

교류전동기의 주기적인 토크리플 보상알고리즘

김 병 섭, 최 중 우
경북대학교 전기공학과

Compensation Algorithm for Periodic Torque Ripple of AC Motor

Byong-Seob Kim and Jong-Woo Choi
Kyungpook National University

ABSTRACT

교류 전동기는 전류의 측정오차와 데드타임 등의 영향으로 전기각 주파수에 동기된 주기적인 토크 리플이 발생한다. 본 논문에서는 주기적인 토크리플 보상 알고리즘을 제안한다. 보상은 속도리플 관측기와 토크리플 보상기로 나누어진다. 본 논문에서는 토크리플 보상기의 해석을 통해 정상상태에서 속도리플이 제거됨을 증명하였고 속도리플 관측기는 속도의 리플을 검출하여 토크리플 보상기를 통해 토크리플 성분이 보상됨을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

교류 전동기는 전류의 측정오차와 데드타임 그리고 회전자 편심에 의한 상간 비대칭 등의 영향으로 전기각 주파수에 동기된 주기적인 토크리플이 발생된다.^[1-3] 최근 가감속의 빠른 응답성을 향상시키기 위해 저관성 모터가 상용화되는 경우가 많아지고 있다. 토크리플의 영향은 특히 관성이 작은 경우에 심각하게 발생하며, 이를 보상하지 않으면 모터구동성능이 매우 저하 된다. 토크리플 보상은 속도리플을 관측하는 속도리플 관측기와 속도리플 관측기에서 구한 값을 통해 토크리플을 보상하는 토크리플 보상기로 나눈다.^[1] 참고문헌 [1]의 속도리플 관측기에서 고조파 리플성분이 나타난다.

본 논문은 교류전동기의 주기적인 토크리플의 보상에 중점을 둔다. 제안된 보상 알고리즘은 속도 정보만으로 계산되므로 전동기 제원이 가변되더라도 고려할 필요가 없다. 제안한 속도리플 관측기는 속도리플 성분만을 구하고 고조파 리플성분은 없다. 그리고 토크리플 보상이 향상됨을 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

2. 주기적인 토크리플 보상기

2.1 속도리플 관측기

그림 1은 주기적인 토크리플 보상 알고리즘의 블록도이다. 토크에 각속도 $n\omega_e$ 을 가진 n 차 고조파 리플이 존재한다면 이 성분은 속도에도 존재한다. 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\omega_{m_ripple_n}(t) = \omega_{m_na} \cos(n\omega_e t) + \omega_{m_nb} \sin(n\omega_e t) \quad (1)$$

속도리플 관측기는 속도리플에서 ω_{m_na} , ω_{m_nb} 을 구한다.

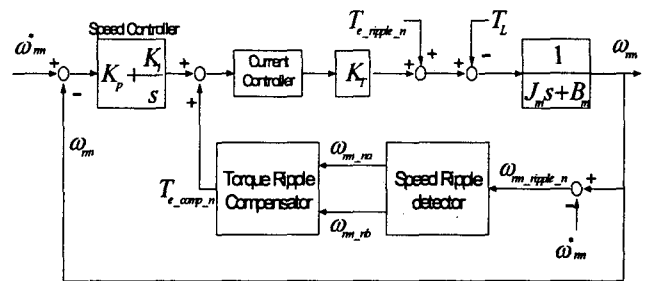


그림 1 토크리플 보상 기법

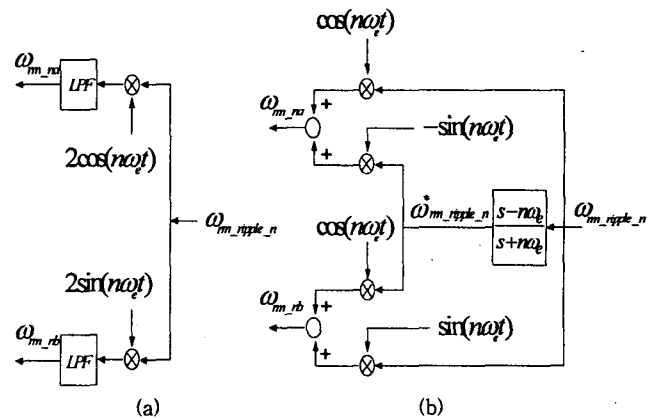


그림 2 속도리플 관측기
(a) 기존방식
(b) 가상dq방식

2.1.1 기존방식의 속도리플 관측기

그림 2(a)는 기존방식의 속도리플 관측기의 블록도이다. n 차 고조파의 계수, ω_{m_na} , ω_{m_nb} 을 구하기 위해, 식 (1)에 $2\cos(n\omega_e t)$ 를 곱하게 되면

