3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터를 위한 PI 및 모델예측 혼합제어

강경민*, 홍석진*, 현승욱*, 강진욱*, 원충연*
성균관대학교*

Hybrid Control of PI and Model Predictive for 3-Level NPC AC/DC PWM Converter

Kyung-Min Kang*, Seok-Jin Hong*, Seung-Wook Hyun*, Jin-Wook Kang*, Chung-Yuen Won*
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

본 눈문에서는 대전력 및 고전압 전력변환에 적용되는 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 출력 DC 전압의 전체적인 특성 향상을 위하여 PI제어와 모델예측제어의 혼합 제어 기법을 제안한다. 혼합제어를 위하여 3-Level AC/DC PWM 컨버터를 모델링하고, PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안한 혼합제어 기법의 제어성능을 검토하였다.

1. 서 론

최근 ESS 및 신재생에너지에 대한 관심 급증으로 대전력 및 고전압을 사용하는 전력망에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 전력망에는 멀티레벨 전력변환장치의 적용이 필수라 할 수 있는데, 3-Level NPC 토폴로지는 2-Level 컨버터와 유사한 방식으로 제어할 수 있으면서 스위칭 소자에 인가되는 전압을 절반으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있어 주목받고 있다. 이러한 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 출력 전압 제어 방법으로는 PI제어와 모델예측제어 방법이 있다. 모델예측제어는 PI제어보다 과도상태응답 특성과 전압 밸런싱이 뛰어나지만 정상상태 리플과 오버슈트는 PI제어보다 큰 특성을 가진다. 본 논문에서는 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터에 PI제어와 모델예측제어를 혼합 적용하여 주어진 상황에 따라 최적의 성능을 낼 수 있는 제어기법을 제안하고 그 제어 성능을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 PI제어 및 모델예측제어 특성 비교

2.1 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터

그림 1은 12개의 스위치와 6개의 다이오드로 구성된 3상 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터로 한 상이 4개의 스위치와 2개의 클램핑 다이오드로 구성되며, 모든 상의 직렬 연결된 다이오드 중성점은 DC-Link의 중성점과 연결된다. 3-Level NPC 에서는 스위칭 소자의 턴 온-오프 상태에 따라 각 상의 출력전압이 "$+V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$"로 구분된다. 이는 2-Level 시스템에 비하여 각 스위칭 소자에 인가되는 전압이 절반임을 뜻하며, 출력전류의 THD가 적은 장점이 있어 고전압, 대용량의 시스템에 주로 사용된다.

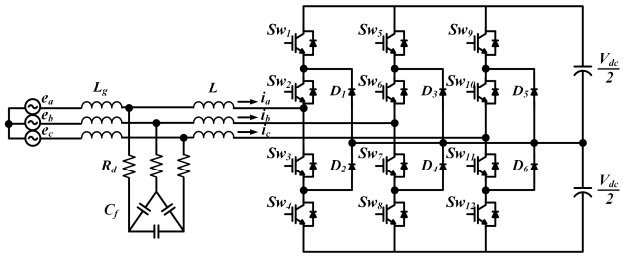

그림 1 3상 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 회로도
Fig. 1 3Phase 3-Level NPC AC/DC PWM Converter schematic

2.2 3-Level NPC의 PI 및 모델예측제어 특성 비교

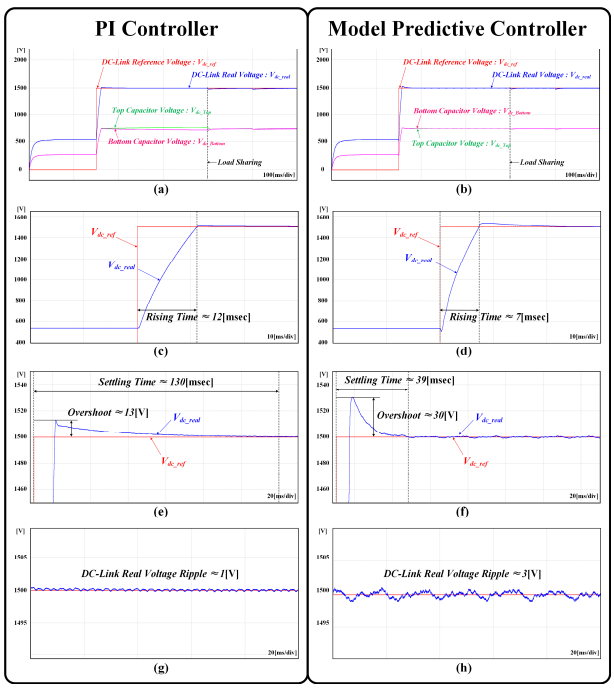

그림 2 3-Level NPC 컨버터의 PI제어 및 모델예측제어(MPC) 출력 파형
Fig. 2 PI and Model predictive control output waveform of 3-Level NPC converter

