

## 대전력 3상 유도전동기의 고정자권선을 이용한 전압원 인버터의 병렬운전

김보경, 문상호, 강성관, 김인동, 노의철, 전성준  
부경대학교

### Parallel Operation of Voltage Source Inverters by Using Stator Windings of High Power Three-Phase Induction Motors

B. K. Kim, S. H. Moon, S. K. Kang, I. D. Kim, E. C. Nho and S. J. Jeon  
Pukyong National University

#### ABSTRACT

본 논문에서는 고압 대전력 3상 유도전동기의 고정자 권선을 이용한 전압원 인버터의 병렬운전 방식을 제안한다. 현재 사용되고 있는 대부분의 4극 이상 대전력 유도전동기는 각 상의 권선이 외부에서 접근이 가능하도록 외부단자가 설치되어 있으며, 이들 외부 단자를 이용하여 복수대의 전압원 인버터를 병렬운전하여 대전력 유도전동기를 구동할 수 있다. 이와 같이 고압 대전력 유도전동기를 복수 개의 전압원 인버터를 병렬 운전하여 구동할 경우, 특정 인버터의 고장발생 시 비록 구동 토크는 감소될지라도, 나머지 인버터로 시스템을 계속 구동할 수 있어 시스템의 고장대처능력을 향상시킬 수 있다. 또한 병렬 운전되고 있는 각 인버터의 스위칭 동작에 대해 서로 위상 차를 갖게 함으로서, 등가 스위칭 주파수를 증가시켜 출력 토크 리플 감소와 입력 전류 리플 감소, DC Link 커패시터의 크기 감소와 같은 좋은 특성을 얻을 수 있다. 또한 각 인버터로의 전력의 분산에 의해 시스템에서 발생하는 EMI영향을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안한 방식을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 특성을 증명하였다.

#### 1. 서 론

고압 대전력 가변속 드라이브는 효율과 성능의 관점에서 팬, 펌프 프로세서 제어응용 같은 분야에 많은 장점들을 제공하고 있다. 이들 고압 대전력 가변속 드라이브는 한번 고장이 발생하면 주요 공정을 정지시킬 뿐만 아니라 생산에도 많은 손실을 가져오고 있다[1]-[6]. 따라서, 이들 시스템의 고장대처능력 즉 신뢰도를 향상시키기 위해 모듈모터와 모듈인버터

의 개념이 제안되었다[3]-[6]. T. M. Jahms에 의해서 제안된 방식은 n상으로 된 대용량 유도 전동기를 제어하기 위해 n개의 독립된 단상인버터를 사용하여 전동기의 전력을 제어하였다[5]. 비록 한 상이 고장이 나더라도 나머지 상에 의해 제어가 되므로 인해, 비록 성능이 약간 떨어지겠지만 시스템을 계속 가동시킬 수 있어 긴급한 수리의 필요성을 현저히 제거하였다.

위와 같은 방식을 표준 3상 대용량 유도전동기로 확장시켜 성능을 개선한 방식이 P. N .Enjeti에 의해서 제안되었다[6]. 이 방식은 그림1(a)와 같은 3상 유도 전동기의 결선을 그림1(b)와 같이 결선을 변경하여 각 전동기 모듈당 3상 인버터를 한대씩 결선하여 그림2와 같이 결선하여 구동하므로 인해 시스템의 신뢰도를 향상시켰다. 이뿐 아니라 P. N .Enjeti에 의해서 제안된 시스템은 고압 대용량 전동기를 1대의 고압 대용량 인버터를 구동할 때의 발생하는 많은 문제를 해결하였다. 한 대의 고압 인버터를 사용하여 고압 전동기를 구동할 시 발생하는 절연의 문제를 해결하였으며, 대전력 인버터에서의 큰 EMI문제를 개선하였다. 또한 고압 대용량 인버터에서는 스위칭 소자에 있어서 스위칭 주파수 제한을 갖는데 비해, 소용량 모듈화된 인버터를 사용할 경우 높은 스위칭 주파수로 인버터를 제어할 수 있어 인버터의 전류 리플과 전동기의 토크 리플을 감소시키는 좋은 특성을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 위에서 기술한 바와 같이 기본적으로 좋은 특성을 지니고 있어 산업계에서 응용이 기대되는 그림2의 모듈전동기 모듈인버터구성을 개선한 새로운 인버터구성과 그 제어 방법을 제안한다.

