

철도 차량 구동용 IPMSM 속도 제어를 위한 스위칭 알고리즘 연구

강성윤, 이창희
다원시스

A Study on the Switching Algorithm for IPMSM Speed Control in Railway Vehicle

Seong Yun Kang, Chang Hee Lee
Dawonsys

ABSTRACT

본 논문은 철도 차량 구동용 IPMSM 제어를 위한 속도 영역 별 PWM 알고리즘을 제안한다. 철도 차량의 고속영역 제어는 인버터 전압 이용률을 최대화 할 수 있는 1 Pulse 제어 기법이 요구된다. 그러나, SPWM을 이용한 비동기 1 Pulse 제어는 출력 전류의 불균형을 초래한다. 따라서, 고속영역 제어를 위해 동기화 시킨 후 SPWM을 이용한 1 pulse 제어는 필수적이다. 본 논문에서는 비동기 모드로 제어를 시작하여 과변조 영역 이전에 지령 전압과 삼각파 주파수를 동기화 시킨 후 고속 영역 운전을 하는 PWM 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

철도 차량의 운전을 위한 유도전동기는 용량 대비 제조원가가 낮은 장점이 있는 반면 충분한 용량 확보를 위해 크기를 줄이는데 한계가 있고 효율 또한 제한적인 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 영구자석 동기전동기를 이용한 철도 차량 운전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 영구자석 동기전동기는 자속 성분이 영구자석에 의해 공급되어 전체 시스템 효율 향상을 기대할 수 있으며, 소형 경량화 및 유지보수 비용 절감 등의 장점이 있다. 동기전동기의 이러한 장점을 활용하기 위해서는 최대토크를 출력하기 위한 제어, 고속 운전을 위한 제어를 고려해야하며, 낮은 스위칭 주파수를 고려한 비동기 동기 SPWM 또한 고려되어야 한다. [1]

따라서, 본 논문에서는 철도 차량 구동용 IPMSM 속도 제어를 위한 비동기 동기 PWM 방식의 알고리즘을 제안한다. 비동기 영역에서는 고정 주파수를 이용한 SPWM을 이용하고 동기 영역에서는 전동기 동기주파수의 정수배를 가지는 삼각파 지령을 인가함으로써 동기 SPWM으로 전환하여 제어는 방법을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 제안하는 비동기-동기 SPWM 알고리즘

속도가 높아질수록 전압변조 지수는 증가하며 고속 영역에서는 1 Pulse 제어 영역으로 넘어가게 되는데 이때 삼각파 주파수와 모터 동기 주파수를 동기화 하지 않으면 낮은 스위칭 주파수 및 스위치 온 오프 시간의 불균형이 발생하여, 전류 리플 및 전동기 소음 증가의 원인이 될 수 있다. 이러한 문제를

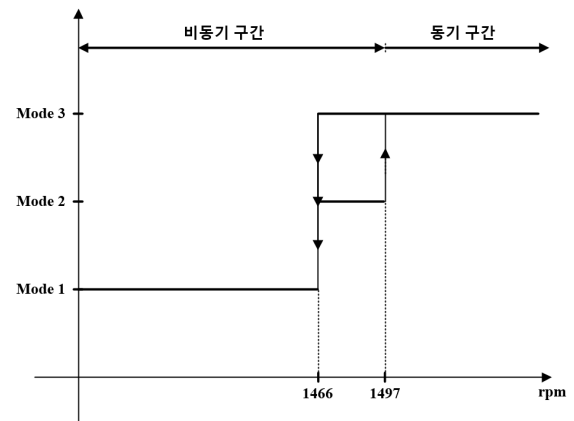


그림 1 속도 영역 별 스위칭 모드
Fig. 1 Switching mode for each speed area

해결하기 위해 비동기에서 동기로 전환하여 전동기를 운전하는 방법은 필수적이다.

