

3상 Voltage Source Converter의 소신호 모델에 관한 연구

금문환, 김환용, 한상규, 노정욱, 홍성수
 국민대학교 전력전자 연구소

A Study on Small-signal Model of Three-Phase Voltage Source Converter

Moon-Hwan Keum, Hwan-yong Kim, Sung-Soo Hong, Sang-Kyoo Han, Chung-Wook Roh
 Kookmin University Power Electronics center

ABSTRACT

Voltage Source Converter(VSC)는 입력전류와 전압을 동상의 정현파로 제어할 수 있고, 전압을 승압하여 일정한 DC전압을 만들 수 있으며, 양방향 제어가 가능하다. 본 논문은 3상 VSC를 동기회전좌표계로 변환하여 등가회로로 모델링하고, VSC의 제어기와 소신호 등가모델을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 회로해석과 소신호 등가모델의 타당성을 검증하였고, 실험결과를 통하여 제어기를 설계의 타당성을 증명하였다.

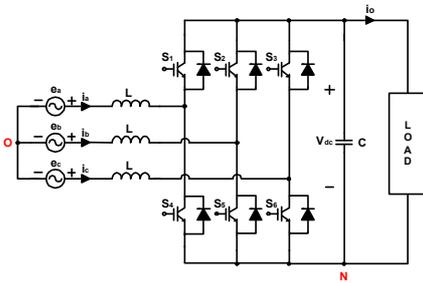


그림 1 VSC 구성도

1. Introduction

기존 AC/DC 컨버터는 SCR이나 Diode를 사용하는 3상 정류기를 사용하여 전력의 단방향성과 낮은 역률, 고조파 문제가 생김으로 전력 계통에 악영향을 끼치기 때문에 안정된 전원 전력이 요구되는 정밀 부하기의 오동작 및 과손이 야기 될 수 있다. 이에 대한 해결책으로 전력용 스위칭 소자로 구성되고 정류와 회생능력을 가지는 AC/DC 컨버터가 사용되고 있다. Voltage Source Converter(VSC)는 입력전류를 정현파로 제어할 수 있어 고조파 성분을 감소시킬수 있고, 입력전압과 동상으로 제어하여 역률을 좋게 할 수 있으며, DC Link 전압을 승압시키면서 일정하게 유지시킬 수 있다. 만약, 회생에너지가 발생하여 DC Link 전압이 상승하게 되었을 때, 3상 정류 시스템의 경우 에너지를 교류전원측으로 되돌릴 수 없기 때문에 회생에너지를 소모하는 저항을 설치하여 소모하였으나, VSC는 양방향으로 제어가 가능하기 때문에 회생 에너지가 발생할 경우 교류전원측에도 회생시킬 수 있어서 에너지 사용을 효율화 할 수 있다. 이러한 장점들로 3상 VSC는 고성능의 구동시스템이나 DC-bus를 공통으로 가지는 멀티 구동시스템에 사용된다.

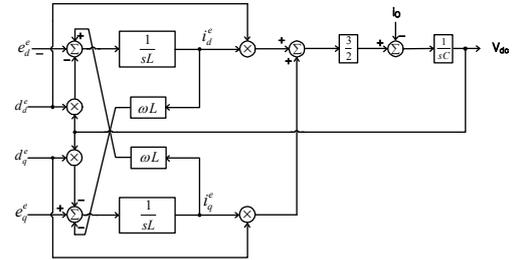


그림 2 VSC 동기 회전 좌표계 블록도

본 논문은 3상 VSC의 공간전압 벡터 변조기법과 동기회전좌표로 변환된 무효성분 전류와 무효성분 전류를 제어하는 제어기를 설계하기 위해 DQ 변환을 사용하여 3상 회로를 다루기 쉬운 등가회로로 모델링하였으며, 시스템의 정특성 및 동특성을 해석하였다. 시뮬레이션을 통해 회로해석과 모델링의 타당함을 검증하였으며, 이를 바탕으로 제어기의 설계를 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.

시스템의 모델링을 위해 스위칭 소자는 이상적이며 스위칭으로 인한 고조파 성분은 기본파에 영향을 주지않고, 평형 3상 시스템이고, 인덕터의 저항과 선의 저항은 없다고 가정을 하였다.

