
대전력 3상 유도전동기의 고정자 권선을 이용한 전압원 인버터의 병렬운전

김인동*, 노의철*, 전성준*

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

I. D. Kim*, E. C. Nho* and S. J. Jeon*

요 약

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 병렬운전 하여 대전력 유도전동기를 구동할 수 있다. 이와 같이 고압 대전력 유도전동기를 복수 개의 전압원 인버터를 병렬 운전하여 구동할 경우, 특정 인버터의 고장발생 시 비록 구동 토오크는 감소될지라도, 나머지 인버터로 시스템을 계속 구동할 수 있어 시스템의 고장대처능력을 향상시킬 수 있다. 또한 병렬 운전되고 있는 각 인버터의 스위칭 동작에 대해 서로 위상차를 갖게 함으로써, 등가 스위칭 주파수를 증가시켜 출력 토오크 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.

ABSTRACT

The parallel operation of voltage source inverters using stator windings of high power three-phase induction motors was proposed in this paper. Most current high power induction motors with more than 4 electric poles have their external terminals installed so that windings of each phase can be approached from the outside. High power induction motors can be driven by parallel-operating several voltage source inverters through these external terminals. This way, in case a certain inverter breaks down, the operation torque will get decreased but the system can maintain its operation with the other inverters, so it can cope more effectively with breakdowns. Moreover, by providing phase difference to the switching movements of each inverter, it can increase equivalent switching frequency, which helps achieve good characteristics such as the reduction in the ripple of output torque, the reduction in the ripple of input current, and the reduction in the size of DC capacitors. Besides, since power is divided into each inverter, it can also decrease the influence of EMI occurring in the system. The characteristics of the proposed method were proved through computer simulations in this paper.

키워드

Parallel inverter, Parallel operation, Induction motor, Voltage source inverter

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 고장 대처능력 즉 신뢰도를 향상시키기 위해 모듈모터와 모듈인버터의 개념이 제안되었다[3]-[6]. T. M. Jahms에 의해서 제안된 방식은 n상으로 된 대용량 유도 전동기를 제어하기 위해 n개의 독립된 단상 인버터를 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)과 같은 3상유도 전동기의 결선을 그림1(b)과 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 구동할시 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 토오크 리플을 감소시키는 좋은 특성을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 위에서 기술한 바와 같이 기본적으로 좋은 특성을 지니고 있어 산업계에서 응용이 기대되는 그림2의 모듈전동기 모듈인버터 구성을 개선한 새로운 인버터구성과 그 제어 방법을 제안한다. 제안한 방법은 그림2의 기존의 시스템에 비해 콘덴서의 전류리플과 용량을 거의 1/2로 줄였으며, 또한 출력 토오크의 맥동분을 거의 1/2로 감소시켰다.

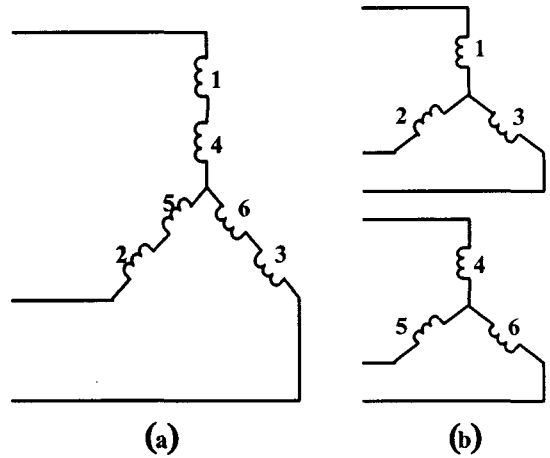


그림 1. (a) 대전력 유도전동기의 권선 다이어그램, (b) 모듈전동기-모듈 인버터 개념을 위한 재결선된 권선다이어그램

Fig 1. (a) Winding diagram of high power 3-phase induction motor, (b) Modified winding diagram for modular motor-modular inverter concept

