

25-레벨 인버터의 입력전압원 불평형에 따른 출력전압 THD 분석

김선필, 강필순
한밭대

THD Analysis of Output Voltage due to Input Voltage Unbalance in 25-level Inverter

Sun Pil Kim, Feel-soon Kang
Hanbat National University

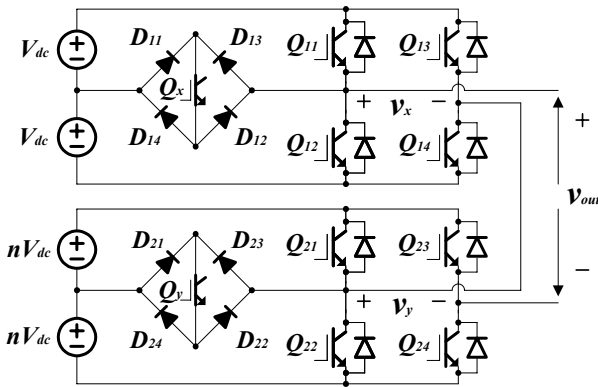
Abstract - 본 논문에서는 두 대의 5-레벨 인버터를 직렬 결합하여 출력 전압에 25 레벨을 형성할 수 있는 멀티레벨 인버터의 입력전압원으로 사용되는 직렬 결합된 커패시터 전압의 불평형에 따른 출력전압의 THD 변화를 분석한다. 25-레벨 인버터의 구동을 위해 등면적법에 의해 계산된 스위칭 각을 적용하고, 상단, 하단 모듈 입력전압 크기의 1, 5, 10, 15, 20 %의 변동에 대해 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석한다.

1. 서 론

멀티레벨인버터는 양질의 출력전압 생성이라는 관점에서 볼 때 가능한 적은 수의 회로 소자를 이용하여 다수의 출력 전압 레벨을 생성하는 것이 PWM (Pulse Width Modulation) 인버터의 대안으로 활용하기 위한 주요 요건 중 하나이다 [1]-[3]. 멀티레벨인버터의 종류 중 출력전압 레벨 수를 효과적으로 증가시키기 위해 적합한 방식은 Cascaded H-bridge cell 방식으로 알려져 있으며, 출력전압 레벨 수를 보다 효과적으로 증가시키기 위해 변형된 구조의 멀티레벨인버터에 대한 다양한 연구가 수행되었다 [4]-[7]. 이들 연구 중 양방향스위치를 가지는 5-레벨 인버터를 직렬 결합하는 멀티레벨인버터 회로 구조는 입력전압원의 크기를 상단 모듈은 $2V_{dc}$, 하단 모듈은 $10V_{dc}$ 로 5배의 차이가 발생하도록 구성하여 출력전압의 레벨 수를 25개로 크게 증가시켜 출력전압의 THD (Total Harmonic Distortion)를 개선시킬 수 있는 방법이다 [6]. 이 방식은 기존의 다단변압기를 활용하는 멀티레벨인버터 방식 [7]과 비교하여 변압기에 의해 발생하는 시스템 부피 증가문제와 변압기 손실 문제를 해결할 수 있으며, 출력전압에 25 레벨을 형성할 수 있어 THD가 2 % 미만으로 추가적인 출력필터 없이 양질의 출력전압 생성이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 입력전압원 구성에 있어 두 개의 커패시터를 직렬 결합하여 사용하게 되므로 입력상태와 부하조건에 따라 이들 입력전압원 사이에 불평형 상태가 발생할 수 있으며 입력전압원의 불평형은 출력전압 파형에 왜곡을 발생시키게 된다. 따라서 본 논문에서는 25-레벨 인버터의 입력전압원 사이의 불평형 상태에 따른 출력전압 THD의 변화를 분석하여 25-레벨 인버터의 구동에 있어 불평형 제어 기법의 필요 유무에 대한 기준을 제시한다.

