

이중밴드 히스테리시스 전류 제어 방식

오원현, 유창훈, 신은철, 박성민, 노학엽, 유지윤
고려대학교 전기공학과

A Double Band Hysteresis Current Control Method

W.H. Oh, C.H. Yoo, E.C. Shin, S.M. Park, H.Y. Noh, and J.Y. Yoo
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

ABSTRACT

Hysteresis controllers are intrinsically robust to system parameters, exhibit very high dynamic response and are suitable for simple implementation. But the current control using a conventional hysteresis controller has the disadvantage that high switching frequency may happen due to lack of coordination among individual hysteresis controllers of three phases. This will of course increase the switching loss. In addition, the current error is not strictly limited. So, in this paper to reduce the switching frequency, a double band hysteresis current controller is proposed. The presented control system was tested with digital simulation in the Borland C++ program and demonstrate the advantage of proposed hysteresis current controller.

1. 서 론

히스테리시스 전류제어기는 전류오차를 측정하여 오차가 정해진 밴드를 벗어나면 즉시 인버터의 스위치 상태를 바꾸어 오차가 밴드 내에 머무르게 하는 순시 궤환 제어기이다. 전류제어기법에 대한 여러 가지 방법들이 제시되었지만 무효전력 보상장치에서는 하드웨어 구현이 쉽고, 동적응답이 빠르며, 최대전류 제한능력을 가지며, 부하 파라미터 변동에 민감하지 않고, 3상이 독립적으로 제어되는 히스테리시스 전류제어기가 많이 사용되고 있다. 그러나 3상 독립 히스테리시스 전류제어기 경우 각각의 히스테리시스 전류제어기 사이의 3상 관계정립이 결여되어 있어서 스위칭 주파수가 높아질 수 있고, 전류 오차도 정확히 제한되지 않는다. 하지만 3레벨 이상의 멀티레벨 히스테리시스 전류제어기를 사용하면 영전압 벡터를 인가할 수 있고 이로 인해 선전류의 기립이 완만하여 스위칭 주파수가 줄어든다. 또한 과도시의 전류 응답 특성이 빠르고 정상상태에서의 전류오차가 줄어드는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이중밴드를 갖는 5레벨 히스테리시스 전류제어 방식을 D-STATCOM (Distribution-STATIC synchronous COMPensator)에 적용하고자 한다. 또한 기존의 2-레벨 인버터를 사용하면서도 이중 밴드 설정으로 인해 늘어나는 각 전압상태를 보다 정밀하게 제어하기 위해서 12개의 전압벡터를 사용할 수 있는 150° 통전형의 인버터 방식을 적용하였다. 제안한 방식은 전력계통의 FACTS 장치인 배전급 STATCOM에 적용한 모의실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였다.^[1]

2. D-STATCOM의 수학적 모델링

2.1 회로방정식

전력계통에 연결된 D-STATCOM은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

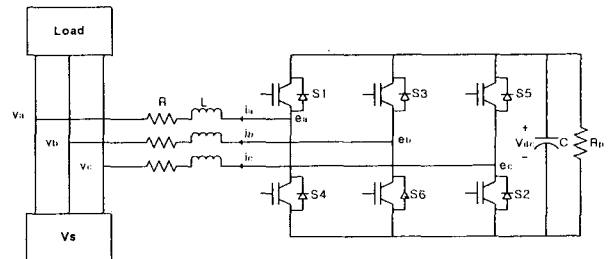


그림1. D-STATCOM 모델
Fig. 1 D-STATCOM Model

R과 L은 각각 변압기의 저항과 누설인덕턴스이며 R_p는 커패시터의 누설전류손실과 인버터의 스위칭 손실을 나타낸다.^{[2][3]}

그림 1의 회로 방정식은 식 (1)과 같다.

$$p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 & 0 \\ 0 & -R/L & 0 \\ 0 & 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

p : 미분연산자

계통전압의 동기속도를 기준으로 한 동기기준좌표계에서 D-STATCOM 회로방정식은 식 (2)과 같다.^[4]

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ \omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d - v_d \\ e_q - v_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

w : 계통전압(V)의 회전각속도

2.2 무효전력제어와 DC 링크 전압제어

동기기준좌표계에서 유효전력과 무효전력을 살펴보면, 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} |v| |i| \cos \phi = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \\ &= \frac{3}{2} v_d i_d (\because v_q = 0) \\ Q &= \frac{3}{2} |v| |i| \sin \phi = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) \\ &= \frac{3}{2} v_d i_q (\because v_q = 0) \end{aligned} \quad (3)$$

즉, 유효전력 P는 i_d 전류에 의해서 제어되고, 무효전력 Q는 i_q 전류에 의해서 제어되므로 동기기준좌표계에서 P, Q는 각각 i_d , i_q 전류에 의해서 독립적으로 제어됨을 알 수 있다.

