

저주파 댐핑 향상을 위한 유연송전시스템의 외부제어기 설계

백승묵* 박정욱*
연세대학교*

External Controller Design of FACTS Devices for Damping Improvement

Seung-Mook Baek* Jung-Wook Park*
Yonsei University*

Abstract - 유연송전시스템(FACTS)은 송전선의 효율을 높임으로서 발전소의 추가 설비 없이도 전력수요에 맞는 전력공급을 가능하게 하는 제어기이다. 특히, 직렬형 유연송전시스템에서 사용하는 외부제어기는 미소 리액턴스 신호를 발생하여 내부제어기에 인가함으로써 전력시스템의 저주파 댐핑을 효과적으로 향상시키는데 사용된다. 본 논문에서는 효과적인 외부제어기 설계를 위해 하이브리드시스템 모델링 이론을 유연송전시스템을 포함한 전력시스템에 적용하였다. 하이브리드시스템은 전력시스템의 고유의 비선형성을 포함하여 모델링을 함에도 불구하고 전체 시스템 행렬을 계산할 수 있게 도와줌으로서 고유치 분석을 통한 적절한 외부제어기 설계를 가능하게 한다. 본 논문에서 제시한 방법을 적용하여 설계된 외부제어기의 성능을 1기 무한모션 시스템에 적용하여 평가하였다.

1. 서 론

현재 전력산업은 전력수요의 꾸준한 증가 및 장거리 송전 등에 대한 요구에도 안정된 전력공급을 보장해야 한다는 문제에 직면하고 있다. 하지만, 비용적인 측면이나 환경적인 측면의 제약에 따라 수요 증가에 따른 추가의 발전소의 증설에 어려움을 겪고 있다. 이러한 제약환경 하에서 별도의 발전설비의 증가 없이도 송전시스템에 효율성을 높임으로서 전력조류를 제어하여 전력수요 증가에 맞춰서 전력을 확보할 수 있다는 장점 때문에 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System, FACTS)[1]에 대한 연구가 각광을 받고 있다.

직렬형 유연송전시스템(Series Capacitive Reactance Compensator, SCRC)은 전송선로에 직접적으로 미소전압을 투입함으로써 전송 효율을 높여주는 제어기이다. 특히, 직렬형 유연송전시스템은 별도의 전압원이 없이 항상 용량형 전압을 투입해야하며, 이 조건을 만족하기 위한 다양한 내부제어기 연구가 진행되어 왔다[2]-[3]. 한편, 외부제어기는 정상상태가 아닌 과도 상태에서 미소 리액턴스 성분을 내부제어기에 제공함으로써 전력시스템의 저주파 댐핑의 향상을 가져온다[4]. 이와 같이 외부제어기는 과도 상태일 때 중요한 역할을 하지만, 유연송전시스템이 복잡한 비선형 시스템으로서 외부제어기의 파라미터 선정에 대한 연구가 부족한 실정이다.

한편, 하이브리드시스템 모델링은 이와 같이 비선형적 특성을 갖는 전력시스템 모델링에 적합한 제어 이론이다[5]. 즉, 연속적 변수뿐만 아니라 이산적 변수 그리고 이산사건에 의한 동적 다이내믹 현상 등이 복잡적으로 나타나는 전력시스템을 일관된 기준으로 모델링하는 기법으로서, 하이브리드시스템은 최근 들어 많은 물리적 시스템의 연구에서 주목을 받고 있다. 특히, 하이브리드시스템 모델링 기법을 통해 전력시스템의 비선형성을 포함하여 모델링을 하여도 전체 시스템 행렬을 구할 수 있으므로, 고유치 분석 기법을 통해 선형 파라미터의 적절한 튜닝이 가능하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 유연송전시스템 모델링에 하이브리드시스템 모델링 기법을 적용하여 전력시스템의 정확한 모델링을 통해 선형 파라미터를 튜닝함으로써 전력시스템의 저주파 댐핑 향상을 보장하는 신뢰성 있는 외부제어기를 설계하고자 한다.

