

직렬 보상 선로에서의 SSR 억제를 위한 강인한 STATCOM 보조 제어기의 설계

論 文
49A-3-6

Design of a Robust STATCOM Supplementary Controller to Suppress the SSR in the Series-compensated System

徐 將 哲* · 文 承 逸** · 朴 鍾 根***

(Jang-Cheol Seo · Seung-II Moon · Jong-Keun Park)

Abstract - This paper presents the design of an H_{∞} based robust Static Synchronous Compensator (STATCOM) supplementary controller to suppress the subsynchronous resonance (SSR) in the series-compensated system. The IEEE second benchmark, System-1 model is employed for this study. In order to design the effective controller, the modal controllability and observability indices to the oscillation modes are considered. Comprehensive time domain simulations using a nonlinear system model show that the proposed STATCOM supplementary controller can suppress the SSR efficiently in spite of the variations of power system operating conditions.

Key Words : Subsynchronous resonance, Series compensation, FACTS, STATCOM, Robust control

1. 서 론

송전선에 직렬로 투입된 커패시터는 터빈과 발전기의 축을 파괴하는 결과를 낳을 수 있는 SSR (Subsynchronous Resonance)을 초래할 우려가 있다 [1]. 이러한 SSR을 억제하기 위하여 그 동안 많은 대책들이 연구·제안되어 왔다 [2,3].

최근 디지털 컴퓨터, 통신, 전력 전자 기술의 급속한 발전에 따라 송전선의 임피던스를 가변할 수 있는 유연송전시스템(FACTS; Flexible AC Transmission Systems)이 고정 보상된 송전 시스템의 대안으로 제시되고 있다 [4]. STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)은 전압원 인버터에 기반을 둔 제 2세대 FACTS 기기로서, SVC(Static VAR Compensator)의 진보된 형태로 볼 수 있다. 일반적으로 STATCOM은 계통 전압의 유지를 위해 설치되는데, STATCOM의 빠른 응답 특성을 고려하면 적절한 제어기 설계를 통해 과도 안정도 향상 등에도 이용할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 직렬 보상된 송전선에서의 SSR을 억제하기 위하여 STATCOM을 이용하였다. IEEE second benchmark, System-1 모델 [5]이 본 논문에서 사용되었는데, 이 모델의 발전기 단자에 기존의 비례-적분 제어기를 가진 STATCOM이 설치되어 있다고 가정하였다. 이 모델을 이용한 고유치 해석 결과는 기존의 비례-적분 제어기만을 가진 STATCOM으로는 모든 SSR 진동 모드를 억제할 수 없음을 보여준다.

따라서 본 논문에서는 모든 SSR 진동 모드의 억제를 위해 STATCOM 보조 제어기의 새로운 설계 방법을 제안한다.

보다 효과적인 제어기를 설계하기 위해서는 제어기의 출력 신호가 인가되는 위치와 제어기 설계를 위해 필요한 측정 신호를 적절하게 선정하는 것이 중요하다. 이를 체계적으로 선정하기 위해 진동 모드에 대한 모드 가제어성(controllability) 및 가관측성(observability) 지수가 도입되었다. 또 매순간 운전 조건이 변동하는 전력 시스템의 특성상 강인한 안정도를 갖는 제어기의 설계가 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 H_{∞} 강인 제어 기법을 채용하였다.

비선형 시스템을 이용한 다양한 시간영역 시뮬레이션을 통해 제안된 STATCOM 보조 제어기가 전력 시스템의 운전 조건 변동에 따른 시스템의 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 보였다.

2. 전력 시스템 모델

본 논문에서는 SSR을 분석하고 이를 효과적으로 억제하는 제어 방식의 개발을 위해 IEEE SSR Working Group에 의해 제안된 IEEE second benchmark, System-1 모델을 사용하였다 [5].