II. 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 연결되어있다. 출력단 인버터의 경우 인버터의 출력단자를 모듈전동기의 각 모듈로 연결되므로 인해 인버터 병렬 연결 시 일어날 수 있는 순환전류(circulating current)의 문제를 제거하였으며, DC 링크 커패시터의 취부와 연결이 용이하다. 또한 병렬 연결된 각 인버터를 PWM 제어할 시 PWM 발생부에서 반송파로 동일 삼각파를 사용하지 않고, 각 인버터의 삼각파 사이 위상차를 주므로 인해 인버터의 중첩된 입력전류에서의 3의 배수 고조파성분을 제거하므로 인해 커패시터의 전류 맥동 성분을 감소시켰다. 이로 인해 DC 링크 커패시터의 전류리플용량을 1/2로 감소시켰으며 또한 콘덴서의 정수 값을 감소시켰다. 또한 PWM발생 시 반송파의 위상 차에 의해 유도전동기 축에서의 출력 토오크 성분에서스위칭 주파수의 3의 배수성분의 맥동 토오크를 감소시켰다.

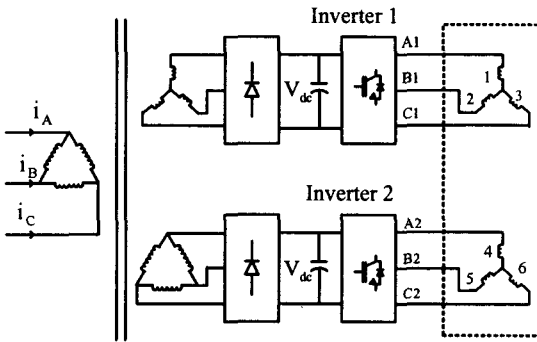


그림 2. 기존의 대전력 유도전동기의 모듈전동기-모듈 인버터를 위한 블록다이어그램
Fig 2. Conventional modular motor - modular inverter block diagram

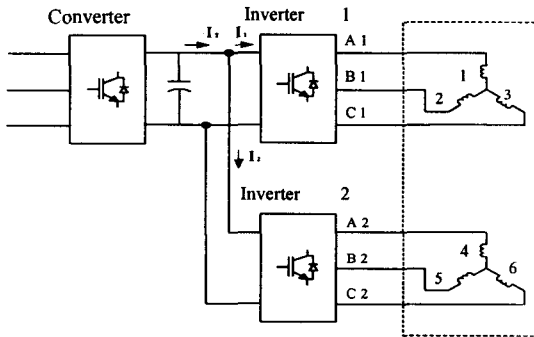


그림 3. 제안한 모듈전동기-모듈인버터를 위한 블록다이어그램
Fig 3. Proposed modular motor-modular inverter block diagram

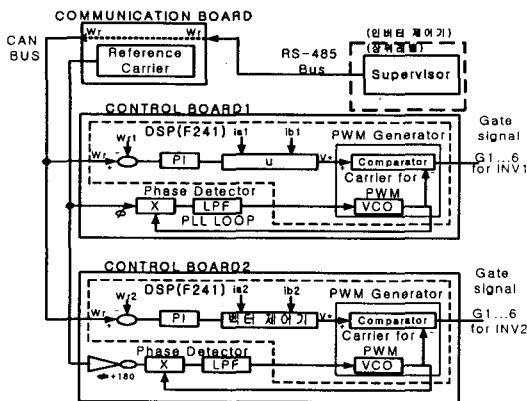


그림 4 병렬운전 유도전동기-인버터 시스템의 제어방법
Fig 4. Control diagram of modular motor-modular inverter system

III. PLL을 이용한 PWM 반송파 발생

본 논문에서 2대의 인버터를 사용한 경우에 대하여 연구하였으며, 따라서 반송파 사이의 위상차는 180도로 하였다. 2대의 인버터를 제어하기 위해 TMS320F241의 DSP를 사용하여 구현하며 그림과 같이 PLL을 구성한다. 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.

