

## SVM 기반 히스테리시스 제어기를 이용한 D-STATCOM 전류 제어에 관한 연구

崔 荊蕙<sup>\*</sup>, 申 垠 澈<sup>\*\*</sup>, 柳 志 潤<sup>†</sup>

### A Study on Current Control using a Novel SVM-Based Hysteresis Controller in D-STATCOM

Jeong-Hye Choi, Eun-Chul Shin and Ji-Yoon Yoo

#### 요 약

배전급 STATCOM(Distribution-network STATic synchronous COMPensator)에 적용 가능한 공간 벡터 변조(Space Vector Modulation, SVM) 기법을 이용한 히스테리시스 전류제어기를 제안하였다. 히스테리시스 전류제어기는 빠른 응답 특성, 쉬운 구현, 파라미터 변화에 대한 둔감성 등 많은 장점에도 불구하고 높은 스위칭 주파수와 제한되지 않는 전류 오차 때문에 스위칭 주파수에 영향을 받는 배전급 STATCOM 전류제어기로는 적합하지 않았다. 또한 전압 벡터의 인가방식에서도 뚜렷한 근거가 없어 전류오차가 제한되지 않았다. 이에 본 논문에서는 구역판별기, SVM, 그리고 외부와 내부 히스테리시스 제어기를 이용하여 높은 스위칭 주파수를 저감하고 특정 밴드 내에서 전류 오차를 줄인 개선된 SVM 기반의 히스테리시스 전류제어기를 제안하고 모의실험을 통해 제안한 기법의 유효성을 입증하였다.

#### ABSTRACT

This paper proposes a control algorithm for STATic synchronous COMPensator(STATCOM), based on Space Vector Modulation(SVM) and Hysteresis Current Controller(HCC) techniques. STATCOM is used to reactive power compensation on a distribution network. The proposed algorithm utilizes the advantages of the fast dynamic response of the hysteresis current control and the reduced switching number of the SVM scheme. The controller determines a set of space vectors from a region detector and applies a space vector. A set of space vectors including the zero vector, to reduce the number of switching, is determined from output signals of two hysteresis comparators. The presented control system was tested with digital simulation in the Borland C++ program and demonstrate the advantage of the proposed hysteresis current controller.

**Key Words** : Hysteresis current controller, SVM, FACTS, Static synchronous compensator

#### 1. 서 론

유연송전(Flexible AC Transmission System)은 전력용 반도체 소자의 고속 스위칭 특성을 이용한 전력 전자 기술을 응용하여 송배전 계통의 기본 특성을 결정하는 교류 송전선로의 임피던스, 모선의 전압크기 및 위상각 조정을 통해 전력조류분포, 전압 및 계통안정도 등 계통특성을 개선하여 설비 이용률을 향상시키고, 특히 특정 전력 수송로의 전력 수송능력 증대를

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 고려대 전기전자전파공학부 교수

E-mail : jyyoo@korea.ac.kr

<sup>\*</sup>정희원, 현대·기아 연구개발본부 연구원

<sup>\*\*</sup>정희원, 고려대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2005. 12. 28

1차 심사 : 2006. 1. 19

2차 심사 : 2006. 4. 6

심사완료 : 2006. 4. 18

통해 전체 계통의 공급신뢰도 향상을 목적으로 하는 전력 제어시스템 기술이다<sup>[1-5]</sup>. 이러한 FACTS 기기 중 무효전력 보상장치로서 STATCOM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[6-8]</sup>.

AC 모터 드라이브, 능동 필터, 무전정 전원공급장치 등과 같은 대부분의 고성능 산업용 시스템과 마찬가지로 배전 네트워크상에 적용 중인 STATCOM은 빠른 응답 특성을 갖는 전류제어기가 필수적인 요소로 전류 제어기의 성능에 따라 STATCOM의 무효전력 보상 성능에 영향을 미친다. 일반적으로 STATCOM의 주요 제어 성능인자는 지령치에 대한 STATCOM 출력 보상전류의 추종 능력이다<sup>[7,8]</sup>. 이에 STATCOM의 보상전류 추종능력 및 응답특성 향상을 위한 다양한 전류 제어 알고리즘에 제시되었다<sup>[9-11]</sup>. 다양한 전류 제어 알고리즘 중 쉬운 구현, 빠른 응답특성, 시스템 파라미터 변화의 둔감성을 고려한 히스테리시스 전류 제어 기법(Hysteresis Current Control)이 가장 적절한 해결방안으로 제시되고 있다. 기본적인 전류 제어 알고리즘에 히스테리시스 전류 제어기(Hysteresis Current Controller, HCC)의 밴드 폭 예측, 이중밴드, 고정된 변조 주파수를 이용한 HCC 등 다양한 전류 제어 알고리즘이 제시되었다<sup>[12-15]</sup>.

