

2상 유도전동기의 벡터제어를 위한 저가형 전류측정 방법

오광호¹, 윤덕용^{1*}

¹공주대학교 대학원 전기전자제어공학과

Low-Cost Current Measurement Method for Vector Control of 2-Phase Induction Motor

Kwang-Ho Oh¹, Duck-Yong Yoon^{1*}

¹Department of Electrical, Electronic and Control Engineering,
Graduate School of Kongju National University

요약 2상 유도전동기의 벡터제어를 위해서는 전동기로 입력되는 상전류를 실시간으로 측정해야 한다. 일반적으로 전동기의 상전류는 인버터의 출력단에 2개의 홀전류센서를 삽입하여 측정한다. 그러나, 홀전류센서는 가격이 비싸고, 2상 유도전동기용 벡터제어 인버터는 주로 시스템의 가격이 낮은 저전력 응용분야를 대상으로 연구가 진행되고 있으므로 홀전류센서를 사용하는 것은 경제성 측면에서 부적합하다. 따라서, 본 논문에서는 인버터의 출력단에 고가의 홀전류센서 대신 셉트저항을 삽입하고, 이것의 양단 전압을 차동 증폭기로 증폭하여 모든 운전영역에서 정밀하게 상전류를 측정하는 방법을 제안한다. 이를 220[V]/360[W]급의 2상 유도전동기 벡터제어 인버터에 적용하였으며, 제안된 방법의 유효성은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

Abstract Phase currents should be measured in real time for vector control of a 2-phase induction motor. Generally, the phase currents of the motor are measured using two Hall current sensors installed at the output terminal of an inverter. Unfortunately, Hall current sensors are expensive and uneconomical because a vector-controlled inverter for 2-phase induction motor is mainly used in low-power and low-price applications. This paper proposes a low-cost current measurement method using two shunt resistors instead of expensive Hall current sensors. The proposed method can measure the phase currents under all operating conditions of the motor. This method was applied to an experimental vector-controlled inverter for 2-phase induction motor of 220[V]/360[W] and was verified through computer simulations and experimentation.

Key Words : Current Measurement, Shunt Resistor, 2-Phase Induction Motor, Vector Control

1. 서론

전력전자 및 전동기 제어기술이 발전함에 따라 가변속 구동을 필요로 하는 전동기 응용분야에서는 여러 가지 기술적인 이유로 대부분 3상 유도전동기(3PIM ; 3-Phase Induction Motor)를 사용해 왔다. 그러나, 현실적으로 3상 전원을 사용하기 어려운 가전제품과 같은 저전력 응용분야에서는 이보다 가격이 저렴한 단상 유도전

동기(SPIM ; Single-Phase Induction Motor)를 널리 사용하고 있다. 그러나, 최근에는 가전제품의 고급화 및 고효율화 추세에 따라 여기에서도 전동기의 고성능 가변속 제어가 요구되고 있다. 하지만, SPIM의 경우에는 전통적으로 정속제어에 주로 사용되어 왔고, 주권선과 보조권선의 불평형으로 인하여 벡터제어가 용이하지 못한 것으로 알려져 있다[1]. 이를 해결하기 위해서는 SPIM에서 주권선과 보조권선을 대칭 분포시킨 2상 유도전동기

*Corresponding Author : Duck-Yong Yoon (Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9165 email: yoony3m@kongju.ac.kr

Received August 25, 2014

Revised October 10, 2014

Accepted January 8, 2015

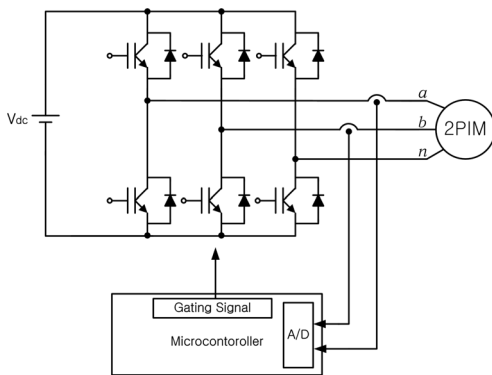
(2PIM ; 2-Phase Induction Motor)를 사용하는 것이 바람직하다.