유효전력과 무효전력에 대한 각각의 d, q축 전류 지령치는 PI제어기와 식 (3)을 이용하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.^[2]

$$\begin{aligned} i_d^* &= (k_1 + \frac{k_2}{s}) \cdot (v_{dc}^* - v_{dc}) \\ i_q^* &= \frac{2}{3v_d} Q^* \end{aligned} \quad (4)$$

3. 히스테리시스 전류제어기

3.1 기존의 D-STATCOM의 전류제어기

그림 2는 2레벨 히스테리시스 비교기를 표1은 한 상의 스위칭 방법을 나타내고 있다. 기존 D-STATCOM의 히스테리시스 전류제어기의 제어블록은 그림3과 같다. 전류 지령치를 3상 정지좌표계로 변환한 후에 각각의 3상 전류 오차 값이 3개의 2레벨 히스테리시스 제어기를 통해 들어간다.^[5]

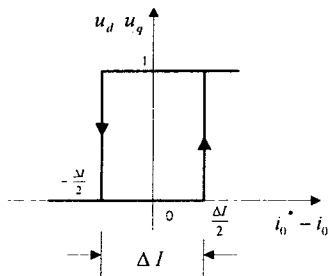


그림 2 2-레벨 히스테리시스 비교기
Fig. 2 2-Level Hysteresis Comparator

표 1. 2-레벨 히스테리시스 전류제어기 스위칭 방법

Table 1. 2-Level Hysteresis Current Controller Switching Method

	Upper leg	Lower leg
$i_0^* - i_0 > \text{upper band}$	1 (on)	-1 (off)
$i_0^* - i_0 < \text{lower band}$	-1 (off)	1 (on)
$i_0^* - i_0$ within bands	Switch status unchanged	Switch status unchanged

B, C상도 이와 같이 표1을 통해 인버터의 스위칭 함수를 생성하며 3개(a,b,c상)의 교류성분을 제어하게 된다.

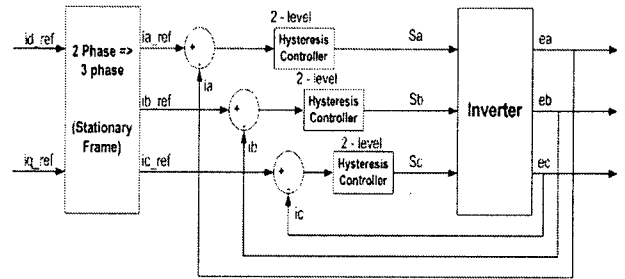


그림 3 기존 D-STATCOM 히스테리시스 전류제어기
Fig. 3 Conventional D-STATCOM Current Controller

3상 독립 히스테리시스 전류제어기가 쓰인 기존의 D-STATCOM은 문제는 독립적인 각각의 히스테리시스 전류제어기들 사이의 간섭문제에 의해 3상 관계정립이 결여되어 있다는 것이다. 이에 영전압 벡터를 인버터에 인가하기가 어려워, 그로 인해 스위칭 주파수가 높아지고, 스위칭 손실이 증가하게 된다. 그러므로 전류오차가 정확히 제한되지 않는다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 여러 가지 방안들이 제안되고 있다.^{[6][7][8]}

3.2 제안한 D-STATCOM의 전류제어기

기존의 히스테리시스 전류제어기의 문제점과 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 스위칭 주파수와 전류오차를 줄일 수 있는 이중밴드 히스테리시스 제어기를 제안한다.