그러나 기존의 STATCOM에 적용된 HCC는 각 상에 독립된 히스테리시스 제어기의 상호간의 내부관계 부재로 인한 높은 스위칭 주파수가 단점이다. 영벡터를 적절히 인가할 수 없으며 전압벡터 인가 방식 또한 뚜렷한 근거가 없어 불필요한 전압 벡터들이 다수 인가되어 높은 스위칭 주파수에 의한 스위칭 손실이 크고 전류오차도 정확히 제한되지 않는다. 이에 스위칭 수를 저감시키고 최대 출력 전압의 향상을 위해서 HCC에 공간 벡터 변조 방식(Space Vector Modulation; SVM)이 적용되어 왔다<sup>[16-19]</sup>. 그러나 적용범위가 펄스 폭 변조 방식(Pulse Width Modulation; PWM) 인버터를 이용한 가변속 드라이브에 국한되었으며 전력용 소자의 스위칭 주파수 한계로 인해 STATCOM 전류제어에 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 부하변화에 빠르게 대처하고 온도와 운전환경에 따른 시스템 파라미터의 변화에 둔감하고 구현도 용이하다는 기존의 히스테리시스 제어기의 장점을 유지하면서 단점인 높은 스위칭 주파수를 줄인 SVM 기반의 새로운 HCC를 제안한다. 제안된 전류 제어기법은 구역판별기로부터 공간벡터를 정의하고 선택된 HCC에 대응되는 적절한 전압벡터를 인가하는 방식으로 전압원 인버터를 채택한 배전 네트워크

상의 STATCOM에 적용하여, 기존의 히스테리시스 전류 제어 기법과 제안한 히스테리시스 전류 제어 방식을 비교, 분석하였다. 제안한 알고리즘을 이용하여 저장된 스위칭 주파수와 제한된 전류 오차를 모의실험을 통해 그 유효성을 입증하였다.

## 2. D-STATCOM의 수학적 모델링

그림 1은 DC링크 커패시터를 갖는 전압원 인버터, 그리고 송전선로와 연결된 변압기를 포함한 D-STATCOM의 모델을 나타낸다. R과 L은 각각 변압기의 저항과 누설 인덕턴스, Rp는 커패시터의 누설 전류 손실과 인버터의 스위칭 손실을 나타낸다. 그림 1의 모델로부터 유도한 회로 방정식은 식 (1)과 같다.  $v_a, v_b, v_c$ 는 송전선로와 D-STATCOM의 연결 지점인 PCC(Point of Common Coupling)의 전압이고  $u_a, u_b, u_c$ 와  $i_a, i_b, i_c$ 는 각각 D-STATCOM 출력전압과 전류이고,  $p$ 는 미분연산자이다<sup>[9]</sup>.

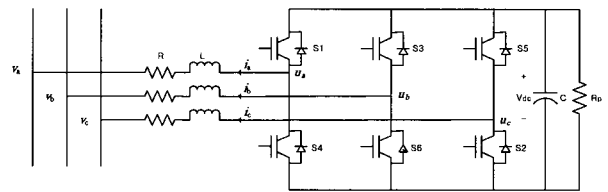


그림 1 D-STATCOM 모델  
Fig. 1 D-STATCOM Model

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

## 3. SVM 기반의 히스테리시스 전류제어기

그림 2는 기존의 2레벨 HCC 3개로 구성된 제어블록도이다. 기존의 방식은 히스테리시스 제어의 여러 장점을 가지고 있지만 영전압 벡터를 인가하기 어렵고 전압벡터 인가 방식 또한 뚜렷한 특징이 없어 불필요한 전압벡터를 인가함으로써 스위칭 수의 증가로 높은 스위칭 주파수와 이에 대한 스위칭 손실이 증가하게 된다.

본 논문에서는 기존의 히스테리시스 제어의 장점인 빠른 시스템 응답 특성, 시스템 파라미터에 대한 둔감성을 이용하면서도 SVM 기법을 적용하여 스위칭 주

과수를 줄여주고 영전압 벡터를 포함한 정확한 전압 벡터를 인가할 수 있는 SVM 기반의 새로운 HCC를 제안한다. 제안한 HCC의 제어블록도는 그림 3과 같다. 외부 밴드에 해당하는  $B_{ao}$ ,  $B_{bo}$ ,  $B_{co}$ 는 각각 a, b, c상의 히스테리시스 외부 밴드로서 적절한 전압 벡터를 선정하기 위한 구역 판별기의 역할을 한다.  $B_{ai}$ ,  $B_{bi}$ ,  $B_{ci}$ 로 구성된 히스테리시스 제어기의 내부 밴드는 외부 밴드보다 더 좁은 폭을 갖게 되며, 보상전류 지령치를 추종하고 특정 밴드 내에서 전류 오차의 정확한 제한을 위해 사용되는 HCC의 실제 밴드에 해당된다.

