

EMTDC를 이용한 배전 선로 전압 보상을 위한 병렬 보상기의 최적 제어기 구현

정수영, 문승일, 김태현*, 한병문**

서울대학교 전기컴퓨터공학부 *목포대학교 전기제어공학부 **명지대학교 전기공학과

Optimal control of DSTATCOM for voltage sag compensation

Soo-Young Jung, Seung-Il Moon, Tae-Hyun Kim*, Byung-Moon Han**
 Seoul Nat'l Univ., *Mokpo Nat'l Univ., **Myongji Univ.

Abstract - 본 논문에서는 전압 sag보상을 하기 위한 DSTATCOM 제어기를 설계하고 EMTDC/PSCAD로 확인하였다. DSTATCOM의 전류성분을 d,q분해 해석을 통하여 상태방정식을 유도하고 부하모델과 네트워크의 제약조건을 결합 모델을 제시하였다. 1선 지락 사고시 PI 제어시보다 LQR 제어의 응답 특성이 우수함을 검증하고 전압 sag가 개선됨을 보였다.

1. 서 론

전원 전압의 전력 품질 문제에 대한 관심이 높아지면서, 여러 가지 대책의 하나로서, 배전 계통에 보상 기기를 부착하는 방법이 연구되고 있다.[1-2] 이러한 보상 기기는 3가지로 구분되며, 병렬 보상 기기인 DSTATCOM(Distribution static synchronous compensator), 직렬 보상 기기인 DVR(Dynamic voltage regulator), 직·병렬 보상 기기인 UPQC (Unified power quality conditioner)로 이러한 배전용 보상 기기에 대해서 CPD(Custom power device)라고 부른다.

그 중 DSTATCOM이 최근에 많이 연구되고 있다. 이러한 DSTATCOM는 기본적으로 전압을 전원 전압에 병렬로 전압을 연결하는 장치로, 빠르게 제어되는 크기와 위상각과 함께 기본 주파수에서 평형 3상 정현파 전압을 발생한다. 다상 회로에서 IGBT를 사용하는 전압원 인버터는 현재 배전 계통에서 가장 실용적으로 사용되고 있다.

이러한 형태의 제어기가 무효 전력에 의한 전압보상, 비선형 부하의 전원측 파급효과 방지 및 역률 개선의 역할을 한다.

그림 1에서 보여주는 전압원 인버터는 여러 개의 6스텝 인버터이고 다중 권선 변압기에 의해 배전 계통과 연결되어 진다. 여러 개의 인버터의 사용은 출력전압의 고조파 왜곡을 감소시킨다. IGBT 인버터들은 DC 전압을 운반하는 커패시터에 연결되어 진다.

본 연구는 이러한 배전 계통에서의 전압 보상을 위한 DSTATCOM의 선형 모델 및 피드백 제어 방법을 제안하고 동적 특성 및 요구되어지는 제어 효과가 PI 제어보다 우수함을 EMTDC로 확인하였다.

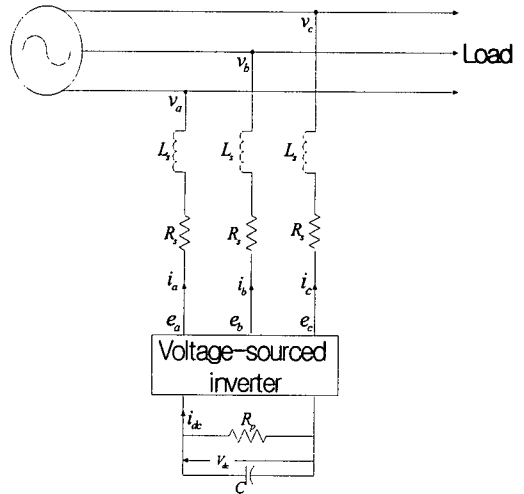


그림 1. DSTATCOM의 등가 모형

2. DSTATCOM의 등가 모형

그림 1은 DSTATCOM의 기본적인 등가 모형을 나타낸다. 여기서 R_s 는 인버터 전도 손실과 변압기 권선 저항 손실의 합이고 L_s 는 변압기의 누설 인덕턴스이고

R_d 는 인버터의 스위칭 손실 및 커패시터의 전력 손실을 말한다. 그리고 회로에서 전압원 인버터 블록은 이상적인 손실 없는 전력 변압기로서 가정하였다.

