

LCL 필터가 적용된 직류배전용 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 예측제어기법

홍석진, 강동주, 현승욱, 강진욱, 원충연
성균관대학교

The Predictive Control Method of 3-Level NPC AC/DC PWM Converter applying LCL Filter for DC distribution

Seok Jin Hong, Dong Joo Gang, Seung Wook Hyun, Jin Wook Kang, Chung Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 LCL필터가 적용된 대용량 3 Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 출력 DC 전압 동특성을 향상시킬 수 있는 방법으로 예측제어기법을 적용하였다. 예측제어를 위하여 LCL필터와 3 Level NPC 컨버터를 모델링하고, 시뮬레이션을 통하여 제안하는 방법의 제어성능을 검토하였다.

1. 서 론

최근 신재생에너지에 대한 관심이 급증함에 따라, 스마트 그리드와 마이크로 그리드 같은 별도의 전력망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 전력망에는 대전력, 고전압을 사용하기 때문에 멀티레벨 전력변환장치의 적용이 필수라 할 수 있다. 특히 3 Level NPC 토폴로지는 2 Level 컨버터와 유사한 제어방식을 적용할 수 있으면서, 스위칭 소자에 인가되는 전압을 절반으로 줄일 수 있는 장점 때문에 주목받고 있다. 이러한 3 Level NPC는 기존의 교류계통과 직접적으로 연결되는 스마트 그리드, 마이크로 그리드 내에 별도의 직류 배전망을 구성한다. 3 Level NPC에서 스위칭으로 인하여 발생하는 고조파를 최소화 하기 위해 교류계통측에 필터를 요구하는데 대용량 시스템에서는 부피대비 고조파 저감효과가 우수한 LCL필터의 사용이 일반적이다. 한편 3 Level NPC 컨버터의 출력은 커패시터를 이용하여 직류전압을 유지하는데, 커패시터의 고유한 특성으로 순간적인 부하의 변동에 따라 직류전압이 변화한다. 직류 배전망내의 DC bus전압의 신뢰성과 안정성을 위해서는 이러한 순간적인 전압의 변화를 최소화할 필요가 있다. 본 논문에서는 대용량 마이크로 그리드와 같은 대용량 직류배전 시스템에서 LCL필터가 적용된 3 Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 출력전압 안정화를 위한 방법으로 Model Predictive Control(이하 MPC)를 적용하였다. MPC의 적용을 위하여 LCL 필터와 3 Level NPC AC/DC PWM 컨버터를 모델링하고 그 제어성능을 PSIM을 이용한 시뮬레이션으로 확인하였다.

2. LCL 필터가 적용된 3-Level NPC의 모델예측제어(MPC)

1.1 시스템 모델링

그림 1은 LCL필터가 적용된 3 Level AC/DC PWM 컨버터

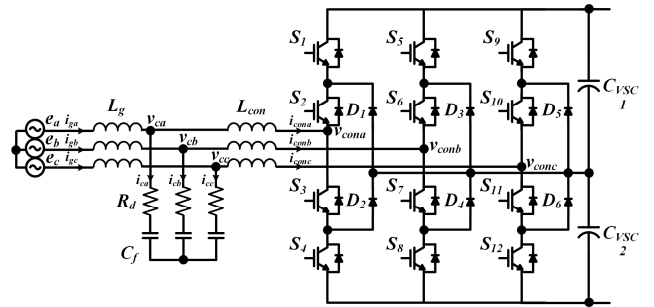


그림 1 LCL필터가 적용된 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터
Fig. 1 3-Level NPC AC/DC PWM Converter applying LCL filter

의 회로도도를 보여준다. 계통 입력 전원과 AC/DC PWM 컨버터 사이의 상태방정식을 구하기 위하여 미분방정식으로 표현하면 아래와 같다.

$$v_{con}(t) = -L_{con} \frac{di_{con}(t)}{dt} + v_c(t) \quad (1)$$

$$v_c(t) = e(t) - L_g \frac{di_g(t)}{dt} \quad (2)$$

$$i_g(t) = i_{con}(t) + i_c(t) \quad (3)$$

여기서 v_{con} , v_c , e , i_{con} , i_g , i_c 는 차례로 컨버터의 출력전압, 필터 커패시터측 전압, 계통전압, 컨버터측 전류, 계통측 전류, 필터 커패시터측 전류를 의미한다. 위 식에서 di/dt 는 오일러 포워드 방식에 의하여 식 (4)와 같이 정리된다.

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (4)$$

따라서 식 (1)~(3)에 식 (4)를 적용하여 이산시간 모델로써 수식을 다시 정리하면 아래와 같다. 이를 이용하여 AC/DC PWM 컨버터에서 출력되는 전류의 예측제어를 위한 수식을 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$v_{con}(k) = -\frac{L_{con}}{T_s} [i_{con}(k+1) - i_{con}(k)] + v_c(k) \quad (5)$$

$$v_c(k) = e(k) - \frac{L_g}{T_s} [i_g(k+1) - i_g(k)] \quad (6)$$

$$i_g(k) = i_{con}(k) + i_c(k) \quad (7)$$

식 (5)~(7)을 이용하여 (k+1)시점에서의 전류(i_{c_v})값 아래 수식에 따라 예측할 수 있다.

$$i_{con}(k+1) = \frac{T_s}{L_{con}}[e(k) - v_{con}(k)] - \frac{L_g}{L_{con}}[i_g(k) - i_g(k-1)] + i_{con}(k) \quad (8)$$

식 (8)에서 $[i_g(k) - i_g(k-1)]$ 는 필터 커패시터에 직렬로 구성된 댐핑저항을 이용하여 식 (7)에 따라 측정하였다. 식 (8)로부터 현재시점(k)에서 컨버터에서 출력되는 전압(v_{con})을 제어함으로써 (k+1)시점에서의 전류를 예측할 수 있다.

