, D 및 T_{12} 의 값이 원래 값에서 $\pm 50\%$ 변동하여도 제어목적을 잘 달성할 수 있도록 하는 제어기를 설계할 수 있도록 불확실성을 설정하는 단계이다. 이와 같이 불확실성의 범위가 주어지면 이에 대해 관심이 되는 주파수 영역을 설정해야 한다. 이는 전력시스템에서 가장 외란의 영향을 많이 받는 주파수대역에서 제어기가 잘 동작하도록 하기 위해서이다. 따라서 본 연구에서의 2지역 연계시스템은 저주파수 영역인 1.5~3 rad/sec 영역이 주요 관심의 영역이기 때문에 주파수는 다음과 같이 설정하였다.

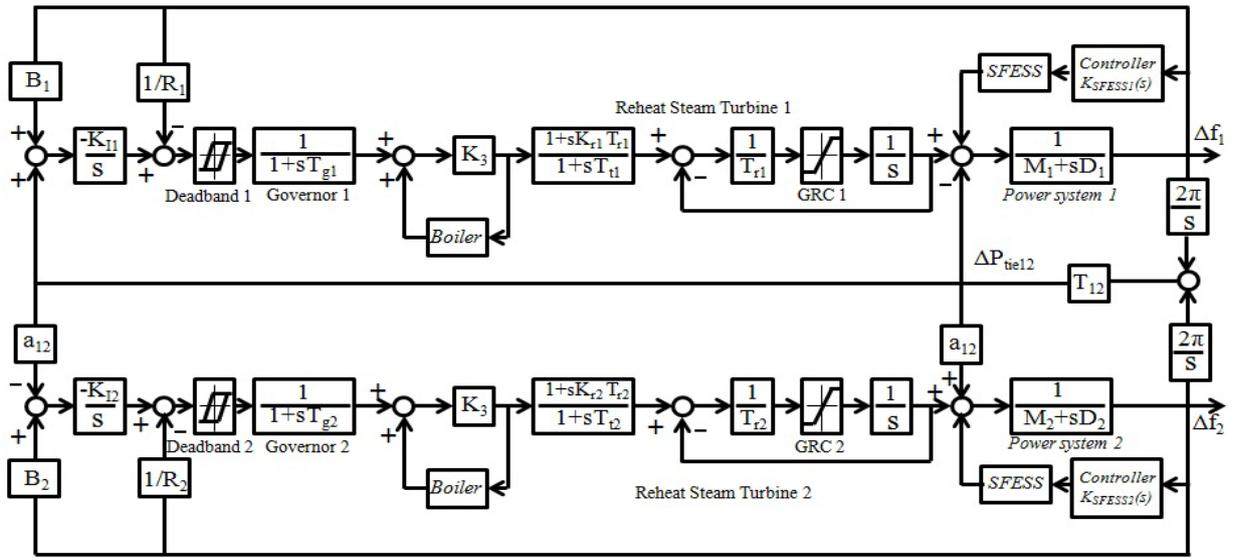


Fig. 4. Block diagram of interconnected 2 areas power system for simulation.

$$\omega_i = [0.1, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5.5, 6, 7, 8, 10, 50] \text{ rad/sec} \quad (7)$$

불확실성을 나타내는 파라미터들의 범위를 이용하여 일련의 주파수 ω_i 에 대한 플랜트 템플레이트를 구하고, 안정한 공칭플랜트를 임의로 선정한다. 일단 공칭플랜트를 선정하고 나면 QFT제어기 설계를 위하여 강인 사양과 외란 억제 성능 사양에 대한 QFT경계를 계산해야 한다. 본 연구에서 사용된 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양은 각각 식 (8), (9) 와 같이 설정하였다.

$$\frac{L_0(j\omega)}{1+L_0(j\omega)} \leq 1.3 \quad (8)$$

$$\frac{G(j\omega)}{1+L_0(j\omega)} \leq 1.8 \quad (9)$$

위와 같은 절차를 통하여 설계 되어진 SFESS용 주파수 제어기는 식 (10)과 같다.

$$K_{SFESS}(s) = \frac{82.5318s^2 + 72.8233s + 13.1934}{128.8416s^2 + 23.0851s + 1} \quad (10)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 장에서는 앞장에서 설계된 SFESS용 QFT 부하주파수 제어기를 적용하여 시뮬레이션을 통하여 강인성능과 외란억제 성능을 고찰하였다. 제어기 설계 시에는 조속기 터빈 시스템을 무시하고 설계하였으나 제어기의 강인제어 성능을 확인하기 위하여 재열 스팀터빈(Reheat steam turbine), 조속기의 사구간(Dead band), 보일러의 동특성과 같은 실제적인 상황을 모두 고려한 모델을 이용하였다. 따라서 선형화 하여 모델링 할 수 없는 비선형성을 모두 포함한 2지역으로

