

속도 관측기를 적용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 직접토크제어

박정우 이동명
홍익대학교 전자전기공학부

Observer-based Sensorless Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors

Jeong-Woo Park and Dong-Myung Lee
School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

산업계에 널리 쓰이고 있는 회전자 자속기준 벡터제어(FOC)와 달리 직접토크제어(DTC)는 고정자 자속기준으로 토크와 자속을 직접 제어한다. 토크는 전류센서를 이용하여 검출한 고정자 전류와 고정자 자속을 곱하여 구한다. 고정자 자속은 매우 빠르게 스위칭되는 전압벡터지령을 이용하여 얻게 되므로, 고정자 자속각을 이용한 속도추정에 어려움이 있다. 따라서, 본 논문은 관측기를 이용한 직접토크제어의 속도 센서리스 구현 기법을 제안하고, 기존의 속도추정 기법과 제안하는 기법을 시뮬레이션을 통해 비교한다.

1. 서론

I. Takahashi와 T. Noguchi에 의해 제안된 스위칭 테이블 기반 직접토크제어(ST-DTC)^[1]는 그림 1에서 토크지령과 현재 토크, 자속지령과 현재 자속을 각각 히스테리시스 제어기를 이용하여 비교하고, 스위칭 테이블을 이용하여 전압벡터를 인버터에 직접 가하는 방식이다. PWM을 위한 연산 동작이 없어서 구조가 단순하고 빠른 응답성이 특징이지만, 스위칭 주기가 자주 바뀌고, 토크와 자속의 리플이 큰 것이 단점이다.

고정자 자속은 매우 빠르게 스위칭되는 전압벡터지령을 이용하여 얻게 되므로, 고정자 자속각을 이용하여 속도를 직접 추정할 수 없게 된다. ST-DTC에서 고정자 자속각을 직접 미분하여 속도를 계산하는 것 혹은 역함수 미분의 결과를 사용하는 것은 잡음이 심각하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저역통과필터를 사용한다. 하지만 저역통과필터를 사용해도 잡음이 심각하여 구현이 불리하다. 본 논문은 ST-DTC를 이용할 때 자속추정과 속도추정에서 속도 관측기를 사용한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

2. 관측기를 이용한 센서리스 직접토크제어

2.1 직접토크제어(Direct Torque Control)

관측기를 이용한 센서리스 DTC 기법의 전체구조는 아래의 그림 1과 같다. 직접토크제어는 토크와 고정자자속의 크기를 이용하여 제어가 수행된다. 고정자 자속의 크기와 토크의 크기는 아래와 같이 구한다. 여기서, 위첨자 s는 정지좌표계, 아래 첨자의 s는 고정자에 대한 값을 의미한다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s) \tag{1}$$

$$\lambda_{dqs}^s = \int_{\tau=0}^t (v_{dqs}^s - R_s i_{dqs}^s) d\tau + \lambda_{dqs}^s |_{t=0} \tag{2}$$

$$|\lambda_s| = \sqrt{(\lambda_{ds}^s)^2 + (\lambda_{qs}^s)^2} \tag{3}$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}^s}{\lambda_{ds}^s} \right) \tag{4}$$

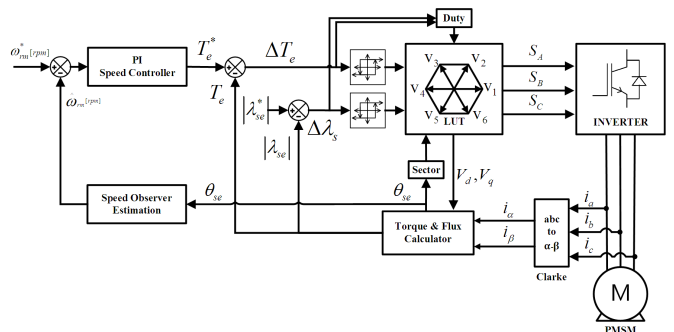


그림 1. 직접토크제어의 구조

식(4)의 고정자 자속각을 통해 현재 섹터를 판별한다. 판별된 섹터로 표 1의 Look Up Table (LUT)을 참조하여 전압벡터가 정해지고 인버터에 직접 가해지며, d 축 전압과 q 축 전압의 값이 얻어진다.

표 1 PMSM에서 DTC기법의 스위칭 룩업테이블

$\Delta\lambda_s^s$	ΔT_e	Sector1	Sector2	Sector3	Sector4	Sector5	Sector6
1	1	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
	-1	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$
-1	1	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
	-1	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$

2.2 제안하는 관측기 기반 센서리스 직접토크제어 (Observer-based sensorless DTC)

회전자의 전기적 속도를 구하기 위하여, 동기전동기는 정상 상태에서 부하각이 일정해지므로 고정자 자속의 전기적 속도인

동기속도와 회전자의 전기적 속도가 같다는 점을 이용하여 식 (5),(6)을 이용하여 회전자의 전기적 속도를 구할 수 있다.

$$\omega_{se} = \frac{d\theta_{se}}{dt} = \frac{d}{dt}(\theta_{re} + \delta) = \omega_{re} + \frac{d\delta}{dt} \approx \omega_{re} [S.S] \quad (5)$$

$$\omega_{se} = \frac{\lambda_{ds}^s (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) - \lambda_{qs}^s (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s)}{(\lambda_{ds}^s)^2 + (\lambda_{qs}^s)^2} \approx \omega_{re} [S.S] \quad (6)$$

그러나 미분을 이용하는 식(5)는 잡음에 매우 민감하여, 현실에서 보정계수미분을 하더라도 사용할 수 없으며, 고정자 전압을 이용하는 식(6)은 매우 빠르게 스위칭 되는 고정자전압의 영향으로 오차가 크다. 따라서, 본 논문에서는 관측기를 이용하여 고정자 자속각을 통해, 회전자 속도를 얻는 속도추정기법을 제안한다.