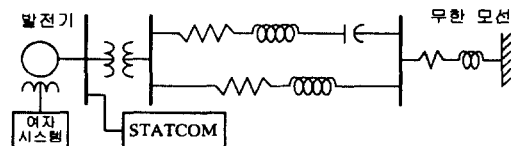


그림 1 IEEE second benchmark, System-1 모델
Fig. 1 IEEE second benchmark, System-1 model

이 전력 시스템 모델은 그림 1에서 볼 수 있듯이 한쪽 송

* 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 9日

最終完了 : 2000年 2月 2日

전선에 직렬 보상 커패시터가 장착된 두 병렬 송전선을 통해 무한모선에 연결되어 있는 증기 터빈과 발전기로 구성되어 있다. 본 논문에서는 STATCOM이 발전기 단자에 설치되어 있다고 가정하였다.

이 모델에서 축의 전기-기계적 진동을 표현하는 터빈-축 시스템은 여자기, 발전기 회전자, 저압 터빈 및 고압 터빈 등 4개의 mass와 이들을 연결하는 스프링으로 이루어진 spring-mass 시스템으로 구성되어 있다. IEEE second benchmark, System-1 모델에서 제안된 여자기, 동기 발전기, 터빈으로 이루어진 spring-mass 시스템의 개형도는 그림 2와 같다.

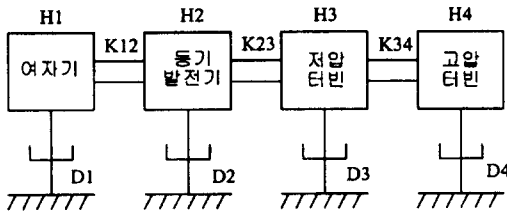


그림 2 여자기, 발전기, 터빈의 spring-mass 시스템
Fig. 2 Spring-mass system of the exciter, generator and turbine

그림 2에서 H1~H4는 각 mass의 관성 계수, D1~D4는 감쇠 상수, K12~K34는 스프링 상수를 나타낸다.

동기 발전기의 동적 특성을 나타내기 위하여 직축(direct axis)과 횡축(quadrature axis)을 각각 3개의 1차 미분 방정식으로 표현하는 발전기 표준 모델을 사용하였고, 승압 변압기와 송전선은 등가 집중 정수 회로에 의해 표현하였다 [5].

3. 여자 시스템 모델

단자 전압과 전력 동요를 억제하기 위해 본 논문에서는 그림 1에서 볼 수 있듯이 여자 시스템을 사용하였고, 그 모델로 IEEE Type-1 여자 시스템을 채용하였다. 이 여자 시스템은 DC 회전기에 기반을 두고 있는 모델로, IEEE second benchmark, System-1 모델의 터빈-축 시스템에 잘 부합할 뿐만 아니라, 그 동안 여러 연구를 통해 그 성능이 검증되어 왔다 [6]. 그림 3에 IEEE Type-1 여자 시스템을 나타내었다.

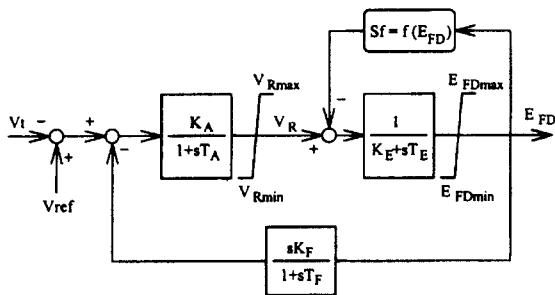


그림 3 IEEE Type-1 여자 시스템
Fig. 3 IEEE Type-1 excitation system

4. STATCOM 모델

그림 4는 본 논문에서 채용한 STATCOM 모델의 등가 회

로도이다 [7,8].

