

모듈라 스케일러블 인버터 시스템에서 PWM 동기화 기법을 적용하기 위한 모터 구동 인버터용 제어보드 설계

엄태상, 김래영[†]
한양대학교

Control Board Design for Motor Drive Inverter Using PWM Synchronization Technique for Modular Scalable Inverter System

Tae-Sang Eom, Rae-Young Kim[†]
Hanyang University

ABSTRACT

MSIS(Modular Scalable Inverter System)에서 모터 구동 시 발생하는 고주파 성분의 순환 전류는 구동 시스템의 효율 및 신뢰성을 저하시키기 때문에, 이를 저감하기 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 동기화 기법의 구현이 필수적으로 요구된다. 본 논문은 MSIS에서 PWM 동기화 기법을 적용하기 위한 모터 구동 인버터용 제어보드의 설계에 관한 것이다. 제어보드 간 PWM 동기화 기법을 적용하기 위해 DSP(Digital Signal Processor)의 EPWMSYNC를 활용하였다. EPWMSYNC은 서로 다른 DSP간 PWM의 위상을 동기화하는 기능으로 DSP의 EPWMSYNCO과 EPWMSYNCI를 사용한다. 설계한 제어보드는 EPWMSYNC 신호를 광케이블을 통해 다른 제어보드로 연결할 수 있도록 설계하여, 제어보드 간의 절연과 잡음의 영향을 최소화했다. 본 논문에서 설계한 제어보드의 EPWMSYNC를 시험하였으며, 600W급 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)을 부하로 사용하는 시스템에서 설계된 제어보드의 유효성을 검증하였다.

1. 서론

MSIS은 인버터와 제어부가 하나의 모듈로 구성되어 있고 이를 병렬로 연결한 시스템이다. 독립된 모듈로 구성되어 있어 문제발생시 해당 모듈별로 교체가 용이하고, 나머지 모듈로 부하를 구동할 수가 있는 장점이 있어 고장에 대한 신뢰성이 높다. 그리고 대용량 인버터를 사용하는 것보다 용량이 작은 인버터를 필요한 전력만큼 병렬로 연결하여 사용하는 것이 비용적인 측면에서 경제적이다. 더욱이 모듈 단위로 제어가 가능하기 때문에 부하에 따른 정격만큼 모듈을 사용할 수 있어 시스템의 효율을 높일 수 있다. 따라서 MSIS는 신뢰성, 효율성, 경제성 향상이 용이한 장점으로 인해 그 적용이 확대되고 있으며, 태양광에너지와 같은 신재생 에너지 시스템과 대용량 UPS(Uninterruptible Power Supply) 시스템, 모터 드라이브 등에 주로 사용되고 있다.

모듈을 병렬로 구성할 경우 PWM 신호는 각각의 개별 모듈에서 생성하기 때문에 PWM 신호의 동기화가 필요하다. PWM 동기화가 되지 않아 모듈 사이에 서로 다른 극전압이 인가되면 부하로 공급되지 않고 모듈 사이에 흐르는 고주파 순환전류가 생기게 된다. 고주파 순환전류가 생기는 경우, 모듈에는 부하로 공급되는 전류에 순환전류가 더해져 흐르기 때문에 시스템의

효율이 저하된다. 또한, 스위치 및 소자의 정격을 초과하는 전류를 흐르게 할 수 있어 시스템의 손상을 줄 수 있으며, 순환 전류로 인해 전류 제어에 오류가 생길 가능성이 있다. 그러므로 고주파 순환전류를 저감하기 위해 PWM 동기화 기법이 MSIS에서 필수적으로 요구된다.

