

Modular Scalable Inverter System에서 캐리어 비동기시 고주파 전압 보상을 이용한 순환전류 저감기법

최승연, 강신원, 임준혁, 김래영
한양대학교

Circulating Current Reduction Using High Frequency Voltage Compensation in Carrier Asynchronous for Modular Scalable Inverter System

Seung-Yeon Choi, Shin -Won Kang, Jun-Huk Im, Rae-Yong Kim
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 Modular Scalable Inverter System(MSIS)에서 두 인버터 간에 캐리어 위상차로 인해 순환전류가 발생할 시 고주파 전압 보상을 이용한 순환전류 저감기법을 제안한다. MSIS는 인버터를 병렬로 구성하여 전력용량을 증가시키고 필요에 따라 선택적으로 사용하여 효율을 높인다. 하지만 병렬 인버터 구조에서는 필연적으로 순환전류가 발생하여 고주파 전압 보상을 이용하여 두 인버터가 동일한 스위칭 패턴을 출력하게 하여 주파수 성분의 순환전류를 저감한다. 제안한 방법의 유효성은 600W IPMSM를 부하로 한 MSIS 축소 모델에서 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

MSIS는 여러 대의 인버터 모듈을 병렬로 구성한 시스템으로써 필요한 부하에 따라 인버터를 선택적으로 사용할 수 있는 시스템이다. 이 시스템은 대용량 모터 드라이브나 무정전 전원공급장치, 재생 에너지 시스템 등에서 널리 사용되고 있다. 수요가 적은 대용량 인버터를 생산하는 것보다 작은 용량의 인버터를 대량 생산하여 필요한 정격만큼 병렬로 연결해서 사용하는 것은 경제적인 측면에서 장점이 있다. 또한 병렬로 구성되어 있는 인버터 시스템은 한대가 고장이 나더라도 나머지의 인버터를 통해 부하를 구동을 할 수가 있기 때문에 신뢰도가 높다. 그러나 병렬로 모듈을 구성하게 되면 순환전류가 발생하는 단점이 있다. 순환전류는 스위치에 스트레스를 증가 시키며, 전류 제어 성능에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 부하분담을 어렵게 한다.

따라서 순환전류를 저감시키기 위해 여러 방법들이 연구되었다^{[1]-[6]}. 순환전류를 저감시키는 방법들은 하드웨어적인 방법과 제어를 통해 저감시키는 방법으로 두 가지로 분류할 수 있다. 하드웨어적인 방법은 참고문헌^[1]과 같이 각 인버터와 부하부를 절연시켜 주는 변압기를 삽입하는 방법과 참고문헌^[2]와 같이 높은 임피던스의

인덕터를 추가하는 방법 등이 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 시스템의 부피와 비용을 증가시키는 단점이 있다. 또한 인덕터를 사용하는 방법은 인덕터에 높은 전압이 인가됨에 따라 부하단에서 이용할 수 있는 전압이 떨어지고 이에 따라 정격이 낮아지는 단점이 있다.

하드웨어적인 방법과 더불어 순환전류 제어를 이용해 순환전류를 저감시키는 방법들도 활발히 연구되고 있다^{[3]-[4]}. 이러한 방법들은 저주파 성분의 순환전류를 효과적으로 저감할 수 있지만 고주파 순환전류를 저감시키지는 못한다. 고주파 성분의 순환전류를 저감하기 위해서 여러 방법들 또한 제시되어 왔다^{[5]-[6]}. 고주파수 성분의 순환전류는 두 개의 독립된 Microcontroller를 사용하여 각각의 모듈을 제어하는 경우, 캐리어 위상차에 의해서 발생한다. 참고문헌^[5]는 각 모듈에서 캐리어의 위상 정보를 수집하여, 마스터 모듈의 캐리어 위상과 비교한 후에 슬레이브 모듈의 캐리어 위상을 조절시켜 줌으로써 모든 모듈의 캐리어 위상을 동기화 시키는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 동기화를 위한 통신이 추가적으로 필요하다는 단점이 있다. 참고문헌^[6]은 순환전류의 리플을 이용하여 캐리어의 위상차를 추정한 후에 슬레이브 모듈의 캐리어의 주파수를 조절하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 시스템의 성능이 순환전류 리플 한계치에 영향을 많이 받으며 한계치의 기준을 설정하기 어렵다. 또한 슬레이브 모듈의 스위칭 주파수가 일정하지 않으며, 제정수 오차에 민감하다.