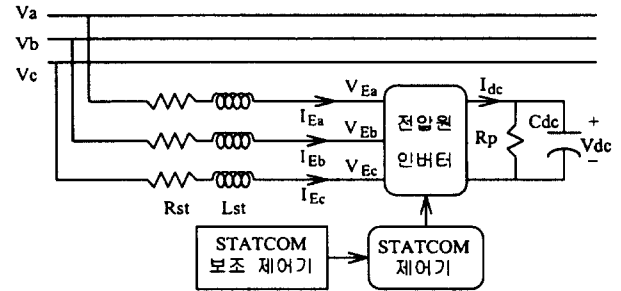


그림 4 STATCOM의 등가 회로도
Fig. 4 Equivalent circuit of STATCOM

그림 4에서 확인할 수 있듯이 STATCOM은 GTO를 기반으로 한 전압원 인버터와 DC 링크 커패시터로 구성된다. STATCOM은 전력 시스템과 커플링 변압기를 통해 연결되는데, 이 변압기는 누설 리액턴스 L_{st} 와 저항 R_{st} 로 표현된다. 또 저항 R_p 는 전압원 인버터의 스위칭 및 도통 손실을 의미한다.

인버터에 의해 발생되는 전압 고조파를 무시하면 인버터 출력 전압을 동기 회전 좌표계에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{ED} = kV_{dc} \cos \delta_E \quad (1)$$

$$V_{EQ} = kV_{dc} \sin \delta_E \quad (2)$$

위 식에서 k 는 DC 커패시터 전압과 인버터 AC 출력 전압 사이의 관계를 나타내는 상수이고, δ_E 는 동기 회전 좌표계의 직축과 인버터 출력 전압과의 위상 차를 의미한다. 이 모델에서 k 는 상수이므로, 제어 가능한 변수는 위상 차 δ_E 하나이다.

인버터의 AC 터미널과 DC 터미널의 순시 전력은 같으므로 다음과 같은 전력 평형 방정식이 유도된다.

$$V_{dc} I_{dc} = V_{ED} I_{ED} + V_{EQ} I_{EQ} \quad (3)$$

또 DC 축 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{V}_{dc} = 120\pi \left(\frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{V_{dc}}{C_{dc} R_p} \right) \quad (4)$$

식 (1), (2), (3)을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_{dc} = kI_{ED} \cos \delta_E + kI_{EQ} \sin \delta_E \quad (5)$$

결국 STATCOM 등가회로의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$x = [I_{ED} \quad I_{EQ} \quad V_{dc}]^T, u = [V_D \quad V_Q \quad 0]^T$$

$$A = 120\pi \begin{bmatrix} -\frac{R_{st}}{L_{st}} & \omega & -\frac{k}{L_{st}} \cos \delta_E \\ -\omega & -\frac{R_{st}}{L_{st}} & -\frac{k}{L_{st}} \sin \delta_E \\ \frac{k}{C_{dc}} \cos \delta_E & \frac{k}{C_{dc}} \sin \delta_E & -\frac{1}{C_{dc} R_p} \end{bmatrix}$$

$$B = 120\pi \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{st}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{st}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위 식에서 I_{ED}, I_{EQ} 는 계통에서 STATCOM으로 흐르는 전류를 동기 회전 좌표계에서의 D, Q 축 값으로 표현한 것이고, V_D, V_Q 는 STATCOM이 연결된 버스의 전압을 동기 회전 좌표계에서의 D, Q 축 값으로 표현한 것이다. 위 식의 모든 값들은 단위 값들이다.

그림 5는 동기 회전 좌표계에서의 AC 축 전압의 벡터도이다.

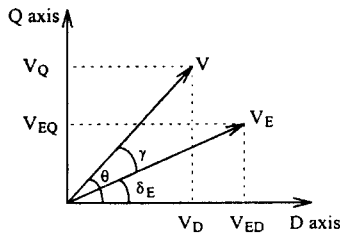


그림 5 동기 회전 좌표계에서의 AC 축 전압의 벡터도
Fig. 5 Voltage vectors in the synchronous rotating frame

5. 기존의 STATCOM 제어기

그림 4에서 볼 수 있듯이 STATCOM에는 전압원 인버터 출력 전압의 위상 각을 조절하기 위해 STATCOM 제어기가 부착되어 있다. 그림 6은 본 논문에서 채용한 STATCOM 제어기의 개념도이다. 이 제어기는 그 동안 제작·운용되어 왔던 많은 STATCOM에서 STATCOM을 자동 전압 제어 모드로 운전할 때 사용해온 범용적인 제어기이다 [9].

