

전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델에 대한 에너지 함수 제어전략의 적용

국경수*, 오태규*, 전영환*, 김학만*, 김태현*, 전진홍*,
한국전기연구소*

Application of energy function control strategy to VSC based UPFC Model

Kyung-Soo Kook*, Taekyoo Oh*, Yeonghan Chun*, Hak-Man Kim*, Tai-Hyun Kim*, Jin-Hong Jeon*
KERI*

Abstract - UPFC(Unified Power Flow Controller) consists of two voltage sourced converter(VSC)s inserted into AC system through series and parallel coupling transformer, where two VSCs are linked by capacitor at DC-side. Since VSC acts as an AC voltage source behind a reactance, where both magnitude and phase angle of the source are controllable, UPFC can be represented by the equation related to input-output relation of two VSCs. Voltage control of DC-link capacitor provides the path of real power flow between two VSCs. While UPFC is controlled for maintaining the given reference value in steady state, it should be controlled for damping power oscillation in dynamics. For such a control objective, the control strategy based on the energy function was proposed and has been shown to be effect and robust for damping power oscillation of power system.

In this paper, UPFC model based on the VSC was analysed and applied to power-flow control and stability analysis. The control strategy based on the energy function is adopted for damping power oscillation of power system. The effectiveness of proposed control strategy was verified by simulation study

1. 서론

UPFC는 응용범위가 가장 넓은 FACTS 제어기의 하나로 교류 모선의 전압을 일정하게 유지하는 기능을 수행할 뿐만 아니라, 선로의 유효 및 무효의 전력조류를 제어할 수 있는데 UPFC의 이러한 전력조류 제어기능은 전력계통의 동요를 감쇄시키는 데에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.[1] 하지만, 이를 위한 UPFC의 모델링과 제어방법은 아직 확립되지 못하고 있다.

한편, 최근 전력 전자 분야의 빠른 발전에 따라 GTO (Gate-Turn-Off) 싸이리스터 기술을 사용한 전압원 컨버터(Voltage-Sourced Converter)에 기반을 둔 새로운 FACTS 제어기들이 출현하여 FACTS 제어기를 포함하는 전력계통의 해석에서도 FACTS 제어기를 전압원 컨버터에 의해 모델링하는 접근방법이 제안되고 있다.[2]

이에 대해 본 논문에서는 전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델을 분석하여 이를 계통 해석에 적용하고, 여기에 에너지 함수를 이용한 제어전략[3,4,5]을 적용하여 그 유효성을 검증하였다. 즉, UPFC를 2개의 전압원 컨버터로 표현하고, 병렬 전압원 컨버터는 모선의 교류 전압과 연계 캐패시터의 직류 전압을 일정하게 유지하도록 제어하며, 직렬 전압원 컨버터에 대해서는 전력계통의 동요를 감쇄시키기 위한 에너지 함수법으로부터 전압원 컨버터의 제어 규칙을 유도하여 이를 제어 전략으로 사용하였다.

2. 전압원 컨버터에 의한 UPFC 모델

UPFC는 그림 1과 같이 모선에 병렬로 연결되는 컨버터 1과 선로에 직렬로 연결되는 컨버터 2가 DC 캐패시터로 연결되어 구성된다. 이때 UPFC의 병렬부분(컨버터1)은 UPFC의 입력단 전압 V_i 의 크기를 일정하게 유지하고 DC 링크 커패시터의 전압을 일정하게 유지시키는 기능을 한

다. 또한 UPFC의 직렬부분(컨버터2)은 직렬로 삽입되는 전압의 크기와 위상각을 적절히 제어하여 UPFC 출력단의 유효전력과 무효전력을 제어하는 기능을 한다.

