영구자석 동기 전동기의 MRAS 관측기를 이용한 Dead Time 보상에 대한 연구

김종현, 김학원, 조관열, 임병국
한국교통대학교 제어계측공학과

Study on Dead Time Compensation using MRAS Observer of Permanent Magnet Synchronous Motor.

Jong Hyun Kim, Hag Wone Kim, Kwan Yuhl Cho, Byung Kuk Lim
Department of the Control & Instrumentation Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

PMSM 구동을 하였을 때, 인버터의 지령전압과 출력전압 사이에 왜곡이 발생하며, 대부분 Dead Time에 의한 영향 이다. 전압왜곡을 보상하는 여러 가지 방법 들이 연구되어왔다. 하지만 전압 왜곡의 보상이 abc 축 또는 dq축에서 이루어지고 있으나 어느 방식이 더 좋은지에 대한 검토가 없었다. 본 논문에서는 d q축 전압방정식 과 abc축 전압방정식으로부터 왜곡된 전압을 보상하는 방법을 비교한다.

1. 서론

최근 3상 PWM 인버터는 전동기 구동 등 많은 분야에서 사용되고 있으며, 이에 따라 전동기의 고효율 구동 방법에 대한 연구들이 이루어지고 있다. 이러한 연구 들 중 3상 PWM 인버터에 의해 발생하는 전압왜곡을 보상하여 조금 더 효율적으로 전동기를 구동하는 연구가 이루어지고 있다[1] [3].

전동기 구동 시 여러 가지 이유로 인버터 출력전압과 지령전압 사이에 왜곡이 발생한다. 대표적인 예로 인버터에 전력스위칭소자의 Dead Time, Drop Voltage , Turn On/Off time 그리고 온도에 따른 소자 파라미터의 성질 변화 등 많은 원인들이 있다[1]. 특히 대부분의 전압 왜곡은 Dead time에서 일어난다해도 무방하다. 이러한 전압 왜곡은 동기 전동기의 전류 왜곡, 토크 맥동, 관측기의 수행 저하를 일으키는 요인이 된다. 한편, 왜곡을 보상하는 방법 중 MRAS(Model Reference Adaptive System)관측기를 이용하여 전압방정식으로부터 왜곡된 전압을 관측하여 d q축 방정식으로부터 보상하는 방법이 이전에 소개 된 적 있다.[1] [3]

본 논문에서 MRAS 관측기를 이용하여 d q축에서 전압왜곡에 대한 보상과 abc축에서의 보상에 대한 차이를 분석하였다.

2. MRAS관측기를 이용한 보상

2.1 MRAS 관측기를 이용한 abc축 왜곡전압 보상 방법

그림 1은 전동기를 부하로 사용하는 3상 인버터 회로이다. 회로에서 출력되는 전압방정식(Plant)은 다음과 같다. 출력되는 전압은 왜곡된 성분이 포함 된 식(1)과 같다.

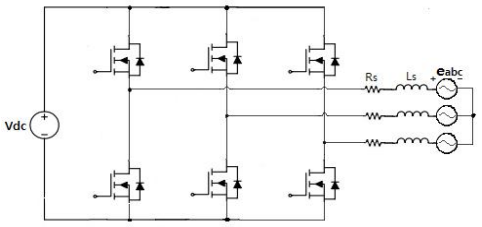

Fig. 1 Configuration of 3 phase inverter circuit

$$V_{abc} = i_{abc}R_s + L_s\frac{di_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (1)$$

출력 전압에 왜곡이 없는 모델 방정식은 식(2)와 같다.

$$V_{abcm} = i_{abcm}R_s + L_s\frac{di_{abcm}}{dt} + e_{abcm} \quad (2)$$

위의 식에서 실제 plant 식과 model 식의 역기전력 차이가 없다고 가정할 때, 식(1)와 식(2)의 차이는 식(3)과 같다.

$$V_{abc} - V_{abcm} = (i_{abc} - i_{abcm})R_s + L_s\frac{d(i_{abc} - i_{abcm})}{dt} \quad (3)$$

식(3)의 실제 plant의 식과 model 식이 parameter가 동일하다고 가정 하에 왜곡 전압의 차이는 여러 원인이 있지만 대부분이 Dead time에 의해 발생한다고 봐도 무방하다. 앞에서 구한 식 (3)을 k 1번째 모델 전류를 k 1번째 실제 전류로 사용하여 이산화한 식은 다음과 같다.

$$\triangle V_{abc}(k) = (i_{abc}(k) - i_{abcm}(k))R_s + \frac{L_s}{T_s}(i_{abc}(k) - i_{abcm}(k)) \quad (4)$$

식(4)에서$\triangle V_{abc}(k)$는 실제 plant 와 model 차이 즉 인버터의 데드 타임 효과를 나타낸다. 식(2)에서 model 전류에 대한 식으로 이산화 시켜 $i_{abcm}(k)$를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{abcm}(k) = \frac{T_s}{L_s}V_{abcm}(k-1) + (\frac{R_sL_s}{T_s} - 1)i_{abcm}(k-1) + e_{abc}(k-1) \quad (5)$$

식(5)에서 구한 model 전류를 식(4)에 대입하면 Dead time에 의해 왜곡된 부분을 보상해주는 전압이 된다. 이렇게 구한 보상전압을 abc축 레퍼런스 전압에 더해주면 왜곡된 전압이 보상되게 된다.

