

아날로그 필터를 이용한 신호주입 센서리스제어의 각추정 오차 분석

정성호, 하정익
서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Analysis of Angle Estimation Error in Signal Injection Based Sensorless Control Using Analog Filter Circuit

Sungho Jung, and Jung Ik Ha
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 아날로그 필터회로의 신호 증폭비에 따른 센서리스 각추정 성능에 대해 분석 하였다. 신호 주입 센서리스에서 높은 주파수 신호 주입 방법이 선호되는데, 주입 주파수가 커질수록 시스템 임피던스가 증가한다. 따라서 낮은 주파수 주입방법과 동일한 각추정 성능을 얻기 위해서는 상대적으로 큰 주입전압이 필요하다. 특히 전동기의 돌극성이 작거나 ADC의 정밀도가 낮으면 각추정이 불가능한 경우도 존재 한다. 하지만 아날로그 필터회로를 이용하여 주입 주파수 신호를 증폭할 경우 작은 크기의 전압주입으로 각추정이 가능하다. 아날로그 대역통과필터의 신호 증폭비에 따른 최대 각에러 값을 모의 실험을 통해 비교하고, 실제 회로를 설계하여 센서리스 각추정 성능을 시험평가 하였다.

1. 서론

전동기 센서리스 구동시 영속 혹은 극 저속 운전역역에서는 회전자의 돌극성을 판단하여 회전자 위치를 추정하는 신호 주입방법을 주로 사용한다. 크게 정지좌표계에서 회전하는 전압을 주입하는 방법과 추정된 회전자 좌표계에서 맥동하는 전압을 주입하는 방법으로 분류된다. 신호주입시 사용되는 주입 주파수는 보통 전류제어기의 제어밴드 주파수 보다 크고 스위칭 주파수보다 작으며, 빠른 각추정 성능과 기본주파수 신호와 주입주파수 신호의 순위를 분리할 위해 가능한 높은 주파수 사용을 선호한다. 최근 주입신호에 의한 가청주파수 소음발생을 최소화하기 위해 16kHz이상의 전압신호를 주입하는 스위칭 주파수 신호주입방법이 소개 되었다¹⁾. 하지만 주입주파수가 클수록 시스템의 임피던스가 크기 때문에 센서리스가 가능한 크기의 전류응답을 얻기 위해서는 낮은 주입주파수를 사용할 때보다 더 큰 전압을 주입해야 한다는 단점이 있다. 따라서 제한된 직류단 전압 조건에서 큰 주입전압을 사용하게 되면 상대적으로 전동기 구동을 위한 전압여유분이 작아지게 된다. 이를 해결하기 위해 아날로그 필터 회로를 이용한 주입 주파수 신호 증폭방법이 제안되었다²⁾. 하지만 신호 증폭비에 따른 각추정 성능 향상 대한 분석이 충분하지 않고, 아날로그 필터회로의 설계 방법에 대한 논의가 없었다. 본 논문에서는 아날로그 영역에서 신호 증폭으로 인한 센서리스 제어에서의 장점을 서술하며, 아날로그 필터회로의 설계 방법을 제안한다.

2. 아날로그 필터회로를 이용한 신호증폭

2.1 센서리스 알고리즘

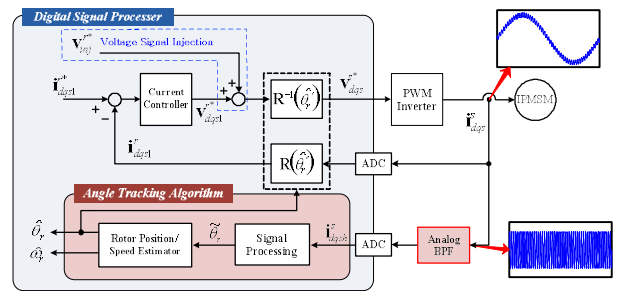


그림 1 아날로그 필터회로를 이용한 센서리스 알고리즘

그림 1은 아날로그 필터 회로를 이용한 센서리스 알고리즘의 제어 블록도이다. 전류제어기 출력에 센서리스를 위한 주입 전압이 더해져 인버터 전압지령으로 전달되고 PWM을 통해 합성된 전압은 전동기에 인가된다. 전동기 전류 신호에는 전동기 회전주파수의 저주파 전류 성분과 주입주파수의 고주파 전류 성분이 존재한다. 기존 센서리스 시스템에서는 두 주파수의 전류 신호를 하나의 ADC를 통해 디지털화 한 다음 제어기 내부의 디지털 필터를 통해 두 주파수 신호를 분리 하였다. 제한된 해상도를 가지는 ADC는 전동기 정격전류의 크기를 고려하여 측정범위가 설정하기 때문에 상대적으로 크기가 작은 고주파 맥동 신호의 충분한 측정이 불가능하다. 아날로그 필터회로를 이용한 센서리스 시스템에서는 아날로그 필터 회로를 이용해 두 주파수 신호를 분리한 다음 2개의 ADC 채널을 사용하여 전류신호를 디지털화 한다. 따라서 고주파 맥동신호 크기를 고려한 ADC 설계가 가능하기 때문에 작은 크기의 맥동신호도 쉽게 측정할 수 있으며, 기존 센서리스 시스템에 비해 상대적으로 작은 크기의 전압주입으로 각추정이 가능하게 된다²⁾.

