

개선된 공간벡터형 히스테리시스 전류제어기법

정안식, 박기원, 정승기,  
 광운대학교 전기공학과 전력전자연구소

Modified Space-Vector Modulation Hysteresis Current Control Method

An Sik Jeong, Ki Won Park, Seung Gi Jeong,  
 Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon Univ.

**Abstract** - This paper proposes a modified hysteresis current control method based on space vector modulation. The proposed method differs from former works in that it uses effective voltage vectors instead of zero vectors while not significantly increasing the circuit complexity. The circuit uses outer band that is slightly wider than the usual current limit band (inner band) to detect the phase of current command and thereby the region information. The comparator output signals associated with the inner and outer band are used to determine the proper voltage vector that minimizes the current error and number of switching, with simple logic circuitry. The utilization of effective voltage vector is of particular importance when the ac-side emf is relatively large. Both the simulation and experiment show that the proposed method is more effective than the conventional one that uses zero vectors, in reducing the number of switching over a range of ac-side emf variation.

1. 서 론

전류제어는 고성능 AC motor drive나 고조파를 제거하고 무효전력보상을 하는 능동전력필터(APF)에 주로 사용되며 일정전압 일정주파수(CVCF)를 출력하는 무정전 전원장치(UPS)에서 내부전류제어루프로서 사용된다. 전류제어방법으로 비교적 많이 사용되는 것이 히스테리시스 전류제어이다. 각상이 독립적으로 제어되는 히스테리시스 전류제어는 구현이 용이하며 응답특성이 우수하고 경제적인 장점을 가지는 반면 3상에서는 선간의 상호작용으로 인해 낮은 변조지수에서도 스위칭 주파수가 매우 높아질 수 있다. 이것은 스위칭 소자의 손실을 증가시키며 소자의 수명을 단축시킨다. 최근 영벡터를 인가함으로써 스위칭 수를 줄이는 히스테리시스 전류제어방법이 제안되었다.[1] 이 방법은 기전력을 고려하지 않아서 히스테리시스 전류제어방법보다 스위칭 수가 더 증가하는 현상이 발생한다.

3상이 독립적으로 제어되는 히스테리시스 전류제어와는 달리 공간벡터변조기법은 연산시간이 길고 구현이 복잡하다. 실제의 스위칭 패턴을 생성하기 위해서 벡터 공간상에서 기준전압벡터에 가장 가까운 2개의 유효전압벡터를 선정하고 각각의 전압벡터가 인가되는 시간을 한 주기 평균의 개념으로부터 연산해 낸다. 이렇게 연산된 시간은 또다시 실제 스위칭 시간을 연산하기 위해 재합성된다. 이러한 과정을 거친 후에야 실제의 스위치 on-off시간이 결정될 수 있기 때문에 고속의 마이크로프로세서 및 복잡한 하드웨어를 사용하여 구현할 수 있다.[2]

본 논문에서는 공간벡터변조기법에 연산시간 지연이 없는 히스테리시스 전류제어를 접목하여 인가할 공간벡터를 한정할 수 있는 개선된 공간벡터형 히스테리시스 전류제어방법을 제안하고, 각상의 스위칭 테이블을 통해서 게이팅 로직을 구하였으며 제안된 전류제어기의 간단한 하드웨어의 구성을 제시하였다.

2. 히스테리시스 전류제어

히스테리시스 전류제어는 구현이 간단하며, 동특성이 우수하다는 장점을 갖는다. 이 제어기는 각 상이 독립적으로 제어되며 따라서 간헐적으로 영벡터가 발생된다. 동작원리는 실제전류  $i$ 와 기준전류  $i^*$ 를 비교하여 실제전류가  $i^* + band$ 를 치면 실제전류를 감소시켜 주는 전압을 인가하고, 실제전류가  $i^* - band$ 를 치면 실제전류를 증가시키는 전압을 인가한다.