2.2 MRAS 관측기를 이용한 d-q축 왜곡전압 보상 방법

앞 절에서 설명한 것과 같이 d q축에서도 똑같은 방법으로 d q축 에서도 왜곡 된 전압을 보상할 수 있다. 앞에서 구한 식(2)를 d q축 방정식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Phi_f \qquad (6)$$

앞 절에서 구한 방식대로 식(6)을 model 식으로 구하고 실제 plant 와 model의 차이를 구해 이산화 시켜 나타내면 다음 과 같다.

$$\triangle V_d(k) = R_s(i_d(k) - i_{dm}(k)) + \frac{L_d}{T_s}(i_d(k) - i_{dm}(k)) - \omega_r L_q(i_q - i_{qm})$$

$$\triangle V_q(k) = R_s(i_q(k) - i_{qm}(k)) + \frac{L_q}{T_s}(i_q(k) - i_{qm}(k)) - \omega_r L_d(i_d - i_{dm}) \qquad (7)$$

동일한 방법으로 $i_{dm}(k)$ 와 $i_{qm}(k)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$i_{dm}(k) = \frac{T_s}{L_d} V_{dm}(k-1) + (\frac{R_s T_s}{L_d} - 1) i_{dm}(k-1) + \frac{\omega_r L_q T_s i_{qm}(k)}{L_d} \qquad (8)$$

$$i_{qm}(k) = \frac{T_s}{L_q} V_{qm}(k-1) + (\frac{R_s T_s}{L_q} - 1) i_{qm}(k-1) + \frac{\omega_r L_d T_s i_{dm}(k)}{L_q}$$

식(7)에서 model 전류 식(8)을 대입하면 Dead time에 의해 왜곡된 부분을 보상해주는 전압이 된다. 보상전압을 d q축 레퍼런스 전압에 더하거나 빼면 왜곡된 전압부분이 보상이 되게 된다.

2.3 모의 해석

표 1 parameter of IPMSM

R_s	0.14 [Ω]
L_d	0.052 [mH]
L_q	0.059 [mH]
J_m	0.000224 [kgm^2]
$Pole$	8 [pole]
dead time	3 [usec]

모터의 사양은 표1과 같고 PWM 주파수는 16 kHz이다. 그림 2는 데드 타임 효과에 의하여 왜곡된 전류의 파형 및 THD 분석 결과이다. 모의해석 결과 데드 타임에 의하여 q축과 d축에 전류 왜곡이 나타남을 알 수 있으며 이 중에 d축의 왜곡이 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있다. 그림4와 그림6는 각각 abc축 방정식으로 왜곡된 전압을 보상을 하였을 때, d q축 방정식으로 왜곡된 전압을 보상 하였을 때, 전류파형과 THD 분석한 결과이다. 그림 3은 abc축 방정식에서 보상했을 때 보상전압에 대한 파형이고 그림 4는 d q축 방정식에서 보상을 했을 때 보상전압에 대한 파형이다.