유도전동기의 벡터제어를 위해서는 전동기의 상전류를 실시간으로 측정하는 것이 필요한데, 일반적으로 홀전류센서(Hall current sensor)를 사용하여 각 상의 전류를 측정한다. 전체 시스템의 가격이 높은 대용량 인버터에서는 홀전류센서의 가격이 큰 비중을 차지하지 않지만, 저전력 응용분야에서는 홀전류센서의 가격이 전체 시스템에서 차지하는 비중이 크므로 이를 사용하는 것은 경제성 측면에서 부적합하다. 이러한 이유로 3상 벡터제어 인버터에서 홀전류센서 대신에 션트저항(Shunt resistor)을 사용하는 방법이 많이 연구되어 왔으나, 2PIM용의 벡터제어 인버터에서는 아직까지 이러한 연구가 거의 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 2PIM용 벡터제어 인버터에서 고가의 홀전류센서 대신에 션트저항을 사용하여 모든 운전영역에서 상전류를 정밀하게 측정하는 방법을 제안하고, 이를 실제의 벡터제어 인버터에 적용하여 그 성능을 검증한다.

2. 전류측정의 저가격화 방법

2.1 기존의 홀전류센서를 사용하는 방법

홀전류센서를 사용한 상전류 측정 방법은 2상 유도전동기 벡터제어 인버터에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 방식으로 Fig. 1과 같다[2]. a상과 b상의 전원선에 각각 홀전류센서를 삽입하고 이것의 출력을 A/D컨버터로 읽어 들여 상전류를 측정한다. 이와 같이 홀전류센서를 사용하는 방법은 해당 전원선에서 상전류를 직접 측정하



[Fig. 1] Traditional phase-current measurement method using two Hall current sensors

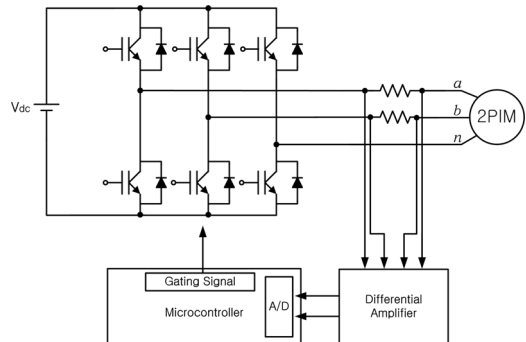
기 때문에 인버터의 스위칭 상태나 운전조건에 관계없이 전동기의 모든 운전영역에서 상전류를 측정할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 소용량 인버터에서는 센서의 가격이 비싸고, 때로는 이것의 부피가 크기 때문에 적용하기 어려운 경우도 있다.

2.2 제안된 션트저항을 사용하는 방법

3상 유도전동기 벡터제어 인버터에서는 저가격화를 위해 고가의 홀전류센서 대신에 션트저항을 사용하는 방법이 널리 연구되어 왔으나, 스위칭 상태나 운전조건에 따라 측정 불가능영역이 존재하여 벡터제어 인버터에 적용하기 어려운 문제를 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 전류센서의 위치에 션트저항을 삽입하여, 모든 운전영역에서 전류를 측정하는 방법이 발표되었다[3].

그러나, 2PIM용의 벡터제어 인버터에서는 아직 이러한 연구가 진행되지 않았으며, 본 논문에서는 2개의 션트저항을 사용한 상전류 측정방법을 적용하여 Fig. 2와 같이 2PIM용 벡터제어 인버터를 설계하였다.

