전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

Space vector modulation을 이용한 대용량 멀티 레벨 H-bridge 인버터의 해석 및 모델링

김효진, 정승기
광운대학교

Analysis and modelling of the large capacity multilevel H-bridge inverter using Space vector modulation

H.J. Kim and S.G. Jeong
Kwangwoon University

ABSTRACT - Conventional variable-speed induction motor drives with inverters are subject to detrimental effect of zero-sequence voltages, such as shaft voltage and bearing current. This paper presents a way of the suppression of the zero-sequence components in multilevel H-bridge inverters. First examined is the inherent zero-sequence characteristic of the conventional subharmonic PWM method. Then it is shown that the zero-sequence voltage can be eliminated with proper selection of switching states with space vector modulation. Although this method alone restricts the linear modulation range of control, a combination of the proposed method and the minimum switching method appears to be effective in suppressing the zero-sequence voltage to minimum level while maintaining the linear control range.

1. 서 론

최근 대용량 인버터의 요구가 증가하고 있다. 대용량 인버터의 요구가 늘어남에 따라서 인버터 하나를 단독으로 사용하여 대용량의 전압을 내는 방식보다는 소용량의 인버터들을 직렬로 연결하여 대용량 전압을 내는 H-bridge 인버터를 많이 사용하고 있다.

종래의 인버터의 구동에서는 필연적으로 영상분 전압이 발생하게 되어 인버터 뒤쪽에 있는 기계의 수명에 악영향을 끼치게 된다. 이러한 영상분 전압을 없애는 방법으로는 여러 가지가 있지만, 특히 H-bridge 인버터[4]를 사용하게 되면 출력 전압을 선택할 수 있는 폭이 크기 때문에 이러한 전압들의 조합으로 인버터 출력의 영상분 전압을 없애주어 축전압과 베어링 전류등으로 인한 악영향을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 H-bridge 인버터에 고전적인 SPWM[1][3] (Sub Harmonic Pulse Width Modulation)을 사용하였을 때와, SVPWM[2](Space Vector Pulse Width Modulation)을 사용할 때 영상분 전압을 제거하거나 줄일 수 있는 방법은 어떠한 것이 있는지에 대하여 알고리즘을 고안하여 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 검토하도록한다.

2. H-bridge 인버터의 SPWM(Sub Harmonic Pulse Width Modulation)을 이용한 구동방법

H-bridge Multilevel Inverter을 만들기 위해서 전브리지 모듈을 직렬로 여러개 연결하여 만들어줄 수 있다. 직렬로 연결하는 모듈의 개수를 n 이라고 하면 그 때에 Inverter가 출력할 수 있는 level의 개수는 2n+1 개로 나타난다. 예를 들어 13-level을 만들기 위해서는 6개인 인버터 모듈을 직렬로 연결해 주어야 하며 그 구성은 그림 1과 같다. 그림 1은 한 상에만 해당하는 것이며 동일한 회로가 3개 조합되어 3상 인버터를 구성하게 된다.