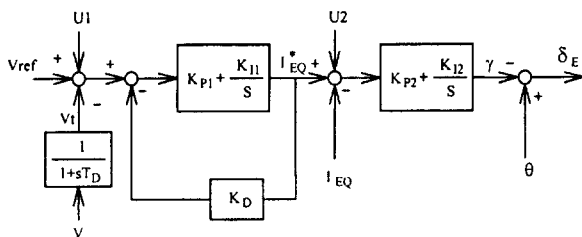


그림 6 기존의 STATCOM 비례-적분 제어기
Fig. 6 Conventional PI controller of the STATCOM

위 그림에서 V_t 는 단자 전압의 크기를 의미하고, θ 와 γ 는 그림 5에서 볼 수 있듯이 각각 단자전압의 위상 각, 단자 전압과 전압원 인버터 출력 전압과의 위상 차를 의미한다. 시정수 T_D 는 단자 전압의 크기를 계산하는 데 소요되는 시간을 표현한다. U_1, U_2 는 7 절에서 설명될 STATCOM 부가 제어기의 출력 신호이다. 그림 1의 전력 시스템에 $K_{P1}=K_{P2}=3, K_{I1}=K_{I2}=0.5$ 인 비례-적분 제어기가 설치되었을 때 고유치 분석을 통해 구해진 축의 비틀림 모드는 표 1과 같다. 이때 직렬 커패시터 보상률은 50%이다.

표 1 축의 비틀림 모드 I

Table 1 Torsional modes of the shafts I

	제어기 설치 전	제어기 설치 후
모드 0	$3.7107 \pm j 8.6911$ (1.38Hz)	$-0.259 \pm j 8.7512$
모드 1	$0.1929 \pm j 155.39$ (24.7Hz)	$0.5502 \pm j 155.39$
모드 2	$-0.0461 \pm j 203.47$ (32.4Hz)	$-0.0359 \pm j 203.47$
모드 3	$-0.0494 \pm j 321.19$ (51.1Hz)	$-0.0488 \pm j 321.19$

표 1에서 모드 0은 축이 비틀리지 않고 4개의 mass가 같이 진동하는 것을 의미하고, 모드 1은 1개의 축, 모드 2는 2개의 축, 모드 3은 3개의 축이 비틀리는 것을 의미한다. 이 표는 위와 같은 파라미터를 가진 제어기로는 모드 0은 안정화시킬 수 있지만, 모드 1은 안정화시킬 수 없음을 보여 준다.

그림 7은 $K_{P1}/K_{I1}=K_{P2}/K_{I2}=6$ 의 조건을 유지하면서 K_{P1}, K_{P2} 를 0부터 50까지 변화시켰을 때, 모드 1에 상응하는 고유치의 실수 부분 변화를 보여준다.

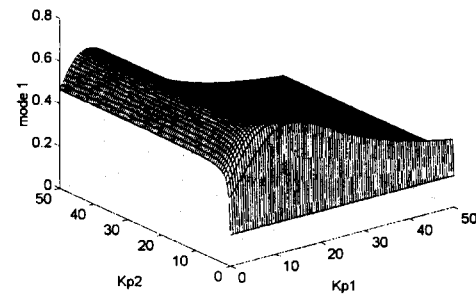


그림 7 모드 1 고유치의 실수 부분 변화
Fig. 7 Variation in the real part of the mode 1 eigenvalue

위 그림에서 아무리 제어기 파라미터를 변동시키더라도 모드 1을 안정화시킬 수 없음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 K_{P1}, K_{I1} 의 비를 변동시키거나, K_{P1}, K_{I1} 를 임의로 잡더라도 마찬가지이다. 결국 기존의 비례-적분 제어기를 가진 STATCOM으로는 모든 SSR 모드를 제어할 수 없음을 알 수 있다. 이는 SSR 모드 제어를 위해 STATCOM 보조 제어기가 필요하다는 것을 말해준다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 STATCOM 보조 제어기의 출력 신호는 전압 비교 블록 U_1 또는 전류 비교 블록 U_2 에 인가할 수 있다. 보조 제어기 출력 신호의 인가 위치에 따라 제어기의 성능이 달라지는데, 가장 제어 성능이 좋은 인가 위치를 찾기 위해 본 논문에서는 진동 모드에 대한 모드 가제어성 지수를 사용하였다.

