

# 전압원 인버터의 공간 전압 벡터 세분화를 통한 모델 예측 제어 기반의 SVM 기법

문현철, 이준희, 이준석, 이교범  
아주대학교

## MPC-SVM Method using Segmentation of Space Voltage Vectors in a Voltage Source Inverter

Hyun-Cheol Moon, June-Hee Lee, \*June-Seok Lee, Kyo-Beum Lee  
Ajou university, \*Korea Railroad Research Institute

### ABSTRACT

본 논문에서는 전류품질 향상을 위해 다양한 전압벡터를 인가하는 모델 예측 제어 기반의 공간 벡터 변조 기법을 제안한다. 기존의 모델 예측 제어 기반의 전류제어는 제어주기 동안 하나의 스위치 상태가 인가되어 낮은 스위칭 횟수로 인해 높은 전류품질을 기대하기 힘들다. 이러한 이유로 본 논문에서 제안하는 방법은 공간 벡터도 상에서 전압벡터의 세분화를 통해 스위칭 횟수를 늘려 전류품질을 높일 수 있다. 또한 계통 위상각을 이용해 필요한 전압벡터만을 사용하여 비용함수를 계산하기 때문에 제어주기 동안 계산시간을 보장할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방법이 기존의 모델 예측 제어 기법의 전류제어 기법보다 향상된 전류품질을 보장하는 것을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 마이크로컨트롤러(Micro controller unit, MCU)의 발전과 더불어 전력변환시스템에서 모델 예측 제어 기법의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전력변환 시스템에서 기존 모델 예측 제어 기법은 PWM (Pulse width modulation) 기법을 사용하지 않기 때문에 일정한 스위칭 주파수를 보장하지 않는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 기존의 모델 예측 제어 기법은 좋은 성능의 DSP (Digital signal processor) 하드웨어를 사용하거나 큰 인덕터 또는 커패시터와 같은 필터 소자가 필요하다. 하지만 이러한 경우 전체 시스템의 부피와 비용이 증가한다는 단점 때문에 전력변환시스템에서의 모델 예측 제어 기법은 대용량 시스템에 주로 사용되었다. 하지만 공간벡터변조 기법을 기반한 모델 예측 제어 기법의 연구가 진행되면서 스위칭 횟수를 보장하는 동시에 높은 성능을 보장하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]-[2]</sup> 본 논문에서는 공간벡터도를 세분화하여 다양한 전압벡터를 인가하고, 지령 전압의 위상각을 이용해 공간벡터도 상에서 비용함수에 들어갈 전압벡터 영역을 결정하여 한 제어주기 동안 계산시간을 보장하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 기존 방법과 제안하는 방법의 전류 품질을 비교 분석한다.

### 2. 제안한 모델 예측 제어 기반의 SVM 기법

제안한 방법의 세분화된 공간벡터도는 그림 1과 그림 2와 같다. 그림 1은 30도 간격으로 세분화된 공간벡터도로, 총 12개

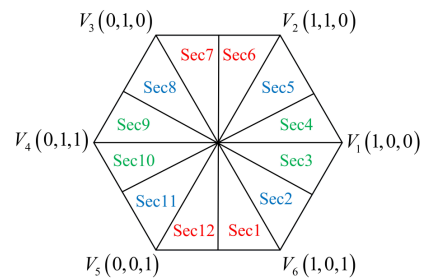


그림 1 세분화된 공간벡터도  
Fig. 1 Segmentation of space vector diagram

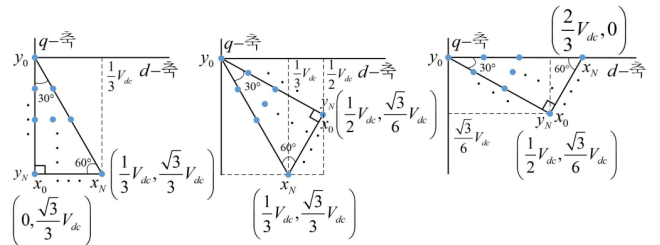


그림 2 영역 1~3의 세분화된 전압벡터  
Fig. 2 Segmented voltage vectors of sector 1~3

영역으로 구성되고 각 영역의 전압벡터들은 서로 대칭관계가 있음을 알 수 있다. 예를 들면, Sec1의 전압벡터 값을 기준으로 Sec6, Sec7, Sec12의 전압벡터는 각각 d축, q축, 원점 대칭 관계이다. 그림 2는 균일하게 N등분된 공간벡터도의 영역 1~3을 나타내며, 각 영역에서의 전압벡터 값은 다음과 같다.

