

자속 및 토크 기울기를 이용한 유도전동기의 직접토크 제어

최연옥, 최문한, 정삼영, 조근배, 백형래
 * 조선대학교 **한국수력원자력(주)

Direct Torque Control of Induction Motor Using Flux & Torque Slop

Youn-Ok Choi, Mon-Han Choi, Sam-Young Jeong, Geum-Bae Cho, Hyung-Lae Baek
 * Dept. of Electrical Eng. Chosun Univ ** Korea Hydro & Nuclear Power Company

Abstract - The conventional DTC strategy provides a fast torque response even though it has very simple scheme consisted with only two hysteresis band comparators and a switching table for torque and flux control. Drawbacks of the conventional DTC are relatively high torque ripple at low speed and variation of the switching frequency according to motor speed. In this paper, the new direct torque control(DTC) schemes are proposed. Those schemes are based on the torque slope and flux to reduce the torque ripple.

1. 서 론

직접토크제어는 공간벡터개념을 기본으로 하고 있으며 스칼라 제어방식인 V/F 제어방식과 같이 제어기 구성이 단순한 반면 벡터제어방식과 같이 전동기의 정수 중에서 고정자 저항에 대한 정보만을 필요로 하므로 급작스러운 부하 변동이나 순간적인 지령치 변동 등에 대한 속응성이 우수하다. 다만 직접 토크제어 방식은 기동시 또는 저속운전시 큰 토크 리플이 발생하기 쉽고, 인버터의 설계에 중요한 변수 중의 하나인 스위칭 주파수가 히스테리시스 비교기의 밴드폭에 의해 크게 변화되는 단점을 지니고 있다.^[1]

평균토크 제어기법은 기존의 리플 최소화 직접 토크 제어 방식과 유사하며 하나의 스위칭 구간내에서 하나의 유효전압벡터만을 적용하므로 하나의 스위칭구간에서 2개의 유효전압벡터를 적용하는 SVPWM 방식에 비해 스위칭 주파수를 2/3로 감소시킬 수 있는 반면 자속의 리플이 큰 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 SVPWM 방식과 같이 하나의 스위칭 구간에서 섹터에 인접한 2개의 유효벡터를 적절한 시비율로 인가하는 자속과 토크 기울기를 이용한 직접 토크 제어기법을 제안하여 자속의 리플이 감소됨을 시뮬레이션을 통하여 검증하고 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 유도전동기 구동시스템 모델링

유도전동기는 직교의 정지좌표에서 식 (1)과 같이 모델링된다. 널리 알려진 유도전동기 등가회로 부터 회전자 자속은 식 (2)와 같이 고정자 전류와 고정자 자속으로 나타낼 수 있으며,

$$\begin{aligned} \dot{i}_{ds} &= -a_1 i_{ds} + a_3 \lambda_{dr} + a_4 \omega_r \lambda_{or} + b v_{ds} \\ \dot{i}_{qs} &= -a_1 i_{qs} - a_4 \omega_r \lambda_{dr} + a_3 \lambda_{or} + b v_{qs} \\ \dot{\lambda}_{dr} &= a_5 i_{ds} - a_7 \lambda_{dr} - a_8 \omega_r \lambda_{or} \\ \dot{\lambda}_{or} &= a_5 i_{qs} + a_8 \omega_r \lambda_{dr} - a_7 \lambda_{or} \\ \dot{\omega}_r &= \frac{N_p}{J} (T_e - T_L) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_1 &= \left(\frac{R_r M^2}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s} \right), \quad a_3 = \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r^2}, \\ a_4 &= \frac{M}{\sigma L_s L_r}, \quad a_5 = \frac{R_r M}{L_r}, \quad a_6 = \frac{R_r}{L_r}, \quad a_8 = 1 \\ b &= \frac{1}{\sigma L_s} \end{aligned}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{N_p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{or} i_{ds})$$

R_s 및 R_r : 고정자 및 회전자 저항
 L_s, L_r , & M : 고정자, 회전자 및 상호 인덕턴스

$\sigma = 1 - M^2 / (L_s L_r)$: 누설계수

N_p : 극의 쌍 수

J : 회전자 관성

T_L : 부하 토크

$$\begin{aligned} \lambda_{dr} &= \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds} - \sigma L_s i_{ds}) \\ \lambda_{or} &= \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs} - \sigma L_s i_{qs}) \end{aligned} \quad (2)$$

고정자 자속은 식 (3)과 같이 인가 전압 및 고정자 전류에 의해 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{ds} &= v_{ds} - R_s i_{ds} \\ \dot{\lambda}_{qs} &= v_{qs} - R_s i_{qs} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 직접토크 제어

3.1 직접토크 제어 기법

직접토크제어는 순시 토크와 순시 자속을 독립적으로 제어하는 방법으로 자속과 토크의 지령치를 입력받아 각각 유도전동기의 고정자 전압과 고정자 전류 정보를 이용해 추정된 고정자 자속 및 고정자 전류와 추정 자속으로부터 연산된 추정 토크와 비교하여 오차를 발생한다. 발생한 오차를 히스테리시스 밴드폭과 비교하여 매 연산주기마다 오차가 최소화하도록 인버터의 전압벡터를 선정하는 직접토크제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어하므로 빠른 응답성과 정확성을 얻을 수 있으며 제어기 구성이 단순하다는 장점을 가지고 있으나 히스테리시스 제어를 사용함으로써 스위칭 주파수가 가변적이고 토크 리플이 크며 기동 및 저속 특성이 양호하지 않는 단점이 있다.^[3,4,5]

그림 1은 유도전동기의 직접토크제어의 블록다이어그램으로 제어기의 구성은 크게 고정자 자속과 토크 연산 블록, 자속과 토크 제어를 위한 히스테리시스 비교기, 전압벡터 선정블록으로 구분된다.^[1]

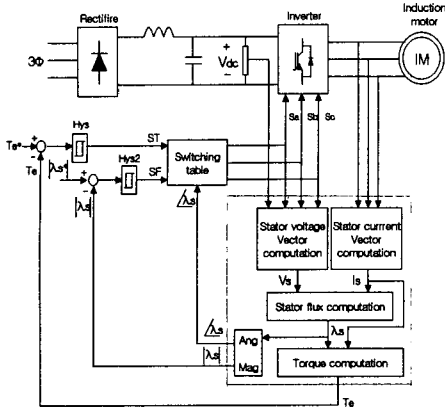


Fig. 1 Block diagram of IM drive under DTC.

3.2 최적 스위칭 전압벡터

고정자 자속과 고정자 전압과의 관계는 식 (3)을 이용하여 직접토크제어는 인버터의 출력인 고정자 전압으로부터 고정자 자속을 직접 제어한다.^[4]

여기서 인버터 전압벡터를 발생시키는데 필요한 섹터는 식 (4)와 같이 고정자 자속의 크기와 위치각을 이용하여 결정된다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2} \quad (4)$$

$$\angle \lambda_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right)$$

또한, 정상운전시 식 (3)에 포함된 고정자 저항값은 일반적으로 작은 값이므로 이에 의한 전압강하 $R_s i_{ds}$ 를 무시하면 고정자 자속은 고정자 전압의 크기에 정 비례한 벡터로 간주할 수 있다. 따라서 어느 순간 에서 식 (3)의 고정자 자속은 식 (5)와 같이 이산형으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda_s = V_s \times \Delta t \quad (5)$$

여기서, Δt 는 샘플링 주기이다.

그림 2는 인버터 전압벡터를 이용하여 자속 및 토크를 제어하는 원리를 설명하기 위하여 고정자 자속의 섹터 및 인버터 전압벡터를 나타낸 것이다. 그림 2에서 고정자 자속벡터가 섹터 1에 위치하고 있고 회전자가 화살표 방향과 같이 반시계 방향으로 회전하고 있다고 가정하면 고정자 자속 λ_s 는 고정자 자속과 인버터 전압의 벡터합에 의해 제어되며, 토크는 토크와 인버터 전압의 벡터합에 의하여 제어된다. 즉, 인버터 전압벡터 V_2 는 고정자 자속과 토크를 증가시키고, V_3 는 자속은 감소시키는 반면 토크를 증가시킨다. V_5 는 자속과 토크를 모두 감소시키며, V_6 은 자속을 증가시키고 토크는 감소시킨다. 또한 V_1 은 자속을 증가시키나 토크는 거의 변화시키지 않으며, V_4 는 자속을 감소시키나 토크는 거의 변화시키지 않는다. 더불어 영전압벡터 V_0 및 V_7 은 자속을 변화시키지 않는 반면 토크를 감소시킨다. 이와 같은 방법으로 고정자 자속이 다른 섹터에 머무르는 경우에도 전압벡터가 고정자 자속 및 토크에 미치는 영향을 검토하면 토크 및 자속 제어에 필요한 전압벡터를 손쉽게 결정할 수 있다.

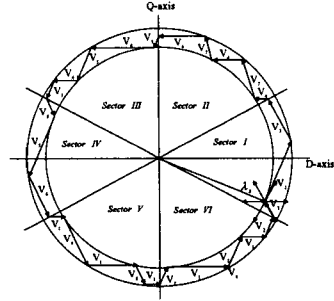


Fig. 2 Variation of stator flux(stator flux is in sector 1)

4. 제안한 자속 과 토크 기율기에 의한 DTC

4.1 고정자 자속 기율기 연산

고정자 자속식을 다시 쓰면 식(6)와 같다.

$$\frac{d\lambda_s}{dt} = V_s - R_s i_s \quad (6)$$

$$\frac{\Delta \lambda_s}{T_s} = V_s - R_s i_s$$

여기서 $-R_s i_s$ 성분을 무시하면 전압 V_s 에 의한 자속의 기율기는 식(7)와 같다.

$$f_v = V_{dc} \cos \theta \quad (7)$$

이고 전압벡터 벡터 V_{n+1} 과 V_{n+2} 와의 자속각 θ_s 에 의한 자속의 기율기는 식(8)로 표현된다.

$$f_{v1} = V_{dc} \cos(\pi/3 - \theta_s) \quad (8)$$

$$f_{v2} = V_{dc} \cos(2\pi/3 - \theta_s)$$

식(6)에 포함된 $-R_s i_s$ 성분에 의한 자속의 기율기는 식(9)와 같다.

$$f_n = -R_s i_s \cos(\theta_i - \theta_s) \quad (9)$$

그림 3는 하나의 섹터 내에서 인접한 전압벡터에 의한 자속의 기율기를 나타낸 것이다.

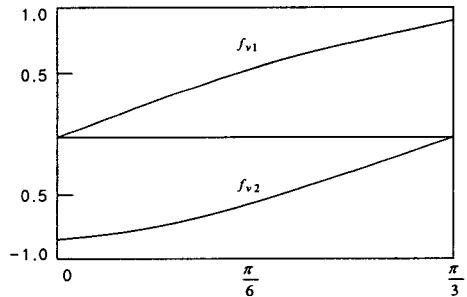


Fig. 3 Slope of flux with effective vector

4.2 자속 및 토크 기율기에 의한 직저토크 제어

식(8)에서 f_{v1} 은 자속의 증가 기율기이고, f_{v2} 는 V_{n+2} 벡터에 의한 자속의 감소 기율기이고 및 f_n 은 자속의 전류성분에 의한 자속의 감소 기율기이다. f_{v2} 에

비해 f_n 의 크기는 상대적으로 적으므로 f_n 을 무시하면 자속의 리플은 f_{v1} 과 f_{v2} 를 이용하여 제어할 수 있다. 여기서 자속 리플을 최소화하기 위하여 하나의 스위칭 구간내에서 자속의 증가분과 감소분을 동일하게 유지하기 위한 V_{n+1} 벡터의 인가시간비율을 t_a 라고 하면 t_a 는 다음과 같이 구해진다.

$$t_a = \frac{|f_{v2}|}{|f_{v1}| + |f_{v2}|} \quad (10)$$

또한 V_{n+2} 벡터의 인가시간비율을 t_b 라고 하면 t_b 는 다음 식(11)과 같다.

$$t_b = 1 - t_a = \frac{|f_{v1}|}{|f_{v1}| + |f_{v2}|} \quad (11)$$

여기서 t_a 와 t_b 는 유효벡터의 인가시간이므로 이들 시간을 이용하여 토오크의 증가기울기는 식(12)와 같이 구해진다.

$$S_{\rho 12} = S_{v1}t_a + S_{v2}t_b \quad (12)$$

식(12)에서 구해진 토오크 합성된 증가기울기와 감소기울기를 이용하여 유효 스위칭 시간 T_{on} 은 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{on} = \frac{|S_{v1}|}{|S_{\rho 12}|} T_s \quad (13)$$

식(12)와 식(13)로부터 유효전압벡터 V_{n+1} 과 V_{n+2} 의 인가시간을 T_{01} 과 T_{02} 라 하면 이들은 식(14)와 같다.

$$T_{01} = T_{on}t_a + k_a \Delta \lambda_s \quad (14)$$

$$T_{02} = T_{on}t_b - k_a \Delta \lambda_s$$

식(15)에서 $k_a \Delta \lambda_s$ 항은 자속오차 $\Delta \lambda_s$ 가 존재하는 경우 이를 제어하기 위한 보상식이다. 토오크 기울기를 이용한 제어방식과 같이 평균토오크 제어를 위한 보상식을 적용하면 식(13)은 식(15)와 같이 나타내어진다.

$$T_{on} = T_{om} - \left(\frac{1}{2} T_{om} S_{\rho 12} + \Delta T_e + k_a \Delta \lambda_s \right) \frac{1}{S_{\rho 12} - S_n} \quad (15)$$

식(15)에서 $k_a \Delta \lambda_s$ 또한 정역제어시 감소기울기가 영(0)에 근접하는 경우 유효 스위칭 시간이 영(0)에 가까워지므로 이에 따른 자속의 감소 현상을 완화하기 위하여 부가한 보상값이다.

5. 시뮬레이션 결과

그림 4는 무부하시 자속 및 토오크 기울기를 이용한 직접토오크 제어를 위해 자속제어를 위한 고정자의 기준 자속 및 자속비교기의 히스테리시스 밴드는 각각 0.3[Wb] 및 ± 0.02 [Wb]로 설정하였으며, 속도제어기 출력단에서 제공되는 토오크의 최대값은 10[N.m]으로 설정하였으며 그림 4(a)는 기준속도를 ± 1500 [rpm]으로 가변하였을 경우의 기준속도와 전동기 추종속도를 나타낸 것이며 (b)는 고정자 전류 (c)는 고정자 자속 (d)는 전동기 토오크 파형을 나타내고 있다.

그림 5(a)는 기준속도와 전동기 추종속도를 나타낸 것으로 부하 변동에 따른 과도상태에서 전동기 속도의 변화가 약간 보이고 있으나 전반적으로 양호한 제어가 이루어짐을 알 수 있다. (b)에서 8[N.m]의 부하가 인가되었을 때 고정자 전류의 리플의 크기는 최대 약 3[A]이며, (c)의 자속의 리플의 크기는 최대 약 0.02[Wb]이고, (d)의 토오크 리플의 크기는 최대 2.2[N.m]이다.

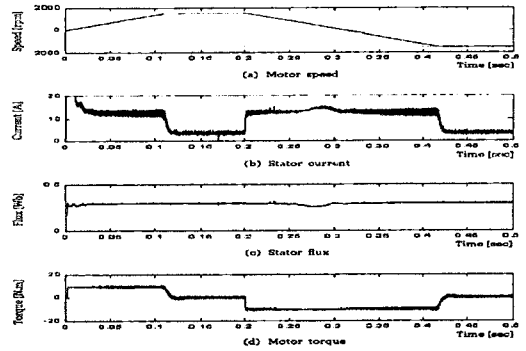


Fig. 4. No-load dynamic characteristics under flux & torque slope

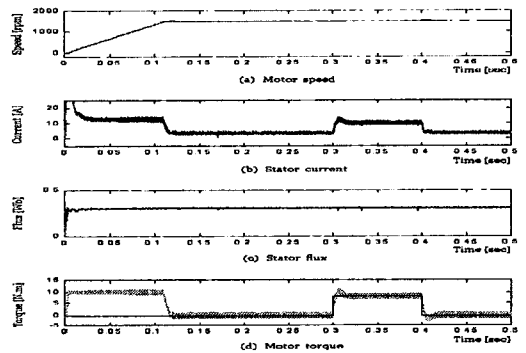


Fig. 5 Load dynamic characteristics under flux & torque slope

6. 결론

유도전동기의 벡터제어 방식은 신속하고 정확하게 자속 및 토오크를 제어할 수 있는 장점을 지고 있으나 제어알고리즘이 복잡하여 구현이 어렵고 경제적인 부담이 증가하므로 제어알고리즘이 비교적 간단한 직접토오크제어를 통하여 정확하고 빠른 자속과 토오크의 응답을 얻고자 하였다. 또한, 직접 토오크 제어 방식은 토오크 리플이 큰 문제점을 지니고 있어 이를 해소하기 위해 자속과 토오크 기울기를 이용한 새로운 직접 토오크 제어방식을 제안하여 시뮬레이션을 통하여 구현의 가능성을 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 22, No. 5 Sept/Oct, 1986, pp820~827
- [2] Jun-Koo Kang, Seung-Ki Sul, "New Direct Torque Control of Induction Motor for Minimum Torque Ripple and Constant Switching Frequency", IEEE, Trans. on Industry Application, Vol. 35, No. 5 Sept/Oct. 1999, 1076~1082
- [3] S.Y. Jeong, et al, "Application of Extended Luenberger Observer for Induction Motor control", ICPE'98, pp. 304-309, 1998
- [4] 조급배, 최연옥, 백형래, "저속영역에서의 동특성개선을 위한 유도전동기의 직접토오크 제어", 전력전자학회논문집, 2000년 12월호