

병렬운전 인버터의 부하 불평형 해소를 위한 3상전류 제어 기법

이봉기*, 박철현*, 조주현*, 이교범**
LS 일렉트릭*, 아주대학교**

Three-Phase Current Control to Solve Load Unbalanced in Paralleled Inverters

Bong-Ki Lee*, Cheol-Hyun Park*, Joo-Hyun Cho*, Kyo-Beum Lee**
LS Electric*, Ajou University**

ABSTRACT

본 논문에서는 인버터가 병렬로 연결된 전동기 구동 시스템에서 발생하는 인버터 간의 부하 불평형을 해소하기 위한 3상전류 제어 방법을 제시한다. 복수의 인버터의 출력을 연결하여 1대의 전동기를 구동하기 때문에 인버터 간의 순환 전류 및 하드웨어들의 공정 오차에 의해서 같은 전압을 출력한다고 제어할 하여도 출력 전류는 차이가 나게 된다. 본 논문의 알고리즘은 전동기 제어 기법에 관계없이 인버터들의 출력 상 별로 전압을 보상하여 출력 전류의 크기를 같게 함으로서 부하 불평형을 해소한다. 제안된 제어 방법은 3대의 인버터를 병렬로 시스템을 구현하여 실험을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근에 대용량 전동기를 사용하는 경우가 증가하고 있으며 특히 친환경 선박의 추진기로 메가단위의 전동기가 사용된다^[1]. 따라서 대용량 인버터가 필요하게 되었다. 대용량 인버터를 단일 인버터로 개발하게 되면 용량별로 만들어야 하는 불편함이 존재한다. 따라서 산업계에서는 기존 용량의 인버터를 개발하고 인버터들을 연결하여 대용량 전동기를 구동하는 병렬운전 제어 기술이 반드시 필요하다.

인버터의 병렬운전에서는 모든 인버터가 똑같은 전압 출력을 하기 위해 PWM (Pulse Width Modulation) 스위칭 소자의 온, 오프의 시점이 같아야 한다. 스위칭 소자의 온, 오프 시점이 다르게 되면 순환 전류가 발생한다. 순환 전류는 에너지 손실 또는 인버터의 소손이 발생하게 된다. 순환 전류를 막기 위해서는 인버터들의 출력마다 교류 리액터(AC Reactor)를 설치한다.^[2]

인버터들의 리액터, 스위칭 소자, 게이트 드라이브 등의 하드웨어들은 온도, 출력 주파수 등의 환경들에 의해 동작 특성이 조금씩 다르게 된다. 따라서 인버터의 출력 전압과 기생 저항의 값들의 차이가 발생하여 출력 전류의 크기 차이가 발생하게 된다. 그렇기 때문에 여러 대의 인버터 운전시 한 대의 인버터만 전류가 높아지게 되는 현상이 발생하게 되고 이로 인해 병렬로 연결된 인버터들의 최대 출력은 낮아지게 되는 문제가 발생하게 된다.

본 논문에서는 인버터가 병렬로 연결된 전동기 구동 시스템에서 발생하는 인버터들 사이의 부하 불평형이 발생하는 원인을 확인하고 해소하기 위한 강인한 3상전류 제어 기법을

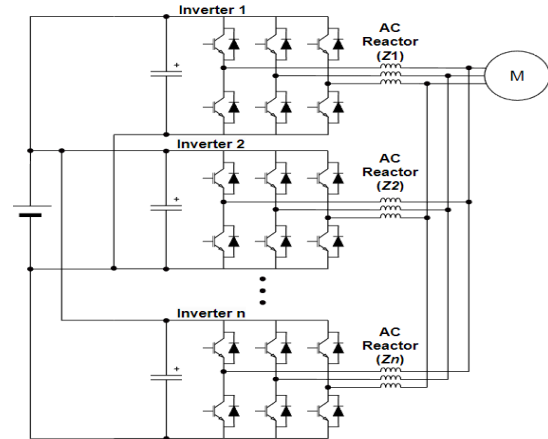


그림1.n개 병렬연결 인버터 구성도

Fig.1 Block Diagram of n-paralleled inverters.

