

대용량 인버터 병렬 운전에 관한 연구

조운관, 임정식, 설승기
서울대학교

Parallel operation of PWM inverters for high power and high speed motor drive system

Un-kwan Cho, Jung-sik Yim, Seung-ki Sul
Seoul National University / Power electronics laboratory

ABSTRACT

최근 초고속 압축기와 같은 다양한 분야에서 대용량 초고속 모터 드라이브 시스템이 많이 사용되고 있다^{[1],[2]}. 이러한 시스템에 사용되는 초고속 전동기는 정격 회전 속도가 수만 r/min에 이르며, 작은 인덕턴스 값을 가지는 것이 특징이다. 따라서 초고속 전동기의 고정자(Stator)에는 큰 맥동(ripple) 성분을 가지는 전류가 흐르게 되며, 이로 인해 발열, 손실등의 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서는 결합(coupled inductor)를 이용하여 대용량 인버터를 병렬 운전하는 방법을 제안하고, 이를 통해 초고속 전동기의 고정자에 흐르는 전류 맥동의 크기를 감소시키고자 한다. 제안된 방법은 실험을 통해 그 타당성을 검증한다.

1. 서론

초고속 압축기, 펌프등의 응용분야에서 에너지 변환 효율을 높이고 유지·보수 비용을 줄이기 위해 전동기의 회전축에 임펠러(impeller)를 직접 연결하는 직결형(direct coupling) 구조로 시스템을 설계하는 경우가 많다^[3]. 이와 같은 시스템의 경우 용량이 수만 MW, 정격 속도는 수만 r/min으로 구동하기 때문에 인버터의 운전 주파수는 수 kHz에 이르게 된다. 그러나 대용량 인버터의 스위칭 주파수가 제한되어 있기 때문에 병렬 운전이 반드시 필요하게 된다.

초고속 전동기의 경우 상 인덕턴스(L_s)가 기존의 저속 모터의 상 인덕턴스에 비해 매우 작기 때문에 PWM(Pulse width Modulation)에 의한 전류 맥동이 커지게 되고 이로 인해 철손이 기존의 저속 전동기에 비해 커지는 문제점이 존재한다. 그리고 철손의 경우 속도뿐만 아니라 대용량 인버터의 제한된 스위칭 주파수로 인해 그 영향이 더욱더 커지게 된다. 이와 같이 철손을 야기하는 전류 맥동 성분은 줄어들면서 모터 드라이브 시스템의 용량을 증가시킬 수 있는 새로운 PWM 인버터 병렬 운전 기법을 제안한다. 제안된 병렬 운전 방법의 출력 전압을 수식을 이용하여 분석한 후, 실험 결과를 통해 제안된 방법의 유효성을 검증한다.

2. 제안된 병렬 운전 방법

2.1 전체 시스템의 구성

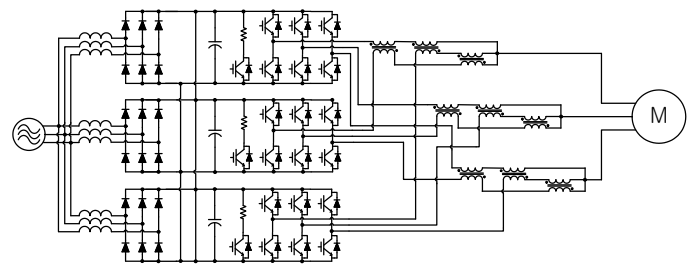


그림 1 제안된 병렬 운전 방법의 회로도

그림 1은 제안된 병렬 운전 방법의 회로도를 나타낸 것이다. 전체 시스템의 구성은 3개의 PWM 인버터의 출력단이 9개의 결합 인덕터와 연결되어 있으며, PWM 인버터는 스위칭에 의한 전류 맥동을 줄이고자 인터리빙 운전을 하게 된다. 인버터의 출력측에 연결되어 있는 결합 인덕터는 각 인버터의 출력 전류가 모터쪽으로 흐르게 될 경우 누설 인덕턴스로만 작용을 하여 인덕터에 의한 전압 강하를 최소화 하는 동시에 인터리빙 운전으로 인한 인버터간 순시적인 전압차이로 인해 생성되는 순환 전류에 대해서는 자기 인덕턴스(self inductance)와 상호 인덕턴스(mutual inductance)의 합으로 작용을 하여 최소화 하고자 한다.