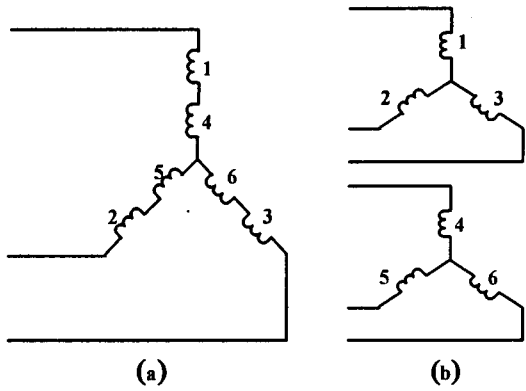


그림 1 (a) 대전력 유도전동기의 권선 다이어그램  
 (b) 모듈전동기-모듈 인버터 개념을 위한 재 결선된 권선다이어그램  
 Fig. 1 (a) Winding diagram of high power 3-phase induction motor  
 (b) Modified winding diagram for modular motor-modular inverter concept

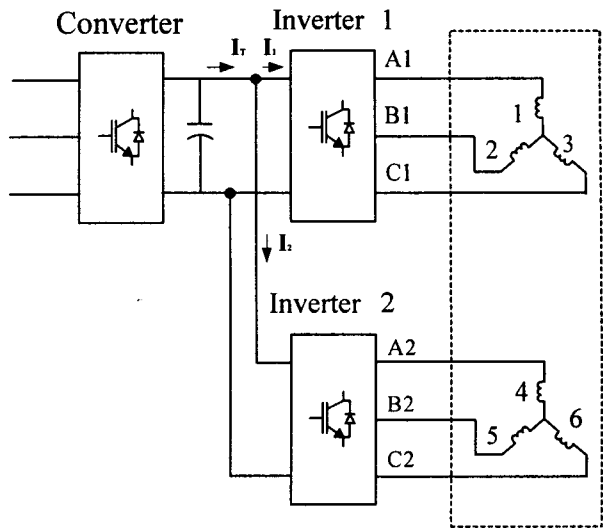


그림 3 제안한 모듈전동기-모듈인버터를 위한 블록다이어그램  
 Fig. 3 Proposed modular motor-modular inverter block diagram

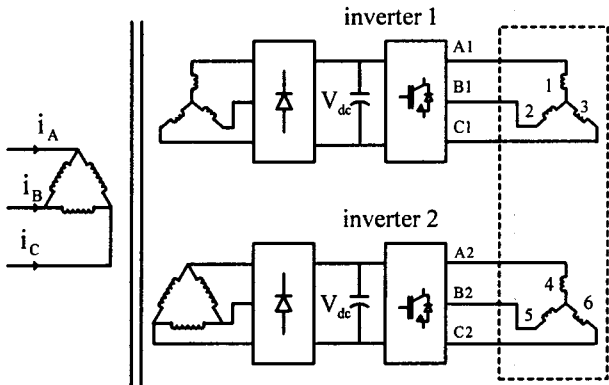


그림 2 기존의 대전력 유도전동기의 모듈전동기-모듈 인버터를 위한 블록다이어그램  
 Fig. 2 Conventional modular motor-modular inverter block diagram

제안한방법은 그림2의 기존의 시스템에 비해 콘덴서의 전류리플과 용량을 거의 1/2로 줄였으며, 또한 출력 토크의 맥동분을 거의 1/2로 감소시켰다.

## 2. 제안한 시스템의 구성과 제어 방식

본 논문에서 제안하는 회로는 그림3과 같이 DC 링크 커패시터를 공동으로 사용하고 있으며, DC 링크 커패시터 중심으로 하여 입력단 컨버터와 출력단 인버터가 병렬로 연결되어 있다. 출력단 인버터의 경우 인버터의 출력단자를 모듈전동기의 각 모듈로 연결되므로 인해 인버터 병렬 연결 시 일어날수 있는 순환 전류 (circulating current)의 문제를 제거하였으며, DC 링크 커패시터의 취부와 연결이 용이하다. 또한 병렬연결된 각 인버터를 PWM 제어할 시 PWM 발생부에서 반송파로 동일 삼각파를 사용하지 않고, 각 인버터의 삼각파사이 위상 차를 주므로 인해 인버터의 중첩된 입력전류에서의 3의 배수 고조파성분을 제거하므로 인해 커패시터의 전류 맥동 성분을 감소시

켰다. 이로 인해 DC Link 커패시터의 전류리플용량을 1/2로 감소시켰으며 또한 콘덴서의 정수 값을 감소시켰다. 또한 PWM발생 시 반송파의 위상 차에 의해 유도 전동기 축에서의 출력 토크 성분에서 스위칭 주파수의 3의 배수성분의 맥동 토크를 감소시켰다.

