

# 철도차량용 견인전동기를 위한 추진인버터의 비선형성 보상에 관한 연구

## Study on compensation method of the nonlinearity of the propulsion inverter for railway traction motor

정신명\*<sup>†</sup>, 박찬배\*, 김재희\*, 이준호\*, 이수길\*, 이병송\*

Shin-Myung Jung\*<sup>†</sup>, Chan-Bae Park\*, Jae-Hee Kim\*,

Jun-Ho Lee\*, Soo-Gil Lee\*, Byeong-Song Lee\*

**Abstract** In general, there exist voltage differences between the voltage commands and the output voltages of the propulsion inverter for railway traction motor, which are caused by the intended dead-time to prevent the arm-short of a leg and the nonlinearities of switching devices. This phenomena is clearly shown up at low speed region and reduces the entire system efficiency and performances. In this paper, a simple observation and compensation method of the nonlinearities of the propulsion inverter is proposed. The proposed method is based on MRAS technique and able to simply observe and compensate the differences between the voltage commands and the real output voltages. To show the effectiveness of the proposed method, the experiments are carried out for the digitally controlled drive system.

**Keywords** : Propulsion inverter, nonlinearity, traction motor

**초 록** 일반적으로 견인전동기 구동을 위한 추진인버터의 출력전압과 출력전압명령 사이에는 전압차이가 발생하는데, 이는 스위치 레그의 암쇼트를 막기 위해 인위적으로 인가하는 데드타임과 스위치의 비선형성 때문에 나타난다. 이러한 현상은 견인전동기의 속도가 낮을수록 극명하게 나타나는데, 이는 시스템 효율, 성능 등을 떨어뜨리는 요인이 된다. 본 논문에서는 이러한 추진인버터의 비선형성을 관측하고 보상하기 위한 새로운 방식의 보상 기법을 제안한다. 제안한 방법은 MRAS 기반의 간단한 방식으로 손쉽게 출력전압과 출력전압명령 사이의 전압차이를 관측하고 보상할 수 있다. 유효성 검증을 위해 실험을 수행하였고, 그 결과 추진인버터의 비선형성을 보상하여 성능을 향상시킬 수 있었다.

**주요어** : 추진인버터, 비선형성, 견인전동기

## 1. 서 론

철도차량용 견인전동기 구동을 위한 펄스 폭 변조 (PWM) 전압원 인버터 (VSI)는 전압명령과 실제 전압 간의 전압 차이, 곧 전압왜곡이 존재하는데, 이는 스위치 레그의 전원단 단락으로 인한 사고를 없애고자 인위적으로 인가하는 데드타임과 스위치의 전압강하, 점호 및 소호

<sup>†</sup> 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(caesar.ju@krrri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

지연 시간 등 스위치의 고유 특성에 기인한다. 이 전압왜곡은 저속 영역에서 더욱 극명하게 나타나며[1], 이는 전류의 왜곡으로 이어지게 되어 결국에는 토크의 왜곡이 발생하여 제어 성능이 크게 떨어지는 결과를 초래한다.

이러한 문제점을 극복하고자 여러 가지 방법들이 소개되어 왔다 [1]-[6]. 하지만, 부가적으로 전압 센서와 같은 하드웨어를 사용하거나, 구현이 복잡하여 그 적용이 쉽지 않다. 따라서, 본 논문에서는 부가적인 하드웨어 사용 없이, 간단하고 정확하게 전압왜곡을 관측하고 보상하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 적응제어기법을 이용한 전압왜곡 관측기

동기 좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전류 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_q}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega_e \\ \omega_e & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_m \omega_e}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $i_q$ 와  $i_d$ 는  $q$ 축과  $d$ 축에서의 전류이며,  $\omega_e$ 는 회전자의 전기적 위치,  $\lambda_m$ 은 영구자석에 의해 생성되는 쇄교 자속을 의미한다. 적응제어기법(MRAS; Model Reference Adaptive System)을 적용하기 위한 기준 모델 방정식은

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{qm}}{dt} \\ \frac{di_{dm}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s0}}{L_{s0}} & -\omega_e \\ \omega_e & -\frac{R_{s0}}{L_{s0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{s0}} \begin{bmatrix} v_q^* \\ v_d^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_{m0} \omega_e}{L_{s0}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기에서  $v_q^*$ 와  $v_d^*$ 는 각각  $q$ 축과  $d$ 축에서의 전압명령이고,  $i_{qm}$ 과  $i_{dm}$ 은 각각  $q$ 축과  $d$ 축에서의 전류, 그리고 "0"은 각 파라미터의 공칭 값을 의미한다.