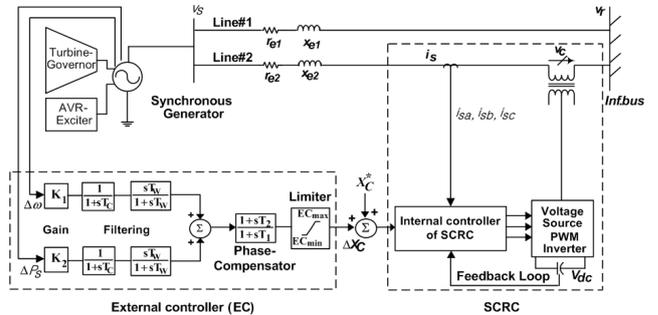
2. 본 론

2.1 직렬형 유연송전시스템

직렬형 유연송전시스템은 전송선로에 직접 보상전압을 투입함으로써 전체 시스템의 안정도를 보장하는 제어기이다. 특히, 직렬형 유연송전시스템의 인버터 DC단에 커패시터를 사용함으로써 투입되는 전압은 송전선에 흐르는 전류와 항상 90° 지상을 유지하여 송전선과 유연송전시스템 간의 유효전력의 흐름이 없도록 제어되어야 한다[1]. 그림 1의 내부제어기의 피드백 루프가 이러한 조건을 만족시켜주는 역할을 하게 된다.

그림 1은 1기 무한모션 시스템에 연결된 직렬형 유연송전시스템 및

내·외부 제어기이다. 그림 1에서 보는 것과 같이 외부제어기는 각속도 변화값($\Delta\omega$) 및 발전기 전력의 변화값(ΔP)을 입력으로 사용한다. 따라서 정상상태 일 때는 두 입력이 "0" 이므로 외부제어기는 내부제어기에 미소 임피던스(ΔX_C)를 제공하지 않게 된다. 하지만 외란이 발생하여 과도 상태가 발생하는 경우는 ΔX_C 를 내부제어기에 인가함으로써 전력시스템의 저주파 댐핑의 향상을 도모하게 된다.



〈그림 1〉 직렬형 유연송전시스템의 내·외부 제어기

2.2 전력시스템의 하이브리드시스템 모델링

서론에서 언급한 것과 같이 하이브리드시스템은 선형 및 비선형 동적 특성을 보이는 전력시스템을 모델링하고 제어하는 새로운 기법이다. 이번 논문에서는 그림 1의 전력시스템을 하이브리드시스템으로 모델링함으로써 정교한 모델링을 통하여 외부제어기의 선형파라미터를 튜닝하려고 한다.

2.2.1 하이브리드시스템 모델링

앞서 언급한 하이브리드시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 연속적인, 이산적인 상태변수
- 연속적인 동적 특성
- 이산사건과 트리거
- 사건에 따른 이산적인 상태변수의 변화에 대한 도식화

다시 말해서, 하이브리드시스템은 연속적인 사건과 이산적인 사건의 상호작용으로 구성된 물리적 시스템의 수학적 모델이다. 이러한 특성을 갖는 하이브리드시스템을 모델링하고 수치적 최적화 기법에 적용하기 위해서는 다음 수식과 같이 DAIS 구조로 전력시스템을 모델링하는 것이 적합하다.

$$\dot{x} = f(x, y), \quad 0 = g(x, y) \quad (1)$$

$$0 = \begin{cases} g^{(i-)}(x, y) & y_{d,i} < 0, \\ g^{(i+)}(x, y) & y_{d,i} > 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, d \quad (2)$$

$$x^+ = h_j(x^-, y^-) \quad y_{e,j} = 0, \quad j \in \{1, \dots, e\} \quad (3)$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad \underline{f} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{h}_j = \begin{bmatrix} x \\ h_j \\ \lambda \end{bmatrix}$$

$$x \in X \subseteq \mathbb{R}^n, y \in Y \subseteq \mathbb{R}^m, z \in Z \subseteq \mathbb{R}^l, \lambda \in L \subseteq \mathbb{R}^p,$$

x 는 전력각, 각속도, 자속과 같은 연속 변수; z 는 변압기 탭의 위치와 같은 이산 변수; y 는 단자전압, 단자각과 같은 대수적 변수; λ 는 변압기 리액턴스, 제어기 이득값, 스위칭 시간, 리미터와 같은 파라미터.