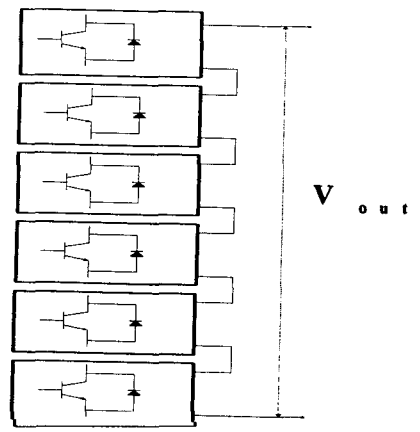


그림 1. 단상 H-bridge 인버터 모듈

위의 직렬 연결된 전브리지 회로를 여러 레벨이 나타나게 하려면 각 모듈의 스위치마다 넣어줄 신호를 다르

게 넣어주어야 한다. 그 방법은 반송파 v_{tri}의 신호를 모듈이 하나씩 증가할 때마다 (직렬로 연결된 모듈의 개수 n, v_{tri}의 주파수 f_{tri}) 모듈마다 순차적으로 스위치 신호를 v_{tri}를 $\frac{1}{f_{tri}} * \frac{1}{n}$ 만큼씩 위상 지연을 시킨다. 그림 1은 단상을 나타낸 것이며 3상 구현을 하기 위해서는 그림 1의 모듈이 3개가 있어야 하며 PWM signal을 만들어 주기위한 $v_{control}$ 신호를 a상을 기준으로 하였을 120° 씩 위상 지연시킨다. 3상 System의 영상분 전압은 $\frac{v_a + v_b + v_c}{3}$ 로 나타낼 수 있다. 각각의 모듈의 스위치에 인가하여 주기 위해 비교해야 할 파형은 그림 2와 같다.

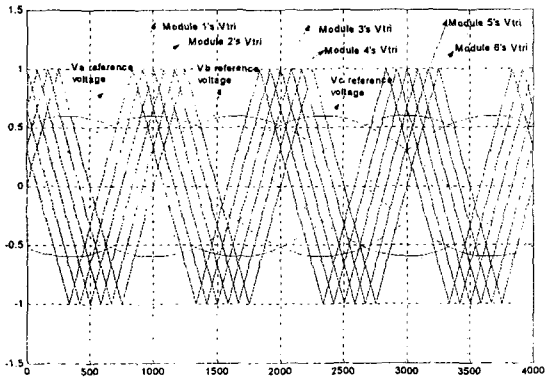
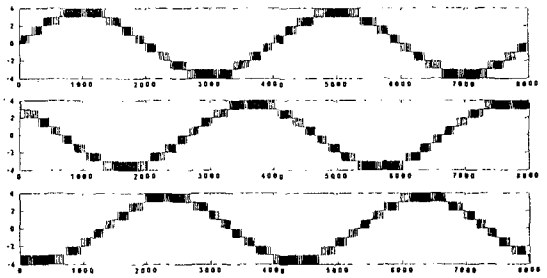


그림 2. 각 모듈에 들어가야 할 신호

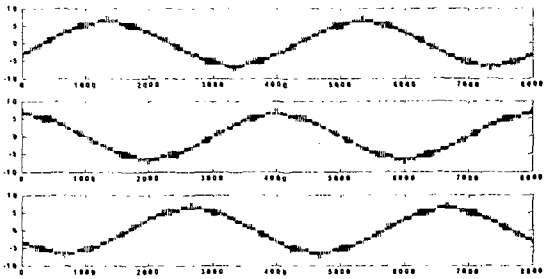
그림 2 에서와 같이 삼상의 각 모듈마다 위상 지연한 v_{tri}를 각 상의 $v_{control}$과 비교하여 스위치 signal을 만들어 준다. 위에서 사용되어진 스위치 signal 생성 방법은 PWM의 한 방식인 unipolar 방식을 이용하였다. unipolar 방식을 이용하여 나온 signal을 각각의 모듈에 인가하여 주면 모듈마다 스위치가 동작하는 시점이 서로 다르기 때문에 출력 되는 값이 시점마다 서로 달라지게 되어 정현파에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 이것을 이용하여 시뮬레이션 해 보았다.

이 때의 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다. $v_{control}$의 크기는 0.6 이며 $f_{control} = 60Hz$ $v_{tri} = 1$ $f_{tri} = 600[Hz]$ 일 때의 상전압, 선간전압, 영상분전압의 그림이다. 논문의 모든 프로그램은 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

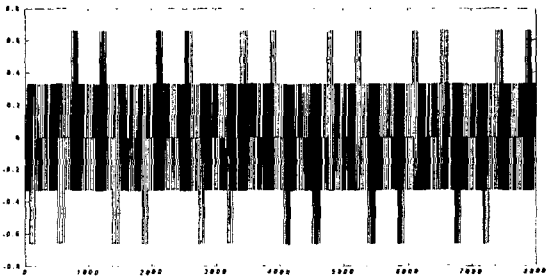
그림 3.를 보면 출력 상전압 레벨이 -6 에서부터 +6까지 13-레벨이 됨을 알 수 있다. 위의 경우에는 상전압 파형이나 선간 전압 파형이 모두 정현파에 가깝게 나오게된다. 시뮬레이션에서 보는 것과 같이 ±1/3, 0, ±2/3 레벨까지 나타남을 볼 수 있다.



