

CAN 통신을 이용한 UPS의 병렬 제어

김경환*, 오성진*, 김태훈*
이화전기공업(주)*

Parallel Operation of UPS with PWM Synchronization using CAN

KyungHwan Kim, SungJin Oh, TaeHoon Kim
Ehwa Technology Information

ABSTRACT

본 논문에서는 CAN(Controller Area Network) 통신을 이용한 전 디지털 UPS시스템의 병렬제어에 대해 기술한다. UPS 주제어기인 DSP 내부에 실장된 CAN모듈을 이용하여 별도의 상위제어기가 없는 효과적이고 간단한 UPS의 병렬제어 시스템을 제시하며 특히 고조파 순환전류를 제거하기 위한 PWM 동기 방법을 제안하고 시험을 통해 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

무정전 전원공급 장치(UPS: Uninterruptible Power Supply)는 은행, 방송, 증권거래소, 전화교환국, 병원 그리고 반도체 공장 등 여러 산업에서 전원계통의 정전, 순간정전, 전압강하에 대한 대책으로 주로 사용되고 있다. 정전에 대한 최후의 대책 역할을 수행하는 UPS는 그 신뢰성을 높이기 위해서 또는 용량을 증가시키기 위한 목적으로 병렬 운전되고 있다. UPS 병렬운전의 핵심은 병렬 운전되는 각각의 UPS가 그 출력전압의 크기 및 위상을 온라인 제어하여 UPS간 흐르는 순환전류를 영으로 제어하는 것이다. 이러한 제어를 구현하기 위해서는 병렬 운전되는 다른 UPS의 전압, 전류 등의 정보를 알아야 하는 것이 필수적이며 이러한 정보의 공유를 위해서 UPS간 여러 가지 직렬 통신을 사용하고 있는 것이 일반적이다. 최근 단상 UPS 병렬운전의 경우 이러한 통신선을 사용하지 않고도 병렬운전이 가능한 방법들이 제시되고 있으나^{[1][2]}, 이러한 방법이 3상 UPS에 적용되기는 매우 어렵다.

기존에 발표된 3상 UPS의 병렬운전에 대한 제어 알고리즘은 병렬 운전되는 각각의 UPS가 순환전류의 무효분과 유효분을 연산하고 무효분을 영으

로 하기위해 출력전압의 크기를 그리고 유효분에 대응해서는 출력전압의 위상을 각각 제어하거나 또는 병렬 운전되는 UPS의 출력 임피던스 특성에 따라 반대로 제어하는 것이 주류를 이루고 있다^{[3][4][5]}. 이러한 방법들은 출력 전압 간에 미세한 위상 및 크기의 차이로 발생하는 저주파 순환전류를 효과적으로 제거 할 수 있으나 병렬 운전되는 UPS의 출력PWM (Pulse Width Modulation) 파형의 비동기로 인해서 UPS간에 흐르는 고조파 순환전류는 제거하지 못한다. 저주파 순환전류 제거를 위한 제어성능을 향상시키고 EMI/EMC 성능을 개선시키기 위해서 이러한 고조파 순환 전류는 제거되어야 한다.

본 논문에서는 CAN버스를 이용한 3상 UPS의 병렬제어 시스템을 제시하며 특히 병렬제어 시스템을 구성함에 있어 PWM출력파형의 비동기로 인한 고조파 순환 전류를 제거하기 위한 간단하고 효과적인 PWM 동기 방법을 제시한다. 또한 30KVA 두 대로 병렬운전시스템을 구성하여 제안한 방법의 타당성을 시험을 통해 입증한다.

2. 시스템 구성

그림 1.은 제안된 병렬 UPS시스템 구성도를 나타낸다. 여기서 UPS_M은 주(Master) UPS, UPS_S는 보조(Slave) UPS를 나타낸다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 두 대의 UPS는 출력측이 서로 연결되어 있으며 CAN버스(Bus)를 통해 통신이 이루어지게 된다. UPS 각각의 주제어기는 두개의 DSP를 사용한다. TMS320VC33은 주로 시스템 제어를 위한 연산을 하고 있으며 TMS320LF 2407A는 PWM발생을 주 목적으로 하게된다. 이러한 병렬시스템을 제어하기 위해서는 부하전류의 검출이 필수적이지만 시스템 구성상 부하전류를 직접검출하려면 추가적인 센서 및 인터페이스 보드가 요구