그림 1에서 교류측 회로 방정식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 Per-unit 개념을 도입하여 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.[3]

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta i'_d}{dt} \\ \frac{d\Delta i'_q}{dt} \\ \frac{d\Delta v'_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R'_d \omega_b}{L'_d} & \omega_b & \frac{k\omega_b \cos \alpha_0}{L'_d} \\ -\omega_b & -\frac{R'_q \omega_b}{L'_q} & \frac{k\omega_b \sin \alpha_0}{L'_q} \\ -\frac{3}{2}kC'\omega_b \cos \alpha_0 & -\frac{3}{2}kC'\omega_b \sin \alpha_0 & -\frac{\omega_b C'}{R'_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i'_d \\ \Delta i'_q \\ \Delta v'_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{L'_d} & -\frac{k\omega_b v'_{dc0} \sin \alpha_0}{L'_d} \\ 0 & \frac{k\omega_b v'_{dc0} \cos \alpha_0}{L'_d} \\ 0 & \frac{3}{2}kC'\omega_b (i'_{d0} \sin \alpha_0 - i'_{q0} \cos \alpha_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v' \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 DSTATCOM의 동적 모델을 포함한 배전 계통 모형은 다음 3가지 모델로 구성할 수 있다.

1) 부하의 모델

$$\dot{x} = f(x, z) \quad (3)$$

2) DSTATCOM의 동적 모델

$$\dot{y} = g(y, z) \quad (4)$$

3) P, Q 흐름을 제어하는 네트워크의 제약조건

$$h(x, y, z) = 0 \quad (5)$$

단, x: 계통의 부하의 상태

y: DSTATCOM의 상태 (i'_d, i'_q, v'_{dc})

z: 선로 전압의 크기와 각

이 시스템은 동작점에 대해서 선형화하면 식(6)으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{load} & 0 & B_{xz} \\ 0 & A_{dstat} & B_{yz} \\ C_{xz} & C_{yz} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (6)$$

여기서 E는 식 (2)에 의해서 다음과 같다.

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k\omega_b v'_{dc}}{L'_d} \\ -\frac{3}{2}k\omega_b C' i'_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

네트워크 방정식이 해가 존재하고 가역적(invertible) 이라고 가정하면 다음과 같이 축소차수 선형 시스템으로 표현 가능하다.[4]

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (8)$$

여기서,

$$A_{xx} = A_{load} - B_{xz} D^{-1} C_{xz} \quad A_{xy} = -B_{xz} D^{-1} C_{yz}$$

$$A_{yx} = A_{dstat} - B_{yz} D^{-1} C_{xz} \quad A_{yy} = -B_{yz} D^{-1} C_{yz}$$

이다.

3. 제어 기법

3.1 PI 제어

기존의 PI 제어는 전압 응답의 전형적인 제어 방식으로 그림 2와 같다. 여기서 K_p 및 K_i 는 제어기의 비례 요소 및 적분 요소를 가르킨다. 또한 α_{min} 및 α_{max} 는 DSTATCOM의 커패시터의 용량 및 무효전력 공급능력에 의해 제한되어지는 최소 및 최대 각이다.

PI제어는 상태피드백 형태로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

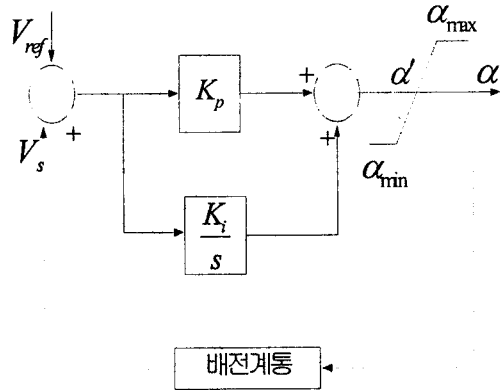


그림 2. PI 제어 블록 다이어그램

위 모델을 위한 제어기 조정 방법으로 Ziegler와 Nichols에 의한 조정을 기초로 하여 제어기 변수를 선정하였다.[5]

3.2 Linear Quadratic Regulator(LQR) 제어

이 방법에서는 성능지수를 최소화함에 의해 간접적으로 시스템의 극점을 이동시킬 수 있다. 이때 성능 척도(performance measure) 다음과 같다.[6]

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [(V_s - V_{ref})' Q (V_s - V_{ref}) + \Delta \alpha^T R \Delta \alpha] dt \quad (9)$$

주어진 목적 함수는 기준전압 와 배전 선로의 전압의 차를 최소화하도록 돕으로써 최적화 할 수 있다.

4. 시뮬레이션

제안한 제어기들을 EMTDC/PSCAD를 이용하여 그림 3에서 보여준 IEEE 13버스에 적용하였다. 150번 버스가 중부하이그 전원측으로부터 거리가 멀다. 따라서 전압 문제에 민감하다. 본 논문에서는 150번 버스 앞단에 DSTATCOM을 두었다.

