

다단 인버터 STATCOM의 직류전압 평형 제어

김경진 송승호 정승기
광운대학교 전기공학과

DC Voltage Balancing Control for Multilevel H-Bridge STATCOM

Kim, Kyoung-Jin Song, Seong Ho Jeong, Seung-Gi
Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

This paper proposes a balancing control of DC-link voltages of a H-bridge multilevel inverter for STATCOM application. Individual DC link voltage is controlled by simply adjusting the d-q voltage reference through a PI controller in each cell while the main controller carries out the reactive power control. The correctness and effectiveness of the method are validated by PSIM simulation with unbalanced load condition data taken from a typical arc furnace load, showing the adverse effects of load unbalance to DC link voltage significantly suppressed.

1. 서 론

다단 H-브릿지 인버터의 제어에서 개별 셀인버터들의 직류단 전압 사이에 평형을 유지하는 것은 매우 중요하다. 직류단 커패시터의 전압평형에 관한 여러 논문들이 발표된 바 있다. [1]에서는 각 H-Bridge 인버터들의 위상을 조정하여 직류단 커패시터의 전압평형이 이루어지도록 하였다. 그러나 위상 조절은 안정화시키기가 어렵고 잘못된 위상 조정은 시스템의 불안정성을 증가시킬 수 있다는 문제를 지니고 있다. [2]에서는 클러스터 제어와 개별 평형 제어방식을 제안하고 있다. 먼저 삼상 커패시터 전압평형을 제어하고, 각 상의 전압을 개별 제어한다. 그러나 이 방법은 구현이 복잡하고 제어기의 파라미터를 구하는 게 어렵다는 단점이 있다. [3]에서는 전압제어를 위하여 공통 커플링 버스를 이용하지만, 가격이 상승하게 된다. 한편 독립 평균 전압제어 방식이 [4]에서 제안되었으나, 유효전력 분배가 기반이지만 이를 찾기 위해 인버터의 출력전압과 출력전류의 위상차이가 필요한데 이의 구현이 어렵다.

본 논문에서는 STATCOM으로 적용되는 다단 H-브릿지 인버터에서의 직류단전압의 평형방식을 다루고 있다. 주제어기에서 무효전력을 보상해 주며 각 상의 셀제어기는 각각의 직류단 커패시터전압평형을 제어해주게 된다. 제안하는 제어기는 각 상의 전압을 각각 제어하기 때문에 안정성이 높다는 강점을 가지며, 마스터는 단순 무효전력 보상만 하기 때문에 부담이 적게 된다. 또한 제어기의 구성이 간단하여 여러 시스템에 간단히 적용할 수 있다는 장점을 가진다.

2. d-q 전류제어를 이용한 직류전압 평형 제어

2.1 무효전력 보상 장치 구성.

전체 Cascade STATCOM의 구성도를 그림 1에 보이고 있다. 전체 구성은 다음과 같다. 적용 모델은 전기 아크로용 부하에 맞추어 구성되어 있으며, 계통 전압 110kV이고, Y- Δ 변압기를 통하여 20kV로 출력된다. STATCOM의 제어기는 실제 무효전력을 보상하는 Master와 각각의 단상 인버터의 전압을 제어하고 PWM을 발생시키는 18개의 CELL로 구성되어 있다. Master에서는 전체 무효전력을 보상해주게 되고 각 Cell에서는 직류단 커패시터를 제어해주게 된다.

Master는 전류제어, PLL, 무효전력량 계산을 하게 되며 이를 위해 3상 전원 전압, 3상 부하전류 및 전압, 3상 제어전류 등을 검출하여 각 Cell에 보내주게 된다. 이때 d축 전류는 무효전력을 제어하며 q축은 유효전력을 제어하게 된다.

