

칼만 필터를 이용한 전동기의 고정자 저항값 검출 방법

황상진, 신동철, 이동명
홍익대학교 전자전기공학부

Estimation of Stator Resistance by Kalman Filter

Sang-Jin Hwang, Dong-Cheol Shin, and Dong-Myung Lee

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

ABSTRACT

전동기 제어에 있어서, 전동기의 상수 추정이 필요한 경우가 있다. 예를 들면 고정자 자속기준 벡터제어시에는 고정자 저항의 정보가 필요하다. 본 논문에서는 전동기의 고정자 저항값을 검출 기법을 제안한다. 테드타임의 영향을 제거하기 위하여, 차동 성분의 전압, 전류값을 사용하며, 측정 노이즈 등에 따른 오차를 저감시키기 위해 Kalman Filter 알고리즘을 적용한다. 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 타당성을 보인다.

1. 서론

전동기제어 알고리즘 중에 정확한 전동기 상수를 요구하는 알고리즘이 존재한다. 예를 들면 DTC (Direct Torque Control)를 이용한 전동기를 제어하는 경우 자속 및 토오크의 크기를 연산할 때 전동기 저항값이 필요하다. 식(1)은 DTC에서 토오크 제어시 필요한 토오크식이다[1]. 식(1)의 자속값은 식(2)와 같이 전압과 전류, 전동기 상수 중의 하나인 저항 값을 이용하여 얻는다. 식(2)에서 알 수 있듯이, 전동기의 고정자 저항(R_s)값에 오차가 존재하는 경우 자속 계산에 오차가 있음은 자명하다. R_s 는 전동기의 운행에 따라 발열에 의해서 변동하는 값으로 그 변동 범위가 50%에 달한다. 식(2)에서 부정확한 R_s 정보로 인해 식(3)에서 계산되는 자속의 크기 및 식(4)로부터 계산되는 고정자 자속의 위치 검출에서 오차를 수반하게 된다. 따라서 전동기의 고정자 저항값을 정확히 검출하여야 한다.

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

$$\lambda_{dqs}^s = \int e_{dqs}^s d\tau = \int (v_{dqs}^s - R_s i_{dqs}^s) d\tau \quad (2)$$

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

$$\theta_e = \tan^{-1}(\lambda_{qs}^s / \lambda_{ds}^s) \quad (4)$$

여기서, T_e 는 전자기 토크이며, λ 는 자속, θ_e 는 고정자 자속의 위치이다. 위첨자 s 는 정지좌표계(stationary reference frame)상의 값을 의미한다. 한편, 아래첨자 s 는 고정자(stator)를 의미한다.

2. 제안하는 고정자 저항값 검출 방법

식(5)는 표면부착형 PMSM의 고정자 전압 방정식이다. 여기서, λ_f 는 쇠교자속, L_s 는 고정자 인덕턴스, R_s 는 고정자 저항, v_{ds} 는 d축 고정자 전압, v_{qs} 는 q축 고정자 전압, i_{ds} , i_{qs} 는 각각 d축 고정자 전류, q축 고정자 전류, $\rho = d/dt$ 이다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho L_s + R_s & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & \rho L_s + R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

표면 부착형 영구자석 전동기의 토오크는 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 매입형 영구자석 전동기에 대한 토오크는 식(7)과 같이 나타난다. 매입형 영구자석 전동기는 돌극성에 의하여 표면부착형 영구자석 전동기의 인덕턴스로 L_s 가 d, q축에 대하여 각각 L_d , L_q 로 나타난다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_f i_{qs} \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_f i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}) \quad (7)$$

식(6)에서 보면, i_{ds} 는 토오크 발생에 기여하지 않으며 식(7)의 IPM에서의 토오크는 $i_{qs}=0$ 인 상태에서는, i_{ds} 는 토오크에 기여하는 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 전동기가 정지시에, q축 전류는 0A으로 고정된 채, d축 전류를 가변하여, 식(8)과 같이 전압 및 전류의 증가율을 통한 저항 계산을 기본 식으로 한다.

