

PMSM 구동용 벡컨버터/인버터 시스템의 스위칭 손실저감 스위칭제어기법

안혜은, 김석은, 콧진영, 이정인, 김태웅
경상국립대학교

Switching Loss Reduction Switching Control Scheme Based on Buck Converter / Inverter System for PMSM Drive

Hye-Eun An, Seok-Eun Kim, Jin-Yeong Kwak, Jung-In Lee, Tae-Woong Kim
Gyeongsang National University

ABSTRACT

본 논문은 PMSM 구동용 배터리전원 기반 벡컨버터/인버터 시스템의 스위칭손실을 저감하고 효율을 향상시키기 위한 스위칭제어방식을 제안한다. 벡컨버터/인버터의 PMSM 구동시스템에 있어서 기존 PWM방식과 제안 PWAM 방식의 유효성을 시뮬레이션해석에 의해 유효성을 검증하고 스위칭손실 및 THD 측면에서 기존 PWM방식과 비교/분석을 수행한다. PWM에 비해 PWAM이 하드스위칭 횟수를 약 67% 감소시키면서도 유사한 THD 수준을 보이는 것을 확인하여 제안 토폴로지에 있어서 PWAM 제어방식이 스위칭손실을 크게 저감시킬 수 있다.

1.서론

오늘날 영구자석동기전동기(PMSM)는 고출력 밀도와 높은 토크특성 및 고효율, 정밀제어 성능으로 전기자동차 및 무인항공시스템(UAV)과 같은 e-모빌리티분야, 산업용 자동화 및 가전제품 등 다양한 분야에서 많이 사용되고 있다^[1].

배터리전원 기반 시스템에 있어서 PMSM을 구동하기 위해서 전력변환시스템이 필수적이다. 배터리전원으로 PMSM을 구동하기 위해서 인버터 혹은 DC-DC 컨버터 및 인버터로 구성 가능하며 인버터 구성은 직류전원을 인버터가 직접 교류로 전력변환하여 구조가 간단하지만, 전동기가 요구하는 전압에 따라 배터리 용량이 결정된다. DC-DC 컨버터 및 인버터 구성은 배터리전압을 전동기가 요구하는 전압레벨로 조정된 후 인버터가 AC로 변화시켜 더 유연하고 효율적으로 전압제어가 가능하다.

인버터의 변조기법은 6 스텝, PWM, DPWM, SVPWM 등 많은 연구가 이루어졌으며 이 중 가장 많이 사용되는 PWM 스위칭기법은 출력전압 크기를 변조하여 고조파를 저감하고 스위칭손실을 저감할 수 있는 기법이며, 이후에도 최적변조방식(optimal PWM), SVPWM 기법등의 스위칭손실을 저감하기 위한 다양한 방법이 연구/개발되어 왔다.

그러나 전압형 인버터의 경우 하드스위칭으로 인해 스위칭손실이 발생하고 이에 따라 시스템 효율이 감소하는 문제가 여전히 존재한다. 이를 해결하기 위해 PWM과 PAM을 혼합한 스위칭변조방식인 PWAM 변조기법이 연구되고 있으며^[2] 인버터의 스위칭횟수를 줄여 하드스위칭 손실을 저감할 수 있다.

본 논문은 PMSM을 구동하기 위해 배터리전원 기반 벡컨버터/인버터 시스템의 스위칭손실을 저감하여 효율을 향상시킬 수 있는 변조기법으로 PWAM을 채택하여 PSIM 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하고 기존 PWM 방식과 스위칭횟수 및 출

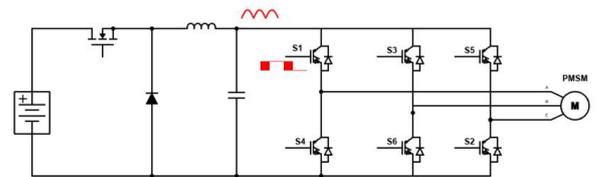


Fig.1 배터리전원 기반 PMSM 구동용 제안 벡컨버터/인버터 토폴로지

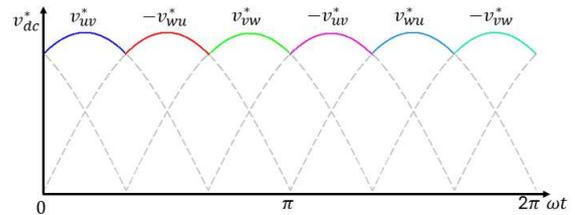


Fig.2 벡컨버터의 가변 출력전압 지령패턴

력전압 THD를 비교/분석하여 타당성을 입증한다.

