

철도 차량용 전속도영역 IPMSM 센서리스 알고리즘

Sensorless Algorithm of IPMSM Drive for Railway Vehicle in Wide Speed Range

황세운*, 길도영*, 박진호**, 이창희**, 이준석*†

Se-Woon Hwang*, Do-Young Gil*, Jin-Ho Park**, Chang-Hee Lee**, June-Seok Lee*†

초 록 본 논문에서는 철도 차량용 전속도영역 IPMSM 센서리스 알고리즘을 제안한다. 센서리스 구동 시작 시 초기 위치에 대한 정보가 필수적이다. 따라서 회전자의 극성을 찾기 위해 펄스 전압을 짧게 인가하여 극성을 판별하고 동기좌표계 d축에 구형파 전압을 주입하여 회전자 초기 위치를 추정한다. 역기전력 관측이 어려운 영속과 저속 영역에서는 추정된 동기좌표계 d축에 구형파 전압을 주입하여 상태 필터를 통해 회전자의 위치와 속도를 추정한다. 역기전력 관측이 가능한 중·고속 영역에서는 선형 확장 상태 관측기를 사용하여 역기전력을 관측하고 PLL을 사용하여 회전자의 위치와 속도를 추정한다. 본 논문의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

주요어 : 센서리스, 극성 판별, 초기 위치 추정, 구형파 전압 주입, 상태 관측기

1. 서 론

철도 차량에서 널리 쓰이는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 순시 토크 제어를 위해서 회전자 자속의 위치 정보가 필수적이다. 위치 정보를 검출하기 위해 센서를 사용하게 되면 시스템의 가격 및 부피가 상승하며 신뢰성이 저하된다.

본 논문에서는 철도 차량용 IPMSM의 전속도영역 센서리스 알고리즘을 제시한다. 회전자 초기 위치 정보를 검출하는 알고리즘을 제안하고 이를 바탕으로 저속 영역에서 전압 주입 센서리스 제어 알고리즘과 역기전력 관측을 통한 중·고속에서의 센서리스 제어 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1 극성 판별 알고리즘^[1]

영구자석동기전동기는 회전자의 위치에 따라

고정자 전류 인가 시 전동기 내부의 자속 포화에 차이가 발생한다. 따라서 인버터를 통해 펄스 전압을 인가하여 회전자의 극성을 판별한다.

2.2 초기 위치 추정 알고리즘

추정된 동기 좌표계 d축에 구형파 전압을 인가했을 때 유기되는 전류는 식(1)과 같고 위치 오차가 0이면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{dh}^s \\ i_{qh}^s \end{bmatrix} = V_{\in j} T_s \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_r) \cos(\tilde{\theta}_r) + \sin(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} + \frac{\sin(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \\ \frac{\sin(\theta_r) \cos(\tilde{\theta}_r) - \cos(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} - \frac{\cos(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dh}^s \\ i_{qh}^s \end{bmatrix} = \frac{V_{\in j} T_s}{L_{dh}^r} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $V_{\in j}$ 는 주입한 전압 크기, T_s 는 샘플링 시간, θ_r 은 회전자 위치, $\tilde{\theta}_r$ 은 위치 오차를 나타낸다. 이를 통해 식(3)과 같이 역탄젠트를 이용하여 회전자 위치를 계산할 수 있다.

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{i_{qh}^s}{i_{dh}^s} \right) \quad (3)$$

주입해준 구형파 전압으로 인해 발생하는 고조파 전류와 고조파 성분이 제거된 기본파 전류를 계산하는 방법은 식(4)와 같다.

† 교신저자: 단국대학교 공과대학 전자전기공학
학과 (ljs@dankook.ac.kr)

* 단국대학교 공과대학 전자전기공학과

** (주) 다원시스 철도사업부 철도기술연구소

$$i_{dq1}^r = \frac{i_{dq}^r[k] + i_{dq}^r[k-1]}{2} \quad (4)$$

$$i_{dqh}^r = i_{dq}^r - i_{dq1}^r$$

2.3 구형파 주입 알고리즘

식(3)에서 계산된 회전자 위치로부터 Fig. 1의 상태 필터를 통해 회전자 위치와 속도를 추정한다.

