

### 3상 매트릭스 컨버터의 Simple $V_{max}$ - $V_{mid}$ 전압 변조 방법

차한주, 임현주  
충남대학교

#### Simple $V_{max}$ - $V_{mid}$ Modulation Method for 3 Phase Matrix Converter

Hanju Cha, Hyunjoo Lim  
Chungnam National University

**Abstract** - 본 논문에서는 AC-AC 직접 변환 방식인 매트릭스 컨버터의 전압 변조 방법 중 하나인  $V_{max}$ - $V_{mid}$  PWM 변조 방법을 간략화한 simple  $V_{max}$ - $V_{mid}$  전압 변조 방법에 대해 소개한다.  $V_{max}$ - $V_{mid}$  전압 변조 방법은 실행 전에 입력전압 위상각( $\theta_E$ )을 판별하는 PLL(Phase Locked Loop)과정을 거친 후, 얻은 위상 정보를 사용하여 게이트 신호를 만들어 낸다. 하지만 PLL의 사용이 연산 시간의 딜레이를 발생시키고, 처리과정을 복잡하게 만드는 단점으로, PLL과정을 생략하여 입력 전압의 크기 정보만으로 섹터를 판별하고 게이트 신호를 발생시켜 스위치를 조작하는 변조 방법을 사용하였다. 이로 인해 연산시간의 단축과 처리 과정의 축소 등의 이점을 취하고, 이를 시뮬레이션으로 검증한다.

#### 1. 서 론

매트릭스 컨버터는 양방향 AC-AC 변환장치로서 다양한 크기와 주파수의 출력전압을 합성할 수 있다. 하지만 복잡한 변조 방법과 제어의 어려움, 양방향 스위치의 개신 요구 등으로 인해 상업적인 경쟁력은 약하다고 인식되어 왔다. 때문에 전압 변조 방법을 보다 간단히 하여 경쟁력을 높이고자 기존의  $V_{max}$ - $V_{mid}$  전압 변조 방법에서 PLL 과정의 생략을 시도해보았다. 기존의 PLL 과정은 입력 위상각을 추종하여 이 위상정보로 입력전압의 섹터를 판별하고 스위칭 시간과 게이트 신호를 만드는 데 사용한다. Simple  $V_{max}$ - $V_{mid}$ 과정에서는 입력 전압 위상각 대신 크기 비교를 통해 입력전압 섹터를 판별하고, 게이트 신호를 만드는 전압 변조 방법을 도입해 시뮬레이션 결과를 소개한다.

#### 2. $V_{max}$ - $V_{mid}$ 전압 변조 방법

그림 1은 매트릭스 컨버터의 전력회로 모델이다. 매트릭스 컨버터는 크게 입력전원부인  $E_A, E_B, E_C$ 와 출력단자인  $I_a, I_b, I_c$ 부분, 스위치를 나타내는  $S_{Aa}, S_{Ba}, S_{Ca}, \dots, S_{Cc}$ 와 인덕터와 커패시터로 구성된 필터부분으로 나눌 수 있다. 그림 1에서의 매트릭스 컨버터의 전력 회로도 를 직접적인 입, 출력 전압의 크기를 기준으로 재정렬하면 그림 2와 같이 매트릭스 컨버터 모델을 간략하게 표현될 수 있다.