2.1 전압 방정식을 이용한 출력 전압의 분석

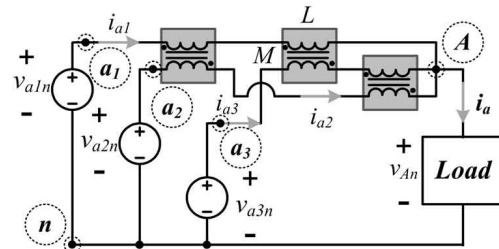


그림 2 등가회로

그림 2는 제안된 병렬 운전 방법의 등가회로를 나타낸 것이다. v_{a1n} , v_{a2n} , v_{a3n} 은 각 인버터의 극 전압을 나타내고 v_{An} 은 부하측의 극 전압을 나타낸다. i_{a1} , i_{a2} , i_{a3} 은 각 인버터의 출력 전류, i_a 는 부하측 전류를 나타내며, 각 극 전압과 출력 전류는

다음과 같은 관계식을 진다.

$$v_{a1n} - v_{An} = 2L \frac{di_{a1}}{dt} - M \frac{di_{a2}}{dt} - M \frac{di_{a3}}{dt} \quad (1)$$

$$v_{a2n} - v_{An} = 2L \frac{di_{a2}}{dt} - M \frac{di_{a1}}{dt} - M \frac{di_{a3}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{a3n} - v_{An} = 2L \frac{di_{a3}}{dt} - M \frac{di_{a1}}{dt} - M \frac{di_{a2}}{dt} \quad (3)$$

위의 식에서 L과 M은 각각 결합 인덕터의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 의미한다. 전압 및 전류가 기본파 성분과 PWM에 의한 맥동 성분 두 가지로 구성되어 있다고 가정한다면 식(1)-(3)은 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{v}_{a1n} + \tilde{v}_{a1n} - (\bar{v}_{An} + \tilde{v}_{An}) \\ = 2L \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a1} + \tilde{i}_{a1}) - M \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a2} + \tilde{i}_{a2}) - M (\tilde{i}_{a3} + \tilde{i}_{a3}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{a2n} + \tilde{v}_{a2n} - (\bar{v}_{An} + \tilde{v}_{An}) \\ = 2L \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a2} + \tilde{i}_{a2}) - M \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a1} + \tilde{i}_{a1}) - M (\tilde{i}_{a3} + \tilde{i}_{a3}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{a3n} + \tilde{v}_{a3n} - (\bar{v}_{An} + \tilde{v}_{An}) \\ = 2L \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a3} + \tilde{i}_{a3}) - M \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a1} + \tilde{i}_{a1}) - M (\tilde{i}_{a2} + \tilde{i}_{a2}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\bar{v}_{a1n}, \bar{v}_{a2n}, \bar{v}_{a3n}, \bar{v}_{An}, \tilde{i}_{a1n}, \tilde{i}_{a2n}, \tilde{i}_{a3n}$ 은 기본파 성분을 $\tilde{v}_{a1n}, \tilde{v}_{a2n}, \tilde{v}_{a3n}, \tilde{v}_{An}, \tilde{i}_{a1n}, \tilde{i}_{a2n}, \tilde{i}_{a3n}$ 은 PWM에 의한 맥동 성분을 나타낸다. 세 인버터가 같은 전압 지령을 가진다면 $\bar{v}_{a1n} = \bar{v}_{a2n} = \bar{v}_{a3n}, \tilde{i}_{a1} = \tilde{i}_{a2} = \tilde{i}_{a3} = \frac{1}{3} \tilde{i}_a$ 와 같이 가정할 수 있고, 식(4)-(6)을 이용하여 \tilde{i}_a 와 \bar{v}_{a1n} 와의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\bar{v}_{a1n} - \bar{v}_{An} = \frac{2}{3} (L - M) \frac{d\tilde{i}_a}{dt} \quad (7)$$

만약 결합 인덕터의 누설 인덕턴스(leakage inductance, L-M)가 매우 작다고 가정한다면 식(7)에 의해 결합 인덕터에서 기본파 성분에 의한 전압 강하는 무시할 수 있다.

