

클린룸 FFU/EFU의 B4-인버터 1:3 PMSM 제어

윤재현, 이옥진
충남대학교

B4-Inverter 1:3 PMSM Control of Cleanroom FFU/EFU

Jae-Hyun Youn, Wook-Jin Lee
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 클린룸 공조시스템을 구성하는 FFU(Fan Filter Unit) / EFU(Equipment Filter Unit)의 시스템 원가절감을 위해 B4-인버터 기반의 1:3 PMSM 제어를 제안하였다. 1대의 제어기로 3대의 PMSM을 개별 제어할 수 있고, B4-인버터의 출력전압 왜곡을 전압 불평형 보상 제어기를 통해 개선이 가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 최종적으로 인버터의 원가절감이 높은 주요 소자의 최소화 기존 FFU/EFU용 제어기 3대를 사용하는 경우와 비교 시 약 52%의 원가절감이 가능하여 본 논문에서 제안하는 시스템의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 FPD(Flat Panel Display) 시장 규모는 큰 방향으로 변화가 진행 되고 있으며, 이에 따른 반도체 설비 투자가 정점에 이르고 있다. 국내 관련 기업들도 지속적으로 반도체 생산 설비를 증설 중이다. 이러한 분야에서 이물·화학 오염 방지를 위한 필수 설비인 클린룸에는 Particle의 발생·유입·유보가 최소화 되도록 FFU/EFU 설치로 기류 제어를 하여 클린룸 내부 청정도를 유지한다. FFU/EFU의 구동부로는 전동기와 Fan으로 구성 되어 있다. 종래 FFU/EFU는 단가 문제로 3상 유도전동기를 주로 사용하였지만, 수만대의 전동기가 수명이 다 할 때까지 상시 구동이 필요한 특수성으로 요즘은 전기에너지 절약을 위해 영구자석동기전동기(PMSM)로 전환 되고 있는 추세이다.

PMSM은 구동을 위한 인버터의 동반이 필수적이다. 인버터는 전원 회로, 구동 회로, 기타 제어 회로 등 많은 부가 회로의 구성으로 FFU/EFU 원가의 대부분을 점유하고 있다. 이는 반도체 설비 투자 비용의 상승을 야기 시키며, 나아가 우리가 사용하는 가전제품 등의 가격 상승을 의미한다. 따라서, 본 논문에서는 클린룸 FFU/EFU용 제어기의 원가 절감을 위해 전원 회로 및 주요 소자를 대폭 최소화 하는 B4-인버터 기반의 1:3 PMSM 제어를 제안하고, B4-인버터의 전압 불평형 문제에 따른 출력 전압 왜곡을 개선하기 위해 연구된 방법들을 적용하여 성능을 극대화 할 수 있음을 검증 하였다.

2. B4-인버터의 PMSM 제어

2.1 Topology

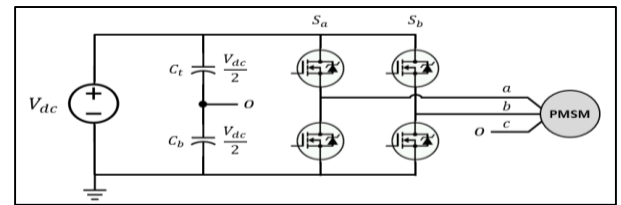


그림 1. B4-인버터의 기본 구조
Fig.1 Basic structure of B4-Inverter

B4-인버터는 그림 1과 같이 B6-인버터에서의 한 상을 2개의 커패시터로 대체한 구조를 갖고 있다. B6-인버터에 비해 스위치 2개와 그 외 능동소자 및 PWM 채널의 최소화 하드웨어적인 원가절감이 가능하다. 직접 제어가 가능한 상이 두 상 뿐이므로 별도의 좌표 변환 없이 2상 전압 지령만을 사용하여 제어 연산을 단순화 할 수 있다.^[1]

2.2 SVPWM (Space Vector PWM)

Vector Name	Switch State		Voltage [V]
	S _a	S _b	
V ₀	0	0	$V_0 = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} \angle 240^\circ$
V ₁	0	1	$V_1 = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \angle 150^\circ$
V ₂	1	0	$V_2 = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \angle 330^\circ$
V ₃	1	1	$V_3 = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} \angle 60^\circ$

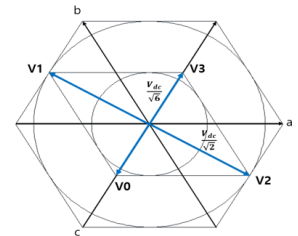


그림 2. B4-인버터의 스위칭 표와 출력 전압 벡터
Fig.2 Switching table and Output voltage vector of B4-Inverter

그림 2와 같이 B4-인버터는 4개의 유효 전압 벡터를 가지며, 크기가 같고 방향이 반대인 벡터(V₀, V₃ 또는 V₁, V₂)를 같은 시간 동안 인가하여 영 벡터로 사용한다. 스위치 상태에 따라 직접 제어가 가능한 상은 2상 뿐이며 a, b상에 의해 c상이 결정 된다. 따라서, 3상의 상전압 지령(v_{as}, v_{bs}, v_{cs})을 a, b상에 대한 전압 지령(v_{ar}, v_{br})으로 변환하면 식(1), 식(2)와 같이 좌표 변환 없이 간단한 SVPWM 구현이 가능하다.^[1]

$$v_{ar}^* = v_{as}^* - v_{cs}^* + \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