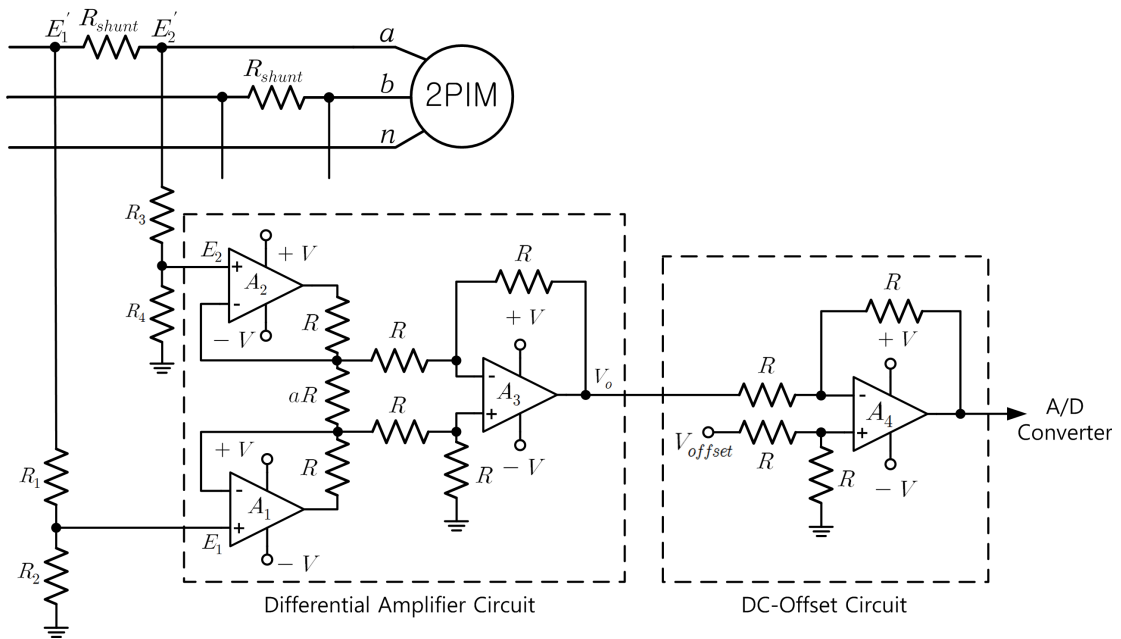
기존에 사용하던 2개의 홀전류센서 대신에 2개의 션트저항을 같은 자리에 삽입함으로써 전동기의 모든 운전영역에서 상전류를 실시간으로 정확하게 측정할 수 있게 된다. 그러나, 이 방법에서는 션트저항 양단의 전위가 높게 플로팅 되어 있기 때문에 이 상태에서 션트저항 양단의 전압을 측정하기 위한 정밀한 아날로그 회로 설계기술이 필요하다.



[Fig. 2] Proposed phase-current measurement method using two shunt resistors

2.3 상전류 측정을 위한 아날로그 회로 설계

본 논문에서 사용한 전류측정 회로는 Fig. 3과 같으며,



[Fig. 3] Analog circuit for phase-current measurement

이는 선트저항의 양단 전압을 검출하여 증폭하기 위한 차동증폭 회로와 마이크로프로세서의 A/D 컨버터를 위한 오프셋 전압 추가 회로로 구성된다.

차동증폭 회로는 입력신호가 연산증폭기의 단자에 직접 입력되어 입력 임피던스가 매우 높고, 공통 모드 전압에 거의 영향을 받지 않는 특징을 가지고 있다. 그런데, 선트저항의 양단은 수백[V]의 높은 전위 E'_1, E'_2 로 높게 플로팅 되어있으므로 이를 각각 저항분압으로 낮추어 차동증폭기의 입력 E_1, E_2 에 입력해야 한다. 단, 이러한 방법이 올바르게 동작하려면 선트저항은 물론이고 저항분압 회로에서 사용하는 저항소자 $R_1 \sim R_4$ 가 매우 정밀해야 하므로 여기에는 오차가 0.1% 이내인 정밀급을 사용하는 것이 좋다. 그리고 차동증폭 회로의 출력신호는 접지를 기준으로 하는 양극성 교류신호이기 때문에 마이크로프로세서의 A/D컨버터에 입력하려면 여기에 직류 오프셋 전압을 더해줘야 한다.

본 논문에서 사용한 차동증폭 회로의 출력 전압은 식 (1)과 같다[3].

$$V_o = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(E_1 - E_2) \quad (1)$$

단, a 는 저항 aR 과 R 의 비를 나타낸다.

여기서, 분압저항 R_1 과 R_3 가 서로 같고, 또한 R_2 와 R_4 가 서로 같다면 이것을 위 식에 대입하여 식 (2)와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_o &= \left(1 + \frac{2}{a}\right) \left\{ \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) E'_1 - \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) E'_2 \right\} \\ &= \left(1 + \frac{2}{a}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) (E'_1 - E'_2) \end{aligned} \quad (2)$$

이상의 결과로부터 출력전압을 상전류 i_{as} 로 환산하는 식은 식 (3)과 같다. 같은 방법으로 b 상의 전류 i_{bs} 도 측정할 수 있다.