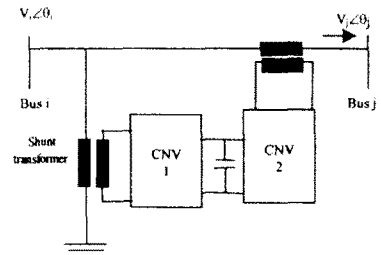


그림 1. UPFC 기본 구성

여기서, 전압원 컨버터는 그림 2와 같이 그 크기와 위상각이 제어 가능한 리액턴스 배후 전압원으로 등가 될 수 있는데 V_d 는 컨버터에 인가되는 직류 전압이고, 전압원의 리액턴스는 컨버터 변압기 리액턴스(X_i)와 직렬 접속에서 선로의 리액턴스가 될 수 있는 추가 리액턴스(X_j)로 구성된다.[2]

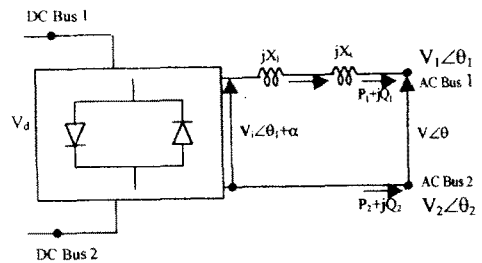


그림 2. 전압원 컨버터 모델

전압원 컨버터의 출력 전압(V_i)은 modulation ratio (γ)에 의해서 조절되며 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_i = K_c V_d \gamma / (N_i a_t V_{base}) \tag{1}$$

또한, 전압원의 위상각(θ_i)은 다음 식 (2)와 같이 모선 1 전압의 위상각을 기준으로 하여 컨버터 power angle (α)에 의해 조절된다.

$$\theta_i = \theta_1 + \alpha \tag{2}$$

따라서, 전압원 컨버터의 기능은 다음 식 (3)과 (4)에 의

해 표현될 수 있다.[2]

$$P = V_d V_c \gamma \sin(\alpha + \theta_c) / X_c \quad (3)$$

$$Q = V_d V_c \gamma \cos(\alpha + \theta_c) / X_c - V_{base}^2 V^2 / X_c \quad (4)$$

이와 같은 전압원 컨버터를 이용하여 UPFC를 나타내면 다음 그림 3과 같다.

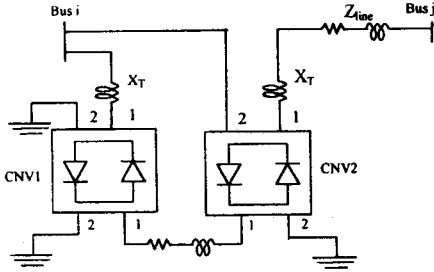


그림 3. VSC based UPFC model

직렬 컨버터(CNV2)에서 컨버터의 모선1과 2는 각각 UPFC가 설치된 선로의 끝 모선(j모선)과 시작모선(i모선)에 연결되고, P_1 과 Q_1 를 제어하는 모드로 동작된다. 병렬 컨버터(CNV1)에서는 컨버터의 모선1이 시작모선(i모선)에 연결되고 모선2는 접지되어, 모선의 전압과 직류축 전압을 제어하는 모드로 동작된다.

이러한 두 전압원 컨버터들은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$P_{CNV1} = P_{CNV2} \quad (5)$$

$$S_{CNV1} = S_{1,CNV1} + S_{2,CNV1} \quad (6)$$

$$S_{CNV2} = S_{1,CNV2} + S_{2,CNV2} \quad (7)$$

$$V_{DC,CNV1} = V_{DC,CNV2} \quad (8)$$

$$P_{1,CNV1} + jQ_{1,CNV1} = P_{sched} + jQ_{sched} \quad (9)$$

조류계산에서는 P_1 과 Q_1 이 목표값으로 지정되며, 안정도 해석에서는 P 과 α 에 의해서 제어되고 Q 가 γ 에 의해서 제어된다.

3. 제어전략

UPFC의 병렬 전압원 컨버터는 모선의 전압과 연계 캐패시터의 직류 전압을 독립적으로 유지하도록 제어되는데 이를 위한 제어 기법은 다음 그림 4와 같다.[2]

