

직렬 통신을 이용한 병렬 운전 인버터의 PWM 동기화 알고리즘

이승용, 박영민
현대중공업

PWM synchronization method of parallel operating inverters with Serial-communication

Seong-Yong Lee, Young-Min Park
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

배터리 에너지 저장 시스템이나 태양광 발전 시스템은 흔히 용량 확장, 신뢰성 향상, 효율 향상 등을 목적으로 계통연계형 인버터를 다수 모듈형으로 병렬 구성하게 된다. 이렇게 DC전원을 공유하면서 인버터 출력단을 하나로 묶어 운전하는 경우에 순환전류가 문제가 될 수 있는데, 계통주파수에 해당하는 위상 차 뿐만 아니라 수 kHz의 동기화 되지 않은 PWM 캐리어 위상 차에 의해서도 순환전류가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PWM 동기화를 위하여, PEBB(Power Electronics Building Block) 개념을 사용하는 다수 대의 인버터가 직렬 또는 병렬로 구동될 때, 직렬 통신을 이용하여 PWM 캐리어들을 정밀하게 동기화 시키는 실용적인 방법에 대해서 제안하고자 한다.

1. 서 론

현대중공업에서는 1MW/1MWh ESS(Energy Storage System)를 음성에 있는 태양광 모듈 공장에 설치하여 2015년 2월 말부터 현재까지 상시 실증 운전 중에 있다. 1MW에 해당하는 PCS는 그림 1과 같이 250kW 4대로 구성되어 있는데, 통신을 담당하는 별도의 주제어기(Master of MCU)가 250kW PCS를 제어하는 MCU에 상황에 따른 운전 지령을 내리고 상태정보를 취합한다.

배터리의 출력 단자가 하나의 쌍으로만 들어오기 때문에 PCS 4대의 DC측이 하나로 묶여 있으며, 효율 저하를 최소로 막고 혹시 모를 사고에 대비하여 5권선 고효율 변압기로 각 출력단을 절연하였으나, 동기화되어 있지 않은 PWM 순환전류에 의한 과전류 현상이 빈번하게 발생하게 되었다.

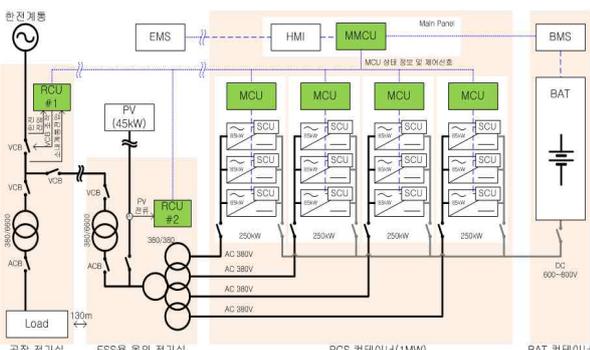


그림 1 ESS 설비 및 PCS 제어기 구성도

2. 기존 PWM 동기화 방법

2.1 지속적인 PWM 캐리어 동기화의 필요성

그림 1의 회로에서 전력 회로 변경 이외의 방법으로 순환 전류를 막기 위해서는, 단일 통합 제어기를 사용하여 각 인버터에 똑같은 PWM 게이트 신호를 사용하는 방법이 있으나 모듈 구성의 자유도가 떨어지는 단점이 있다.

반면, 독립된 다수의 인버터 제어기를 사용할 경우에는 제어기 내부의 과형발생기를 사용하여 PWM을 발생시키지만 해당 주파수는 약간의 제조상 오차를 지니고 있어 시간이 수 초만 지나도 순환전류를 발생시킬 정도로 위상의 오차가 벌어지는 것이 보통이다. 따라서 지속적으로 PWM 캐리어를 동기화할 수 있는 방법이 몇 가지 연구되었다.