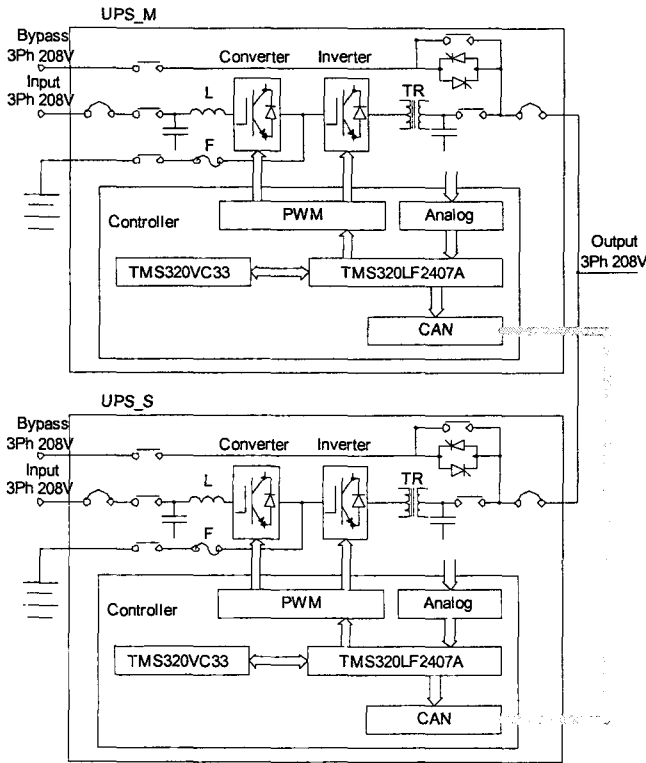


그림 1 병렬 UPS시스템 구성도
Fig. 1 Configuration of Parallel UPS

된다. 따라서 TMS320LF2407A 내부에 실장된 CAN 모듈을 이용하여 서로의 전류정보를 공유하고 각각의 UPS에서는 이들 전류를 모두 더하여 부하에 흐르는 전체 출력전류를 연산한다.

3. CAN통신을 이용한 인터럽트 동기화

3.1 통신 규약 (Protocol)

CAN의 브로드캐스트(Broadcast) 통신능력을 이용하여, 각 장비들은 2ms간격으로 전류정보와 상태정보를 일정하게 전송한다. 이와 같은 통신모델은 생산자/소비자(Producer/Consumer) 모델과 가깝지만 본 논문에서는 병렬제어 관점에서 마스터와 슬레이브로 구분하여 서술한다. 본 논문에서 적용한 CAN 통신의 속도는 500Kbps이고, 데이터 프레임은 그림 2와 같다. 12Bit의 중재필드(Arbitration Field)에 마스터와 슬레이브 정보를 포함시켰고 우선순위는 마스터가 제일 높도록 하였다. 그 결과 데이터 프레임의 흐름은 그림 3과 같다.

3.2 인터럽트 동기화 기법

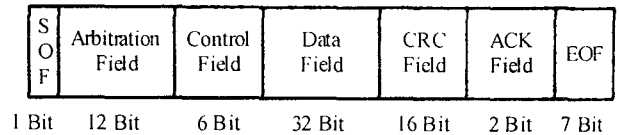


그림 2 CAN 데이터프레임
Fig. 2 CAN Data Frame

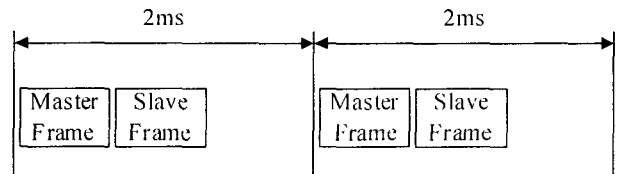


그림 3 마스터 슬레이브간 데이터 프레임의 이동
Fig. 3 Movement of Data Frame between Master and Slave

병렬 UPS에서 각각의 단독장비는 서로 다른 DSP에 의해 동작된다. 따라서 PWM을 발생시키기 위한 타이머 인터럽트는 서로 일치하기가 어렵다. 왜냐하면 같은 사양의 DSP일지라도 타이머의 속도가 절대적으로 일치할 수 없기 때문이다. 이러한 타이머 인터럽트의 비 동기화는 장비들 간에 스위칭 주파수 대역의 순환전류를 발생시키게 되고, 부하전류 외에 스위칭 주파수에 해당하는 순환전류가 더해지는 결과를 초래하게 된다. 본 논문에서는 CAN통신의 특성을 이용하여 DSP내의 타이머 인터럽트를 동기화 시킬 수 있는 방법을 제안한다.