2.2 신호 증폭효과

추정된 d축에 맥동하는 전압 $v_{ds}^* = V_{inj} \cos \omega_h t$ 을 주입할 경우 추정된 동기 좌표계의 q축 고주파 전류 i_{qsh}^* 는 (1)와 같다.

$$i_{qsh}^* = -\frac{V_{inj}}{2\omega_h} \frac{L_{qs} - L_{ds}}{L_{ds} L_{qs}} \sin 2\tilde{\theta}_r \sin \omega_h t \quad (1)$$

여기서 $\tilde{\theta}_r$ 은 실제각과 추정각 사이의 각 에러를 나타낸다.

주입주파수가 충분히 클 경우 인덕턴스에 의한 임피던스가 전체 임피던스의 대부분을 차지하므로 전류위상이 전압위상에 비해 90도 뒤쳐지게 된다. 따라서 캐리어 신호의 최대값과 최저값에서 전류신호를 측정하여 전류 벡터 변화량으로부터 맥동하는 q축 전류의 크기 정보를 획득할 수 있다. 또한 (1)로부터

단위 비트당 최대 각에러 $\hat{\theta}_r$ 와 변수들의 관계는

$$\hat{\theta}_r \propto \frac{\omega_h L_{ds} L_{qs}}{V_{inj} (L_{qs} - L_{ds})} I_Q \quad (2)$$

이다. 여기서 I_Q 은 상당 최대양자화 에러이며 전체 전류 측정 범위를 ADC 변환 비트값의 전체 크기로 나눈 값이다. 단위 비트당 최대 각 에러가 작을수록 센서리스 제어시 정확한 각추정이 가능하다. 큰 전압을 주입할수록 단위 비트당 최대 각 에러는 작아지지만, 직류단 전압의 크기가 제한되기 때문에 주입전압 크기 증가를 통한 센서리스 성능 향상에는 한계가 존재한다. 아날로그 필터회로를 이용한 주입신호 처리시 증폭비 만큼 상당 최대양자화 에러를 줄일 수 있기 때문에 단위 비트당 최대 각 에러를 줄일 수 있게 된다.

3. 모의실험 및 실험결과

표 1 전동기 및 시험세트의 파라미터

L_{ds}	3.7mH	정격전류	54A
L_{qs}	4.3mH	전류측정범위	$\pm 166A$
전동기 상저항	0.1 Ω	ADC정밀도	12bit
전동기출력	11kW	직류단 전압	300V
전동기 극수	6극	스위칭 주파수	16kHz

3.1 모의실험

아날로그 회로의 증폭비에 따른 추정각 에러 감소 효과를 확인하기 위해 모의실험을 실시하였다. 모의실험 및 실험에 사용된 전동기의 제정수는 표1과 같으며, 그림 2에서는 아날로그 회로의 증폭비에 따른 각에러를 나타낸다. 실제 회전자좌표계의 d축에 맥동하는 30V를 주입하였을 때의 실제각과 추정각 사이의 각에러이며, (가)는 1배 증폭비를 (나)는 8배 증폭비를 사용한 경우이다. 1배의 증폭비를 사용할 때 최대각 에러가 0.209rad. 였으나 8배의 증폭비를 사용했을 때는 0.037rad.이다. 그림3은 12bit ADC상용시 최대 각에러를 모의실험을 통해 측정하였으며, 아날로그 회로의 증폭비에 따른 값을 그래프로 도시하였다. 증폭비가 커질수록 최대 각에러가 감소하므로, ADC의 성능향상 없이 아날로그 증폭회로를 통해 정밀한 각추정이 가능함을 알 수 있다.