6. 모드 가제어성 및 가관측성 지수

시스템의 선형화된 모델의 상태 방정식이 다음과 같을 때

$$\dot{X} = AX + Bu, \quad y = CX \quad (7)$$

모드 가제어성 및 가관측성 지수는 다음과 같이 정의된다 [10].

$$MC_i = |W_i^T B| \quad (8)$$

$$MO_i = |CV_i| \quad (9)$$

위 식에서 V_i , W_i^T 는 각각 진동 모드에 대한 상태 행렬 A 의 우측 고유벡터와 좌측 고유벡터를 의미한다. 모드 가제어성 지수 MC_i 는 i 번째 진동 모드에 대한 제어기의 영향 정도를 의미하고, 모드 가관측성 지수 MO_i 는 시스템 출력으로부터 i 번째 진동 모드를 추정할 수 있는 정도를 의미한다.

다음 표 2는 STATCOM 보조 제어기 출력 신호의 인가 위치에 따른 모드 가제어성 지수를 나타낸다.

표 2 진동 모드에 대한 모드 가제어성 지수
Table 2 Modal controllability indices to the oscillation modes

인가 위치	모드 0	모드 1	모드 2	모드 3
U_1	36.817	5.128	0.501	0.043
U_2	12.618	1.742	0.172	0.015

위 표에서 STATCOM 보조 제어기의 출력 신호가 전압 비교 블록 U_1 에 인가될 때, 전류 비교 블록 U_2 에 인가될 때 보다 모드 가제어성 지수가 훨씬 큼을 알 수 있다. 따라서 전압 비교 블록이 보조 제어기 출력 신호의 인가 위치로 선정되었다.

표 3은 전력 시스템에서 쉽게 측정할 수 있는 3가지 측정 신호에 대한 모드 가관측성 지수를 보여 준다.

표 3 진동 모드에 대한 모드 가관측성 지수
Table 3 Modal observability indices to the oscillation modes

측정 신호	모드 0	모드 1	모드 2	모드 3
유효 전력	0.0368	0.0242	0.0157	0.0041
전압	0.0076	0.0092	0.0099	0.0028
전류	0.0349	0.0126	0.0198	0.0044

표 3의 모드 가관측성 분석 결과는 보조 제어기 설계를 위해 유효 전력을 측정할 경우, 현 시스템에서 시스템 안정을 위해 억제할 필요가 있는 모드 1에 대한 모드 가관측성 지수가 가장 커짐을 보여준다. 따라서 보조 제어기 설계를 위해 가장 효과적인 측정 신호는 유효 전력이다.

7. H_∞ STATCOM 보조 제어기 설계

그림 8은 가중 함수를 가진 augmented plant $P(s)$ 와 제어기 $K(s)$ 의 피드백 구조를 포함하고 있는 폐루프 시스템의 블록 선도이다 [11]. 그림 8에서 d 는 외란 신호, u 는 제어기의 출력 신호, y 는 시스템의 출력 신호를 의미하고, W_S , W_U , W_T 는 각각 오차 신호, 제어 신호, 출력 신호에 대한 가중 함수를 의미한다.

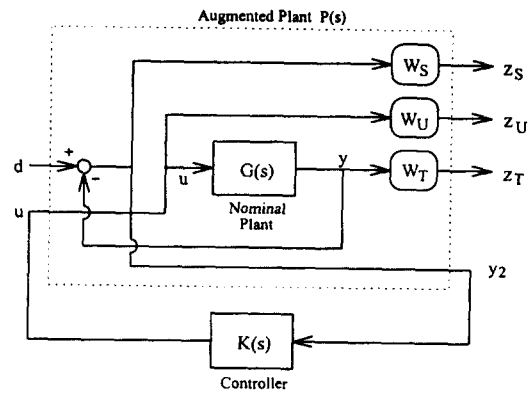


그림 8 페루프 시스템의 블록 선도
Fig. 8 Diagram of the closed-loop system

제어기 $K(s)$ 로 표현되는 H_∞ STATCOM 보조 제어기는 전력 시스템에서 쉽게 측정할 수 있는 유효 전력의 변화량 ΔP 만을 측정하면 제어기 구성이 가능하므로, 기존의 상태 피드백 제어기에 비해 많은 이점을 갖는다.