그림 4의 Timer_M은 마스터의 타이머 값을 나타낸다. 마스터는 Timer_M의 값이 '0' 일 때 CAN 송신(Tx) 인터럽트를 발생시켜서 데이터를 전송한다. 여기서 송신 인터럽트를 발생하는 지점을 M_0 라 정의하자. 송신 과정에서 발생하는 송신 인터럽트 지연(Latency)은 α 로 정의한다. 전송데이터 프레임의 길이는 그림 2에서 알 수 있듯이 76비트(Bit)가 되고 전송속도가 500Kbps이므로 전송 데이터 프레임의 길이는 다음과 같다.

$$L_F = 76 \times 2\mu s = 152\mu s \quad (1)$$

전송데이터 프레임이 슬레이브에 도착하면 슬레이브에는 CAN 수신(Rx) 인터럽트가 발생하여 데이터를 취득한다. 이때 발생하는 수신 인터럽트 지연을 β 라고 하면 데이터 송수신에 소요되는 전체 시간 L_T 는

$$L_T = \alpha + L_F + \beta \quad (2)$$

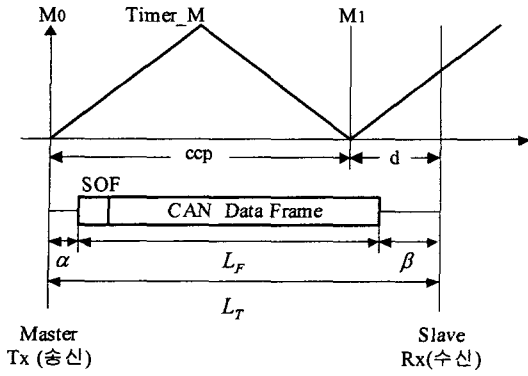


그림 4 타이머 인터럽트와 CAN데이터프레임
Fig. 4 Timer Interrupt and CAN Data Frame

와 같고, 타이머 주기를 ccp 라 하고 L_T 지점에서 가장 가까운 $Timer_M$ 의 시작점 즉, $Timer_M=0$ 인 지점을 $M_n(n=0,1,2,3\cdots)$ 이라 하면 M_n 과 L_T 와의 차이 d 는

$$d = M_n - L_T \quad (3)$$

와 같다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 슬레이브의 수신 인터럽트는 상승모드 또는 하강모드에서 발생할 수 있으며 수신 인터럽트는 L_T 지점에서 발생하게 된다. 수신 인터럽트가 발생한 $Timer_S$ 의 시작점 즉, $Timer_S=0$ 인 지점을 S_n 이라 하자. 이때 수신 인터럽트 발생지점과 가장 가까운 $Timer_S$ 의 시작점까지의 차이 r 은 상승모드와 하강모드에서 각각 다르게 정의된다. 먼저 상승모드에서 수신 인터럽트 발생 시 S_n 지점과 L_T 지점의 거리 r 은

$$r = L_T - S_n \quad (4)$$

과 같이 정의하고, (3)식과 (4)식을 이용하면 그림 6의 M_n 지점과 S_n 지점 사이의 거리 T 는

$$T = M_n - S_n = r + d \quad (5)$$

임을 알 수 있다. 그림 6은 상승모드에서 나타날 수 있는 모든 경우를 보여준다. 그림 6에서 보여지듯이 $T > 0$, $0 < T < \frac{ccp}{2}$ 인 경우는 슬레이브의 타이머가 마스터의 타이머보다 진상인 것으로 판단하여 슬레이브의 타이머 주기를 $ccp+1$ 만큼 증가시키고, $T < 0$, $T > -\frac{ccp}{2}$ 인 경우는 슬레이브의 타이머가 마스터의 타이머보다 지상인 것으로 판단하여

