

# 동기 PWM 펄스 수 전환을 통한 추진시스템 고효율 운전 방법

김준석, 길도영, 이준희\*, 류준형\* 이준석  
 단국대학교, 한국철도기술연구원\* (KRRI)

## High-Efficiency Operation of Propulsion Systems Utilizing Synchronous PWM Pulse Number Transition

Joon-Seok Kim, Do-Young Gil, June-Hee Lee\*, Joon-Hyoung Ryu\*, June-Seok Lee  
 Dankook University, Korea Railroad Research Institute\* (KRRI)

### ABSTRACT

본 논문은 추진시스템을 고효율 운전하기 위한 동기 PWM(Pulse Width Modulation) 펄스 수 선정 방법을 제안한다. 동기 PWM은 기본과 한 주기당 출력되는 펄스 수를 일정한 정수로 유지하는 방법으로, 펄스 수의 크기에 따라 인버터 손실과 출력 특성이 달라지게 된다. 본 논문에서는 펄스 수에 따라 달라지는 인버터 및 전동기 손실을 분석한다. 또한, 이러한 특징을 활용하여 추진시스템의 효율을 높이는 펄스 수 선정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 인버터 측과 모터 측의 손실 분석을 수행하여 얻은 테이블을 이용하여 추진시스템의 손실을 최소화하는 펄스 수를 선정하는 방법이다. 제안하는 방법의 타당성은 332kW급 영구자석 동기 전동기를 이용한 실험을 통해 검증한다.

### 1. 서론

고출력 전동기 드라이브 시스템에서는 빈번한 스위칭 동작에 따라 증가하는 스위칭 손실을 줄이기 위해 전압원 인버터의 스위칭 주파수를 1k Hz 정도로 제한한다. 그러나 고정된 스위칭 주파수를 사용하면 기본과 주파수와 캐리어 주파수가 비동기화 되어 3상 출력 전압의 불균형이 발생한다. 또한, 전동기가 고속운전 하는 영역에서는 캐리어 주파수 대비 기본과 주파수의 비율이 크게 감소하여, 출력 전압의 불균형 현상이 증가하게 된다. 따라서, 낮은 스위칭 주파수를 사용하기 위해서는 기본 주파수의 정수 배수로 캐리어 주파수를 제어하는 동기 PWM 방법을 통해 출력 전압의 불균형 문제를 해결해야 한다.

동기 PWM은 스위칭 주파수를 제어하는 정수 배수의 크기를 변경하여 스위칭 주파수를 변경하거나, 출력 전류의 THD (Total Harmonic Distortion)를 조절할 수 있다. 따라서, 기존에는 최대 스위칭 주파수를 초과하지 않는 정수 배수 중에서 출력 전류 THD가 가장 작은 정수 배수를 선정하는 방법을 활용하였다<sup>[1]</sup>. 하지만, 기존 방법은 스위칭 주파수만을 제한하는 방법으로 인버터 측의 손실만을 줄이는 방법이다. 즉, 인버터와 전동기로 구성된 전체 전동기 드라이브 시스템의 손실은 증가할 수 있기 때문에, 시스템의 손실을 줄이는 측면에서는 바람직하지 않다. 따라서, 본 논문은 동기 PWM의 정수 배수에 따른 전동기 및 인버터 양측의 손실을 모두 분석하여, 전체 전동기 드라이브 시스템의 손실을 최소화 할 수 있는 정수 배수를 선정하는 방법을 제안한다.

