

# 3상 매트릭스 컨버터의 고효율 변조방법 설계 및 시뮬레이션

임현주<sup>1</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## Design and Simulation of High Efficiency PWM Modulation Method for Three-phase Matrix Converter

Hyun-Joo Lim<sup>1</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

**Abstract** - A matrix converter is used for converting AC/AC power directly. In order to generate sinusoidal input/output waveform in matrix converter, it uses nine bidirectional switches and PWM modulation. This paper presents an analytical averaged loss model of matrix converter with DDPWM(direct duty ratio PWM) and proposes a new switching method for reducing switching losses. A Mathematical loss models with average magnitude of voltage/current are classed as conduction and switching loss. The proposed switching pattern is improved with existing DDPWM. To prove improved efficiency with proposed DDPWM, this paper compares losses between suggested switching pattern and conventional switching pattern using mathematical and simulation method. Each loss types are influenced by environmental factors such as temperature, switching frequency, output current and modulation method.

**Keywords:** matrix converter, high efficiency, PWM, loss analysis, PWM modulation method

### 1. 서 론

3상 매트릭스 컨버터는 9개의 양방향 스위치를 이용하여 AC-AC 전력변환을 하는 기기로 기존 드라이버에서 DC 링크를 제거하여 수명을 장기화하고 신뢰성을 향상 시켰다. 또한 양방향성 스위치의 사용으로 에너지 전달이 양방향으로 가능함에 따라 회생 에너지를 필요로 하는 부하에서 에너지 절감 효과를 낼 수 있다.<sup>[1,2]</sup> 그러나 많은 장점에도 불구하고 많은 스위치 개수로 인한 복잡한 변조기법과 그로 인한 고속, 고 전력의 스위칭 소자의 부재로 인해 초기 필드에서 주목받지 못하였다.

본 논문에서는 매트릭스 컨버터의 손실에 대해 분석하고 분석된 데이터를 바탕으로 손실 저감을 위한 스위칭 패턴을 제안하였다. 지금까지의 매트릭스 컨버터의 손실해석은 복잡한 전압 변조 기법과 고속 스위칭으로 해석에 어려움이 있었다.<sup>[3,4]</sup>

또한, 매트릭스 컨버터의 손실 해석은 기존 AC-AC 드라이버인 VSI(Voltage Source Inverter)와 비교하여

하드웨어와 알고리즘에서 많은 차이를 가지고 있기 때문에 새로운 손실 해석 방법이 요구되었다.<sup>[5]</sup> 매트릭스 컨버터는 다양하고 복잡한 변조 방법을 가지고 있고, 변조방법에 따라서 손실이 변하기 때문에<sup>[8]</sup> 특정 알고리즘에 따라 손실을 달리 해석해야 하는 어려움이 있다. 본 논문에서는 Venturini 방식<sup>[11]</sup>에 기본을 둔 DDPWM과 개선된 DDPWM을 적용하였을 때 발생하는 손실을 수학적으로 계산하여 비교하였다.<sup>[9]</sup>

본 논문에서는 매트릭스 컨버터 손실해석은 전도 손실과 스위칭 손실로 나뉘어 모델링되었다. 분석된 손실 모델링을 참고하여 기존 스위칭 패턴에서 손실을 줄일 수 있는 스위칭 패턴에 대하여 제안하였고, 기존 스위칭 패턴과 제안된 스위칭 패턴을 비교하여 감소한 손실의 양을 수식적으로 비교하였다. 또한 손실 해석에 영향을 미치는 조건 즉, 온도, 스위칭 주파수, 출력 전류의 크기 등의 변수들을 달리하여 달라지는 손실의 양을 시뮬레이션을 통하여 분석하고 도식화하였다.

그림 1은 3상 매트릭스 컨버터의 회로도를 간소화하여 도식화한 것이다. 양방향 스위치가 출력 상을 기준으로 각각 3개씩 구성되어 있다.

### 2. 스위칭 방법 해석

#### 2.1 전압변조방법

Paper number: TKPE-2012-17-4-8 ISSN: 1229-2214  
<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University  
 Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895  
<sup>1</sup> Avionics R&D Lab, LIG Nex1.  
 Manuscript received Jan.31, 2011; accepted Mar.19, 2012

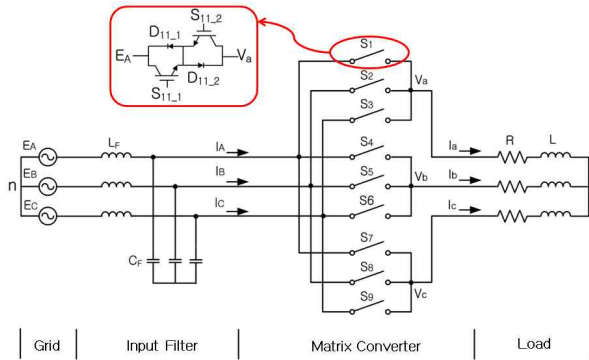


Fig. 1 Power circuit of Matrix Convert

DDPWM은 출력 지령 전압값, 캐리어와 시비율을 이용하여 스위칭에 인가되는 시간과 상태를 계산하는 방식이다.<sup>[6]</sup> 이 방법은 출력 지령 전압값에 시비율과 삼각파 캐리어를 직접 비교함으로써 게이팅 파형을 계산할 수 있고, 각각의 입력상에 대하여 스위칭 시간과 상태를 직관적으로 이해할 수 있다. 또한, 삼각파 캐리어의 상승 및 하강 기울기만을 제어하여 입력측 역류가 제어 가능하다는 장점이 있다. 그림 2 (a)와 (b)은 캐리어와 시비율을 이용하여 계산된 스위칭 패턴을 도식화 하여놓은 것으로, 입력 전압의 크기에 따라 스위칭 패턴 I과 스위칭 패턴 II로 분류된다. 그림 2에서의 MAX, MID, MIN은 매트릭스 컨버터의 입력전압을 스위칭 구간에서의 크기를 비교하여 나타낸 값으로 스위칭 구간에서 가장 큰 값을 가지고 있는 구간을 MAX, 중간값을 가지고 구간을 MID, 최소값을 가지고 있는 구간을 MIN로 명명하여 사용한다.

