

고전압 Cascaded NPC H-Bridge 인버터 설계

현승욱, 노용수, 현병조, 최준혁, 김진홍
전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터

Design of High Voltage Cascaded NPC H-Bridge Inverter

Seung Wook Hyun, Yong Su Noh, Byong Jo Hyon, Jun Hyuk Choi, Jin Hong Kim
¹Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

This paper proposed design method of DC link capacitor and leakage inductance of transformer with high voltage cascaded NPC H bridge inverter. DC link capacitor is designed based on the ripple power between input AC power and output AC power, and leakage inductance of transformer is designed based on FFT table of unipolar PWM with NPC H bridge inverter. The proposed design method is verified by simulation results of 6.6[kV], 1.2[MW] Cascaded NPC H bridge inverter.

1. 서 론

전력전자 기술 및 대용량 시스템 산업의 발달로 MW급 인버터 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 고전압 전력 반도체 및 고성능 MCU의 개발로 인해 다양한 어플리케이션에 대한 연구도 진행되고 있다. 현재까지 개발된 고전압 모터 구동용 어플리케이션으로는 SC2L(Series Connected 2 Level), DCML(Diode Clamped Multi Level), CCML(Capacitor Clamped Multi Level) 그리고 HBML(H Bridge Multi Level) 와 같이 크게 4가지 타입의 인버터가 있으며, 그 중 정격 전압 및 용량 확장성이 용이한 HBML 인버터가 가장 많은 제품화가 진행되고 있다.^[1]

HBML 인버터는 저전압 단상 H Bridge 인버터를 직렬로 연계하여 고전압 전동기를 운전할 수 있는 인버터이다. 하지만 HBML 인버터의 직렬 연계를 위해서는 개별 스택 입력에 정류기와 위상천이 변압기를 필요로 하며, 이러한 위상천이 변압기의 제작에 대한 복잡성 때문에 변압기의 구조를 단순화시킬 수 있는 Cascaded NPC H Bridge 인버터를 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 하지만 NPC H Bridge 인버터를 사용할 경우 기존 H Bridge 인버터와 다른 필터 설계 기법과 DC link 커패시턴스 설계 기법을 필요로 하게 된다.

본 논문에서는 고전압 Cascaded NPC H Bridge 인버터의 DC link 리플 전압 및 출력 전류 THD를 위한 DC link 커패시터와 기생 인덕턴스 설계 기법을 제안한다. 제안하는 DC link 커패시터 설계는 개별 스택 커패시터의 리플 전력과 허용 전압 리플을 기준으로 설계하였고, 변압기의 기생 인덕턴스는 NPC H Bridge 인버터의 전압 THD 테이블을 기준으로 설계하였다.

2. Cascaded NPC H-Bridge 인버터 설계

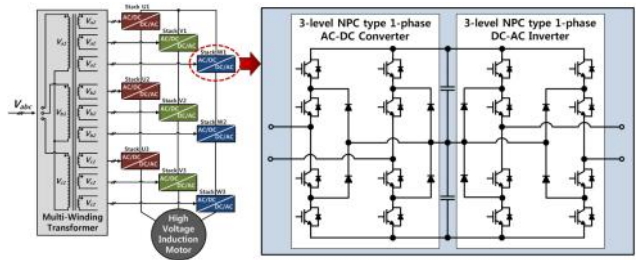


그림 1 Cascaded NPC H-Bridge 인버터 회로도
Fig. 1 Schematic of cascaded NPC H-bridge inverter

그림 1은 Cascaded NPC H Bridge 인버터 회로 구성도이다. 그림과 같이 제안하는 토폴로지는 개별 스택이 양방향 NPC 인버터로 구성되어있으며, 개별 스택의 DC link를 단상 NPC AC DC 컨버터가 제어하기 때문에 기존 HBML과 같은 위상천이 변압기가 아닌 다권선 변압기(Multi Winding Transformer)로 시스템 구성이 가능하다. 하지만 Cascaded NPC H Bridge 인버터의 경우 그림 1과 같은 구조로 인해 DC link 커패시터 리플전력이 필연적으로 발생하기 때문에, 커패시터 내압 정격 안에서의 안정적인 운전을 위해서는 허용 리플 전압 안에서 운전될 수 있는 DC link 설계가 필요하다.