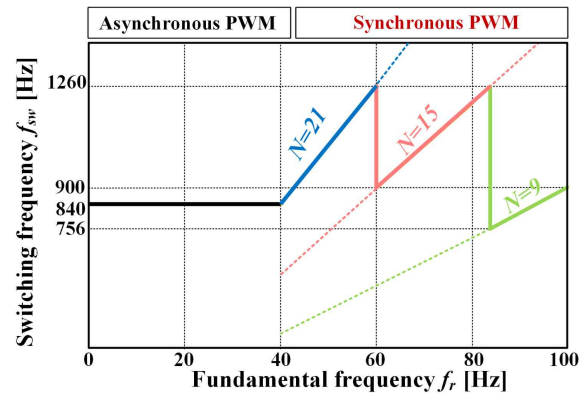


그림 1 동기 PWM의 펄스 수에 따른 스위칭 주파수  
 Fig. 1 Switching frequency according to pulse number in synchronous PWM

### 2. 동기 PWM 펄스 수에 따른 추진 시스템 손실

#### 2.1 동기 PWM의 기본 특징

동기 PWM은 그림 1과 같이 스위칭 주파수를 기본과 주파수의 정수 배수로 제어하는 방법으로, 인버터 출력전압의 기본과 한 주기 동안 스위칭 동작 횟수를 정수 배수만큼 일정하게 하여 출력전압의 불균형을 해소하고 출력 전압의 고조파 성분 크기를 줄일 수 있다. 인버터 출력전압의 기본과 한 주기 동안 출력되는 펄스 수(N)는 정수 배수와 같으며, 일반적으로 출력 전압의 반파, 1/4파 대칭을 통해 고조파를 저감하기 위해 N은 아래와 같이 3의 배수이며 홀수인 정수로 설정한다.

$$N = 3 \cdot (2m - 1) \quad (m = 1, 2, 3 \dots) \tag{1}$$

동기 PWM 적용 시 인버터의 스위칭 주파수( $f_{sw}$ )는 아래와 같이 기본과 주파수( $f_r$ )와 펄스 수의 곱으로 제어된다.

$$f_{sw} = N \cdot f_r \tag{2}$$

따라서, 동일한  $f_r$ 에 대해서 큰 N을 선정할수록  $f_{sw}$ 가 커지고 낮은 N을 선정할수록  $f_{sw}$ 가 작아진다.

## 2.2 펄스 수에 따른 인버터 및 전동기 손실

인버터의 스위칭 소자에서 발생하는 손실은 일반적으로 스위칭 손실과 전도 손실로 분류된다. 스위칭 손실은 반도체 소자가 켜지거나 꺼질 때 발생하는 손실로,  $f_{sw}$ 가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있고, 전도 손실은 반도체 소자의 순방향 전압 강하에 의해 발생하는 손실로, 스위치와 프리휠링 다이오드가 켜져 있는 동안 흐르는 전류에 의해 발생한다<sup>[2]</sup>.

전동기에서 발생하는 손실은 일반적으로 동손, 철손 및 기계 손으로 분류된다. 동손은 코일 내 저항 성분과 전류에 의해 발생하는 열로 나타나는 손실로, 전류가 증가함에 따라 비례하여 증가하는 경향이 있다. 철손은 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 분류되며, 히스테리시스 손실은 자기 재료의 자기 히스테리시스에 의해 발생하는 손실로, 자기 재료의 특성 때문에 발생하는 손실이다. 일반적으로, 히스테리시스 손실은 자성재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇회 주회하는지에 따라 달라지며 주파수와 자속밀도에 비례한다. 와전류 손실은 시간에 따라 변하는 자기 유도가 도체를 통과할 때 전자기 유도에 의해 와전류가 흐르면서 발생하는 손실이다. 와전류는 표피효과로 인해 표면에 집중되기 때문에 고조파가 증가함에 따라 전류 경로가 감소하고 저항이 증가하여 와전류 손실이 증가한다. 따라서 일반적으로 와전류 손실은 주파수와 자속 밀도의 제곱에 비례한다.

