

유도전동기 자속 시지연을 고려한 약계자 운전 궤적에 따른 피드포워드 보상 기법

A Feedforward Compensation Method Based on Field-Weakening Operation Trajectory Considering Flux Linkage Delay in Induction Motors

김준석*, 이준희**, 류준형**, 이준석*†

Joon-Seok Kim*, June-Hee Lee**, Joon-Hyuong Ryu**, June-Seok Lee*†

초 록 본 논문에서는 유도전동기의 전 운전 영역에서 약계자 제어 성능을 향상시키기 위한 두 가지 피드포워드 보상 기법을 제안한다. 첫 번째 기법은 역행, 타행, 회생 모드로 전환되는 다양한 운전 조건을 분석하고, 이에 기반하여 최적의 d축 전류 지령 피드포워드를 계산함으로써 약계자 운전 성능을 개선한다. 두 번째 기법은 자속의 시지연 특성을 고려하여, 전체 약계자 영역에서 발생할 수 있는 d축 전류 지령 오차를 보상함으로써 제어 성능 저하를 최소화한다. 제안된 두 기법은 모두 실시간 제어 구현이 가능하며, 시뮬레이션을 통해 약계자 영역에서의 효과적인 성능 향상을 검증한다.

주요어 : 철도차량 추진시스템, 유도전동기, 약계자 제어, 피드포워드

1. 서 론

최근 친환경적이고 에너지 효율이 높은 운송 수단으로 철도 시스템의 중요성이 더욱 강조되고 있으며, 특히 고속철도 및 도시철도 차량은 높은 정격 속도와 넓은 운전 영역을 요구한다. 유도전동기는 가격 경쟁력, 견고성, 유지보수의 용이성 등의 장점으로 철도 차량에 널리 채택되어 왔다[1].

벡터 제어는 전동기의 전류를 회전자 자속에 정렬된 d-q축 좌표계로 변환하여 자속과 토크를 독립적으로 제어하는 방식이며, 약계자 영역에서는 고정자 d축 전류 I_{ds} 를 감소시켜 자속을 약화시키는 전략이 적용된다. 특히 철도차량은 고속 주행을 위해 전동기의 넓은 운전 범위와 높은 출력 밀도를 요구하며, 이에 따라 유도전동기의 고속 운전 및 약계자 제어는 필수적이다.

2. 본 론

2.1 약계자 운전 궤적에 따른 피드포워드 보상

유도전동기의 약계자 영역에서는 전압의 변화에 선제적으로 대응하여 보다 빠르고 안정적인 전류 제어를 위해 d-q축 전류 지령의 피드포워드를 사용한다[2]. 철도 차량은 역행, 타행, 회생 운전으로 전환되며, 이 중 타행 구간에서는 I_{ds} 제어 방식에 따라 손실 및 동특성이 달라진다. 타행 운전 시 I_{ds} 제어 방식은 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 방법 1은 I_{ds} 를 영전류로 제어하는 방식, 방법 2는 I_{ds} 를 그대로 유지하는 방식, 방법 3은 전압 타원 궤적을 따라 I_{ds} 를 제어하는 방식이다. 타행 운전 모드에서의 각 제어 방법에 따른 전류 궤적은 Fig. 1과 같다.

방법 1은 I_{ds} 와 고정자 q축 전류 I_{qs} 를 영전류로 제어하여 인버터 손실을 최소화하는 방식이며, 방법 2는 I_{ds} 를 유지하여 회생 구간 진입 시 자화 시간을 줄이기 위한 방식이다. 방법 3은 전압제한 타원을 따라 전류 궤적을 형성하여 자화 시간을 줄이고, Six-Step 제어 시 손실 저감 효

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

* 단국대학교 공과대학 전자전기공학과

** 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부

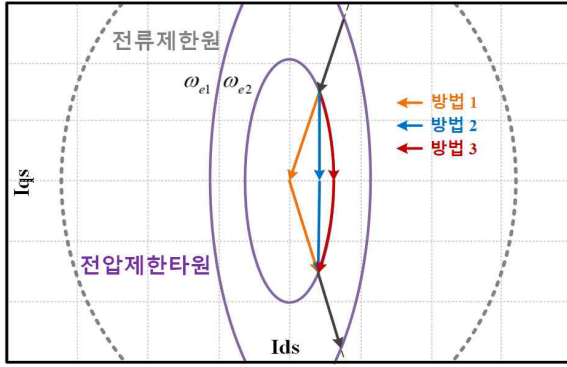


Fig. 1 Current vector trajectory according to the control method in coasting operation mode.