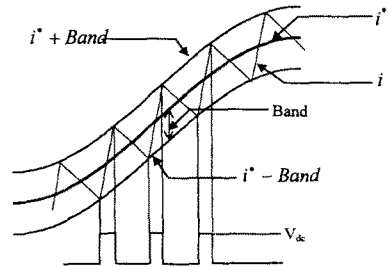


그림 1. 일반적인 히스테리시스 제어원리

그림 1은 한 상에 대한 동작을 나타낸 것이고, 3상에서는 각상이 전류의 방향을 바꾸기 위하여 독립적으로 스위칭을 하게 된다. 즉 상태전압벡터가 한정되는 것이 아니고 유효전압벡터들이 불규칙하게 인가된다. 3상 PWM 컨버터의 전류제어시 나타날 수 있는 스위칭은 8가지가 되고, 이 8가지의 출력전압벡터 중에서 6개의 유효전압벡터와 2개의 영전압벡터를 출력하게 된다. 그러나 히스테리시스 전류제어의 경우는 구역정보를 검출하여 스위칭을 하는 것이 아니라, 단순히 밴드에 따라서 스위칭이 일어나기 때문에 리미트 사이클이 발생하는 등 불안한 요소를 여전히 가지고 있고, 이러한 문제점을 보완하려는 연구가 많이 발표되었으나 히스테리시스 전류제어의 단순성을 잃어버리게 된다.[3,4] 그러나 공간벡터변조기법을 이용하여 지령치의 영역정보를 검출하여, dq변환을 통하여 전류오차를 최소화하는 유효전압벡터를 인가하는 스위칭 table을 작성하면 각 상의 게이팅 신호를 내보내도록 하는 간단한 전류제어기를 구현할 수 있다.

3. PWM 컨버터의 공간벡터표현

각각 abc상을 120도의 변위를 갖는 축으로 표현하였을 때 직교하는 dq축과의 관계를 도식적으로 그림 2에 나타내었다. 이로부터 abc 임의의 3상변수를 식(1)과 같이 dq변수로 변환하여 q축을 실수축으로 d축을 허수축으로 놓으면 dq변수는 하나의 복소수로 나타낼 수 있다. 이를 평면 직교좌표상에 나타내면 공간벡터에 의한 표현이 되고, 식(2)와 같다.

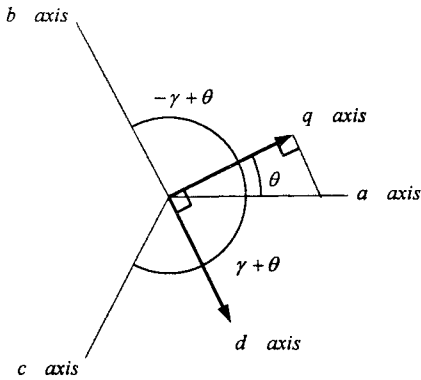


그림2. abc축과 dq축간의 관계

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\gamma) & \cos(\gamma) \\ 0 & -\sin(\gamma) & \sin(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{2\pi}{3} \\ \bar{f} &= \bar{f}_a - j\bar{f}_d \\ &= \frac{2}{3}(f_a + \bar{a}f_b + \bar{a}^2f_c) \\ \bar{a} &= \cos(\gamma) + j\sin(\gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

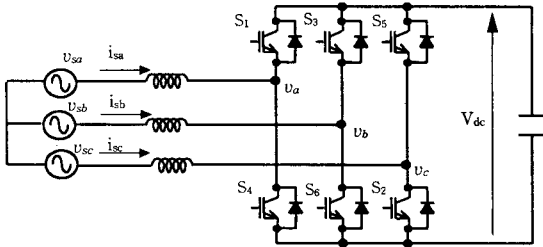


그림3. 3상 PWM 컨버터 모델링과 상태공간전압벡터

PWM 컨버터에서 각 상의 Positive Switch가 켜지면 '1', Negative Switch가 켜지면 '0'로 정의하면 그림3과 같은 상태공간전압벡터를 얻을 수 있다.