그림 2에 적용된 시비율은 식 (1)에서, 캐리어는 식 (2)와 같이 계산되어 진다. ((a) 스위칭 패턴 I, (b) 스위칭 패턴 II)

$$d_x = \begin{cases} \frac{MAX - v_{y(y=a,b,c)}^*}{(MAX - MID) + n(MID - MIN)} & (a) \\ \frac{n(MAX - MID) + (MID - v_{y(y=a,b,c)}^*)}{n(MAX - MID) + (MID - MIN)} & (b) \end{cases} \quad (1)$$

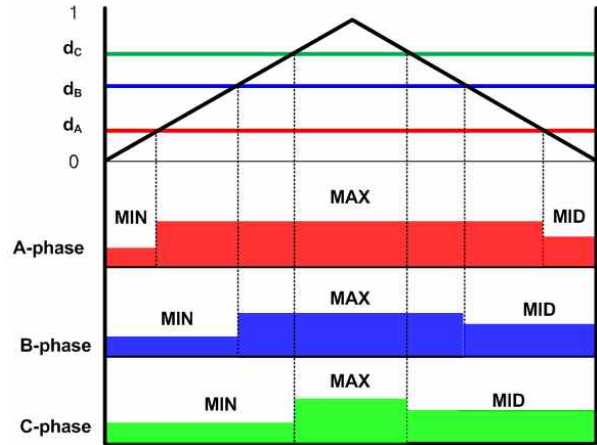
(n : 캐리어,  $v_{y}^*$  : 출력 지령 전압값)

$$n = \begin{cases} -\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = -\frac{MIN}{MAX} & (a) \\ -\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = -\frac{MAX}{MIN} & (b) \end{cases} \quad (2)$$

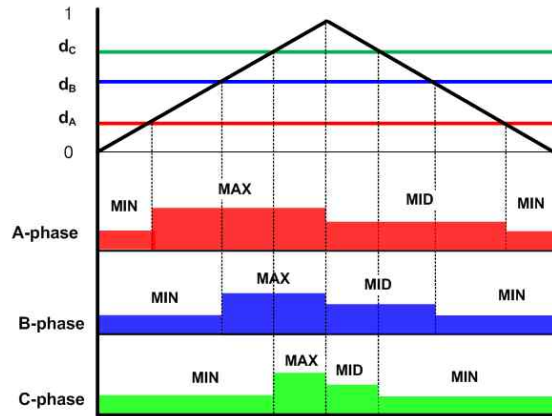
그림 (2)의 각 스위칭에 인가되는 시간은 식 (1)과 식 (2)의 시비율과 캐리어로부터 계산할 수 있다.

### 2.2 손실 해석

매트릭스 컨버터의 손실은 전도 손실과 스위칭 손실로 나누어 해석하였다.<sup>[7]</sup> 전도 손실은 IGBT의 구조에



(a) Switching Pattern I



(b) Switching Pattern II

Fig. 2 Switching pattern of DDPWM

따라서 트랜지스터와 다이오드로 나누어 모델링 되었고, 스위칭 손실은 IGBT의 트랜지스터의 ON/OFF 손실과 다이오드의 역회복 손실로 나누어 모델링 하였다. 본래 다이오드의 ON/OFF 손실도 고려되어야 하나, 수치가 미미하여 이를 제외하고 손실을 모델링하였다.

#### 2.2.1 전도 손실

전도 손실은 소자가 ON되어 있는 동안 발생하는 손실로, 손실 모델은 IGBT의 트랜지스터와 다이오드로 나누어 전압원과 저항으로 모델링하였다. 식 (3)은 트랜지스터를 식 (4)는 다이오드의 손실 모델을 수식적으로 표현한 것이다. ( $V_{CE}$  : 컬렉터와 에미터 사이의 전압,  $V_{CE0}$  : 트랜지스터 문턱전압,  $R_{CE}$  : 등가적으로 계산된 트랜지스터 저항,  $i_{CE}$  : 컬렉터와 에미터 사이의 전류,  $V_{AK}$  : 다이오드의 걸리는 전압,  $V_{D0}$  : 다이오드의 문턱전압,  $R_{DK}$  : 등가적으로 계산된 다이오드의 저항,  $i_C$  : 컬렉터에 흐르는 전류)

$$V_{CE} = V_{CE0} + R_{CE} \cdot i_{CE} \quad (3)$$

$$V_{AK} = V_{D0} + R_{DK} \cdot i_C \quad (4)$$

매트릭스 컨버터는 출력 전류의 위상 차이에 따라 순시적으로 손실량이 달라지므로, 주기를 기준으로 평균화를 하여 전도 손실을 수식화 하였다. 본 논문에서의 손실 모델은 매트릭스 컨버터 동작시 한상의 출력과 한 주기 동안 발생하는 손실을 기준으로 하였다. 식 (5)와 식 (6)에서는 트랜지스터와 다이오드의 평균 손실을 수식화하여 나타냈다. ( $P_{CONT}$  : 트랜지스터 평균 전도 손실,  $P_{COND}$  : 다이오드 평균 전도 손실,  $T$  : 주기)

$$P_{CONT} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CE} \cdot i_{CE} \cdot dt \quad (5)$$

$$P_{COND} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AK} \cdot i_c \cdot dt \quad (6)$$