연계된 전력시스템은 Fig. 4와 같다[8]. 보일러의 선형화 모델은 문헌 [8] [9]에 자세히 나타나 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

특히 기계적인 제약으로 인한 분당 발전량 제한(GRC) 조건도 고려하였으며 이는 계통의 기준용량 대비 분당 10%로 제한하였다. 또한 SFESS도 용량의 한계가 있으므로 SFESS의 입출력 용량도 전체 용량의 $-0.01 \leq \Delta P_{SFESS} \leq 0.01$ [puMW] 로 제한하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 전체 시스템의 파라미터는 Table I에 나타내었다.

TABLE I.
SYSTEM PARAMETERS

$M_1 = M_2 = 0.1667, D_1 = D_2 = 0.00833, K_{r1} = K_{r2} = 0.333$
$T_{r1} = T_{r2} = 10, T_{g1} = T_{g2} = 0.2, T_{t1} = T_{t2} = 0.25$
$R_1 = R_2 = 2.4, B_1 = B_2 = 0.425, K_{l1} = K_{l2} = 0.4$
$T_{12} = 0.0707, a_{12} = 1, T_{SFESS1} = T_{SFESS2} = 0.1$

Table I에서 K_{ri} 는 i 지역 터빈의 재열이득, T_{ri} 는 i 지역 터빈의 시정수, T_{gi} 는 i 지역 조속기 시정수, T_{ti} 는 i 지역 터빈시정수, R_i 는 i 지역 조절비, B_i 는 i 지역 바이어스 계수, K_{li} 는 i 지역 적분제어 이득이다.

먼저 Fig. 5는 앞에서 정의한 관성계수 M, 제동계수 D 및 연계선 동기화계수 T_{12} 의 변동을 포함한 플랜트 집합의 주파수별 QFT경계와 설계 되어진 제어기를 포함한 $L(s)$ 를 나타내었다. Fig. 3에서 설명한 것처럼 전달함수 $L(s)$ 가 설정한 모든 주파수대역에서 QFT 경계 위에 존재함으로써 제어기 설계가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 Fig.7은 1지역에 0.01[puMW]의 부하가 갑자기 증가하여 지속적으로 유지되는 경우에 SFESS가 없는 기존의 연계선 바이어스제어 방식, 문헌 [9]의 방식 및 제안한 QFT제어 방식의 경우에 대하여 1지역과 2지역의 주파수 변동 특성을 나타내었다

QFT제어기를 가진 SFESS의 경우가 기존의 방식보다 주파수의 진동을 현저히 감소시킴을 알 수 있다.

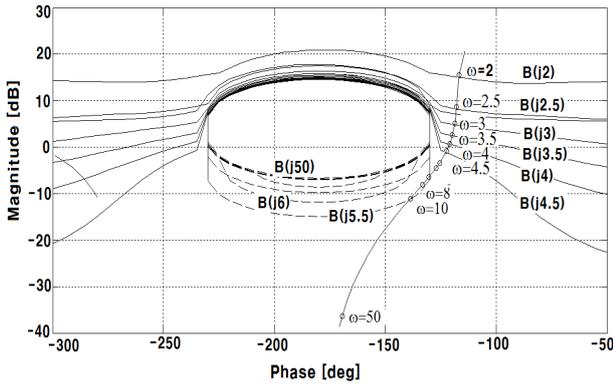


Fig. 5. QFT bounds and loop shaping result.

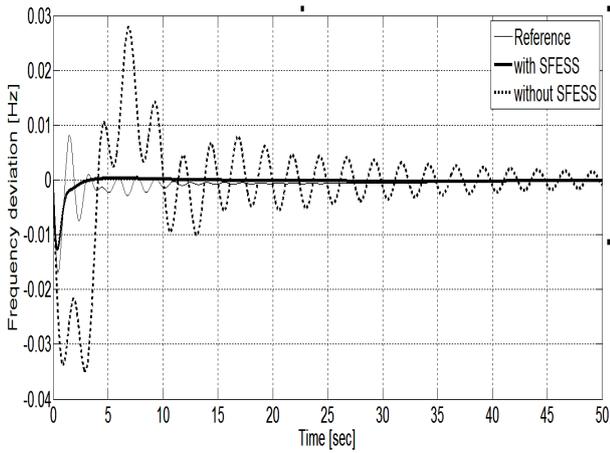


Fig. 6. Frequency deviation of area 1.