2. 벡컨버터/인버터의 PWAM 제어기법

2.1. 토폴로지 구성 및 동작원리

그림 1은 PMSM 구동용으로 벡컨버터에 의해 가변직류를 생성하고, 인버터를 제안하는 방식으로 동작하는 인버터로 구성된 토폴로지를 보여준다. 일반적으로 직류를 출력하였던 벡컨버터와 달리 출력을 그림 2에 보여준 3상 정현파와 지령전압을 전과정류한 가변직류 지령전압으로 생성한다.

그림 3 및 4는 3상 PWAM 인버터의 펄스발생원리를 보여준다. 인버터 PWAM 동작원리는, 그림 3에 보여준 변조신호 E_u, E_v, E_w 와 캐리어신호를 비교하여 PWM 신호를 발생하며, 변조신호는 인버터 출력선간전압 V_{uv} 의 $\pi/3$ 씩 6구간, 지령전압 V_u^* 기준으로는 $\pi/6$ 씩 12구간으로 나누어 생성해야 하며, 다른 2개 상도 동일하게 적용된다.

그림 4는 지령전압 V_u^*, V_v^*, V_w^* 의 위상에 따라 인버터의 스위치 상태를 보여준다. 1은 상압 스위치의 턴온, 하압 스위치의 턴오프 상태를 의미하며, 0은 반대로 상압 스위치의 턴오프, 하압 스위치의 턴온 상태이고, *는 한 레그 스위치가 턴온 및 턴오프의 반복상태를 의미한다. 제안 제어기법에서는 한 레그만 턴온 및 턴오프를 반복하며 동시에 나머지 상은 0 또는 1의 상태를 그대로 유지한다. 그림 4에서 보여준 표 1열은 V_u^* 의

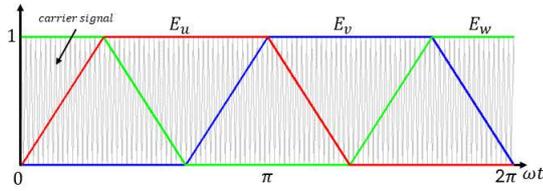


Fig.3 PWM 제어기법에 의한 변조신호 및 캐리어 신호

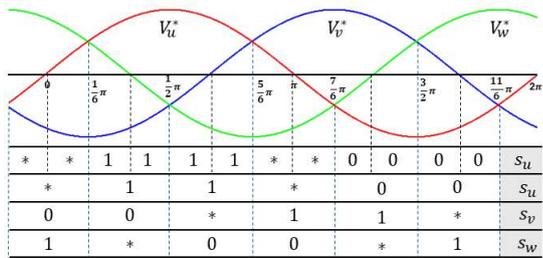


Fig.4 PWM 제어기법의 인버터 게이트 신호패턴

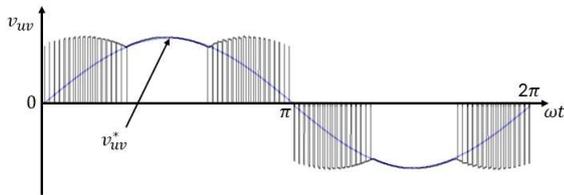


Fig.5 PWM 제어기법에 인버터의 지령 및 출력 선간전압 파형

한 주기를 $1/6\pi$ 간격 당 스위치 상태를 보여준다. V_u^* 는 $\pi/6 \sim 5\pi/6$, $7\pi/6 \sim 11\pi/6$ 동안의 휴지기간을 가지며, 마찬가지로 다른 두 상도 한 주기의 $1/3$ 동안만 스위칭 동작하며 $2/3$ 주기 동안의 휴지기간을 가진다. 인버터의 스위치가 휴지기간 동안에는 벽컨버터의 가변직류전압이 그림 5처럼 인버터 출력에 반영되며 PMSM에 인가되어 출력선간전압이 정현파 형태를 유지할 수 있다.

3. 시뮬레이션 해석

3.1. 시스템 구성

PMSM 구동용 벽컨버터/인버터 시스템의 PWM 제어기법 유효성을 검증하고 PWM과의 스위칭손실 및 THD의 비교분석을 위해 PSIM 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 시뮬레이션에 의한 시스템 구성도와 시뮬레이션 사양은 그림 6 및 표 1에 보여준다.

