

영구자석 동기 전동기의 영가형 센서리스 제어회로

김 학 원^{*}, 양 순 배, 조 관 열, 홍 찬 희
LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

A Low Cost Sensorless Control Circuit for Permanent Magnet Synchronous Motor

Hag-Wone Kim^{*}, Soon-Bae Yang, Kwan-Yuhl Cho, Chan-Hee Hong
Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc.

ABSTRACT

In this paper, the low cost sensorless control circuit for a PM synchronous motor without the mechanical rotor position sensors is presented. The sensorless control algorithm and position detection circuit for the sinusoidal current wave drive is more complex than that of the rectangular current wave drive. The proposed position sensing circuit is composed of an operational amplifier and several passive elements. The design procedures for getting the optimal parameters for the position sensing circuit are presented. The performance of the proposed algorithm is verified through the simulations and experiments.

1. 서 론

선진국을 중심으로한 에너지규제 움직임과, 사용자의 사용편리성 추구 및 저소음등의 쾌적한 사용환경에 대한 요구의 증대에따라 에어컨, 냉장고등의 백색가전을 중심으로 인버터의 채용이 활발히 전개되고 있다. 이러한 백색가전분야에서는 효율 및 소음특성이 우수한 영구자석형 동기전동기(permanent magnet synchronous motor)가 정속 유도기를 대체해가고 있으나, 인버터 구동회로부의 재료비 상승으로 인하

여 적용이 크게 확대되지 못하고 있다. 3상의 영구자석 동기전동기를 구동하기 위해서는 회전자에 대하여 일정한 부하각을 갖고 회전하는 회전자계를 고정자에 발생하기 위한 회전자 위치 감지센서가 필요하다. 이러한 위치 감지센서는 전동기 시스템의 가격을 상승시킬 뿐아니라, 시스템 부피의 증가, 생산 공정수 증가 및 전자파 장해 등을 유발한다. 또한 냉장고, 에어컨등의 압축기(compressor)에 응용시는 압축기 내부의 물리적인 환경으로 인하여 센서를 취부하기가 곤란한 경우가 존재한다. 이러한 문제로 인하여 영구자석형 동기 전동기를 회전자 위치 센서없이 구동하는 센서리스 드라이브에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^[1]

일반적으로 백색가전(home appliance)분야에서는 제어가능 용이한 영구자석형 동기전동기의 구형파 전류 구동 방식(rectangular current wave drive)을 사용하여 왔다. 이방식은 3상의 모터 권선중 2상만 외부에서 전압이 인가되므로 전류가 흐르지 않는 비통전상(open phase)이 존재하며, 비통전상으로부터 추출된 단자전압은 위치정보를 가지고 있는 모터의 역기전력과 동일하므로 위치정보를 용이하게 뽑아 낼 수 있는 장점이 있어서, 위치센서 없는 구동방식은 대부분 이방식을 채용하고 있다.^{[2],[3]} 그러나 구형파 전류 구동방식은 전동기에 인가 가능한 최대 전압의 제한 및 모터의 시정수로 인하여 전류(commutation)시 이상적인 형태인 전류 변화가 급격한 형상을 만들기가 어렵고, 이로 인해발생되는 전동기의 토크리플(torque ripple)로 인해, 소음의 저감을 저감하는데 어느정도

한계가 존재한다. 반면 정현파 전류구동(sinusoidal current wave drive) 방식은 전류의 변화가 급격하지 않으므로 저소음 저진동에 유리한 반면, 제어회로가 복잡하고 특히 센서리스 운전 제어 측면에서는, 고정자에 전류가 흐르지 않는 비통전상이 존재하지 않기 때문에, 단자전압만으로 영구자석형 동기전동기의 위치정보를 도출하기가 곤란하다. 따라서, 전압과 전류 정보를 이용한 영구자석 동기전동기의 위치감지 및 제어 방법에 대해서 여러 논문에서 그 방법을 제시하고 있다.^{[4],[5],[6]} 그러나 이러한 방식들은 고가의 전류 센서가 적어도 2개 이상 필요하고, 전압 및 전류의 아나로그 신호를 디지털로 변환하는 변환기(A/D converter)가 필요하며, 짧은 시간에 많은 양의 데이터를 처리하여야 하므로 고가의 디지털 시그널 프로세서(digital signal processor)가 적용되는 것이 일반적이므로, 가격경쟁이 심한 가전제품에는 적용하기가 어렵다.