본 논문에서는 이러한 단점들을 극복하기 위해 고주파 전압 보상을 이용한 순환전류 저감기법을 제안한다. 제안한 방법은 고주파 전압보상을 통해 두 인버터의 스위칭 패턴을 일치 시켜 순환전류를 효과적으로 저감시킬 수 있다. 이 방법은 순환전류 저감을 위한 별도의 통신을 요구하지 않고, 캐리어의 주파수 가변 없이 고주파 성분의 순환전류를 저감할 수 있다는 장점이 있다. 제안한 방법의 유효성은 600W IPMSM를 부하로 한 MSIS 축소 모델에서 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 고주파 전압 보상을 통한 순환전류 저감기법

2.1 절 MSIS의 구성

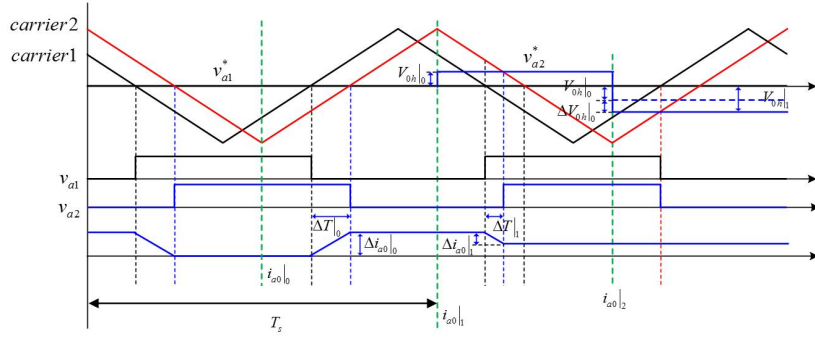


그림1 보상 지령의 보정을 통한 스위칭 패턴 동기화

MSIS는 하나의 DC-link 단을 공유하여 병렬로 인버터를 구성한다. 각각의 인버터 출력단에는 순환전류를 저감하기 위한 결함 인덕터를 추가한다. 추가된 인덕터로 인해 부하에서 가용할 수 있는 전압이 감소하여 전압 정격이 낮아지기 때문에 적절한 값의 선정이 필요하다

2.2 절 순환전류 발생과 전압보상 기법

2.2.1 절 순환전류 발생

각각의 독립된 DSP를 사용하여 각 인버터를 제어하게 될 때, 시스템 클럭의 차이 혹은 DSP내부 요인으로 인해 DSP의 캐리어 간에 위상차가 발생하게 되고, 그에 따라 두 모듈 간의 극전압 차로 인한 스위칭 주파수 성분의 순환전류가 생긴다. 그림 1에서 첫번째 반주기를 통해 스위칭 주파수 성분의 순환전류 리플과 위상차와의 관계를 분석할 수 있다. ΔT 는 스위칭 패턴간의 차이이고, Δi_{a0} 는 그에 따라 나타나는 고주파수 성분의 순환전류 변동분이다. 모듈 2를 기준으로 하였을 때, 두개의 직렬로 연결된 결함 인덕터에 V_{dc} 의 전압이 인가되고 이에 따라 순환전류의 변화가 생긴다. 인덕터 전압 방정식을 통해 a상의 순환전류 변동분은 식 (1)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{dc} = 2L \frac{di_{a0}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{di_{a0}}{dt} = \frac{V_{dc}}{2L}$$

b상과 c상에서도 동일한 방식으로 순환전류 변동분을 식 (5)와 (6)과 같이 각각 유도할 수 있다.