#### 4. 공간벡터형 히스테리시스 전류제어

공간벡터형 히스테리시스 전류제어기의 특징은 간단히 주 히스테리시스 밴드에 추가로 조금 더 큰 밴드(outer band)를 설정하여 지령치의 영역정보를 검출하여 전류오

차를 최소화하도록 영벡터를 포함한 상태공간벡터를 인가하는 방법이다. [1] 즉 인가할 상대전압벡터를 한정하는 공간 벡터변조기법 [1]과 3상이 독립적인 히스테리시스 전류제어의 장점을 접목시켜 적절히 영벡터를 인가하여 스위칭 수를 감소시키는 것이며, 고속의 DSP를 사용하지 않고서도 아날로그 회로로 간단히 구현이 되는 특징을 갖고 복잡한 연산이 불필요하다는 것이다. 이 방식에서는 적절하지 못한 영벡터의 인가로 인하여 실제전류가 주밴드를 벗어나면 구역별밴드(outer band)가 실제전류를 주 밴드(inner band)이내로 강제로 들어가도록 전압을 인가하며 동시에 이 밴드(outer band)를 건드림으로 해서 영역정보가 검출된다. 이렇게 검출된 영역정보와 지령치의 기율기 정보를 사용하여 영벡터 인가시점을 결정하여 각 영역에서 영벡터를 포함한 공간전압벡터를 인가한다. 기전력이 적은 경우에 적절한 영벡터의 인가는 전류오차의 감소로 인하여 스위칭 수가 줄어드는 효과를 얻을 수 있지만 DC link전압에 비해 크다면 영벡터의 인가는 오히려 전류오차를 증가시켜 실제전류가 영벡터 인가시에 급격한 기율을 갖게 되어서 스위칭 수의 증가를 초래하게 된다. 스위칭 수의 감소는 다음과 같은 수식을 통하여 얻을 수 있다.

저항을 무시하고 각상에 대한 전압방정식을 구해보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L \frac{d}{dt} i_{sa} = v_{sa} - v_a \quad (3)$$

$$L \frac{d}{dt} i_{sb} = v_{sb} - v_b \quad (4)$$

$$L \frac{d}{dt} i_{sc} = v_{sc} - v_c \quad (5)$$

여기서 상전류를 구하면 다음과 같다.

$$i_{sa} = I_a + \frac{1}{L}(v_{sa} - v_a) \quad (6)$$

$$i_{sb} = I_b + \frac{1}{L}(v_{sb} - v_b) \quad (7)$$

$$i_{sc} = I_c + \frac{1}{L}(v_{sc} - v_c) \quad (8)$$

영벡터를 인가하면 각 상전류는 기전력의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 기전력이 DC link전압에 비하여 적을 경우에 영벡터를 인가시 실제전류가 완만한 기율을 가지고 감소하거나 증가하지만 기전력이 크다면 급격한 기율을 가지고 감소하거나 증가하여 스위칭 수가 증가할 것이다.

$$\epsilon_a = i_a^* - i_a \quad (10)$$

$$\epsilon_b = i_b^* - i_b \quad (11)$$

$$\epsilon_c = i_c^* - i_c \quad (12)$$

전류오차에 대한 미분방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{d\epsilon_a}{dt} = \frac{d i_a^*}{dt} + \frac{1}{L}(v_a - v_{sa}) \quad (13)$$

$$\frac{d\epsilon_b}{dt} = \frac{d i_b^*}{dt} + \frac{1}{L}(v_b - v_{sb}) \quad (14)$$

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{d i_c^*}{dt} + \frac{1}{L}(v_c - v_{sc}) \quad (15)$$

즉 전류오차의 변화율은 영벡터 인가시 기전력의 영향을 주로 받기 때문에 기전력이 DC link전압에 비해 클 경우는 전류가 급격한 기율을 가지고 감소하므로 스위칭 수가 증가하게 된다. 기전력이 적을 경우에 영벡터인가시 스위칭 수 감소의 원리를 그림4를 통해서 알 수 있다. 식 (3), (4), (5)를 dq변환을 이용하여 식(16)과 같이 구할 수 있고 전류오차의 변화를 그림5을 통해서 확인할 수 있다. 이것은 기전력이 클경우와 작을 경우에 영벡터인가시 전류오차의 변화를 나타내고 있다.