기존 연구에서 마스터-슬레이브 구조인 3상 병렬 컨버터 시스템의 마스터와 슬레이브의 캐리어 주기를 CAN통신을 이용해 비교한 후 슬레이브의 캐리어 주기를 변경하여 마스터 캐리어 주기에 맞추는 기법이 제안되었다. 이 기법에서 사용된 DSP들은 PWM 동기화 기능을 지원하지 않아 제어를 이용해 구현을 하였다.^[1] 최근에는 PWM 동기화를 지원하는 DSP가 늘어나면서 비교적 간단하게 적용이 가능하다는 장점으로 널리 사용되고 있다. DSP에서 지원하는 PWM 동기화 기능을 구현하기 위해서는 EPWMSYNC 신호 전달 지연을 고려하고 잡음의 간섭이 최소화 되는 하드웨어 설계가 필요하다.

본 논문에서는 Texas Instrument사의 TMS320F28335 DSP를 대상으로 PWM 동기화 기법을 적용하기 위한 모터 구동 인버터용 제어보드를 설계한다. TMS320F28335 DSP는 PWM 동기화를 위한 EPWMSYNC 기능을 지원한다. 이를 이용하여 두 개의 제어보드 중 하나는 EPWMSYNCO로 동기신호를 출력하고, 다른 제어보드는 EPWMSYNCI로 동기신호를 입력받아 PWM을 동기화 하게 된다. EPWMSYNC 신호 전달 지연을 고려하여 Phase Shift를 설정함으로써 동기화의 정확성을 높였다. 또한, 잡음의 영향을 최소화하기 위해 자체적으로 절연이 가능한 광케이블을 이용하여 다른 제어보드와 연결할 수 있도록 설계한다. 설계한 제어보드는 구동에 필요한 전원부 회로, 인버터 구동 시 상전류를 확인하기 위한 ADC회로, 전압레퍼런스를 확인하기 위해 필요한 DAC회로, 안정적인 PWM 출력을 위한 회로 등을 포함한다. 설계 완료 후 실험 검증을 수행하였으며, 최종적으로 600W급 IPMSM을 이용하여 인버터 구동 시험 결과를 제시함으로써 유효성을 검증한다.

2. 모듈라 스케일러블 인버터 시스템

그림 1은 2개의 모듈로 간략화한 모듈라 스케일러블 인버터 시스템을 보여준다. MSIS는 DC-Link 하나를 공유하는 각각의 제어보드를 가진 2개의 인버터 모듈과 전체 시스템을 제어하는 마스터 제어보드로 구성된다. 마스터 제어보드는 모터 회전자 위치를 알 수 있는 회전각을 받아 각 모듈의 제어보드로 전류

지령을 내려준다. 하지만 모듈형 인버터 시스템에서 인버터 모듈 사이에 극전압이 차이가 생기는 경우 부하로 공급되지 않고 모듈 간에 흐르는 순환전류가 발생하게 된다. 순환전류는 전류 제어 성능에 악영향을 미치기 때문에 부하분담을 어렵게 한다. 따라서 고주파 성분의 순환전류를 저감하기 위해서 PWM 동기화 기법이 적용된 제어보드가 필요하다.

해당 구성은 동일한 방법에 의해 N개의 모듈을 확장 가능하며, 이때 마스터 제어보드 모듈 수에 관계없이 1개만 존재한다.