그림 2는 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 PI제어 및 모델예측제어(MPC) 출력 파형이다. 그림 2-(a)와 (b)는 각각 PI제어와 모델예측제어의 전체 출력 파형을 나타내며 (c)와 (d)는 제어응답특성 중 상승시간을, (e)와 (f)는 오버슈트와 정착시간을, (g)와 (h)는 정상상태에서의 리플전압을 보여준다. 그림 2를 통하여 모델예측제어와 PI제어의 차이점을 알 수 있는데, 그림 2-(a)와 (b)에서 DC-link의 상·하단 커패시터의 전압밸런싱 상태를 비교할 수 있다. PI제어의 경우 부하 인가 전에는 전압밸런싱이 잘 이루어지지 않다가 부하가 인가된 후에 전압밸런싱이 이루어지는 것을 확인 할 수 있는 반면, 모델예측제어는 부하 인가 전과 인가 후 모두 전압밸런싱이 잘 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 2-(c)와 (d), (e)와 (f)를 통하여 상승시간(rising time), 정착시간(settling time)이 PI제어보다 모델예측제어를 적용하였을 경우 각각 약 5[msec], 91[msec]만큼 더 단축되어 제어응답특성이 향상된 것을 확인 할 수 있다. 그러나 오버슈트(overshoot)는 PI제어보다 모델예측제어가 약 18[V]로 높게 나타났으며, 정상상태의 출력 리플이 PI제어는 약 1[V]인 반면 모델예측제어는 약 3[V]로 PI제어에 비하여 리플이 더 심한 것을 그림 2-(g)와 (h)를 통하여 확인 할 수 있다.

2.3 제안하는 PI와 모델예측제어(MPC)의 혼합제어

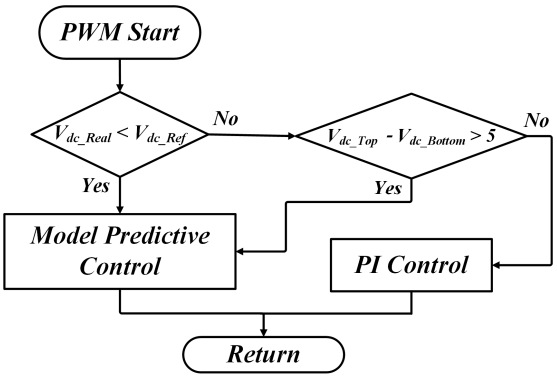

그림 3 PI 및 모델예측 혼합제어의 순서도
Fig. 3 Flowchart for hybrid control of PI and Model Predictive

그림 3은 본 논문에서 제안하는 혼합제어의 순서도이다. 제어가 시작되면 DC-Link의 실제전압(V_{dc_Real})은 지령전압(V_{dc_Ref})보다 작기 때문에 제어응답특성이 빠른 모델예측제어를 먼저 실행하여 상승시간(rising time)과 정착시간(settling time)을 단축시킨다. 실제전압이 지령전압에 도달하면 상·하단 커패시터의 전압 오차로 전압언밸런싱을 체크하게 되는데, 전압 오차가 5[V]를 초과하면 모델예측제어를 수행하여 전압밸런싱을 진행하고, 오차가 5[V] 이하이면 PI제어로 전환하여 정상상태 리플을 최소화 시킨다. 이러한 동작을 반복하여 PI제어와 모델예측제어의 장점을 동시에 구현한다.

3. 시뮬레이션

제안하는 혼합제어기법의 제어성능을 검증하기 위하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 적용된 파라미터이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

Item	Value	Item		Value
Power	250 [W]	Vdc_Link		1500 [V]
V_{rms}	380 [V]	LCL Filter	L_{con}	100 [μH]
f_{sw}	10 [kHz]		C_f	50 [μH]
f_{res}	3.898 [kHz]		L_g	50 [μH]

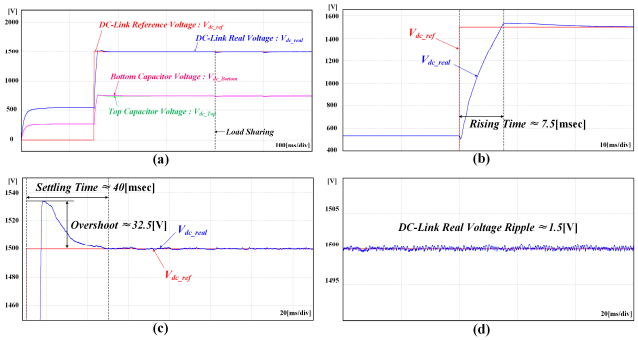

그림 4 제안하는 혼합제어의 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveform of proposed hybrid control

그림 4는 제안하는 혼합제어기법의 시뮬레이션 결과이다. 혼합제어를 적용하였을 때, 상승시간(rising time)은 약 7.5[msec], 정착시간(settling time)은 약 40[msec], 오버슈트(overshoot)는 약 32.5[V], 정상상태 리플은 약 1.5[V]로 모델예측제어보다는 약간 떨어지지만 PI제어보단 향상된 제어성능을 볼 수 있으며, 또한 그림 4-(a)에서 상·하단 커패시터의 전압밸런싱이 잘 이루어지고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 제어를 위하여 PI제어와 모델예측제어기법을 혼합적용 하였다. 제안한 혼합제어를 적용함으로 PI제어와 모델예측제어의 장점을 동시에 구현하는 것이 가능함을 3-Level NPC AC/DC PWM 컨버터의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.20152020105720)

참 고 문 헌

[1] Jose Rodriquez, Patricio Cortes, “Predictive control of power converters and electrical drives,” John Wiley & Sons Ltd, 2012.

[2] 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