

낮은 스위칭 주파수로 구동되는 철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 동기 PWM 제어 방법

박승찬*, 전은탁*, 조웅*, 박진호*, 엄정섭*, 이창희*
 다원시스*

Synchronous PWM Control Method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Vehicles with Low Switching Frequency

Seung-Chan Park, Eun-Tak Jeon, Woong-Jo, Jin-ho Park, Jung-sup Eom, Chang-Hee Lee
 Dawonsys

ABSTRACT

효율 및 내환경성에서 우수한 성능을 갖는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 최근 철도차량용 견인전동기로서 주목받고 있다. 일반 도시 철도차량의 추진제어시스템은 장시간 연속 운행 및 자연통풍냉각 방식의 설계가 요구되므로 대전력 스위칭으로 인한 발열 문제가 고려된 낮은 스위칭 주파수 및 6-스텝 제어 아래 인버터의 고성능 제어가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 6-스텝 및 낮은 스위칭 주파수로 IPMSM을 제어하기 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 동기화 방법을 기술하고 시뮬레이션을 통하여 제어 성능을 검증하였다.

1. 서 론

높은 효율과 출력 밀도, 소형 경량화 및 유지 보수 비용 절감 등의 장점으로 IPMSM 기반의 철도 차량 운전제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[1],[2]} 철도차량의 기본 수명 및 스위칭 손실로 인한 발열 문제의 관점에서 보면 낮은 스위칭 주파수로 구동되는 인버터가 유리하고, 차량 주행성능 및 안정성의 관점에서 보면 높은 스위칭 주파수로 구동되는 인버터가 유리하다. 따라서 긴 수명 및 자연통풍냉각방식의 제한된 차량 요구 조건 하에서 철도차량 추진제어장치의 구성요소인 인버터의 고성능 제어가 필요하다.

본 논문에서는 낮은 스위칭 주파수 및 6-스텝 제어에서도 고성능 제어가 가능하도록 전압지령 한 주기 기준 삼각 반송파의 주기를 동기화시켜 PWM 변조로 인한 전류 불평형 문제를 개선시킬 수 있는 방법을 기술하고 실제 철도차량용 210kW급 IPMSM 제원을 기준으로 시뮬레이션을 통하여 제어 성능을 검증하였다.

2. 철도차량용 IPMSM의 제어방법

2.1 동기 PWM 방법

6-step 제어는 인버터 각 상의 두 스위치를 요구되는 운전 주파수의 반주기마다 상보적으로 도통하는 제어방식으로 DC-link 전압 이용률을 최대화할 수 있으며, 스위칭 주파수를 최소화할 수 있다. 하지만 IPMSM의 벡터 제어방식은 전 구간 회전자 자속의 위치를 기준으로 페루프 제어가 수행되며 전압

벡터의 위상이 매 샘플링 주기마다 지속적으로 변동된다. 이러한 상황에서 전동기의 속도가 증가함에 따라 전압지령의 주기가 짧아지는 경우 전압지령과 반송파가 동기되지 않고 인버터를 제어할 시 낮은 스위칭 주파수로 전압을 합성한 결과는 높은 스위칭 주파수 대비 상대적으로 인버터 출력 전류에 더 큰 불균형 문제를 초래하게 된다. 이러한 전류의 불균형은 추가적인 시스템 손실과 전동기 출력 토크 맥동을 발생시킨다.

따라서 본 논문에서는 특정 속도 이상의 속도 영역부터 반송파 주파수 즉, 샘플링 주기를 가변하여 동기화를 수행한다. 동기화를 위한 샘플링 주기의 계산은 식 (1)과 같다.

$$T_{sync} = T_{period} + \Delta T_{comp} \tag{1}$$

$$= \frac{1}{Nf_1} + \Delta T_{comp}$$

여기서 f_1 은 기본파 주파수, N 은 기본파 주파수 한 주기당 변조수로 상수이며, T_{period} 는 동기 샘플링 주기를 ΔT_{comp} 는 동기화를 위한 동기 보상성분을 나타낸다. 변동되는 전압지령 위상에 대한 보상성분 ΔT_{comp} 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta T_{comp} = \frac{\alpha' - \alpha}{2Nf_1} \tag{2}$$

여기서 α 는 식 (3)에 보이듯이 전압 위상을 기준으로 계산된 성분이며, α' 은 동기 오차를 계산하기 위한 상수이다.

$$\alpha = \frac{N\theta_v}{2\pi} = \frac{N}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{V_d^{*}}{V_q^{*}} \right) \tag{3}$$

여기서 θ_v 는 정지 좌표계 d-q축 전압지령(V_d^{*} , V_q^{*})으로부터 계산된 전압지령의 위상이다. 기본파 주파수로부터 계산된 동기 샘플링 주기에 전압지령의 위상과 삼각파의 오차를 보상하여 동기화를 수행한다. 이러한 과정을 인버터 전류제어 알고리즘 블록도에 반영한 것이 그림 1과 같다. IPMSM의 벡터 제어 방식을 기반으로 전류 제어기에서 출력된 d-q 축 전압지령으로부터 전압지령의 위상 정보를 얻어 동기 보상성분 ΔT_{comp} 를 계산하고, 레졸버를 통해 측정된 속도 정보로부터 동기 샘플링 주기 T_{period} 를 계산하여 동기화를 수행 및 인버터를 제어한다.