$$\begin{aligned} & \omega_{m_ripple_n} \times 2\cos(n\omega_e t) \\ & = \omega_{m_na} + \omega_{m_na} \cos(2n\omega_e t) + \omega_{m_nb} \sin(2n\omega_e t) \quad (2) \end{aligned}$$

이 된다. 식 (2)는 차단주파수를 $n\omega_e$ 보다 매우 작은 저역 통과필터(Low Pass Filter)를 통과하게 되면 ω_{rm_na} 를 구할 수 있다. 또한 ω_{rm_nb} 는 같은 원리로 구할 수 있다. 차단주파수를 높였을 경우에 고조파 리플성분이 많이 유입되며 반대로 차단주파수를 낮추었을 경우에 응답속도가 느려진다.

2.1.2 가상dq(Virtual-dq)방식의 속도리플관측기

그림 2(b)의 블록도는 제안한 가상dq방식의 속도리플 관측기이다. $n\omega_e$ 을 가지는 속도리플이 필터 $F(s) = \frac{s - n\omega_e}{s + n\omega_e}$ 을 거치면 다음과 같다.

$$\omega_{rm_ripple_n}^*(t) = -\omega_{rm_na} \sin(n\omega_e t) + \omega_{rm_nb} \cos(n\omega_e t) \quad (3)$$

식 (1)의 속도리플 성분과 식 (3)의 위상 이동시킨 속도리플 성분은 식 (4)의 계산으로 ω_{rm_na} , ω_{rm_nb} 를 구한다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{b_n} \\ \omega_{a_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\omega_e t) & \sin(n\omega_e t) \\ -\sin(n\omega_e t) & \cos(n\omega_e t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ripple_n}^* \\ \omega_{ripple_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)의 의해 제안한 가상dq방식의 속도리플 관측기는 고조파 리플성분이 포함하지 않으며 원하는 속도리플 성분을 바로 얻을 수 있어 응답속도가 빠르다.

2.2 토크리플 보상기

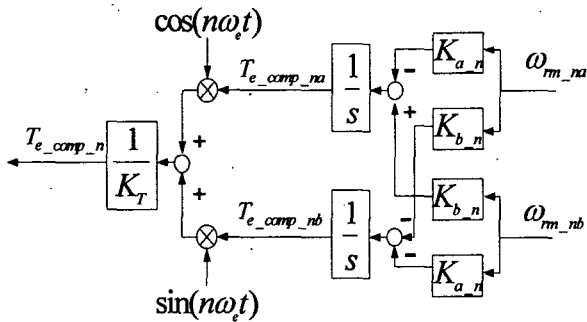


그림 3 토크리플 보상기

그림 3은 토크리플 보상기의 블록도이다. 수식은 계산의 편의를 위해 전기각주파수의 1배인 성분만 고려하여 수식 전개한다. 전기각주파수의 1배인 속도리플의 식은 속도리플의 복소함수식의 실수부로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{rm_ripple_1}(t) &= \omega_{rm_a}(t) \cos \omega_e t + \omega_{rm_b}(t) \sin \omega_e t \\ &= \text{Re}[(\omega_{rm_a}(t) - j\omega_{rm_b}(t)) e^{j\omega_e t}] \quad (5) \end{aligned}$$

식 (5)에서와 같이 토크리플의 식도 토크리플의 복소함수식의 실수부로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{e_ripple_1}(t) &= T_{e_a}(t) \cos \omega_e t + T_{e_b}(t) \sin \omega_e t \\ &= \text{Re}[(T_{e_a}(t) - jT_{e_b}(t)) e^{j\omega_e t}] \quad (6) \end{aligned}$$