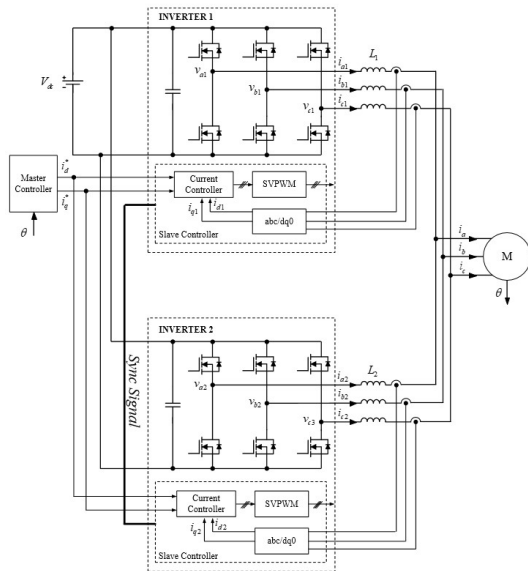


그림 1 모듈라 스케일러블 인버터 시스템 회로
Fig. 1 Circuit of Modular Scalable Inverter System

3. 하드웨어 설계

제어보드는 용도에 따라 DSP에서 필요한 기능을 선정하여 설계할 필요성이 있다. 인버터의 경우 PWM, ADC, DAC 등의 기능이 원활하게 동작해야 한다. 특히 본 논문에서 설계하는 제어보드는 PWM 동기화 기법을 사용하기 위해 EPWMSYNCO와 EPWMSYNCI를 광케이블로 각 제어보드와 연결할 수 있도록 설계하였다. 제어보드의 블록도는 그림 2와 같다. 본 장에서는 TMS320F28335 DSP를 이용한 제어보드의 세부 하드웨어 설계 방법에 대해 설명한다.^[2]

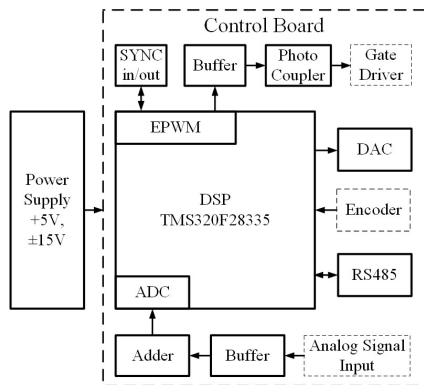


그림 2 TMS320F28335 DSP 제어보드 블록도
Fig. 2 TMS320F28335 DSP Control Board Block Diagram

3.1 전원부 회로

DSP는 구동 시 5V, 1.9V, 3.3V의 전원이 사용된다. ADC 회로에서 사용되는 OP-Amp에는 +15V와 -15V가 사용된다. 또한, EPWM 회로와 DAC IC 전원으로 5V가 사용된다. 따라서 설계할 제어보드는 5V, +15V, -15V, 1.9V, 3.3V의 전압이 필요하다. 5V와 +15V, -15V는 외부 SMPS를 통해 공급하고 1.9V와 3.3V는 레귤레이터 IC를 이용해 변환한다.

3.2 ADC 회로

모터 구동용 인버터 제어보드에서 ADC는 모터 제어 시 각 상전류의 센싱 용도로 사용한다. OP-Amp 2개를 이용하여 회로를 구성하였으며, 앞단의 OP-Amp는 이득을 1로 하여 버퍼용으로 사용한다. 뒷단의 OP-Amp는 가산기로 사용하며, DSP의 Analog 입력 신호레벨(0-3V)로 변환하는 역할을 한다. 총 8개의 채널을 사용가능하도록 설계하였다.

3.3 DAC 회로

TMS320F28335 DSP는 DAC기능을 내장하고 있지 않아서 별도의 DAC칩을 장착하여야 한다. 따라서 동시 4CH 출력이 가능한 DAC IC인 TLV5614ID 채택하였고, DSP와 DAC간의 통신은 SPI통신을 사용했다. 채택한 IC의 레퍼런스 전압은 5V로 설정했고, OP-Amp로 구성된 버퍼를 지나 출력하도록 설계하였다.

3.4 EPWM 및 EPWMSYNC 회로

총 12개의 EPWM을 사용할 수 있으며, 3개를 1세트로 하여 총 4세트로 구성하였다. EPWM 신호가 플로팅 되는 것을 막기 위해 풀다운 저항을 연결하였다. 노이즈로 인한 오작동을 막기 위해 버퍼를 사용하였으며, EPWM 신호 출력단과 DSP간의 완전한 절연을 위하여 고속 광 커플러를 통해 EPWM 신호가 전달되도록 설계 하였다. 또한 EPWM 신호에 사용되는 5V전원은 절연형 DC-DC 컨버터에서 공급한다.