전류 맥동 성분을 야기하는 극 전압의 맥동 성분은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\tilde{v}_{a1n} + \tilde{v}_{a2n} + \tilde{v}_{a3n}}{3} \approx \tilde{v}_{An} \quad (8)$$

식 (8)로부터 인터리빙 운전으로 인해 PWM에 의한 전류 리플 성분이 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 각 인버터간 출력전압의 순시적인 차이가 발생하고, 이로 인해 순환 전류가 생성된다. 순환 전류는 다음과 같은 관계식을 가지게 된다.

$$\tilde{v}_{a1n} - \tilde{v}_{a2n} = (2L + M) \frac{d}{dt} (\tilde{i}_{a1} - \tilde{i}_{a2}) \quad (9)$$

즉 식 (9)에 의해 순환 전류는 결합 인덕터에 의해 제한될 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 병렬 운전 기법을 사용하여 실험을 하기 위해 먼저 결합 인덕터를 분말 자성코어와 리즈 와이어를 이용하여 제작하였다. 제작 설계 목표치를 57μH로 선정 후 그림 3과 같이 직접 제작하였고, RLC 미터를 이용하여 제정수를 측정하였다.

자기 인덕턴스의 경우 설계치와 거의 유사한 56 μH라는 값



상대 투자율	125
턴 수	12
자기 인덕턴스	56.0 μH
상호 인덕턴스	55.5 μH

그림 3 제작된 결합 인덕터와 제정수

을 얻을 수 있었고, 누설 인덕턴스는 자기 인덕턴스의 1% 미만의 값을 얻을 수 있었다. 이와 같이 제작된 결합 인덕터를 이용해 프로토타입 인버터를 제작하였고 표 1과 같은 조건하에서 유도 전동기를 구동하였다.

표 1 실험 조건(a) 및 모터 제정수(b)

(a) 실험 조건		(b) 모터 제정수	
입력 선간 전압	220 V	정격 출력	22 kW
입력 인덕턴스	1.5 mH	정격 속도	1765 r/min
운전 속도	1,000 r/min	정격 전류	74.6 A
스위칭 주파수	10 kHz	극 수	4
샘플링 주파수	20 kHz	R _s	0.044
출력 파워	3 kW	L _σ	500 μH

(a)

(b)

하나의 인버터를 이용하여 구동하였을 경우 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있었고, 제안된 방법을 이용하여 구동하였을 경우 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그 결과 하나의 인버터를 사용하였을 경우 보다 제안된 방법으로 구동하였을 경우 PWM에 의한 전류 리플 성분이 현저히 감소함을 알 수 있다.

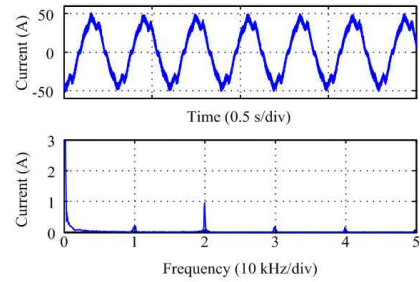


그림 3 하나의 인버터로 구동할 시

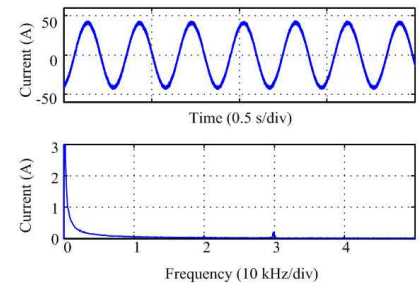


그림 4 제안된 방법으로 운전할 시

그림 5는 모터의 상전류(i_a)와 각 인버터의 출력 전류(i_{a1} ,

i_{a2} , i_{a3})를 나타낸 것이고, 그림 6은 그림 5의 확대파형이다.

각각의 인버터의 출력 전류는 반송파의 1/3씩 시프트된 인터리빙 운전으로 전류가 출력되고 있음을 알 수 있다.