$$L \frac{d}{dt} \bar{i}_s = \bar{v}_s - \bar{v}_k \quad (16)$$

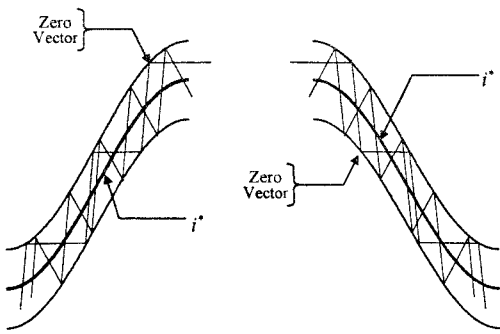


그림 4. 영벡터인가시 스위칭수 감소의 원리

식(16)을 통해서 영벡터가 인가되면 전류오차의 변화율은 기전력의 영향을 주로 받게 되며, 따라서 전류오차를 줄여 주기 위하여 기전력을 최소화하는 벡터를 인가하도록 하는 스위칭을 내보내야 한다는 것을 알 수 있다. 즉 구역판별밴드에 의해 공간벡터군이 결정되면, 영벡터 인가시점에서 영벡터 대신 전류오차를 최소화하는 유효전압벡터를 인가하는 것이고, 그 결과로 실제전류가 좀더 완만한 기울기를 가지고 감소하거나 증가하여, 스위칭 수가 감소하게 된다. 이러한 논리로 스위칭 테이블을 작성하여 하드웨어를 구현하더라도 복잡하지 않은 게이팅 로직을 갖는 특징이 있다.

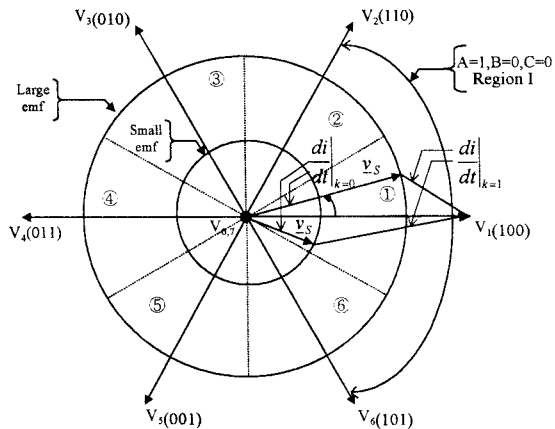


그림 5. 전압벡터인가에 의한 전류오차의 변화

$k=0$ 는 영벡터를 의미하며,  $k=1$ 는  $V_1$ 을 나타낸다. 즉 기전력이 큰 경우에는 한 영역에서 영벡터 대신 인근 유효벡터를 인가하는 것이 전류오차를 줄일 수 있다.

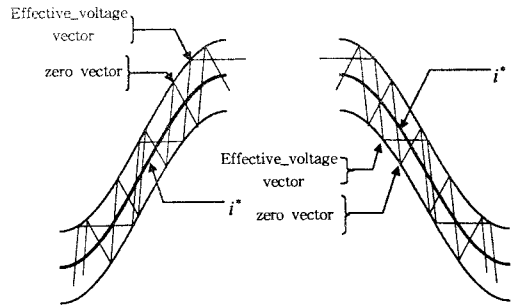


그림 6. 기전력을 최소화하는 유효벡터 인가시 파형

제한된 방식은 기전력이 클 경우에 전류오차를 최소화하는 인근 유효전압벡터를 인가함으로써 전류오차의 변화율을 다소 감소시켜서 스위칭 수를 줄이는 것이다. 이러한 스위칭 인가 패턴을 정리하면, 각 leg의 게이팅 로직을 구할 수 있다. 예를 들어서 지령치가 ①영역에 있고, 기전력이 DC link전압에 비해 크다면, 영벡터를 인가하는 것보다 지령치에 가까운 인근 유효전압벡터를 인가하는 것이 전류오차를 줄여 준다. 이것은 그림5를 통해서 확인 할 수 있다. 마찬가지로 지령치가 ②영역에 있고, 기전력이 DC link전압에 비해 크다면, 인근유효벡터를 인가하는 것이 전류오차를 줄일 수 있는 방법이다. 이와 같은 방법으로 스위칭 테이블을 작성하여 정리 하면 아래와 같은 각 상의 게이팅 신호로 정리할 수 있고, 기전력이 고려되지 않은 기존의 공간벡터형 히스테리시스 전류제어방법보다 크게 복잡한 것이 없다.