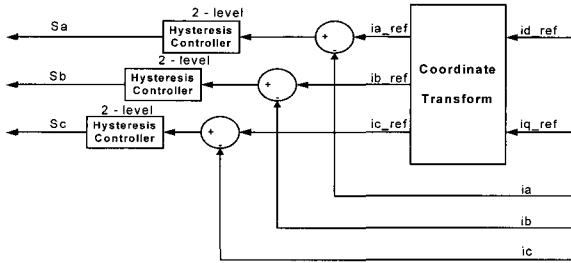


그림 2 기존 히스테리시스 전류제어기  
Fig. 2 Conventional Hysteresis Current Controller

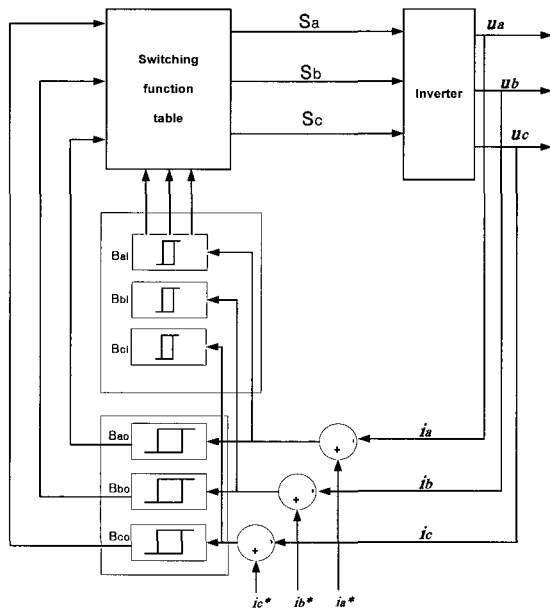


그림 3 제안된 히스테리시스 전류제어기  
Fig. 3 Proposed Hysteresis Current Controller

그림 1의 전압원 인버터형 STATCOM 모델로부터

각 상에 대응되는 스위칭 함수를 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ 는 각 상에 대한 스위칭 함수를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 S_i &: On \rightarrow S_i^* = 1, i=1,2,\dots,6 \\
 S_i &: Off \rightarrow S_i^* = 0 \\
 S_a &= S_1^* - S_4^* \\
 S_b &= S_3^* - S_6^* \\
 S_c &= S_5^* - S_2^*
 \end{aligned} \tag{2}$$

또한 수학적으로 인버터의 출력 전압은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e_a &= S_a \times V_{dc} \\
 e_b &= S_b \times V_{dc} \\
 e_c &= S_c \times V_{dc}
 \end{aligned} \tag{3}$$

일반적인 PWM 인버터에서 공간벡터  $V_n$ 은 식 (4)와 같이 표현되고 식 (5)로 간략화된다.

$$\begin{aligned}
 V_n &= \frac{1}{3} V_{dc} [ (S_1^* - S_4^*) + (S_3^* - S_6^*) e^{j\frac{2}{3}\pi} \\
 &\quad + (S_5^* - S_2^*) e^{-j\frac{2}{3}\pi} ]
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 V_n &= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(n-1)(\frac{\pi}{3})} \quad n=1, 2, \dots, 6 \\
 V_n &= 0 \quad n=0, 7
 \end{aligned} \tag{5}$$

그림 4(a)는 여덟 개의 스위치 상태에 대응되는 인가 가능한 여섯 개의 전압 벡터와 두 개의 영 벡터를 보이고 있다.

식 (1)의 송전선로와 병렬로 연결된 STATCOM의 각 상에 대한 미분 방정식은 식 (6)의 벡터 표현식으로 정리할 수 있다. 여기서  $\mathbf{o}$ 는  $a, b, c$  이고  $\mathbf{u}_o$ ,  $\mathbf{i}_o$ 는 각각 해당 상의 STATCOM 출력 전압벡터와 보상전류벡터를 나타낸다.

$$L \frac{d\mathbf{i}_o}{dt} = -R \mathbf{i}_o + \mathbf{u}_o - \mathbf{v}_o \tag{6}$$

보상 전류벡터에 대한 기준치를  $\mathbf{i}_o^*$  라고 정의하면 보상 전류오차벡터  $\mathbf{i}_e$ 를 식 (7)과 같이 표현가능하

며, 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 보상 전류오차 벡터의 미분 방정식을 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$i_e = i_o^* - i_o \tag{7}$$

$$L \frac{di_e}{dt} = L \frac{di_o^*}{dt} - R i_o + u_o - v_o \tag{8}$$

전류오차를 0으로 만들기 위해서는 식 (7)로부터  $i_o^* = i_o$ 의 조건을 만족해야 하고 이때 출력 되어야 하는 전압 벡터 지령치를  $u_o^*$  라고 정의하면 식 (9)와 같이 표현된다.

$$u_o^* = L \frac{di_o^*}{dt} - R i_o^* - v_o \tag{9}$$

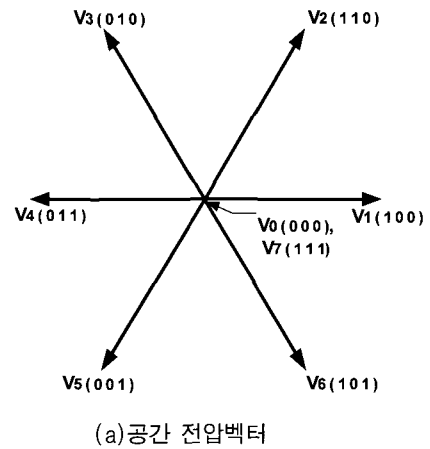
식 (9)에 식 (7)을 대입하고 식 (6)을 이용하면 식 (10)과 같이 보상 전류오차 벡터의 미분 방정식을 출력 전압벡터와 그에 대한 지령치로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} L \frac{di_e}{dt} &= u_o^* - (L \frac{di_o}{dt} + R i_o + v_o) \\ &= u_o^* - u_o \end{aligned} \tag{10}$$