그림 4와 그림 5는 이중밴드 히스테리시스의 밴드 구분과 비교기를 보여주고 있다.

$$A : i_0^* - i_0 > \frac{\Delta I}{2} \quad B : i_0^* - i_0 > \frac{\Delta I}{4} \quad C : i_0^* - i_0 = 0 \quad D : i_0^* - i_0 < -\frac{\Delta I}{4} \quad E : i_0^* - i_0 < -\frac{\Delta I}{2}$$

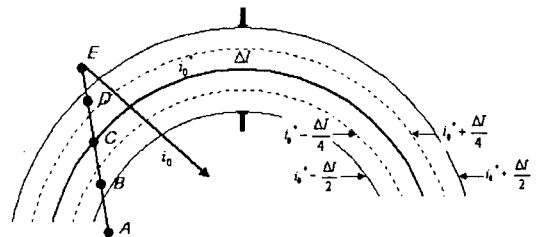


그림 4 이중밴드 히스테리시스 제어밴드
Fig. 4 Double Band Hysteresis Control Band

전류오차를 기존의 2구간에서 5구간으로 나누어 각 구간에 따라 세분화된 값을 할당하기 때문에

기존의 제어 방식보다 더욱 정확한 전압을 인가 할 수 있게 된다. 표 2에서는 이중밴드 즉 5-레벨 히스테리시스 전류제어기 밴드 지령치를 보여주고 있다.

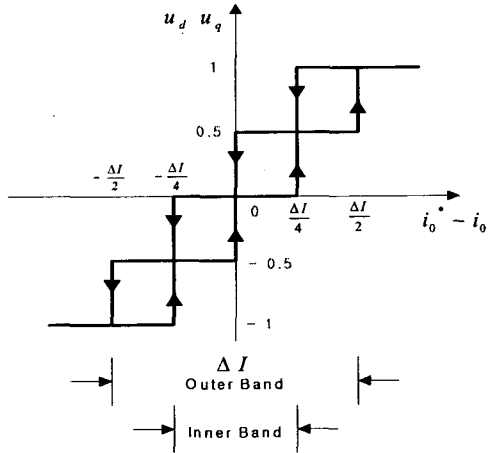


그림 5 이중밴드 히스테리시스 비교기
Fig. 5 Double Band Hysteresis Comparator

표 2 제안한 히스테리시스 전류제어기 밴드 지령치
Table 2 Proposed Hysteresis Current Control Band Reference Value

밴드 범위	u_d, u_q
$i_0^* - i_0 > \Delta I / 2$	1
$i_0^* - i_0 > \Delta I / 4$	0.5
$i_0^* - i_0 = 0$	0
$i_0^* - i_0 > -\Delta I / 4$	-0.5
$i_0^* - i_0 > -\Delta I / 2$	-1

제안한 D-STATCOM의 히스테리시스 전류제어기의 제어블록은 그림 6과 같다. 2상의 전류 지령치와 실제의 3상전류를 고정자 기준 좌표축으로 변환한 2상전류 오차값이 2개의 5레벨 히스테리시스 제어기를 통해 들어간다.

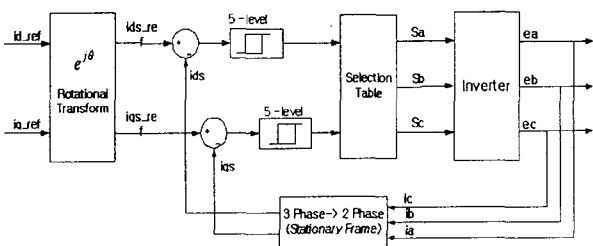


그림 6 제안한 D-STATCOM 히스테리시스 전류제어기
Fig. 6 Proposed D-STATCOM Hysteresis Current Controller

인버터 구동 방식은 이중 밴드 설정으로 인해 늘어나는 각 전압상태를 보다 정밀하게 제어하기 위해서 12개

의 전압벡터를 사용할 수 있는 150° 통전형의 전압벡터를 이용하였다. 그림 7은 150° 통전형의 공간전압벡터 상에서 제안한 히스테리시스 전류제어 밴드 내에서 인가할 수 있는 전압벡터를 나타내고 있다.