제안한다. 인버터들의 상 별로 출력 전압을 보상하여 전류의 크기 차이가 줄어들 것을 확인한다. 제안 제어 방법의 타당성은 3대의 인버터를 병렬로 시스템을 구현하여 실험을 통해 검증한다.

2. 강인한 3상전류 제어 기법

2.1 병렬운전 구성

인버터를 병렬로 연결하여 전동기를 제어하기 위한 구조는 그림 1과 같다. 인버터들의 출력 전압을 같게 하기 위해서 스위칭 소자에 입력되는 직류 전원을 모두 연결하여 같은 직류 전압이 되도록 한다. 각 인버터의 출력단에는 출력 전압의 크기가 다를 때 발생하는 순환 전류를 막기 위해 교류 리액터 (AC Reactor)가 연결한다. 인버터의 출력 교류 리액터를 통과한 출력을 하나의 전동기에 연결되어 전동기를 제어한다.

2.2 병렬운전 출력 등가 회로

그림 1에서 교류 리액터 $Z1, Z2, Zn$ 의 L 값은 이론적으로는 같은 값으로 설계가 된다. 그러나 모든 부품에는 제조 오차가 존재하게 되기 때문에 실제 계측 값은 조금씩 다르다.

인버터 내부의 스위칭 소자도 기본적인 온, 오프의 시점의 스위칭 시간 오차가 존재하고 인버터 내부 하드웨어의 기생 저항 값의 차이도 존재한다. 이에 따라 같은 전압으로 출력을 하려고 하여도 실제 출력은 조금씩 다르게 된다.

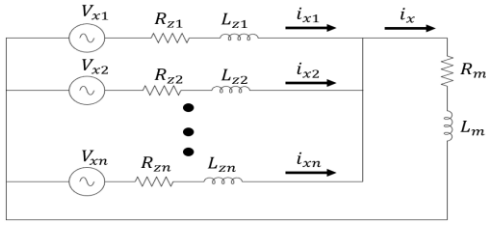


그림2. n 개 병렬 연결 인버터들의 x상 등가 회로
Fig.2 Block Diagram of n-paralleled inverters.

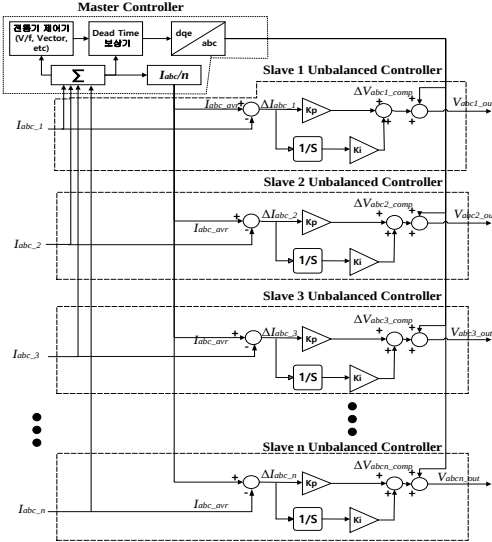


그림3. 병렬운전 인버터 n개 부하 불평등 제어기
Fig3. Unbalance Load Controllers in Paralleled Inverters

그림2. 에서 오차물을 감안한 x 상의 등가회로이다. 리액터 Z_n 의 임피던스 값을 기생 저항 값 R_{zn} 과 L_{zn} 값으로 표현할 수 있다.

전동기 제어 연산을 통해 인버터가 출력해야 하는 제어 전압을 V_x 로 정의한다. (1)을 통해 전압의 오차 값 ΔV_x 을 연산할 수 있다.

$$\Delta V_{xn} = V_x - V_{xn} \quad (1)$$

인버터들의 출력 전류의 차이는 ΔV_x 와 R_{zn} 값에 의해 발생하게 된다. (2), (3)을 통해 전류의 평균값을 구하고 (4)에서 출력 전류에서 발생하고 있는 차이 값 Δi_{xn} 을 구할 수 있다.

$$i_x = \sum_{k=0}^n i_{xk} \quad (2)$$

$$i_{avr} = \frac{i_x}{n} \quad (3)$$

$$\Delta i_{xn} = i_{avr} - i_{xn} \quad (4)$$

이러한 등가회로들 기반으로 출력 상 전류를 제어할 수 있다.