$$V_{dc} = 2L \frac{di_{b0}}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{di_{b0}}{dt} = \frac{V_{dc}}{2L}$$

$$V_{dc} = 2L \frac{di_{c0}}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{di_{c0}}{dt} = \frac{V_{dc}}{2L}$$

2.2.2 절 고주파 전압보상을 이용한 순환전류 저감기법

그림 2는 제어 블록도이다. 마스터의 속도 제어기에서 나온 전류 지령을 슬레이브에 통신을 이용하여 전송하여

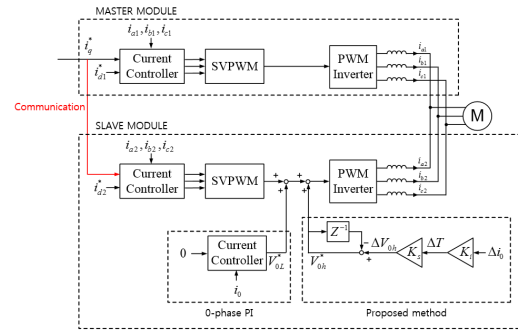


그림2 제어 블록도

부하분담을 한다. 순환전류 제어부는 슬레이브에서 동작을 하며, 슬레이브의 전류를 센싱하여 제어를 한다.

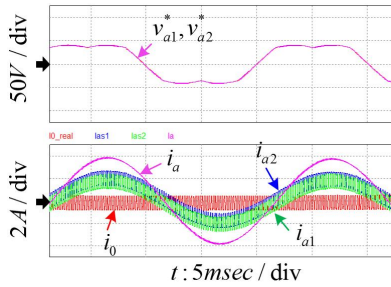
기본파 및 저주파수의 순환전류는 기존의 영상분 PI제어를 통하여 저감을 시킨다. 이에 따라 스위칭 주파수 성분의 순환전류만 남게 된다. 제안한 고주파 순환전류 제어기는 스위칭 주파수 성분의 순환전류 리플을 통해 전압지령에 얼마나 보상을 해주어야 하는지를 계산한다. 그림 2에서 스위칭 주파수 성분의 전류 변화를 측정한다. 그리고 그 차를 통해 스위칭 리플을 계산한다. $i_{a0|0}$ 가 측정 되는 시점에 보상을 시작하면 $i_{a0|1}$ 과 $i_{a0|0}$ 의 차이 Δi_{a0} 에 의해 위상차인 ΔT_0 를 계산한다.

$$\Delta T_0 = \frac{2L}{V_{dc}} \Delta i_{a0} \quad (4)$$

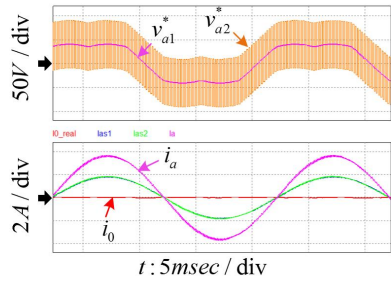
위상차에 캐리어의 기율기인 $\frac{2V_{dc}}{T_s}$ 를 곱하여 보상하는 값인 V_{0h_h} 를 계산한다.

$$V_{0h_h} = \frac{2V_{dc}}{T_s} \cdot \Delta T_0 \quad (5)$$

보상한 후에도 파라미터 및 센싱 오차로 인해 순환전류 리플 Δi_{a1} 이 남아 있을 경우, 남은 리플에 식(4)의 상수를 곱해 스위칭 패턴의 차이 ΔT_1 을 계산한다. 그리고 이 ΔT_1 에 캐리어의 기율기를 곱해주면 추가적으로 보상해야 할 ΔV_{0h_h} 를 얻을 수 있다. 따라서 다음 반주기에는 기존의 V_{0h_h} 와 ΔV_{0h_h} 를 더해서 보상을 해준다. 이전 반주기의 전압지령에 계산한 값을 더해줌으로써 스위칭 패턴이 맞춰지는 것은 다음 그림에서 알 수 있다.