식(1)과 식(2)로부터 추진인버터의 비선형성에 의해 기인하는 전압명령과 실제 전압 사이의 전압 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_q^* - v_q &= v_q^{dead} = L_s \left( \frac{di_{qm}}{dt} - \frac{di_q}{dt} \right) \\ v_d^* - v_d &= v_d^{dead} = L_s \left( \frac{di_{dm}}{dt} - \frac{di_d}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 각 파라미터인  $R_{s0}$ ,  $L_{s0}$ ,  $\lambda_{m0}$ 은 실제 값인  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $\lambda_m$ 과 같다고 가정하였다. 식(3)으로부터  $k$ 번째 PWM 주기에서의 전압왜곡을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_q^{dead}(k) &= L_s \left( \frac{i_{qm}(k) - i_q(k)}{T_s} \right) \\ v_d^{dead}(k) &= L_s \left( \frac{i_{dm}(k) - i_d(k)}{T_s} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 모델에서의 전류  $i_{qm}(k)$ 와  $i_{dm}(k)$ 는 식(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qm}(k) &= i_q(k-1) + \frac{T_s}{L_{s0}} \left[ v_q^*(k-1) - R_{s0}i_q(k-1) - \omega_e L_{s0}i_d(k-1) - \omega_e \lambda_{m0} \right] \\ i_{dm}(k) &= i_d(k-1) + \frac{T_s}{L_{s0}} \left[ v_d^*(k-1) - R_{s0}i_d(k-1) + \omega_e L_{s0}i_q(k-1) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.2 전압왜곡 보상 방법

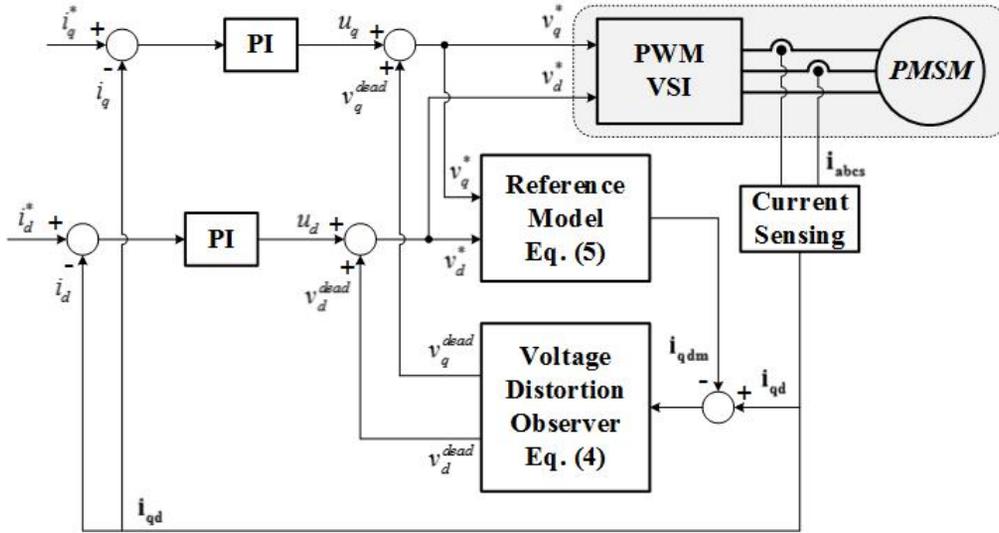
전압왜곡은 식(4)와 식(5)를 통해 구할 수 있으며, 제어를 위해 생성된 전압명령에 피드-포워드 방식으로 보상하는 방식을 택한다. 따라서, 최종적으로 생성되는 전압명령은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_q^*(k) &= u_q(k) + e_q(k) + v_q^{dead}(k) \\ v_d^*(k) &= u_d(k) + e_d(k) + v_d^{dead}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $u_q$ 와  $u_d$ 는 각각  $q$ 축과  $d$ 축의 비결합된(de-coupled) PI 전류 제어기의 출력이며,  $e_q(k)$ 와  $e_d(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_q &= L_s \omega_e i_d + \lambda_m \omega_e \\ e_d &= -L_s \omega_e i_q \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 1은 제안된 방법으로 전압 왜곡을 관측하고, 이를 보상하는 제어기의 구성도를 나타낸 것이다. 제안된 방법으로 별도의 하드웨어 사용 없이 전압왜곡을 관측하고 이를 전류 제어기에 피드-포워드 함으로써 전압왜곡을 보상한다.