(a) 상전압파형



(b) 선간전압 파형



(c) 영상분 전압 파형

그림 3. SPWM을 이용한 전압 파형

유도 전동기 구동에서 문제가 되는 영상분전압은 레벨의 크기도 문제가 되지만 유도 전동기의 수명을 단축 시키는 또다른 이유 중에 하나는 영상분전압의 레벨이 변하는 순간에 기생 커패시터에 의한 베어링 전류 때문이다. 그림 3를 보게 되면 일단 레벨이 ±2/3 까지 나올 뿐만 아니라 v_{tri}의 주파수에 따라서 영상분전압의 레벨이 계속 변동함을 볼 수 있다.

영상분전압 레벨이 예상과 다르게 두 배로 커지는 부분이 생기는 이유는 정현파의 크기와 반송파의 크기, 반송파의 주파수, 반송파의 개수 때문이다. 특정 시간 에 생기는 파형의 개수는 반송파의 개수 n개와 6개의 control(reversal,original) signal 개수 6개이다. 이때의 영상분전압의 Level은 그림 2 에서 보는 것과 같이 x축을 중심으로 두 개의 인근 정현파 사이에 끼인 반송파 개수의 합으로 나

타낼 수 있다. 인근 정현파 중에 위에 있는 정현파가 반전되지 않은 정현파이면, 사이에 낀 반송파 개수의 값을 +로, 그렇지 않은 경우에는 -로 둔다. 6개의 정현파가 있기 때문에 3개의 정현파 사이에 낀 반송파의 개수가 나오게 된다. 이 때의 값들을 더하여 3으로 나누어 준 것이 영상분전압의 레벨이 된다. 이 때의 인근 두 정현파 사이에 끼는 반송파의 개수는 정현파의 크기가 크고, 반송파의 주파수가 빠르며, 반송파의 개수가 많으면 영상분전압의 레벨이 ±2/3이 나올 확률이 높아진다. 그 이유는 인근 정현파의 사이는 넓고 반송파가 자주 반복 되며, 반송파와 반송파 사이의 간격이 조밀하기 때문에 더 많은 캐리어가 들어가기 때문이다. 그래서 영상분전압이 ±1/3, 0, ±2/3 나오게 된다.

3. 멀티 레벨 H-bridge 인버터의 공간 벡터도

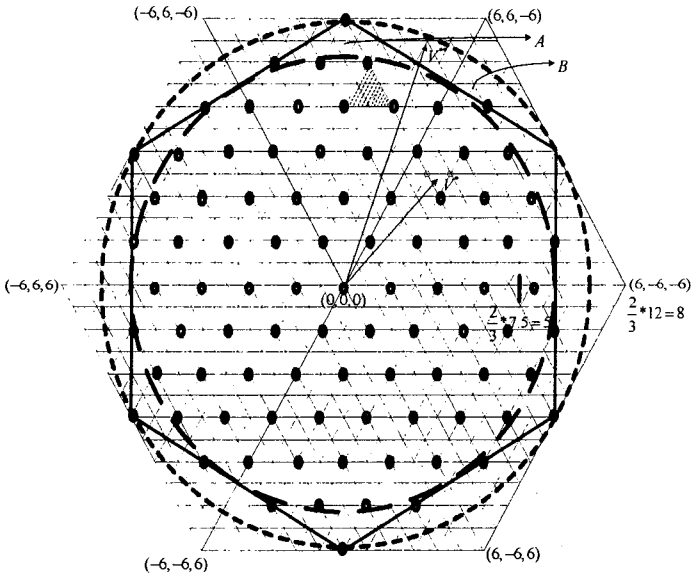


그림 4. 13-레벨 인버터의 공간 벡터도

13-level 인버터의 공간 벡터도를 보면 그림 4와 같이 나타 낼 수 있다. 사용할 수 있는 스위치의 가지 수는 +6~-6까지 13종류이다.