식 (3) ~ 식 (6)을 이용하여 PWM 발생 1주기와 출력한 상에서 발생하는 전도 손실을 계산하면, 식 (7)과 식 (8)과 같다. ( $P_{CONT\_Aa}$  : 입력 A상과 출력 a상에 위치한 스위치의 전도 손실,  $P_{CONT\_Ba}$  : 입력 B상과 출력 a상에 위치한 스위치의 전도 손실,  $P_{CONT\_Ca}$  : 입력 C상과 출력 a상에 위치한 스위치의 전도 손실,  $I_o$  : 출력 rms 상전류)

$$P_{CONT} = P_{CONT\_Aa} + P_{CONT\_Ba} + P_{CONT\_Ca} \quad (7)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{CE} + R_{CE} I_o^2$$

$$P_{COND} = P_{COND\_Aa} + P_{COND\_Ba} + P_{COND\_Ca} \quad (8)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{D0} + R_{DK} I_o^2$$

### 2.3 스위칭 손실

스위칭 손실은 스위칭 ON 손실과 스위칭 OFF 손실, 다이오드 역회복 손실로 나누어 해석했다. 3상 매트릭스 컨버터에서 스위칭 손실 해석은 4단계 전류방법과 전압 변조방법에 따라 달라진다. 스위칭 손실은 전압 변조방법에 따라 손실량이 달라지고, 같은 전압 변조방법을 사용하더라도 4단계 전류방법과 전류 방향에 따라 스위칭 손실이 발생하는 위치가 달라지기 때문에 순시적으로 발생하는 손실의 크기가 달라진다. 따라서 본 논문에서의 DDPWM을 적용했을 때와 전류의 방향이 입력에서 출력쪽으로 흐를 때 즉,  $I_o > 0$ 일 때 발생하는 스위칭 손실에 대해 설명하였다. 그림 3은 DDPWM의 스위칭 패턴 I, II에서 전류의 방향이  $I_o > 0$ 으로 흐를 때 발생하는 스위칭 손실을 도식화 한 것이다.  $I_o < 0$ 일 때도 같은 방법으로 손실 해석이 가능하므로 본 논문에서는 생략하고 수식으로만 도출하였다.

#### 2.3.1 ON/OFF 스위칭 손실

그림 3을 참고해 보면 출력 한상의 스위칭 패턴에서는 각각 ON/OFF 손실이 발생하게 된다. ON/OFF 스위

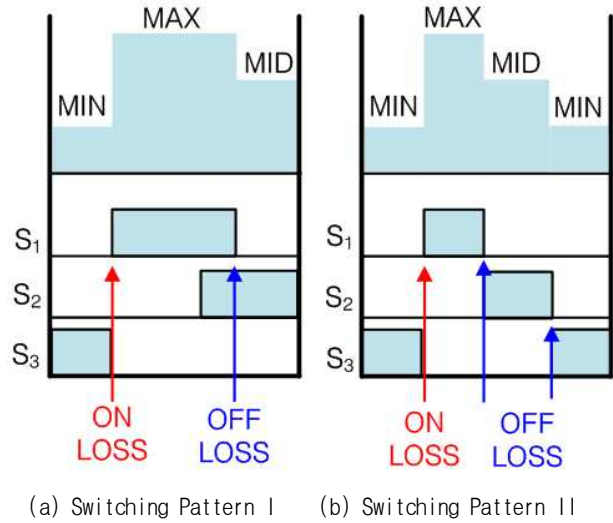


Fig. 3 Switching communication and Switching losses with  $I_o > 0$

칭 손실 해석은 같은 원리이므로 본 논문에서는 ON손실을 기준으로 설명하였다. 그림 3 (a)에서 ON 손실시 스위치에 인가되는 전압은 전류가  $I_o > 0$ 일 때는 MAX-MIN,  $I_o < 0$ 일 때는 MAX-MID값이 인가되고 전류는  $I_c$ 로 나타낼 수 있다.

식 (9)는 한 주기 동안에 순시적으로 발생하는 손실을 모델링한 것이다. ( $P_{ONT}$  : 스위칭 ON 손실계수,  $V_{CE(MAX)}$ ,  $V_{CE(MID)}$  : 에미터-컬렉터 사이에 인가되는 전압크기)

$$P_{ONT} = P_{MAX\_ON} + P_{MID\_ON} \quad (9)$$

$$= \xi_{tON} V_{CE(MAX)} \cdot I_c + \xi_{tON} V_{CE(MID)} \cdot I_c$$

$$= \xi_{tON} (\Delta MAX - \Delta MID) \cdot I_c$$

식 (9)의 순시적인 손실 모델을 바탕으로 변화하는 전압과 전류의 값을 평균화 하여 손실의 평균값을 식 (10)와 같이 표현할 수 있다. ( $f_c$  : 스위칭 주파수)

$$P_{ONT} = \frac{1}{T} \int_0^T \xi_{tON} (\Delta MAX - \Delta MID) \cdot I_o \cdot f_c \cdot dt \quad (10)$$

식 (10)을 바탕으로 전압의 주기를 기준으로 계산하면 식 (11)과 같은 한 상에서의 스위치 ON손실을 구할 수 있다. ( $E_i$  : 입력 rms 상전압)

$$P_{ONT} = \xi_{tON} \frac{9+6\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c \quad (11)$$

식 (9), 식 (10), 식 (11)과 같은 방법으로 스위칭 OFF 손실을 계산하면 식 (12)와 같다.

$$P_{OFFT} = \xi_{tOFF} \frac{9+6\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c \quad (12)$$

### 2.3.2 다이오드의 역회복 손실

본 논문에서 다이오드의 손실은 역회복 손실만을 고려한다. OFF상태에 있던 다이오드가 ON상태가 되어 발생하는 순방향 전압강하보다 ON상태이던 다이오드에 전원의 극성이 순간적으로 반전되어 다이오드가 OFF되면서 생기는 역회복 특성에 의한 손실이 더욱 크기 때문이다.