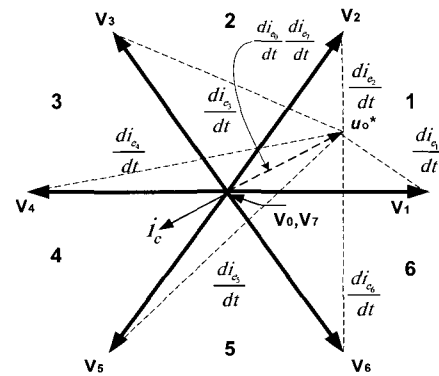
식 (10)에서 보는 바와 같이 본 논문에서 저감하고자 하는 전류 오차의 미분 성분은 출력 전압 벡터와 해당 지령 벡터에 의해 영향을 받게 된다. 전류 오차를 제한할 수 있는 출력 전압 벡터의 지령치를 만들기 위하여 STATCOM의 인버터 출력 전압 벡터를 변조시켜야하므로  $u_o^*$ 는 식 (11)과 같이 공간 벡터( $V_n$ )로 표현할 수 있다.

$$L \frac{di_e}{dt} = u_o^* - V_n \tag{11}$$

일반적으로 HCC는 각 상의 전류 벡터가 전류 벡터 지령치를 빠른 응답 속도로 추종하고 전압과 시스템 파라미터 변동에 둔감한 특성을 이용하고 있다. 그러나 각 상에 존재하는 각각의 HCC는 서로간의 관계 정립이 되지 않아 스위칭 주파수가 높고, 전류오차가 제한되지 않는 단점이 있다. HCC의 이러한 단점은 공간 벡터 개념을 적용하여 개선할 수 있다. SVM의 공간 벡터를 나타낸 그림 4(b)와 같이 적절한 전압 벡터를 인가함으로써 전류 오차를 제한할 수 있다.



(a)공간 전압벡터



(b)전류 오차 미분 벡터

그림 4 전압벡터  
Fig. 4 Space vectors

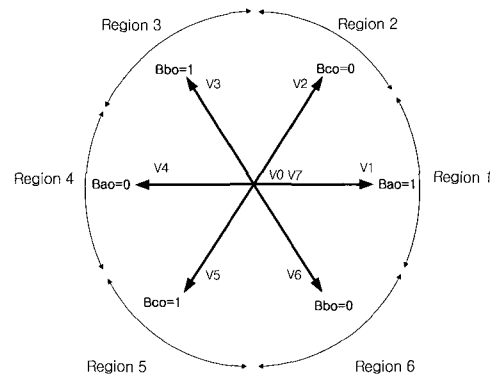


그림 5 전압 벡터와 외부 구역 판별기 출력 값의 관계  
Fig. 5 Relation of voltage vectors and output of region detector

그림 4(b)는 공간 전압벡터 지령치  $u_o^*$ 가 구역 1에 위치하고 있을 때 지령치를 변조시킬 수 있는 전압벡터  $V_n$ 에 대응되는 전류 오차 미분 벡터를 보여 주고 있다. 구역 1에서 공간 전압벡터  $u_o^*$ 를 인가할 수 있는 적절한 공간 벡터는  $V_1, V_2$  그리고  $V_0$ 이다. 그러나 일반적인 HCC에서는 영전압 벡터를 사용하지 못하고 다른 전압 벡터를 이용하게 된다. 스위칭 주파수를 저감하기 위해서는 크기를 줄여야 하는 전류 오차 미분 벡터에 대응하는 공간 전압 벡터  $V_n$ 를 인가해야 한다. 본 논문에서 제안하는 전류 오차 ( $i_e$ ) 저감 기법은 과도 상태에서는 빠른 전류 응답을 위해 가장 큰 역방향의 전류 오차 미분 벡터인  $di_{e_s}/dt$ 를 선택하고, 정상 상태에서는 고조파 제거, 스위칭 수의 감소를 위해 영벡터에 대응되는 전류 오차 미분 벡터를 선택한다. 그러나 전류 오차의 미분 성분을 포함하고 있기 때문에 일반적으로 쉽게 연산이 되지 않는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전압벡터 지령치를 직접 사용하는 방법 대신 전류 오차 미분 벡터의 부호 변화에 대응되는 그림 5의 구역 판별기를 사용하였다.  $B_{\omega}, B_{\omega}, B_{\omega}$ 는 각 상의 히스테리시스 외부 밴드를 의미한다. 구역 판별기의 역할을 해주는 이 밴드는 내부 히스테리시스 밴드보다 더 넓은 폭의 밴드 폭을 가진다. 만약 외부 HCC를 통해 나온 상태 값이  $(B_{\omega}, B_{\omega}, B_{\omega})=(1\ 0\ 0)$ 을 가리키면 구역 1에 출력하고자 하는 전압 벡터가 존재함을 알려준다.

외부 밴드보다 더 좁은 폭을 가진 내부 밴드는 전류 지령치를 추정하고 특정 밴드 내에서 전류 오차를 더 정확히 제한하기 위해 사용되어 진다. 즉 전류 지령치와 보상 출력 전류의 차이인 전류 오차 값이 내부 밴드의 상한치(Upper band) 위쪽으로 벗어나게 되면 그때의 밴드 상태를 1로 표시한다. 또한 오차 값이 내부 밴드의 하한치(Lower band) 보다 아래쪽으로 벗어나게 되면 밴드 상태는 0으로 표시한다. 이 값들에 따라 판별해 놓은 구역에서 해당되는 전압 벡터의 집합 중 가장 적합한 전압 벡터 하나를 적용하게 된다. 예를 들어 A상 전류 오차 값이 내부 히스테리시스 A상 비교기의 상한치 위쪽으로 벗어나고 B상, C상 전류 오차 값이 내부 히스테리시스 비교기의 하한치 아래쪽으로 벗어나면  $(B_{\bar{a}}, B_{\bar{b}}, B_{\bar{c}})=(1\ 0\ 0)$ 으로 표시된다. 이 값에 따라 적절한 전압 벡터  $V_1$ 를 적용하게 된다.

