

스위칭 손실을 고려한 동기 PWM 방법의 펄스 수 전환 방법

Pulse Pattern Transition Strategy in Synchronous PWM Considering Switching Loss

김준석*, 김도현*, 이준희**, 류준형**, 이준석*†

Joon-Seok Kim*, Do-Hyeon Kim*, June-Hee Lee**, Joon-Hyoung Ryu**, June-Seok Lee*†

초 록 본 논문에서는 동기 PWM 방법을 이용한 철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)에서 동기 PWM의 펄스전환 방법을 제안한다. 동기 PWM 방법은 철도차량 추진시스템에 적용된 IPMSM의 고속운전 시 기본파와 PWM의 비동기로 인한 출력전압 불평형 문제를 해결하기 위해 사용된다. 동기 PWM 방법에서는 펄스 전환을 통하여 연산시간을 확보하거나 스위칭 손실을 저감하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 스위칭 손실 저감 측면에서 역행과 회생동작에 따른 적절한 펄스 전환의 방법을 수립하고 제안한다. 제안 방법의 타당성은 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

주요어 : 매입형 영구자석 동기전동기, 동기 PWM, 스위칭 손실, 펄스 수 전환, 전류 리플

1. 서론

철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)를 비동기 PWM을 사용하여 제어하는 경우 인버터의 기본파와 반송파 사이의 비동기로 인한 출력 전압의 불평형 문제가 발생할 수 있다. 또한, 기본파 한 주기 동안 인버터 스위칭 펄스 수가 감소하는 고속영역에서 이러한 출력 전압의 불평형 문제는 커지게 된다. 따라서 전압 불평형 문제를 해결하기 위해 IPMSM의 고속영역에서는 동기 PWM을 사용한다. 동기 PWM을 이용하면 기본파 한 주기 동안 인버터 스위칭 펄스 수를 일정하게 제어하는 것이 가능하고, 이를 통해 스위칭 손실제어도 가능하다.

본 논문에서는 스위칭 손실 저감 측면에서 역행과 회생동작에 따른 펄스 수 전환 방법을 제안하며 타당성은 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

2. 본론

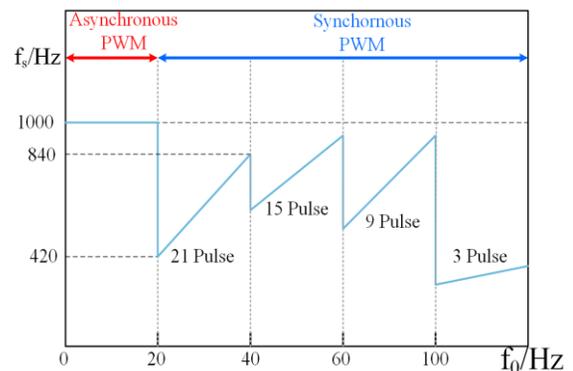


Fig. 1 Switching frequency corresponding to the fundamental frequency and pulse number

2.1 동기 PWM의 펄스 수 전환 방법

2.1.1 펄스에 따른 스위칭 주파수와 손실

동기 PWM에서 스위칭 주파수를 Fig. 1 과 같이 기본파 주파수의 일정 배수로 제어하여 기본파 한 주기 동안 인버터 스위칭 펄스 수를 일정하게 제어하는 것이 가능하다[1].

따라서, 작은 펄스를 선택하는 것이 기본파 한 주기간 동안 스위칭 횟수가 줄어 스위칭 손실 저감측면에서 유리하다.

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

* 단국대학교 공과대학 전자전기공학부

** 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부

2.1.2 제안하는 펄스 수 전환 방법

스위칭 손실 저감만을 고려하면 작은 펄스 수를 선택하여 제어하는 것이 바람직하지만, 작은 펄스 수는 높은 펄스 수에 비해 토크 리플의 크기가 크다는 단점이 존재한다.