이와 같이 가정을 하였을 때 그림 1에서 캐패시터의 전류와 인덕터의 전압을 식 (1)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L \frac{di_a}{dt} = e_a - (V_{dc}d_a + V_{NO}) \quad (1)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = e_b - (V_{dc}d_b + V_{NO}) \quad (2)$$

$$L \frac{di_c}{dt} = e_c - (V_{dc}d_c + V_{NO}), V_{NO} = -\frac{V_{dc}}{3}(d_a + d_b + d_c) \quad (3)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_a d_a + i_b d_b + i_c d_c - i_o \quad (4)$$

여기서 i_a, i_b, i_c 는 선전류이며, e_a, e_b, e_c 는 상전압이고, d_a, d_b, d_c 는 각 상의 스위칭 시비율이다. 여기서 3상시스템을 동기회전좌표 변환식을 이용하여 식(1)~(4)을 동기회전 좌표로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.[1]

$$L \frac{di_d^e}{dt} = e_d^e + wL i_q^e - V_{dc}d_d^e \quad (5)$$

$$L \frac{di_q^e}{dt} = e_q^e + wL i_d^e - V_{dc}d_q^e \quad (6)$$

2. A Mathematical Model of a VSC

VSC의 정특성 및 동특성을 파악하기 위해서는 시스템의 해석이 필요하고, 3상 회로는 모델링하기가 어렵고 번거롭다. 그래서 DQ변환을 사용하여 동기회전 좌표로 변환하여 해석하였다.

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (\hat{i}_d^e \hat{d}_d^e + \hat{i}_q^e \hat{d}_q^e) - i_o \quad (7)$$

위에서 유도한 식 (5)~(7)을 블럭도로 나타내면 그림2와 같다.

3. Control of The VSC

$$\hat{i}_d^{e*} = (K_p + \frac{K_I}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (8)$$

$$V_d^{e*} = e_d^e + wL\hat{i}_q^e - (K_p + \frac{K_I}{s})(\hat{i}_d^{e*} - \hat{i}_d^e) \quad (9)$$

$$V_q^{e*} = e_q^e + wL\hat{i}_d^e - (K_p + \frac{K_I}{s})(\hat{i}_q^{e*} - \hat{i}_q^e) \quad (10)$$

그림 2의 블럭도를 이용하여 외부루프에는 DC link 전압제어기를 식(8)로 나타내었고, 내부루프의 전류제어기를 식(9), (10)으로 나타내었다. 우선 외부루프의 전압제어기는 식(8)과 같이 DC Link 기준지령치와 DC Link전압과의 편차가 비례적분되어 동기회전자표계의 유효성분전류의 기준지령치(\hat{i}_d^{e*})가 된다. 외부루프 전류제어기는 식(9)와 같이 \hat{i}_d^{e*} 와 교류입력측 유효성분전류 검출치(\hat{i}_d^e)와 비교된 편차가 비례적분된 값과 속도기전력과 전원전압의 유효성분전압(e_d^e)이 더해져서 유효성분전압의 기준지령치(V_d^{e*})를 얻는다. 또한 위의 식(10)과 같이 무효성분전류의 기준지령치(\hat{i}_q^{e*})는 역률을 1로 만들기 위해 0으로 놓고, 교류입력측 무효성분전류 검출치(\hat{i}_q^e)와 비교해 위의 식(11)과 같은 방식으로 무효성분전압의 기준지령치(V_q^{e*})를 얻는다. 이 기준지령치들을 d-q정지좌표값으로 변환하고 공간벡터변조기법에 의해 PWM을 발생시켜 VSC를 제어한다.

4. Small signal Model of The VSC

그림 3은 VSC의 제어기에서 전류 제어 루프를 블럭도로 나타낸 것이다. 여기서 G_I 는 비례적분 제어기를 제외한 전류 제어 루프의 게인으로 식(11)와 같다.

$$G_I = \frac{1}{sL} \quad (11)$$

그림 4는 VSC의 제어기에서 전압 제어 루프를 블럭도로 나타낸 것이다. 여기서 전압제어기의 비례적분 제어기의 출력으로 나온 \hat{i}_d^{e*} 와 \hat{i}_q^{e*} 는 전류제어기가 전압제어보다 빠른 동특성을 가지므로 같다고 보고 해석한다. G_V 는 \hat{i}_d^e 와 V_{dc} 의 관계로 다음과 같이 유도된다. 식 (7)을 변형시켜서 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$V_{dc} = \frac{1}{sC} \left\{ \frac{3}{2} (\hat{i}_d^e \hat{d}_d^e + \hat{i}_q^e \hat{d}_q^e) - i_o \right\} \quad (12)$$