구역 판별을 하는 외부 밴드와 전류 오차를 적절히 제어하기 위한 내부 밴드의 각각의 상태 값을 이용하

표 1 히스테리시스전류제어기밴드상태 표시 테이블  
Table 1 Main band state of hysteresis current controller

Current error	$B_{\bar{a}}$	$B_{\bar{b}}$	$B_{\bar{c}}$
$i_{ref}-i > \text{상한치 (upper band)}$	1	1	1
$i_{ref}-i < \text{하한치 (lower band)}$	0	0	0

표 2 제안된 히스테리시스 전류제어기의 스위칭 테이블  
Table 2 Switching Table of proposed hysteresis current controller

Region	$B_{\omega}$	$B_{\omega}$	$B_{\omega}$	$B_{\bar{a}}$	$B_{\bar{b}}$	$B_{\bar{c}}$	$V_n$
I	1	0	0	1	0	1	$V_6$
				1	0	0	$V_1$
				1	1	0	$V_2$
				other cases			$V_7$
II	1	1	0	1	0	0	$V_1$
				1	1	0	$V_2$
				0	1	0	$V_3$
				other cases			$V_0$
III	0	1	0	1	1	0	$V_2$
				0	1	0	$V_3$
				0	1	1	$V_4$
				other cases			$V_7$
IV	0	1	1	0	1	0	$V_3$
				0	1	1	$V_4$
				0	0	1	$V_5$
				other cases			$V_0$
V	0	0	1	0	1	1	$V_4$
				0	0	1	$V_5$
				1	0	1	$V_6$
				other cases			$V_7$
VI	1	0	1	0	0	1	$V_5$
				1	0	1	$V_6$
				1	0	0	$V_1$
				other cases			$V_0$

여 적절한 스위칭 함수를 만들기 위해 표 2와 같이 HCC의 스위칭 테이블을 만들 수 있다. 예를 들어 구역 판별기 역할의 외부 밴드에서  $(B_{\omega}, B_{\omega}, B_{\omega})=(1\ 0\ 0)$ 이면 인가할 출력 전압 벡터가 구역 1에 존재함을 의미한다. 이에 따라 구역 1에 해당되는 공간 벡터들의 집합인  $V_1, V_2, V_6, V_7$  중에서 하나의 전압 벡터를

선택하게 된다. 외부 밴드 보다 더 좁은 폭을 갖는 내부 밴드의 상태에 따라 적절한 하나의 벡터를 인가하게 된다. 만약 구역 1에서  $(B_{\bar{a}} \ B_{\bar{b}} \ B_{\bar{c}})=(1 \ 0 \ 0)$ 이면 A상 전류는 현재 전류가 지령치 전류 보다 낮고 B상과 C상 전류는 현재 전류가 지령치 전류 보다 높음을 의미한다. 즉 이 값을 보상하기 위해 인가 가능한 전압 벡터 집합 중 가장 근접한  $V_1$  벡터를 인가하면 된다. 또 다른 경우 구역 1에서  $(B_{\bar{a}} \ B_{\bar{b}} \ B_{\bar{c}})=(1 \ 0 \ 1)$ 이면 A상, C상 전류는 현재 전류가 지령치 전류 보다 낮고 B상 전류는 현재 전류가 지령치 전류 보다 높음을 의미하므로  $V_6$  벡터를 인버터에 인가한다. 이와 마찬가지로 방법으로  $(B_{\bar{a}} \ B_{\bar{b}} \ B_{\bar{c}})=(1 \ 1 \ 0)$ 의 경우에는  $V_2$ 를 인가한다. 그리고 구역 1에서 이외의 다른 상태 값이 인가되면 영전압 벡터  $V_7$ 을 인가함으로써 스위칭 수를 최소한으로 줄여준다.

4. 시뮬레이션

STATCOM의 전류제어기로서 기존 3상 독립 히스테리시스 전류제어기와 본 논문에서 제안한 HCC의 성능을 비교, 분석하기 위해 모의 실험을 수행하였다.

표 3 시뮬레이션 파라미터  
Table 3 Simulation Parameter

Vs	3상 220 [V], 60 [Hz]
Line impedance ( Rt, Lt )	0.3 [ $\Omega$ ], 0.003 [H]
R	0.23 [ $\Omega$ ]
L	0.005 [H]
C	4500 [ $\mu$ F]
Vdc_ref ( DC-Link 전압 지령치)	600 [V]
Ts ( Sampling Time )	50 [ $\mu$ s]

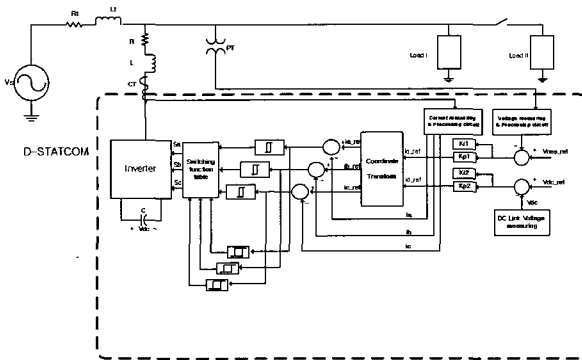


그림 6 D-STATCOM 시뮬레이션 개략도  
Fig. 6 Simplified simulation schematic of D-STATCOM

표 3은 모의실험에 사용된 STATCOM의 시스템 파라미터이고, 그림 6은 본 논문에서 수행한 모의 실험 모델이다. 모의실험의 미분 방정식 계산은 Runge-Kutta방식을 사용했으며 미분방정식을 포함한 모든 수식 연산은 Borland C++로 프로그래밍하여 Matlab의 Plot 명령을 이용하여 결과를 출력하였다.