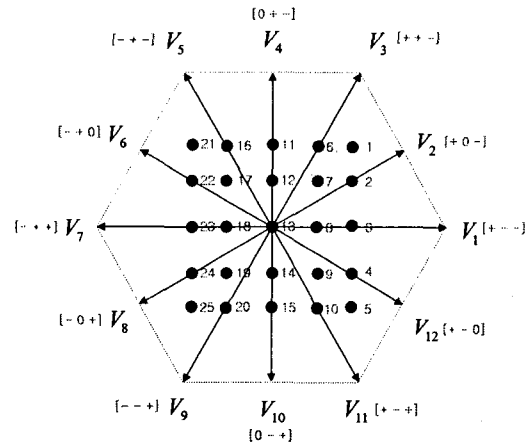


그림 7 공간벡터에 의한 히스테리시스 상태
Fig. 7 Hysteresis State by Space Vector

기존의 2레벨 비교기로 3상전류를 독립적으로 제어 할 경우 3개의 히스테리시스 비교기 지령치의 조합에 따라 8가지의 제어 경우로 나누어지지만 제안한 방식에 의한 5레벨 비교기로 2상전류를 제어하게 되면 영전압 벡터를 포함하는 25개의 경우가 발생한다. 그러므로 전류오차에 따라 더욱 정밀한 제어가 가능하고 3상을 독립적으로 제어하는 경우 보다 영전압 벡터를 더 많이 인가 할 수 있기 때문에 스위칭 주파수가 감소한다.

또한 이중밴드를 사용할 경우 전류오차가 제한된다. 예를 들어 그림 8에서 보듯이 Inner Band에 의해서 히스테리시스 상태가 그림 7의 1번에서 2번으로 전환 될 때 기존의 전압벡터로는 계속 V_3 를 인가해 주어야 하지만 제안한 전압방식에 의해서는 V_2 전압을 인가해 줄 수 있다. V_2 는 V_3 보다 전압의 크기가 작으므로 전류의 기립이 더 늦고 이로 인해 전류리플이 줄어들고 전류오차도 제한된다. 특히 정상상태에서는 전류오차가 Inner Band 내에서 제어되기 때문에 정상상태의 전류오차도 감소하게 된다.

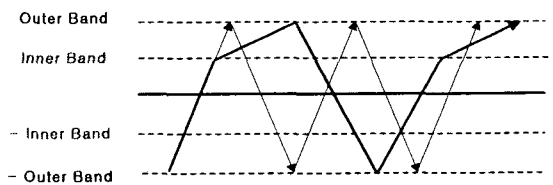


그림 8 이중밴드 히스테리시스 제어 방식
Fig. 8 Double Band Hysteresis Control Method

표 3은 제안한 히스테리시스 전류제어기의 상태에 따른 스위칭 테이블을 보여주고 있다.

표 3 제안한 히스테리시스 전류제어기의 스위칭 테이블

u_d	1					0.5					-0.5					-1									
	1	0.5	0	-0.5	-1	1	0.5	0	-0.5	-1	1	0.5	0	-0.5	-1	1	0.5	0	-0.5	-1					
Vector	V_3 or V_2	V_2	V_1	V_{12}	V_{11} or V_{12}	V_3	V_3 V_2	V_1	V_{11} or V_{12}	V_{11}	V_4	V_4	V_0	V_{10}	V_{10}	V_5	V_5 or V_6	V_7	V_8 V_9	V_9	V_5 or V_6	V_6	V_7	V_8	V_8 or V_9

4. 시뮬레이션

D-STATCOM에 적용한 기존의 히스테리시스 제어기와 제안된 히스테리시스 제어기의 성능을 비교, 분석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 그림9는 시뮬레이션의 모델을 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 미분방정식 계산은 Runge-Kutta방식을 사용했으며 미분방정식을 포함한 모든 수식 연산은 Borland C++로 프로그래밍하여 Matlab의 Plot을 이용하여 결과를 도식하였다. 시뮬레이션에 사용된 D-STATCOM의 파라미터는 다음과 같다.

$$V = 220V (60Hz), V_{dc}^* = 600V, R = 0.33\Omega$$

$$L = 5mH, C = 3000\mu F$$

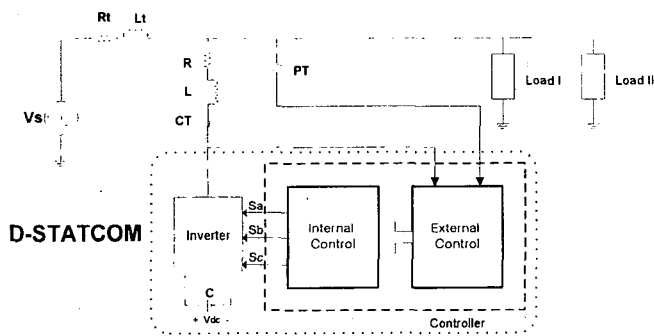


그림 9 D-STATCOM 시뮬레이션 모델
Fig. 9 D-STATCOM Simulation Model

그림 10과 그림 11은 각각의 히스테리시스 전류제어방법에 대한 무효전력 지령치에 대한 응답특성을 나타내고 있다. $t=0.325$ 에서 $Q=10KVAR$ 인 캐패시티브 보상모드로 운전하고 $t=0.4$ 에서 $Q=-10KVAR$ 인 인덕티브 보상모드로 전환하여 운전한 후 $t=0.475$ 에서 $Q=0$ 로 다시 전환하였다.

