

유도전동기 직접토크제어의 히스테리시스 밴드 크기의 최적화에 관한 연구

정병호, 김성결, 박정국, 오금곤, 조금배, 백형래
 조선대학교 전기공학과

A Study of Using Optimal Hysteresis Band Amplitude for Direct Torque Control of Induction Motor

B.H. Jeong, S.K. Kim, J.K. Park, G.K. Oh, G.B. Cho, and H.L. Baek
 Dept. of Electric Eng. Chosun Univ.

ABSTRACT

Most of all, DTC drive is very simple in its implementation because it needs only two hysteresis comparator and switching vector table for both flux and torque control. The switching strategy of a conventional direct torque control scheme which is based on hysteresis comparator results in a variable switching frequency which depends on the speed, flux, stator voltage and the hysteresis of the comparator. The amplitude of hysteresis band greatly influences on the drive performance such as flux and torque ripple and inverter switching frequency. In this paper the influence of the amplitudes of flux and torque hysteresis bands and sampling time of control program on the torque and flux ripples are investigated. Simulation results confirm the superiority of the DTC under the proposed method over the conventional DTC.

주파수는 반드시 히스테리시스 밴드 비교기의 크기가 토크오차와 자속 오차 범위내로 제한되지 않는다. 이것은 제어시스템의 지연에 의한 현상으로 제어프로그램의 시간계산, 전력전자 소자의 스위칭 주파수의 제한이나 센서의 완전한 응답특성, 그리고 A/D 컨버터를 통한 변환에 소요되는 시간에 의한다. 그러므로 만약 직접토크제어의 모형이 하나의 샘플링 기간동안에 적절한 고정자 전압을 선택한다면 전류와 다음 샘플링기간 사이의 지연은 오차의 증가와 비교기 밴드를 초과하는 원인으로 작용하여 유도전동기의 자속과 토크 리플을 증가시키는 등의 부작용을 일으킬 수 있다.^[4]

본 연구에서는 자속과 토크의 히스테리시스 밴드의 크기에 의한 영향을 분석하였고, 자속과 토크리플을 최소화하기 위한 히스테리시스 밴드폭의 크기를 결정하는 새로운 방법을 제안하였다.

1. 서 론

유도전동기의 직접토크제어 방식은 V/F 제어방식의 장점인 토크에 대한 빠른 동적응답특성과 전동기의 파라미터 변동에 대한 강인성을 가지고 있고, 토크와 자속 히스테리시스밴드를 이용한 스위칭 테이블에 적용시킴으로서 벡터제어방식보다 실제 시스템에 용이하게 적용될 수 있다는 장점을 가진다.^[1] 이러한 직접토크제어방식은 토크와 고정자 자속을 히스테리시스밴드의 범위 내로 유지시키기 위한 적절한 고정자 전압벡터의 선택이 요구된다.^[3] 이 때, 자속 히스테리시스의 값이 작으면 정현파형의 고정자 전류파형을 만들어지고, 토크 히스테리시스 밴드의 값이 작으면 유연한 토크특성을 가지는 우수한 드라이브를 만들 수 있으나 히스테리시스 밴드의 값이 작으면 높은 스위칭 주파수를 요구하게 되므로 스위칭 손실이 증가하게 된다.

유도전동기의 직접토크제어에 적용된 인버터의 스위칭

2. 유도전동기의 직접토크제어

일반적인 직접토크제어방식이 적용된 제어구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 유도전동기 d-q 모델, 토크와 자속 비교기 그리고 최적화된 스위칭 논리를 위한 조건표(look-up table)등을 기본적인 블록으로 하여 구성되어 있다. 고정자 자속의 크기는 유도전동기의 위치와 전자기 토크를 계산하도록 설계되며 속도측정을 위한 엔코더가 필요없는 속도와 토크 궤환 루프가 포함되어 있다. 직접토크제어에 이용된 전자기토크는 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{p}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \\
 &= \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_\sigma^2} \text{Im}(\hat{\lambda}_s e^{j\theta_s} \cdot \hat{\lambda}_s e^{-j\theta_s}) \\
 &= \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_\sigma^2} \lambda_s \lambda_r \sin \theta_{sr}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\theta_{sr} = \theta_s - \theta_r$

회전자 속도 ω_m 이라하면 다음의 식 (2)에서와 같다.

$$\omega_m = \frac{(\theta_r(t) - \theta_r(t - \Delta T_\omega))}{\Delta T_\omega} - \frac{2}{p} \left(\frac{3}{2} R_r \frac{T_{em}}{\lambda_r^2} \right) \quad (2)$$

$$= \omega_r - \omega_{slip}$$

연산된 속도 $\omega_{mech, est}$ 는 기준속도 ω_{mech} 로 나누어 지고 둘 사이의 오차는 토크기준신호 T_{em}^* 을 생성한

다. 연산된 속도는 고정자 자속쇄교 λ_s^* (속도 동작의 확장된 범위에 대해서 약계자가 발생한다.)에 대한 기준신호를 발생시키고 이것은 연산된 고정자 자속쇄교 $\lambda_{s, est}^*$ 와 비교된다.

전자기 토크와 고정자 자속의 오차는 고정자 자속쇄교 공간벡터의 회전각 $\angle \theta_s$ 과 비교되어 고정자 전압공간벡터 V_s 를 결정하고, 이것은 각각의 Sampling Time 간격 동안에 전동기에 적용된다.