그림 7은 기존 HCC를 적용한 STATCOM의 A상 출력전류, 무효전력 보상 전류, 그리고 DC Link 전압을 보여주고 있다. 그림 8은 본 논문에서 제안한 HCC를 적용한 STATCOM의 무효전력 지령치에 대한 응

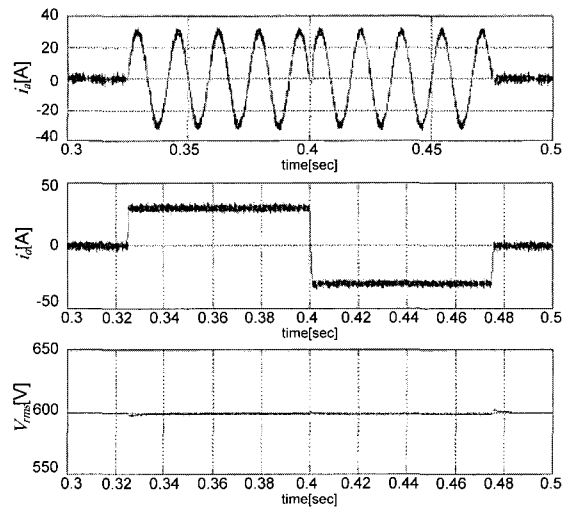


그림 7 기존 HCC 응답특성 (t=0.3-0.5)  
Fig. 7 Characteristics responses of conventional HCC

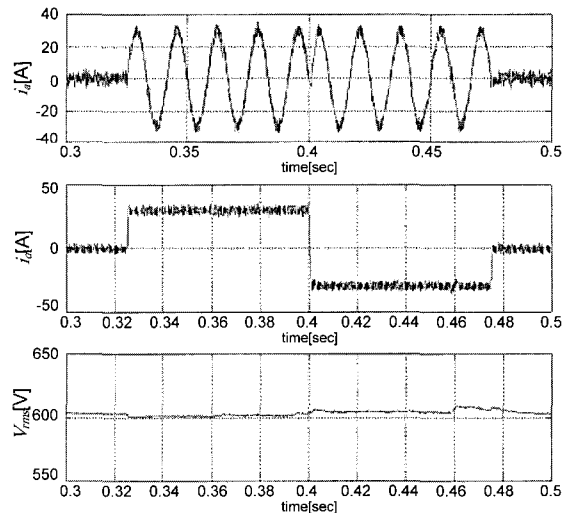
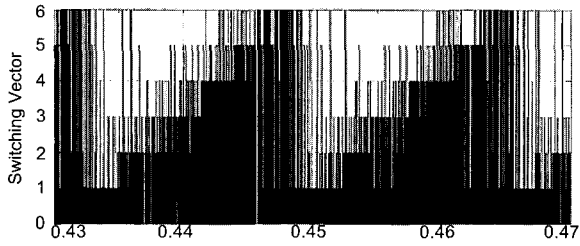
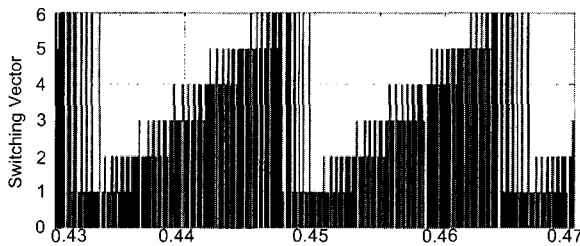


그림 8 제안한 HCC 응답특성 (t=0.3-0.5)  
Fig. 8 Characteristics responses of proposed HCC

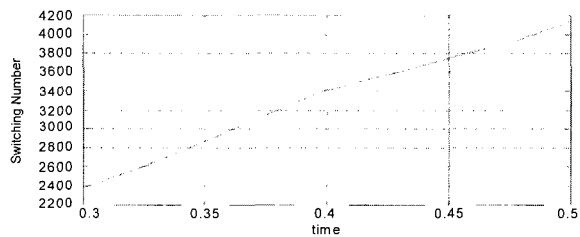


(a) 기존 HCC에 의해 인가된 전압 벡터

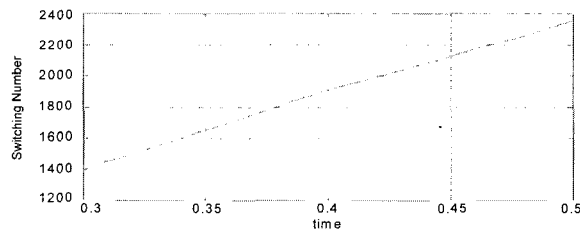


(b) 제안한 HCC에 의해 인가된 전압 벡터

그림 9 인가된 전압 벡터  
Fig. 9 Applied voltage vector



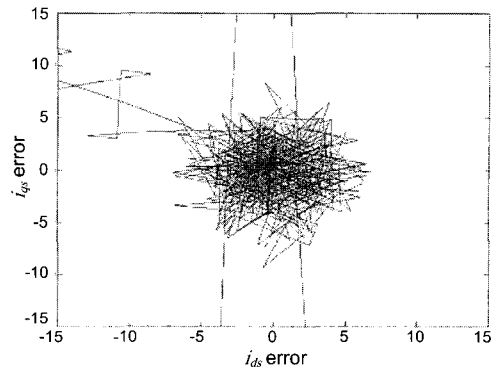
(a) 기존 히스테리시스 전류제어기 ( $f_1=8.4$  kHz)