역회복 손실은 매트릭스 컨버터에서 다른 스위치가 OFF됨과 동시에 발생되므로 스위칭 턴 오프 손실의 해석과 비슷하다. 다만 다이오드의 특성으로 스위칭 턴 오프시 손실계수 대신에 다이오드의 역회복 손실 계수를 이용하여 손실을 계산할 수 있다. 식 (13)은 이를 바탕으로 출력 한주기를 기준으로 계산된 다이오드의 역회복 손실을 정리한 것이다. ( $P_{OFFD}$ : 다이오드 역회복 손실,  $\xi_{OFFD}$ : 역회복 손실 계수)

$$P_{OFFD} = \xi_{OFFD} \frac{9+6\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c \quad (13)$$

### 3. 손실 저감을 위한 스위칭 방법 제안

#### 3.1 손실 저감을 위한 스위칭 제안

3상 매트릭스 컨버터의 출력 전압 합성을 위해 사용되는 전압 변조방법에서 스위칭 주기 안에서 같은 전력량을 유지할 수 있다면 스위칭 패턴이 변화하여도 출력 전압 합성에 영향을 주지 않는다.<sup>[10]</sup> 그렇기 때문에 스위칭 손실을 줄이기 위해서는 스위칭 횟수를 줄이거나 스위치에 인가되는 전압 및 전류의 양을 줄이는 방법으로 손실을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 스위칭 주기를 기준으로 주기 내에서 같은 전력량을 유지하면서 스위칭 횟수를 줄이는 방법으로 스위칭 손실을 개선하였다. DDPWM의 스위칭 패턴은 그림 2와 같으며 그림 4는 그림 2 (a) 스위칭 패턴 I를, 그림 5는 그림 2 (b)의 스위칭 패턴 II의 스위칭 패턴을 변화하여 손실을 줄일 수 있는 스위칭 패턴에 대해 도식화한 것이다. 제안된 스위칭 패턴에서는 기존의 스위칭 주기인  $T_s$ 의 시간은 2배로 늘려  $T_p$  (Period of Switching)로 새로 정의해 주었다.

스위칭 패턴 I를 비교하여 보면, 기존의 스위칭 패턴은 같은 스위칭 주기인  $T_p$  동안 MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID에서 MID-MAX-MIN-MAX-MID로 변화하였다. 이를 직관적으로 비교해서 보면 기존의 스위칭 패턴은 총 5번의 스위칭을 하고 있고, 그림 4의 제안된 스위칭 패턴에서는 4번의 스위칭을 하고 있다. 제안된 스위칭 패턴은 기존 방식에 비하여 MIN-MID에서 넘어가는 스위칭을 생략했지만 같은 전력량을 유지하여 출력 전압 합성에는 영향을 주지 않는다. 또한, 스위칭 구간에서 다른 스위칭 구간으로 넘어갈 때도 기존의 스위칭 패턴에서는 MID-MIN 만큼의 스위칭을 추가로 하게 되

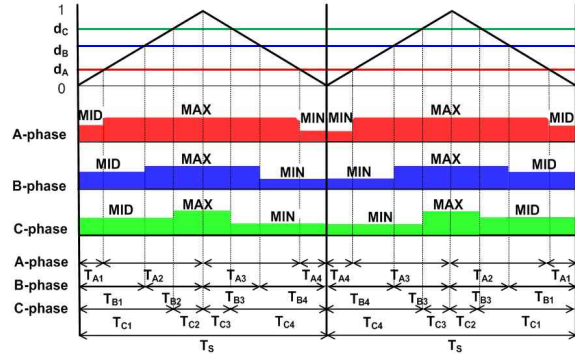


Fig. 4 The suggested switching pattern I

지만 제안된 스위칭 패턴에서는 MID-MID로 진행되어 추가적인 스위칭이 발생하지 않는다. 직관적으로 설명된 제안된 스위칭 패턴은 수식적으로 다음과 기술할 수 있다. 각 스위칭 구간에서의 인가시간은 식 (1)과 식 (2)를 통하여 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{A1} &= d_{A1} \cdot (1-n) \cdot T_s \\ T_{A2} &= (1-d_{A1}) \cdot (1-n) \cdot T_s \\ T_{A3} &= (1-d_{A1}) \cdot n \cdot T_s \\ T_{A4} &= d_{A1} \cdot n \cdot T_s \end{aligned} \quad (14)$$

스위칭 패턴 II에서는 I에서와 같이,  $T_p$  동안에 기존의 스위칭 패턴은 MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID로 구간 내에 총 6번의 스위칭을 하고 있지만, 그림 5의 제안된 스위칭 패턴은 MID-MIN-MAX-MIN-MID로 총 4번의 스위칭을 하고 있다. 또한 구간과 구간이 넘기는 시점을 비교해 보면 MAX-MID 구간의 스위칭이 2번 줄어든 것을 직관적으로 확인할 수 있다. 그림 5에서의 제안된 스위칭에 인가된 시간을 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산하면 식 (15)와 같다.