(a)



(b)

그림3 모듈1, 2의 전압지령 및 전류 파형 (a)보상 전 (b) 보상 후

이것을 수식적으로 표현을 하면 다음과 같다.

$$V_{0n}[n] = -V_{0n}[n-1] + \frac{2V_{dc}}{T_s} \cdot \frac{V_{dc}}{2L} \cdot \Delta i[n-1] \quad (6)$$

이렇게 전압지령을 보상해줌으로써 스위칭 패턴을 맞춰 줄 수 있고 이를 통해 두 인버터 간의 각 상의 전압을 동일해진다. 그러므로 순환전류 리플이 발생하지 않는다. 이 방법은 위상차가 나더라도 캐리어 조정 없이 순환전류를 저감할 수 있다.

2.3 질 시뮬레이션

이전 섹션에서 논의한 것을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 부하는 600W급 IPMSM를 이용하였으며 임의로 캐리어 위상차를 주었다. 파라미터는 다음과 같다.

Parameter	Value	Unit
Rated power	600	W
Rated torque	1.6	Nm
Pole pairs	3	-
Stator resistance	1.65	Ω
d-axis inductance	11.5	mH
q-axis inductance	20	mH
Rotor magnet flux linkage	0.109	Wb
PWM switching frequency	5	kHz
DC-link voltage	310	V
Interphase inductor inductance	2	mH

그림 3는 정격 부하인 1.6Nm에서 1000rpm으로 동작할 때의 상황이다. 그림 3(a)는 제안한 알고리즘을 적용하기 전으로 캐리어 위상차에 의해 고주파수의 순환전류가 발생하고 있는 상황이다. 그림 3(b)는 제안한 방식을 통해 지령을 보상하여 순환전류를 저감한 상황을 나타낸다. 이때 각 모듈은 전류를 동일하게 분담하게 된다.

3. 결론

본 논문에서는 두 개의 DSP간의 위상차에 의한 순환전류를 줄이기 위한 병렬 운전 기법을 제안하였다. 여러대의 인버터를 MSIS로 구성하면 신뢰성이 높아지고 용량을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 이때 모듈 내부를 흐르는 순환전류가 발생한다. 이 순환전류에서 캐리어 간 위상차에 의해 발생하는 고주파수 성분은 전압 지령을 보상하여 스위칭 패턴을 맞춰줌으로써 저감시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안한 저감기법을 검증하였다.

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164010200860)

참고 문헌

- [1] J. W. Dixon and B. T. Ooi, "Series and parallel operation of hysteresis current-controlled PWM rectifiers," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 25, pp. 644-651, July/Aug. 1989.
- [2] D. Shin, J. P. Lee, D.-W. Yoo, H.-J. Kim, "Stability improvement of interleaved voltage source inverters employing coupled inductors for grid-connected applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 10, pp. 6014-6023, Oct. 2015.
- [3] K. Shukla, M. Varun, R. Maheshwari, "A novel carrier-based hybrid PWM technique for minimization of line current ripple in two parallel interleaved two-level VSIs", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, pp. 1908-1918, Aug. 2017.
- [4] S. Ogasawara, J. Takagaki, H. Akagi, "A novel control scheme of a parallel current-controlled PWM inverted", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, pp. 1023-1027, Sept./Oct. 1992.
- [5] M. Hua, H. Hu, Y. Xing, Z. He, QIN Xinxin, "Distributed control for AC-motor-drive-inverters in parallel operation", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 12, pp. 5361-5370, Dec. 2011.
- [6] Weidong Jiang, Yan Gao, Benxian Xiao, et al, "Suppression of High-Frequency Circulating Current Caused by Asynchronous Carriers for Parallel Three-Phase Grid-Connected Converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.65, pp.1031-1040, 2018.