

전압변조기법 변경을 이용한 유도전동기의 스위칭 손실 및 토크 리플 저감 방법

이성호* , 김솔준** , 이준석*** , 이장무***
 한국교통대학교* , 인하대학교** , 한국철도기술연구원***

Torque Ripple Reduction and Switching Loss Reduction Method for Induction Motors by Hybrid PWM

Sung Ho Lee*, Sol Joon Kim**, June-Seok Lee***, Chang-Moo Lee***

Korea National University of Transportation*, Inha University**, Korea Railroad Research Institute***

ABSTRACT

본 논문에서는 유도전동기의 토크 리플 및 스위칭 손실 저감을 위해 전압변조기법인 공간벡터변조(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 기법과 불연속전압변조(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM) 기법을 혼합하여 사용하는 새로운 변조기법을 제안한다. 제안하는 방식은 지령전압이 최대인 부근에서 SVPWM 기법을 사용하며, 나머지 구간에서는 DPWM 기법을 적용한다. 전 구간 단일기법을 적용할 때와 비교하여 제안하는 방식은 토크 리플 및 스위칭 손실을 효율적으로 저감시킬 수 있으며 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

1. 서론

유도전동기에 적용되는 대표적인 전압변조기법으로는 공간 벡터변조(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)와 불연속전압변조(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM) 기법이 있다. 전류 및 토크 리플 최소화를 위해서는 SVPWM이 일반적으로 사용된다. 반면 DPWM은 SVPWM과 비교하여 토크 리플이 크다는 단점을 가지고 있으나, 한 주기의 일정시간 동안 스위칭을 하지 않기 때문에 스위칭 손실이 적다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 두 가지 전압변조기법(SVPWM, 60° DPWM)을 함께 사용하여 토크 리플 및 스위칭 손실을 효율적으로 저감하는 방법을 제시한다. 또한, DPWM을 기준으로 SVPWM 적용 영역을 넓혀가며 가장 효과적인 변환점을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검증한다.^[1]

2. 제안하는 전압변조기법

2.1 기존 SVPWM, DPWM 기법

기존의 SVPWM과 DPWM 기법은 아래의 오프셋(V_{offset}) 식 (1), (2)를 지령전압(V_{ref})에 주입하여 구현이 가능하다^[2].

$$- \text{SVPWM} : V_{offset} = -\frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (1)$$

$$- 60^\circ \text{ DPWM} : V_{offset} = \frac{V_{dc}}{2} - V_{max} \quad (2)$$

$$\Rightarrow V_{ref, SVPWM \text{ or } DPWM} = V_{ref} + V_{offset}$$

두 가지의 전압변조기법을 사용하였을 때 변조지수 (Modulation Index, MI) 값을 증가시키면서 토크 리플과 스위칭 손실을 비교해 보면 그림 1과 그림 2와 같이 나타난다. 앞으로 나올 그림 1 - 4 는 표1 파라미터를 고려한 결과이다.

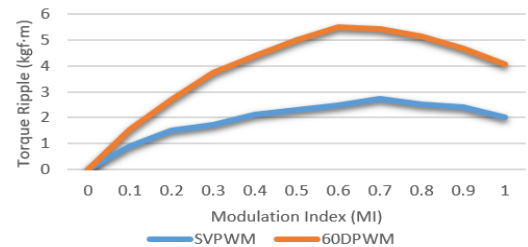


그림 1 MI에 따른 토크 리플 (SVPWM, 60° DPWM)
 Fig. 1 Torque ripple by MI (SVPWM, 60° DPWM)

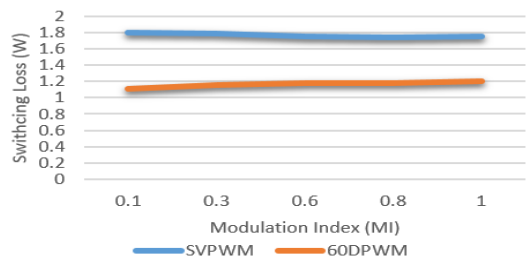


그림 2 MI에 따른 스위칭 손실 (SVPWM, 60° DPWM)
 Fig. 2 Switching Loss by MI (SVPWM, 60° DPWM)

그림 1과 2의 시뮬레이션 결과 값을 비교하여 각 기법들의 특징을 확인할 수 있다. 토크 리플의 크기는 MI가 증가함에 따라 DPWM의 토크 리플 증가폭이 SVPWM의 토크 리플 증가폭 보다 크다. 하지만 스위칭 손실을 보면 DPWM은 SVPWM 보다 항상 적다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 어느 한 가지의 전압변조기법만을 사용하게 될 경우, 토크 리플과 스위칭 손실 저감에 효과적이지 못하다.

2.2 제안하는 전압변조기법

본 논문에서 제안하는 전압변조기법에서는 DPWM을 기본으로 스위칭 손실을 감소시키고, 토크 리플이 최대인 지점에서 SVPWM으로 변환시켜 토크 리플을 감소시킨다. 원하는 영역에서 필요한 기법을 사용하므로 요구되는 토크 리플 및 효율에 맞춰 적용범위를 변화시켜 적용이 가능하다. 본 논문에서 제시하는 DPWM과 SVPWM 변환점은 아래의 식 (3)과 같이 비율

(Ratio)로 나타낼 수 있다.

$$Ratio = \frac{60^\circ - SVPWM\text{의 각도}}{60^\circ} \quad (0 \leq Ratio \leq 1) \quad (3)$$

SVPWM의 적용위치는 지령전압의 한 주기에서 전압이 최대, 최소인 곳으로 토크 리플이 가장 크게 발생하는 구간을 중심으로 적용되며, 3상 지령전압에 모두 적용이 됨으로 한 주기 동안 총 6구간에 적용된다.