**Fig. 1** Current control block diagram using the proposed voltage distortion observer for the compensation of the nonlinearities of the propulsion inverter

### 2.3 실험 결과

실험을 위해 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터와 인버터에 사용된 전력용 반도체의 파라미터를 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Fig. 2는 영구자석 동기전동기를 저속 영역에서 운전시키면서 전압왜곡을 보상하지 않았을 때의 전류 파형이다. 전류 파형에 왜곡이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 토크에 영향을 주는  $i_{qd}$  전류에도 왜곡 현상이 발생하여 토크의 왜곡이 발생함을 예상할 수 있다. Fig. 3은 제안된 방법으로 전압왜곡을 관측하여 보상이었을

**Table 1:** Specifications of the test PMSM

Rated Power	750 [W]	# of poles	8
Rated Torque	2.4 [Nm]	Rated Speed	3000 [r/min]
Phase Resistance	0.49 [ $\Omega$ ]	Rated Current	6.0 [A]
Linkage Flux	0.0667 [Wb]	Phase Inductance	6.9 [mH]

**Table 2:** Specifications of the Three-phase PWM VSI

DC-link Voltage	300 [V]	Switching Frequency	11 [kHz]
Dead-time	2.8 [usec]	Switching Device	IGBT
Turn-on Time <sup>†</sup>	25 [nsec]	Turn-off Time <sup>†</sup>	115 [nsec]
Saturation Voltage <sup>†</sup>	2.5 [V]	Forward Voltage <sup>†</sup>	1.95 [V]

<sup>†</sup>Fairchild datasheet (FGH40N60SFD)

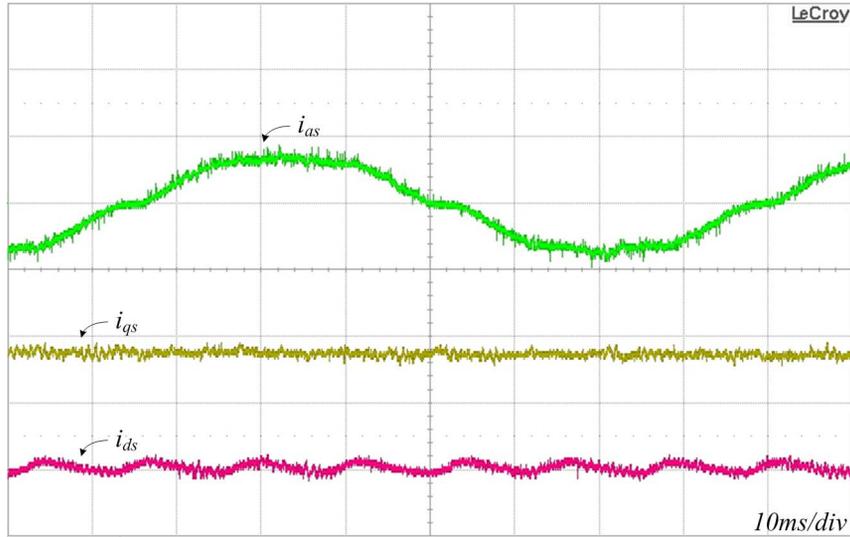


Fig. 2 Experimental results of the current waveforms without dead-time compensation