그림의 마지막 테투리 부분의 전압을 내기 위한 스위치의 가지 수는 한가지뿐이다. 그러나 작은 삼각형 쪽으로 하나씩 들어오면 스위치 가지의 수는 1개 씩 늘어나게 되어 2가지의 스위치의 가지수를 갖게 되며 한칸 더 안쪽으로 들어오면 3개의 스위칭 가지 수를 갖게 된다. 그렇게 되면 원점은 스위치의 가지 수는 13개가된다.

3상의 스위치 이므로 사용 가능한 스위치 조합 개수는 $(2n+1)^3$이며, 사용 가능한 스위치의 개수들은 $12n^2+6n+1$ 개이다.

이 때의 스위치의 값들의 합이 0이 되는, 예를 들어 (-1,2,-1), (-6,0,6) 과 같은 벡터들을 0벡터라고 한다. 이러한 영벡터의 개수는 $3n^2+3n+1$ 각 스위치들의 값은 +6~-6까지 나올 수 있지만, 실제로 사용되는 벡터들은 스위치들의 합의 값이 -1~+1인 경우에만 사용된다. 스위치의 값이 -1~+1이 나오는 부분은 큰 육각형의 내접하는 원만큼이 되며, 영벡터가 나타나는 부분은 작은 육각형에 해당하는데, 실로 영벡터로만 나타 낼 수 있는 linear range 는 작은 육각형에 내접하는 원의 크기만큼이 되며 이것은 SPWM의 선형영역 구간과 같게 된다. 이러한 특성을 이용하게 되면 앞 절에서 본 것과 같이 H-bridge Multilevel Inverter를 만들어 주기 위해서 SPWM 구동방법을 사용하면 영상분 전압의 레벨이 2배까지 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 SVPWM의 특성을 이용하여 인버터 모듈레이션을 하게 되면, 영전압을 줄이거나 제거, 선형 영역을 늘릴 수 있다.

4. 최근접 벡터 선택 방법

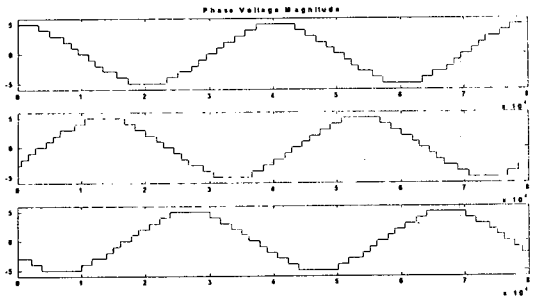
멀티레벨에서 SVPWM을 이용하게 되면 나타낼 수 있는 전압 벡터의 개수가 많아지게 된다. 이 것을 감안하여 최근접 벡터 선택 방법은 매 순간 인버터에서 내야 하는 전압을 기준 전압 벡터 V^*의 인근의 벡터 값으로 나타내는 방법이다.

그림 4에서 보는 것과 같이 13-level Inverter가 되면 스위칭 할 수 있는 벡터가 여러 가지가 된다. 기준 전압 벡터 V^*가 나타나게 되면 그 인근 작은 삼각형을 선택하여 V^*과 norm을 비교하며 가장 작은 크기의 norm을 가진 벡터를 선택하여 주는 방법이다. 그렇게 되면 그 선택되어진 벡터는 영상분 전압의 레벨이 -1/3, 0, +1/3로 나타나게 된다.