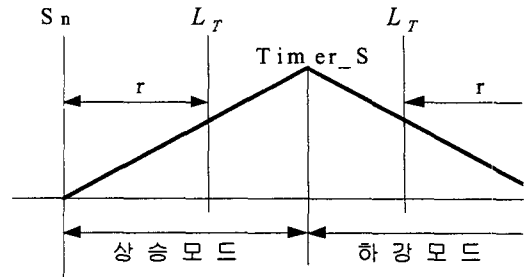
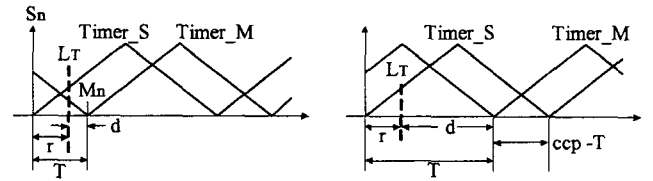
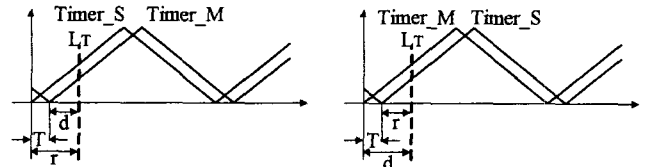


그림 5 수신 인터럽트와 상승, 하강모드
Fig. 5 Tx Interrupt and Upward, Downward

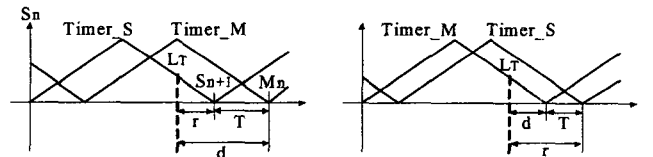


(a) $d > 0, 0 < T < \frac{ccp}{2}$ (b) $d > 0, T > \frac{ccp}{2}$

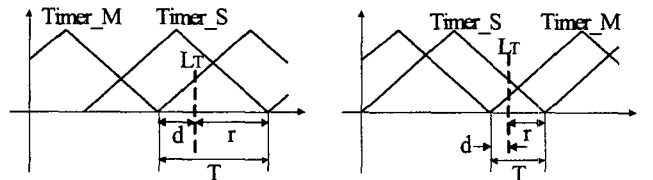


(c) $d < 0, T > 0$ (d) $d < 0, T < 0$

그림 6. Upward에서 수신 인터럽트 발생 ($T=r+d$)
Fig. 6 Rx Interrupt Trigger at Upward



(a) $d > 0, T < 0$ (b) $d > 0, T > 0$



(d) $d < 0, T > \frac{ccp}{2}$ (c) $d < 0, 0 < T < \frac{ccp}{2}$

그림 7. Downward에서 수신 인터럽트 발생 ($T=r-d$)
Fig. 7 Rx Interrupt Trigger at Downward

슬레이브의 타이머 주기를 $ccp-1$ 만큼 감소시키게 된다. 이와 반대로 하강모드에서는 r 을

$$r = S_{n+1} - L_T \quad (6)$$

과 같이 정의하고, (3)식과 (6)식을 이용하면 그림 7의 M_n 지점과 S_{n+1} 지점 사이의 거리 T 는

$$T = M_n - S_{n+1} = r - d \quad (7)$$

와 같이 되며 그림 7에서는 하강모드에서 나타날 수 있는 모든 경우를 보여준다. 그림 7에서 보여지듯이 $T < 0$, $T > \frac{ccp}{2}$ 인 경우는 슬레이브의 타이머가 마스터의 타이머보다 진상인 것으로 판단하여 슬레이브의 타이머 주기를 $ccp+1$ 만큼 증가시키고,

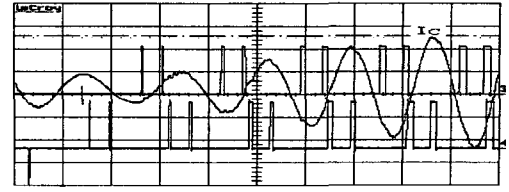
$T > 0$, $0 < T < \frac{ccp}{2}$ 인 경우는 슬레이브의 타이머가 마스터의 타이머보다 지상인 것으로 판단하여 슬레이브의 타이머 주기를 $ccp-1$ 만큼 감소 시키게 된다.

