

병렬 인버터 구성시 결합 인덕터를 이용한 모터 제어 성능 향상 방법

신지석, 장푸름, 주동명, 김진홍, 박준성, 최준혁
한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

The Method of Improving Motor Control Performance Using Coupled Inductors in Parallel Inverter System

Ji-Seok Shin, Pooreum Jang, Dongmyoung Joo,
Jin-Hong Kim, Joon Sung Park, Jun-Hyuk Choi

Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

대용량 모터 구동을 위해서 인버터를 병렬 형태로 시스템을 구성하여 많이 사용한다. 전압형 인버터의 동작 특성으로 인해 각 인버터에는 출력 인덕터를 장착하여 각 인버터간의 전압차로 인한 문제를 해결한다. 출력 인덕터 사용시 효과적으로 인버터 병렬 시스템 구성을 가능케 하지만 각 인버터 스위칭 특성 차이로 인해 스택간의 순환전류를 야기할 수 있으며 이를 해결하기 위해서는 추가적인 제어 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 결합 인덕터(coupled inductors)를 사용하여 각 인버터간의 순환전류를 최소화 시킬 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 방법의 효용성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

전력반도체의 전류, 전압의 사양 제한으로 인해 대용량 모터 구동을 위해서는 흔히 각 인버터를 병렬로 연결하여 시스템을 구성한다. 이러한 병렬 인버터 시스템은 각 인버터에 출력 인덕터를 체결하여 시스템 용량 확장을 손쉽게 할 수 있는 장점을 지닌다. 하나 각 스택의 기생 성분 차이 및 스위칭 특성의 차이로 인해 각 인버터 스택간의 순환전류를 야기할 수 있으며 고속 모터 구동시 인덕터에 걸리는 전압으로 인해 전압 마진을 감소시키는 단점을 지닌다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 순환전류를 제한하는 추가적인 제어를 구성하거나 과변조와 같은 알고리즘이 필요하다.^[3]

2. 병렬 인버터 시스템

2.1 일반적인 병렬 인버터 시스템

그림 1 (a)는 일반적인 2레벨, 3상 인버터 구성을 보여준다. 3상 인버터는 6개의 전력반도체와 DC 링크 커패시터로 구성되어 있으며 이를 구동하기 위한 게이트드라이버 및 제어보드로 구성된다. 3상 인버터의 병렬 구성을 위해서는 그림 1 (b)와 같이 출력 인덕터를 이용하여 구성하는 것이 일반적이며 이는 VSI 특성으로 인해 각 인버터간 과전류 및 전압 스파이크로 인해 전력반도체 소손을 막는 효과적인 방법이다. 하나 이러한 구성은 각 인버터간의 기생성분과 같은 특성 차이로 인해 순환전류를 야기시키며 이를 위해서 추가적인 알고리즘이 필요하다.^[1]

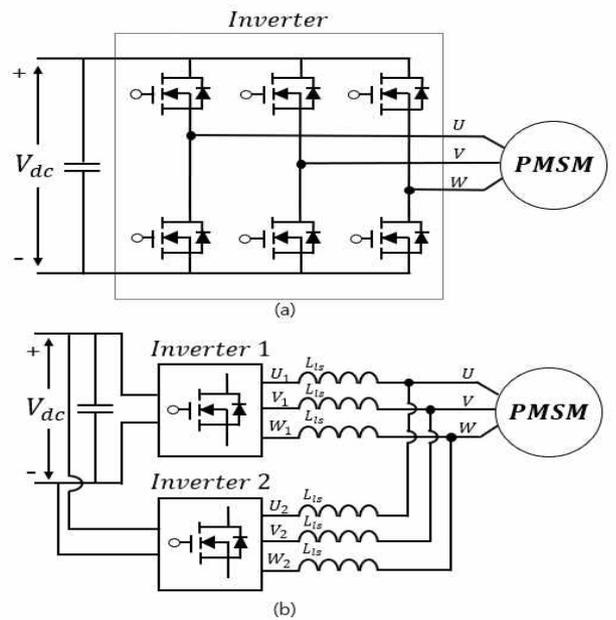


그림 1 (a) 3상 인버터 구성, (b) 출력인덕터 기반 병렬 인버터 시스템
Fig. 1 (a) 3-phase inverter configuration, (b) output inductor-based parallel inverter system