2.3 속도 관측기(Speed estimation using observer)

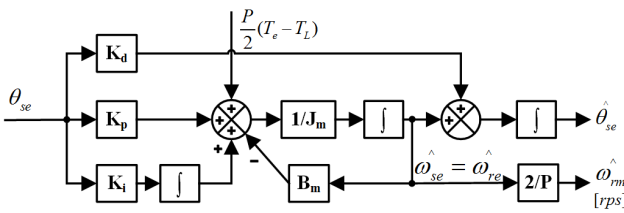


그림 2. 속도 관측기 구조

속도 관측기는 그림 2와 같이 설계하였다. 식(4)의 고정자 자속각이 속도관측기의 입력이다.

식(7)의 전동기 식을 식(8)의 관측기 형태로 변경한다.

$$T_e = J_m \frac{d\omega_{se}}{dt} + B_m \omega_{se} + \frac{2}{P} T_L \quad (7)$$

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (8)$$

관측기의 이득행렬 L은 식(9)을 이용하여 구한다.

$$\det[sI - (A - LC)] = 0 \quad (9)$$

삼중근 β 을 갖는다고 설정하여, 관측기이득 l_1, l_2, l_3 를 구한다.

$$l_1 = -3\beta - \frac{B_m}{J_m}, l_2 = 3\beta^2 - \frac{B_m}{J_m} l_1, l_3 = \beta^3 \frac{2J_m}{P} \quad (10)$$

그림 2에서 $K_p = J_m l_2, K_i = -l_3, K_d = l_1$ 로 한다.^[2]

2.4 시뮬레이션 결과(Simulation results)

Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 식(5)와 식(6)에 저역통과필터(LPF)를 사용하여 얻은 속도 값이다. LPF로 인한 시간지연이 있으며, 잡음이 심각하여 사용하기 힘들다.

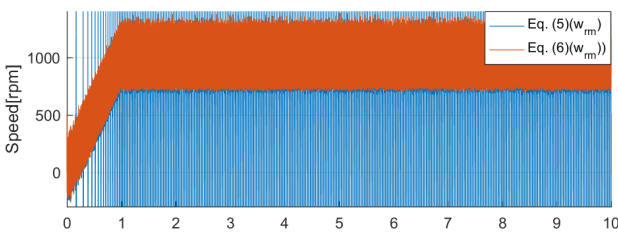
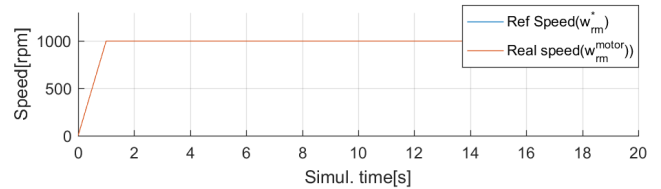
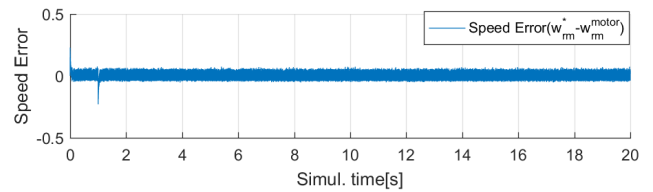


그림 3. 고정자 자속각의 직접미분으로 추정된 전동기 속도와 역함수 미분의 결과로 추정된 속도

그림 4(a)는 시뮬레이션 상의 실제 모터의 기계적 속도[rpm]와 고정자 자속각으로 관측기를 통해 얻은 모터속도[rpm]를 비교하였다. 그림 4(b)는 그 둘 간의 오차를 나타낸다. 오차가 매우 적어 안정적으로 추정됨을 알 수 있다. 그림 5는 계산된 고정자 자속각과 관측기로 추정된 고정자 자속각을 비교하였다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 제안한 기법의 실제모터의 속도와 추정된 속도 (b) 실제모터의 속도와 추정속도의 차이

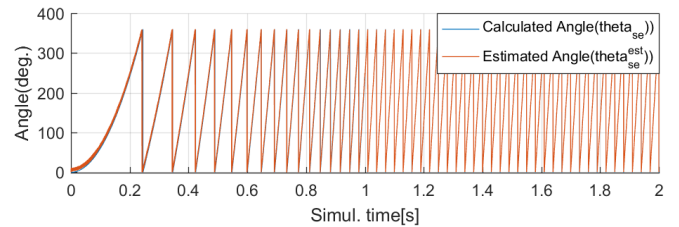


그림 5. 고정자 자속각(식(4))과 관측기로 추정된 고정자 자속각

3. 결론

ST-DTC는 구조가 단순하며, 응답성이 빠르다. 단순한 구조로 고정자 자속이 계산될 수 있다. 센서리스 구동을 위한 기존의 속도계산방식은 잡음이 심각하여 적용에 어려움이 있다. 본 논문은 속도 관측기를 이용하여 고정자 자속각으로 회전자속도를 추정하는 기법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음.(2016R1A2B4011954)

참고 문헌

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 22, no. 5, pp. 820 - 827, Sep. 1986.
- [2] 설승기, "전기기기 제어론," 홍릉과학출판사, 2008.