앞서 설명한 구역판별밴드의 정보를 통해서 지령치의 위상을 검출하여 전류오차를 최소화하는 유효전압벡터 인가방식의 스위칭 테이블을 작성하면 다음과 같은 게이팅 로직을 구할 수 있다.

$$S_a = B \cdot C \cdot a \cdot b + B' \cdot C \cdot a \cdot c + A \cdot B' \cdot C \cdot a + A \cdot B \cdot C' \cdot a + A \cdot B' \cdot C' \cdot b + A \cdot C' \cdot a' \cdot c + A \cdot B' \cdot C'$$

$$S_b = A' \cdot B \cdot C \cdot a + A' \cdot B' \cdot a' \cdot b + A' \cdot C \cdot b \cdot c + A \cdot B \cdot C' \cdot c + A \cdot B \cdot C' \cdot b + A \cdot B \cdot C \cdot c + A' \cdot B \cdot C'$$

$$S_c = A' \cdot B \cdot C \cdot a + A' \cdot B' \cdot b \cdot c + A' \cdot B \cdot C \cdot c + A \cdot B' \cdot a \cdot c + A \cdot B' \cdot C \cdot c + B' \cdot C \cdot a \cdot b + A' \cdot B' \cdot C$$

대문자 A, B, C는 각각의 구역판별밴드의 영역정보를 나타낸다. 즉 A=AOB, B=BOB, C=COB이다. 그리고 소문자 a, b, c는 각각의 주 히스테리시스 밴드를 의미한다. a=AIB, b=BIB, c=CIB이다. 이러한 게이팅 신호를 유도하기 위하여 다음과 같은 스위칭 테이블을 사용한다. 그리고 전체적인 제어블럭과 제한된 제어기는 다음과 같다.

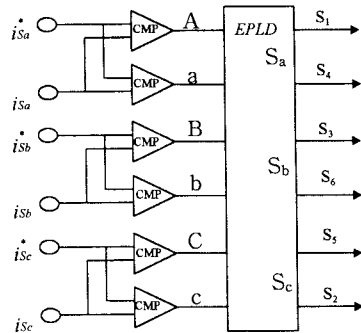


그림 7. 제한된 전류제어기의 간단한 하드웨어 구현

	①			②			③		
AOB	1			1			0		
BOB	0			1			1		
COB	0			0			0		
AIB	1	1	1	1	0	0	1	0	1
BIB	0	1	1	0	1	0	1	1	1
CIB	1	0	1	0	0	0	0	1	1
$V_k$	$V_6$	$V_2$	$V_7$	$V_1$	$V_3$	$V_0$	$V_2$	$V_4$	$V_5$
	④			⑤			⑥		
AOB	0			0			1		
BOB	1			0			0		
COB	1			1			1		
AIB	0	0	0	0	1	1	0	1	0
BIB	1	0	0	1	0	1	0	0	0
CIB	0	1	0	1	1	1	1	0	0
$V_k$	$V_3$	$V_5$	$V_0$	$V_4$	$V_6$	$V_7$	$V_5$	$V_1$	$V_0$

