

인버터로 구동되는 동기전동기 시스템에서의 토크리플 저감

원의연[○], 이동근, 홍순찬

단국대학교 전기공학과

Torque Ripple Reduction in Synchronous Motor Systems Driven by an Inverter

Euy-Youn Won[○], Dong-Keun Lee, Soon-Chan Hong

Department of Electrical Engineering, Dankook University

ABSTRACT

This paper proposes a new method to reduce the torque ripple in vector controlled inverter fed synchronous motor systems. In three phase voltage source inverter systems, all the three line currents are generally not measured and the currents of two lines are measured through two sensors and two A/D converters. The measured currents may contain some error due to the non-ideality of the current sensors and A/D converters, and the error coefficient of two line currents are not same. As a result, the developed torque contains the torque ripple. The proposed method can eliminate the torque ripple by setting the error coefficient to same value. To verify the proposed method, digital simulations are carried out.

1. 서론

오늘날 산업의 발달로 자동화 및 제어기기 분야에서 동특성이 우수한 제어시스템이 요구되고 있다. 정밀하고 빠른 응답특성이 요구되는 제어용 전동기로는 대부분 직류전동기가 사용되어 왔으나, 직류전동기는 정류자 및 브러시를 가지고 있어서 이에 대한 정기적인 유지, 보수를 필요로 하는 단점이 있고, 별도의 직류전원이 필요하다. 이에 반해 교류전동기는 보수, 유지가 쉽고 견고하며 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점이 있는 반면에 구동조건을 만족시키기가 쉽지 않다. 그러나 근래에 들어 제어기술의 발전과 더불어 반도체 기술의 향상으로 인해 교류전동기로의 전환이 적극적으로 이루어지고 있다.

벡터제어기법을 사용하여 교류전동기(유도전동기나 동기전동기)를 제어하는 시스템은 크게 보아 교류전동기, 디지털제어기, 인버터로 구성된다. 이러한 시스템에서는 출력토크를 제어하기 위하여 반드시 전동기에 유입되는 삼상전류를 변환시켜야 하는데, 키르히호프의 전류법칙에 따라 세 상의 전류의 합이 0이러는데 착안하여 두상의 전류 값만을 읽어들인다. 여기서 전류센서의 출력은 아니라고 할지라도 이 값을 D/A컨버터를 사용하여 디지털값으로 바꾸어 시스템 제어기에 보내진다. 이때 제어기가 읽어들이는 전류값은 두상의 전류센서와 D/A컨버터의 이득이 실제에 있어서 똑같지 않기 때문에 불가피하게 오차가 포함되는데 이 오차에 의하여 전동기의 토크리플이 증가한다. 이에 따라 교류전동기가 서보용전동기로 사용될 경우에 문제가 될 수 있으며 이러한 문제는 저속일수록 심각해진다.

본 연구에서는 삼상 전압형인버터로 구동되는 동기전동기시스

템에서 위와 같은 오차를 보정하여 출력토크의 리플을 저감시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하고 해석함으로써 동기전동기가 보다 고성능의 제어가 가능하도록 하고자 한다.

2. 벡터제어시 동기전동기의 전압방정식

동기 회전좌표계의 dq좌표축은 동기속도로 회전하므로 이 좌표축에서 볼 때 동기속도로 회전하고 있는 고정자의 전류 및 전압벡터는 일정한 방향과 크기를 가지게 되며 다음과 같이 표현된다.^[1]

$$\sqrt{2} I_s = i_d + j i_q \quad (1)$$

$$\sqrt{2} V_s = v_d + j v_q \quad (2)$$

전동기의 고정자 권선은 3상 Y결선 대칭분포이고, 공극의 기자력은 정현파이며, 고정자 철심의 자화특성이 선형이라는 일반적인 가정을 전제로 하여 고정자의 전압방정식을 동기속도로 회전하는 dq 회전좌표계로 표현하면 다음과 같다.^{[2][3]}

$$v_d = (R_s + pL_d) i_d - \omega_r L_d i_q \quad (3)$$

$$v_q = (R_s + pL_q) i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_f \quad (4)$$

3. 동기전동기의 발생토크

abc 좌표계를 dq좌표계로 변환하였을 경우 전동기에 입력되는 전력은

$$Power = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (5)$$

이며^{[4][5]} 식(3),(4)를 대입하면 다음과 같다.