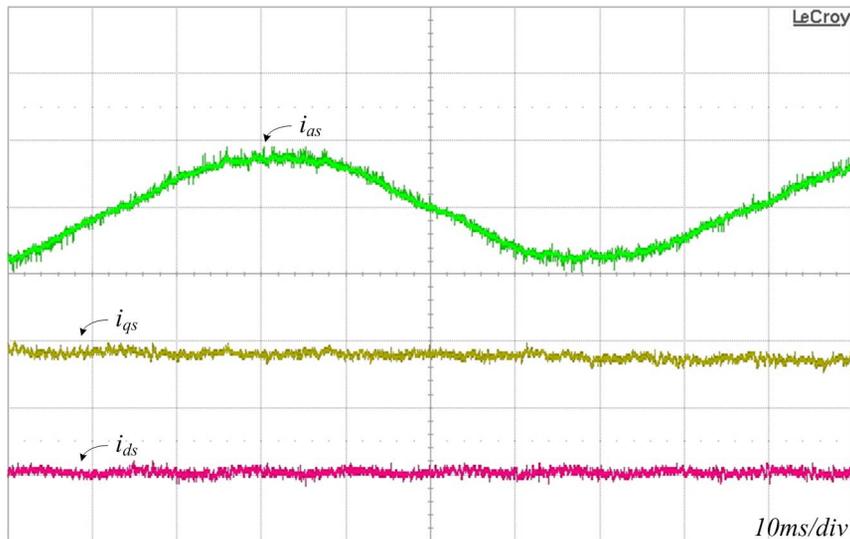


Fig. 3 Experimental results of the current waveforms with the proposed voltage distortion observer

때의 전류 파형이다. Fig. 2와 달리 제안된 전압왜곡 관측기를 사용하여 전압왜곡을 관측하고 보상함으로써 전류 파형이 크게 개선된 것을 알 수 있다. 이를 통해 전류 하모닉을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상되며, 전류의 왜곡이 없기 때문에 토크 맥동 역시 줄어들어 제어 성능이 개선될 것으로 기대할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 철도차량용 견인전동기 추진을 위한 인버터의 비선형성으로 인한 전압왜곡을 적응제어기법을 사용하여 관측하고 보상하는 방법을 제안하였다. 전압 왜곡은 크게 두 가지

이유로 발생하는데, 첫째는 인버터 스위치 레그의 전원단 단락을 막기 위해 인위적으로 인가하는 데드타임과 스위치의 비선형성, 즉, 전압 강하, 점호 및 소호 지연시간 등 때문에 나타난다. 전압왜곡은 저속 영역에서 더 심하게 나타나는데, 이는 곧 전류의 왜곡을 초래하여 하모닉 증가와 토크 리플 등으로 이어지게 되어 시스템 성능이 크게 떨어지게 된다. 그러나, 제안된 방법을 통해 전압왜곡을 관측하고 보상하게 되면 전압왜곡을 줄여 이를 크게 개선할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다.

## 참고문헌

- [1] J. Holtz, J. Quan (2002) Sensorless vector control of induction motors at very low speed using a nonlinear inverter model and parameter identification, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 38(2), pp. 1087-1095.
- [2] J. W. Choi, S. K. Sul (1996) Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11(2), pp. 221-227.
- [3] A. R. Munoz, T. A. Lipo (1999) On-line dead-time compensation technique for open-loop PWM-VSI drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14(4), pp. 683-689.
- [4] F. Blaabjerg, J. K. Pederson, P. Thøgersen (1997) Improved modulation techniques for PWM-VSI drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), pp. 87-95.
- [5] H. S. Kim, K. H. Kim, M. J. Youn (2003) On-line dead-time compensation method based on time delay control, *IEEE Transactions on Control System Technology*, 11(2), pp. 279-285.
- [6] H. W. Kim, H. S. Kim, M. J. Youn (2004) Online observation and compensation of voltage distortion in PWM VSI for PMSM, *IEE Electric Power Applications*, 151(5), pp. 534-542.