본 논문에서는 센서 없는 영구자석 동기 전동기의 정현파 전류구동을 염가형으로 구현할 수 있도록 간단한 전류 및 전압 감지저항과 하나의 OP Amp 및 몇개의 수동소자로 구성된 염가형의 위치감지회로를 제안하고, 시스템의 구성 및 감지회로 설계 시 고려사항에 대해서 고찰하고, 제안된 위치감지 회로의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해서 검증하였다.

2. 시스템 구성

그림1은 제안된 센서리스 감지회로가 적용된 시스템의 구성도이다. 영구 자석형 동기 전동기의 구형과 전류구동의 경우, 적어도 전기적으로 60도 마다 위치 정보가 필요하나, 정현파 전류구동의 경우는 보다 정밀한 위치정보가 필요하다. 그러나 일반적으로 가전제품의 경우 정밀한 위치제어를 행하지 않으며, 또한 일반적으로 급가감속을 행하지 않으므로, 속도의 변동이 크지 않아, 일정한 시점에서의 위치 정보와 속도 정보로부터 연속적으로 변화하는 위치 정보를 계산하더라도 전동기를 구동하는데 무리가 없다. 반면, 가전제품의 경우 재료비의 저감이 상당히 중요한 요소이므로 상대적으로 적은량의 염가형 하드웨어로부터 위치 정보를 추출하여 구동하는 것이 중요하다.

본 방식은 영구자석 동기전동기의 한상의 위치정보만을 전류 및 전압 신호로 이용하여 구동정보로 활용한다. 한상의 위치 신호를 얻기 위하여 전동기의 특정상에 급속판 무유도 저항(Metal Plate Resistor)을 이용한 전류 센서 1개와 전압을 얻기 위한 전압 센서를 설치하고, 상기한 전류 센서와 전압 센서의 출력 결과를 아나로그로 연산 처리하여 위치정보를 얻는다. 상기한 위치정보는 임의의 위치에 대한 모든 정

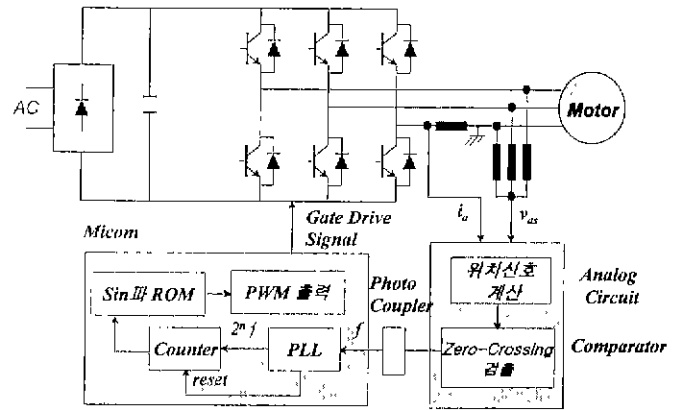


그림 1 제안된 시스템 구성도

Fig 1 Configuration of the proposed system

보를 가지고 있으나, 위치신호를 얻기 위한 아날로그 회로의 신호 그라운드와 마이크로컨트롤러의 그라운드가 동일하지 않으므로 신호전달을 위해서 포토 커플러(photo coupler)가 필요하다. 이 포토 커플러로 신호를 전달하기 위해서는 신호를 디지털화하여 전달하여야 하며, 본 논문에서는 아날로그 회로로부터 복원된 위치 신호의 영전위점(zero cross point)을 검출하여 마이크로 컨트롤러로 전달한다.