본 논문에서 H_∞ STATCOM 보조 제어기 설계 목적은 갑작스런 외란으로 인한 SSR 진동 모드의 억제, 전력 시스템 운전 조건의 변동에 따른 시스템 불확실성에 대한 강인한 안정성 확보, 과도한 제어기 출력의 억제 등이다. H_∞ 제어기 설계를 위한 H_∞ 혼합 감도 문제에서는 가중 함수 W_S , W_U , W_T 를 적절하게 선정함으로써 이러한 설계 목적을 달성할 수 있다.

표 1에서 볼 수 있듯이, 대상 전력 시스템에서 SSR 모드는 1.38Hz부터 51.1Hz까지 존재한다. 따라서 이 주파수 대역에서 외란에 대한 시스템의 감도를 감소시키기 위해 가중 함수 W_S 는 이 주파수 대역에서는 큰 값을 가지고, 이보다 높은 주파수 대역에서는 작은 값을 가지도록 선정된다. 결국 W_S 는 다음과 같은 저주파 통과 필터(low pass filter) 형태를 갖는다.

$$W_S = \frac{s+12000}{2(s+500)} \quad (10)$$

제어기의 강인한 안정도 성능을 위해서는 가중 함수 W_T 를 적절하게 선정해야 하는데, 본 논문에서는 가중 함수 W_S 와의 상보 관계를 고려하여 고주파 통과 필터(high pass filter) 형태로 선정하였다.

$$W_T = \frac{s+1}{s+6000} \quad (11)$$

설계된 제어기가 고주파 영역에서 chattering 문제를 갖지 않고 매우 낮은 저주파 영역에서 washout 성질을 가지도록 가중 함수 W_U 는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$W_U = \frac{100(s+10^{-4})(s+1000)}{(s+10^{-6})(s+10^5)} \quad (12)$$

그림 9는 가중 함수 W_S , W_U , W_T 의 Bode 크기 선도를 보여준다.

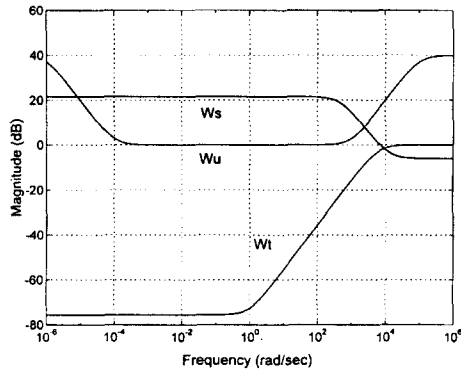


그림 9 가중 함수들의 Bode 크기 선도
Fig. 9 Bode magnitude plot of the weighting functions

8. 모의 실험 결과

제안된 H_∞ STATCOM 보조 제어기가 직렬 보상 선로에서 발생하는 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하기 위해 고유치 분석과 비선형 시스템을 이용한 시간 영역 시뮬레이션을 수행하였다. 직렬 커패시터 보상률은 50%를 가정하였고, 외란으로는 저압 터빈의 토크가 0.1초 후 3주기 동안 10% 증가하는 것으로 상정하였다.

표 4는 비례-적분 제어기만 설치되어 있을 경우와 H_∞ STATCOM 보조 제어기가 함께 설치되어 있을 경우의 축의 비틀림 모드이다.