그림 1은 속도별 스위칭 모드에 대한 그림이다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 Mode1(비동기 영역), Mode2(비동기에서 동기 넘어가는 영역), Mode3(동기 영역)으로 나누어 제어한다.

식(1)은 660 Hz로 고정주파수를 가지는 Mode1에서 Mode2로 넘어가는 전동기 주파수를 구하기 위한 식이다. 전동기 동기 주파수의 15배에 해당하는 삼각파를 생성하고 있으며 동기 주파수의 90%에서 Mode2로 전환됨을 확인할 수 있다. 주파수 값을 고려하여 속도 값을 계산해 보면 Mode1에서 Mode2로 전환되는 속도는 1466 rpm이며 Mode2에서 Mode3으로 전환되는 속도는 1497 rpm이다.

$$2f_{Mode1(660Hz)} = 0.9N_{(30)}f_{Motor} \quad (1)$$

$$0.9N_{(30)}f_{Motor} \quad (2)$$

$$N_{(30)}f_{Motor} \quad (3)$$

여기서, $f_{Mode1(660Hz)}$ 는 고정 주파수 660 Hz를 나타내며, f_{Motor} 는 전동기의 동기 주파수를 나타낸다. 식(2)는 Mode2에서의 삼각파 주파수이며, 식(3)은 Mode3에서 삼각파 주파수를 나타낸다. Mode2에서 Mode3으로 전환하는 과정에서 전동기의 동기 주파수의 정수배인 Mode3 주파수와 Mode2 주파수는 0.9 차이가 있음을 식(2)와 식(3)을 통해서 확인할 수 있다. 즉, Mode3에서 삼각파 주파수는 동기 주파수의 정수배를 가지므로 Mode2와 Mode3의 오차 적산값이 정수값에 가까울 때 전환하면 전환과정에서 출력토크의 과도현상을 줄일 수 있다.

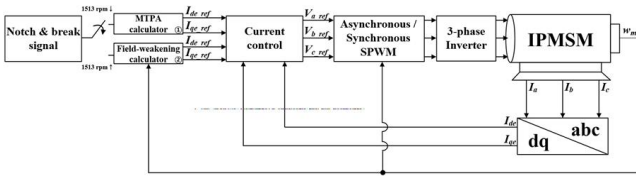


그림 2 시스템 제어 블록도
Fig. 2 System control block diagram

그림 2는 시스템 제어 블록도를 나타낸다. 노치 및 제동 스텝에 대한 신호가 인가되고, 인가 신호에 따라 정해진 토크값을 이용하여 1513 rpm이하에서 MTPA제어를 이용한 d q축 동기좌표계 전류 지령이 인가된다. 인가된 전류 지령은 전류 제어기를 거쳐 속도 영역에 따라 비동기 동기 SPWM을 이용하여 전동기가 제어된다. 1513 rpm이상에서는 전압제한타원과 전류제한원을 고려한 약자속제어를 통해 계산된 전류 지령으로 전동기를 구동한다.

3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter

IPMSM Parameter			
Flux Linkage	2.5707 Wb	정격 토크	2500 Nm
P	4	정격 속도	1513 rpm
Rs	0.08161 Ω	정격 전류	188 A
Ld	0.009846 H	정격 전압	1760 V _{pk}
Lq	0.035627 H	정격출력	410 kW

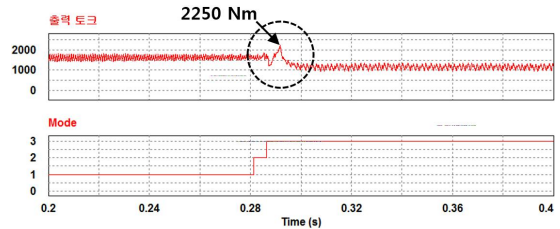
표 1은 시뮬레이션을 위한 전동기 파라미터를 나타낸다.