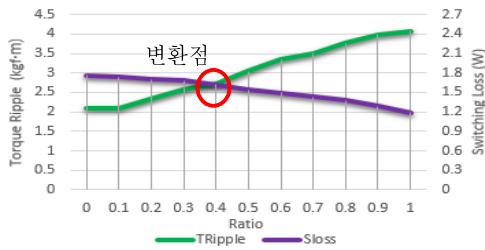


그림 3 Ratio에 따른 토크 리플과 스위칭 손실
Fig. 3 Torque Ripple and Switching Loss by Ratio

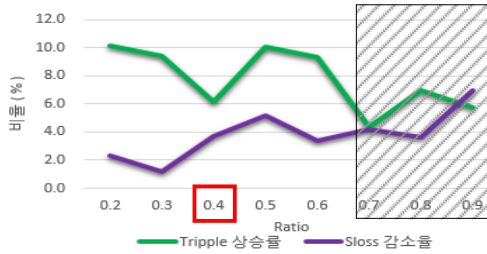


그림 4 토크 리플 상승률 및 스위칭 손실 감소율
Fig. 4 Increasing ratio of Torque Ripple, Reduction ratio of Switching loss

그림 3에서 Ratio가 0.1 - 0.2인 구간은 스위칭 손실의 변화가 미미하고, 0.7 이상의 구간은 토크 리플의 크기가 커서 효과적인 변환점 선정 기준에서 제외한다. 그림 4는 그림 3의 결과를 기반으로 도출한 토크 리플의 증가량(상승률)과 스위칭 손실의 감소량(감소율)의 기울기를 나타낸다. 본 논문에서는 토크 리플이 급격하게 상승하기 이전을 변환점으로 선택하였으며, 선정된 변환점은 Ratio가 0.4일 때이며, SVPWM이 적용되는 구간은 36°이다. 변환점 기준으로 SVPWM의 영역을 더 줄이면, 스위칭 손실의 감소율에 비해 토크 리플 상승률이 훨씬 커지게 된다.

3. 시뮬레이션 검증

표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다. 그림 5는 각각 제안 기법의 3상 전류와 d, q축 지령 전류를 나타낸다.

표 1 시뮬레이션 파라미터 정리
Table 1 Arrangement of Simulation parameters

no. of Poles	4	Control Period	100μs
R_s	0.295Ω	V_{DC}	220V
R_r	0.397Ω	Switching Frequency	10kHz
L_{ls}, L_{lr}	1.794mH	Constant-speed Load	2100rpm
L_m	59mH	T_{rate}	10Nm

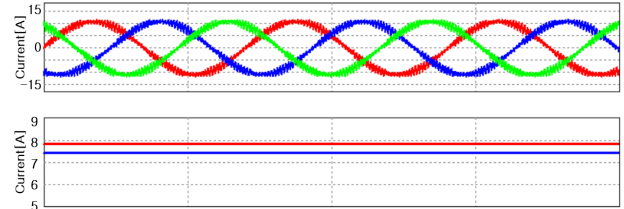
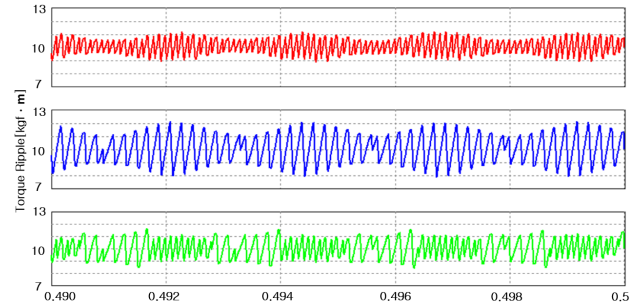
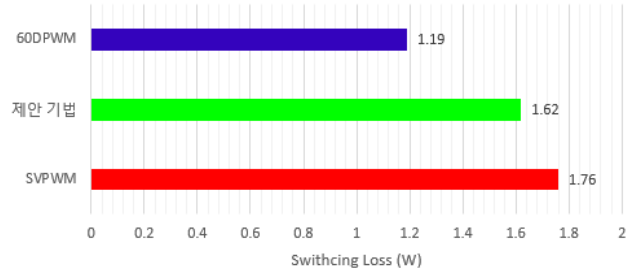


그림 5 제안 기법의 3상 전류와 d, q축 지령 전류
Fig. 5 3 phase currents and d-q axis reference currents



(a) 토크 리플 비교 ■ : SVPWM, ■ : 60DPWM, ■ : 제안 기법



(b) 스위칭 손실 비교

그림 6 토크 리플 및 스위칭 손실 비교

Fig. 6 A Comparison of Torque Ripple and Switching Loss

그림 6 (a)의 결과로 제안 기법이 60° DPWM보다 토크 리플이 저감되고, (b)의 결과로 제안 기법이 SVPWM보다 스위칭 손실이 저감된다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 토크 리플 저감과 스위칭 손실을 고려한 효과적인 전압변조기법을 제안한다. 제안한 방식은 DPWM 기법과 SVPWM기법의 특성을 함께 사용하여 효율 및 토크 리플 측면에서 효과적인 결과를 나타냈다. 또한, 본 논문에서 제안한 효과적인 변환점은 사용자의 필요에 맞게 특성을 적용할 수 있다.

참고 문헌

[1] S. J. Yoo, J. S. Lee, and K. B. Lee, "The DPWM Method to Reduce Neutral-Point Voltage Ripple in a Three-Level Inverter", IEEE Trans. Ind. Electron., pp. 315-316, July, 2015

[2] N. Matsui, T. Takeshita, K. Yasuda, "A new sensorless drive of brushless DC motor," in Proc. 1992 Int. Conf. IECON, 1992, pp. 430-435