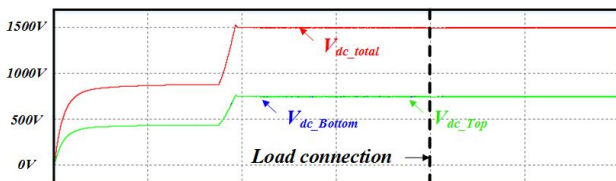
3. 시뮬레이션

제안하는 모델예측제어기법의 제어성능을 검증하기 위하여 PowerSIM을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 적용된 파라미터를 보여준다.

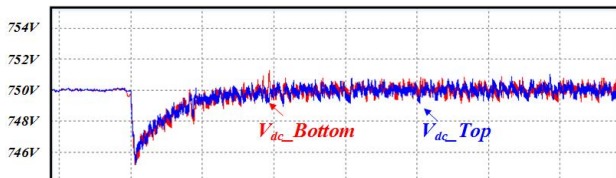
표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

Item	Value	Item	Value	
Power	260 [kW]	V_{dc_Link}	1500 [V _{dc}]	
V_{LL}	630 [V _{rms}]	LCL Filter	L_{con}	100 [μ H]
f_{sw}	10 [kHz]		C_f	50 [μ F]
f_{res}	3.898 [kHz]		L_g	50 [μ H]

제안하는 직류배전 시스템은 3 Level NPC 컨버터의 직류 출력 전압을 DC bus 전압으로 사용하며 양극성 배전구조를 갖는다. 따라서 ± 750 [Vdc], 1500[Vdc]로 총 3종류의 전압을 이용 가능하지만 본 논문에서는 1500[Vdc]에서 부하가 인가되었을 때의 시뮬레이션을 진행하였다.



(a) 출력 DC 전압제어

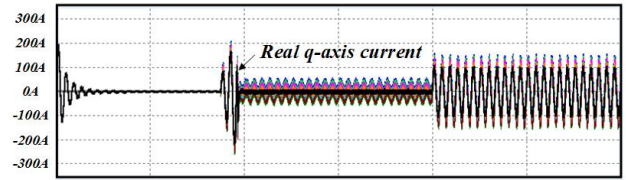


(b) 상/하단 커패시터의 전압파형

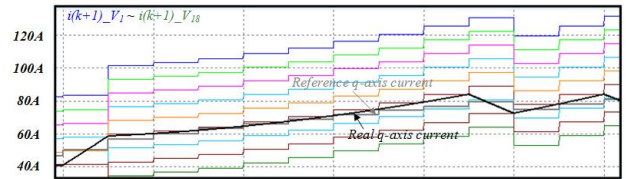
그림 2 제안하는 시스템의 모델예측제어(MPC)
Fig. 2 Model Predictive Control of proposed system

그림 2는 LCL필터가 적용된 3 Level NPC AC/DC PWM

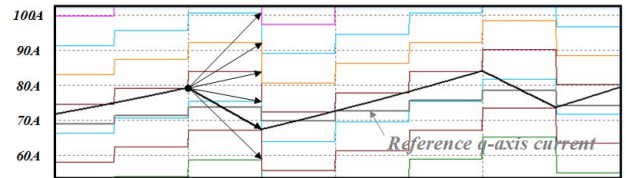
컨버터의 출력 직류 전압제어에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 제안하는 시스템의 제어에는 모델예측제어가 적용되었다. 그림 2로부터 지령전압을 정상적으로 추종하는 모습과 NPC 컨버터의 출력 커패시터의 균형제어가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) q축 전류제어 파형



(b)



(c) q축 관련 벡터지령에 대한 응답파형

그림 3 q축 전류의 모델예측제어 결과

Fig. 3 MPC results of q-axis current

그림 3은 동기좌표계상의 q축 전류에 대한 모델예측제어 시뮬레이션 결과이다. 실제 q축 전류의 파형이 지령전압을 정상적으로 추종하는 것을 확인할 수 있다. 모델예측제어 수행 시 각 벡터에 대하여 비용함수를 계산하는데, 계산된 비용함수로부터 최적의 벡터를 선정하여 출력한다. 그림 3 (b), (c)에서는 각 벡터에 대한 계산결과와 지령전압 추종을 위한 최적의 벡터가 선정되어 출력되는 모습을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LCL필터가 적용된 3 Level NPC AC/DC PWM 컨버터를 모델링하고 모델기반예측제어(MPC)를 적용하였다. MPC기법을 적용하였을 때 3 Level NPC 컨버터의 제어성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A2A2A05006744)

참고 문헌

[1] R. Vargas, P. Cortes, U. Ammann, J. Rodriguez, and J. Pontt, "Predictive control of a three phase neutral point clamped inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2697-2705, October, 2007