가변자속 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어

양현석*, 이광운*, 신덕식**, 조주희**, 김근영***,
목포해양대학교*, 전자부품연구원**, 윌링스***

Sensorless Control of Variable Flux Permanent Magnetic Synchronous Motor

Hyeon Seok Yang*, Kwang Woon Lee*, Duck Shick Shin**, Ju Hee Cho**,
Guen Yeong Kim***

Mokpo National Maritime Univ*, Korea Electronics Technology Institute**, Willings***

ABSTRACT

가변자속 영구자석 동기전동기는 자속의 변화에 따라 전동기의 제정수도 변화하므로, 수학적 모델 기반의 역기전력 추정 센서리스 제어를 적용하는 경우 제정수 오차로 인해 센서리스 제어 성능이 저하된다. 본 논문에서는 3kW급 가변자속 영구자석 동기전동기에 대해서 자속 가변에 따른 전동기 제정수 변화를 살펴보고, 이를 기반으로 가변자속 영구자석 동기전동기에 적합한 센서리스 제어 알고리즘에 대해 살펴보고자 한다.

1. 서 론

약자속 제어 없이도 넓은 속도 범위에서 운전이 가능한 가변자속 영구자석 동기전동기에 대한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 영구자석 동기전동기는 약자속 운전 영역에서 과도한 약자속 전류 공급으로 인해 효율이 저하되는 문제가 있다. 반면에 가변자속 영구자석 동기전동기는 영구자석의 자속의 크기를 가변할 수 있는 별도의 감자/착자 구조를 갖추고 있어 운전조건에 맞추어 영구자석의 자속을 조절하기 때문에 효율을 보다 더 향상시킬 수 있다.

역기전력에 기반하는 센서리스 제어는 전동기의 수학적 모델로부터 역기전력을 추정하고, 추정 역기전력으로부터 회전자의 속도 및 위치 정보를 추출하므로, 전동기 제정수 변동에 따라 센서리스 제어 성능이 크게 영향을 받는다.

가변자속 영구자석 동기전동기는 영구자석의 자속 변화에 따라 자기회로의 제정수가 변화하므로 운전조건 및 가변되는 자속의 변화에 따라 전동기의 제정수 역시 크게 변화한다. 특히 가변자속 영구자석 동기전동기의 역기전력 상수는 가변자속에 직접적인 영향을 받는다.

본 논문에서는 3kW급 가변자속 영구자석 동기전동기에 대해서 자속 가변에 따른 전동기의 제정수 변화를 살펴보겠다. 그리고 초기상태에서 가변자속 영구자석 동기전동기에 신호를 인가하여 제정수를 추정한 후, 추정된 제정수를 기반으로 가변자속 영구자석 동기전동기에 적합한 센서리스 제어 알고리즘에 대해 살펴보고, 실험을 통해 센서리스 제어성능을 평가하고자 한다.

2. 자속변화에 따른 가변자속 영구자석 동기전동기의 제정수 변동 특성

그림 1은 본 논문에서 사용하는 가변자속 영구자석 동기전동기로 6극 9슬롯 구조를 가진다. 회전자의 ND자석은 착자 상태를 유지하고, SmCo자석은 별도의 착자/감자 수단을 통해 자속량이 변경되도록 전동기가 설계되었다. 그림 1의 전동기에 대해 SmCo자석의 착자 및 감자 상태에 따른 전동기 제정수의 측정 값은 표 1과 같다. 표 1에서 SmCo자석의 가변에 따라 역기전력 상수는 크게 변화한다. 인덕턴스는 SmCo자석이 착자되면 d축 인덕턴스의 변동이 있는 것을 볼 수 있다.

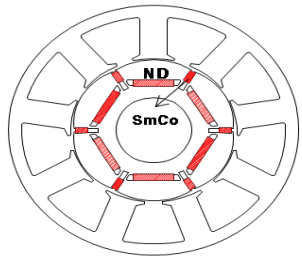


그림 1 가변자속 영구자석 동기전동기의 단면도

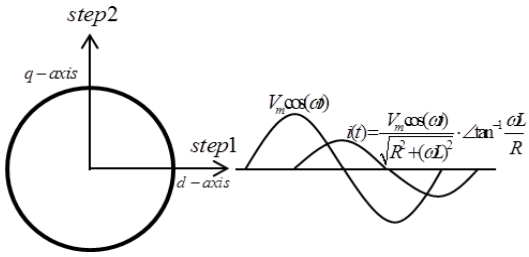
표 1 가변자속 영구자석 동기전동기의 제정수

	SmCo(감자)	SmCo(착자)
Rs[Ω]]	0.23	0.23
Ld[mH]	5.94	5.724
Lq[mH]	7.375	7.392
Ke[Wb]	0.044563	0.076394

3. 가변자속 영구자석 동기전동기의 제정수 추정

전동기 제정수 추정을 위해 d축과 q축에 신호를 인가하는데, 저항은 서로 다른 두 레벨의 직류신호를 d축에 인가하여 각각의 전압의 차에 대한 전류응답의 차의 비로 추정하며, 인덕턴스는 그림 2와 같이 교류신호를 d축과

q축에 인가하여 출력된 전류응답을 가상dq방식을 이용해 추정시간을 최소화 한다[2],[3].