그림 2에서는 전체 제어블럭도를 보여주고 있다 그림 2에서 보이는 바와 같이 Master에서는 d-q축 제어를 한다. d-q축 전류제어를 할 때 무효전력은 d축 전류제어기가 하게 되고, q축 전류제어기는 유효전력을 제어하게 된다. 출력 레퍼런스는 각 Cell제어기로 들어가게 되고 각 Cell 제어기에서는 이 정보를 받아 직류단 커패시터 전압 평형 제어를 한다.

여기서 I_{ds} , I_{qs} 는 d,q축 전류이고, V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 는 계통 3상 상전압이다. 3상 상전압에서 PLL을 하여 위상을 검출하게 되고, 무효분 전류를 계산하여 Cascade STATCOM에서 출력하게 된다.

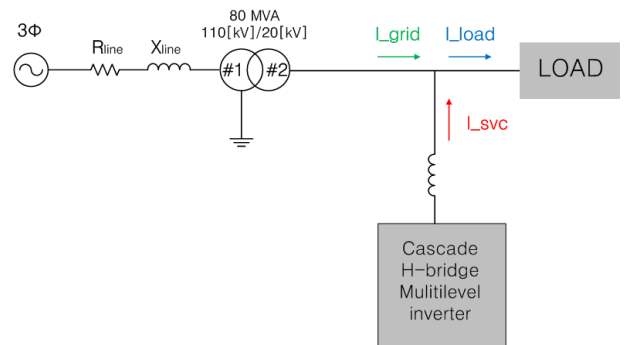


그림 1 시스템 구성도

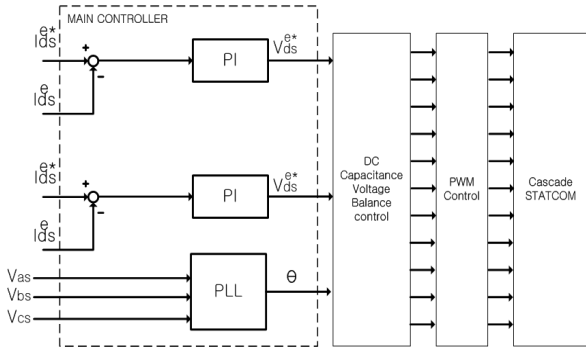


그림 2 전체 제어기

2.2 직류 전압 평형 제어

그림 3에서는 각 Cell 단상 인버터의 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 3에서 보이는 제어 블록도는 각 상 Cell 제어기의 하나의 제어 블록도이다. 본 논문에서는 각 상당 6 series, 즉 총 18개의 단상 인버터를 쓰고 있으므로, 전체 시스템에서는 총 18개의 Cell 제어기와 하나의 Master로 구성되게 된다. 이때 각 상에 있는 하나의 제어기가 가지는 제어 블록도를 그림 3에서 보이고 있으며, 여기서 V_{dc} 는 각 인버터 스택의 직류단 커패시터 값이다. V_{qs}^* 와 V_{ds}^* 는 Master에서 전달 받은 레퍼런스 값이다. 이와 함께 Master에서 PLL하여 받은 Theta값을 각 상 Cell 제어기에 전달해주게 되며 전달 받은 값과 각 단상 인버터 직류단 커패시터의 값 V_{dc} 를 받게 된다.

그림 2에서 보던 전체 Master에서 각 상의 Cell제어기에 무효전력을 보상한 값을 주게 되고, 각 Cell에서는 V_{qs}^* 와 V_{dc} 를 받아 각각의 직류단 커패시터 전압 평형을 제어하게 된다. 직류단 커패시터를 제어하기 위해 PI제어기를 사용하였다.