$$v_{br}^* = v_{bs}^* - v_{cs}^* + \frac{V_{dc}}{2} \quad (2)$$

하지만, DC Link 중성점(o)에 흐르는 전류에 의한 상하단 커패시터 전압(v_{ct}, v_{cb})은 $\frac{V_{dc}}{2}$ 로 유지될 수 없고, 전압 불평형에 의해 출력 전압의 왜곡이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 식(3), 식(4)와 같이 a, b상 전압 지령(v_{ar}, v_{br})에 c상의 전압인 하단 커패시터 순시 전압(v_{cb})을 적용한다.^[2]

$$v_{ar}^* = v_{as}^* - v_{cs}^* + v_{cb} \quad (3)$$

$$v_{br}^* = v_{bs}^* - v_{cs}^* + v_{cb} \quad (4)$$

2.3 DC Offset 전류 주입을 통한 전압 불평형 보상

지령 전압에 따라 계산된 스위칭 시간을 그대로 인가한 경우, 전압 불평형에 의해 지령 전압 벡터와 출력 전압 벡터 사이에 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 전압 불평형을 보상하기 위한 PI 제어기를 추가하여 인버터의 i_{de}, i_{qe} 전류 제어기에 DC Offset 전류(i_{offset})를 주입 하는 방법을 적용한다.^[2]

한 주기 동안 상하단 커패시터의 평균 전압($\Delta v_{ct}, \Delta v_{cb}$)과 DC Offset 전류(i_{offset})는 식(5)와 같이 정리된다.^[2]

$$\Delta v_c = \Delta v_{ct} - \Delta v_{cb} = \frac{i_{offset}}{C} \quad (5)$$

식(5)를 통해 상하단 커패시터의 전압차(Δv_c)와 DC Offset 전류(i_{offset})는 비례 관계이며, DC Offset 전류(i_{offset}) 주입을 통해 상하단 커패시터의 전압차(Δv_c)를 보상해줄 수 있음을 알 수 있다.^[2]

3. 시뮬레이션

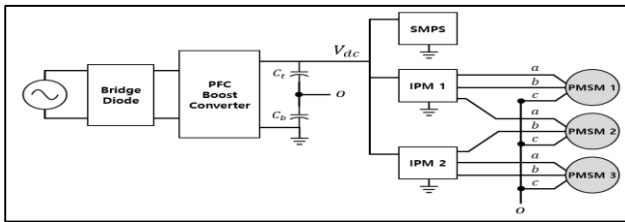


그림 3. B4-인버터 1:3 PMSM 제어 시스템 구성도
Fig.3 Block Diagram of B4-Inverter based 1:3 PMSM control System

Inverter		Motor	
Vdc	380 [V]	Type	SPMSM
Bulk Cap	220 [uF]	Poles	8 [Pole]
ω_{cc}	1,000 [Hz]	R_s	4.4 [Ω]
$f_{switching}$	20 [kHz]	L_s	19.88 [mH]

표 1. 시뮬레이션 파라미터 표
Table.1 Parameter table for Simulation

그림 3과 같이 B4-인버터를 기반으로 하여 1대의 제어기로 3대의 PMSM을 제어하는 회로를 구성하였다.

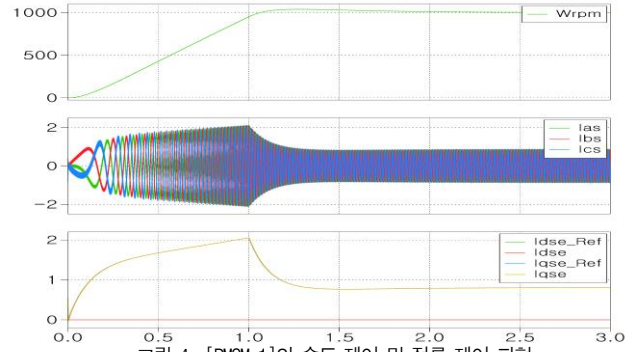


그림 4. [PMSM 1]의 속도 제어 및 전류 제어 파형

(a) rpm (b) 3상 상전류 (c) 전류 제어 파형

Fig.4 Speed & Current control waveforms of [PMSM 1]

(a) rpm (b) 3P Phase Current (c) Current control waveform

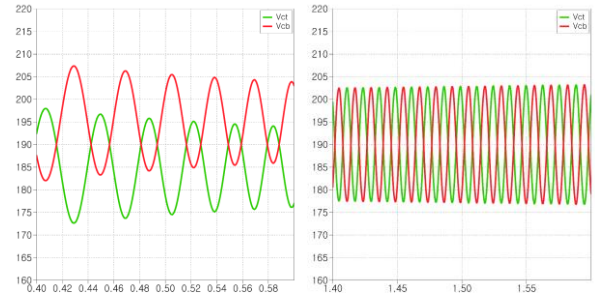


그림 5. 상하단 커패시터 순시 전압 파형

(a) 보상 미적용 (b) 보상 적용

Fig.5 Voltage waveforms of Top-Bottom Capacitors

(a) Compensation Not applied (b) Compensation applied

4. 결론

본 논문에서 제안하는 제어기는 기존 FFU/EFU용 제어기 3대와 비교 시 전원부(정류 회로, PFC, SMPS 등) 회로를 1개만 사용하고, IPM(Intelligent Power Module), MCU 외 기타 소자등의 최소화로 약 52% 원가 절감이 가능하다. 시뮬레이션을 통해 각 PMSM의 개별 제어가 가능하고, 전압 불평형 보상을 통한 인버터 성능 개선까지 검증 하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Zhang, "A Simplified Space Vector PWM Algorithm for Four-Switch Three-phase Inverters," 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Chicago, IL, USA, 2021, pp. 1–6
- [2] Y. Jark, S. Son, and I. Choy, "Compensation of unbalanced capacitor voltage for Four-Switch Three-phase Inverter Using DC offset current injection," J. of the Korean Institute of Electronic Communications Sciences, vol. 10, no. 3, Mar. 2015, pp. 365–373.