$$Power = \frac{3}{2} [(R_s i_d^2 + R_s i_q^2) + p(L_d i_d^2 + L_q i_q^2) + \{\omega_r(L_d - L_q) i_d i_q + \omega_r \lambda_f i_q\}] \quad (6)$$

여기서 $p = (d / dt)$ 이다. 이 식에서 우변의 첫번째 항은 고정자의 저항손실이고, 두번째 항은 인덕턴스에 의한 무효전력이며,

마지막 항이 기계적인 출력을 의미한다. 따라서 기계적 출력은 다음과 같다.

$$P_{mech} = \frac{3}{2} (\omega_s (L_d - L_q) i_q i_{ds} + \omega_s \lambda_f i_{\alpha}) \quad (7)$$

$$= \omega_m T_e$$

여기서 ω_m 은 기계적인 각속도로서 전기각속도 ω_s 와의 관계는 다음과 같다.

$$\omega_m = \frac{\omega_s}{P} \quad (8)$$

단, P는 전동기의 쌍극수(pole pair)이다. 그러므로 전동기의 발생토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_f i_{\alpha} + (L_d - L_q) i_{\alpha} i_{\beta} \quad (9)$$

윗 식에서 우측의 첫번째 항은 동기전동기의 고정자 자속과 회전자 자속의 작용에 의하여 발생된 토크를 의미하고, 두번째 항은 고정자 슬롯과 회전자의 형상에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 의미한다. 그러나, 회전자에 돌극성이 없을 경우에는 전동기의 d축 리액턴스와 q축 리액턴스가 같게 되어 ($L_d = L_q$) 발생 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_f i_{\alpha} \quad (10)$$

4. 오차가 포함된 d, q축 전류

그림 1은 3상 전압형 인버터시스템으로서 3선중 a, b상의 전류값을 전류센서와 A/D변환기를 통하여 측정하는 경우이다. 이론적으로는 키르히호프의 전류법칙에 따라 $i_c = -i_a - i_b$ 가 되므로 c상의 전류는 측정하지 않는 것이 일반적인데 a, b상에 설치된 전류센서와 A/D변환기의 이득율이 같지 않기 때문에 $i_c \neq -i_a - i_b$ 이며, 이런 부정확한 값으로 제어를 하면 정확한 제어를 할 수 없고 이로 인하여 토크리플이 발생한다.

a상과 b상에서 측정시에 발생하는 오차가 포함된 a, b상의 전류 i'_{α} , i'_{β} 는 a, b상의 오차계수를 k_{α} , k_{β} 라 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

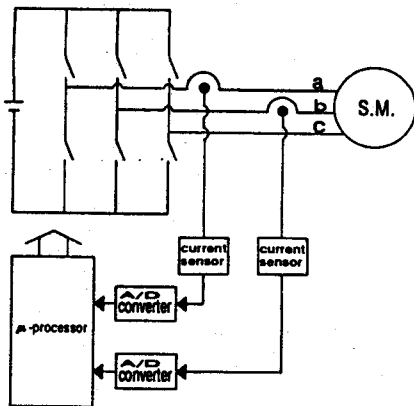


그림 1. 인버터 시스템

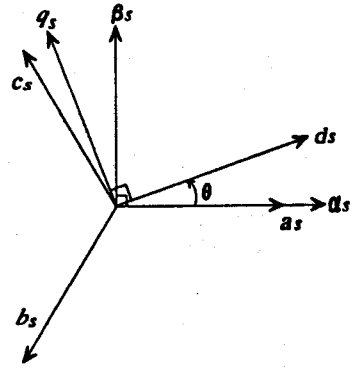


그림 2. 2상 고정좌표계, 3상 고정좌표계, 동기 회전좌표계 사이의 관계

$$i'_{\alpha} = k_{\alpha} i_{\alpha} \quad (11)$$

$$i'_{\beta} = k_{\beta} i_{\beta} \quad (12)$$

벡터제어기법으로 제어되는 시스템에서 3상 고정좌표계와 2상 고정좌표계, 동기회전좌표계를 그림으로 표시하면 그림2와 같으며 3상 고정좌표계와 2상 고정좌표계의 관계는

$$i_{\alpha} = i_{\alpha s} \quad (13)$$

$$i_{\beta} = -\frac{1}{2} i_{\alpha s} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta s} \quad (14)$$

$$i_{\alpha} = -\frac{1}{2} i_{\alpha s} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta s} \quad (15)$$