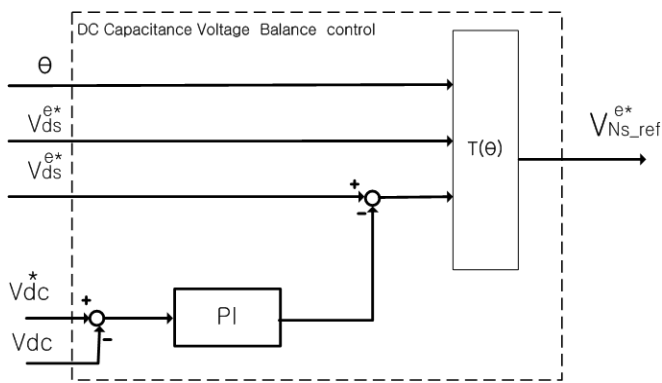


그림 3 Cell 전압 평형 제어기

2.3 직류 전압 평형 제어기의 전달 함수

전원측에서 공급되는 유효전력을 계산하면 다음과 같다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 입력전력과 관계된 전류는 동기좌표계 q축 전류이고, d축 전류와는 무관하다. 그러므로 q축 전류는 유효전력과 관계있는 유효전력분 전류로 생각할 수 있다. d축 전류는 유효전력과 무관하며 무효전력과 관련이 있는 무효

전력분 전류이고, 역률을 제어할 수 있는 전류이다. 여기서 e_a , e_b , e_c 는 전원 전압, i_a , i_b , i_c 는 상전류이고 'E'는 상전압의 최대치이다. 또한 e_q^e , i_q^e , e_d^e , i_d^e 는 각각 d-q축으로 변환한 q축 전압, 전류와 d축 전압 전류이다.

$$P_{in} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = \frac{3}{2}(e_q^e i_q^e + e_d^e i_d^e) = \frac{3}{2}E i_q^e \quad (1)$$

STATCOM에서 실제로 보상해주는 것은 무효분 전력만이고 유효분은 입출력은 없다. 그러므로 유효분 출력전력은 0이 된다. 식 (2)에 직류링크 방정식을 나타내었다. 여기서 C는 직류링크 커패시턴스이고, V_{dc} 는 직류단 전압, P_{in} 과 P_{out} 은 각각 입력 전력과 출력전력이다.

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (2)$$

케환제어기를 사용하는 경우에는 q축 분이 직류단 커패시터 전압에 관계되어 있다. 이때, q축 전류에서는 d축 무효분 전류는 외란으로 나타나게 된다. 이러한 외란을 보상하고 PI제어기를 사용하는 경우 전류는 다음의 식처럼 나타나게 된다.

$$i_q^e = [(V_{dc} - V_{dc}^*)K_p + K_i \int (V_{dc} - V_{dc}^*)dt] / (R + L_s) \quad (3)$$

q축 전류제어가 완벽하고 부하측에서 소비하는 전력에 대한 보상이 완벽하다면 식 (1),(2)와 (3)으로부터 다음과 같은 식을 구할수 있다.

$$CV_{dc0} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}E [(V_{dc} - V_{dc}^*)K_p + K_i \int (V_{dc} - V_{dc}^*)dt] / (R + L_s) \quad (4)$$

(4)식으로부터 설계한 전압제어기의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다. 또한 하나의 셀 전압제어기의 제어 블록도를 그림 4에 나타내었다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{3}{2}E \frac{K_i s + K_p}{LCV_{dc0} + K_i L}}{s^2 + \frac{V_{dc0}R + K_i R}{LCV_{dc0} + K_i L} + \frac{RK_p}{LCV_{dc0} + K_i L}} \quad (5)$$