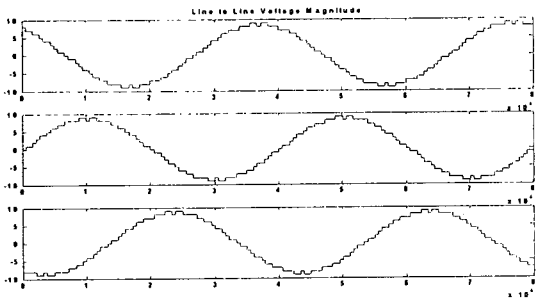
그 때의 시뮬레이션은 다음과 같다. 그림 4에서 가장 큰 육각형에 내접하는 원(조밀한 점선으로 표현되어 있는 원)의 크기만큼 표현이 가능하다. 이 때에 선택되는 벡터들 중에는 영상분 전압이의 크기를 0으로 만드는 벡터도 포함되어있다. 그림 4에서 보는 것과 같이 크기를 5로 놓았을 때 상전압 파형 선간전압 파형, 영상분 전압 파형은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

시뮬레이션 파형에서 보는 것과 같이 영상분 전압의 레벨은-1/3, 0, 1/3로 나오게 됨을 알 수 있다. 또한 영상분 전압의 스위칭의 회수가 SPWM의 경우보다 많이 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러나 이것은 기준 벡터의 크기가 클 때에 해당하는 것이다, 그림에서는 나와 있지 않

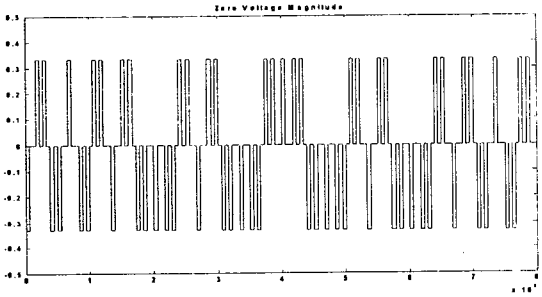
지만, 기준벡터의 크기가 작게되면 스위칭 할 수 있는 벡터의 개수가 작기 때문에 고조파가 많이 함유된다.