2.2.2 고유치 분석을 통한 선형 파라미터 최적화

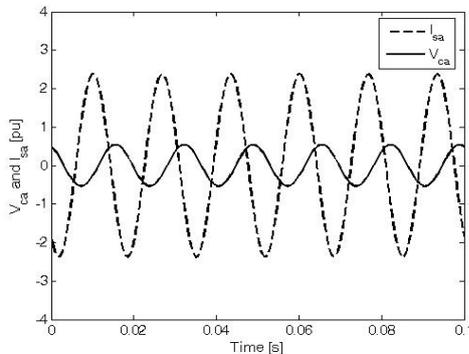
DAIS 구조를 통한 하이브리드시스템 모델링은 시스템 전체의 변수에 대한 고유치를 구하는데 효과적이다. 식 (1)~(3)을 통해 구해진 전력시스템 모델링은 f, g 함수에 대한 비선형 및 선형 변수의 1차 편미분을 제공해 줌으로서 다음 식 (4)을 통해 시스템 전반에 대한 고유치를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= f_x \cdot \Delta x + f_y \cdot \Delta y, \\ 0 &= g_x \cdot \Delta x + g_y \cdot \Delta y, \\ \Delta y &= -g_y^{-1} \cdot g_x \cdot \Delta x, \quad \Delta \dot{x} = (f_x - f_y \cdot g_y^{-1} \cdot g_x) \cdot \Delta x = \mathbf{A} \cdot \Delta x \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{A} 는 변수벡터 x 에 대한 전체 시스템을 나타내는 행렬로서, 그 행렬의 고유치가 실제 시스템에 대한 고유치를 대표하게 된다.

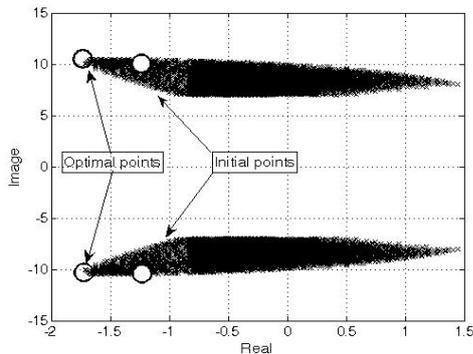
2.3 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 그림 1의 유연송전시스템의 외부제어기를 튜닝하기 위해서 2.2절에서 소개한 하이브리드시스템으로 전력시스템을 모델링하였다. 내부제어기의 설계가 연구의 대상이 아니므로 내부제어기는 2.1절에 제시한 조건을 만족하도록 선형화하여 설계하였다. 그림 2는 하이브리드 시스템 모델링을 완성한 전력시스템의 정상상태일 때의 선로 전류와 인버터 출력단의 전압을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 정상상태 일 때, 보정 전압(V_{ca})은 선로 전류(I_{sa})에 대해서 항상 90° 지상을 유지하는 것을 확인할 수가 있다.



〈그림 2〉 선로전류와 보정 전압의 각도 비교

2.2절에서 유연송전시스템을 포함하는 전력시스템에 대한 하이브리드시스템 모델에 식 (4)를 적용하여 시스템 행렬(\mathbf{A})를 구하였다. 시스템 행렬을 이용하여 고유치를 계산함으로써 저주파 댐핑에 해당하는 고유치에 대한 분석을 하였다. 그림 3은 선형파라미터의 가능한 범위에 대한 저주파 댐핑을 나타내는 고유치들의 분포를 나타내고 있다. 그림 3에서 보면 많은 수의 고유치 값들이 좌표의 우반면에 존재한다는 것을 확인할 수가 있다. 즉, 전송선로에 직접 전압을 투입하는 직렬형 유연송전시스템의 경우 선형 파라미터의 잘못된 선정은 전체 시스템의 안정도를 저해한다는 것을 나타내고 있다. 또한, 그림 3에서 가장 좌측에 존재하는 고유치는 저주파 댐핑을 가장 효과적으로 향상시킬 수 있는 파라미터의 고유치를 나타낸다.