이며^{[6][7]} 따라서 다음이 성립한다.

$$i_{\alpha s} = i_{\alpha} \quad (16)$$

$$i_{\beta s} = \frac{1}{\sqrt{3}} (-i_{\alpha} - 2i_{\beta}) \quad (17)$$

또한 고정좌표계를 회전좌표계로 표시하면 다음과 같다.

$$i_{\beta} = i_{\alpha s} \cdot \cos \theta + i_{\beta s} \cdot \sin \theta \quad (18)$$

$$i_{\alpha} = -i_{\alpha s} \cdot \sin \theta + i_{\beta s} \cdot \cos \theta \quad (19)$$

식(16), (17)을 식(18), (19)에 대입해서 정리하면

$$i_{\beta} = i_{\alpha} \cdot \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (-i_{\alpha} - 2i_{\beta}) \cdot \sin \theta \quad (20)$$

$$i_{\alpha} = -i_{\alpha} \cdot \sin \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (-i_{\alpha} - 2i_{\beta}) \cdot \cos \theta \quad (21)$$

식(20)의 i_{α} 는 a상과 b상의 전류가 정확히 측정된 경우의 d축 전류이다. 그러나 앞에서 언급하였듯이 a, b상의 전류는 두개의 상에 설치된 전류센서와 A/D변환기에서의 측정 오차로 인하여 오차가 포함된 실제전류는 i'_{α} , i'_{β} 가 된다. 이때의 d축전류를 i'_{ds} 라 하면

$$i'_{ds} = i'_{\alpha} \cdot \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (-i'_{\alpha} - 2i'_{\beta}) \cdot \sin \theta \quad (22)$$

이 성립하며 식(11), (12)를 대입하면 다음과 같다.

$$I_{ds} = k_a i_{as} \cdot \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (-k_a i_{as} - 2k_b i'_{bs}) \cdot \sin \theta \quad (23)$$

윗식을 i_{bs} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$i_{bs} = \frac{k_a}{k_b} \cdot \frac{1}{2 \sin \theta} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta) i_{as} - \frac{\sqrt{3}}{2k_b \cdot \sin \theta} I_{ds} \quad (24)$$

위에서 구한 i_{bs} 를 식(20)에 대입하여 정리하면

$$i_{ds} = i_{as} \cdot \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(1 - \frac{k_a}{k_b} \right) + \frac{I_{ds}}{k_b} \quad (25)$$

이며 바로 이 전류가 실제 연산에 사용되는 d 축 전류가 된다.

q 축 전류의 경우에도 d 축 전류와 마찬가지로 식(21)의 i_{qs} 는 이상적인 경우이다. 이때에도 a 상과 b 상의 전류가 오차가 포함된 i'_{as} , i'_{bs} 일 때의 q 축 전류를 I_{qs} 라 하면 다음이 성립한다.

$$I_{qs} = -i'_{as} \cdot \sin \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (-i'_{as} - 2i'_{bs}) \cdot \cos \theta \quad (26)$$

식(26)에 식(11),(12)를 대입하여 i_{bs} 를 구하면 다음과 같다.

$$i_{bs} = -\frac{k_a}{k_b} \cdot \frac{1}{2 \cos \theta} (\sqrt{3} \sin \theta + \cos \theta) i_{as} - \frac{\sqrt{3}}{2k_b \cos \theta} I_{qs} \quad (27)$$

여기서 구한 i_{bs} 를 식(22)에 대입하여 정리하면 오차가 존재할 때의 q 축 전류 i_{qs} 는 다음과 같다.

$$i_{qs} = i_{as} \left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{k_a}{k_b} - 1 \right) + \frac{I_{qs}}{k_b} \quad (28)$$

5. 토크리플 감소

5.1 비돌극기일 경우

토크 수식(10)에서 알 수 있듯이 비돌극기일 경우에는 q 축 전류만 제어하면 토크를 제어할 수 있다. 그러나 오차가 포함된 전류수식(28)을 토크식(10)에 대입하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda \left\{ i_{as} \left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{k_a}{k_b} - 1 \right) + \frac{I_{qs}}{k_b} \right\} \quad (29)$$

a , b 상의 전류 측정 및 A/D변환에 오차가 존재하면 $k_a \neq 1$, $k_b \neq 1$ 이며 일반적으로 $k_a \neq k_b$ 이다. 따라서 식(29)의 첫항과 같은 토크리플이 존재한다. 그러나 k_a 나 k_b 가 1이 아니더라도 $k_a = k_b$ 로 제어하면 이 첫항이 소거되며 이때의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda \frac{I_{qs}}{k_a} \quad (30)$$