실제 3상 매트릭스 컨버터가 동작할 때 스위칭 패턴 I과 스위칭 패턴 II의 순서로 동작하는 구간이 있으므로

$$\begin{aligned} T_{A1} &= (1-d_{A2}) \cdot (1-n) \cdot T_s \\ T_{A2} &= d_{A2} \cdot (1-n) \cdot T_s \\ T_{A3} &= d_{A2} \cdot n \cdot T_s \\ T_{A4} &= (1-d_{A2}) \cdot n \cdot T_s \end{aligned} \quad (15)$$

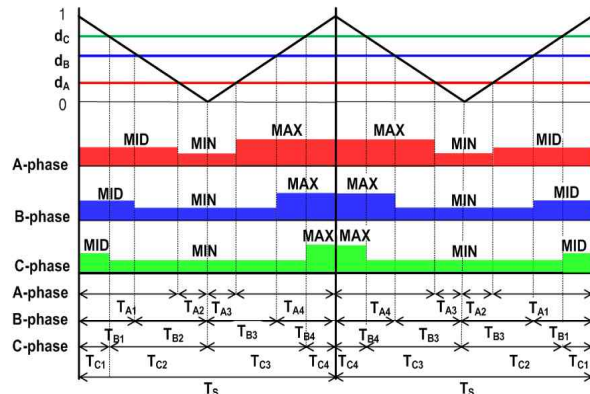


Fig. 5 The suggested switching pattern II

기존의 스위칭 패턴과 제안된 스위칭 패턴의 동작을 비교를 해 보았다.

실제 3상 매트릭스 컨버터가 동작할 때 스위칭 패턴 I 과 스위칭 패턴 II의 순서로 동작하는 구간에서 기존의 스위칭 패턴과 제안된 스위칭 패턴의 동작을 비교를 해 보았다.

기존의 스위칭 패턴은 MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MID-MIN으로 총 12번의 스위칭을 하게 되지만, 제안된 스위칭 패턴에서는 MID-MAX-MIN-MAX-MID-MIN-MAX-MIN-MID로 총 8번의 스위칭을 하게 된다. 따라서 같은 구간에서 총 4번의 스위칭 구간을 줄여 매트릭스 컨버터의 효율을 높였다.

### 3.2 DDPWM과 제안된 DDPWM의 손실 비교

앞 절에서 설명된 손실 해석 수식을 이용하여 기존 DDPWM과 제안된 DDPWM을 3상의 매트릭스 컨버터에 적용하였을 때 발생하는 손실을 표 1과 같이 비교하였다.

두 전압 변조방법간의 전도 손실은 차이가 없다. 하지만 스위칭 손실의 경우 3.1절에서 언급한 바와 같이 스위칭 횟수가 줄어들고, 줄어든 스위칭 횟수와 줄어든 전압량과 전류량만큼 손실 변화가 생겼음을 확인할 수 있다.

기존의 DDPWM과 제안된 DDPWM의 손실을 비교하기 위하여 Psim의 Thermal Module을 사용하였다. 시뮬레이션에 이용된 IGBT는 APT사의 APT33GF120LRD을 사용하였고, 손실 해석을 위한 매트릭스 입, 출력 전압 정보, 스위칭 주파수, 부하 등에 대한 정보는 표 2에 정리하였다.

그림 6은 표 2의 조건을 이용하여 전도 손실을 시뮬레이션한 결과이다. 그림 6의 P<sub>CONT</sub>, P<sub>COND</sub>는 입력전압과 출력전압이 변화할 때 IGBT의 트랜지스터와 다이오드에서 발생하는 전도 손실을 나타낸 것이다. 손실 모델링과 같은 주기에서의 손실을 비교해 보기 위해서 그림 6의 테이블에서는 같은 구간동안 발생했던 손실의 평균 값을 측정해 놓았다.

Table 2 Matrix Converter parameters for loss analysis simulation

Reference conditions	V <sub>R</sub> (V)	792		I <sub>R</sub> (A)	33
IGBT	V <sub>CEO</sub> (V)	25°C	1.25	E <sub>on,T</sub> (mJ)	3
		125°C	2.2		
	r <sub>CE</sub> (mΩ)	25°C	23.81	E <sub>off,T</sub> (mJ)	3
		125°C	37.74		
Diode	V <sub>DO</sub> (V)	25°C	0.85	E <sub>rr,D</sub> (mJ)	2.73
		100°C	0.75		
	R <sub>DK</sub> (mΩ)	25°C	16.129		
		100°C	19.608		
Input	V <sub>i</sub> (V <sub>rms</sub> )	220		ω <sub>i</sub> (rad/s)	2πx60
Output	I <sub>o</sub> (A <sub>rms</sub> )	4.04		ω <sub>o</sub> (rad/s)	2πx52
Switching frequency	f <sub>c</sub> (kHz)	10			
Load	R(Ω)	20		L (mH)	40

시뮬레이션 된 손실값과 본 논문에서 제시한 손실 모델링을 살펴보면, 해석적 손실로 계산된 트랜지스터의 평균 전도 손실을 14.6894W(25°C, 126°C : 25.85W)이고 시뮬레이션에서 발생된 평균 전도 손실을 16.67W임을 확인 할 수 있다. 같은 방법으로 다이오드의 평균 전도 손실을 11.813W(25°C, 100°C : 9.144W)이고 시뮬레이션의 평균 전도 손실은 11.81W임을 확인 할 수 있다.