2.3 강인한 3상전류 제어기

(5)를 통해 모든 인버터의 출력 전류 차이 값 Δi_{xn} 값의 총합은 0이다.

$$\sum_{k=0}^n \Delta i_{xk} = 0 \quad (5)$$

불평형의 전류 값을 제거하는 것을 목표로 제어를 설계하였다. (6)은 제어를 표현한 수식으로 출력은 출력 전압 보상전압 $\Delta V_{xn,comp}$ 이 된다.

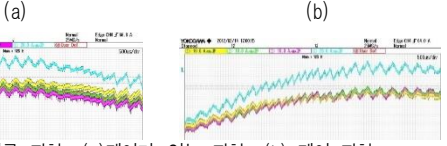


그림4. 시험 전류 파형. (a)제어가 없는 파형. (b) 제어 파형
Fig.4 Test Current Wave. (a)Not Control Wave. (b)Control Wave.

$$\Delta V_{xn,comp} = k_p \cdot \Delta i_{xn} + k_i \cdot \frac{1}{s} \cdot \Delta i_{xn} \quad (6)$$

인버터의 최종 출력 상전압 $V_{xn,out}$ 은 (7)과 같이 된다.

$$V_{xn,out} = V_x + \Delta V_{xn,comp} \quad (7)$$

위 식들은 그림 3.과 같이 마스터 제어기와 슬레이브 제어기로 나타낼 수 있고 전동기 제어기와 상관없이 전류 불평등을 제어할 수 있다.

3. 병렬운전 시스템

3.1 시뮬레이터 구성

시뮬레이터는 마스터 제어기와 슬레이브 제어기로 구성한다. 마스터 제어기에서 평균 전류 값과 전동기 제어를 통한 3상 출력 전압을 연산한다. 슬레이브 제어기는 3상전류 제어를 수행하고 전압을 출력한다. 마스터와 슬레이브 사이의 캐리어를 동기 시키기 위해 동기 신호를 주기적으로 보내도록 한다.

그림 3. 과 같이 병렬운전 마스터 제어기와 슬레이브 제어기로 구분하여 제어를 한다. 본 실험에서는 3.7kw, 380V인버터 3대를 연결하여 11kw 병렬 운전용 인버터로 만든 실험 장비로 시험을 진행하였다.

3.2 시험 결과

3병렬 운전에서 부하가 100%(46A)가 걸려있고 캐리어 주파수는 4KHz 출력 주파수는 60Hz에서 실험한 파형이다. 오실로스코프 화면에서 하늘색은 전동기 입력 전류 파형이고 아래 3색 전류파형은 인버터들의 출력 전류이다.

그림4(a)는 3상전류 제어를 수행하지 않고 전동기 제어만 하여 출력한 전류이다. 각각의 출력에 일정한 오차가 있다는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서는 제시한 슬레이브 제어기가 동작하여 그림4(b)에서 3상의 전류의 불평형이 줄어 든 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 병렬운전을 하는 인버터에서는 하드웨어 공정 오차에 의해 발생한 출력 전류의 불평형이 발생 이유를 분석하였고 불평형을 해소하기 위한 전류 제어기법을 제시하였다. 부하 불평형 해소를 위한 3상전류 제어를 하여 인버터들의 출력 상전류들의 불평형 크기가 제어를 하지 않았을 때 보다 줄어 드는 것을 실험을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이창희, “친환경 전기 선박의 기술 동향 및 선박용 전기 추진 시스템의 구조”, 전력전자학회지 제27권 제6호 pp. 52 - 57, 2022, Dec.
- [2] H.S. Jung, S.K. Sul “Decomposed Current Controller for a Paralleled Inverter With a Small Interfaced Inductor”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 9, pp. 9316-9328, 2019, Sep.