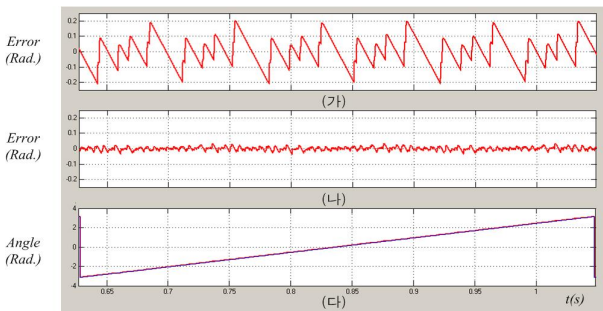


그림 2 아날로그 회로의 주입주파수 신호 증폭비에 따른 각추정 에러; (가) 1배 신호 증폭 (나) 8배 신호증폭 (다) 회전자 위치

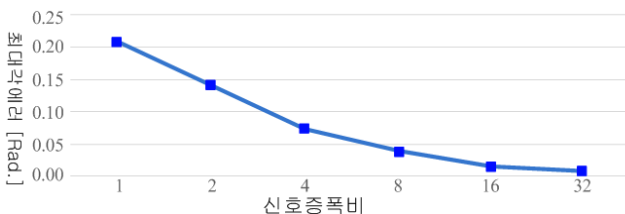


그림 3 신호 증폭비에 따른 최대 각에러

3.2 실험결과

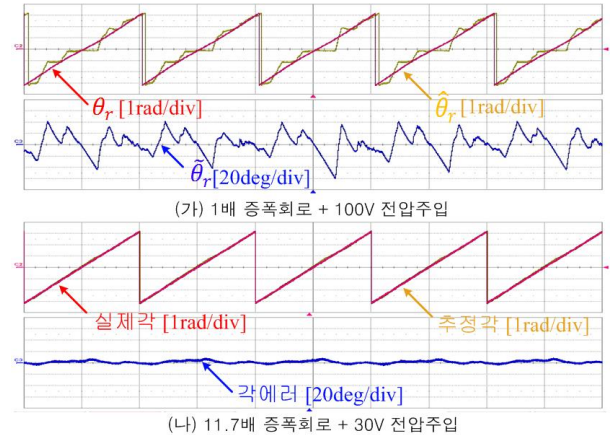


그림 4 신호증폭비에 따른 센서리스 알고리즘의 각추정 성능

그림 4는 1배 증폭비를 가지는 아날로그 필터회로와 11.7배의 증폭비를 가지는 아날로그 필터회로를 설계하여 50rpm 센서리스 속도제어를 실시 하였을 때 실제각과 추정각, 그리고 각에러를 도시하였다. 아날로그 필터회로는 1차 고역통과필터와 1차 저역통과필터의 직렬연결로 이루어진 2차 대역통과필터를 사용하였으며 Q는 0.2이하, 중간주파수는 주입주파수인 16kHz로 설계하였다. 주어진 시스템에서 1배 증폭비를 사용하였을 경우 30V전압주입으로는 센서리스 속도제어가 불가능하여, 그림4(가)와 같이 센서리스 구동이 가능한 최소전압 100V를 주입하였다. 이때 최대 각에러는 60도였으며, 부하토크 인가시 탈조현상을 보였다. 그림4(나)는 11.7배의 증폭비를 가지는 아날로그 회로를 사용했을 때이며 주입전압은 30V이다. 각 에러는 7도이하로 상대적으로 작았으며, 정격 부하토크 인가에도 추정각을 잃지 않고 일정속도를 유지하였다. 즉, 아날로그 증폭회로 없이 센서리스구동을 위해서는 100V이상의 전압을 주입해야 하는 시스템에서 11.7배의 아날로그회로를 이용할 경우 30V전압 주입만으로도 안정적인 센서리스 구동이 가능함을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 아날로그 필터회로를 이용한 센서리스 구동 시스템에서 신호 증폭비에 따른 각추정 성능향상에 대해 살펴해보았다. 아날로그회로의 주입신호 증폭비를 높일수록 각추정 성능이 향상된다는 것을 모의실험을 통해 증명하였으며, 작은 돌극비를 가지는 전동기에서 아날로그 회로를 사용할 경우 작은 주입전압만으로도 센서리스 제어가 가능함을 보였다. 기존 센서리스 시스템에 비해 ADC 채널을 하나 추가해야 한다는 단점이 존재하지만 낮은 ADC 정밀도를 가지는 시스템 이거나 돌극비가 작은 전동기에서 높은 주파수, 작은 주입으로 센서리스 구동이 가능하다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kim, J. I. Ha, and S. K. Sul, "PWM Switching Frequency Signal Injection Sensorless Method in IPMSM", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol 48, No. 5, SEP/OCT. 2012.
- [2] S. Jung, and J. I. Ha, "Sensorless Control of AC Machines at Carrier Frequency Signal Injection Using Analog Filter Circuit" IEEE 10th Conf. on PEDS, Kitakyushu, Japan, April, 2013, pp. 439-444.