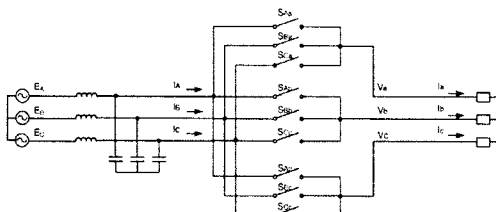


그림 1. 매트릭스 컨버터 전력 회로

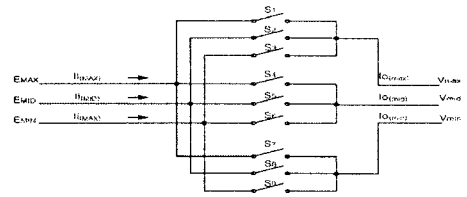


그림 2. 간략화 된 매트릭스 컨버터 전력회로

그림 1에서의  $S_{Aa}, S_{Ba}, S_{Ca}, \dots, S_{Cc}, E_A, E_B, E_C, V_a, V_b, V_c$  등 각 소자의 이름을 그림2에서는  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_9$ 와  $E_{MAX}, E_{MID}, E_{MIN}, V_{max}, V_{mid}, V_{min}$ 과 같이 바꾸어 주었다. 그리고 입력 3상중 절대 값의 크기가 가장 큰 상을  $E_{base}$ 로 정해 스위칭 시간을 계산하는데 사용한다. 매트릭스 컨버터의 PLL에 의해 계산되는  $\theta_E$ 는 입력 전압 섹터와  $E_{MAX}, E_{MID}, E_{MIN}, E_{base}$ 를 판별해 주고, 그림 3은  $\theta_E$ 의 변화에 따른  $E_{MAX}, E_{MID}, E_{MIN}$ 의 섹터를 도식화하였다.

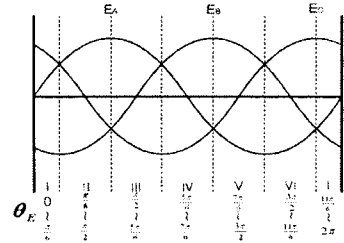


그림 3.  $\theta_E$ 에 따른 섹터

입력 선간전압 중 크기가 최대인 전압은  $\Delta E_{MAX}$ , 최소인 전압을  $\Delta E_{MIN}$ 로 표기하고, 출력 선간전압도 같은 방식으로  $\Delta V_{max}, \Delta V_{min}$ 로 표기하여 스위칭 시간 계산에 사용하였다. 이렇게 정한 입력 선간전압과 출력 선간전압과의 관계를 기본으로 해서 식 (1)이 성립하도록 전압 변조를 한다. ( $T_2+T_4$ )와  $T_3$ 은 입력전류의 배분계수에 의해서 식 (2)와 같이 구한다.

$$\Delta V_{max} = \frac{1}{T_s} [(T_2 + T_4) \cdot \Delta E_{MID} + T_3 \cdot \Delta E_{MAX}] \quad (1)$$

$$\Delta V_{mid} = \frac{1}{T_s} [(T_{22} + T_{24}) \cdot \Delta E_{MID} + T_{23} \cdot \Delta E_{MAX}]$$

$$\alpha = \frac{T_2 + T_4}{T_3} = \frac{T_{22} + T_{24}}{T_{23}} = \frac{\hat{I}_{(MID)}}{\hat{I}_{(MIN)}} \text{ or } \frac{\hat{I}_{(MID)}}{\hat{I}_{(MAX)}} \quad (2)$$

입력측의 역률이 1일 때  $I_{(MID)}, I_{(MIN)}$ 을  $E_{MAX}, E_{MIN}$ 으로 계산할 수 있으며, 다른 상의 전압과 스위칭도 위와 같은 방식으로 계산된다[1]. 그림 4는 주기  $T_c$  구간동안  $\Delta V_{k(k=MAX,MIN)}$ 와  $\Delta E_{k(k=MAX,MIN)}$ 의 관계로 계산된 결과에 따른 스위칭 상태를 나타낸다.

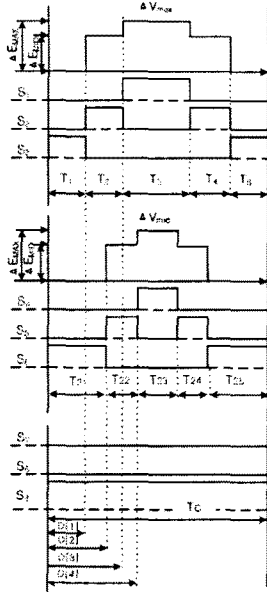


그림 4. 선간 전압 기준의 스위칭 패턴  
( $E_{base}=E_{MD}$ ,  $S_7=S_8=0$ ,  $S_9=1$ )

### 3. Simple $V_{max}$ - $V_{mid}$ 전압 변조 방법

매트릭스 컨버터의 전압 변조 방법인  $V_{max}$ - $V_{mid}$ 와 simple  $V_{max}$ - $V_{mid}$  과정의 차이점은 PLL 이용의 유무이다. PLL에서 입력전압에 대한 정보를 얻기 위한 입력 위상각을 이용하는 것 대신에 3상 입력상의 크기를 이용하고 비교하여 변조를 하게 된다.