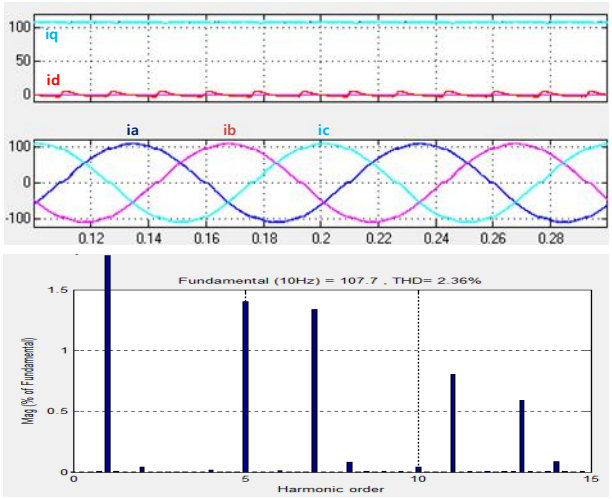

Fig. 2 Current wave and THD analysis by dead time

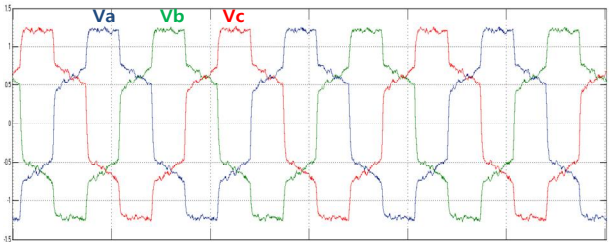

Fig. 3 abc axis compensation voltage

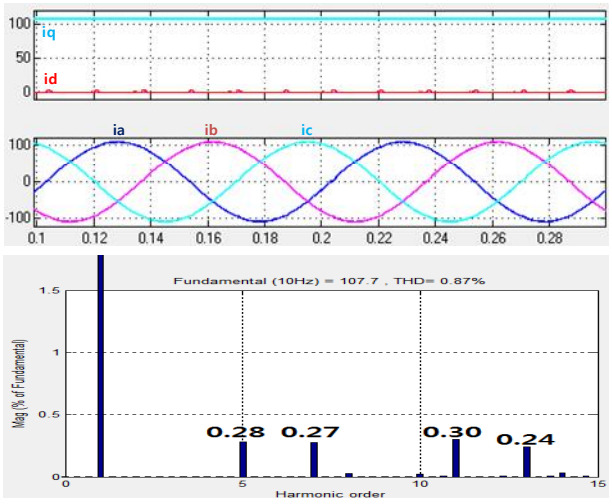

Fig. 4 current wave and THD analysis using abc-axis compensation

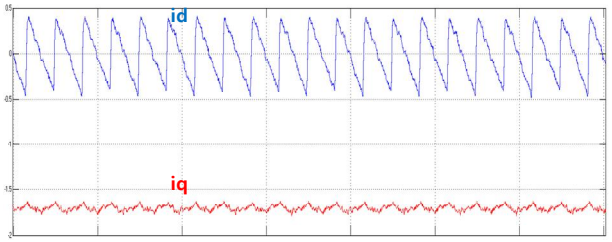

Fig. 5 d-q axis compensation voltage

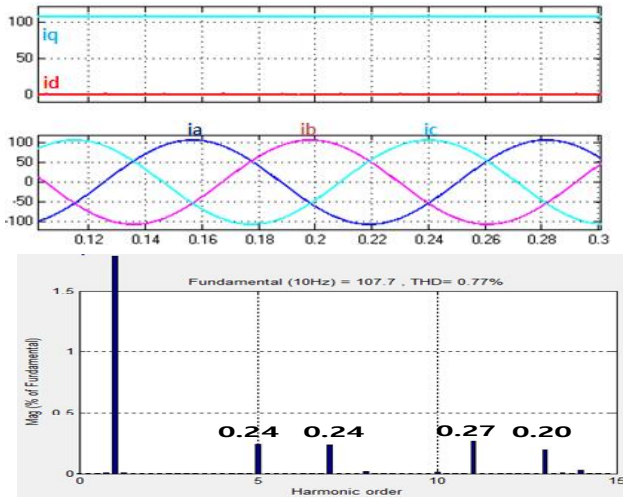

Fig. 6 current wave and THD analysis using dq-axis compensation

모의해석 시 모터는 150RPM으로 구동하였고 LPF(cut off frequency = 500Hz)걸어 주었다. 그 결과 d q축 방정식을 이용하여 보상하는 방법이 abc축 방정식을 이용하는 방법 보다 THD 분석이 낮게 나오는 걸 확인 하였다. 이와 같은 결과가 나온 이유로는 LPF로 인한 시 지연 현상 및 보상전압의 불연속인 부분이 존재하기 때문이다. 그림3은 abc축 보상전압의 파형이며 어느 한 지점에서 각 상마다 1V의 불연속인 부분과 다른 상에 의한 불연속인 부분이 0.5V 씩 발생하기 때문에 총 2V의 불연속전압이 존재한다. 반면에 그림5는 d q축 보상전압의 파형이며 대부분이 d축에서 불연속전압이 1V가 발생했다. 즉, d q축 보상전압이 abc축 보상전압보다 어느 한 지점에서의 불연속인 부분이 1V정도 낮게 나와 보상이 더 효과적이다.

3. 결론

본 논문은 PMSM 구동 시 Dead Time에 의해 발생하는 전압왜곡을 MRAS관측기를 사용하여 abc축 과 d q축 방정식으로 왜곡을 보상하여 두 방정식을 THD 분석을 하였다. 그 결과 d q축이 방정식이 abc축 방정식 보다 보상효과가 더 뛰어난걸 알 수 있다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제 번호 2013011487)

참 고 문 헌

[1] H.W. Kim, M.J. Youn, K.Y. Cho, and J.C. Kim, “Voltage Distortion Analysis and On line Compensation of VSI for Permanent Magnet Synchronous Motor”, Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol 1, page(s): 648 652, July ,2003.

[2] Hee Keun Shin, Byoung Woong An, Hag Wone Kim, Kwan Yuhl Cho, and Shin Myung Jung, “Switch Open Fault Detection and Tolerant Operation Method for Three Phase PWM Rectifier”, Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 17, No. 3, page(s):266 273, June 2012.

[3] Yong Sin Jin, Kwan Yuhl Cho, Hag Wone Kim, Byung Kuk Lim, Byung Moon Han, “Torque Ripple Reduction based on Flux Linkage Harmonics Observer for an Interior PM Synchronous Motor including Back EMF Harmonics”, Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.18, No.4, page(s): 367 375, August 2013.