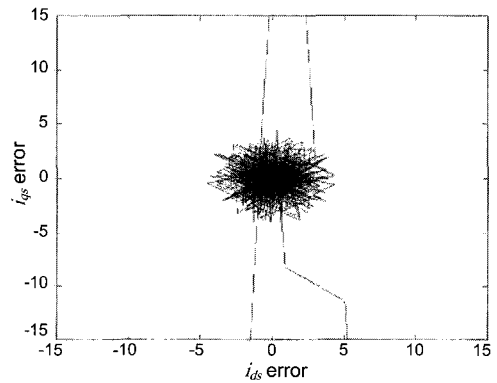
(b) 제안된 히스테리시스 전류제어기 ( $f_2=4.6$  kHz)

그림 10 스위칭 수  
Fig. 10 Switching Number

답 특성을 나타내고 있다. 초기 상태는 무부하 상태로 송전 선로 상에 특정 사고 또는 비선형 부하가 인가되기 이전의 응답 특성으로서 보상을 위한 STATCOM의 출력은 없는 상태이다.  $t=0.325s$ 에서  $Q=10kVAr$ 인



(a) 기존 히스테리시스 전류제어기



(b) 제안된 히스테리시스 전류제어기

그림 11 전류 오차 영역  
Fig. 11 Current error area

부하가 인가된 경우, 즉 커패시티브 보상모드로 운전하고 다시  $t=0.4$ 에서  $Q=-10kVAr$ 인 인덕티브 보상모드로 전환하여 운전한 후  $t=0.475s$ 에서  $Q=0$ 으로 다시 전환하였다. 그림 7과 8의 결과에서 보이는 바와 같이 다른 전류 제어기와 비교하여 HCC의 특징인 빠른 응답 특성과 지령치에 대해 정확한 추종 성능을 보이고 있다. 그러나 그림 9(a)에서 보면 기존의 히스테리시스 전류 제어기는 뚜렷한 근거 없이 빈번한 스위칭 동작으로 불필요한 전압 벡터들이 인가되고 스위칭이 불규칙적이며 영전압 벡터도 좀처럼 인가하기 힘든 결과를 보이고 있다. 반면 제안된 알고리즘을 통한 새로운 HCC는 히스테리시스 제어의 장점을 살려 빠른 응답 특성을 가지며, 적절한 영전압 벡터 인가를 위해 SVM 기법을 적용하여 정확한 전압 벡터를 인가함으로써 불필요한 스위칭이 사라지고 영전압 벡터의 인가가 눈에 띄게 많아 졌음을 알 수 있다. 그림 10는 기존 HCC와 제안한 HCC의 스위칭 주파수를 비교하였

다. 기존 HCC의 경우 스위칭 주파수가 8.4kHz이고, 제안한 HCC는 4.6kHz로서 기존 스위칭 주파수보다 약 46%만큼 감소되었다. 또한 그림 11의 전류 오차 제적은 제안한 방법이 기존 방식보다 좁은 영역으로 수렴한다. 이는 제안한 HCC가 보다 효과적으로 전류 오차를 제한함을 알 수 있다. 제안된 히스테리시스 제어기를 가진 STATCOM을 전력시스템에 연결하여 부하 변화 시 PCC전압을 조정하는 모의실험을 행하였다. 그림 12는  $t=0.2s$ 에서  $t=0.425s$ 까지 인덕티브 부하를 인가한 경우, 보상기를 설치하지 않은 경우 전압이 유지되지 않는다. 제안된 히스테리시스 전류제어기를 적용한 D-STATCOM 설치 시 빠른 응답특성을 보이며 무효전력보상을 통한 일정 전압 유지가 가능한 것을 볼 수가 있다.

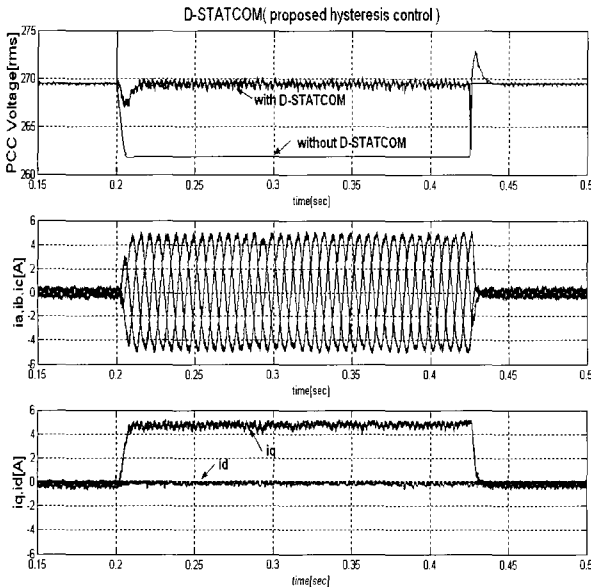


그림 12 제안한 HCC 전압조정 특성  
 (a)Vrms 값 (b)인버터 전류 (c)id, iq 전류  
 Fig. 12 Voltage regulation characteristics of proposed HCC  
 (a)Vrmsvalue (b)Current of VSI (c)d, q-axis current