2. 입력전압원 크기의 불평형에 따른 출력전압 THD 분석

2.1 분석 대상의 멀티레벨 인버터 구조



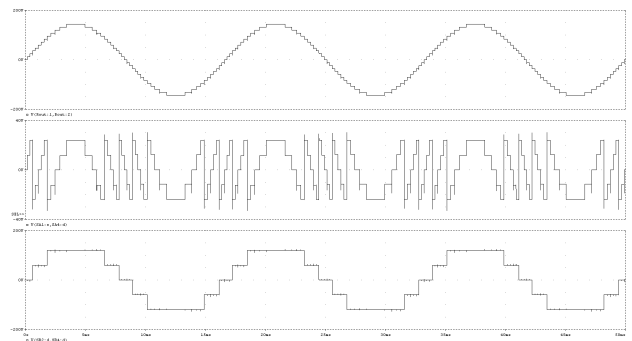
〈그림 1〉 분석 대상의 멀티레벨 인버터 구조

분석 대상인 멀티레벨 인버터의 회로 구성을 그림 1에 나타낸다. 각 H-bridge 모듈은 두 개의 커패시터가 직렬결합된 입력 전압원을 가지

며, H-bridge와 입력 전압원의 중성점 사이에 양방향 스위치가 삽입된 구조를 가진다. 각 인버터 모듈은 출력전압에 다섯 레벨을 형성할 수 있고, 두 모듈의 출력전압단을 직렬 결합시켜 출력전압 레벨 수를 보다 증가시킬 수 있는 멀티레벨 인버터를 구성할 수 있다. 그림 1에서 상단 모듈의 입력전압 크기를 각각 V_{dc} 로 고정하고 하단 모듈의 입력전압의 크기를 각각 nV_{dc} 로 할 때, 상단 모듈은 $-2V_{dc}$ 부터 $2V_{dc}$ 까지 영 레벨을 포함하여 5 레벨의 출력전압을 형성할 수 있고, 하단모듈은 $-2nV_{dc}$ 부터 $2nV_{dc}$ 까지 영 레벨을 포함한 5 레벨의 출력전압을 형성할 수 있다. 이때 각 모듈의 출력전압을 직렬로 결합시킨다면 n 의 값에 따라 생성 가능한 출력전압의 개수는 변화한다. n 이 1부터 5까지의 값을 가지는 경우에는 각 모듈 출력전압의 가감을 통해 연속적인 정수비의 출력전압 형성이 가능하다. 그러나 n 이 6부터 9까지인 경우에는 출력할 수 있는 레벨의 최대값은 증가하지만 연속적인 정수비를 가지는 레벨 형성이 불가능하다. 따라서 두 대의 5 레벨 인버터를 직렬 결합시킨 그림 1의 구조에서는 n 의 값이 5인 경우에 최대의 출력 레벨수인 25 레벨 형성이 가능하게 된다. 즉 상단 인버터의 출력 v_x 는 $-2V_{dc}, -V_{dc}, 0, V_{dc}, 2V_{dc}$ 의 5-레벨의 출력을 생성하며, 하단 인버터의 출력 v_y 는 $-10V_{dc}, -5V_{dc}, 0, 5V_{dc}, 10V_{dc}$ 의 5레벨 출력전압을 생성하게 된다. 제한된 멀티레벨 인버터의 출력전압 v_{out} 은 두 인버터 출력전압의 합으로 나타나므로 $-12V_{dc}$ 에서 $12V_{dc}$ 까지 영전압을 포함한 총 25 레벨의 출력 전압을 형성할 수 있다.