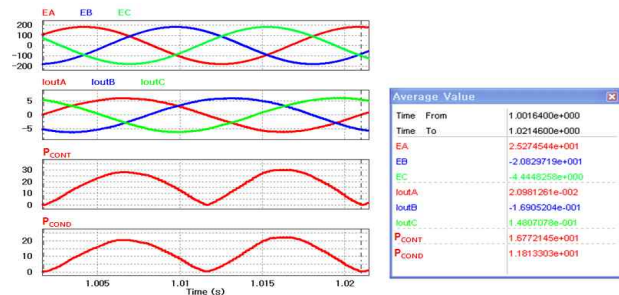


Fig. 6 Simulated conduction losses

[E<sub>A</sub>,E<sub>B</sub>,E<sub>C</sub> : Input phase voltage (V), I<sub>outA</sub>, I<sub>outB</sub>, I<sub>outC</sub> : output current (A), P<sub>CONT</sub>/P<sub>COND</sub> : transistor/diode losses (W)]

Table 1 Compared Matrix converter total losses

	DDPWM Method	Proposed Method
Transistor Conduction	$P_{CONT} = 3 \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{CE0} + R_K I_o^2 \right)$	
Diode Conduction	$P_{COND} = 3 \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{DO} + R_{DK} I_o^2 \right)$	
Switching ON/OFF	$P_{ON/OFF_T} = 3 \cdot \left( \xi_{ON/OFF} \frac{9+6\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c \right)$	$P_{ON/OFF_T} = 3 \cdot \xi_{ON/OFF_T} \frac{18}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c$
Reverse Recovery	$P_{RR_D} = 3 \cdot \left( \xi_{rr_D} \frac{9+6\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c \right)$	$P_{RR_D} = 3 \cdot \xi_{OFF_D} \frac{18}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c$



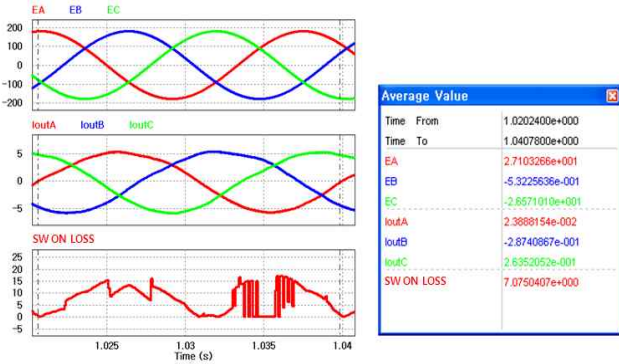


Fig. 7 Simulated ON switching loss with DDPWM [SW ON LOSS(W)]

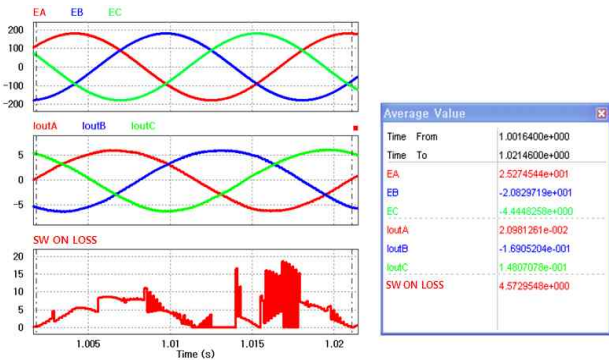


Fig. 8 Simulated ON switching loss with suggested DDPWM

그림 7은 DDPWM 전압 변조방법과 표 2의 조건을 적용하였을 때 발생하는 스위칭 ON 손실 및 입력 전압과 출력 전류를 시뮬레이션 한 것이다. 해석적 손실로 계산된 스위칭 ON 손실은 6.4464W이고 시뮬레이션에서 발생한 평균 전도 손실은 7.075W임을 확인 할 수 있다. 해석적 손실에서는 고려되지 못한 부분, 즉 스위칭 패턴과 패턴사이에 발생하는 손실이 시뮬레이션에서 고려되어 계산되어지기 때문에 오차가 발생할 수 있다.

그림 8은 제안된 DDPWM 전압 변조방법과 표 2의 조건을 적용하였을 때 발생하는 스위칭 ON 손실 및 입력 전압과 출력 전류를 시뮬레이션 한 것이다. 해석적 손실로 계산된 스위칭 ON 손실은 5.5819W이고 시뮬레이션에서 발생한 평균 전도 손실은 4.57W임을 확인 할 수 있다.

해석적 방법의 결과가 시뮬레이션 결과와 오차가 크게 나타는 이유에는 해석적 방법에서의 평균화에는 입력 전압의 섹터가 바뀔 때의 손실을 고려하지 않아주었기 때문에 실제적으로 시뮬레이션으로 손실을 계산하였을 때 더 많은 손실 저감 효과가 있음을 확인 할 수 있다.

3상 매트릭스 컨버터 손실의 비중은 스위칭 손실보다는 전도 손실의 비중이 크고, 스위칭 손실에서는 IGBT의 트랜지스터에서 발생하는 손실의 비중이 컸다. 전압 변조 방법에 따른 손실의 크기를 수치적으로 비교해 보면 제안된 DDPWM은 기존의 전압 변조 방법보다 약

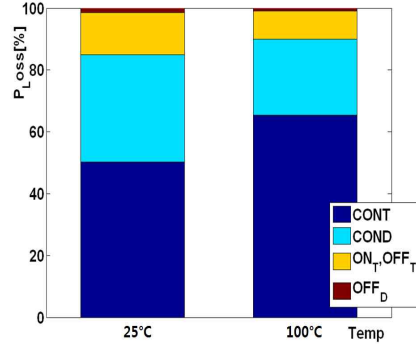


Fig. 9 Simulated losses with temperature changed [phase a,  $f_c=10\text{kHz}$ ,  $T_j = 100^\circ\text{C}$ ,  $E_A=220\text{Vrms}$ ,  $I_o=8.85\text{A}$ ,  $\text{pf}=0.92$ , CONT : transistor conduction losses, COND : diode conduction losses,  $\text{ON}_T, \text{OFF}_T$  : switch ON/OFF losses,  $\text{OFF}_D$  : diode reverse recovery losses]