그림 10과 그림 11의 결과에서 보듯이 모두 히스테리시스 전류제어기로서의 빠른 응답특성과 지령치에 정확한 응답을 보이고 있다. 그러나 그림12와 그림13에서 보면 기존의 3상 독립 히스테리시스 전류 제어기는 스위칭이 불규칙적이며 영전압 벡터를 좀처럼 인가하기 힘든 결과를 나타내고 있다. 제안된 알고리즘을 통한 새로운 히스테리시스 전류 제어기는 기존의 방식 보다 많은 영전압 벡터를 인가할 수 있음을 볼 수 있다.

그 결과 그림 14와 같이 기존의 방법($f_1 = 6.46kHz$)보다 제안된 방법($f_2 = 7.65kHz$)이 스위칭 주파수가 감소됨을 알 수 있다. 또한 그림 15는 제안한 방식이 기존의 방식보다 전류 오차를 효과적으로 제한 할 수 있음을 보여주고 있다.

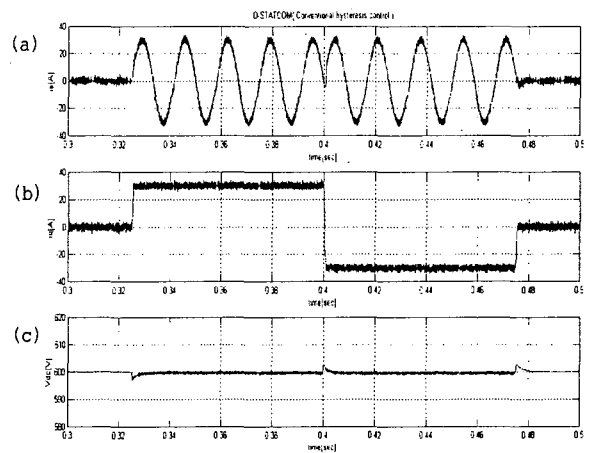


그림 10 전류제어기 응답특성 (기존)
Fig. 10 Current Controller Response Characteristics (Conventional)

(a) ia전류 (b) q축전류 (c) DC링크전압

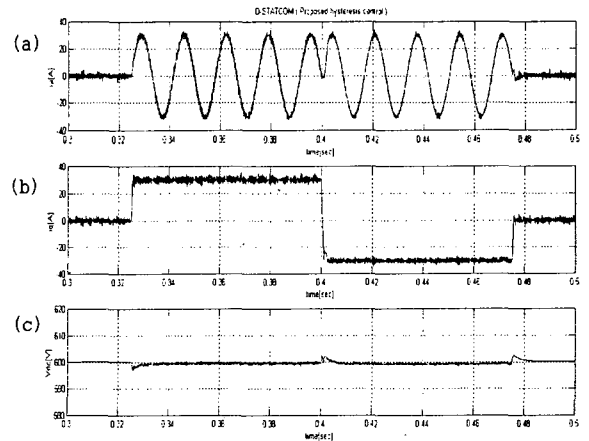


그림 11 전류제어기 응답특성(제안)
Fig. 11 Current Controller Response Characteristics (Proposed)

(a) ia전류 (b) q축전류 (c) DC링크전압

5. 결론

본 논문에서는 D-STATCOM의 전류제어기로서 기존 히스테리시스 제어기의 문제점을 보완한 개선된 히스테리시스 전류제어기를 제안하여 모의실험을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 알고리즘을 통해 최근 비선형부하에 즉각적으로 대응할 수 있는 빠른 응답 특성을 가지는 히스테리시스 전류제어기를 설계 할 수 있었다. 이중밴드를 사용함으로써 기존의 방식보다 더 많은 영전압벡터를 생성하고 이로 인하여 스위칭 주파수를 줄일 수 있어 스위칭 손실을 줄일 수 있었다. 또한 이중밴드로 인한 전류리플 및 정상상태 전류오차도 제한할 수 있었다. 향후 제안된 알고리즘을 기초로 D-STATCOM의 축소모형 실험을 통한 실계통 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 본다.