동기 PWM을 통해 인버터를 제어하는 경우, 높은  $N$ 을 사용할수록  $f_{sw}$ 가 증가하여 인버터 스위칭 손실의 증가로 인버터 측 손실은 증가하게 된다. 하지만 잦은 스위칭으로 인해 인버터 출력전류에 포함된 고조파 성분의 크기는 작아지게 되어, 전동기의 철손이 감소하게 되어 전동기 손실은 감소하게 된다. 이와 반대로 낮은  $N$ 을 사용할수록  $f_{sw}$ 가 감소하게 되어 인버터 스위칭 손실의 감소로 인버터 측 손실은 감소하게 되지만, 인버터 출력전류에 포함된 고조파 성분의 크기가 커지게 되어, 전동기의 철손이 증가해 전동기 손실이 증가하게 된다. 즉,  $f_{sw}$ 에 따라 인버터 측 손실과 전동기 측 손실은 서로 상충관계에 있게 된다.

## 3. 추진 시스템 고효율화를 위한 펄스 수 선정

### 3.1 펄스 수에 따른 인버터 및 전동기 손실 분석

본 논문에서 제안하는 추진 시스템 고효율화를 위한  $N$  선정 방법은 인버터와 전동기의 손실 분석이 필요 하다. 손실 분석은 332kW IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)과 SiC-MOSFET 모듈(FMF750DC-66A)로 구성된 2레벨 인버터로 진행하였다.

인버터 손실 분석은 PSIM을 활용하여 수행되었고,  $N$ 이 21, 15 및 9일 때 각각 진행하였다. 인버터 손실은 스위칭 주파수와 전류의 크기에 따라 달라지므로, 손실 분석의 기준을 MI(Modulation Index)와 출력 전류의 크기로 지정하였다. 손실 분석 결과는 그림 2의 3D 테이블을 통해 확인할 수 있다. 전류의 크기가 커짐에 따라 인버터의 손실이 증가하는 것은 스위치와 다이오드에서 발생하는 전도 손실이 증가하기 때문이다. 또한, 동일한 전류에서 MI가 커짐에 따라 인버터의 손실이 증가하는 것은 전동기 속도 및 역기전력이 커짐에 따라 MI가 커지게 되고, 동기 PWM을 사용하기 때문에  $f_{sw}$ 의 증가로 이어져 스위칭 손실의 증가로 인해 인버터 손실이 증가하기 때문이다.

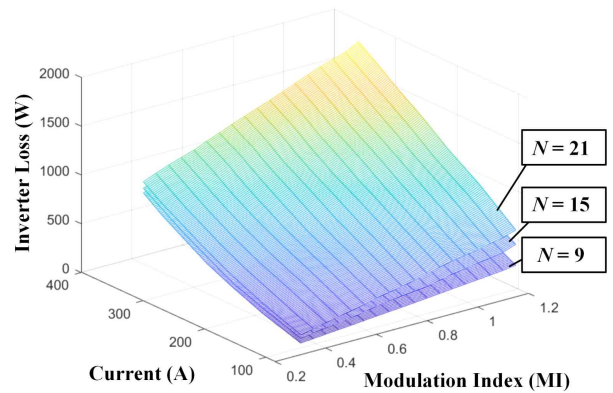


그림 2 동기 PWM의 펄스 수에 따른 인버터 손실  
Fig. 2 Inverter loss according to pulse number in synchronous PWM

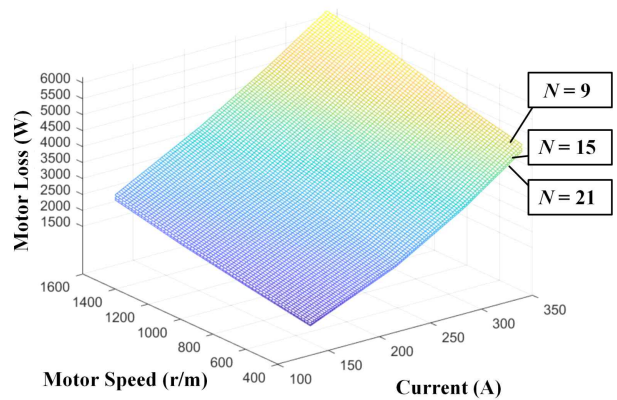


그림 3 동기 PWM의 펄스 수에 따른 전동기 손실  
Fig. 3 Motor loss according to pulse number in synchronous PWM