따라서, 제안하는 펄스 수 전환 방법에선 전류, 전압의 크기가 작아 스위칭 주파수가 증가해도 스위칭 손실이 작은 영역에서 손실을 감안하고 큰 펄스 수를 선택하여 전류와 토크 리플의 크기를 줄인다. 또한, 일정 펄스로 제어하는 상황에서 전류, 전압 또는 기본과 주파수 증가로 스위칭 손실이 최대 스위칭 손실에 도달하는 경우엔 보다 작은 펄스로 전환하여 스위칭 손실을 최대 스위칭 손실 이하로 유지하는 펄스 전환 방법을 제안한다. 이때, 최대 스위칭 손실은 비동기 PWM 구간의 최대 손실로 선정한다.

2.1.2 손실분석 3D Table

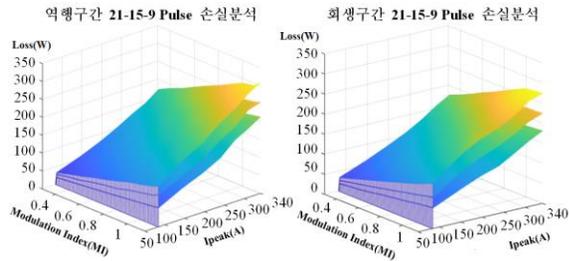


Fig. 2 Switching loss analysis 3D table

동기 PWM에서 최대 스위칭 손실에 도달하는 경우 스위칭 손실이 감소하는 펄스로 전환하기 위하여 제어에 사용할 펄스에 대한 손실분석을 진행했고, Fig. 2 와 같이 3D Table을 작성하였다. 손실분석은 SIC-MOSFET (FMF750DC-66A) 소자와 Table 1의 파라미터를 갖는 IPMSM을 이용하여 진행하였고, 전류의 크기와 Modulation Index (MI)에 따라 스위칭 손실을 분석했다.

Table 1 Properties of materials.

Motor rate Voltage	612 [V _{rms}]	d-axis Inductance	1.833 [mH]
Motor rate Frequency	95 [Hz]	q-axis Inductance	5.335 [mH]
Motor rate Speed	1900 [rpm]	Stator Resistance	0.039 [Ω]
Motor rate current	240 [Arms]	Pole	6

2.2 시뮬레이션 검증

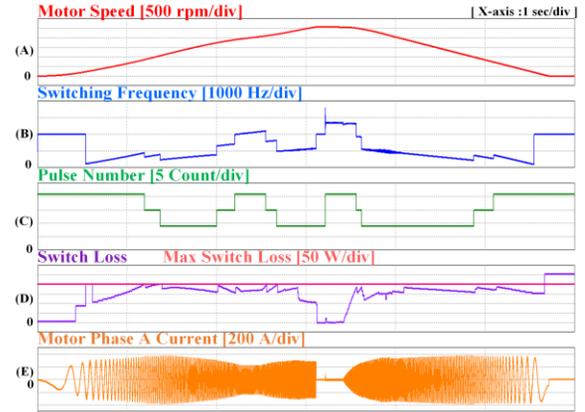


Fig. 3 Pulse Transition Simulation

PSIM 툴을 이용하여 Table 1의 사양과 같은 IPMSM을 전류의 크기를 Fig. 3(E)와 같이 변화시키며 진행하였다.

비동기 영역에서 동기 영역으로 전환은 200[rpm]으로 선정하였고, 이 경우 비동기 영역에서의 최대 스위칭 손실은 약 202.7[W]이다. Fig. 3(D)와 같이 전류와 전압의 크기가 증가함에 따라 스위칭 손실이 증가하게 되고 최대 스위칭 손실에 도달함에 따라 Fig. 3(C)와 같이 펄스 전환되는 모습이다.

3. 결론

본 논문에서는 동기 PWM에서 최대 스위칭 손실을 초과하지 않으며 전류 리플을 최소화하는 펄스 전환 방법을 제안하였으며 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 21RTRP-B146051-04).

참고문헌

- [1] H. Yang and Y. Zhang (2017) Hybrid Synchronized PWM schemes for Closed-Loop Current Control of High-Power Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 6920-6929