(a) 상전압 파형



(b) 선간전압 파형

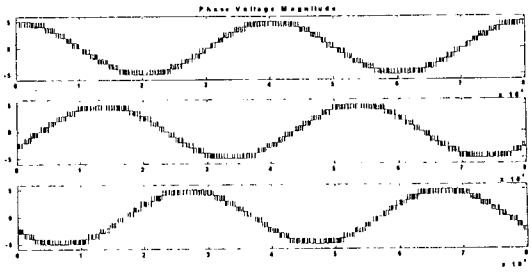


(c) 영상분전압 파형

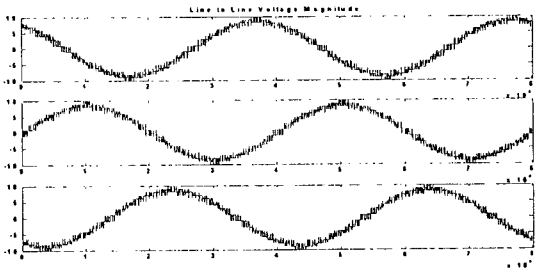
그림 5. 최근접 벡터를 이용한 전압 파형

5. 영벡터 선택 방법

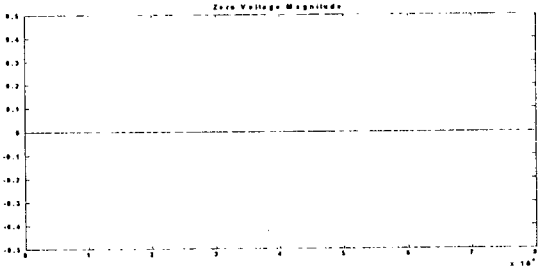
영벡터 선택 방법은 3절에서 언급한 영벡터들만을 이용하여 기준 전압을 나타내는 방법이다. 눈금으로 크게 빗금 쳐진 삼각형의 꼭지점, 그리고 점으로 표시된 점들이 영벡터에 해당한다. 출력하고자 하는 기준 전압이 있을 때에 인근 영벡터 3개가 결정되면 이 3개의 벡터들을 일반 SVPWM의 한 주기 동안에 3가지 벡터들을 인가하는 방법을 이용하여 출력하여 준다. 최근접 벡터보다 영벡터를 선택하는 방법이 스위칭을 움직여야 하는 횟수는 크지만 영전압의 크기를 0 으로 만들 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이 때의 시뮬레이션은 다음과 같다. 기준 전압 벡터의 크기를 5 로 놓고 그림.6은 상전압의 파형, 선간전압 파형, 영상분전압 파형이다.



(a) 상전압 파형



(b) 선간전압 파형



(c) 영상분전압 파형

그림 6. 영벡터를 이용한 전압 파형

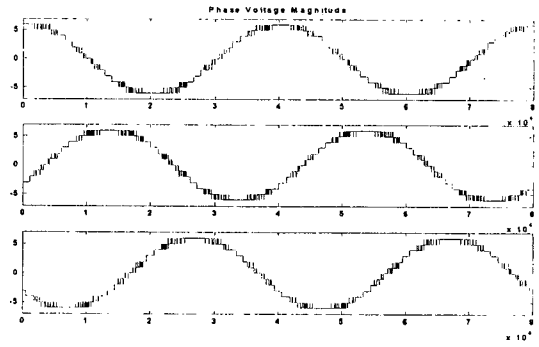
그림 6에서 보는 것과 같이 레벨의 폭(스위치가 움직여야 하는 횟수)이 최근접 벡터 선택 법보다는 커지지만 SPWM 방법과 비교하여 보면 스위칭 회수가 SPWM 방법보다는 적다. 영상분전압의 크기는 항상 0이 됨을 알 수 있다. 그러나 영벡터만으로 기준 전압을 나타내는 linear range가 최근접 벡터 선택 방법보다는 줄어들게 된다.

6. 최근접 벡터와 영벡터 선택방법의 혼합 방법

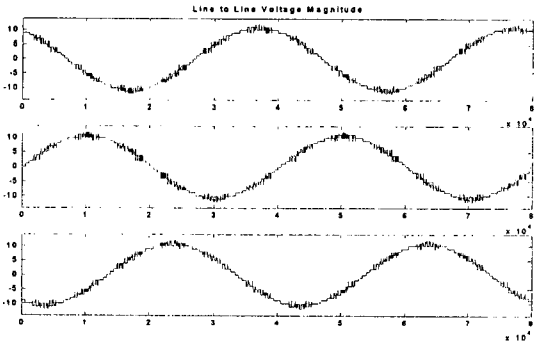
그림 4에서 보는 것과 같이 굵은 점선으로 되어 있는 육각형의 안쪽 부분에는 영상분전압의 크기를 0으로 만드는 벡터 스위치들이 포함되어 있고 간격이 좁은 점선으로 되어 있는 원의 안쪽 부분은 최근접 벡터가 나타낼 수 있는 가장 큰 기준전압 벡터의 크기이다.

이 때에 정해진 기준 벡터가 V^{**}로 시간에 의해서 회전할 때에 A부분을 지날 경우에는 영벡터 선정 방법을 사용하며, B와 같은 영역에서는 최근접 벡터 방법을 사용하여 주는 방법이다. 그림 4에서와 같이 영벡터로만 나타낼 수 있는 기준벡터의 크기는 6이 최대이고 선형

