

회전자 인버터 내장형 동기 전동기의 고주파 맥동 전압 주입 센서리스 제어 기법

최세화, 정은수, 설승기
서울대학교 SPEC

Pulsating High Frequency Voltage Injection Sensorless Control Method for Synchronous Machine with Inverter Integrated Rotor (SMIIR)

Sehwa Choe, Eunsoo Jung, Seung Ki Sul
SPEC, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 회전자 인버터 내장형 동기 전동기에 고주파 신호 주입 센서리스 알고리즘을 적용하는 방법을 제안한다. 고주파 신호주입 센서리스는 자기적인 돌극성을 활용하여 자속 축을 찾기 때문에, 자기적인 돌극성이 뚜렷하지 않은 회전자 인버터 내장형 동기 전동기에서는 이를 적용할 수 없는 문제가 존재한다.

이를 해결하기 위해 회전자 인버터를 이용하여 가상의 돌극성을 생성하고, 이 가상의 돌극성을 이용한 고주파 신호주입 센서리스 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 실험을 통하여 검증되었으며, 추가적인 손실이나 하드웨어 없이 센서리스 운전이 가능함을 확인하였다.

1. 서론

센서를 사용하지 않고 자속 축을 파악하는 센서리스 기법은 센서의 부재로 인한 모터의 가격 하락 및 소형화로 인한 이득과 동시에 센서의 고장에 대한 문제를 근원적으로 제거함으로써 신뢰성을 향상시키는 장점이 있다. 이러한 센서리스 기법은 역기전력을 활용하는 방법과 고주파 신호를 주입하는 방법으로 나뉘는데, 고주파 신호를 주입하는 방법은 자기적인 돌극성이 있는 경우에만 자속 축을 찾을 수 있는 단점이 존재한다.^[1]

영구자석의 가격이 상승함에 따라 영구자석을 사용하지 않는 권선형 회전자 동기 전동기의 일환으로 개발된 회전자 인버터 내장형 동기전동기^[2]는 자기적인 돌극성을 가지고 있지 않으므로 기존의 고주파 신호 주입 센서리스 방법을 적용하는 것이 불가능하다는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 자기적인 돌극성이 없는 회전자 내장형 동기 전동기의 회전자 인버터를 이용하여 가상의 돌극성을 생성하고, 이를 바탕으로 고주파 신호 주입 센서리스를 적용하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 회전자 인버터 내장형 동기 전동기의 동작 원리

회전자 인버터 내장형 동기 전동기는 그림 1과 같이 고정자 측은 전형적인 동기전동기의 구조를 가지고 있지

만, 회전자 측에는 인버터가 내장되어 있다는 점에서 영구자석이나 슬립링을 가지고 있는 통상의 동기기의 구조와는 다르다.

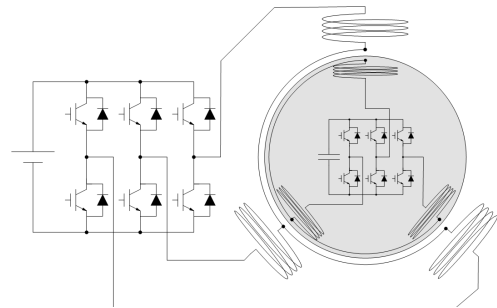


그림 1 회전자 내장형 동기 전동기의 구조
Fig. 1 Structure of SMIIR

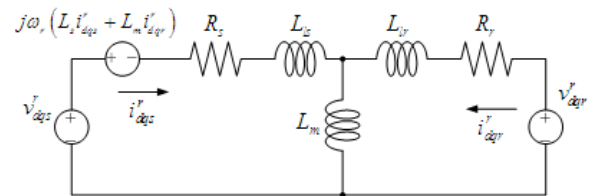


그림 2 회전자 내장형 동기 전동기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of SMIIR

이러한 회전자 내장형 동기전동기의 등가회로는 그림 2와 같이 표현될 수 있으며, 고정자와 회전자의 인버터는 별도의 동기화 및 통신을 하지 않고 독립적으로 동작한다. 따라서 고정자 인버터가 전형적인 동기기와 같은 방식으로 동작하기 위해서는 회전자 인버터가 일정한 자속을 생성해야 한다. 즉, 회전자 인버터는 동기좌표계 d 축 전류를 제어하여 자속을 생성하고, 고정자 인버터는 토크를 제어하기 위하여 q 축 전류를 제어한다.

이 때, 회전자 인버터는 별도의 전력원을 가지고 있지 않으므로 고정자로부터 전력을 전달받아야 하는 문제가 발생한다. 이를 위하여 고정자는 고주파 전압(v_{dqsh}^r)을 합성하여 주입하고, 회전자 인버터는 고정자가 주입한 전압을 추정하여 그 전압에 반대 위상이 되는 전류(i_{dqr}^r)를 합성해야 한다. 다시 말해 고정자로부터 회전자에 전력을 전달하기 위하여 식 (1)과 같이 동작하는

부가적인 고주파 제어가 필요하다.

$$i_{dqrh}^r = -k v_{dqsh}^r \quad (1)$$

위첨자에서 r은 동기좌표계, 아래첨자에서 s는 고정자, r은 회전자, h는 주입 고주파, k는 양의 비례상수를 의미한다.