표 4 축의 비틀림 모드 II
Table 4 Torsional modes of the shafts II

	보조 제어기 설치 전	보조 제어기 설치 후
모드 0	$-0.259 \pm j 8.7512$	$-0.259 \pm j 8.7512$
모드 1	$0.5502 \pm j 155.39$	$-0.5502 \pm j 155.4$
모드 2	$-0.0359 \pm j 203.47$	$-0.0359 \pm j 203.47$
모드 3	$-0.0488 \pm j 321.19$	$-0.0488 \pm j 321.19$

표 4에서 H_∞ STATCOM 보조 제어기가 설치될 경우, 비례-적분 제어기로는 안정화시킬 수 없었던 모드 1도 안정화시킬 수 있어 모든 모드를 안정화시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 각각 제안된 H_∞ STATCOM 보조 제어기가 없을 경우와 있을 경우의 모의 결과를 보여준다. 그림 10으로부터 기존의 비례-적분 제어기는 진동 모드 0은 안정화시키지만, 진동 모드 1은 안정화시키지 못하여 시스템이 불안정해짐을 알 수 있다. 그러나 그림 11에서 볼 수 있듯이 제안된 보조 제어기를 설치하면 모든 진동 모드가 억제되어 시스템이 안정화된다. 이것은 제안된 STATCOM 보조 제어기가 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여 준다.

제안된 STATCOM 보조 제어기의 강인성을 검증하기 위하여, 다양한 운전 조건하에서 많은 시간 영역 모의를 수행하였다. 그림 12와 13은 많은 시간 영역 모의 중 대표적인 2가지 모의 결과를 보여준다. 그림 12는 전력 시스템 운전 조건이 보조 제어기 설계를 위해 사용하였던 유효전력 $P=0.9$, 무

효전력 $Q=0.436$ 에서 $P=0.4$, $Q=0.2$ 로 변동되었을 때의 모의 결과를 보여주었고, 그림 13은 직렬 커패시터 보상률이 50%에서 70%로 변동되었을 때의 모의 결과를 보여준다. 이 결과로부터 제안된 H_∞ STATCOM 보조 제어기가 전력 시스템 운전 조건의 변동에 의한 시스템 불확실성에도 불구하고 SSR을 성공적으로 억제할 수 있음을 알 수 있다.

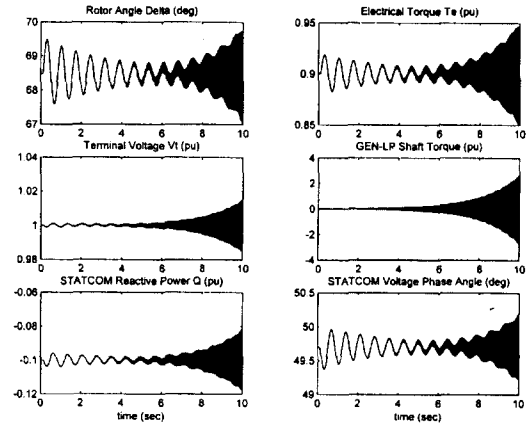


그림 10 보조 제어기 설치전 모의 결과
Fig. 10 Simulation results without the supplementary controller

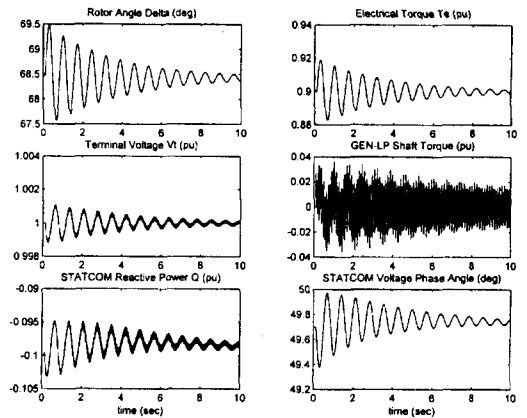


그림 11 보조 제어기 설치후 모의 결과
Fig. 11 Simulation results with the supplementary controller