2.1 DC link 커패시터 설계

그림 1의 AC DC 컨버터의 경우 60Hz의 지령전압을 통해 60Hz의 전류를 발생시키지만, 인버터의 경우 모터 지령 속도의 동기 주파수에 해당하는 지령 전압과 전류를 발생시키며 입력 전력과 출력 전력의 차이를 발생시킨다. 이러한 입력 전력과 출력 전력의 차이에 의해 나타나는 DC link 전압 리플은 식 (1)과 같다.

$$v_{DC}(t) = \frac{V_{peak_g} I_{peak_g}}{4C_{DC} V_{DC}} \left\{ \frac{\cos(\phi_g) \sin(2\omega_m t + 2\phi_{phase_m} + \phi_m)}{\cos(-\phi_m) \omega_m} - \frac{\sin(2\omega_g t + 2\phi_{phase_g} + \phi_g)}{\omega_g} \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 시간에 대한 함수로, sin에 의해 시간에 따라 진동하는 특성이 나타나게 된다. 이 때 중괄호 부분의 값이 최대값이 되는 시간과 최소값이 되는 시간에 대한 전압 차이가 최대

전압 리플이 되며, 이를 이용한 DC link 커패시터 설계 수식을 계산하면 식 (2) 와 같다.

$$C_{DC} > \frac{V_{peak_m} I_{peak_m}}{4 \Delta v_{DC} V_{DC}} \left(\frac{\omega_g + \omega_m}{\omega_g \omega_m} \right) \quad (2)$$

2.2 변압기 기생 인덕턴스 설계

단상 NPC H Bridge 인버터의 개별 스택 출력 전압은 두 개의 캐리어와 지령전압을 통해 모듈레이션 되지만, 이때 나타나는 출력 전압을 푸리에 급수로 전개하면 상당히 복잡한 식으로 나타나며, 토폴로지 특성 및 PWM 기법에 따라서도 모두 다르게 나타난다. 그렇기 때문에 NPC H Bridge 인버터의 출력 전압 고조파 특성을 간단하게 알아보기 위해서는 시뮬레이션 결과값을 FFT로 전개하여 분석하는 기법을 많이 사용한다.

그림 2는 진폭변조지수(Ma)에 따른 NPC H Bridge 인버터 출력 전압 FFT Lookup table이다. 인버터 출력의 전압 고조파는 스위칭 주파수의 배수 주파수 영역에서 나타나며, 이때 스위칭 주파수가 달라져도 FFT상에 나타나는 전압 고조파의 개형과 크기는 유사하다. 하지만 진폭변조지수가 달라지면 그림 2와 같이 각 주파수에서 나타나는 고조파의 크기가 달라진다. 필터 설계를 위한 진폭변조지수는 계통 전압과 DC link 지령 전압을 통한 전향보상값으로 선정하면 해당 파라미터에서 나타나는 전압 고조파 특성을 얻을 수 있다. 이에 나타나는 진폭변조지수는 식 (3)과 같이 나타난다.

$$M_a = \frac{V_g^e}{V_{dc}} \quad (3)$$

이를 이용한 전류 THD는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$THD_i = \frac{i_H}{i_{peak_rate}} = \frac{1}{i_{peak_rate}} \sum_{m=1}^N \frac{v_H(M_a) V_{dc}}{\omega_m I_{kg_TR_2nd} V_{dc_table}} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 원하는 전류 THD 설계를 위한 최소 기생 인덕턴스는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$L_{kg_TR_2nd} > \frac{V_{dc}}{V_{dc_table} i_{peak_rate} THD_i} \sum_{m=1}^N \frac{v_H(M_a)}{\omega_m} \quad (5)$$