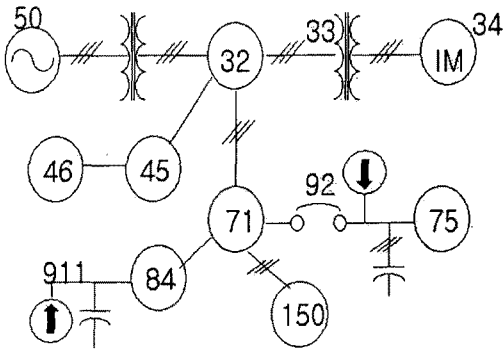


그림 3. IEEE 13버스 방사형 배전 계통

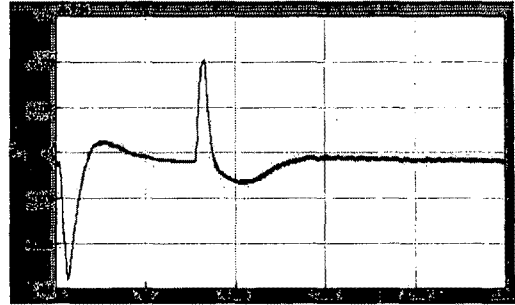


그림 6. LQR 제어에 의한 전압 응답특성

그리고 32번 버스 전단에 1선 지락 사고를 모의 하였다.

여기서 사고 지속시간은 0.3초로 두었고 원하는 초기 전압 동작점은 0.985[pu]로 두었다. 그림 4는 DSTATCOM 제어 전의 3상 전압의 실효값의 전압 sag 파형을 나타낸다. 이 그림에서 정상상태 전압이 거의 30% sag가 발생함을 알 수 있다.

EMTDC/PSCAD를 이용하여 PI 제어에 의한 시뮬레이션 결과 그림 5와 같다.

PI 제어에 비교하여 LQR 제어기의 과도 응답 특성이 우수함을 알 수 있고 PI 제어의 높은 진동 응답과 비교하여 LQR 제어기의 보다 완만한 캐도는 전력 전자 소자의 보다 좋은 성능 및 제어각의 감소를 기대할 수 있다. 또한 제어각의 감소는 낮은 전도 손실 및 낮은 정격의 전력전자 기기를 기대 할 수 있다.

본 논문에서 어느 정도의 전압 sag는 무효전력 주입만으로 보상이 가능함을 알 수 있다.[7]

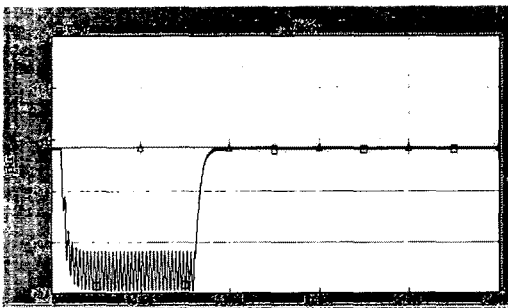


그림 4. 제어전의 전압 응답

5. 결 론

DSTATCOM의 선형 모델을 제안하였고, 이를 배전 계통의 전력 품질 향상을 위해 2가지의 전압 제어 기술을 적용하였다. 1선 지락 사고시에 본 논문에서 제시한 방법을 이용한 시뮬레이션을 통해 전압 sag가 개선됨을 보였고 LQR 제어에 의한 제어가 기존의 제어 방식보다 응답특성이 우수함을 EMTDC/PSCAD를 이용하여 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원(과제번호: 제00-021호)에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

PI 제어기의 비례이득 K_p 는 0.5, 적분 이득 K_i 는 32.34로 두었다.

LQR 제어에서는 R의 가중치를 40, Q의 가중치는 50,000으로 두었을 때 만족할 만한 성능함수를 얻을 수 있었다. LQR 제어의 크기에 대한 응답은 그림 6에 나타내었다.

- [1] K.Chan, and A. Kara, "Voltage sags mitigation with an Integrated Gate Commutated Thyristor based Dynamic Voltage Restorer," Harmonics and Quality of Power Proceedings, Proceedings. 8th International Conference On Volume:1, 1998, pp.561 -565
- [2] Sang-Yun Yun, Jung-Hwan Oh, Seong-Jeong Rim and Jae-Chul Kim, "Mitigation of Voltage Sag Using Feeder Transfer in Power Distribution System," Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conference, vol 3. July 2000, pp.1421 -1426
- [3] C.Schauder and H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static VAR compensator," IEE Proceedings-C, vol 140, no. 4, July 1993
- [4] Chi-Tsong Chen, Linear System Theory and Design: Oxford University Press, 1999
- [5] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, Feedback control of Dynamic systems: Addison Wesley, 1994
- [6] Donald E. Kirk, Optimal Control Theory: Prentice Hall, 1970
- [7] Math H.J.Bollen, Understanding Power Quality Problems: IEEE Press, 2000, pp 430 - 435

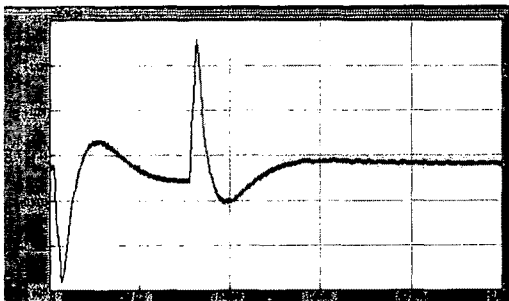


그림 5. PI제어에 의한 전압 응답특성