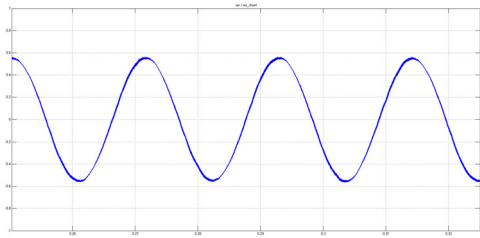
$$i_{as} = \frac{E'_1 - E'_2}{R_{shunt}} = \frac{V_o}{\left(1 + \frac{2}{a}\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) R_{shunt}} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

2개의 선트저항을 사용하여 상전류를 측정하는 방법을 MATLAB Simulink 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

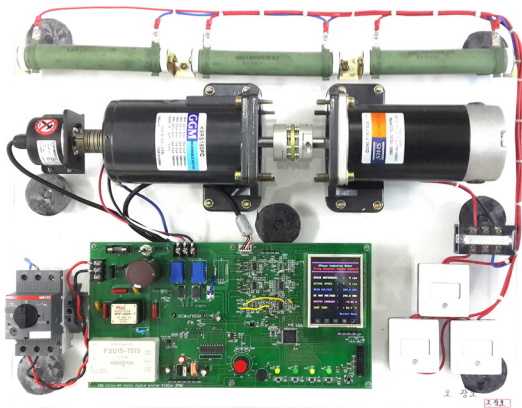
Fig. 4는 +1200[rpm]의 기준속도로 벡터제어를 수행하는 동안에 홀전류센서와 셉트저항으로 각각 측정된 a 상 전류를 서로 비교한 시물레이션 파형이다. 빨간 선은 전동기에 흐르는 a 상 전류를 나타내며, 파란 선은 셉트저항으로 측정된 a 상 전류를 나타낸다. 2 개의 전류 파형이 서로 겹쳐서 거의 하나의 선처럼 보이는 결과로부터 셉트저항으로 측정된 전류값이 매우 정확하다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 4] Simulation result of phase-current measurement method using two shunt resistors

3.2 실험 결과

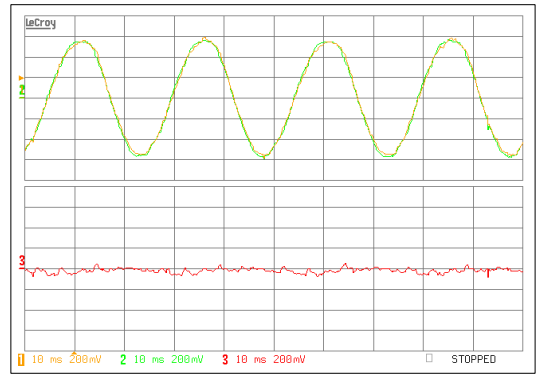
본 논문에서 사용한 2PIM용의 벡터제어 인버터 실험 장치는 Fig. 5에 보였다. 여기에서는 360[W]급의 2PIM과 직류발전기를 연결하여 M-G세트를 구성함으로써 부하 실험이 가능하게 하였다.



[Fig. 5] Photograph of experimental equipment

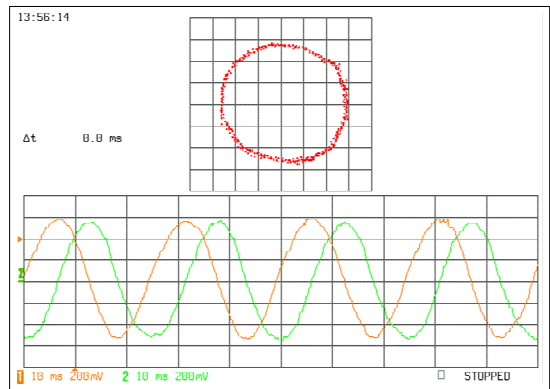
전력회로는 IPM(Intelligent Power Module)을 사용하여 3레그형 인버터로 구성하였고, 제어기로는 STMicroelectronics사의 ARM Cortex-M4형 32비트 마이크로컨트롤러인 STM32F407VET6을 사용하였다. 상 전류 측정에는 홀전류센서와 셉트저항을 모두 사용하여

2가지의 전류측정 결과를 서로 비교 실험할 수 있도록 구성하였다.