3. 위치감지 회로 설계 및 시뮬레이션

영구자석 동기 전동기의 한상에 걸리는 전압식은 다음과 같다.

$$V_a = R_a i_a + L \frac{di_a}{dt} + emf_a \quad (1)$$

또한, 영구자석의 위치 정보인, 쇄교자속(flux linkage)은 아래의 식으로 표현된다.

$$\lambda_m(\theta) = \int emf_a(\theta) dt \quad (2)$$

여기서 $\lambda_m(\theta)$ 는 회전자의 영구자석에 의해 A상 권선에 나타나는 쇄교자속이다. 그림2는 상기한 위치 신호 계산을 위한 아날로그 회로부의 상세 회로도이다. 위치 신호 계산부의 입력은 그림1의 전동기 전류 및 전압 신호이며, 저항1(R_1)은 전동기 고정자의 저항, 콘덴서1(C)은 전동기 고정자의 인덕턴스 그리고 저항2(R_2)는 전동기에 인가되는 전압을 각각 모델링한 것이다. 전동기의 상저항은 25°C에서 4.5 Ω 이고 상인덕턴스는 31.9mH이다. 그림2의 회로에서 저항 R_1 의 전류는 고정자 권선 저항의 전압에

비례하고, C_1 의 전류는 고정자 권선 인덕턴스 전압에 비례하며, 상전압 v 또한 동일한 비례상수로 R_2 에 전류로 나타나야 한다. 위의 관계를 수식으로 표현하면식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{R_{sen}i_a}{R_1} &= A_{gain}Ri_a \\ C_1 \frac{dR_{sen}i_a}{dt} &= A_{gain}L \frac{di_a}{dt} \\ V_{as} \frac{R_5}{R_2} &= A_{gain}V_{as} \end{aligned} \quad (3)$$

상기한 각 파라미터 전류의 합이 적분되어 적분기의 출력으로 나타나므로, 적분기의 출력은 식(4)와 같다. 이제 식(3)을 식(4)에 대입하면, 식(5)와 같다.

$$V_{out} = -\frac{1}{C_2} \int i dt \quad (4)$$

여기서,

$$i = \frac{R_{sen}i_a}{R_1} + C_1 \frac{dR_{sen}i_a}{dt} - V_{as} \frac{R_5}{R_2(R_4 + R_5)}$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= -A_{gain}(Ri_a + L \frac{di_a}{dt} - V_{as}) \\ &= -\frac{A_{gain}}{C_2} \int emf_a dt \end{aligned} \quad (5)$$

정현파 전류 구동을 위한 전동기의 역기전력은 정현파 형상을 가지므로 역기전력은 아래의 식(6)과 같이 표현되고, 식(6)을 식(5)에 대입하여 식(7)을 도출할 수 있다.

$$emf_a = K_e \omega_r \cos \omega_r t \quad (6)$$

$$V_{out} = \frac{A_{gain}K_e}{C_2} \sin \omega_r t \quad (7)$$

출력전압의 크기는 속도에 관계없이 전동기의 역기전력상수 K_e 와 전동기의 각파라미터의 전압과 감지회로의 전류의 비율인 A_{gain} 및 적분을 위한 콘덴서 C_2 의 함수이다. C_2 의 크기는 위치를 감지하고자하는 최저속도에서의 콘덴서로 흐르는 충전전류를 OP Amp의 Bias 전류보다 상당히 크게 되도록 설계한다. C_2 의 경우 특성을 일정하게 하기 위하여 온도보상형의 정밀콘덴서를 사용하는데, 온도보상형의 경우 콘덴서의 용량의 변화에 따라 재료비의 변화가 크다. OP Amp의 Bias 전류가 작을수록 C_2 의 용량도 작아지므로, OP Amp는 Bias 전류가 상당히 작은 소자를 사용한다. C_2 의 값이 결정되면 A_{gain} 은 식(7)로부터 결정된다. 전류 감지 저항 R_{sen}