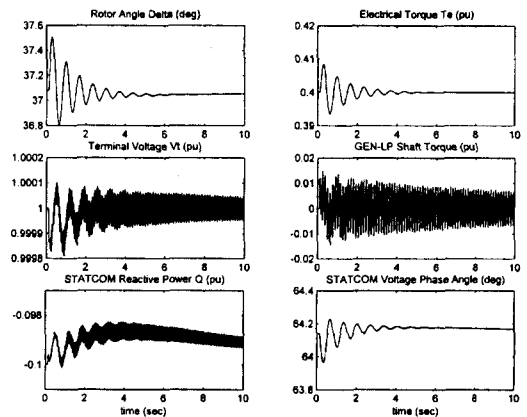


그림 12 $P=0.4$, $Q=0.2$ 에서의 모의 결과
Fig. 12 Simulation results under $P=0.4$, $Q=0.2$

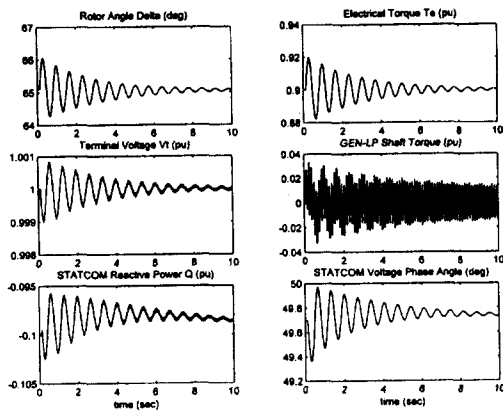


그림 13 직렬 보상률 70%에서의 모의 결과
Fig. 13 Simulation results under 70% series compensation

9. 결 론

본 논문에서는 H_{∞} 제어 방식을 이용하여 직렬 보상 선로에서의 SSR을 억제하기 위한 STATCOM 보조 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 보다 효과적인 제어기 설계를 위해 진동 모드에 대한 모드 가제어성 및 가관측성 지수가 도입되었다. 제안된 H_{∞} STATCOM 보조 제어기의 성능은 발전기 단자에 STATCOM이 설치된 IEEE second benchmark, System-1 모델을 이용하여 확인하였다.

비선형 전력 시스템을 이용한 다양한 시간 영역 시뮬레이션을 통해 제안된 H_{∞} STATCOM 보조 제어기가 전력 시스템 운전 조건 변동에 의한 시스템 불확실성에도 불구하고 SSR을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] P.M. Anderson, B.L. Agrawal, and J.E. Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, IEEE Press, 1990
- [2] IEEE SSR Working Group, "Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.5, September/October 1980, pp. 1810-1818
- [3] J.C. Seo, T.H. Kim, J.K. Park, and S.I. Moon, "An LQG Based PSS Design for Controlling the SSR in Power Systems with Series-Compensated Lines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.11, No.2, June 1996, pp.423-428
- [4] IEEE & CIGRE FACTS Working Group, *FACTS Overview*, IEEE, 1995
- [5] IEEE SSR Working Group, "Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.5, May 1985, pp.1057-1066
- [6] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, New York, 1994

- [7] C. Schauder and H. Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators", IEE Pro.-C, Vol.140, No.4, July 1993, pp.299-306
- [8] A. Nabavi-Niaki and M.R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11, No.4, November 1996, pp. 1937-1943
- [9] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T.W. Cease, and A. Edris, "Operation of \pm 100MVAR TVA STATCON", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997, pp. 1805-1811
- [10] B. Porter, *Modal Control Theory and Applications*, Taylor and Francis Ltd., 1972
- [11] K. Zhou, J.C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, 1996

저 자 소 개



서 장 철 (徐 將 哲)

1969년 12월 25일생. 1993년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2000년 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정
Tel : 02-880-7258
E-mail : bulbong@hanimail.com



문 승 일 (文 承 逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~1997년 전북대 전기공학과 조교수. 1997년~현재 서울대 공대 전기공학부 조교수
Tel : 02-880-1821
E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr



박 종 근 (朴 種 根)

1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1979년 동경대 공학계 대학원 졸업(석사). 1982년 동 대학원 졸업(박사). 1982년 4월~1982년 9월 일본 도시바 중전 기술 연구소 연구원. 1982년 10월~1983년 3월 일본 국립 에너지 물리학 연구소 연구원. 1983년 4월~현재 서울대 공대 전기공학부 교수
Tel : 02-880-7247
E-mail : parkjk@plaza.snu.ac.kr