2.2 기존 PWM 동기화 방법 및 실패 사례

PWM 동기화 방식 중 하나로 펄스 형태의 동기화 신호를 이용한 H/W적인 방법을 생각해볼 수 있으며 TI사 DSP의 ePWM 1번 모듈에는 이를 위한 SYNC1핀이 존재한다. 이와 같은 H/W 동기화 방식은 CPU의 영향을 받지 않으므로 송신 주기가 상당히 규칙적이나, 단지 1개의 펄스 신호를 동기화 신호로 사용하므로 노이즈 발생시 원치 않는 위상으로 단번에 동기화될 우려가 있다. 또한 그림 2 처럼 동기화 신호 직전에 인터럽트가 일어난 경우 인터럽트 Flag가 누적 발생하여 적분기의 동작이나 전압 전류 센싱을 위한 주변 회로의 동작 등을 방해할 우려가 있다.

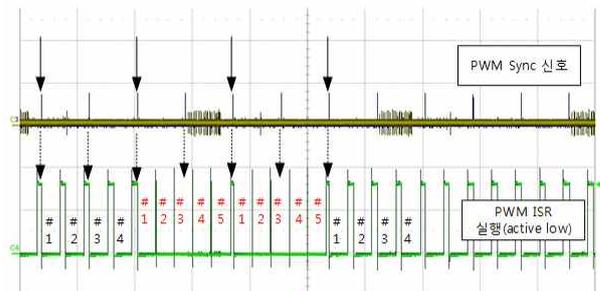


그림 2 동기화 신호에 의한 인터럽트 중복 발생 현상

또한 ePWM 모듈 내부의 Counter와 Compare 레지스터가 Match되는 이벤트가 발생해야 PWM 신호의 극성이 바뀌게 되는데, 만약 동기화로 인하여 Counter가 Compare값과 Match되지 못하면 그림 3과 같은 치명적인 현상이 발생하기도 한다.

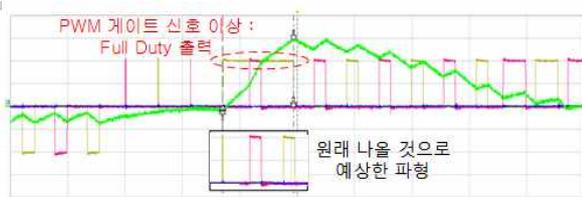


그림 3 PWM Counter와 Compare값 mismatch시 PWM 이상 현상

다른 방식으로 통신 수신시 최우선 인터럽트로 동기화 하는 S/W적인 방식^[1]이 있다. 이는 정상적인 통신에 대해서만 동기화를 수행하므로 노이즈 면역성이 좋으나, 통신 송신측의 주기가 불규칙해지는 현상이 자주 있고, 이 경우 단번에 영향을 받으며, 부수적으로 실시간으로 수행되어야 할 다른 수행 함수의 자원을 빼앗아 가는 단점이 있다.

3. 제안된 PWM 동기화 알고리즘

3.1 제안된 PWM 동기화 알고리즘

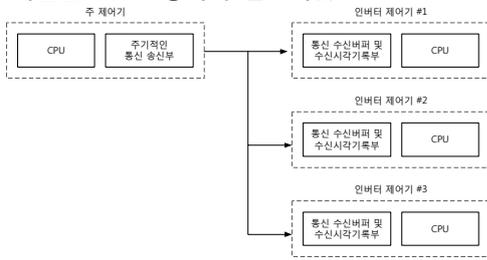


그림 4 제안된 방법을 위한 제어기 구성

그림 4와 같이 송신부는 PWM 주파수의 주기 또는 수 배에 해당하는 일정한 주기로 메시지를 송신하며, 수신부는 통신 수신시 자동적으로 메시지 내용을 저장하는 버퍼와 수신시각을 기록하는 부분으로 이루어져 있다.

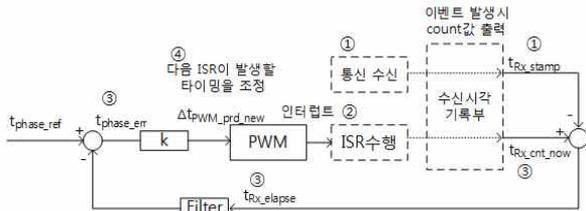


그림 5 제안된 PWM 동기화 제어 알고리즘

그림 4와 같은 구성에서 그림 5의 알고리즘을 적용할 수 있으며, 각 단계에서 수행해야 하는 절차는 다음과 같다.