2.2 기본 동작 시뮬레이션

분석 대상인 25-레벨 인버터의 기본 동작 파형을 확인하기 위한 PSpice 기반의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2는 상단 인버터의 출력전압 (v_x), 하단 인버터의 출력전압 (v_y), 두 인버터 출력의 합으로 나타나는 최종 인버터의 25레벨을 가지는 출력전압 (v_{out}) 파형을 보여준다. 상단 입력전압원은 각각 DC 12 V, 하단 입력전압원은 각각 DC 60V이며 출력전압은 AC 100V, 출력주파수는 60 Hz 조건이다. 스위칭 각은 등면적법으로 계산된 각을 적용하였다. 등면적법의 경우 특정 고조파를 선택적으로 제거하기에는 어려우나 전체 출력전압의 THD를 개선시키는 점에서는 유용한 스위칭 방법이다. 하단의 인버터는 기본 5레벨의 출력 전압 레벨을 형성하고 상단 인버터의 출력전압이 가감되어 선형적인 정수비의 출력전압 레벨이 형성됨을 알 수 있다. 출력전압의 레벨 수가 25레벨로 거의 정현적인 출력전압 파형이 형성되지만 이는 입력전압원이 일정한 크기의 입력전압을 유지한다는 전제하에서만 가능한 결과이다.



〈그림 2〉 V_{out} , V_x , V_y 시뮬레이션

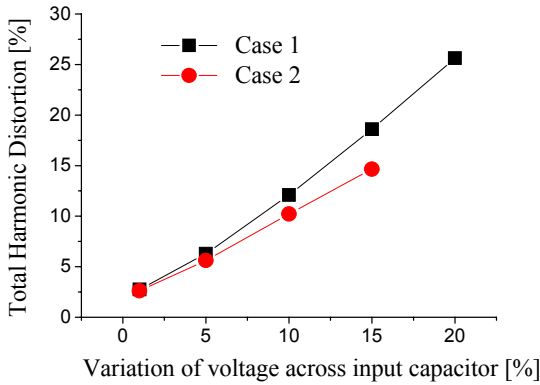
2.3 입력전압 불평형 시뮬레이션

일반적으로 두 개의 직렬결합된 입력전원을 사용하는 구조에서는 스위치 동작에 따라 입력전압의 불균형이 발생할 수 있고 이는 결과적으

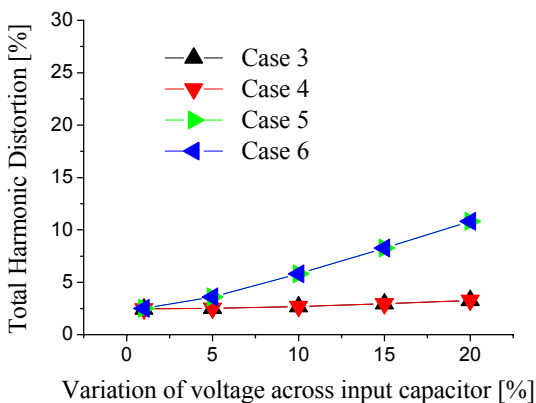
로 출력전압의 THD에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 제안된 인버터 구조에서 입력전압의 변동에 따른 출력전압의 THD 영향을 분석하였다. 등면적법에 의해 계산된 스위칭 각을 적용하고, 각 입력전압 크기의 1, 5, 10, 15, 20 %의 변동에 대해 시뮬레이션으로 분석한다. 6가지의 시뮬레이션 조건은 표 1에 나타낸다.

<표 1> 입력전압 불평형 상태 조건

조 건	설 명
Case 1	두 모듈 중 상단 전압이 높을 때 (단 전체 입력전압은 144 V로 일정)
Case 2	두 모듈 중 하단 전압이 높을 때 (단 전체 입력전압은 144 V로 일정)
Case 3	상단 모듈의 상단입력전압이 높을 때 (단 하단모듈 입력전압은 120 V로 일정)
Case 4	상단 모듈의 하단입력전압이 높을 때 (단 하단모듈 입력전압은 120 V로 일정)
Case 5	하단 모듈의 상단입력전압이 높을 때 (단 상단모듈 입력전압은 24 V로 일정)
Case 6	하단 모듈의 하단입력전압이 높을 때 (단 상단모듈 입력전압은 24 V로 일정)



(a)



(b)