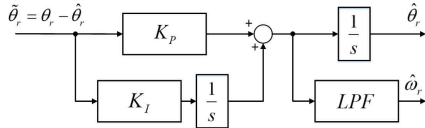


Fig. 1 PI State Filter

2.4 선형 확장 상태 관측기(Linear Extended State Observer, ILESO)^[2]

LESO 시스템은 단독으로 사용하면 추정된 역기전력의 지연이 발생하기 때문에 이를 보상하기 위해 RSIE 시스템을 적용한다. LESO 시스템에 RSIE 시스템을 적용한 ILESO식은 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{1d}^s &= \hat{x}_{1d}^s - i_d^s \\ p\hat{x}_{1d}^s &= \hat{x}_{2d}^s + b_0 u + f(\hat{x}_{1d}^s, t) - \beta_1 \epsilon_{1d}^s \\ p\hat{x}_{2d}^s &= -\beta_2 \epsilon_{1d}^s - G(t)\epsilon_{1d}^s \end{aligned} \quad (5)$$

ILES0 시스템을 통해 관측한 역기전력을 Phase-Locked Loop (PLL)의 입력으로 사용하여 위치와 속도를 추정할 수 있다.

Fig.2는 제안하는 알고리즘 블록도를 나타낸다.

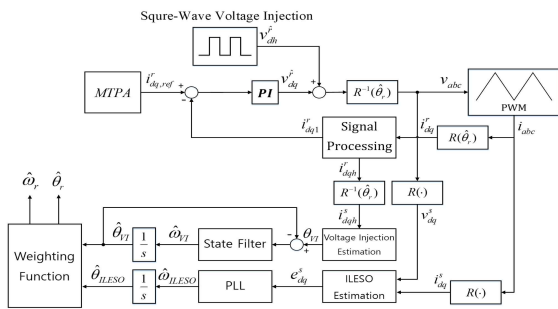


Fig. 2 Block diagram of Wide Speed Range Sensorless Algorithm

Table 1. IPMSM parameters

Parameter	Value
Rated Power	332 [kW]
Rated Current	350 [A]
Rated Frequency	125 [Hz]
Pole	6
Stator Resistance	0.039 [Ω]
d-axis Inductance	1.833 [mH]
q-axis Inductance	5.335 [mH]

2.5 시뮬레이션 검증

시뮬레이션은 Psim 툴을 사용하였다. DC-Link는 1500V이고 스위칭 주파수는 1kHz이다. Fig.3에서 극성 관별 시 200V의 전압을 인가하였고 구형파 주입 알고리즘을 위해 주입해준 전압은 50V이다. Fig.4와 같이 3가지 영역으로 나누어 전영역 센서리스 알고리즘을 수행하였다.

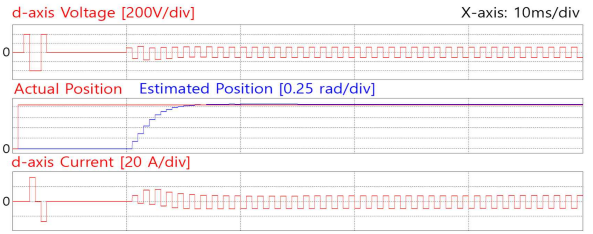


Fig. 3 Initial Position Estimation

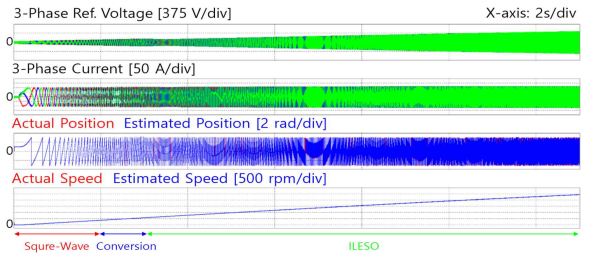


Fig. 4 Wide Speed Range Sensorless Algorithm

3. 결론

본 논문에서는 초기 위치 추정 알고리즘을 바탕으로 전영역에서의 센서리스 알고리즘을 제안하였으며 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1G1A1100297)

참고문헌

- [1] X. Wu, Y. Feng, S. Huang, X. Yuan, J. Gao, J. Zheng (2017) Initial Rotor Position Detection for Sensorless Interior PMSM With Square-Wave Voltage Injection, *IEEE Transactions On Magnetics*, 53(11)
- [2] Y. Zhang, Z. Yin, C. Bai, G. Wang, J. Liu (2021) A Rotor Position and Speed Estimation Method Using an Improved Linear Extended State Observer for IPMSM Sensorless Drives, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 36(12), pp. 14062-14073