표1. 제안된 전류제어기법의 스위칭 테이블

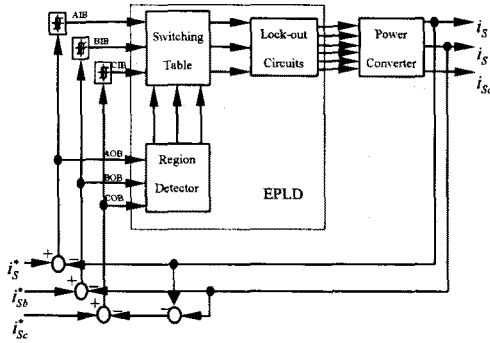


그림8. 제안된 전류제어기의 개념도

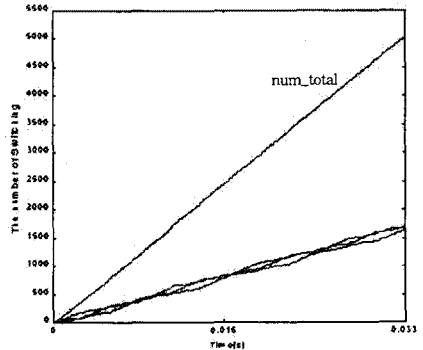
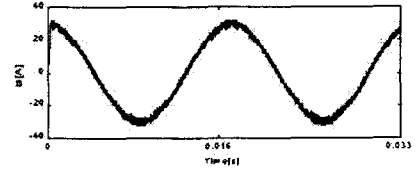
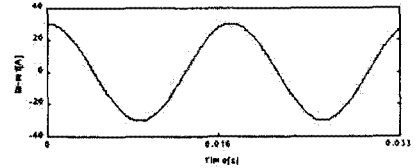
### 5. 시뮬레이션 결과

주 히스테리시스 밴드폭의 설정은 전류지령치의 최대값의 0.05(p.u)로, 구역판별밴드는 전류지령치 최대값의 0.08(p.u)로 설정하였다. 모의실험에 사용한 톨은 ACSL과 matlab를 사용하였으며, 조건은 기전력이 DC link전압에 비해 큰 경우에 대하여 행하였고, 각각의 전류제어방법을 사용하였을 때 나타나는 스위칭 파형과 스위칭 수를 확인하였다.

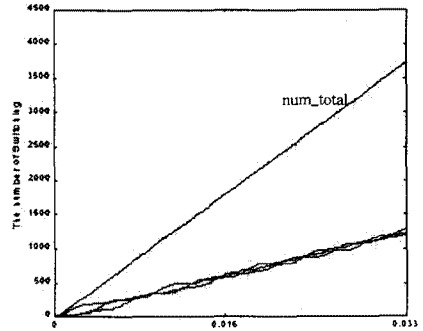
컨버터 제정수	전류제어방법	히스테리시스 전류제어	공간벡터형 히스테리시스 전류제어	개선된 공간벡터형 히스테리시스 전류제어
입력전압, $v_s$ [V]		440	440	440
교류측 인덕턴스, L [mH]		0.8	0.8	0.8
직류측 기준전압, $v_{dc}$ [V]		700,800	700,800	700,800
Inner band, outer band		0.05, 0.08	0.05, 0.08	0.05, 0.08
입력전류 최대치, $I_m$ [A]		30	30	30

표2. 전류제어방식에 변화에 따른 컨버터 제정수

기전력이 DC link전압에 비하여 클 경우와 작을 경우이므로 DC link전압을 변경한 결과를 가지고서 확인하였다.

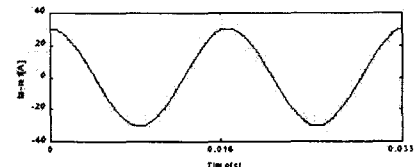


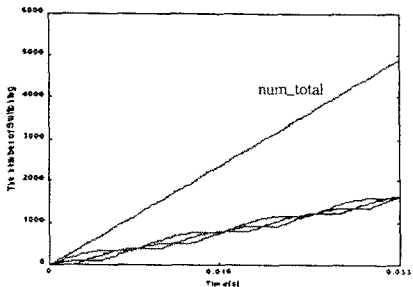
(a) 기전력이 작은 경우



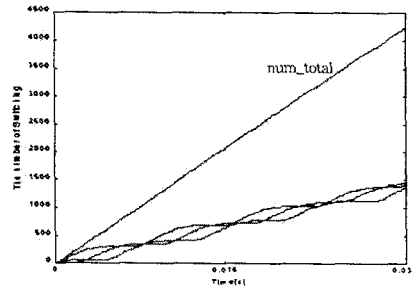
(b) 기전력이 큰 경우

그림9. 히스테리시스 전류제어



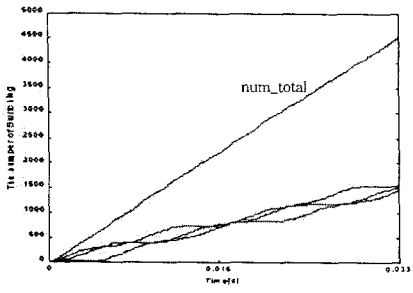
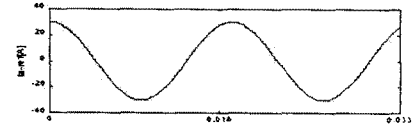