그림 3은 Mode3으로 전환되는 시점의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그 결과 오차 적산값이 정수값에 가까울 때 전환한 그림 3 (b)가 출력토크의 과도현상이 약 250 Nm 작은 것을 확인할 수 있다.

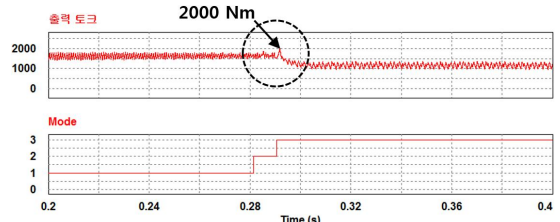
그림 4는 4500 rpm에서 비동기 SWPM으로 진행했을 때와 동기 SPWM으로 진행한 결과이다. 비교 결과 그림 4 (a)는 스위칭 주파수가 낮으며 이에 따라 d q축 동기좌표계 전류의 리플이 심한 것을 확인할 수 있으며 비동기 모드로 인한 3상 출력전류의 불균형을 확인할 수 있다. 반면 그림 4 (b)는 d q축 동기좌표계 전류가 리플이 작으며 3상 출력 전류는 균형적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 철도 차량 구동용 IPMSM 속도제어를 위한 스위칭 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 고정 스위칭 주파수로 비동기 SPWM을 이용하고 일정 속도 이상 범위에서 동기 SPWM을 이용하여 제어의 안정성을 확보하였다. 또한 비동기에서 동기 모드로 전환하는 과정에서 과도 상태를 억제하기 위해 비동기 영역 주파수가 정수와의 오차값이 가장 작은 시점에서 전환하여 약 250 Nm의 과도상태를 억제할 수 있었다. 제안한 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 확인 하였다.

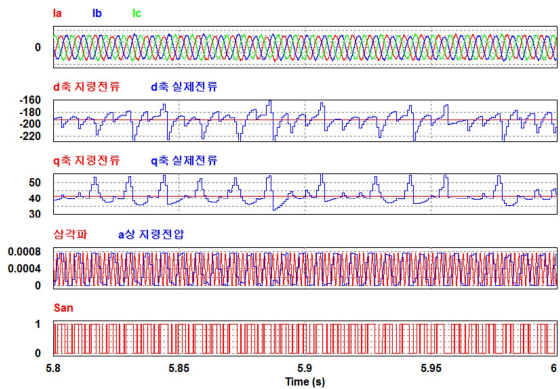


(a)

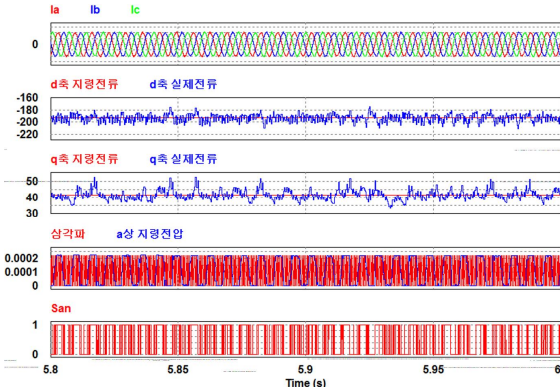


(b)

그림 3 비동기-동기 전환 시점에서 출력토크 파형
Fig. 3 Output torque waveform for the mode change point



(a)



(b)

그림 4 4500 rpm에서 비동기-동기 SPWM 제어 결과 파형
Fig. 4 Asynchronous-synchronous SPWM results for 4500 rpm

참고 문헌

- [1] 김성제, "SPWM을 이용한 IPMSM이 적용된 차세대 고속 철도 시스템의 전속도 제어," 석사학위 논문, 중앙대학교 대학원, 2011.
- [2] Ki Ho Kang, Young Min Kim, "철도용 IGBT인버터를 위한 최적 PWM 전략," 전력전자학회논문지, vol. 4, no. 4, pp. 332-341, Aug. 1999.