과도 기대할 수 있다. 그러나 방법 3에서는 적절한 I_{ds} 피드포워드가 없을 경우 제어기 성능에 따라 동특성이 저하될 수 있으며, 이에 따른 I_{qs} 감소에 대응하는 d축 전류 피드포워드는 아래와 같이 계산된다.

$$I_{ds,ff}^{coast} = \sqrt{\frac{V_{s,lim}^2 - (\omega_e \sigma L_s I_{qs})^2}{\omega_e L_s}} \quad (1)$$

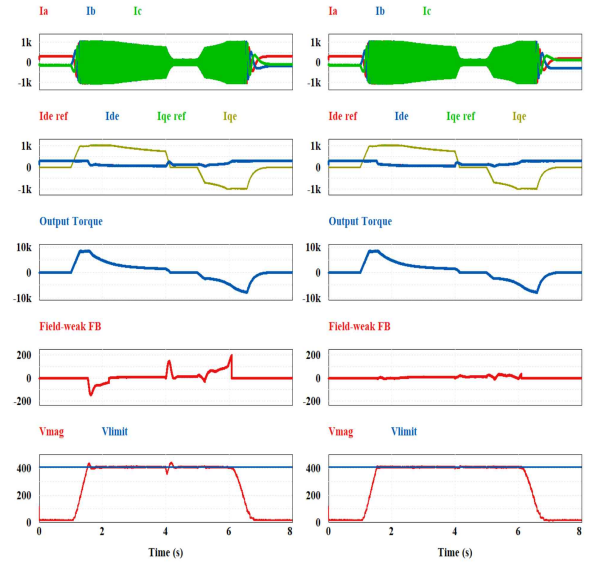
2.2 자속 시지연을 고려한 피드포워드 보상

유도전동기의 d축 회전자 자속은 I_{ds} 변화에 대해 시정수 L_r/R_r 를 갖는 일차 지연 특성을 가지므로, 정상상태 전압 방정식 기반의 피드포워드 만으로는 약계자 제어 성능이 저하될 수 있다. 이에 따라 시지연 시스템의 미분 방정식을 해석함으로써, 입력에 해당하는 보상용 d축 전류 피드포워드를 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$I_{ds,ff}^{comp} = \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{dI_{ds,ff}}{dt} + I_{ds,ff} \quad (2)$$

2.3 시뮬레이션 결과

제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 활용하여 Fig. 2와 같이 시뮬레이션을 수행하였고, 이때 사용된 유도전동기의 파라미터는 Table 1과 같다. Fig. 2는 피드포워드 보상 유무에 따른 제어 성능 차이를 비교한 것으로, 이를 통해 제안하는 방법을 적용하는 경우 자속 시지연을 고려한 정확한 피드포워드에 의해 약자속 제어기의 부담이 감소하고 출력전압이 제한값으로 유지되는 것을 확인 가능하다.



(a) Without compensation (b) With compensation
Fig. 2 Simulation with and without compensation

Table 1 410 kW Induction motor Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Rated Voltage	1100 Vrms	R_s, R_r	0.02 / 0.024 Ω
Rated Current	730 Arms	L_{ls}, L_{lr}	0.5 mH
Rated Torque	8483 N·m	L_m	6.86 mH
Rated Power	410 kW	Pole	6

3. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 약계자 운전 성능 향상을 위해 두 가지 피드포워드 기법을 제안하였다. 운전 모드 전환에 따른 최적의 d축 전류 지령과 자속 시지연을 보상하는 기법을 통해 제어 성능을 개선하였으며, PSIM 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 유효성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00417481).

참고문헌

- [1] G. Gallegos-Lopez, "Current Control of Induction Machines in the Field-Weakened Region," in *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 43, no. 4, pp. 981-989, July-Aug. 2007.
- [2] 김동호, 김원호, 김광수. (2020). 전기철도 추진 시스템의 운전조건을 고려한 추진용 유도전동기 설계 및 특성 연구. 한국철도학회논문집, 23(2), 152-159.