(a) 기전력이 작은 경우

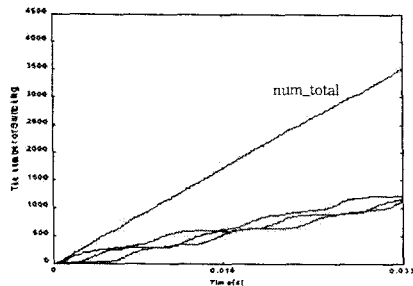


(b) 기전력이 큰 경우

그림 10. 공간벡터형 히스테리시스 전류제어



(a) 기전력이 작은 경우



(b) 기전력이 큰 경우

그림 11. 개선된 공간벡터형 히스테리시스 전류제어

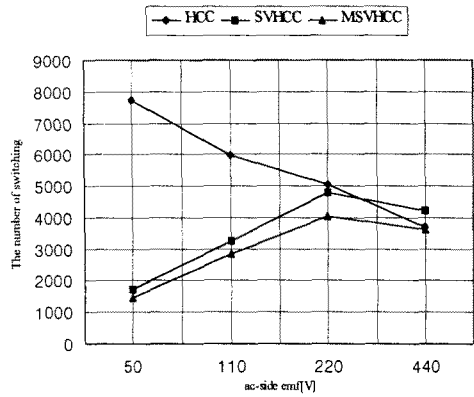


그림 12. 기전력의 변화에 따른 스위칭수 변화양상

### 3. 결 론

공간벡터형 히스테리시스 전류제어는 주 히스테리시스 밴드에 추가로 구역판별밴드를 설정하여 이것으로서 지령치의 영역정보를 얻어내어 어떤 한 공간벡터군을 결정한후 영역벡터를 포함한 인근 유효전압벡터를 인가함으로써 스위칭수를 줄일 수 있었다. 즉 기전력이 DC link 전압에 비해 적은 경우는 기존의 방법도 효과를 볼수 있으나 기전력이 큰 경우는 오히려 스위칭 수가 일반적인 히스테리시스 전류제어 방식보다 기전력의 영향으로 더 많아지는 경우가 발생한다. 따라서 기전력을 고려한 유효전압벡터 인가방식을 사용하면 스위칭수를 5~10%정도를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 하드웨어적으로도 비교적 간단히 구현할 수 있었다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 전류제어방법은 기전력이 DC link전압에 비해 큰 경우에도 스위칭 수가 감소함을 확인할 수 있었고 제어기 자체가 갖는 특성 또한 비교적 간단함을 알 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Bong-Hwan Kwon, "A Novel SVM-Based hysteresis Current Controller", IEEE Trans on Power Electronics, vol. 13, no 2, 1998
- [2] H.W. Van der Broeck, H.C. Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors.", IEEE Trans. on IA, vol. 24, no. 1, 1988
- [3] T.A. Lipo, "Recent progress in the development of solid state ac motor drives", IEEE Trans on Power Electronics, vol 3, no. 2, 1988
- [4] D.M. Brod and D.W. Novotny, "Current control of VSI-PWM Inverters", IEEE, Trans. Ind Electronics, vol. 37, no. 5, 1990
- [5] C.T. Pan and T.Y. Chang, "An improved hysteresis current controller for reducing switching frequency", IEEE trans. Power Electronics, vol. 9, no. 1, 1994
- [6] S. Fukuda, Y. Iwaji, and H. Hasegawa, "PWM technique for inverter with sinusoidal output current", IEEE Trans. Power Electronics., vol. 5, no. 1, 1990
- [7] N. Mohan, T.M. Underland, W.P. Robbins, "Power Electronics converters, applications and design", Wiley Press, second edition