표 1 IPMSM 사양  
Table 1 Specifications of IPMSM

Rated Power	332 kW	Number of poles	6
Rated Current	350 A	Number of slots	27
Rated Frequency	125 Hz	Core Material	35PN230
Stator phase resistance	0.039	Permanent Magnet Material	NdFeB
Stator d-axis Inductance	1.833 mH	Stator Stack Length	235.2 mm
Stator q-axis Inductance	5.335 mH	Outer Diameter	256.5 mm
Stator Winding	3-phase star distributed winding	Inner Diameter	141.5 mm

$N$ 에 따른 인버터 손실은  $N$ 이 클수록 증가하는 경향을 보이는 데,  $f_{sw}$ 의 증가로 인한 스위칭 손실이 증가하기 때문이다.

전동기 손실분석은 표1의 사양을 갖는 IPMSM과 JMAG을 활용하여 수행되었고,  $N$ 이 21, 15 및 9일 때 각각 진행하였다. 전동기 손실은 고조파 및 전류의 크기에 따라 달라지므로, 손

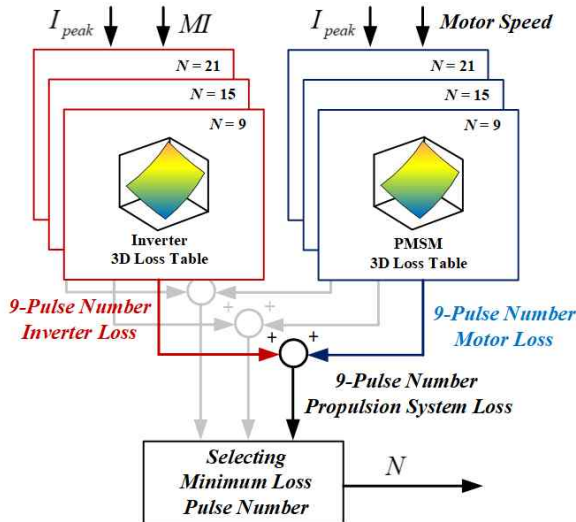


그림 4 최소 시스템 손실 펄스 수 선정 알고리즘 블록도  
Fig. 4 Block diagram of the minimum system loss pulse number selection algorithm

실 분석의 기준을 전동기 속도와 전류의 크기로 지정하였다. 손실 분석 결과는 그림 3의 3D 테이블을 통해 확인할 수 있다. 전류의 크기가 커짐에 따라 전동기의 손실이 증가하는 것은 동손이 증가하기 때문이다. 또한, 동일한 전류에서 전동기 속도가 커지거나  $N$ 이 낮아짐에 따라 전동기의 손실이 증가하는 것은  $f_r$ 의 증가 및  $f_{sw}$ 의 감소에 따라 철손이 증가하기 때문이다.

본 논문에서 제안하는 펄스 수 선정 방법은 그림 4와 같이 인버터 출력 전류, 출력 전압, 전동기 속도와 인버터 및 전동기 3D 손실 분석 테이블을 이용하여 전체 시스템이 최소의 손실을 갖게 하는 펄스 수를 선정하는 방식으로 이뤄진다.

#### 4. 시뮬레이션

제안하는 방법의 유효성을 검증하기 위해, 제안한 방법과 스위칭 주파수만을 제한하는 기존 방법을 비교하는 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같고 표1의 파라미터를 갖는 IPMSM을 이용하여 동일한 전류 크기 및 속도 조건에서 수행되었다. 제안하는 방법을 적용한 경우는 파란색을 이용하여 표현하였으며, 기존 방법은 붉은색을 이용하여 표현하였다. 두 방법의 손실 비교를 수행하기 위하여 동일한 조건을 갖는 2개의 손실 비교 지점을 선택하여 손실 비교를 수행하였다.