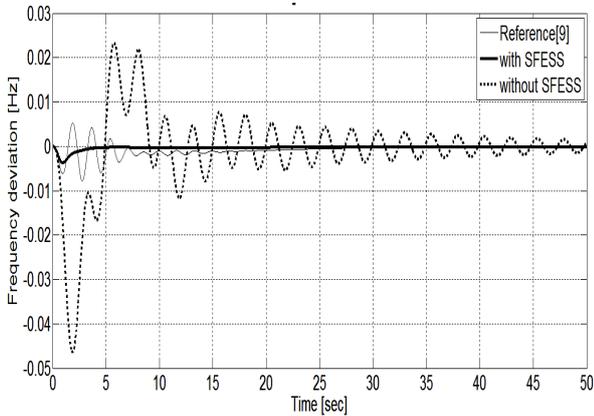


Fig. 7. Frequency deviation of area 2.

다음으로 부하가 지속적으로 변동하는 경우에 제어성능을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 부하가 지속적으로 변동하는 경우에 대한 결과를 Fig. 9와 Fig.10에 나타내었다. 부하가 지속적으로 변하는 경우에도 제한한 QFT 제어기를 이용한 SFESS의 경우에도 주파수의 진동특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

다음은 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 전력시스템의 파라미터가 가장 좋지 않은 경우로 50% 변동하였을 경우에 1지역에 0.01 [puMW]의 부하가 갑작스럽게 증가한 경우에 대한 주파수 변동 특성을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전력시스템의 파라미터가 변동한 경우에도 제어기 설계

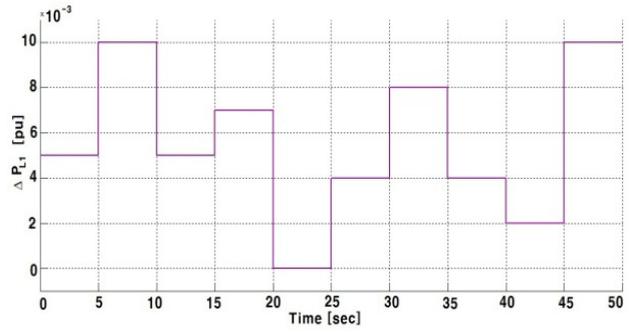


Fig. 8. Load changes of area 1.

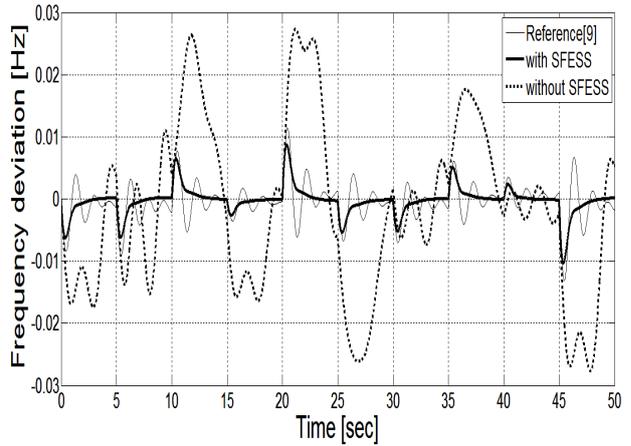


Fig. 9. Frequency deviation of area 1.

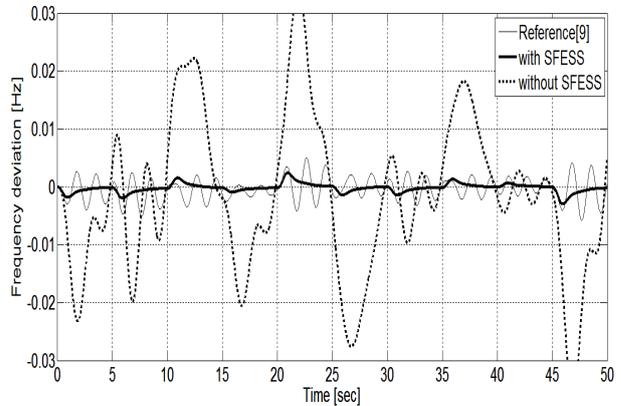


Fig. 10. Frequency deviation of area 2.

단계에서 파라미터의 변동을 고려하였기 때문에 제어기의 강인성이 매우 우수함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력시스템의 부하주파수 제어를 위하여 기존의 조속기 시스템 제어 방식과는 다르게 SFESS를 적용하여 직접적으로 전력출력 조절을 통하여 신속하게 주파수를 제어할 수 있도록 강인한 제어기를 설계하였다. 급격한 부하 변화에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과 기존의 방법보다 신속하게 주파수 제어가 가능하며, 지속적인 부하변동에 대해서도 주파수 제어 성능이 우수 하였다. 또한 전력시스템의 파라미터가 변동한 경우에도