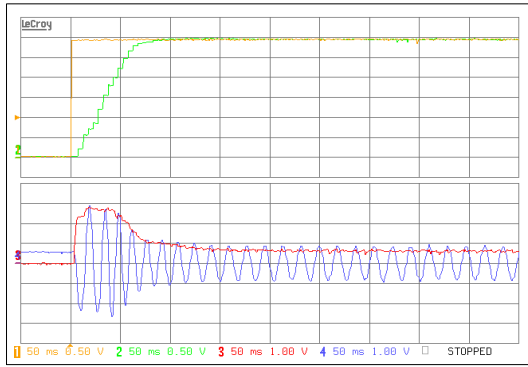
[Fig. 6] Comparison of phase currents measured by Hall current sensor and shunt resistor

Fig. 6은 +1200[rpm]의 기준속도로 벡터제어를 수행하는 동안에 홀전류센서와 셉트저항으로 각각 측정된 a 상 전류의 비교 파형이다. 여기서, 채널1은 홀전류센서로 측정된 전류파형이며, 채널2는 셉트저항을 사용하여 측정된 전류파형이다. 채널3은 이 2가지 전류 측정값의 차이를 나타낸다. 실험 결과로부터 2가지의 방법으로 측정된 상전류가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 7] Waveforms of phase current i_{as} and i_{bs} measured by shunt resistors and their Lissajous figure

Fig. 7은 인버터로 벡터제어를 수행하는 동안에 셉트저항을 사용하여 측정된 a, b 상의 전류파형과 이것의 리사쥬 도형을 나타낸다. 이 실험 결과로부터 a, b 상의 전류가 거의 정확하게 90° 의 위상차를 가지며 정현파 형태의 전류로 제어가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 8] Experimental results of vector control using phase currents measured by shunt resistors

Fig. 8은 셉트저항으로 측정된 전류를 적용하여 벡터 제어를 수행한 결과로서 1/2부하에서 전동기를 +1200[rpm]으로 스텝 기동한 경우의 응답 파형이다. 여기서 채널1은 기준속도, 채널2는 실제속도, 채널3은 q 축 전류, 채널 4는 a 상 전류를 나타낸다. 이는 홀전류센서를 사용한 경우와 거의 유사한 결과로서 2상 유도전동기의 기동특성이 매우 양호하게 나타나는 것 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 주로 저가형 소용량 인버터 분야에서 연구가 진행되고 있는 2상 유도전동기 벡터제어를 대상으로 고가의 홀전류센서 대신에 셉트저항을 사용하여 저가적으로 전동기의 상전류를 측정할 수 있는 방안을 제시하였다.

2개의 셉트저항을 기존의 홀전류센서 위치에 대체함으로써 인버터의 스위칭 조건에 관계없이 전동기의 모든 운전영역에서 상전류를 측정할 수 있는 장점이 있으나, 셉트저항의 양단이 수백[V]의 높은 전위를 갖기 때문에 이를 처리하는 아날로그 회로 설계 기술이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 분압저항과 연산증폭기를 사용하여 차동증폭기 회로를 설계하는 방법을 제시하였으며, 이러한 상전류 측정 방법을 360[W]급 2PIM 벡터제어 인버터에 적용하고 실험을 통하여 홀전류센서를 사용하는 경우와 매우 유사한 측정결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

셉트저항을 사용하는 이러한 저가형 상전류 측정 방법은 가전제품과 같은 저전력 응용분야에서 전체 시스템을 저가가격화하는 좋은 방안이 될 수 있다.

References

- [1] Do-Hyun Jang, "Problems Incurred in a Vector- Controlled Single-Phase Induction Motor, and a Proposal for a Vector-Controlled Two-Phase Induction Motor as a Replacement", IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 1, pp.526~536, Jan. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199772>
- [2] M. B. R. Correa, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva and A. M. N. Lima, "Vector Control Strategies for Single-Phase Induction Motor Drive Systems", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 5, pp. 1073~1080, Oct. 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2004.834973>
- [3] Won-Il Lee and Duck-Yong Yoon, "A Novel Current Sensing Method for Low-Cost Vector- Controlled Inverter of AC Motor", Trans of KIEE, vol. 62, no. 7, pp.950~955, Jul. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.7.950>

오 광 호(Kwang-Ho Oh)

[준회원]



- 2013년 2월 : 가천대학교 전기공학과 졸업
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 전기전자제어공학과 석사과정

<관심분야>

2상 및 3상 유도전동기 벡터제어, 자동화 시스템 설계

윤 덕 용(Duck-Yong Yoon)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1982년 12월 ~ 1984년 5월 : 삼성 전자 종합연구소 주임연구원
- 1985년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

<관심분야>

전동기 서보제어, 마이크로프로세서 응용 설계