$V_{max}$ - $V_{mid}$  전압 변조 방법에서  $\theta_E$ 에 의한  $E_{MAX}$ ,  $E_{MD}$ ,  $E_{MIN}$ 와  $E_{base}$  판별은 PLL과정에 의해 만들어진 입력 위상각으로 판별 되었다. 만약 PLL처리 과정의 역방향으로 진행된다면,  $E_{MAX}$ ,  $E_{MD}$ ,  $E_{MIN}$ 으로 입력 전압 섹터를 판별할 수 있다. 입력 전압 섹터는 주기 동안  $\theta_E$ 을 기준으로 6개로 나누었고, 섹터 구분에 관한  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  입력 정보는 표1과 같이 정리될 수 있다.

표 1  $E_A, E_B, E_C$ 에 의한 섹터의 구분

Sector	I	II	III	IV	V	VI
$E_{MAX}$	EC	EA	EA	EB	EB	EC
$E_{MD}$	EA	EC	EB	EA	EC	EB
$E_{MIN}$	EB	EB	EC	EC	EA	EA

#### 3.1 Simple $V_{max}$ - $V_{mid}$ 전압 변조 방법의 스위칭 신호

Simple  $V_{max}$ - $V_{mid}$ 에서  $T_c$  구간에서의 스위칭 패턴은  $E_{MAX}$ ,  $E_{MD}$ ,  $E_{MIN}$ ,  $V_{max}$ ,  $V_{mid}$ ,  $V_{min}$ 을 기준으로 스위치가 선택되는 것부터 시작한다. 그림 2의 스위치의 표기를 그림 5와 같이 변화하여 재도식화 하였다. 스위치는  $S[N][M]$ 의 배열을 사용하였으며 앞의 배열 번호는 입력 3상의 순서대로  $N=1, 2, 3$ 이고, 뒤의 배열 번호는 출력 3상의 순서대로  $M=1, 2, 3$ 이다.

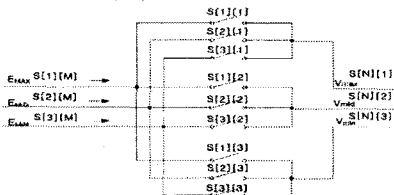


그림 5. 스위치를 재 명명한 매트릭스 컨버터 전력회로

즉,  $E_{MAX}$ ,  $E_{MD}$ ,  $E_{MIN}$ 상을 순서대로  $S[1][M]$ ,  $S[2][M]$ ,  $S[3][M]$ 으로 표기했고,  $V_{max}$ ,  $V_{mid}$ ,  $V_{min}$ 상은  $S[N][1]$ ,  $S[N][2]$ ,  $S[N][3]$ 으로 표기하였다. 이러한 방법을 이용하여 매트릭스 컨버터 스위치를 명명하여  $S[N][M]$ 형식으로 표기하였다. 그림 4를 참고하여  $E_{MAX}$ 와  $V_{mid}$ 를 연결시키는 스위치를 찾는 과정을 식 (3)으로 설명할 수 있고, 9개의 스위치는 표 2와 같이 연결된다.

$$S4=S[E_{MAX}인 스위치번호][V_{mid}인 스위치 번호] \quad (3)$$

표 2. Simple  $V_{max}$ - $V_{mid}$  스위치 표기

$S_1$	$S[E_{MAX}인 스위치번호]$	$[V_{max}인 스위치 번호]$
$S_2$	$S[E_{MD}인 스위치번호]$	$[V_{max}인 스위치 번호]$
$S_3$	$S[E_{MIN}인 스위치번호]$	$[V_{max}인 스위치 번호]$
$S_4$	$S[E_{MAX}인 스위치번호]$	$[V_{mid}인 스위치 번호]$
$S_5$	$S[E_{MD}인 스위치번호]$	$[V_{mid}인 스위치 번호]$
$S_6$	$S[E_{MIN}인 스위치번호]$	$[V_{mid}인 스위치 번호]$
$S_7$	$S[E_{MAX}인 스위치번호]$	$[V_{min}인 스위치 번호]$
$S_8$	$S[E_{MD}인 스위치번호]$	$[V_{min}인 스위치 번호]$
$S_9$	$S[E_{MIN}인 스위치번호]$	$[V_{min}인 스위치 번호]$

이러한 과정으로  $E_{MIN}$ ,  $E_{MD}$ ,  $E_{MAX}$ ,  $V_{min}$ ,  $V_{mid}$ ,  $V_{max}$ 을 연결해 주는 스위치를 찾아내서 그림 4의 스위칭 패턴에 적용하면 된다. 그림 4에서  $D[x]_{(x=1,2,3,...,8)}$ 는 스위치가 변하는 게이팅 시간을  $T_1, T_2, \dots, T_8$ 로부터 구한 것이고, 실제 매트릭스 컨버터에서 메인 CPU인 DSP에서의 스위칭 패턴을 나타내는데 이용되는 값이다. 구간  $D[1]$ 을 예로 들면, 스위칭 패턴은  $S_1=0, S_2=0, S_3=1, \dots, S_9=1$ 로 나타낼 수 있고, 이는 표 2와 연결하여 다시 써주면 표 3과 같다.