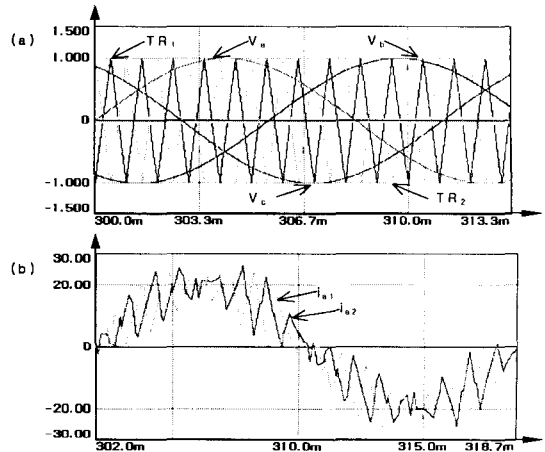


그림 5. (a) PWM 발생부의 3상 기준파와 180°의 위상차를 갖는 삼각파, (b)각 모듈인버터의 전류 i_{a1}, i_{a2}

Fig. 5 (a) Three-phase reference signals and triangular carrier waves of PWM generator, (b) Modular inverter currents i_{a1}, i_{a2}

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 피드백 되어 오는 전동기의 실제속도와 비교하여 벡터제어부와 PWM 발생부를 통해 항상 속도 지령치를 추종하도록 제어되고 있다. 병렬운전에서 스위칭 반송파 사이의 위상과를 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 두개의 PLL 루프에서의 VCO의 출력 파형 즉 PWM발생기로의 반송파의 위상차는 180°를 유지하게 하였다.

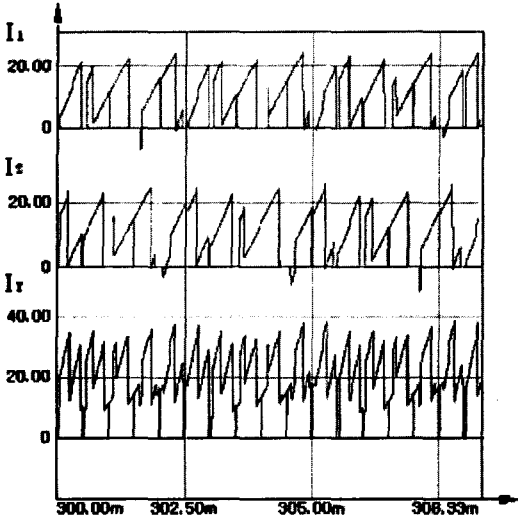


그림 6. 각 모듈 인버터의 입력단 전류 I_1 , I_2 에 중첩한 DC 링크 전류 I_T
Fig. 6 Inverter input currents I_1 , I_2 and Superposed DC Link Currents I_T

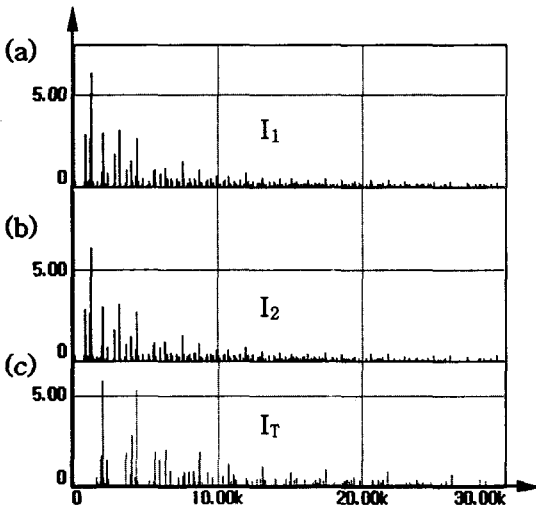


그림7 I_1 , I_2 , I_T 전류의 주파수스펙트럼
Fig.7 Frequency Spectrum of Currents I_1 , I_2 , and I_T

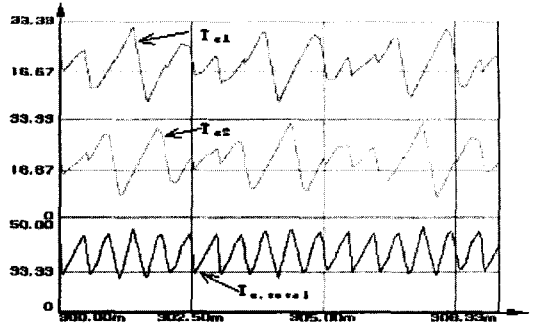


그림8. 각 모듈 전동기의 출력토크, T_{e1} , T_{e2} 와 중첩한 전체 토크 $T_{e,total}$
Fig.8 Modular motor torque T_{e1} , T_{e2} and resultant torque $T_{e,total}$