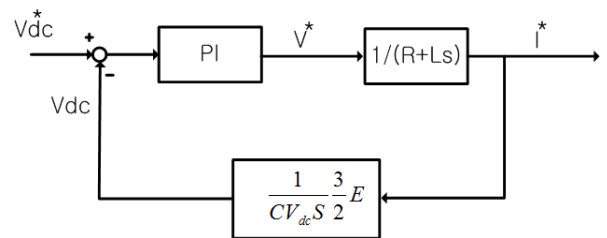


그림 4 전압 제어기 블록도.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 구성

그림 5에는 시뮬레이션 구성을 나타내었다. 가운데 부분에 있는 DLL이 Master제어기 이다. 시뮬레이션 구성은 1개의 Master와 18개의 Cell제어기로 구성되어 있다. 부하는 가변적인 특성을 지닌 전기 아크로이며 이를 구현하기 위해 DLL과 PSIM의 IVCCS라는 소자를 이용하였다. 직류단 커패시터의 변동은 계통으로 연결된 부하가 변동이 적다면 크게 나타나지 않는다. 실제로 무효전력을 보상해 준다 하더라도 부하단에서 불평형이 일어나지 않는다면, 큰 변동은 일어나지 않는다. 이번 시뮬레이션에서 사용한 부하는 1MVA급의 전기 아크로로 설정되어 있으며, 실제 계통과 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

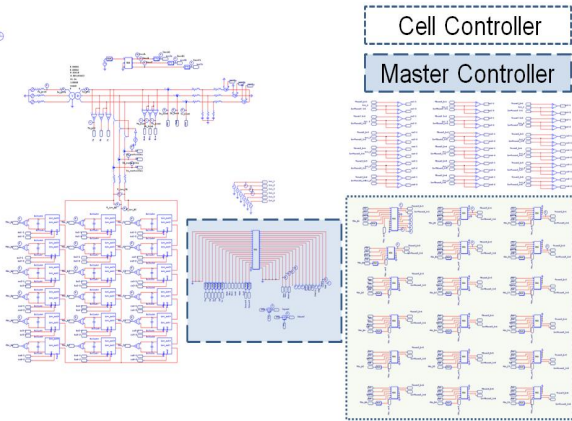


그림 5 시뮬레이션 구성도

그림 5에서 수행한 시뮬레이션 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 먼저 그림 6은 전압평형제어를 안했을 경우의 직류단 커패시터 전압 파형이고, 그림 7은 전압평형을 한 상태에서의 직류단 커패시터 전압 파형이다. 그림 6과 그림 7은 전압을 각각 50~300V 사이로 전압 불평형인 조건에서 실제 제어기의 특성을 확인해 보았다. 그림 6에서의 직류단 커패시터 전압은 불평형인 부하 특성 때문에 상당히 심하게 왜곡됨을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7에서 전압평형 제어를 했을 경우 직류단 커패시터 전압 평형 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8에는 실제 부하 상태와 무효전력 보상이 되는 과정을 보여주기 위해 STATCOM의 출력 전류를 나타내었다. 위에서 언급한대로 불평형 부하일 때 직류단 커패시터에는 큰 악영향이 나타나게 되고, 이때 직류단 커패시터의 전압 제어를 수행하였다. 그림 8의 전류 및 전압은 전기 아크로의 부하 특성을 이용하였으며, 전기 아크로의 카오스적인 특성 때문에 실측 데이터를 이용하여 부하를 구성하였다.

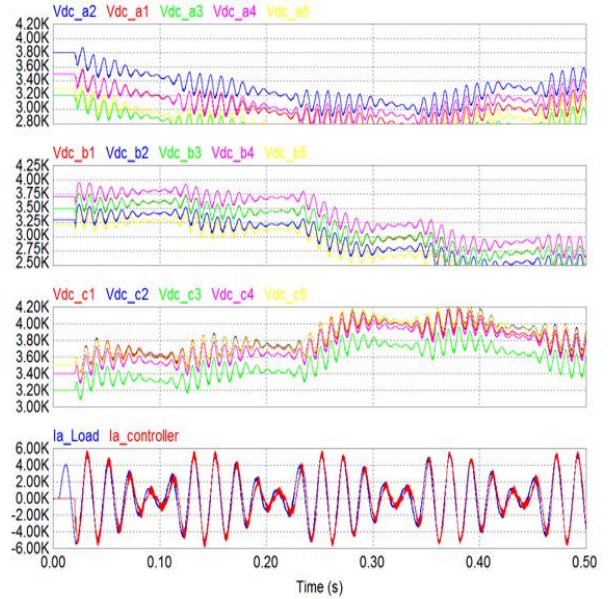


그림 6 평형 전압 제어 없을 경우.