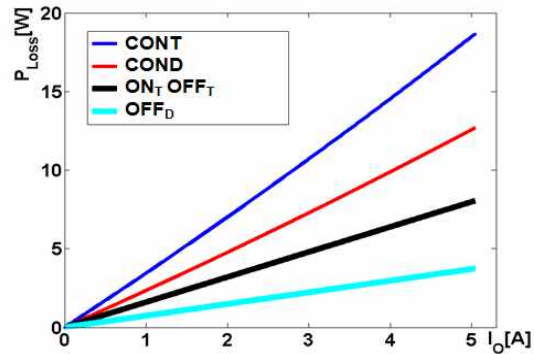


Fig. 10 Simulated losses with output current changed [phase a,  $f_c=10\text{kHz}$ ,  $T_j=100^\circ\text{C}$ ,  $E_A=220\text{Vrms}$ ,  $\text{pf}=0.92$ ]

7.18%의 스위칭 손실 저감 효과가 있는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3.3 외부 조건의 변화에 따른 손실 비교

앞 절에서 DDPWM과 제안된 DDPWM의 손실을 비교하여 보았다. 그러나 실제 동작 시에 매트릭스 컨버터 손실은 전압 변조방법 이외에도 동작시 스위치의 온도, 부하에 따른 출력 전류의 변화, 스위칭 주파수의 조건 등에 따라 영향을 받는다. 실제 동작 시, 제시한 여러 환경 조건들이 3상 매트릭스 컨버터의 손실에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 파악하고 그 수치를 비교하였다.

그림 9는 스위칭 소자의 온도가 변화할 때 손실의 차이를 그래프로 표현해 놓은 것이다. 매트릭스 컨버터가 동작 시 데이터 시트를 통해 약 100도까지 올라감을 파악하고, 상온에서 발생하는 손실과 매트릭스 컨버터가 동작할 때 스위칭 소자의 온도가 증가함에 발생하는 손실을 비교하였다. IGBT는 온도가 상승함에 따라 저항분이 커지게 때문에 전체적인 손실이 증가할 뿐만 아니라 전도 손실의 비중이 증가함과 동시에 전체 손실을 기준으로 각각의 손실이 차지하는 비중도 확인 할 수 있다.

그림 10은 출력 전류를 변화시켜 주었을 때 손실을

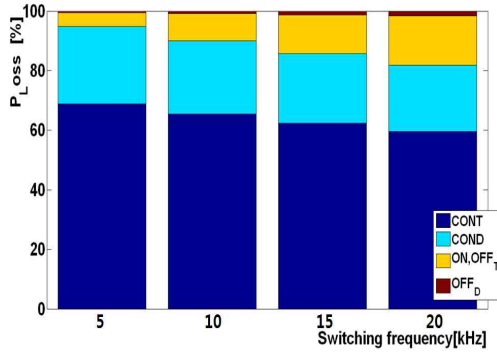


Fig. 11 Simulated lossess with switching frequency changed [phase a,  $f_c=10\text{kHz}$ ,  $T_j = 100^\circ\text{C}$ ,  $E_A=220\text{Vrms}$ ,  $I_o=8.85\text{A}$ ,  $\text{pf}=0.92$ ]

비교해 놓은 것이다. 출력 전류의 증가는 스위칭 소자에 흐르는 전류역시 증가함을 의미하므로 매트릭스 컨버터에서 발생하는 손실 역시 증가하게 됨을 확인 할 수 있다.

그림 11은 스위칭 주파수가 변화할 때의 매트릭스 컨버터 손실의 상관관계이다. 일반적으로 스위칭 주파수는 스위칭 ON/OFF 손실, 다이오드의 역회복 손실과 관련이 있음을 해석적 손실 방법에서 확인할 수 있다. 스위칭 주파수의 변화는 스위칭 손실에 영향을 미치기 때문에 스위칭 주파수가 증가하면 전체 손실에서의 스위칭 손실이 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

### 3.4 전압 변조 조건을 변화에 따른 손실 비교

본 논문에서 비교할 전압 변조 방법은 Vmax-Vmid PWM 전압 변조 방법으로, 매트릭스 컨버터의 입력 선간전압을 이용하여 전압을 변조 하는 방법으로 3상의 입출력 전압, 전류의 크기에 따라서 출력 전압을 합성한다.

Vmax-Vmid PWM 방법을 적용하였을 때의 손실 계산은 DDPWM을 적용하였을 때의 손실계산과 같은 방법으로 해석하여 수식화 하면 표 3과 같이 정리된다. DDPWM 손실을 정리한 표 1과 비교하여 보면 전압 변조 방법을 달리하였을 때 발생하는 손실의 차이를 비교할 수 있다.

Table 3 Compared Matrix Converter total losses

		Vmax-Vmid PWM
Conduction	Transistor	$P_{CONT} = 3 \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{CE0} + R_K I_o^2 \right)$
	Diode	$P_{COND} = 3 \cdot \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o V_{D0} + R_{DK} I_o^2 \right)$
Switching ON/OFF		$P_{ON/OFF_T} = \xi_{iON/OFF} \frac{12\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c$
Reverse Recovery		$P_{RR_D} = \xi_{rr_D} \frac{12\sqrt{3}}{\pi^2} E_i \cdot I_o \cdot f_c$