〈그림 3〉 저주파 댐핑에 해당하는 고유치 분포

표 1은 고유치 분석에 따라 선정된 선형 파라미터를 나타내고 있다. 그림 1의 외부제어기는 저주파 필터, 고주파 필터, 이득 보상기, 위상 보상기 등을 포함하고 있다. 저주파 및 고주파 필터의 선형 파라미터는 전력시스템의 저주파 댐핑에 대한 주파수가 어느 특정 범위를 벗어나지 않기 때문에 초기에 주어진 값을 이용하였으며 고유치 분석을 통해 선정할 대상으로 설정하지 않았다. 따라서 표 1은 이득 보상기, 위상 보상기에 대한 선형 파라미터의 초기값과 고유치 분석을 통한 최적값을 나

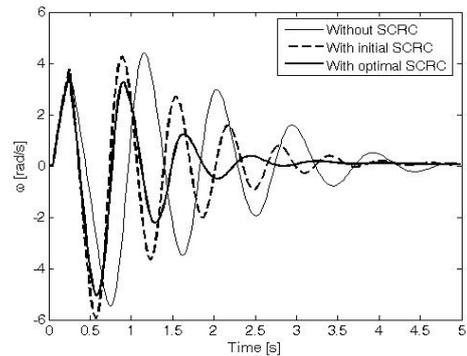
타내고 있다. 또한 그에 따르는 고유치를 제시함으로써 최적값을 사용했을 경우 감쇠비가 더욱 크다는 것을 확인할 수가 있다.

〈표 1〉 외부제어기 선형 파라미터의 초기값과 최적값의 비교

PSS의 파라미터	K_1	K_2	T_1	T_2	고유치 분석
초기값	0.01	0.01	10	0.01	-1.2321±j10.0730
최적값	0.093	0.01	5.2	0.053	-1.7099±j10.0233

저주파 댐핑을 향상시키기 위해 표 1에서와 같이 선정된 선형 파라미터의 성능을 확인하기 위해, 정상상태에서 동작하는 1기 무한모션 시스템의 단자전압에 0.05초 이후에 0.2초간 3상 단락을 가하였다. 단락 임피던스는 0.005pu로 가정하였으며, 5(=t)초 동안 시뮬레이션을 하였다.

각속도는 전력시스템의 저주파 댐핑을 보이는 대표적인 척도로서 그 변화에 대한 분석은 제어기의 성능 평가에 중요한 지표가 된다. 그림 4는 세 가지 경우에 대한 전력각 변화를 나타내고 있다. 직렬형 유연송전시스템이 없을 때보다 있을 때가 그리고 초기값보다는 최적값을 이용하였을 때가 저주파 댐핑 향상에 보다 효과적임을 확인할 수가 있다.



〈그림 4〉 발전기의 전력각 응답 [rad]

3. 결 론

본 논문은 전력시스템의 저주파 댐핑을 향상시키기 위해 직렬형 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System, FACTS)의 외부제어기의 설계를 고려하였다. 유연송전시스템은 복잡한 비선형 제어기로서 선형파라미터의 적절한 선택을 위해 하이브리드시스템 모델링 기법을 적용하였다. 하이브리드시스템으로 구현된 직렬형 유연송전시스템은 그 고유 성질을 유지하는 것을 확인할 수 있었으며, 시스템 행렬에 대한 분석은 외부제어기의 선형 파라미터의 최적 선정을 가능하게 하였다. 또한 본 논문에서 제안한 방법으로 설계된 외부제어기를 1기 무한 모션 시스템에 적용함으로써 전력 시스템의 안정도 향상에 효과적임을 확인하였다.

본 논문은 인버터 기반의 비선형 제어기의 설계에 있어서 하이브리드 시스템 모델링을 적용함으로써 체계적인 방법으로 제어기를 설계하였다. 따라서 본 논문은 산업 전반에 걸쳐 인버터의 고유 비선형성을 포함하는 제어기의 최적 설계에 대한 새로운 방안을 제시하였다.

[감사의 글]

본 연구는 서울시정개발연구원 2006년도 신기술연구개발 지원 사업(과제번호:10988)으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS-concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [2] B. S. Rigby, and R. G. Harley, "An improved control scheme for a series-capacitor reactance compensator based on a voltage-source inverter," IEEE Trans. Industry Application. vol. 34, pp. 355-363, March/Apr. 1998.
- [3] B. S. Rigby, N. S. Chonco, and R. G. Harley, "Analysis of a power oscillation damping scheme using a voltage-source inverter," IEEE Trans. Industry Application, vol. 38, pp. 1105-1113, July/August. 2002.
- [4] Jung-Wook Park, and R. G. Harley, "Secondary Control for a Series Reactive Compensator Based on a Voltage-Source PWM Inverter," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 2, no. 4, pp. 117-120, December 2004.
- [5] A. van der Schaft and H. Schumacher, An Introduction to Hybrid Dynamical Systems, Springer-Verlag, London, 2000.