표 3.  $D[1]$ 과 스위칭 관계

$S[E_{MAX}인 스위치번호][V_{max}인 스위치 번호]=S_1=0$
$S[E_{MD}인 스위치번호][V_{max}인 스위치 번호]=S_2=0$
$S[E_{MIN}인 스위치번호][V_{max}인 스위치 번호]=S_3=1$
.....
$S[E_{MIN}인 스위치번호][V_{min}인 스위치 번호]=S_9=1$

이런 방법으로 그림 4의 스위칭 패턴을 만들어내는데, 매번 복잡한 계산을 하면 짧은 구간에서 스위칭 신호를 만들 수 없어 미리 모든 스위칭 경우의 수를 테이블로 만들어 놓았다. 매트릭스 컨버터의 9개의 스위칭에 대한 모든 경우의 수를 10진수로 변환하여 Switch Table에 저장해 두었다. 그림 6과 같이 10진수로 바꾼 스위칭 신호는 6개의 입력전압 섹터, 6개의 출력전압 섹터, 총 11개 구간과 2가지의  $E_{base}$  등 총 792 가지의 경우의 수가 나오고 위 정보 순서대로 테이블에 저장한다.

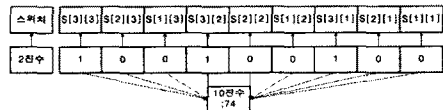


그림 6. Switch Table

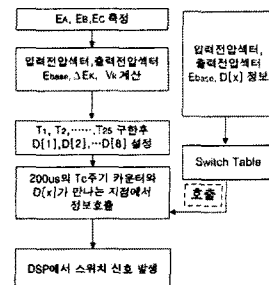


그림 7. DSP의 스위칭 알고리즘 실행과정

십진수로 저장된 Switch Table에서 입력전압 섹터, 출력 전압 섹터, 스위치 구간 정보를 숫자로 찾아 꺼내어 2진수로 바꾸는 과정 후 스위칭 신호로 활용하게 되는데 이는 그림 7에 도식화 되어있다. 측정된 입력전압에서 입력전압 섹터, 출력전압섹터 등을 판별하고,  $T_1, T_2, \dots, T_{25}$ 의 게이팅 시간을 구하고  $D[x]$ 을 정하면 마지막으로 DSP내에서 스위칭 신호를 내보낸다. Switch Table에서 스위칭 신호를 호출하는 과정을 다시 그림 8에 자세히 나타내었다.

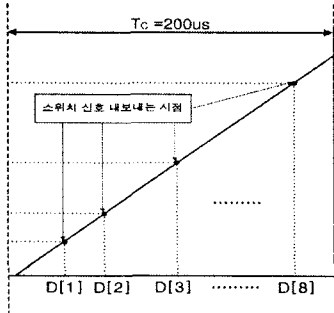


그림 8.  $T_c$  카운터와  $D[x]$ 와의 비교

DSP 내에서  $T_c$  200us 주기인  $T_c$  카운터와  $D[x]$  값을 비교하여 만나는 시점마다 인터럽트를 발생시킨다. 그 인터럽트 안에서 입력전압 섹터와 출력전압섹터,  $E_{base}$ ,  $D[x]$  값으로 Switch Table에서 스위칭 신호가 담긴 정보를 호출해온 값으로 신호를 내보낸다.

### 3.2 $V_{max}-V_{mid}$ 과 simple $V_{max}-V_{mid}$ 처리과정의 비교

각각의 전압 변조 방법의 실행 알고리즘방법을 그림 9와 같이 도식화 하였다. 기존  $V_{max}-V_{mid}$ 방법을 알고리즘의 왼쪽에, simple  $V_{max}-V_{mid}$ 의 수행 과정은 오른쪽에 나타내었다. 수행과정은 기본적으로 한주기 동안의 스위칭 과정을 비교하였고, 공통적으로 두 방법에서 주기 시간동안 스위칭 신호는 6번 발생하게 된다.