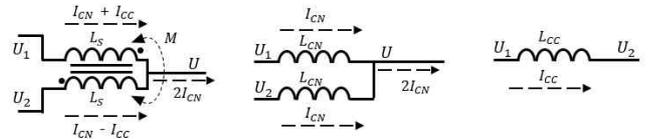


그림 2 결합 인덕터의 차동/공통 전류에 따른 인덕턴스 변화
Fig. 2 Inductance change with differential/common current of coupled inductor

2.2 결합 인덕터를 이용한 병렬 인버터 시스템

2.2.1 차동/공통 전류에 따른 인덕턴스 변화

순환전류 및 전압 마진 감소의 단점을 해결하기 위한 결합 인덕터를 이용한 병렬 인버터 시스템을 제안한다. 그림 2는 결합 인덕터의 차동, 공통 전류에 따른 인덕턴스 차이를 보여준다. 각 인버터의 공통 전류 성분에 대해서는 결합 인덕터의 누설 인덕턴스 성분만이 보이게 되므로 인덕터에 걸리는 전압이 최소화되게 된다. 반대로 두 인버터간의 전류차, 즉 순환 전류

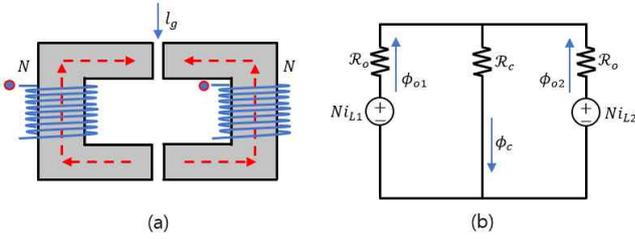


그림 3 (a) 결합인덕터 결선 및 자속, (b) 등가 자기회로
 Fig. 3 (a) Coupled inductor connection and magnetic flux, (b) Equivalent magnetic circuit

표 1 유도모터 파라미터

Table 1 Parameter of induction motor

항목	값	단위
dc-link 전압, Vdc	1400	V
고정자 저항, Rs	0.00721	Ω
D축 인덕턴스, Ld	80.0	μH
Q축 인덕턴스, Lq	130.0	μH
BEMF 계수, ψ	0.1519	-
자기 인덕턴스, Ls	93	μH
상호 인덕턴스, Lm	80	μH

에 대해서는 두 개의 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스의 2배 만큼의 인덕턴스가 보이게 된다. 이는 수식으로 아래와 같이 표현된다.

$$L_{CN} = L_S - M, \quad L_{CC} = 2L_S + 2M \quad (1)$$

따라서 차동 전류에 대해서 인덕턴스에 대해 더 큰 인덕턴스가 보이기 때문에 단일 출력 인덕터를 사용했을 때에 비해 각 인버터 사이의 순환전류를 최소화 할 수 있다.^[2]

2.2.2 릴럭턴스 기반 결합인덕터 설계

결합 인덕터 설계를 위해서는 릴럭턴스 기반의 등가회로로 해석하여 설계한다. 결합 인덕터의 등가회로를 그림 3에서 보여준다. i_{L1}, i_{L2} 는 각 인버터의 전류를 의미하며 N 은 턴수를 의미한다. 각 릴럭턴스 성분은 아래의 수식 기반으로 계산하며 이를 기반으로 인덕턴스를 설계한다.

$$R_o = \frac{l_g}{\mu_0 A_{eo}}, \quad R_c = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} \quad (2)$$

$$L_s = \frac{N^2}{R_o + R_o \parallel R_c}, \quad M = \frac{N^2 R_c}{(R_o + R_c)(R_o + R_o \parallel R_c)} \quad (3)$$