### 5. 결 론

본 논문에서는 유연송전을 위한 설비 중 전압원 인버터 기반 D-STATCOM의 전류제어기로 기존 히스테리시스 제어기의 문제점인 높은 스위칭 주파수, 제한되지 않는 전류 오차를 보완한 SVM 기반의 히스테리시스 전류제어기를 제안하여 모의실험을 통해 그 유

효성을 입증하였다. 이 제안된 기법은 기존 히스테리시스 전류제어기의 장점인 빠른 응답 특성과 스위칭 수 저감을 위해 SVM 기법을 동시에 적용하였다. 전류 오차가 히스테리시스 외부 밴드의 영역을 벗어나는 경우 구역 판별기를 이용하여 영전압 벡터를 포함한 적절한 공간 전압 벡터 집합을 선정하여 빠른 전류 응답 특성을 확보하였다. 내부 히스테리시스 제어기는 정상 상태에서의 전류 오차를 특정 밴드 내에서 정확하게 제한하기 위하여 SVM 기법을 적용하여 히스테리시스 제어의 단점을 보완하여 더 많은 영전압 벡터와 전압 벡터 인가에 뚜렷한 방식을 제안하여 스위칭 수를 감소시켜 스위칭 주파수를 저감하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] N.Hingorani and L. Gyugyi, 'Understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems.' New York: IEEE Press, 2000.
- [2] 'FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술개발(I,II)', 과학기술부, 2000.
- [3] E Acha, et. al, 'Power Electronic Control in Electrical System', Newnes, 2002.
- [4] Hans-Ake Jonsson, "FACTS: Transmission solutions in a changing world", IEEE, 2002.
- [5] L.Dong, M.L.Crow, C.chen, L.Zhang and S.Atcitty "A Reconfigurable FACTS System for University Laboratories " IEEE Trans on Power Systems, Vol.19, No.1, 2004. 2.
- [6] D.J.Hanson, "STATCOM:a new era of reactive compensation", Power engineering Journal, 2002. 6.
- [7] Pierre Giroux, et. al, "Modeling and Simulation of Distribution STATCOM using Simulink's Power System Blockset", IECON'01.
- [8] Pranesh Rao, M.L.Crow, and Zhiping Yang, " STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications" IEEE Trans. on Power delivery, Vol.15, No.4, 2000.10.
- [9] C.Schauder, H.Mehta, " Vector analysis and control of advanced static VAR Compensators ", IEE Proceedings-C, Vol.140, No.4, 1993. 7.
- [10] K.L.Mok, D.Sutanto, L.A.Snider, "EMTP simulation of a STATCOM using Hysteresis Control", APSCOM 2000.
- [11] G.W.Moon " Predictive current control of distribution static compensator for reactive power compensation ", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 5, 1999. 9.
- [12] Luigi Malesani and Paolo Tenti, "A Novel Hysteresis



Control Method for Current-Controlled Voltage- Source PWM Inverters with Constant Modulation Frequency", IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol. 26, NO. 1, January/February 1990.

- [13] B.K.Bose, "An Adaptive hysteresis-band current controller technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive systems", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.37, no.5, pp.402-408, 1990. 10.
- [14] Ching-Tsai Pan and Ting-Yu Chang, "An Improved Hysteresis Current Controller for reducing Switching Frequency", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.9, No. 1, 1994. 1.
- [15] Luigi Malesani, et. al, "Improved Constant-Frequency Hysteresis Current Control of VSI Inverters with Simple Feedback Bandwidth Prediction", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 33, NO. 5, 1997. 10.
- [16] C.T.Pan and T.Y.chang "An improved hysteresis current controller for reducing switching frequency", IEEE Trans.,Power Electronics, Vol.9, No.1, pp97-104, 1994.
- [17] M.P.Kazmierkowski, W.sulkowski and M.A.Dzieniokowski, "Novel space vector based current controllers for PWM inverters," IEEE Trans.,Power Electronics, Vol.6, No.1,pp158-166, 1999. 1.
- [18] B.H. Kwon, T.W. Kim and J.H. Youm, "A Novel SVM-Based Hysteresis Current Controller", IEEE Transaction Power Electronics, Vol.13, No.2, pp.297-307, 1998. 3.
- [19] P.Garcia-Gonzalez and A.Garcia-Cerrda, "Control system for a PWM-based STATCOM", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Issue 4, Oct. 2000 Page(s):1252~1257.



#### 신은철(申垠澈)

1972년 10월 24일생. 1997년 고려대 제어계측공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



#### 유지윤(柳志潤)

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다대학교 전기공학과 졸업(공학). 1987년~1991년 창원대 전기공학과 조교수. 현재 고려대 공대 전기전자전파공학부 교수.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업에 의해 작성되었습니다.

### 저 자 소 개



#### 최정혜(崔荊蕙)

1981년 2월 6일생. 2003년 고려대 제어계측공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대·기아 연구개발본부 연구원.