$$R_s = \frac{\Delta v_{ds}}{\Delta i_{ds}} \quad (8)$$

식(8)을 k 차, $k-1$ 차의 값으로 즉 한번의 차동값의 형태로도 구할 수 있으나, 전류 측정 등에 의한 계산의 오류를 가져올 수 있다. 따라서, 이러한 오류의 방지를 위하여 Kalman Filter를 적용하고, 이를 위해 식(8)을 아래의 이산 형태로 표현하면 식(9)-(13)과 같다. i_{ds} , v_{ds} 는 회전좌표계의 값이다.

$$z(k) = H(k) \cdot x(k) \quad (9)$$

$$\hat{x}(k) = A\hat{x}(k-1) \quad (10)$$

$$z(k) = v_{ds}^*(k) - v_{ds}^*(k-1) \quad (11)$$

$$H(k) = i_{ds}(k) - i_{ds}(k-1) \quad (12)$$

$$\hat{x}(k) = R_s(k) = R_s(k-1) \quad (13)$$

한편, Kalman Filter 수식은 식(14)-(17)과 같다[2].

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}, P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (14)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (16)$$

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (17)$$

여기서, K 는 Kalman Filter 이득, P 는 state 공분산 벡터를 의미한다. $\hat{\cdot}$ 는 예상치, k 와 $k-1$ 는 각각, 현재치와 과거치를 칭한다. Q 는 process 노이즈의 공분산 행렬, R 은 측정 노이즈의 공분산 행렬이다.

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서, 한편 식(11)를 통해서 $z(k)$ 을 구하는 경우에는 지령치를 사용하였다. v_{ds} 의 연산에서는 a, b, c 상의 전압은 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 의 극성에 영향을 받는다. 그러나, 본 논문에서와 같이 i_{ds} 를 회전좌표값으로 사용하는 경우 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 의 값은 i_{ds} 가 0A에서 일정값으로 증가시에 극성이 한쪽 부호를 유지하고 있으므로, 식(11)에서와 같이 $v_{ds}(k) - v_{ds}(k-1)$ 등으로 인가전압의 차이를 구하는 경우 테드타입에 의한 전압 왜곡분은 소멸된다. 그림 1에서 보면 R_s 의 검출을 위하여 그림 1(상)의 그림처럼 i_{ds} 가 0에서 3A로 증가시에 그림 1(하)에서 볼 수 있듯이 위로부터 i_{bs}, i_{as}, i_{cs} 순서의 상전류는 각각 2.59A, 0, -2.59A로 i_{ds} 와 같은 형상으로 변동하여 감을 볼 수 있다. 본 연구에서 보인 아래의 시뮬레이션에서는 회전좌표계 q 축을 a 상인 경우를 0A지점으로 정한 경우이다.

따라서, $i_{ds}=3A, i_{qs}=0A$ 이면, 본 시뮬레이션과 같이 자속의 위치가 0° 인 경우, $i_{as}=0A, i_{bs}=3*\cos(30^\circ)=2.59A, i_{cs}=-i_{bs}=-2.59A$ 가 됨을 볼 수 있다. 한편 전류의 방향이 + 혹은 -의 한쪽 극성만을 가지므로 테드타입에 대한 전압 증가분 혹은 감소분이 동일한 크기를 가지므로 식(18)과 같이 차동분 전압 적용 시 지령치의 변동분은 실제치의 변동분과 일치한다. 즉 식(18) 관계가 있음을 알 수 있다.