## 3. PLL을 이용한 PWM 반송파 발생

본 논문에서 2대의 인버터를 사용한 경우에 대하여 연구하였으며, 따라서 반송파 사이의 위상 차는 180도로 하였다. 2대의 인버터를 제어하기 위해 TMS320F241의 DSP를 사용하여 구현하였으며 그림과 같이 PLL을 구성하였다. 병렬운전 유도전동기구동 인버터시스템의 제어방법은 그림 4와 같다. 그림에서 보는 것처럼 속도지령은 상위레벨 Supervisor에서 명령하며 RS-485 Bus를 통해 인버터제어기내의 Communication Board(통신보드)에 보내어 진다.

인버터제어기내의 통신보드에서 수령한 속도지령은 제어기내의 각 보드를 연결하는 CAN Bus를 통해 각 인버터 제어보드(Control Board 1, 2)로 보내진다. 각 인버터 제어보드 1, 2는 독립적으로 피드백되어 오는 전동기의 실제속도와 비교하여 벡터제어부와 PWM발생부를 통해 항상 속도지령치를 추종하도록 제어되고 있다. 병렬운전에서 스위칭 반송파 사이의 위상차를 180°로 유지하기 위해 PLL(Phase Locked Loop)를 사용하였다. 그림에서 보는 것처럼 통신보드에서 기준 반송파를 발생하여 각 인버터 제어보드에 보내면, 인버터 제어보드에서는 이 기준파를 그대로 PLL의 입력파형으로 사용하고, 인버터 제어보드 2에서 이 기준파를 반전하여 사용하므로 두 개의 PLL 루프에서의 VCO의 출력파형 즉 PWM 발생기로의 반송파의 위상차는 180°를 유지하게 하였다.

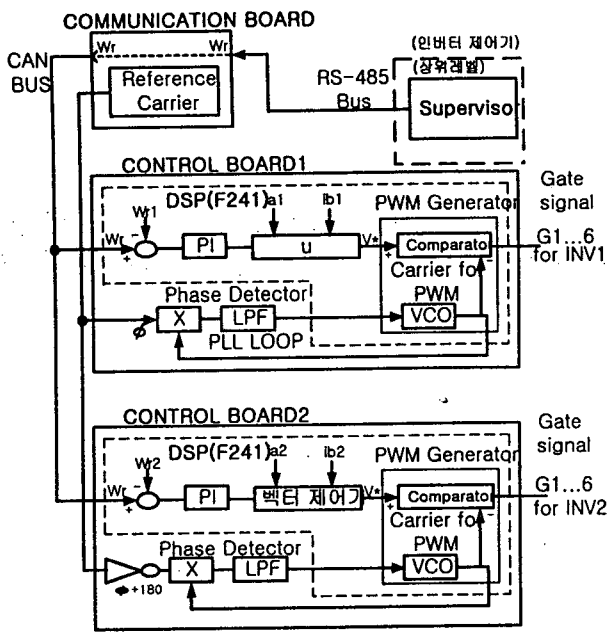


그림 4 병렬운전 유도전동기-인버터 시스템의 제어방법  
 Fig. 4 Control diagram of modular motor-modular inverter system

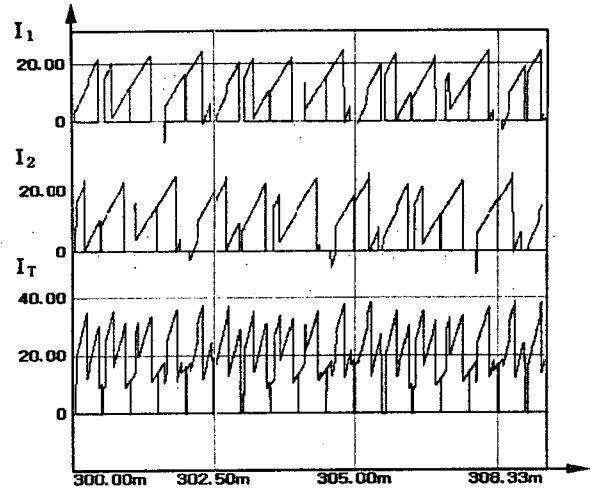


그림 6 각 모듈 인버터의 입력단 전류  $I_1$ ,  $I_2$ , 중첩한 DC Link 전류  $I_T$   
 Fig. 6 Inverter input currents  $I_1$ ,  $I_2$  and Superposed DC Link Current  $I_T$