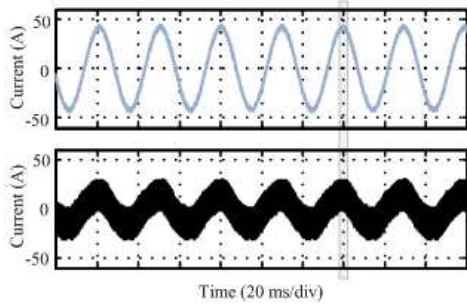


그림 5 제안된 방법으로 구동시 모터 상전류 파형과 각 인버터 출력 전류 파형

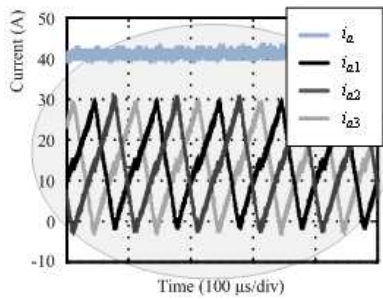


그림 6 그림5의 확대 파형

결합 인덕터에서 발생하는 전압 강하를 측정하기 위해 하나의 인버터를 사용하여 유도전동기의 제정수 L_{σ} 를 측정하였을 때와 제안된 방법을 이용하여 측정할 경우를 비교해 보았다. 인버터의 출력 측에 구형파 전압을 인가하였을 때 전류의 증가량의 기울기를 측정하였고 결과는 표 2와 같다. 제안된 방법으로 구동하였을 경우 하나의 인버터로 구동하였을 경우와 거의 같은 크기의 인덕턴스 값을 얻을 수 있었고, 이는 결합 인덕터에서의 전압 강하는 무시할 정도로 작음을 의미한다.

표 2 모터 인덕턴스 측정결과

	하나의 인버터로 구동시	제안된 방법으로 구동시
Δt	23.354 μs	23.377 μs
Δi	9.07 A	8.97 A
L_{σ}	534 μH	541 μH

제안한 방법의 병렬 운전 방법의 회로도에서 직류단 캐패시터를 서로 연결한 선은 인터리빙 운전으로 생성되는 순환 전류의 경로를 생성해 준 것이며, 이 선에 흐르는 순환 전류는 그림 7과 같다. 전압 방정식을 통해 얻은 순환 전류에 관한 식을 이용하여 계산해 보면 다음과 같은 값을 가진다.

$$i_{cir} = \frac{V_{dc}}{2\pi f_{sw} (2L + M)} \approx 31.1 [A] \quad (10)$$

실제 측정된 전류의 크기와 일치함을 알 수 있고 이는 순환 전류의 크기는 전압 방정식을 통해 예측할 수 있고 결합 인덕터의 인덕턴스 값을 이용하여 제한이 가능함을

의미한다.

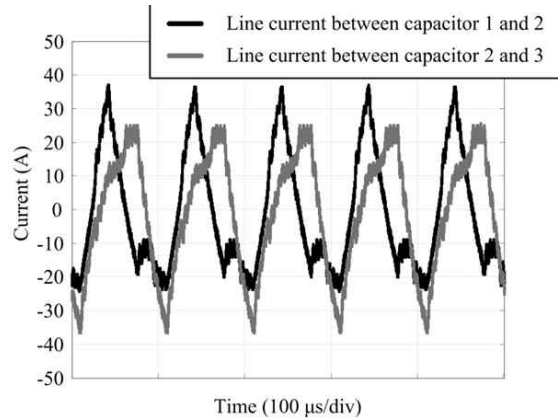


그림 7 순환 전류

4. 결론

본 논문에서는 PWM에 의한 전류 맥동을 줄이기 위해 결합 인덕터를 이용한 인버터 병렬 운전 방법을 제안하였고, 실제 프로토타입 인버터를 제작하여 실험을 수행하였다. 전압 방정식을 통한 분석과 같이 인덕터에서의 전압 강하없이 PWM에 의한 전류 맥동 성분을 줄일 수 있음을 실험을 통해 입증하였다. 또한 인터리빙 운전으로 생성되는 순환전류는 전압 방정식을 통해 예상가능하며, 결합 인덕터의 인덕턴스 값을 조절하여 제한이 가능함을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] W. L. Soong et al., "Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor," *IEEE Transactions on Industry Application*, May/June. 2000.
- [2] M. Mekhiche, J. L. Kirtley, M. Tolikas, E. Ognibene, J. Kiley, E. Holmanský, and F. Nimblett, "High speed motor drive development for industrial applications," in *Conf Rec. IEMD'99*, 1999
- [3] Bon-Ho Bae et al., "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High-Speed PMSM of Turbo-Compressor," *IEEE Transactions on Industry Application*, May/June 2003.
- [4] Chen Liangliang, Xiao Lan, Hu Wenbin, Yan Yangguang, "Application of coupled inductors in parallel inverter system." *Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference