

자화인덕턴스 추정을 이용한 약제자 영역에서의 유도전동기 벡터제어

최 대희 현 동석
한양대학교 전기공학과

Vector Control of an Induction Motors for the Field Weakening Region With the Tuning of the Magnetizing Inductance

D. H. Choi D. S. Hyun
Dept. of Electricl Eng.

ABSTRACT - In case of field weakening region, the dynamic behavior of the speed controller depends on the rotor flux level. In this region, the flux is decreased inversely proportional to the rotor speed. As the rotor flux is decreased, as the magnetizing inductance is increased. In this paper, the effect of this increased magnetizing inductance to the performance of vector control is illustrated. The stationary reference frame torque not including the magnetizing inductance is calculated by stationary stator flux, and the rotating reference frame torque including the magnetizing inductance is calculated by rotating rotor flux. If the magnetizing inductance value is constant, two torque values are same regardless of the flux-component current. However, if the magnetizing inductance is varied, those two values are different. The paper presents the new tuning scheme of the magnetizing inductance using the difference between the stationary and rotating torque. Computer simulation demonstrates the efficacy of the proposed scheme.

1. 서 론

고속 운전을 필요로 하는 스피들 드라이브, 전기철도, 전기 자동차 등의 부하 운전이 있어서 정격속도 이상의 제어가 수행되어야 한다. 이러한 영역에서는 전압 여유분이 감소하게 되므로, 적절한 토크 응답을 기대하기 어렵다고 할 수 있다. 이에 따라, 최대 토크 운전을 위한 여러 연구가 진행되어 왔다 [1]-[4]. 정격속도 이상의 운전을 할 경우, 전동기의 사용가능한 전력 제한 때문에 운전 속도의 증가를 위해서는 토크 지령을 속도 지령에 반비례하게 감소시켜야 한다. 일반적인 토크 식은 다음과 같다.

$$T_e = k\phi i \quad (1)$$

위의 식 (1)을 살펴보면, 토크분 전류를 일정하게 유지시키며 토크를 감소시키기 위해서는 자속 ϕ 를 속도 증가에 반비례하게 감소시켜야 하는데, 이러한 이유로 정격속도 이상의 운전영역을 약제자 영역이라고 한다.

2. 자화인덕턴스의 변화

약제자 영역에서는 속도의 증가에 따라 자속의 기준치가 감소하게 된다. 이에 따라, B-H 곡선상에서 원점쪽으로 이동하게 되어 자화인덕턴스가 증가하게 된다 [5],[6].

그림 1은 기준자속에 따른 자화인덕턴스의 변화를 나타낸다.

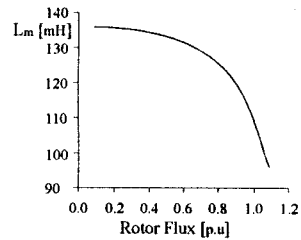


그림 1 자화인덕턴스의 변화

또한, 자화인덕턴스가 변화한다면 회전자 인덕턴스가 변화하게 되고, 이에 따라 회전자 시상수가 변화하여 슬립의 오차를 야기하게 된다. 이러한 오차는 간접벡터제어 시스템에서 가장 중요한 요소인 회전자자속 위치 정보에 오차를 발생하게 한다.

3. 자화인덕턴스 변화가 제어기에 미치는 영향

자화 인덕턴스가 자속기준치에 따라 증가하면 제어기에는 다음의 두 가지 영향을 미치게 된다.

- 자화 전류설정
- 비간섭 제어분의 변화

실제 전동기의 자화인덕턴스(L_m)가 제어기의 자화인덕턴스(L_m^*)보다 큰 경우, 자속기준치를 자화인덕턴스로 나누어 구하는 자속분 전류는 실제 자속분전류보다 크게 인가하는 형태가 되어 회전자자속을 과여자시키게 된다.

전압방정식을 이용하여 과여자에 의한 문제점을 확인해 보기 위해 고정자 전압방정식을 d 축과 q 축으로 나타내보면 식 (2)와 같다.

$$V_{ds} = (R_s + \sigma L_s p) i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} p \lambda_{dr} - \omega_e (\sigma L_s i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qr}) \quad (2-a)$$

$$V_{qr} = (R_s + \sigma L_s p) i_{qr} + \frac{L_m}{L_r} p \lambda_{qr} + \omega_e (\sigma L_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}) \quad (2-b)$$

약계자 영역 운전이 정상상태의 경우라고 가정하면 자속의 변화($p\lambda_{dr}$) 및 λ_{qr} 이 존재하지 않는다. 즉,

$$p\lambda_{dr} = i_{dr} = \lambda_{qr} = 0 \quad (3)$$

따라서, 식 (3)를 이용하면 식 (2)는 식 (4)와 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$V_{ds} = (R_s + \sigma L_s p) i_{ds} - \omega_e \sigma L_s i_{qs} \quad (4-a)$$

$$V_{qs} = (R_s + \sigma L_s p) i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} \quad (4-b)$$

$$\text{단, } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

식 (4)를 살펴 보면 속도가 증가함에 따라 ω_e 가 증가하게 되어 속도기전력분이 크게 증가함을 알 수 있다. 이때 속도기전력의 크기가 입력 전압에 가까이 증가되어 전류 제어를 위한 전압 여유분인 $p i_{qs}$ 가 감소하게 된다. 따라서 토크분 전류인 i_{qs} 의 변화가 원활하지 않게 되어 전류 지령의 빠른 추종을 어렵게 한다. 즉, 약계자 영역에서 속도 기전력이 크게 증가하여 전류제어를 위한 전압 여유분이 감소하므로 속응적인 토크 응답을 기대할 수 없게 된다.

d, q 축 전류간의 분리 제어를 위하여 비간섭 제어를 하게 되는데, 이러한 비간섭분에 대한 자화인덕턴스의 영향을 보기 위해 식 (4-a)를 살펴 보면 다음과 같다. 고속 운전시, 자화인덕턴스가 증가한다면 q 축 전압방정식내의 속도 기전력인 $\omega_e L_s i_{ds}$ 에서 L_s 의 값이 증가하게 된다. 정 토크 영역에서는 이러한 속도 기전력이 큰 영향을 주지는 않지만 기준 속도 이상의 고속영역에서는 ω_e 가 큰 값이므로 자화인덕턴스의 변화에 의한 영향이 매우 크게 되어 전압 여유분을 상당히 감소시키게 된다.

따라서, 약계자 영역인 고속영역에 있어서 자화인덕턴스를 추정하지 않게 되면 부하에 따른 토크의 변화를 위한 토크분 전류의 여유분($p i_{qs}$)을 감소시키게 되어 순시적인 토크 발생을 어렵게 한다. 그래서 약계자 영역에서 자화인덕턴스를 On-Line Tuning하는 기법이 필요하다.

이러한 배경에 따라 본 논문에서는 정지좌표계 및 회전좌표계에서의 토크를 이용하는 자화인덕턴스 추정 방법을 제안한다.

4. 자화인덕턴스의 추정

4-1. 정지좌표계에서의 토크

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{dr} i_{dr} = k (\lambda_{dr} i_{dr} - \lambda_{qr} i_{qr}) \quad (5)$$

$$\text{단, } k = \frac{3}{2} \frac{P}{2}$$

식 (5)에서 정지좌표계 고정자 자속을 구하기 위하여 다음의 식 (6)을 이용한다.

$$\lambda_{dr} = \int (V_{dr} - R_s i_{dr}) dt \quad (6-a)$$

$$\lambda_{qr} = \int (V_{qr} - R_s i_{qr}) dt \quad (6-b)$$

자속을 구하기 위하여 사용하는 식 (6)의 파라미터로는 고정자 저항만이 존재한다. 그러나, 약계자 영역 운전에서는 기전력이 크게 증가하기 때문에 고정자 저항은 무시할 수 있다. 따라서, 식 (5)의 정지좌표계 토크식은 파라미터의 영향이 없다고 할 수 있으며 자화인덕턴스 설정오차의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

4-2. 회전좌표계에서의 토크

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{dr} = k \frac{L_m^2}{L_r} i_{dr} i_{dr} \approx k L_m i_{dr} i_{dr} \quad (7)$$

$$\text{단, } k = \frac{3}{2} \frac{P}{2}$$

식 (7)에서 $L_m/L_r \approx 1$ 이라고 할 수 있으므로 회전좌표계에서 구하는 토크는 자화인덕턴스의 영향을 직접적으로 받는다는 것을 알 수 있다.

그러나, 이러한 토크식을 사용하기 위하여는 정확한 슬립을 결정하여 λ_{qr} 이 0이 되어야 한다는 기본 가정이 필요하게 된다.

한편, 자화인덕턴스가 변화함에 따라 회전자 인덕턴스도 변화하게 된다. 따라서, 제어기 내에서 슬립을 구하기 위해 사용되는 회전자 시정수의 변화가 발생하게 되므로 위에서 언급한 기본가정을 만족시키지 못하게 된다. 그리고, 슬립은 회전자 저항의 변화에 의한 회전자 시정수의 변화에도 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 정지좌표계와 회전좌표계에서의 토크각이 동일함을 이용하는 회전자 시정수 조정 방식으로 정확한 슬립을 구하여 이러한 기본가정을 만족시킨다 [7].

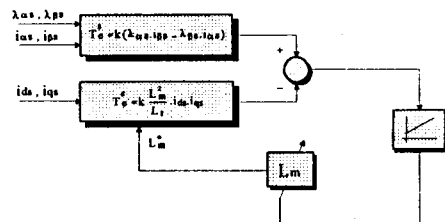


그림 2 제안한 자화인덕턴스 추정

제안한 자화인덕턴스의 추정방법은 그림 2에서 나타내듯이 약계자 영역에서 자속기준치가 감소하여 인덕턴스의 변화가 발생할 경우, 인덕턴스를 포함하지 않는 정지좌표계에서의 토크와 인덕턴스를 포함하는 회전좌표계에서의 토크와의 차이를 PI 제어하여 자화인덕턴스를 추정하는 형태로 구성된다.