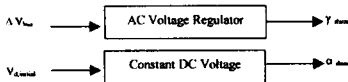


그림 4. UPFC의 병렬 전압원 컨버터에 대한 제어 기법

UPFC의 직렬 전압원 컨버터에 대해서는 에너지 함수법이 전력 동요를 감쇄시키기 위한 제어전략으로 적용된다. 즉, UPFC는 에너지 함수로 표현되는 계통의 에너지가 감소하도록 제어된다. 전력계통에 대한 에너지 함수는 다음 식 (10)과 같이 표현되며 이때 E_{KE} 는 계통의 운동에너지, E_{PE} 는 계통의 위치에너지에 대한 척도가 되고, E_C 는 안정 평형점에서의 에너지 함수 구성에 따라 계통의 에너지를 나타내는 상수이다.[3,4]

$$V = E_{KE} + E_{PE} + E_C \quad (10)$$

계통 외란에 의한 전력 동요를 감쇄시키기 위해서는 에너지 함수의 전체 값이 감소 상태에 있어야 한다. 따라서 송전 선로의 전력조류를 제어하는 UPFC의 직렬 전압원 컨버터는 에너지 함수의 경도가 음의 값이 되도록 제어되어야 한다. 전력계통에 대한 에너지 함수의 경도는 주요 항들만을 사용하여 다음 식(11)과 같이 표현될 수 있다.[3,4]

$$V = P_1 \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) < 0 \quad (11)$$

여기서, P_1 은 직렬 컨버터로부터 계통의 모선으로 주입되는 유효전력이다. 이러한 제어 규칙은 UPFC에 의한 모선으로의 유효전력 주입이 송전 선로를 통한 전력조류의 증대를 억제 해야한다는 물리적인 의미를 가진다. 또한, 전압원 컨버터에서는 P 와 Q 의 주입이 제어 가능한데, 특히 전압원 컨버터에 의한 Q 의 주입은 송전선의 유효 리액턴스를 가감하는 것과 동가가 되는데, 이러한 관계는 다음 식 (12)에 의해 근사적으로 표현될 수 있다.[3,4]

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{(X + Q/I^2)} \quad (12)$$

식(11)과 (12)는 모선으로 주입되는 유효전력(P_1)이 송전선로를 통해 흐르는 유효전력의 증가를 억제하도록 직렬 VSC의 Q 주입량이 제어되어야 함을 의미한다. 즉, $d\theta_{ij}/dt$ 가 음의 값이면 P_1 을 증가시키기 위해 Q 는 유효 리액턴스를 최소화하기 위한 최대값으로 주입되어야 하고, $d\theta_{ij}/dt$ 가 양의 값이면 P_1 을 감소시키기 위해 Q 는 유효 리액턴스를 최대화하기 위한 최소값으로 주입되어야 한다. 또한, 식(4)에서 Q 의 주입량은 VSC에서 γ 와 α 에 의해 제어됨을 알 수 있는데 Q 를 최대값으로 주입하기 위해서는 $\gamma \cos(\alpha + \theta_c)$ 가 +1이 되어야 하고, Q 를 최소값으로 주입하기 위해서는 $\gamma \cos(\alpha + \theta_c)$ 가 -1이 되어야 한다. 이러한 관계로부터 다음과 같은 제어 규칙을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) < 0 \text{ then : } \gamma = +1 \text{ and } \alpha = -\theta_c \\ \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) > 0 \text{ then : } \gamma = -1 \text{ and } \alpha = -\theta_c \end{cases} \quad (13)$$

4. 사례연구

전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델링을 그림 5와 같은 시험계통의 해석에 적용하고 제안된 제어전략을 이용하여 그 유효성을 검증하였다.

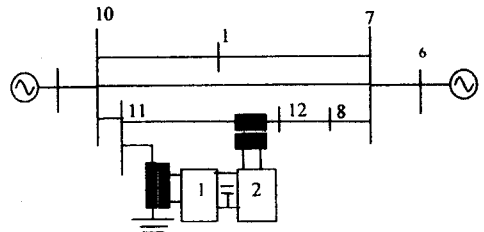


그림 5. 시험 계통

시험 계통은 하나의 취약 선로(11-12-8)와 두 개의 강건 선로로 연결된 두 개의 발전기로 구성된다. 그리고, 이

러한 취약 선로는 강건 선로의 고장시에 저 주파수 진동과 같은 문제를 가지게 된다. 본 사례연구에서는 과도 상태를 모의하기 위해 다음과 같은 외란을 가정하였다.