- ① 통신정상수신 및 수신시각(t_{Rx_stamp})기록 (H/W)
- ② PWM 인터럽트 발생 및 PWM ISR 로 분기(CPU)
- ③ ISR에서 현재시각을 읽고 통신수신시각의 차이 계산
 $\rightarrow t_{Rx_elapse} = t_{Rx_cnt_now} - t_{Rx_stamp}$
 통신 수신 후 경과시간(t_{Rx_elapse})와 목표 값의 차이 계산
 $\rightarrow t_{phase_err} = t_{phase_ref} - t_{Rx_elapse}$
- ④ t_{phase_err} 를 줄이는 방향으로 PWM 주기 조정
 $\therefore t_{PWM_prd_old} \rightarrow t_{PWM_prd_new}$

그림 6에서는 통신 수신 시각보다 PWM 캐리어가 지연되는 상황에서의 PWM 동기화 제어를 예로 나타내었다.

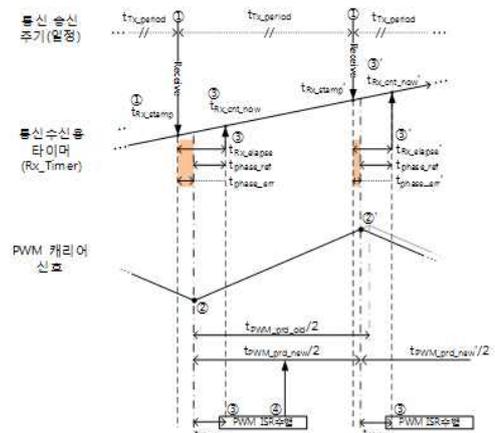


그림 6 제안된 PWM 동기화 제어의 예

제안된 방식으로 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다.

- 별도의 동기화 신호선 불필요
- 간헐적으로 발생할 수 있는 노이즈에 강인
- 약간 불규칙해질 수 있는 송신 주기를 보완
- 최우선 인터럽트 수행 불필요(연산 자원 확보)
- 임의의 위상 차 제어 가능(Phase-Shifted PWM 등)

3.2 실험 결과

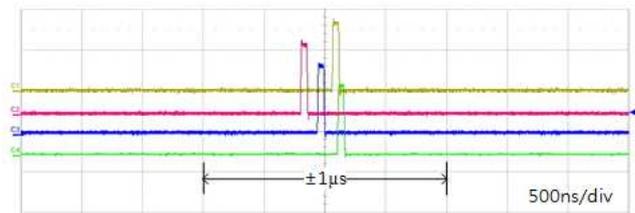


그림 7 제안된 방식에 의한 SYNCO 위상 비교 실험

DSP의 ePWM 모듈에는 동기화를 위한 SYNCI 입력 핀 뿐만 아니라 PWM 캐리어 위상을 표시하는 SYNCO 출력 핀도 존재한다. 그림 7과 같이 인버터 4대의 SYNCO신호를 장기간 관찰함으로써 PWM 캐리어 위상 차가 1주일 동안 최대 $1\mu s$, 1 개월 동안 최대 $2\mu s$ 의 오차로 통상의 데드타임 크기 내에서 정밀하게 제어됨을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문과 같이 다수의 인버터 제어기로 구성된 시스템에서 정밀한 PWM 동기화를 위한 실용적인 방법을 제안하였다. 본 방식은 병렬운전시의 PWM 동기화뿐만 아니라 인터리빙 운전, Cascaded H-Bridge 회로 등 위상 차 제어가 필요한 여러 산업 현장에서 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 박영민 외, "CAN통신을 이용한 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 PWM 동기화 및 위상전이 방법", 전력전자 학술대회, 2004.