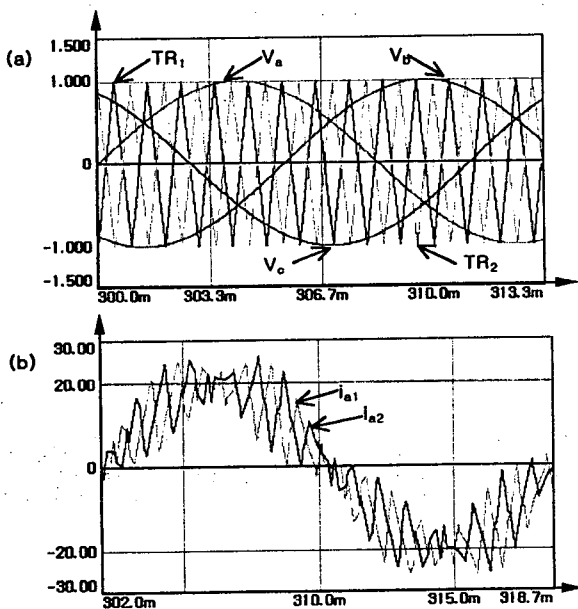


그림 5 (a) PWM발생부의 3상기준파와 180°의 위상차를 갖는 삼각파  
 (b) 각 모듈인버터의 전류  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$   
 Fig. 5 (a) Three-phase reference signals and triangular carrier waves of pwm generator  
 (b) Modular inverter currents  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$

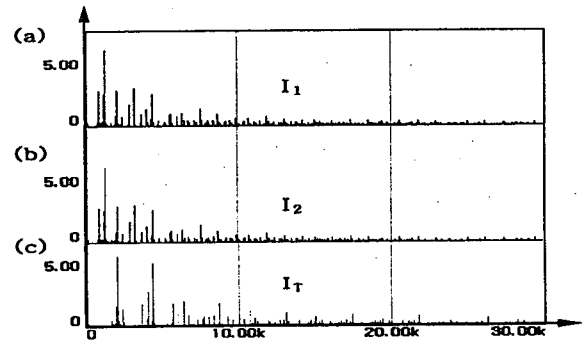


그림 7  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_T$  전류의 주파수스펙트럼  
 Fig. 7 Frequency Spectrum of Currents  $I_1$ ,  $I_2$ , and  $I_T$

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안시스템의 동작을 입증하기 위하여 정격용량 20kw 3상 4극 유도전동기에 대하여 시뮬레이션 소프트웨어 Simplorer 4.2를 사용하여 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 조건으로는 인버터 기본주파수 60Hz, 부하 토크 40[N.m], 인버터 스위칭주파수 1200Hz, 입력단 DC Link전압 360[V]이다. 그림 5(a)에서 시뮬레이션에서의 3상 기준파와 180° 위상차를 갖는 반송파인 삼각파와, 그림 5(b)에서 인버터 출력전류  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$ 를 볼 수 있다. 그림에서처럼 인버터  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$ 의 리플성분은 위상차 180을 지니고 있으며, 이는 제안한 시스템에서 같은 축인 경우와, 혹은 축 연결된 2대의 유도 전동기에서 토크의 리플 성

분을 감소시킬 수 있음을 볼 수 있다.

그림 6과 그림 7은 인버터 입력전류  $I_1$ ,  $I_2$ 와 중첩한 DC Link전류  $I_T$ 와 이들의 고조파 스펙트럼을 보이고 있다. 그림에서처럼  $I_1$ ,  $I_2$ 의 고조파 스펙트럼은 기존의 방식에서 인버터 입력전류에 해당하며, 중첩된 DC Link전류의 고조파 스펙트럼은 제안한 시스템의 전류에 해당하며, 또한 이 전류는 DC Link 커패시터에서 공급하는 리플전류성분에 해당한다. 따라서 제안한 시스템에서는 DC Link 커패시터의 리플 용량이 1/2정도 감소한 커패시터를 선정할 수 있음을 볼 수 있다.