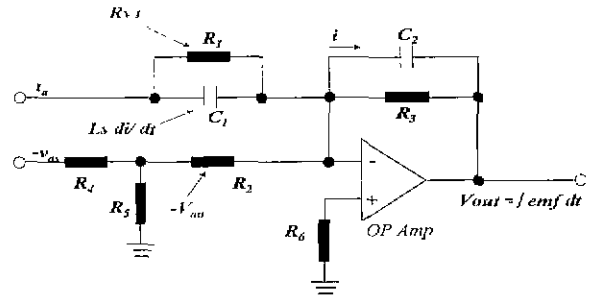


그림 2 위치 신호 계산부 회로도

Fig 2 Details of position sensing circuit

이 클수록 감지된 신호의 레벨이 높아 감지가 용이해지지만, 전동기의 권선 저항을 고려하여 적정값으로 선정하여야 한다. 이제 저항 R_3 의 설계시 고려할 사항을 살펴본다. 전동기에서 온도에 가장 민감하게 변화하는 요소가 전동기의 고정자 저항이다. 저항의 온도변화로 인하여 전동기의 저항에 걸리는 전압성분과 R_1 에 흐르는 전류의 비율이 설계된 A_{gain} 값을 벗어나게 한다. 전동기의 역기전력을 온도변화를 고려하여 수식으로 나타내면 식(8)과 같다.

$$emf_a = (R_0 + \Delta R)i_a + L \frac{di_a}{dt} - V_{as} \quad (8)$$

여기서, R_0 는 상온에서의 R_1 설계의 기준이 되는 온도에서의 고정자 권선의 저항이다. 그런데, 콘덴서에 흐르는 전류 I 는

$$i = A_{gain}(R_0 i_a + L \frac{di_a}{dt} - V_{as}) \quad (9)$$

이므로, 전동기의 저항이 변화할때의 위치 감지 결과는 아래의 식(10)과 같이 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{out} &= -\frac{1}{C_2} \int i dt = -\frac{A_{gain}}{C_2} \int (emf_a - \Delta Ri_a) dt \\ &= -\frac{A_{gain}}{C_2} (\lambda_m(\theta) - \Delta \lambda_m) \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 $\Delta \lambda_m$ 은 온도 변화에 따른 고정자 권선 저항의 변화에 의한 위치감지 오차이다. 위치 감지 오차의 값은 정지 및 저속시 적분 결과의 Offset으로 나타나며, Offset 오차는 전동기의 속도가 정상 속도에 도달하더라도 유지되므로 역기전력의 영전위점(zero cross pint)의 오차는 항상 존재하게 된다. 제안된 위치 감지 방식은 아날로그 적분기의 출력 결과의 영전위점을 감지하므로 적분결과의

Offset은 위치감지결과에 상당한 영향을 미친다. 이러한 전동기의 온도변화에 따른 Offset의 영향을 배제하는 역할을 R_3 가 담당한다. 이 Offset 보상저항의 결정은 전동기가 정지된 상태에서 적분회로의 출력이 발산하지 않도록 어느정도의 안전율을 가지고 결정한다. 그림3은 Offset 보상 저항 R_3 을 결정하기 위하여 전동기 정지 상태에 대한 시뮬레이션한 결과이다. 전동기의 실제 저항이 $5[\Omega]$ 인 상태에서 저항의 모델이 $4.5[\Omega]$ 인 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였다. Offset 보상 저항이 없는 경우 Offset 전류로 적분기의 출력전압이 대략 $0.2[\text{sec}]$ 후 포화되었다. (b)는 Offset 보상 저항이 있는 경우 시뮬레이션 결과이다. 저항 오차에 의한 충전 전류는 보상 저항 R_3 로 방전된다. R_3 를 포함하여 최종적으로 도출된 파라미터의 값을 표1에 나타내었다.

표 1 도출된 각 파라미터
Table 1 Calculated Circuit Parameters.