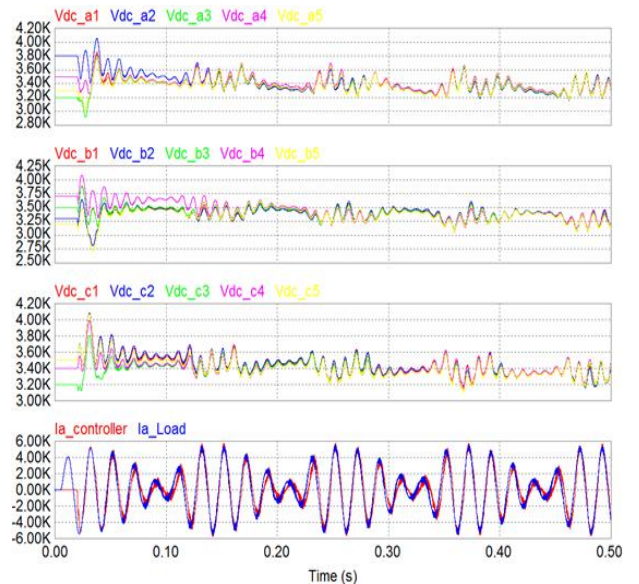


그림 7 평형 전압 제어 할 경우

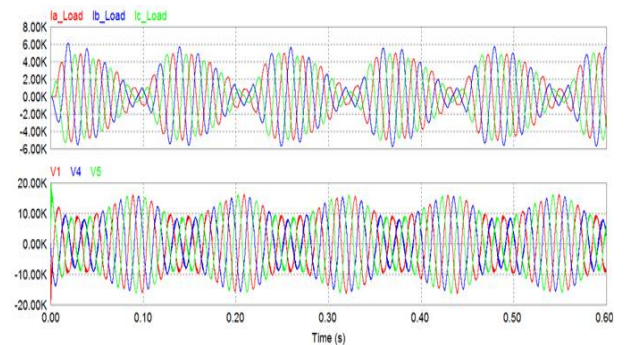


그림 8 부하 전압, 전류

3. 결 론

본 논문은 불평형 부하를 가지는 계통의 무효전력 보상시 H-브릿지 다단 STATCOM의 DC Link 전압 평형 제어에 관하여 서술하였다. 기존의 다른 제어 방식에 비하여 간단히 구현 할 수 있고, PSIM에서 실제의 특성을 가지고 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에서 부하로 불평형 특성이 극심한 전기를 대상으로 함으로써 STATCOM의 DC Link 전압 평형 제어시의 특성을 확인할 수 있었다. 현재 DSP28335를 이용하여 축소모델을 사용한 실험이 진행 중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] F.Z. Peng, J.s. Lai. A multilevel Voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation [J], IEEE Trans On industry applicaions, 1997, 32(5): 1130-1137
- [2] Yoshil T., Inoue s., Akagi H. Control and Performance of a Medium-Voltage Transformerless Cascade PWM STATCOM with Star-Configuration[C]. IEEE41st IAS Annual Meeting, 2006.,volume 4 : 1716-1723
- [3] M.L. Woodhouse, M.W. Donoghue, M.M. Osbome, Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM converter[C]. seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, 2001 : 84-90
- [4] Barrera J.A., Marroyo L., Vidal M.A.r, Apraiz J.R.T Individual Voltage Balancing Strategy for PWM Cascaded H-Bridge Converter-Based STATCOM [J]. IEEE Trans. On Industry Electronics, 2008, 55(1):1512-1521
- [5] Yidan Li, Bin Wum, A Novel DC Voltage Detection Technique in the CHB Inverter-Based STATCOM IEEE Transactions on power delivery, Vol. 23, NO. 3, JULY 2008