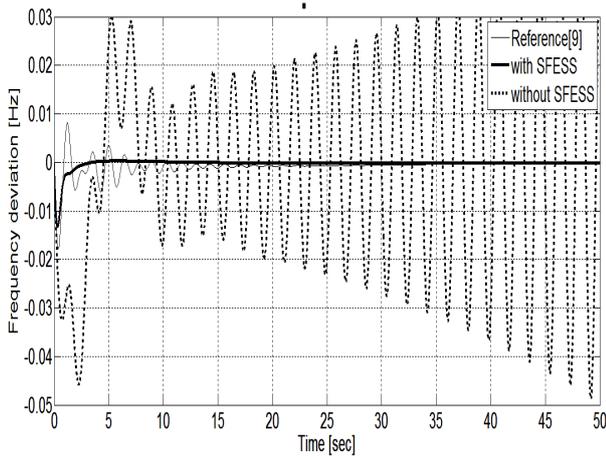


Fig. 11. Frequency deviation of area 1.

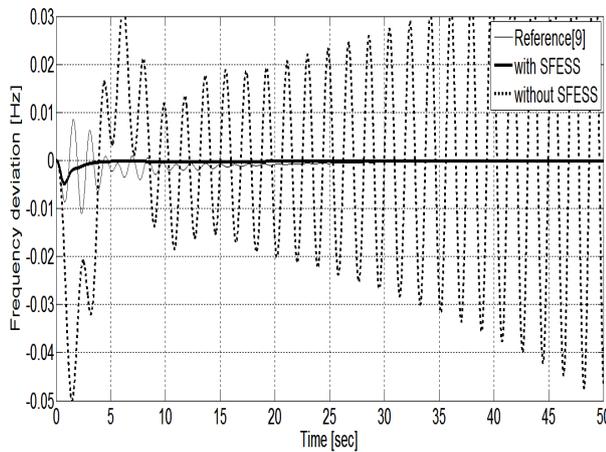


Fig. 12. Frequency deviation of area 2.

기존의 제어 방법보다 매우 강인한 성능을 나타내었다. 따라서 SFESS 적용을 통하여 전력 입출력을 직접 제어 가능하므로 발전기 조속기 터빈 계통의 급격한 출력변동을 억제 가능하여 발전소 설비의 효율적인 운용에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] C. E. Fosha and O. I. Elgerd, "The megawatt-frequency control problem : A new approach via optimal control problem control theory", *IEEE Tran. on Power App. And Syst.*, vol. PAS-80, no. 4, pp. 553-577, 1970
- [2] Y. Mizutani, "Suboptimal control for load frequency control of P-I type using area-decomposition and aggregation method", *IEE J.* vol. 100, no. 1, pp. 9-16, 1980
- [3] C. T. Pan and C. M. Liaw, "An adaptive controller for power system load-frequency control", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 4, No. 1., pp. 122-128, 1989
- [4] F. Beaufays, Y. A-M and B. Widrow, "Application of neural networks to load-frequency control in power systems", *Neural Networks*, vol. 7, no. 1, pp. 183-193, 1994
- [5] C. S. Chang and W. Fu, "Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controller", *Electric Power Systems Research*, Vol. 42, Issue 2, pp. 145-152, 1997
- [6] A. M. Stanovic, G. Tadmor and T. A. Sakharuk, "On robust control analysis and design for load frequency regulation", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 449-455, 1998
- [7] W. Tan and Z. Xu, "Robust analysis and design of load frequency controller for power system", *Electric Power systems Research*, vol. 79, Issue 5, pp. 846-853, 2009
- [8] S. C. Tripathy, R. Balasubramanian, P. S. Chandramohan Nair, "Effect of superconducting magnetic energy storage on automatic generation control considering governor deadband and boiler dynamics", *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 1266-1273, 1992
- [9] I. Ngamroo, "An optimization technique of robust load frequency stabilizer for superconducting magnetic energy storage", *Energy conversion and management*, vol. 46, pp. 3060-3090, 2005,
- [10] 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 Tran. on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, 2009
- [11] S. Y. Jung, Y. H. Han, B. J. Park and S. C. Han, "Design and construction of 35 kWh class superconductor flywheel energy storage system", *Progress in Superconductivity*, vol. 14. no. 1, pp. 60-65, 2012
- [12] I. M. Horowitz, "Survey of quantitative feedback theory(QFT)", *Int. J. Cont.*, vol. 53, no. 2. pp. 255-291, 1991
- [13] J. M. Rodrigues, Y. Chait and O. Yaniv, "An efficient algorithm for computing QFT bounds", *Trans. Of the ASME*, vol. 119, pp. 548-552, 1997
- [14] M. Ikeda, D. D. Siljak, D. E. White, "Decentralized control with overlapping information sets", *J. Optimization Theory Appl.*, vol. 32, no. 2, pp. 279-310, 1981