$$Sec1 : (V_{1,x_i}, V_{1,y_j}) = \left( \frac{x_i}{N} \frac{1}{3} V_{dc} - \frac{y_j}{N} \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc} \right) \quad (1)$$

$$Sec2 : (V_{2,x_i}, V_{2,y_j}) = \left( \frac{-x_i + 3y_j}{N} \frac{1}{6} V_{dc} - \frac{x_i + y_j}{N} \frac{\sqrt{3}}{6} V_{dc} \right) \quad (2)$$

$$Sec3 : (V_{3,x_i}, V_{3,y_j}) = \left( \frac{x_i + 3y_j}{N} \frac{1}{6} V_{dc} - \frac{-x_i + y_j}{N} \frac{\sqrt{3}}{6} V_{dc} \right) \quad (3)$$

여기서,  $x_i, y_j$ 는 각각 세분화된 영역의 좌표값,  $N$ 은 세분화된 공간벡터도 개수,  $V_{dc}$ 는 인버터 직류단 전압을 의미한다. 나머지 영역 4~12에서의 전압벡터 값은 영역 1~3의 값을 이용하여 정의할 수 있다. 부하 임피던스와 출력 전류에 의해서 지령 위상각의 변동이 발생하게 되면 정확한 전압벡터 영역을 선정하지 못하는 경우가 존재하여 정확한 지령 위상각 추종이

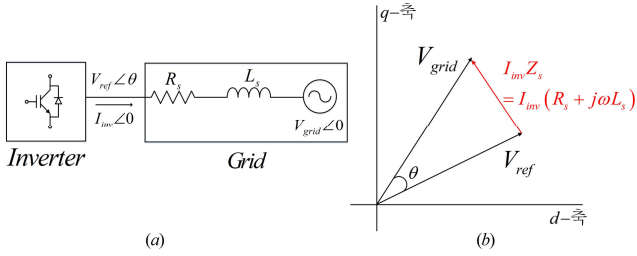


그림 3 (a) 계통연계 인버터 등가회로  
(b) 계통전압 및 지령전압의 벡터도  
Fig. 3 (a) Equivalent circuit of grid-connected inverter  
(b) Vector Diagram of grid and reference voltage

필요하다. 그림 3-a는 계통연계 인버터 등가회로이며, 그림 3-b는 계통전압과 지령전압의 벡터도를 나타낸다. 인버터로부터 계통 측으로 흐르는 전류는 식 (4)와 같다.

$$\frac{v_{grid} - v_{ref}}{Z} = \frac{V_{grid} \angle 0 - V_{ref} \angle \theta}{R_s + j2\pi fL} = I_{inv} \angle 0 \quad (4)$$

여기서,  $L$ 와  $R$ 은 필터 인덕턴스와 저항을 나타내며,  $f$ 는 계통 주파수이다. 식 (5)는 식 (4)를  $\theta$ 에 관한 식으로 정리한 후 지령 위상각을 계산한 식으로, 이를 이용하면 변동된 지령 위상각을 추종할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{-I_{inv} \times 2\pi fL}{V_{grid} - I_{inv}R} \right), \quad \therefore \theta_{ref} = \theta_{grid} - \theta \quad (5)$$

따라서 지령 위상각을 이용하여 전압벡터 영역을 선정하고 선정된 영역에서의 세분화된 전압벡터를 이용해 비용함수를 최소화하는 전압벡터를 결정한다. 결정된 전압벡터는 공간벡터변조기법(SVM)을 이용하여 인버터에 인가된다.