3. 제안된 센서리스 방법

회전자 인버터 내장형 동기 전동기는 전력전달을 위하여 이 미 고주파 전압을 주입하고 있기 때문에, 별도의 신호를 추가하지 않고 이 전압을 이용하여 센서리스를 적용하는 방법을 제안하고자 한다. 신호 주입 센서리스 방법은 고주파 주입 전압과 전류의 방정식으로부터 각도 또는 각도 오차에 대한 정보를 추출하는 원리로 동작하므로, 식 (2)와 같이 회전자의 d축과 q축의 고주파 전류 반응에 돌극성을 부여하면 고정자에서 각도 오차 정보를 추출할 수 있게 된다.

$$i_{drh}^r = -k_d v_{dsh}^r, i_{qrh}^r = -k_q v_{qsh}^r, k_d \neq k_q \quad (2)$$

식(2)의 돌극성이 있는 상태에서 추정 좌표계의 d축과 q축에 식 (3)과 같이 전압을 주입하면, 추정 좌표계 고정자 인버터에 흐르는 전류는 식 (4)로 근사할 수 있다. 위첨자 \hat{r} 은 추정 좌표계, \sim 은 실제 값과 추정 값의 오차, V_{inj} 는 주입하는 고주파 전압의 크기, ω_h 는 주입하는 각주파수를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^{\hat{r}} \\ v_{qsh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} = V_{inj} \begin{bmatrix} \sin \omega_h t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dsh}^{\hat{r}} \\ i_{qsh}^{\hat{r}} \end{bmatrix} \approx \frac{X_m V_{inj}}{X_s} \begin{bmatrix} (k_d \cos^2 \tilde{\theta}_r + k_q \sin^2 \tilde{\theta}_r) \sin \omega_h t \\ -\frac{\sin 2\tilde{\theta}_r}{2} (k_d - k_q) \sin \omega_h t \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때, 식 (5)와 같이 신호처리를 하면, 고정자 q축 고주파 전류로부터 각도 정보를 추출할 수 있게 된다.

$$\varepsilon_f = LPF(i_{qsh}^r \sin \omega_h t) \approx \frac{X_m V_{inj}}{2X_s} (k_d - k_q) \tilde{\theta}_r \quad (5)$$

이 성분이 각도 오차에 대한 정보를 가지고 있으므로 적절한 추정기를 통해 추정 각과 추정 속도를 얻을 수 있다.

표 1 회전자 인버터 내장형 동기 전동기의 제정수
Table 1 Machine parameters of SMI IR

극수	6	정격 속도	1200[r/min]
고정자 정격 전압	220[V _{rms}]	고정자 정격 전류	20[A _{peak}]
회전자 정격 전류	25[A _{peak}]	R _s	0.066[Ω]
L _m	14.3[mH]	L _{ls} , L _{lr}	0.97[mH]

4. 실험 결과

실험에 사용한 회전자 내장형 동기 전동기의 제정수는 표 1에 제시하였다.

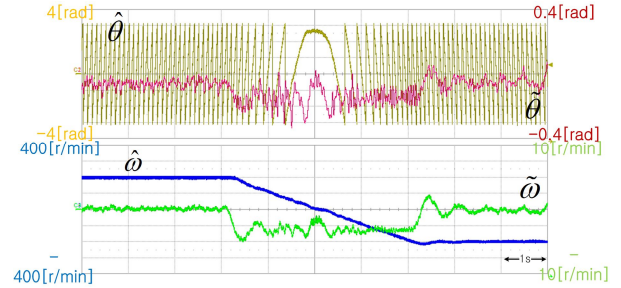


그림 3 제안한 센서리스 알고리즘을 사용한 속도제어 실험 결과[200r/min → -200r/min]

Fig. 3 Experimental result of speed control with proposed sensorless algorithm [200r/min → -200r/min]

제안된 센서리스 알고리즘을 확인하기 위하여 수행한 속도 제어에 대한 파형을 그림 3에 제시하였다. 각각 추정 각과 각도 오차, 추정 속도와 속도 오차를 보여주고 있다. 부하기의 토크 지령이 없는 무부하 상태에서 회전자 내장형 동기전동기로 200r/min에서 200r/min까지 속도를 제어하였다. 속도 변화 동안 속도 오차는 평균적으로 3r/min이며, 최대 5r/min이었다. 각도 오차는 평균적으로 0.2rad이었으며, 최대 0.32rad이었다.

5. 결 론

본 논문에서는 회전자 인버터 내장형 동기전동기에 적용 가능한 고주파 신호주입 센서리스 알고리즘이 제안되었다. 기존의 전력전달을 위해 사용하는 고주파 전압과 고주파 전류를 사용하여 추가적인 손실이나 하드웨어 없이 센서리스 알고리즘을 적용하였다. 이를 위하여 고정자 고주파 주입 전압 대비 회전자 고주파 전류의 비를 d축과 q축에 서로 다르게 제어하는 가상의 돌극비 개념을 도입하였다. 이는 실제 모터에 자기적인 돌극비가 존재하지 않거나 그 크기가 미미하더라도 적용할 수 있으며, 제안된 알고리즘은 실험을 통해 200r/min에서 200r/min으로 센서리스 속도제어 할 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Kim, J. I. Ha, S. K. Sul, "PWM Switching Frequency Signal Injection Sensorless Method in IPMSM", *IEEE Trans, Ind. Appl.*, Vol. 48, no. 5, pp. 1576-1587, Sept./Oct., 2012

[2] 정은수, 설승기, 이병화, 홍정표, 하정익, "회전자 인버터 내장형 브리시리스 동기 전동기에서의 전력 전달을 위한 계자 전류의 제어", 대한전기학회 전자기기 및 에너지 변환 시스템분회 추계학술대회 논문집, 195-197, 2011, 10.