3. 실험 결과

표 1은 시뮬레이션에 사용된 모터의 파라미터를 보여준다. 시뮬레이션은 PSIM으로 진행하였으며 DC링크 입력전압으로 1,400V가 사용되었다. 그림 4 (a)는 출력 인덕터를 이용했을 때의 각 인버터의 전류 및 인덕터의 전압 파형을 보여준다. 각 인버터는 전류 리플 감소를 위해 PWM을 인터리빙하며 이때 각 인버터의 스위치 시간 차이로 인해 순환전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 반대로 그림 4 (b)는 결합 인덕터를 이용했을 때의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각 인버터의 차동 전류에는 더 큰 인덕턴스가 보이기 때문에 임피던스가 커져 순환 전류가 효과적을 억제 할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

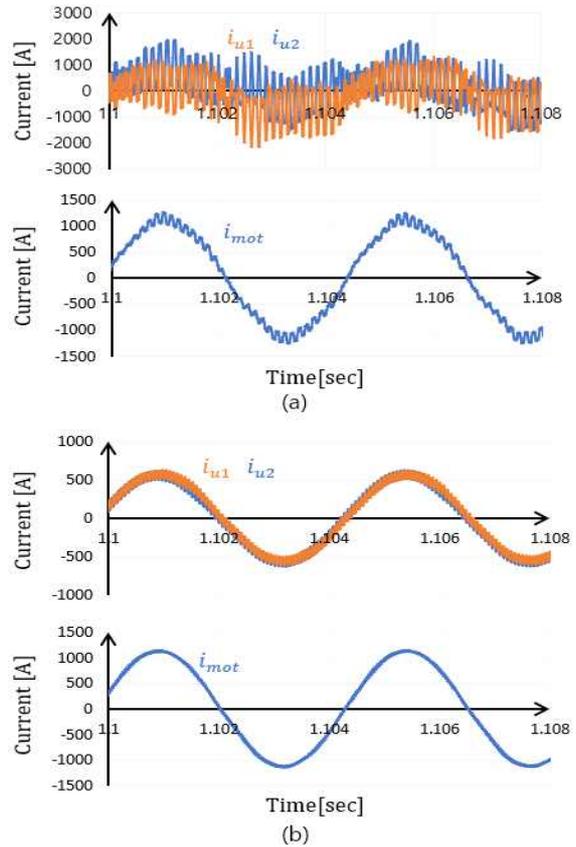


그림 4 병렬 인버터 시뮬레이션 전류 파형 (a) 출력 인덕터, (b) 결합 인덕터
 Fig. 4 Parallel inverter simulation current waveforms (a) output inductor, (b) coupled inductor

4. 결론

본 논문에서는 순환 전류 감소를 위해 결합 인덕터를 사용하여 병렬 인버터 시스템을 구성하였다. 자기회로 기반의 해석을 통해 결합 인덕터를 설계하였으며 이를 통해 각 인버터의 차동 전류에는 큰 인덕턴스가 보여 인버터의 순환전류를 하드웨어적으로 방지하는 방법을 제안하였다. 기존 출력 인덕터와 결합 인덕터를 사용할때의 순환전류 및 전류 리플 차이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (20024464, 600kW급 모터 다이내모용 인버터 기술 개발)

참고 문헌

- [1] NARIYA, Drashti; PANDA, Ashish Kumar; TRIPATHI, Avansh. Parallel Converter Fed High-Performance PMSM Drive with Reduced Circulating Current Meant for High-Speed Applications. In: 2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON). IEEE, 2022. p. 1-6.
- [2] LIANG, Dong; SHIN, Hwi-Beom. Coupled inductor design method for 2-phase interleaved boost converters. Journal of Power Electronics, 2019, 19:2: 344-352.
- [3] 홍석민, 홍성용, 김동균, 이재범, 김백. (2022-07-05). 다상 인터리빙 부스트 컨버터의 효율 향상을 위한 커플드인덕터 설계방안. 전력전자학회 학술대회 논문집, 경북.