EPWMSYNCO로 동기신호를 출력하고, EPWMSYNCI로 동기신호를 입력받아 PWM을 동기화 하게 된다. 제어보드의 호환성을 위해 2개의 핀을 모두 사용가능하도록 설계하였다. 또한 잡음의 영향을 최소화하기 위해 자체적으로 절연이 가능한 광케이블을 이용하여 다른 제어보드와 연결할 수 있다.

4. 실험 검증

4.1 EPWMSYNC 실험

그림 3은 MSIS에서 EPWMSYNC_out을 연결하지 않은 상태의 두 제어보드 간 PWM 동기화 상태를 보여주는 것으로 지연이 발생 하는 것을 볼 수 있는데, 구동 시 실시간으로 변화한다. 그림 4는 MSIS에서 EPWMSYNC_out을 연결한 상태의 두 제어보드 간 PWM 동기화 상태를 보여주는 것으로 EPWMSYNC_out의 펄스신호는 박스로 표시하였다. 그림 5를 통해 EPWMSYNC_out이 동작 시 지연이 많이 줄었다는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 EPWMSYNC_out을 이용해 동기화한 PWM을 확대한 것을 나타낸다. 동기화 후에도 약 200ns의 지연이 발생한 것을 확인할 수 있는데, EPWMSYNC_out 사용 시 항상 일정한 지연을 보여주기 때문에 PWM의 Phase Shift 기능을 이용하여 지연을 제거 할 수 있다. 그림 6은 Phase Shift 기능으로 지연을 제거한 PWM 출력을 보여주고 있다.

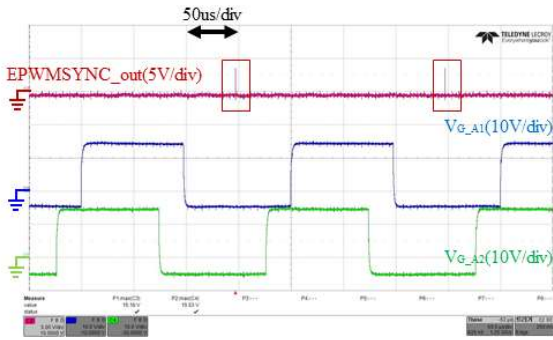


그림 3 EPWMSYNC_out을 연결하지 않은 PWM 동기화 상태
Fig. 3 Delay of PWM Synchronization without EPWMSYNC_out

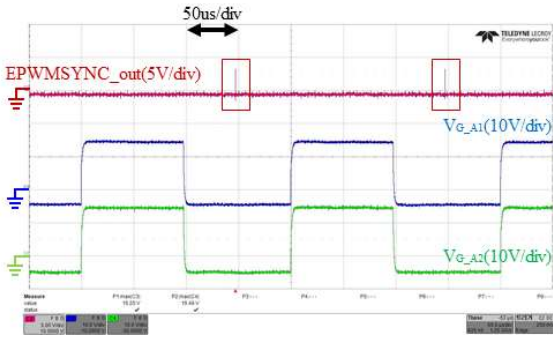


그림 4 EPWMSYNC_out을 연결한 PWM 동기화 상태
Fig. 4 Delay of PWM Synchronization without EPWMSYNC_out

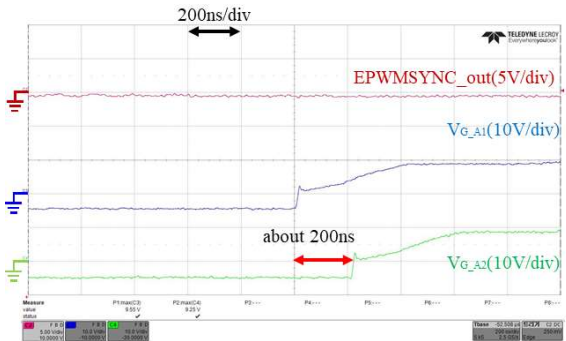


그림 5 확대한 EPWMSYNC_out 연결 시 PWM 동기화 상태
Fig. 5 Enlarged delay of PWM Synchronization with EPWMSYNC_out