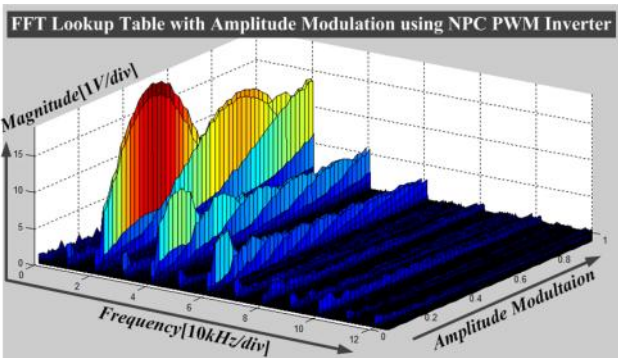


그림 2 진폭변조지수에 따른 NPC H-Bridge 인버터 출력 전압 FFT Lookup Table
Fig. 2 FFT Lookup table with amplitude modulation using NPC H-Bridge inverter

3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Values	Parameters	Values
정격 전력	1.2[MW]	모터 정격 전압	6.6[kV _{rms}]
계통 선간 전압	6.6[kV _{rms}]	모터 정격 전류	104[A _{rms}]
턴수비	3[turns]	DC link 전압	2000[V]
AC/DC 컨버터 스위칭 주파수	5[kHz]	DC/AC 인버터 스위칭 주파수	1[kHz]
변압기 기생 인덕턴스(2차측)	1[mH]	DC link 커패시턴스	1[mF]

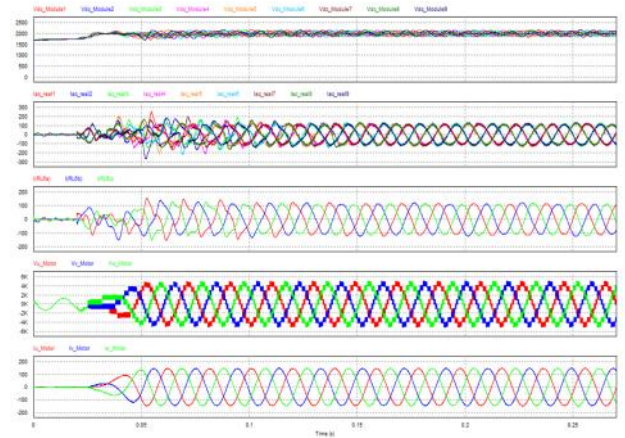


그림 3 Cascaded NPC H-Bridge 인버터 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation results of Cascaded NPC H-Bridge inverter

그림 3은 Cascaded NPC H Bridge 인버터 시뮬레이션 파형이다. 시뮬레이션파라미터는 표 1과 같이 13[%]의 DC link 리플 전압을 만족시키는 커패시턴스와 4%의 계통전류 THD를 만족시키는 기생 인덕턴스를 설계하여 그림 3과 같은 정량적 결과를 얻었다.

4. 결론

본 논문은 고전압 Cascaded NPC H Bridge 인버터를 위한 DC link 커패시턴스 및 변압기 기생 인덕턴스 설계에 대해 제안하였다. 설계 기법은 DC link 리플 전력과 인버터 출력 전압 고조파 성분을 통해 계산하였고, 6.6[kV], 1.2[MW]급 시뮬레이션을 통해 13[%]의 DC link 리플 전압과 4[%]의 전류 THD의 정량적 결과를 통해 설계법의 당위성을 검증할 수 있었다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20162010103830)

참고 문헌

[1] Yong Min Park, "PWM Implementation and Unbalance Control of H Bridge Multi Level Inverter for High Voltage & High Power Induction Motor Drives," Ph.D Dissertation, Korea University, 2007.