$$z(k) = v_{ds}^*(k) - v_{ds}^*(k-1) = v_{ds}(k) - v_{ds}(k-1) \quad (18)$$

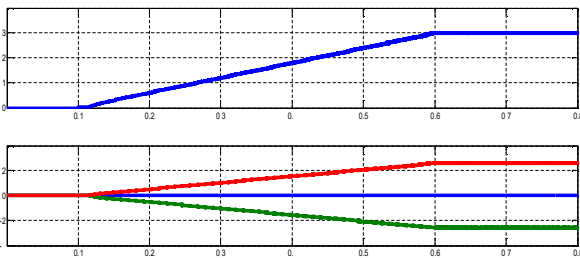


그림 1. (상) i_{ds} 과 (하) a, b, c 상 전류의 파형

그림 2, 3는 본 알고리즘을 통한 추정된 저항의 파형을 보여준다. 실제 그림 2에서는 초기 저항값이 크게 설정된 경우이다. 초기 저항 설정값 8.5Ω 에서 실제 전동기의 저항값인 6.3Ω 으로 수렴되어감을 볼 수 있다. 그

림 3는 초기 저항 설정값이 2Ω 으로 실제치에 비해 낮게 설정된 경우로, 알고리즘이 수행됨에 따라 실제 전동기 저항값인 6.3Ω 으로 수렴됨을 볼 수 있다. 그림 3, 4의 제목에 Kalman Filter에 사용된 식(14), (15)의 Q, R 값도 나타내었다.

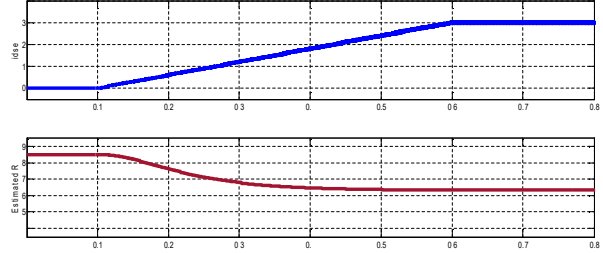


그림 2. 초기치 $R_s=8.5\Omega$ 인 경우의 시뮬레이션 파형
(상) i_{dse} 전류 지령, (하) 추정된 저항값($Q=1, R=0.3$)

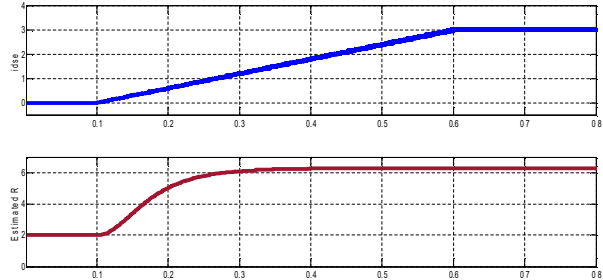


그림 3. 초기치 $R_s=2\Omega$ 인 경우의 저항 추정 파형
(상) i_{dse} 전류 지령, (하) 추정된 저항값($Q=1, R=0.1$)

4. 결론

본 논문에서는 측정 노이즈 등에 따른 계산 오차를 저감하기 위해 Kalman Filter를 적용하여 고정자 저항값을 검출하는 알고리즘을 제시하였다. 본 알고리즘은 고정자 자속기준 벡터 제어, DTC 등과 같이 고정자 저항값이 필요한 알고리즘에 적용시 전동기 제어 성능 향상을 가져올 것이다. 본 알고리즘은 차동 성분의 전압 및 전류의 증가율을 통하여 테드타입의 영향을 배제하였다. 시뮬레이션을 통하여 본 알고리즘의 타당성을 보였다.

본 논문은 2016년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업임(No. NRF-2016R1A 2B4011954).

참고 문헌

- [1] J.W. Park and D.M. Lee, "A new direct torque control scheme of an induction motor using duty ratio modulation," *Journal of Elec. Eng. and Tech.*, vol. 13, no. 3, pp. 1223-1231, 2018.
- [2] D.S. Nair, G. Jagadanand, and S. George, "Sensorless direct torque controlled BLDC motor drive with Kalman filter algorithm," *IECON 2017*, Beijing, pp. 2160-2165, 2017.