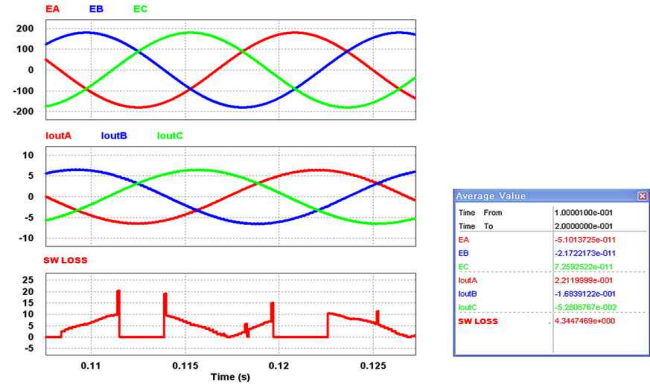


Fig. 12 Simulation losses with Vmax-Vmid PWM

그림 12는 Vmax-Vmid PWM 방법을 적용하였을 때 3상 매트릭스 컨버터에서 발생하는 ON 손실을 시뮬레이션 한 것이다. 해석상으로 전도 손실은 변조 방법 영향을 받지 않기 때문에 전압 변조가 바뀌어도 전도 손실은 동일하다. 스위칭 손실을 살펴보면, Vmax-Vmid PWM의 스위칭 패턴에서는 ON/OFF 손실량이 같다. 따라서 해석적 손실 수식을 살펴보면 매트릭스 컨버터는 적용된 전압 변조 방법에 따라 손실이 변화됨을 확인할 수 있다.

Vmax-Vmid PWM과 DDPWM의 전도 손실은 표 1과 표 3에서와 같이 같은 손실량을 가지고 있기 때문에 그림 6과 똑같은 손실 패턴을 유지하고 있다. 그러나 Vmax-Vmid PWM 방법에서의 스위칭 손실 변화는 그림 12와 그림 7, 그림 8과 비교해 보면 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서 AC/AC 직접 변환 드라이버인 3상 매트릭스 컨버터의 손실을 해석적 방법으로 분석하였고 이를 바탕으로 수식화 하였다. 제안된 손실 분석 방법은 Direct Matrix Converter 방법에서 알고리즘이 변화되는 경우에도 동일한 손실 모델링을 적용하여 손실을 해석할 수 있고, 스위칭 별로 계산이 가능하다. 이는 매트릭스 컨버터의 입력 필터나 부하 등의 적절한 소자값을 계산하는 등 다양한 방면으로 이용될 수 있다. 또한, 개별적인 효율을 개선하여 전체 매트릭스 컨버터의 개별적인 효율 개선을 가능하게 하고 효율을 높이는데 이용될 수 있다.

분석된 손실과 스위칭 패턴을 바탕으로, 본 논문에서는 기존의 전압 변조 방법의 DDPWM을 이용하여 손실 저감을 위한 새로운 스위칭 패턴에 대하여 제안하였다. 제안된 DDPWM 스위칭은 기존의 스위칭을 대칭되는 구조의 스위칭 패턴으로 변화시켜 특정한 섹터나 스위칭 주기가 변하더라도 따라서도 추가적인 스위칭 손실을 발생시키지 않는다. 따라서 DDPWM과 제안된 DDPWM의 손실을 수식적으로 비교해보면 약 7.18% 이

상의 손실 저감 효과가 있다는 것을 확인 할 수 있다.

또한, 매트릭스 컨버터의 손실이 출력 전압을 합성하는 환경 혹은 운용 조건에 따라 달라지는 것을 확인하였다. 환경 조건인 스위칭의 온도와 운용조건인 출력전류, 스위칭 주파수 및 전압 변조방법 등을 달리하여 달라지는 손실을 확인하고 비교하여 실제 동작 시에 운용 조건들이 어느 정도의 영향을 미치는지 시뮬레이션으로 확인하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0004398)

### 참 고 문 헌

- [1] H. Cha, P. N. Enjeti, "An approach to reduce common mode voltage in matrix converter," *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 39, No. 4, pp. 1151-1159, July/Aug. 2003.
- [2] Saul Lopez Arevalo, "Matrix Converter for Frequency Changing Power Supply Applications," *Submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy*, pp. 45-48, Jan. 2008.
- [3] J.K Kang, H. Hara, E. Yamamoto, E. Watanabe, "Analysis and Evaluation of Bi-directional Power Switch Losses for Matrix Converter Drive," *Proceedings of IEEE IAS 2002*, Vol. 1, pp. 438-443, 2002.
- [4] B.Wang and G. Venkataramanan, "Analytical modeling of semiconductor losses in matrix converters," *IEEE Power Electron. Motion Control Conf (IPEMC)*, pp. 1-8, 2006.
- [5] S. Bernet, S. Ponnaluri, R. Teichmann, "Design and Loss Comparison of Matrix Converters and Voltage-Source Converter for Modern AC Drives," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 49, No. 2, pp. 304-314, Apr. 2002.
- [6] Yulong Li, Nam-Sup Choi, "Carrier Based Pulse Width Modulation for Matrix converters," *The Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1709-1715, Feb. 2009.
- [7] H. Lim, H. Cha, "Comparison of Analytical Losses models of Three-Phase Matrix Converter" proceeding of KIEE summer conference 2010. pp. 928-929, 2010
- [8] .K. Kang, H. Hara, E. Yamamoto, E. Watanabe, A.M. Hava, and T.J. Kume, "The matrix converter drive performance under abnormal input voltage conditions," *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001*, Vancouver, Canada, pp. 1089-1095, June 2001.
- [9] H. Lim, H. Cha, "Analysis and Modeling of Losses in the Three-Phase Matrix Converter", proceeding of KIEE spring conference in 2010, pp. 215-217, 2010.
- [10] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri, "Matrix converter modulation strategies: a new general approach based on spacevector representation of the switch state," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 2, pp. 370-381, 2002.
- [11] M. Venturini, "A new sine wave in sine wave out conversion technique which eliminates reactive elements," in *Proc. Powercon 7*, pp. E3-1-E3-15, 1980.



**임현주(林賢珠)**

1984년 6월 27일생. 2009년 충남대 전기공학 학과 졸업. 2011년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 LIG넥스원 연구개발본부 근무중.



**차한주(車翰周)**

1965년 11월 20일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 부교수. 당 학회 총무이사.