3.2. 분석결과

그림 7은 배터리전원 기반 PMSM 구동용 벽컨버터/인버터 시스템의 PWM 제어방식에 의한 시뮬레이션 결과파형을 보여주고, 벽컨버터의 출력전압이 가변 출력전압 지령을 추종하는 것을 그림 7(a)에서 확인할 수 있으며, 게이트신호가 인버터 출력주기의 $2/3$ 동안 휴지하여, 벽컨버터의 출력전압이 인버터의 출력선간전압에 반영되어 정현파전압을 유지하는 것이 그림 7의 (b) 및 (c)에서 확인할 수 있다.

시뮬레이션 해석에 의해 인버터 출력선간전압의 1주기 동안 스위칭소자 1개에 발생하는 스위칭 횟수와 출력선간전압의 고조파성분을 기존 PWM 기법과 제안 PWM 기법에 대하여 비교분석한 결과, PWM의 THD는 2.18%, PWM의 THD는

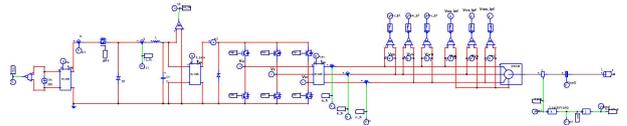
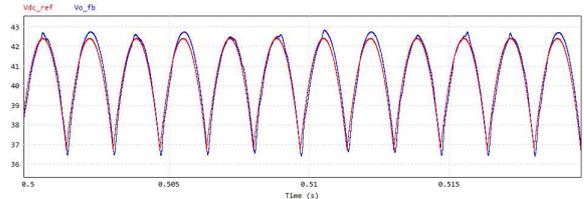


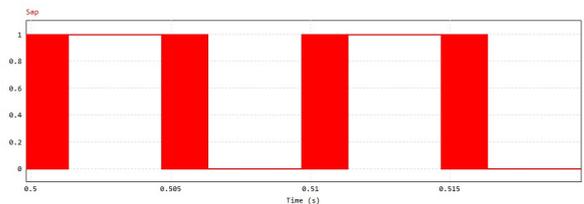
Fig.6 벽컨버터/인버터에 의한 PMSM 구동용 회로구성(시뮬레이션해석)

Table 1. 시뮬레이션 사양

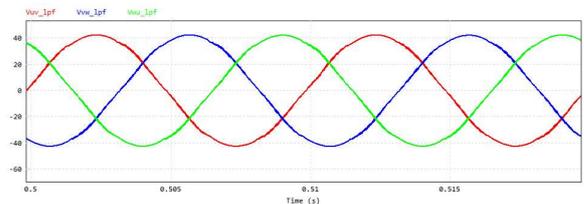
벽컨버터 및 인버터	SPMSM		
배터리전압	300 [V]	정격전류	2.65 [A]
출력선간전압	30 [V]	정격속도	3000 [RPM]
스위칭주파수	50 [kHz]	저항, 인덕턴스	0.29[Ω], 3.29[mH]



(a) 벽컨버터에 의한 가변 직류전압 파형 (지령/출력 전압)



(b) 인버터의 스위칭소자 S1의 게이트 신호



(c) 3상 인버터의 출력선간전압 파형

Fig.7 PMSM 구동용 벽컨버터/인버터의 시뮬레이션 파형

2.10%로 비슷한 수치를 보이고, 스위칭 횟수는 PWM의 경우에는 498회, PWM의 경우에는 165회 발생했다. 출력선간전압의 고조파성분이 비슷하고, 기존 PWM 방식 대비 스위칭 횟수가 비 66.87% 감소하여 스위칭 손실이 저감되는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 배터리전원 기반 PMSM 구동용 벽컨버터/인버터 시스템의 PWM 제어기법 적용에 대한 유효성과 기존 PWM을 적용시의 스위칭손실 및 출력선간전압의 고조파성분을 비교/분석하였다. 시뮬레이션해석에 의해 스위칭기법의 유효성을 검증하였고, 기존 PWM 제어방식 대비 약 67%의 인버터 스위칭 횟수 저감으로 하드스위칭 손실저감을 확인하였다. 향후 벽컨버터의 지령출력전압 추종 정밀도를 향상시키기 위한 지속적인 연구를 진행하고자 한다.

참고 문헌

[1] K.H Yoon, "Vibration Characteristics Analysis of PMSM according to Pole/Slot Combinations," Master's Thesis in Pusan National University, 2021, February.
 [2] X. Yu, Q. Lei, F. Peng, "PWAM Boost-Converter-Inverter System for EV Engine Starter/Alternator," Proc. IEEE, pp. 2969-2976, 2012.