IV. 시뮬레이션 결과

제안시스템의 동작을 입증하기 위하여 정격용량 20kw 3상 4극 유도전동기에 대하여 시뮬레이션 소프트웨어 Simpler 4.2를 사용하여 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 조건으로는 인버터 기본주파수 60Hz, 부하 토크 40[N.m], 인버터 스위칭 주파수 1200Hz, 입력단 DC 링크 전압 360[V]이다. 그림 5(a)에서 시뮬레이션에서의 3상 기준파와 180° 위상차를 갖는 반송파인 삼각파와, 그림5(b)에서 인버터 출력전류 i_{a1} , i_{a2} 를 볼 수 있다. 그림에서처럼 인버터 i_{a1} , i_{a2} 의 리플성분은 위상차 180°을 지니고 있으며, 이는 제안한 시스템에서 같은 축인 경우와, 혹은 축 연결된 2대의 유도 전동기에서 토크의 리플 성분을 감소시킬 수 있음을 볼 수 있다.

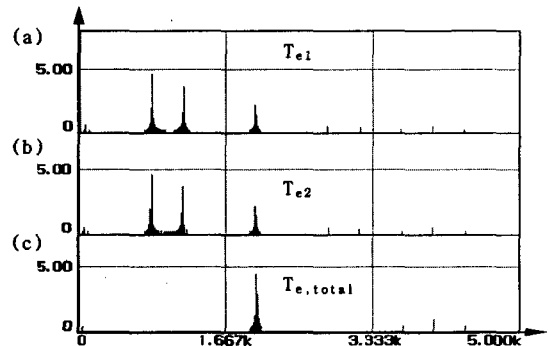


그림9. T_{e1} , T_{e2} , $T_{e,total}$ 토크의 주파수 스펙트럼
Fig.9 Frequency spectrum of torque T_{e1} , T_{e2} , and $T_{e,total}$

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

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

V. 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 구동 토오크는 감소될지라도, 나머지 인버터로 시스템을 계속 구동할 수 있어 시스템의 고장 대처능력을 향상시킬 수 있다. 또한 병렬 운전되고 있는 각 인버터의 PWM스위칭 동작에 있어서 PWM 반송파사이에 서로 위상차를 갖게 함으로서, 동가 스위칭 주파수를 증가시켜 출력 토오크 리플 감소와 입력 전류 리플 감소, DC 링크 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.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 부경대학교 기성회 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- [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. on Industry Applications., vol. 33, pp. 1407-1415, Nov./Dec. 1997
- [3] E. A. Klingshirn, "High phase order induction motors, Part II-Experimental results, "IEEE Trans. on 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. on Industry Applications, 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. on Industry Applications, 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. on Industry Applications, vol. IA-36, No.3, pp. 786-796, May/June 2000.

저자소개



김인동(In-Dong Kim)

1960년생
1984년 서울대 공대 전기공학과
졸업
1987년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 졸업(석사)
1991년 동 대학원 졸업(공학박

1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임
연구원

1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수

1996년~현재 부경대학교 공대 전기제어계측공학
부 부교수

※관심분야 : 전력전자, 전동기제어, 통신용 정류
기 및 UPS, 통신용 DC/DC 컨버터



전성즙(Seong-Jeub Jeon)

1957년생
1980년 숭전대학교 공학사 (전
기공학)
1982년 한국과학기술원 공학석
사(전기 및 전자공학)
2001년 한국과학기술원 공학박

사(전기 및 전자공학)

1982년~1985년 한국과학기술원(현 한국과학기술
연구원) 근무

1985년~1986년 한국전기연구소 근무

1986년~현재 부경대학교 공대 전자공학과 교수

2001년~2004년 미국 버지니아공대 방문교수

※관심분야 : AC-DC converter, soft-switching
DC-DC converter, AC motor control, Hybrid 전
기자동차.



노의철(Eui-Cheol Nho)

1960년생
1984년 서울대 공대 전기공학과
졸업
1986년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 졸업(석사)
1991년 동 대학원 졸업(공학박

1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-
Madison 방문교수

1995년~현재 부경대학교 공대 전기제어계측공학
부 부교수

※관심분야 : 전력전자, 전동기제어, 통신용 정류
기 및 UPS, 통신용 DC/DC 컨버터