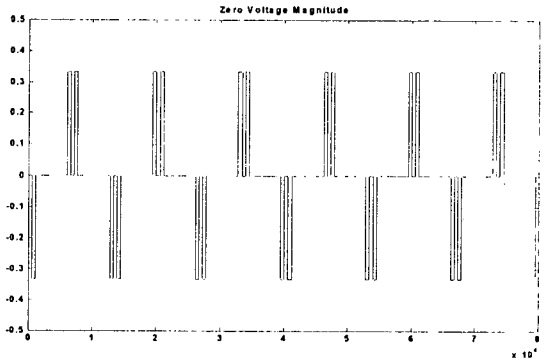
영역으로 동작할 수 있는 최대 크기의 벡터 값은 $4\sqrt{3}$ 이다. 기준벡터의 크기가 6과 $4\sqrt{3}$ 사이의 값일 때에 사용할 수 있다. 이 때의 시뮬레이션은 다음과 같다. 이 때의 기준 벡터의 크기는 6.4로 두었다.



(a) 상전압 파형



(b) 선간전압파형



(c) 영상분 전압파형

그림 7. 최근접 벡터방법과 영벡터의 혼합을 이용한 전압 파형

그림 7 에서 보는 것과 같이 영상분전압 레벨은 제로벡터 선택 방법보다는 많지만 최근접 벡터 스위칭 방법보다는 적게 나타나며, 스위칭 회수도 영벡터 선택 방법보다 주는 것을 볼 수 있다. 이 방법을 이용하면 영상분 전압을 최소화 하면서 linear range를 늘릴 수 있다. SVPWM을 이용하는 이유 중, 선형 영역 구간이 크다라는 장점을 활용하면서, 영상분 전압을 줄 일 수 있다.

7. 결 론

종래의 인버터를 사용한 유도 전동기 가변속 구동에서는 필연적으로 3상 출력전압에 영상분이 존재하여 축전압을 유기하고 이것이 베어링을 통해 흐르는 전류를 유발, 전동기의 기계적 수명에 악영향을 끼친다. 멀티 레벨 H-bridge 인버터의 경우는 출력전압을 변조하는 데에 있어서 많은 선택의 폭이 존재하기 때문에 이를 이용하였다. 인버터의 구동 방법으로 SPWM 과 SVPWM 방법을 이용할 수 있으며 SPWM의 구동 방법은 손쉽게 구동할 수 있다는 장점이 있지만 영상분 전압이 나오게 되며 스위칭 회수가 많음을 알 수 있다. 그리고 SVPWM을 이용한 최근접 벡터 선택방법은 영상분 전압이 나타나기는 하나 영상분 전압의 스위칭 회수가 최소화될 수 있다. 그러나 기준 전압의 벡터의 크기가 작게되면 출력 전압에 고조파 성분이 많이 함유되게 된다.

제로벡터 선택방법은 스위칭 회수가 늘어나기는 하지만 영상분 전압이 전혀 나타나지 않음을 볼 수 있지만 linear range가 줄어들며, 스위칭 회수가 증가함을 알 수 있다. 최근접벡터 선택 방법과 제로벡터를 혼합한 선택방법은 영상분 전압은 나타나지만 제로벡터들로 표현되는 부분이 있기 때문에 linear range도 넓으며, 영전압 레벨도 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 스위칭 회수도 제로벡터 선택방법보다 줄어드는 것을 볼 수 있다. 영상분 전압을 줄이기 위한 세 가지 방법들은 서로 장단점들이 있어 어떠한 목적을 갖고 설계하느냐에 따라서 구동 방법을 선택하여줄 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Mohan, Underand, Robins, "Power Electronics," JOHN WIELY & SONS, Inc., 1995.

[2] Bose, "Modern Power Electronics And AC Drives," Prentice-Hall, 2002.

[3] DANIEL W. HART, "Introduction to Power Electronics," Prentice-Hall, 1997.

[4] Annette von Jouanne, "A multilevel inverter approach providing DC-link balancing, ride-through enhancement, and common-mode voltage elimination," IEEE Trans. on industrial electronics, Vol. 49, No. 4. August 2002.