4. 실험 결과

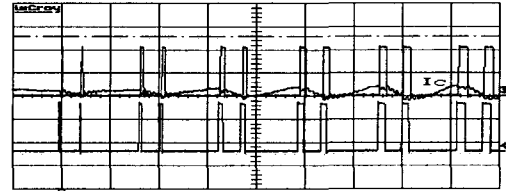
그림 8에서는 무부하의 경우에 각 장비의 인버터 출력전압과 순환전류의 파형을 보여준다. 그림 8(a)에서와 같이 각 장비의 타이머 인터럽트가 비동기라면 스위칭 주파수 대역의 순환전류 I_c 가 발생하게 된다. 하지만 그림 8(b)에서와 같이 타이머 인터럽트가 동기가 맞다면 스위칭 주파수대역의 순환전류는 거의 흐르지 않는다. 그림 9에서는 병렬 UPS시스템 동작 시 출력전압과 각 장비의 출력전류를 보여준다. 그림 9에서 알 수 있듯이 주 UPS의 출력전류와 보조 UPS의 출력전류가 30A씩 분담되며 스위칭 주파수에 해당하는 리플전류는 거의 없는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

병렬 UPS시스템은 장비의 대용량화 또는 장비의 신뢰성 향상을 위해 이용되어진다. 이러한 병렬 시스템을 구현하기 위해 대부분의 장비들은 추가적인 통신보드 또는 병렬제어보드를 요구하게 된다. 본 논문에서는 단독장비 내에 CAN통신 모듈을 이용하여 병렬 UPS시스템을 제어하였으며, CAN통신의 특성을 이용하여 각 장비의 타이머 인터럽트 동기화를 구현하였다. 따라서 병렬제어를 위해 별도의 상위제어기를 추가하지 않기 때문에 경제적이며, 타이머 인터럽트 동기화를 구현하여 스위칭 주파수대역의 순환전류를 제거하였다. 본 논문에서 제안한 구성 및 PWM 동기 방법은 3대 이상의 병렬시스템에 적용 시에도 일관되게 적용할 수 있다.



(a) 타이머 인터럽트가 비 동기일 때



(b) 타이머 인터럽트가 동기일 때

그림 8. PWM 전압과 순환전류파형
Fig. 8 Waveform of PWM Voltage and Circulate Current (200V/div, 10A/div, 100us/div)

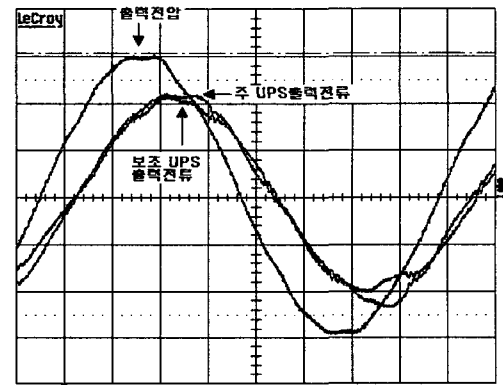


그림 9. 병렬 UPS의 출력전압, 전류 파형
Fig. 9 Output Voltage & Current waveform of Parallel UPS (100V/div, 20A/div, 2ms/div)

참 고 문 헌

- [1] Josep M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, Jose Matas, "A High-Performance DSP-Controller for Parallel Operation of Online UPS Systems", *Proc. IEEE, APEC'04 Conf.*, 2004
- [2] K. Wallace and G. Mantov, "Wireless Load Sharing of Single Phase Telecom Inverters", in *Proc. IEEE INTELEC'99 Conf.*, 1999, pp. 1-7, CD-Record
- [3] Youichi Ito and Osamu Iyama, "Parallel Redundant Operation of UPS with Robust Current Minor Loop", in *Proc. IEEE Nagaoka'97 Conf.*, 1997, pp. 489-494
- [4] Hiroyuki Hanaoka, Masahiko Nagai, Minoru Yanagisawa, "Development of a Novel Parallel Redundant UPS", in *Proc. IEEE INTELEC'03 Conf.*, 2003, pp. 493-497
- [5] TAKAO KAWABATA, SHIGENORI HIGASHINO, "Parallel Operation of Voltage Source Inverters", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 24, No. 2, pp. 281-287, 1989