위의 식은 비선형시스템이므로 Perturbation 기법을 사용해 선형화하여 정리하면 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{V}_{dc} = \frac{1}{sC} \left\{ \frac{3}{2} (\hat{i}_d^e D_d^e + \hat{i}_q^e \hat{d}_d^e + \hat{i}_q^e D_q^e + \hat{i}_d^e \hat{d}_q^e) - \frac{\widehat{V}_{dc}}{R_o} \right\} \quad (13)$$

식(14)에서 R_o 는 Load를 나타내고, 정상상태의 I_q^e 는 0이고 \hat{i}_d^e 와 \widehat{V}_{dc} 의 관계를 알기위하여 식(12)을 선형화하면 식(14)로 나타낼 수 있다.

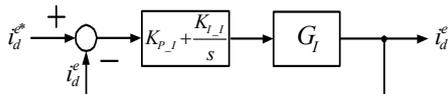


그림 3 전류 제어 루프 블럭도

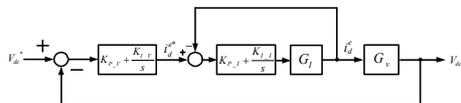


그림 4 전압 제어 루프 블럭도

$$G_V = \frac{\widehat{V}_{dc}}{\hat{i}_d^e} \Big|_{\hat{d}_d^e=0, \hat{d}_q^e=0} = \frac{1.5 D_d^e R_o}{1 + s C R_o} \quad (14)$$

G_I 와 G_V 를 구해 전압제어기와 전류제어기의 loop gain을 구할 수 있고, 제어기를 쉽게 설계할 수 있다.

5. Experimental Result and Simulation

제안된 모델의 타당성을 검증하기 위해서 시스템과 소신호 등가 모델의 loop gain을 Psim 시뮬레이션을 통하여 Magnitude와 Phase로 확인하였다. 실험사양으로 입력교류전원의 선간전압 100V 60Hz, 출력전압 $V_{dc} = 350V$, 출력전류 $i_o = 10A$, 스위칭 주파수 $f_s = 20kHz$, 인덕터 $L = 1mH$, 출력캐패시터 $C = 2.64\mu F$ 으로 회로를 구성하였다. 그림 5는 시뮬레이션의 결과로서 시스템과 제안된 모델링의 Magnitude와 Phase가 모두 일치함을 증명하였다. 그림6은 실험으로 실제로 DC Link전압이 350V로 유지되고 상전압과 선전류가 동상으로 제어됨을 확인할 수 있다.

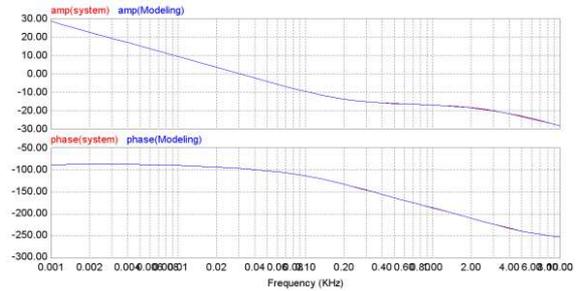


그림 5 VSC 시스템과 소신호 등가 모델의 Magnitude와 Phase

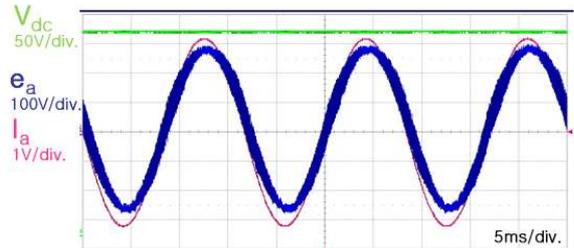


그림 6 VSC 실험파형

6. Conclusion

DQ 변환을 통해 VSC를 3상 시스템에서 다루기 쉬운 동기회전좌표로 변환하여 등가회로를 해석하였으며, 이로부터 모델링을 통하여 제어기를 설계하고 시스템의 특성을 파악하였다. 본 논문에서 제안한 모델을 통해서 loop Gain과 시스템 안정도를 예상할 수 있으며, 사양에 따라 쉽게 제어기를 설계할 수 있음을 Psim 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명하였다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(NIPA-2010-C1090-1021-0005)

참고 문헌

- [1] Vladimir Blasko, "A Novel control to Actively Damp Resonance in Input LC Filter of a Three-Phase Voltage Source Converter", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 33, NO. 2, MARCH/APRIL 1997.