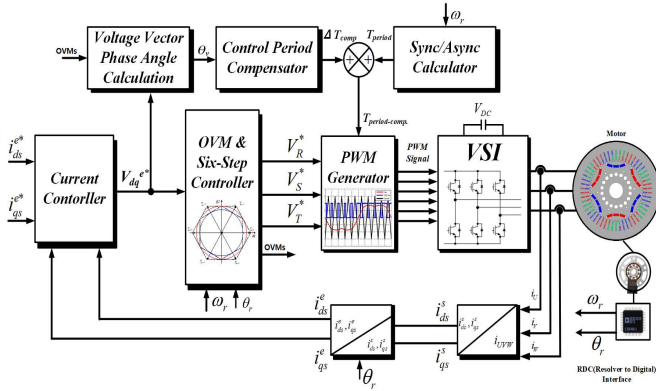
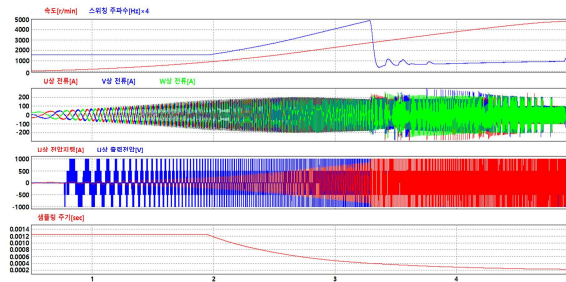


그림 1 IPMSM 제어 블록도.

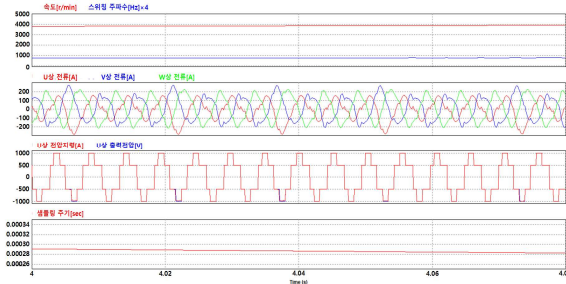
3. 시뮬레이션 결과

철도 차량용 IPMSM의 동기 PWM 제어 방법을 검증하기 위해 표 1의 실제 철도차량용 210kW IPMSM 구동 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 IPMSM의 벡터 제어를 기반으로 속도를 정지 상태에서 최대 속도까지 가속할 시 동기 보상 방법이 적용되지 않은 경우와 적용된 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 동기 보상 방법이 적용되지 않은 그림 2의 경우 6-스텝 제어 시 동기 오차로 인해 전류에 큰 왜곡이 발생하며 샘플링 주기가 단순히 속도가 증가함에 따라 감소하지만, 동기 보상 방법이 적용된 그림 3의 경우 동기 보상을 통해 동기 오차가 감소하여 전류에 왜곡이 발생하지 않고 제어 성능이 보장되며 속도가 증가함에 따라 샘플링 주기가 감소함과 동시에 동기 보상에 의해 순서적으로 샘플링 주기가 변화하는 것을 알 수 있다.

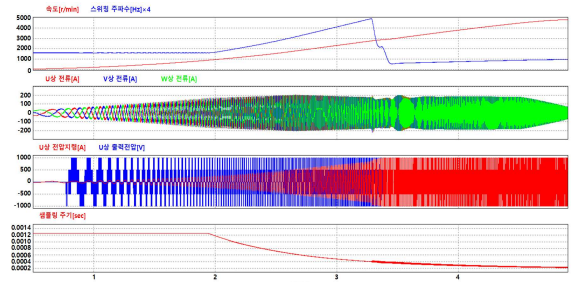


(a) 전체 파형

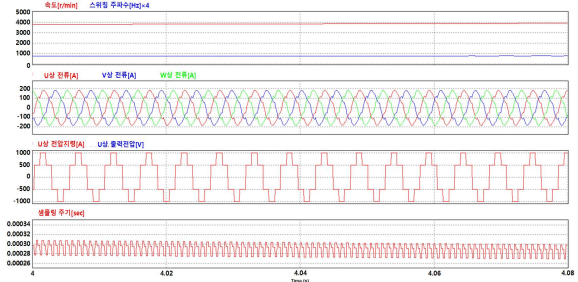


(b) 구간 확대 파형

그림 2 동기 보상이 적용되지 않은 시뮬레이션 결과 파형



(a) 전체 파형



(b) 구간 확대 파형

그림 3 동기 보상이 적용된 시뮬레이션 결과 파형

표 1 210kW IPMSM 파라미터

Rated Power	210 [kW]	P	6
Rated Torque	975 [N·m]	Φ_f	0.63 [Wb]
Rated Speed (Max. Speed)	2200 [r/min] (4810 [r/min])	R_s	0.034 [Ω]
Rated Current	170 [A]	L_d	1.39 [mH]
DC link Voltage	1500 [V]	L_q	5.36 [mH]

4. 결론

본 논문에서는 낮은 스위칭 주파수로 구동되는 철도 차량용 IPMSM의 동기 PWM 제어 방법에 대해 제안하였다. 전압지령의 위상 정보로부터 동기 오차를 계산 및 샘플링 주기에 보상을 하는 가변 샘플링 방식을 통해 전압지령과 반송파가 동기되는 동기 PWM 제어를 수행하였다. 제안된 동기 PWM 제어 방법을 통해 동기 오차를 감소시켜 인버터 출력 전류의 불균형을 제거하였으며 낮은 스위칭 주파수 및 6-스텝 제어 시에도 인버터의 고성능 제어가 가능하도록 하였다. 제안된 기법은 철도 차량용 210kW IPMSM 구동 시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] J. Liu, W. Zhang, F. Xiao, C. Lian, and S. Gao, "Six-step mode control of IPMSM for railway vehicle traction eliminating the DC offset in input current" in IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 9, pp. 8981-8993 Sep. 2019.
- [2] S. Kim and J. Seok, "Maximum voltage utilization of IPMSMs using modulating voltage scalability for automotive applications," in IEEE Trans. power electron., vol. 28, no. 12, pp. 5639-5646 Dec. 2013.