Simple  $V_{max}-V_{mid}$ 처리 방법은 처리 과정 자체가 간단해진 것 이외에도 처리시간이 다른 처리 과정에 비해 단축되었기 때문에 딜레이에 관계해서도 보상이 된다.

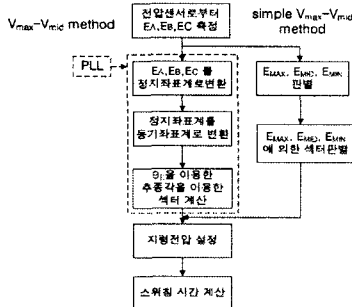


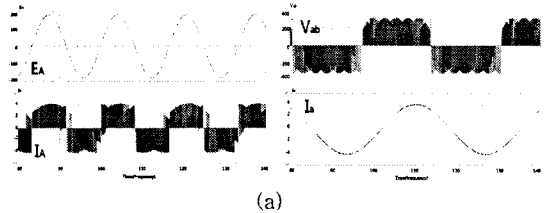
그림 9. 각 전압 변조 방법에 따른 알고리즘 실행과정

### 3.3 실험결과

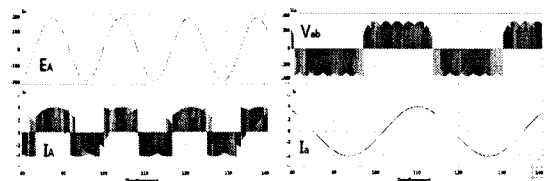
이 논문에서 설명된  $V_{max}-V_{mid}$  변조 방법과 simple  $V_{max}-V_{mid}$  변조 방법 두 가지 방법 모두 실험을 수행하였다. 각각의 시뮬레이션의 실험 조건은 표 4와 같고, 시뮬레이션의 파형은 그림 10과 같이 출력되었다. 시뮬레이션 파형에서 입력 상전류  $I_A$ 는 고조파가 섞여 있고 파형이 깨끗하지 못하게 나오는데, 이는 매트릭스 컨버터에 L-C필터를 달기 전의 시뮬레이션 파형을 찍은 것이기 때문에, 필터 설치 후 파형의 개선을 기대해 볼 수 있다.

표 4. 시뮬레이션 조건

R-L 부하	R=22 $\Omega$ , L=35mH
입력 선간 전압	220Vrms
스위칭 주파수	5kHz
샘플링 주기	100us
입력 주파수	60Hz
출력 주파수	30Hz
전압 전달비	0.866



(a)



(b)

그림 10 (a)  $V_{max}-V_{mid}$  (b) Simple  $V_{max}-V_{mid}$

### 3. 결 론

본 논문에서는, 매트릭스 컨버터의 전압 변조 방법론에서의 기존 전압 변조 방식에서 PLL을 제거한 simple  $V_{max}-V_{mid}$ 에 대해 소개하고 가능성을 실험하였다.

기존의  $V_{max}-V_{mid}$ 방법에서 PLL을 제거한 후에도 PLL 제거 전에 나왔던 입력측 전압, 전류 파형을 똑같이 구현하는 것을 실험의 목표로 정하였고, 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 두 가지 방법 모두 원하는 출력 전류가 합성되었고, 실험을 수행한 결과 simple  $V_{max}-V_{mid}$  방법이 아직 수정할 부분이 많아 깨끗한 출력 전류가 합성되지 못하였지만, PLL 없이도 출력 전류를 합성할 수 있다는 가능성을 살펴보았다. 기존의 방법이 가지고 있는 복잡한 알고리즘과 PLL을 이용한 입력 위상각의 계산시간에서 딜레이가 생기는 단점을 고려한다면, simple  $V_{max}-V_{mid}$  방법을 통해, 그 알고리즘 자체를 단순화했다는 효율성의 측면에서 성과가 있었다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] E. Watanabe, S. Ishii, E. Yamamoto, H. Hara, J. Kang, A. M. Hava, "High performance motor drive using matrix converter", Advances in Induction Motor Control (Ref. No. 2000/072), IEE Seminar, 23 May 2000 pp. 7/1 -7/6
- [2] H. Cha, P. N. Enjeti, "An approach to reduce common mode voltage in matrix converter" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 4, July/AUGUST 2003, 1151~1159