각 지점에서의 손실은 표 2와 같고, 제안하는 방법을 적용하는 경우에서 두 지점 모두 더 작은 시스템 손실을 갖는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 비교 지점에서는 제안 방법 적용 시  $N$ 은 15가 선정되고, 기존 방법 적용 시  $N$ 은 21이 선정된다. 따라서, 제안 방법의  $N$ 이 더 작기 때문에 전동기 손실은 더 크나 인버터 손실이 더 작기 때문에 전체 시스템 손실도 더 작은 것을 확인할 수 있다. 두 번째 비교 지점에서는 제안 방법 적용 시  $N$ 은 15가 선정되고, 기존 방법 적용 시  $N$ 은 9가 선정된다. 따라서, 제안 방법의  $N$ 이 더 크기 때문에 인버터 손실은 더 크나 전동기 손실이 더 작기 때문에 전체 시스템 손실도 더 작은 것을 확인할 수 있다. 즉, 제안하는 방법을 적용하는 경우 인버터 손실과 전동기 손실을 모두 고려하여 최적의  $N$ 이 선정되고 이에 따라 전체 추진 시스템 손실이 감소하게 된다.

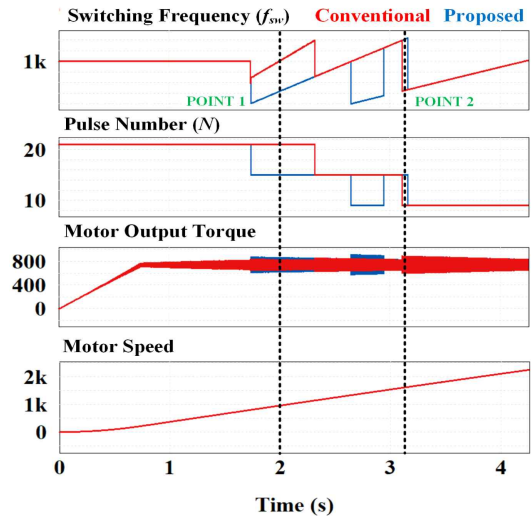


그림 5 시스템 손실 비교 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 System loss comparison simulation result

표 2 손실 비교 지점의 인버터, 전동기 및 시스템 손실  
Table 2 Inverter, motor, and system losses at comparison points

적용 방법	Point 1		Point 2	
	제안 방법	기존 방법	제안 방법	기존 방법
인버터 손실 [W]	545.6	640.45	706.7	553
전동기 손실 [W]	2703.6	2642.5	3465.8	3628.5
시스템 손실 [W]	3249.2	3282.95	4172.5	4181.5

#### 5. 결론

본 논문은 동기 PWM의 펄스 수에 따라 인버터와 모터의 손실이 상충 관계에 있는 특성을 분석 및 활용하여 전체 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 적절한 펄스 수 전환 기준을 제안한다. 제안된 방법은 생성된 3D 손실 테이블을 모니터링하여 손실을 최소화하는 펄스 수를 선택한다. 제안된 방법을 적용하면 추진 시스템의 손실을 저감할 수 있음을 332kW IPMSM을 사용한 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

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

#### 참고 문헌

- [1] L. Xiao, J. Li, Y. Xiong, J. Chen, and H. Gao, "Strategy and Implementation of Harmonic-Reduced Synchronized SVPWM for High-Power Traction Machine Drives," IEEE Transaction on Power Electron., vol. 35, no. 11, Nov. 2020, pp. 12457 - 12471.
- [2] K. Yamazaki and S. Watari, "Loss analysis of permanent-magnet motor considering carrier harmonics of PWM inverter using combination of 2-D and 3-D finite-element method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 5, pp. 1980-1983, May. 2005.