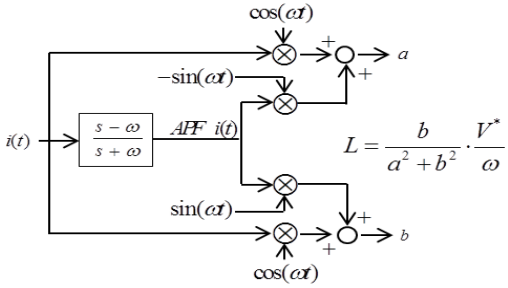


그림 2 인덕턴스 추정 방법.

4. 가변자속 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어

표 1에서 착자 및 감자에 상태에 따라 전동기의 제정수인 역기전력 상수가 크게 변화한다. 역기전력 상수의 변화는 역기전력 기반 센서리스 제어의 속도 및 위치 추정 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 추정된 $\gamma-\delta$축 확장 유기기전력을 서로 나누면, 역기전력 항의 크기가 서로 상쇄 되어 역기전력 상수의 영향을 받지 않고 위치오차를 추정할 수 있다[1].

식 (1)은 확장 유기전력이다. i_d, i_q, L_d, L_q는 각각 $d-q$축 전류 및 인덕턴스, ω_r은 회전자 전기각속도, Ke는 역기전력 상수이고, p는 미분연산자이다.

$$E_{ex}=\omega_r[(L_d-L_q)i_d+Ke]-(L_d-L_q)(pi_q) \tag{1}$$

식 (2)는 동기 좌표계 $\gamma-\delta$축에서의 영구자석 동기전동기의 전압방정식이다. $v_\gamma, v_\delta, i_\gamma, i_\delta$는 $\gamma-\delta$축 전압 및 전류이고, R은 상저항이다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R+pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_q & R+pL_d \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix}+E_{ex}\begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (3)을 $\gamma-\delta$축에서의 확장 유기전력이라고 한다면, 그림 3에서와 같이 확장 유기전력 $E_{\gamma\delta}$를 추정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix}=E_{ex}\begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

$E_{\gamma\delta}$의 추정 값 $\widehat{E_{\gamma\delta}}$는 식 (4)와 같고,

(4)

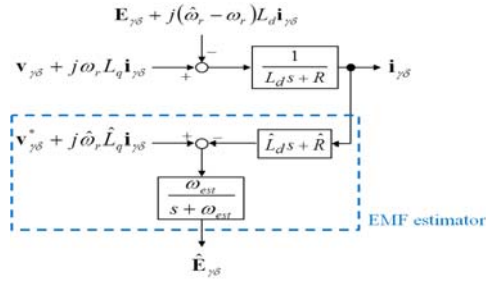


그림 3 확장 유기전력 추정기의 구조

식 (4)를 이용하여 위치오차의 추정 값 $\Delta\hat{\theta}$를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta\hat{\theta}=\tan^{-1}\left(\frac{-\hat{e}_\gamma}{\hat{e}_\delta}\right) \tag{5}$$

그림 4는 가변자속 영구자석 동기전동기의 제정수 추정 및 확장 유기전력 기반의 센서리스 기동 실험 결과이다.

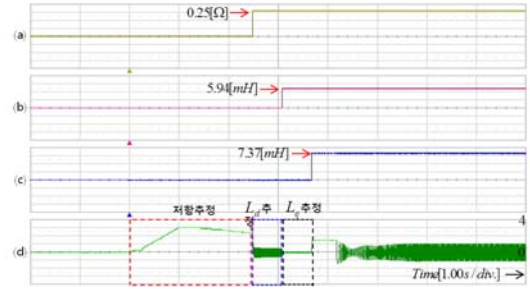


그림 4 제정수 추정 및 센서리스 기동 실험 파형.
(a) 저항 추정 값[Ω], (b) Ld추정 값[mH], (c) Lq 추정값[mH], (d) 상 전류[A]

5. 결 론

본 논문에서는 자속가변에 따른 전동기의 제정수 변화를 살펴보고, 초기상태에서 가변자속 영구자석 동기전동기에 신호를 인가하여 제정수를 추정한 후, 추정된 제정수를 기반으로 가변자속 영구자석 동기전동기에 적합한 센서리스 제어 알고리즘을 살펴보았다. 실험을 통한 가변자속 영구자석 동기전동기의 제정수 추정 값 오차는 20%안에 들어오며, 추정된 제정수에 기반한 확장 유기전력 기반의 센서리스 제어성능은 만족할 만한 성능을 보였다.

참 고 문 헌

[1] 이광운, 이용재, 하정익, “ 영구자석 동기전동기의 역기전력 기반 센서리스 알고리즘 분석”, 전력전자학회 2011년도 학술대회 논문집, pp. 204 205, 2011.7

[2] 김병섭, 최종우, “교류전동기의 주기적인 토크리플 보상알고리즘”, 전력전자학회 2006년도 전력전자학술대회 논문집, pp. 331 332, 2006.6

[3] 한용수, 신호준, 하정익, “초기 상태에서의 매입형 영구자석 전동기 제정수 및 회전자 초기각 추정 기법”, 전력전자학회 2011년도 학술대회 논문집, pp. 198 199, 2011.7