5.2 돌극기일 경우

돌극기일 경우에는 식(9)와 같이 토크가 i_{ds} , i_{qs} 에 관계되며 식(25), (28)을 대입하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \left[\lambda \left\{ i_{as} \left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{k_a}{k_b} - 1 \right) + \frac{I_{qs}}{k_b} \right\} + (L_d - L_q) \left\{ i_{as} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(1 - \frac{k_a}{k_b} \right) + \frac{I_{ds}}{k_b} \right\} \right. \\ \left. \times \left\{ i_{as} \left(\sin \theta + \frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{k_a}{k_b} - 1 \right) + \frac{I_{qs}}{k_b} \right\} \right] \quad (31)$$

이 경우에도 $k_a = k_b$ 로 인하여 토크리플이 존재하는데 여기서도 비돌극기와 마찬가지로 $k_a = k_b$ 로 제어하면 리플성분이 소거되며 이때의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \left\{ \lambda \frac{I_{ds}}{k_a} + (L_d - L_q) \frac{I_{ds}}{k_a} \cdot \frac{I_{qs}}{k_a} \right\} \quad (32)$$

6. 시뮬레이션

위에서 제시한 방법의 타당성을 알아보기 위하여 정격이 220[V], 2.2[kW], 2000[rpm]인 3상 동기전동기를 대상으로 하여 디지털 시뮬레이션을 행하였다.

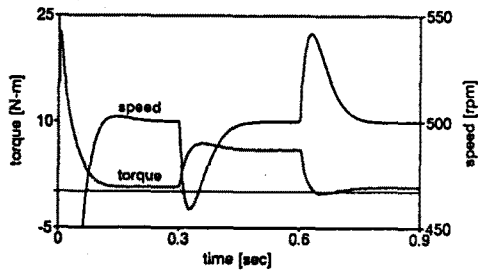
그림 3은 비돌극기에서 무부하상태로 500[rpm]으로 기동하고 0.3초에서 50%의 부하를 인가한 다음에 0.6초에 다시 무부하로 운전시켰을 경우의 동기전동기 발생토크와 확대한 속도응답을 나타내고 있다. 그림 3에서 (a)는 $k_a = k_b = 1$ 인 이상적인 경우로써 오차가 없을 때이며 (b)는 $k_a = 0.95$, $k_b = 1.05$ 로 오차가 포함된 경우이다. 그림 3(b)를 살펴보면 오차로 인하여 토크리플이 존재함을 알 수 있다. 그림 3(c)는 오차계수를 0.95로 통일한 경우이고 그림 3(d)는 오차계수를 1.05로 통일한 경우로써 그림 3(b)와 비교하여 보면 두 경우 모두 리플이 제거되었음을 알 수 있다. 그림 4는 돌극기의 경우로써 시뮬레이션의 조건은 비돌극기와 동일하다.

그림 4는 돌극기의 경우로써 시뮬레이션의 조건은 비돌극기의 경우와 같다. 그림 4에서도 그림 3과 마찬가지로 오차계수를 통일하면 토크리플이 제거됨을 확인할 수 있다.

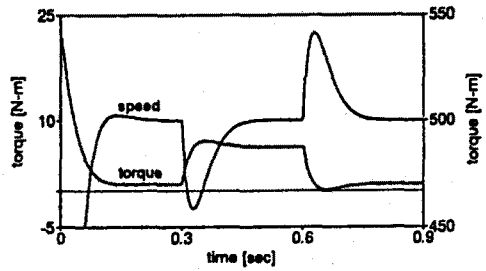
7. 결론

본 논문에서는 임비터로 구동되는 동기전동기 시스템에서 전류센서와 A/D변환기의 오차로 인하여 발생하는 토크리플을 제거할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 해석하였다. 제안한 방법은 돌극기와 비돌극기에 모두 적용할 수 있는데 전류측정에 오차가 포함되더라도 오차를 어느 한쪽으로 통일하면 토크리플이 제거된다. 이론적인 결과를 입증하기 위하여 디지털 시뮬레이션을 행하였으며 그 결과 돌극기나 비돌극기 모두 리플이 감소한다는 주목할만한 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 방법을 서보용제어에 적용하면 매우 우수한 응답특성이 있으리라 기대된다.