토크리플 보상기의 식은 그림 3에서 유도할 수 있다. 토크리플 보상기의 식은 복소함수식의 실수부 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{e_comp_1}(t) &= (\int [-K_{a_1}\omega_{rm_a}(t) + K_{b_1}\omega_{rm_b}(t)] dt) \cos \omega_e t \\ &\quad + (\int [-K_{b_1}\omega_{rm_a}(t) - K_{a_1}\omega_{rm_b}(t)] dt) \sin \omega_e t \\ &= \text{Re}\{(-K_{a_1} + jK_{b_1})[\int (\omega_{rm_a}(t) - j\omega_{rm_b}(t)) dt] \times e^{j\omega_e t}\} \quad (7) \end{aligned}$$

복소함수식의 라플라스변환은 복소함수식의 실수부의 라플라스변환과 구분하기 위해 A' 로 표기한다. 식 (5)과 식 (6) 그리고 식 (7)의 복소함수식을 라플라스변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega'_{rm_ripple_1}(s) &= \omega_{rm_a}(s - j\omega_e) - j\omega_{rm_b}(s - j\omega_e) \\ T'_{e_ripple_1}(s) &= T_{e_a}(s - j\omega_e) - jT_{e_b}(s - j\omega_e) \\ T'_{e_comp_1}(s) &= \frac{1}{s - j\omega_e} (-K_{a_1} + jK_{b_1}) [\omega_{rm_a}(s - j\omega_e) - j\omega_{rm_b}(s - j\omega_e)] \quad (8) \end{aligned}$$

그림 1에서 토크리플과 토크리플 보상에 대한 속도리플의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{rm_ripple_1}(s) &= \frac{s}{J_m s^2 + (B_m + K_T K_p)s + K_T K_i} T_{e_ripple_1}(s) \\ &\quad + \frac{s}{J_m s^2 + (B_m + K_T K_p)s + K_T K_i} T_{e_comp_1}(s) \quad (9) \end{aligned}$$

복소함수식으로 표현한 식 (8)의 토크리플식과 토크리플 보상식 그리고 속도리플식을 식 (9)에 대입하여 토크리플에 대한 속도리플의 전달함수로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\omega_{rm_a}(s - j\omega_e) - j\omega_{rm_b}(s - j\omega_e) \\ &= \left[\frac{s(s - j\omega_e)}{\{J_m s^2 + (B_m + K_T K_p)s + K_T K_i\}(s - j\omega_e) - (-K_{a_1} + jK_{b_1})s} \right] \\ &\quad \times [T_{e_a}(s - j\omega_e) - jT_{e_b}(s - j\omega_e)] \quad (10) \end{aligned}$$

식 (10)에서 양변에 s 대신에 $s + j\omega_e$ 으로 대입 정리하면

$$\omega_{rm_a}(s) - j\omega_{rm_b}(s) = \left[\frac{s(s+j\omega_e)}{[J_m(s+j\omega_e)^2 + (B_m + K_T K_p)(s+j\omega_e) + K_T K_i]s - (-K_{a-1} + jK_{b-1})(s+j\omega_e)} \right] \times [T_{e_a}(s) - jT_{e_b}(s)] \quad (11)$$

식 (11)에서 토크리플값(T_{e_a}, T_{e_b})이 일정하다면, 최종값 정리에 의해 $\omega_{rm_a}(t) - j\omega_{rm_b}(t)$ 는 '0'의 값을 가지므로 속도리플이 제거됨을 수식적으로 증명하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

그림 4는 제안한 속도리플 관측기와 기존방식의 속도리플 관측기의 성능비교를 위한 시뮬레이션 파형이다.

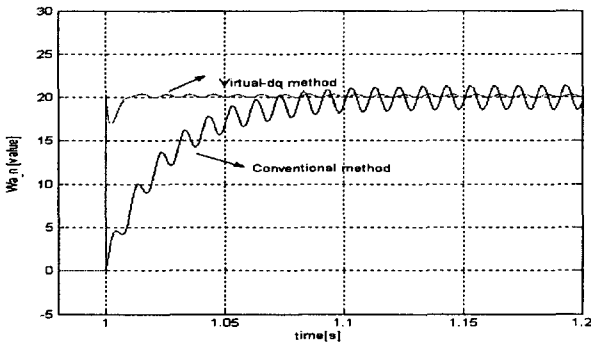


그림 4 기존방식과 가상dq방식의 시뮬레이션 파형

시뮬레이션에서 리플의 주파수는 50[Hz]이고 리플의 식은 $\omega_{rm_ripple}(t) = 20 \cos(\omega_e t) + 10 \sin(\omega_e t)$ 이다. 1초일 때부터 리플성분을 관측하였다. 기존방식은 계수의 리플성분 때문에 응답속도가 늦으나 제안한 가상dq방식은 속응성을 보인다. 제안한 속도리플 관측기가 기존방식 보다 성능이 개선됨을 증명하였다.