**<그림 3> 입력전압원 크기 변동에 따른 출력전압의 THD 변화
(a) Case1~2, (b) Case 3~6**

그림 3은 입력전압원의 크기가 표 1의 조건에 따라 변동할 경우 출력 전압의 THD 변화를 보여준다. 그림 3(a)와 그림 3(b)를 보면 그림 3(a), 즉 Case 1과 Case 2의 변동시 THD에 악영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 모듈의 입력전압의 크기가 DC 144 V로 일정한 상태에서

상단 혹은 하단의 모듈 입력전압 전체를 증가 또는 감소 될 경우 출력 전압의 THD에 악영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 각 입력전압원은 DC/DC 컨버터에 의해 정전압 제어되므로 두 경우는 크게 문제시 되지 않는다. 그림 3(b)의 Case 3부터 Case 6까지는 각 모듈의 두 개의 입력전압원이 직렬 결합되어 이용되는 구조에서 전압 불평형이 발생할 경우 출력전압 THD에 미치는 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션 결과이다. Case 3과 Case 4는 THD에 거의 변화가 없다. 하단 모듈의 입력전압원 크기를 DC 120 V로 고정하고 상단 모듈의 입력전압원이 불평형 상태인 경우로 상단 입력전압원의 크기가 상대적으로 작기 때문에 출력전압의 THD에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 반면 Case 5와 Case 6은 상단모듈 입력전압원 크기를 DC 24 V로 고정한 상태에서 하단 입력전압원의 불평형 상태에서의 출력전압 THD 변화를 분석하였다. 10 % 까지의 불평등 조건에서는 THD가 5 % 미만으로 양호하지만 그 이상에서는 출력전압의 THD가 악화됨을 알 수 있다. 일반적인 인버터 동작 조건에서는 직렬결합된 전압원의 크기가 정상상태 스위치 동작에 의해 10 % 이상 차이가 나는 경우는 극히 드물다. 따라서 제안하는 인버터 구조에서 입력전압원의 불평형에 따른 출력전압의 THD 저하는 큰 문제가 되지 않는다고 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 두 대의 5-레벨 인버터를 직렬 결합하여 출력 전압에 25 레벨을 형성할 수 있는 멀티레벨 인버터의 입력전압원으로 사용되는 직렬 결합된 커패시터 전압의 불평형에 따른 출력전압의 THD 변화를 분석하였다. 25-레벨 인버터의 구동을 위해 등면적법에 의해 계산된 스위칭 각을 적용하고, 상단, 하단 모듈 입력전압 크기의 1, 5, 10, 15, 20 %의 변동에 대해 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석한 결과, 10 % 변동까지는 출력전압의 THD가 5 % 미만의 조건을 만족한 양질의 출력전압 생성이 가능함을 확인하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No.2010-0009504)

[참 고 문 헌]

- [1] H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez, and Ge Baoming, "Medium-Voltage Multilevel Converters State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2581-2596, Aug. 2010.
- [2] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Pérez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206, July 2010.
- [3] L. G. Franquelo, J. L. Rodriguez, J. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol.2, no.2, pp.28-39, Jun.2008.
- [4] W. K. Choi, C. S. Kwon, U. T. Hong, and F. S. Kang, "Cascaded H-bridge Multilevel Inverter Employing Bidirectional Switches," *Proc. ICEMS 2010*, Oct. 2010, pp.102-106.
- [5] S. J. Park, F. S. Kang, M. H. Lee, and C. U. Kim, "A new single-phase five-level PWM inverter employing a deadbeat control scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.18, no.18, pp.831-843, May2003.
- [6] 최원근, 권철순, 홍운택, 강필순, "두 대의 5-레벨 인버터의 직렬 결합을 이용한 멀티레벨인버터," *전력전자학회 논문지*, 제 15권, 제 5호, pp. 376-380, 2010년 10월.
- [7] F. S. Kang, S. J. Park, M. H. Lee, and C. U. Kim, "An efficient multilevel synthesis approach and its application to a 27-level inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 1600-1606, 2005.