그림 8과 9는 각 모듈 전동기에서 발생하는 토크  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ 와 중첩된 합상 토크  $T_{e,total}$  및 이들의 고조파 스펙트럼을 보이고 있다. 그림에서 보는 것처럼 토크의 맥동성분의 크기가 거의 1/2로 감소하였을 뿐만 아니라 주파수도 2배 증가하였음을 볼 수 있다.

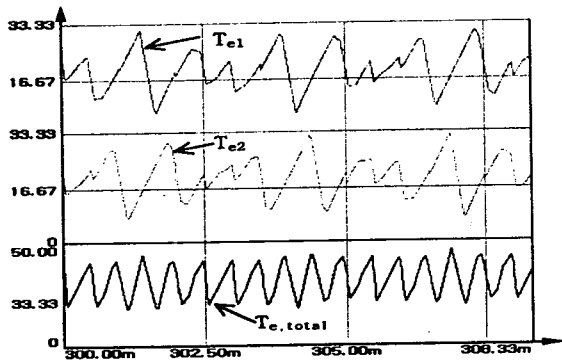


그림 8 각 모듈전동기의 출력토크  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ 와 중첩한 전체 토크  $T_{e,total}$

Fig. 8 Modular motor torque  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$  and Superposed resultant torque  $T_{e,total}$

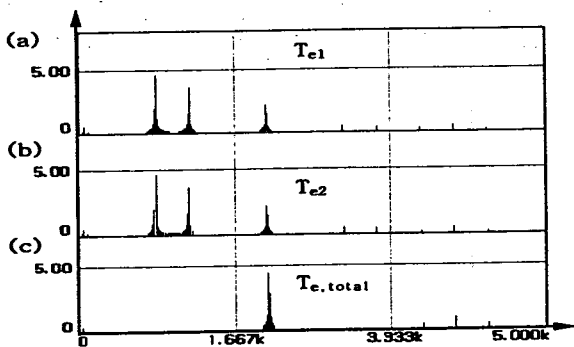


그림 9  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ ,  $T_{e,total}$  토크의 주파수 스펙트럼  
Fig. 9 Frequency spectrum of torque  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ , and

$T_{e,total}$

## 5. 결 론

본 논문에서는 고압 대전력 3상 유도전동기의 고정자 권선을 이용한 전압원 인버터의 병렬운전 방식을 제안한다. 대전력 유도전동기를 고정자 권선을 이용하여 복수 개의 전압원 인버터를 병렬 운전하여 구동하므로 인해, 특정 인버터의 고장발생 시 비록 구동토크는 감소될지라도, 나머지 인버터로 시스템을 계속 구동할 수 있어 시스템의 고장대처능력을 향상시킬 수 있다. 또한 병렬 운전되고 있는 각 인버터의 PWM스위칭 동작에 있어서 PWM 반송파사이에 서로 위상 차를 갖게 함으로서, 등가 스위칭 주파수를 증가시켜 출력 토크 리플 감소와 입력 전류 리플 감소, DC Link 커패시터의 크기 감소와 같은 좋은 특성을 얻을 수 있다. 또한 각 인버터로의 전력의 분산에 의해 시스템에서 발생하는 EMI영향을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 제안한 방식을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 특성을 증명하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] "Adjustable speed drives-Application guide," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Rep. TR101140, 1992.
- [2] R. A. Hanna and S. Prabhu, "Medium voltage adjustable speed drives-Users' and manufacturers' experiences," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, pp. 1407~1415, Nov./Dec. 1997.
- [3] E. A. Klingshirn, "High phase order induction motors, Part II-Experimental results," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, pp. 54~59, Jan. 1983.
- [4] M. A. Abbas et al., "Six-phase voltage source inverter driven induction motor," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-20, pp. 1251~1259, Sept./Oct. 1984.
- [5] T. M. Jahns, "Improved reliability in solid-state ac drives by means of multiple independent phase-drive units," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-16, pp. 321~331, May/June 1980.
- [6] E. Cengelci, P.N. Enjeti and J. W. Gray, "A New Modular Motor-Modular Inverter Concept for Medium-Voltage Adjustable-Speed-Drive Systems," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-36, No. 3, pp. 786~796, May/June 2000.