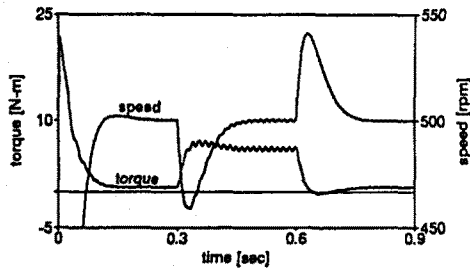
본 연구는 단국대학교 1995년도 대학연구비 지원에 의하여 연구되었음.



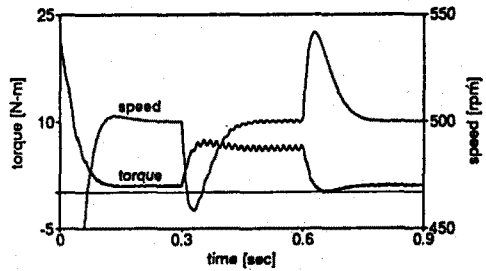
(a) $k_a=1, k_b=1$ 일 경우



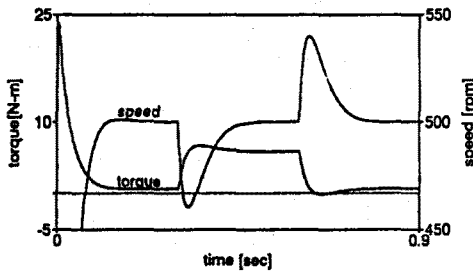
(a) $k_a=1, k_b=1$ 일 경우



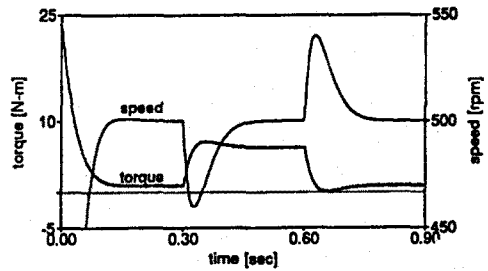
(b) $k_a=0.95, k_b=1.05$ 일 경우



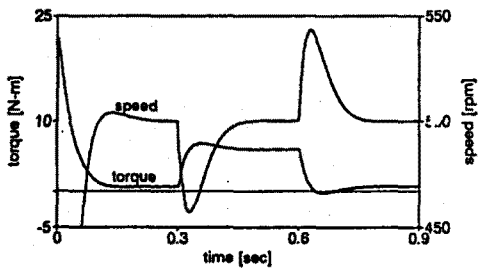
(b) $k_a=0.95, k_b=1.05$ 일 경우



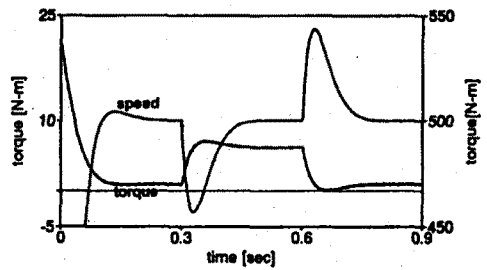
(c) $k_a=0.95, k_b=0.95$ 일 경우



(c) $k_a=0.95, k_b=0.95$ 일 경우



(d) $k_a=1.05, k_b=1.05$ 일 경우



(d) $k_a=1.05, k_b=1.05$ 일 경우

그림 3. 비돌극기에서의 발생토크와 속도응답

그림 4. 돌극기에서의 발생토크와 속도응답

참 고 문 헌

- [1] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", Oxford University Press, 1990.
- [2] 윤덕용, 홍순찬, "공간전압벡터 PWM 기법을 사용한 영구 자석형 동기전동기의 속도제어", 전기학회 논문지, 제43권, 제7호, pp. 1112~1120, 1994. 7
- [3] 전태원, 김홍근, 홍순찬, "영구자석형 교류 서보전동기의 전압 분리제어 방식을 사용한 벡터제어에 관한 연구", 전기학회 논문지, 제40권, 제2호, pp. 154~161, 1991.2
- [4] Peter Vas, "Electrical Machines and Drives, A Space-Vector Theory Approach", Oxford University Press, 1992.
- [5] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, 1986.
- [6] A. P. Morgan, "General Theory of Electrical Machines", Heyden, 1979
- [7] P. C. Krause, "Analysis of Electric machinery", McGraw-Hill, 1987.