C_1	200nF
C_2	4.7nF
R_1	32.7k Ω
R_2	65.4k Ω
R_3	10M Ω
R_6	21.8k Ω
A_{gain}	3.06×10^{-7}

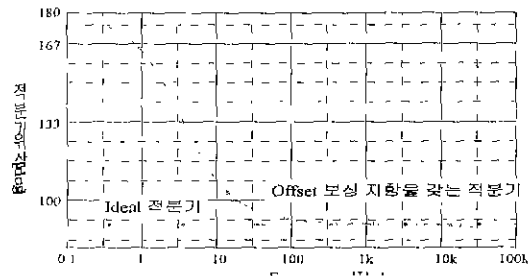
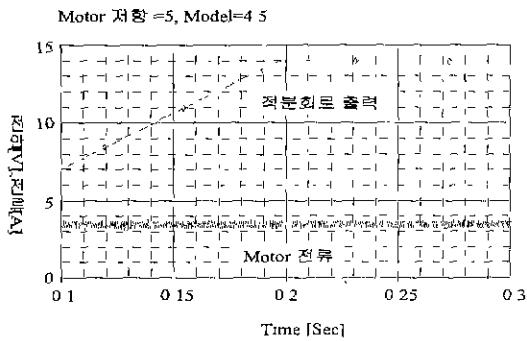
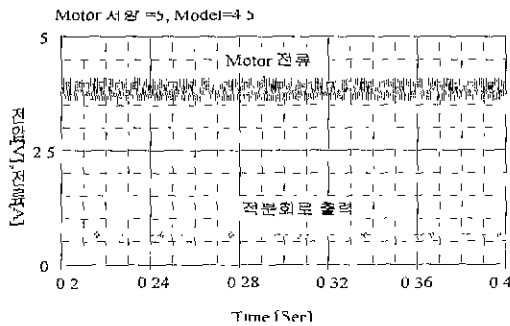


그림 4 적분기의 Bode Plot
Fig 4 Bode plot of integrator

그림 5는 권선 온도 55°C 에서 기동 정지를 빈번히 실시하여 위치 감지 신호를 비교한 것이다. Offset 보상 저항을 추가 하므로, 저속에서의 적분위상 오차가 발생하지만, Offset 저항과 적분 콘덴서의 시정수가 $47[\text{mSec}]$ 이므로 기동직후 Offset 에러는 사라진다.



(a) Offset 보상 저항 R_3 가 없을 때
(a) Without offset compensation resistor R_3



(b) Offset 보상 저항 R_3 가 $10\text{M}\Omega$ 의 경우
(b) With $10\text{M}\Omega$ offset compensation resistor

그림 3 Offset 보상저항의 효과 Simulation
Fig 3 Simulation of offset compensation resistor effects

4. 실험 결과 및 고찰

그림4는 Offset 보상 저항을 갖는 적분기의 Bode Plot을 나타내었다.

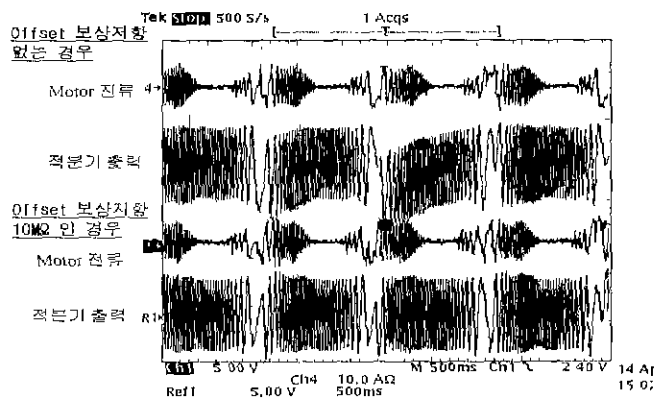


그림 5 Offset 보상저항의 효과 확인 실험
Fig 5 Experimental Results for effects of offset compensation resistor

그림6은 전동기의 위치신호를 나타내는 적분기 출력의 결과와 포토 커플러로 신호를 전달하기 위한 신호인 적분기 출력의 영전위 감지 결과를 나타내었다. 그리고 영전위 감지결과와 비교하기 위한 홀센서 신호 및 전류 파형을 나타내었다. (a)는