### 3. 시뮬레이션

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 3상 2레벨 계통연계 시스템의 전류제어를 수행한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다.

그림 4-a는 기존의 모델예측제어 기법의 시뮬레이션 전류파형이고 그림 4-b, c는 제안한 방법의 시뮬레이션 전류파형이다. 기존의 모델예측제어 기법의 전류  $THD_i$ 는 12.55%이며, 제안한 방법의 전류  $THD_i$ 는 2.69%( $N=5$ ), 2.17%( $N=10$ )이다.

표 1 시뮬레이션 파라미터 정리  
Table 1 Arrangement of simulation parameter

Parameters	Value
dc-link voltage	600 V
grid voltage(RMS)	220 V
$C_{dc}$	2200 uF
$L$	10 mH
$R$	0.1 $\Omega$
Switching frequency	10k Hz
Control period	100 us
Fundamental frequency	60 Hz

다.

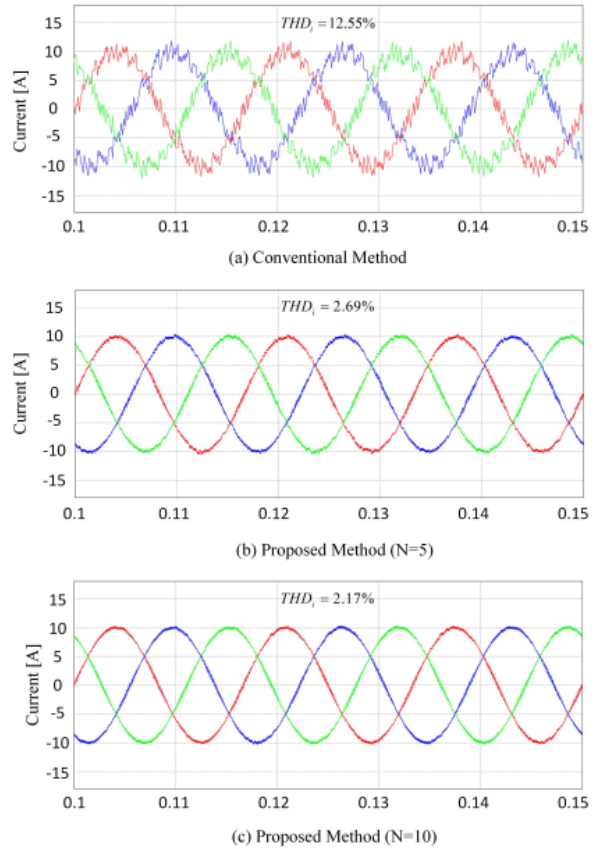


그림 4 시뮬레이션 결과  
Fig 4. Simulation results

전류  $THD_i$ 를 비교해 볼 때, 제안한 방법의 전류  $THD_i$ 가 기존의 방법보다 개선된 것을 알 수 있다. 또한  $N$ 의 값이 커질수록, 공간벡터도를 더욱 세분화할수록 다양한 전압벡터를 인가할 수 있으므로 전류 성능이 개선되는 것을 그림 4-b와 c를 통해 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 3상 2-레벨 인버터에서 모델예측제어 기반의 공간 벡터 변조 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 공간벡터도를 세분화하여 다양한 전압벡터를 비용함수 계산 시에 고려하며, SVM을 이용해 일정한 스위칭 횟수를 보장함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] M. E. Romero, M. M. Seron and G. C. Goodwin, "A combined model predictive control/space vector modulation (MPC-SVM) strategy for direct torque and flux control of induction motors", Proc. Ind. Electron. Soc. Conf., pp. 1674-1679, 2011.  
[2] W. J. Choi, E. S. Lee, and K. B. Lee, "A Novel MPC-SVM Strategy for Direct Torque Flux Control of an Induction Motor Drive System Using a Matrix Converter," IEEE ICIT2014, pp. 181-186. 2014.