- 외란 : 초기상태로부터 0.5초 후에 모선 10에서 3상 고장이 발생한다. 고장은 발생 0.067초 후인 0.567초에 선로를 개방함으로써 제거된다.

UPFC가 설치되지 않은 경우 시험 계통은 외란 발생시에 감쇄 부족의 특성을 나타내었다. 그림 6과 7은 UPFC가 없는 경우 외란 발생시의 해석 결과를 보인다.

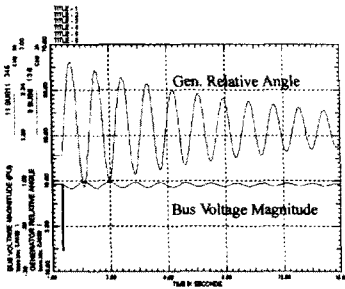


그림 6. UPFC가 설치되지 않은 경우의 발전기 위상차와 모선 전압의 변화

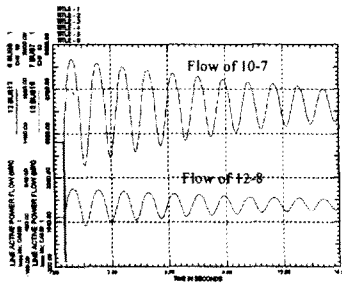


그림 7. UPFC가 설치되지 않은 경우의 유효 선로조류의 변화

이에 대해 동요 감쇄의 향상과 모선(11) 전압의 조절을 목적으로 취약 선로의 시작모선 측에 UPFC가 설치된다고 가정하였다.

그림 8과 9는 UPFC가 설치된 경우 외란 발생시의 해석 결과를 보인다.

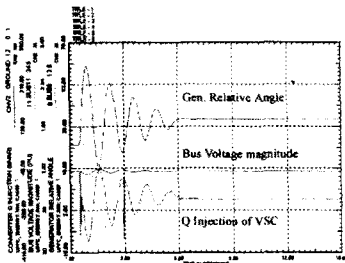


그림 8. UPFC가 설치된 경우 발전기 위상차와 모선 전압의 변화

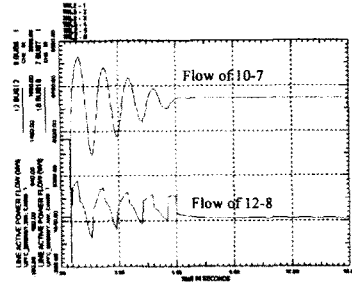


그림 9. UPFC가 설치된 경우 외란 발생시의 유효 전력 조류의 변화

이때, UPFC가 설치된 선로의 시작 모선과 끝 모선사이의 주파수 차이가 UPFC 직렬 전압원 컨버터의 제어를 위한 입력으로 사용되었다.

이러한 사례연구를 통해 제안된 제어전략이 전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델에 적용되어 전력 동요를 효과적으로 감쇄시키는데 응용될 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 전력계통 해석을 위한 전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델을 분석하고 에너지 함수를 적용하여 전력 동요를 감쇄시키기 위한 제어전략을 도출하였다. 제안된 제어전략은 UPFC가 설치된 선로의 시작 모선과 끝 모선의 주파수 차이를 입력 신호로 사용한다.

사례연구를 통해 전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델이 전력계통 해석에서 UPFC의 구조를 고려하는 실용적인 해석결과를 제공할 수 있고, 제안된 제어전략이 전압원 컨버터 기반의 UPFC 모델에 적용되어 전력 동요를 효과적으로 감쇄시키는데 응용될 수 있음을 확인하였다.

6. 참고문헌

- [1] Manzar Rahman, Mohammed Ahmed, Richard Gutman, Robert J. O'Keefe, "UPFC Application on the AEP System : Planning Considerations, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997.
- [2] S. Arabi, P. Kundur, A versatile FACTS devices model for powerflow and stability simulations, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996.
- [3] James F. Gronquist, William A. Sethares, Fernando L. Alvarado, Robert H. Lasseter, Power Oscillation damping control strategies for FACTS devices using locally measurable quantities, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [4] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, Improving power system dynamics by series-connected FACTS devices, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [5] K.R. Padiyar, A.M. Kulkarni, Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998.