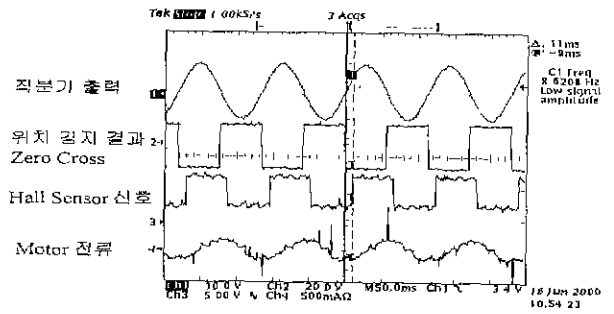
8.5[Hz]에서의 신호이며, (b)는 60[Hz], (c)는 250[Hz]에서의 신호를 나타내었다. 비교를 위한 홀 센서는 위치감지를 위한 상권선의 센터위치로부터 회전방향과 반대방향으로 전기각으로 9.5도 치우쳐져 취부되어 있다. 이를 고려한 회전 주파수별로 위치 감지 오차는 8.5[Hz]에서 24.2도이며, 60[Hz]에서는 7.8도로 나타났다. 250[Hz]로 진상각을 80도 인가하여 운전하는 경우에도 센서리스 위치감지가 홀 센서 파형과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

5. 결론

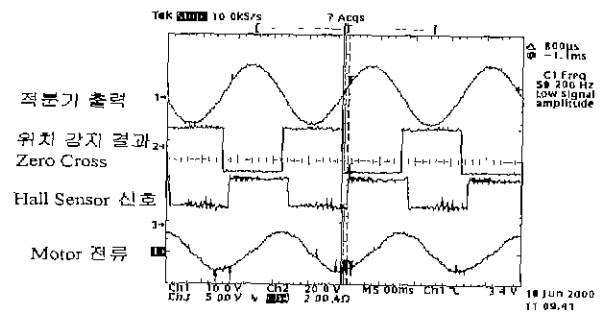
본 논문에서는 부하의 변화가 급격하게 변화하지 않는 시스템을 위한 영구자석 동기전동기의 정현파 전류구동용 영가형 센서리스 제어회로를 제안하였다. 그리고 전동기의 권선저항 변화에 따른 위치 감지 오차를 저감하기 위하여 위치 감지부에 보상저항을 삽입하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그효과를 검증하였다. 향후 팬 및 압축기에 대하여 기존의 구형파 전류 구동 방식과 비교하여 제안된 센서리스 정현파 전류 구동방식의 소음 및 진동저감 효과를 검증할 계획이다.

참고 문헌

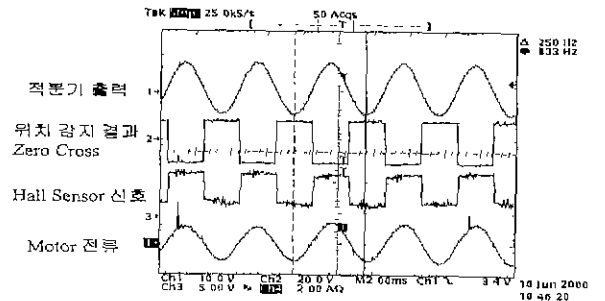
- [1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, "Sensorless Control of AC Motor Drives," IEEE Press, pp. 259~268, 1996.
- [2] K.Iizuka, H. Uzuhashi, et al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 21, no. 4, pp. 595~601, 1985.
- [3] T. Futani and Y. Shida, "Brushless DC Motor for Compressor of Airconditioner," Proceeding of 94. Symposium of Motor Technology, pp. C5-1-1~C5-1-16, 1994.
- [4] N. Matsui and M. Shigyo, " Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 28, no 1, pp. 120~127, 1992
- [5] A. Consoli, S. Musumeci, et al., " Sensorless Vector and Speed Control of Brushless Motor Drives," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 41, no. 1, pp. 91~96, 1994.
- [6] N. Ertugrul and P. Acarnley, " A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 30, no. 1, pp. 126~133, 1994



(a) 8.5[Hz]에서의 위치감지 파형
(a) Position detection signal at 8.5[Hz]



(b) 60[Hz]에서의 위치 감지 파형
(b) Position detection signal at 60[Hz]



(c) 250[Hz]에서의 위치 감지 파형,
Advance Angle 80도
(c) Position detection signal at 250[Hz]
80 degree advance angle

그림 6 위치 감지 결과 파형
Fig 6 Waveform of position detection signal