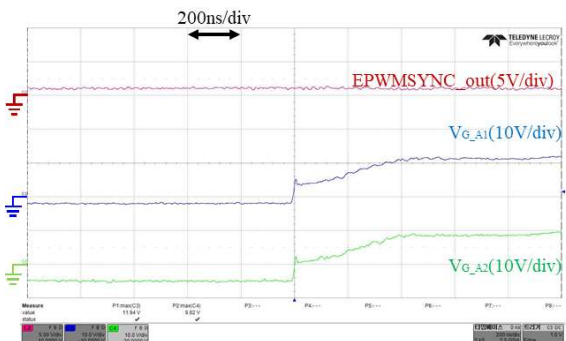


그림 6 Phase Shift를 적용한 EPWMSYNC_out 연결 시 PWM 동기화 상태
Fig. 6 Phase Shift applied delay of PWM Synchronization with EPWMSYNC_out

4.2 인버터 구동 시험

제작한 제어보드로 IPMSM을 부하로 한 인버터 구동 시험을 하여 동작을 확인하였다. PWM은 공간벡터변조방식

(SVPWM)을 이용했다. 표 1은 설계한 제어보드의 동작시험을 위한 600W급 IPMS의 파라미터이다. 그림 7은 정격부하에서 500rpm으로 동작할 때 a상 상단과 하단 게이트 신호와 a상, b상에 흐르는 전류를 나타낸 것으로 안정적으로 출력되고 있는 것을 확인할 수 있다.^[3]

표 1 실험 파라미터
Table 1 Parameters of experiment

Parameter	Value	Unit
Rated power	600	W
Rated torque	1.6	Nm
Pole pairs	3	-
Stator resistance	1.65	Ω
d-axis inductance	11.5	mH
q-axis inductance	20	mH
Rotor magnet flux linkage	0.109	Wb
PWM switching frequency	5	kHz
DC-link voltage	310	V
Interphase inductor inductance	2	mH

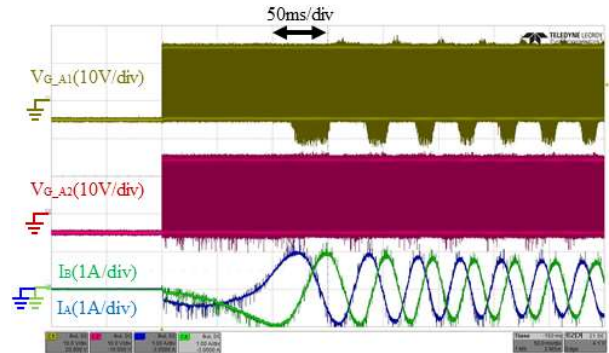


그림 7 인버터 구동 실험 파형
Fig. 7 Experiment result of Inverter operation

5. 결론

본 논문에서는 MSIS에서 PWM 동기화 기법을 적용하기 위한 모터 구동 인버터용 제어보드를 설계하였다. 설계한 제어 보드는 EPWMSYNC 기능이 내장된 TMS320F28335 DSP를 사용하여 PWM 동기화 기법을 구현하였기 때문에 상대적으로 간단하게 설계가 가능한 장점이 있다. 두 제어보드 간의 PWM 동기화가 정상적으로 동작하는 것을 실험으로 확인했고, 최종적으로 600W급 IPMSM을 이용하여 인버터 구동 시험 결과를 제시함으로써 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] W. Jiang, Y. Gao, B. Xiao, J. Wang, X. Ding and L. Wang, "Suppression of High-Frequency Circulating Current Caused by Asynchronous Carriers for Parallel Three-Phase Grid-Connected Converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1031-1040, Feb. 2018.
- [2] Texas Instruments, TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs) REVISED APRIL 2019.
- [3] S. Choi, S. Kang, J. Im, R. Kim, "Circulating Current Reduction Method Using High Frequency Voltage Compensation in Asynchronous Carriers for Modular Scalable Inverter System," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, 24(2), pp. 71-77, Apr. 2019.