참고 문헌

- [1] N.Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York: IEEE Press, 2000.
- [2] 박성민, 오원현, 신은철, 유지운, "D-STATCOM 전류제어를 위한 새로운 히스테리시스 제어기", 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 2003.
- [3] Jae-Ho Choi, Hyong-Cheol Kim, Joo-Sik Kwak "Indirect Current Control Scheme in PWM Voltage-Sourced Converter", Power Conversion Conference - Nagaoka 1997, Proceedings of the , Volume: 1, 3-6 Aug. 1997.
- [4] C. Schauder, H. Mehta, " Vector analysis and control of advanced static VAR Compensators", IEE Proceedings-C, Vol. 140, NO. 4, July 1993.
- [5] K.L. Mok, D. Sutanto, L.A. Snider, "EMTP simulation of a STATCOM using Hysteresis Control", APSCOM 2000
- [6] P.C. Loh, G.H. Bode, D.G. Holmes and T.A. Lipo, "A Time-Based Double Band Hysteresis Current Regulation Strategy for Single-Phase Multilevel Inverter", Industry Applications, IEEE Transactions on , Vol: 39 Issue: 3, May-June 2003
- [7] Corzine, K.A., "A hysteresis current-regulated control for multi-level drives", Energy Conversion, IEEE Trans. on, Volume: 15 Issue: 2, June 2000.
- [8] Lafoz, M.; Iglesias, I.J.; Vezanones, C.; Visiers, M., "A novel double hysteresis-band current control for a three-level voltage source inverter ", Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual , Volume: 1, 18-23 June 2000

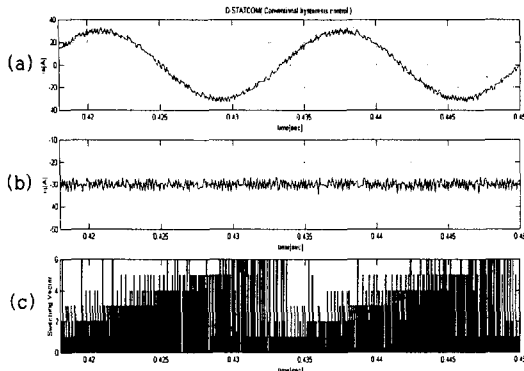


그림 12 전류파형과 스위칭 벡터 (기존)

Fig. 12 Current Wave and Switching Vector (Conventional)
(a) ia 전류 (b) q축 전류 (c) 스위칭 벡터

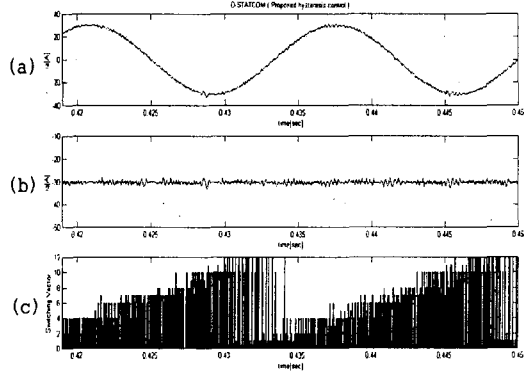


그림 13 전류파형과 스위칭 벡터 (제안)

Fig. 13 Current Wave and Switching Vector (Proposed)
(a) ia 전류 (b) q축 전류 (c) 스위칭 벡터

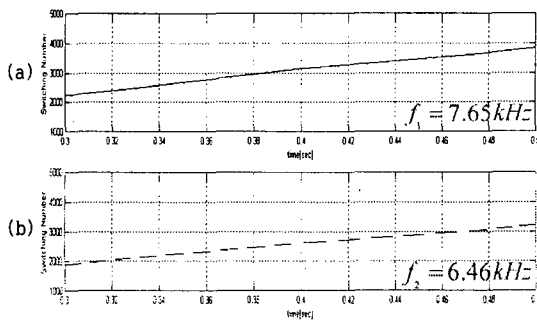
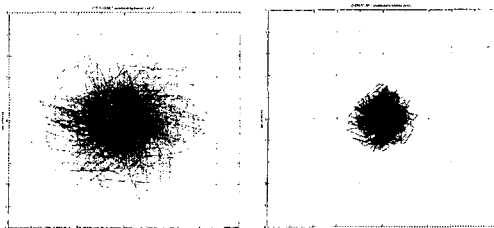


그림 14 스위칭 주파수

Fig. 14 Switching Frequency
(a) 기존 (b) 제안



(a) (b)

그림 15 전류오차 분포
Fig. 15 Current Error
(a) 기존 (b) 제안