3.2 실험

제안한 보상 기법의 성능이 향상됨을 검증하기 위해 실험하였다. 실험에 사용한 전동기는 500[W] 영구자석 동기 전동기이고 전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 이 전동기의 특징은 속응성을 개선하기 위해 관성이 매우 작게 설계되었다는 것이다.

표 1 전동기 파라미터

용량	500[W]	관성	$2 \times 10^{-5} [kg \cdot m^2]$
정격토크	1.59[Nm]	극수	8극
정격속도	3000[rpm]	상저항	0.88[Ω]
최대속도	5000[rpm]	상인덕턴스	5.75[mH]
정격전류	4.8[A]	자속	0.057[Wb]
최대전류	14.4[A]		

실험에 사용된, 토크리플 보상의 보상이득 K_{a-n}, K_{b-n} 는 각각 0.18과 0을 사용하였다. 주파수에 따라 보상이득을 변경할 수 있으나, 안정적이면서도 빠른 토크리플 보상응답을 고려하여 설정하였다. 그리고 지령속도는 토크리플이 가장 심하게 나타나는 270[rpm]으로 설정하였다.

그림 5에서 기존방식을 사용한 보상에 비해 제안한 가상dq방식을 사용한 보상의 성능이 개선됨을 실험을 통해 검증하였다.

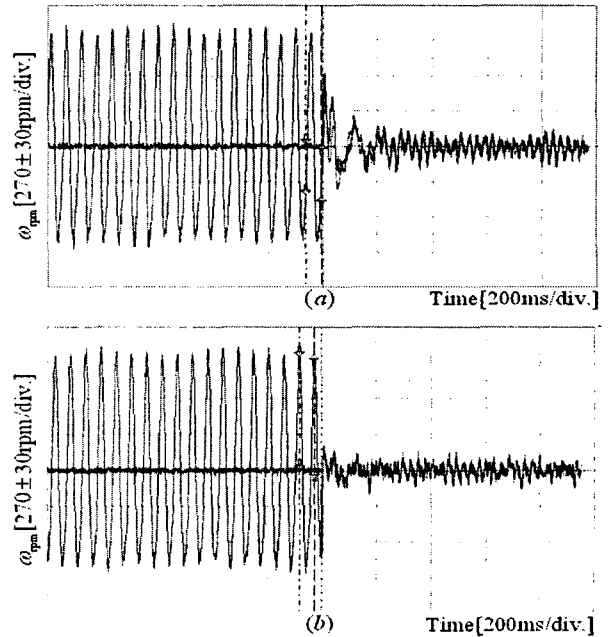


그림 5 주기적인 토크리플 보상이 동작할 때의 속도파형
(a) 기존방식의 속도파형
(b) 가상dq방식의 속도파형

4. 결론

본 논문은 교류전동기의 주기적인 고조파 리플의 보상에 중점을 두었다. 토크리플 보상의 해석을 통해 정상상태에서 속도리플이 제거됨을 증명하였고 시뮬레이션을 통해 제안한 속도리플 관측기는 기존방식의 속도리플 관측기에 비해 우수함을 증명하고 실험을 통해 보상의 성능이 향상되었음을 검증하였다.

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R08-2003-000-10906-0)

참고 문헌

[1] Jong-Woo Choi, Sang-Sup Lee, Sang-Yeop Yu and Seok-Joo Jang, "Novel Periodic Torque Ripple Compensation Scheme in Vector Controlled AC motor drives," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998, pp. 81~85.

- [2] Roberto Barro and Ping Hsu, "Torque Ripple Compensation of Induction Motors under Field Oriented Control," IEEE APEC Conference, 1997, pp. 527~533.
- [3] Weizhe Qian and S.K. Panda, "Torque ripple minimization in PM synchronous motors using iterative learning control," Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004, pp. 272~279.
- [4] Philip Beccue, Jason Neely, Steve Pekarek, Daniel Stutts, "Measurement and control of torque ripple-induced frame torsional vibration in a surface mount permanent magnet machine," Power Electronics, IEEE Transactions on, 2005, pp. 182~191.