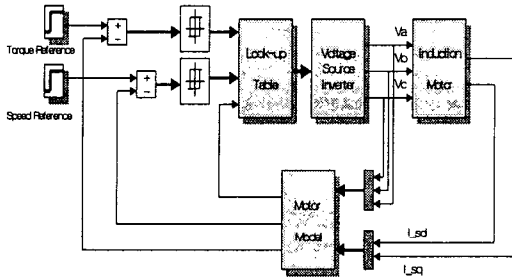


Fig. 1 Basic scheme of Conventional DTC Strategy

히스테리시스 밴드의 비교기는 자속과 토크 상태 ($d\lambda$ 와 dt_e)를 업데이트하기 위해 사용되며, 비교기에서 사용된 로직은 식 (1)과 같다.

$$d\lambda = 1, \text{ if } |\bar{\lambda}_s| \leq |\bar{\lambda}_{s, ref}| - |\Delta \lambda| \quad (3)$$

$$d\lambda = 0, \text{ if } |\bar{\lambda}_s| \geq |\bar{\lambda}_{s, ref}| + |\Delta \lambda|$$

전동기의 반시계 방향의 회전에 대한 로직은 식 (2)와 같다.

$$dt_e = 1, \text{ if } |T_e| \leq |T_{e, ref}| + |\Delta t| \quad (4)$$

$$dt_e = 0, \text{ if } |T_e| \geq |T_{e, ref}|$$

전동기의 시계방향의 회전에 대해서 식 (3)에서와 같다.

$$dt_e = -1, \text{ if } |T_e| \geq |T_{e, ref}| + |\Delta t| \quad (5)$$

$$dt_e = 0, \text{ if } |T_e| \leq |T_{e, ref}|$$

최적의 스위칭 논리는 조건표(look-up table)에 기초하여 적절한 고정자 전압을 선택한다.

3. 유도전동기의 자속리플과 토크 리플의 생성

3.1 자속 크기의 결정

유도전동기의 방정식과 여기에서 고정자 저항이 약간의 전압강하를 가진다고 가정하면, 이때의 고정자 자속 벡터의 변동은 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta \bar{\lambda}_s \cong \bar{V}_s \cdot \Delta t \quad (6)$$

여기서 Δt 는 일정한 고정자 전압벡터 \bar{V}_s 가 고정자에 공급되는 동안의 시간이다. 위의 식 (4)로부터 $\Delta \bar{\lambda}_s$ 의 수직성분인 $\Delta \bar{\lambda}_{sr}$ 의 크기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \bar{\lambda}_{sr} = \bar{V}_s \cos \delta \Delta t \quad (7)$$

여기서 δ 는 고정자 자속 벡터 $\bar{\lambda}_s$ 과 \bar{V}_s 사이의 각도이다. δ 의 최소값은 30° 이다. 이값은 자속벡터의 위치로부터 얻어 질 수 있고, 이에 대응되는 전압벡터는 스위칭 특업 테이블에 의해 결정된다. 그러므로 각각의 시간 간격에서 $\Delta \bar{\lambda}_{sr}$ 의 최대값은 다음과 같다.

$$|\Delta \bar{\lambda}_{sr}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_s \Delta t \quad (8)$$

만약, 인버터의 최소 스위칭 시간을 T_{sw} 라 하면 자속 리플의 최소값은 식 (7)과 같다.

$$|\Delta \bar{\lambda}_s \min| = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_s T_{sw} \quad (9)$$

만약 자속 비교기의 히스테리시스밴드의 크기가 이 값보다 작다면, 자속 히스테리시스 밴드는 자속 리플을 제한 할 수 없게 된다. 이런 조건에서 자속 리플은 두 개의 연속적인 스위칭사이의 지연에 의해서 히스테리시스 밴드를 초과한다. 다른 한편으로, 만약 자속 히스테리시스 밴드의 크기가 $\Delta \bar{\lambda}_s \min$ 의 값보다 크다면 자속 리플은 샘플링 시간의 지연에 의해서 히스테리시스 밴드를 초과한다. 그러므로 직접토크제어방식에서 자속 리플을 결정하기 위한 수학적 관계는 다음에 도달한다.

$$\text{if } \Delta \lambda \leq |\Delta \bar{\lambda}_s \min|$$

$$\lambda_{ripple} = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_s \cdot T_{sw}$$

$$\text{if } \Delta \lambda > |\Delta \bar{\lambda}_s \min|$$

$$\lambda_{ripple} = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_s \cdot T_s + \Delta \lambda \quad (10)$$

3.2 토크 크기의 결정

유도전동기의 전자기 토크에서 non zero 전압 공급된 고정자 권선의 변동은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s) - R_m T - P^2 \omega |\bar{\lambda}_s|^2}{L\sigma} \Delta t \quad (11)$$

그리고 유도전동기에 zero 전압이 공급된 전자기 토크의 변동은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{R_m T - P^2 \omega |\bar{\lambda}_s|^2}{L\sigma} \Delta t \quad (12)$$

정상상태의 조건에서 두 개의 연속된 스위칭순간사이의 전자기토크에서의 변화는 식 (11)과 같다.

$$\Delta T = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{L\sigma} \Delta t \quad (13)$$

여기서 $\Delta t = 2 T_{sw}$ 이므로 스위칭 기간동안의 토크 리플은 토크리플의 최소값과 같고 다음의 식 (12)와 같다.

$$\Delta T_{ripplemin} = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{2L\sigma} T_{sw} \quad (14)$$

히스테리시스 밴드의 크기가 각각의 스위칭 기간동안에 토크의 오차 보다 더 클 때 토크리플은 디지털제어시스템의 지연으로 인해 히스테리시스밴드의 범위를 초과하게 될 것이다. 그러나 그 차이는 하나의 샘플링 기간동안의 토크리플보다 크지 않으므로 토크 리플은 식 (13)과 같이 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \Delta T \leq \Delta T_{ripplemin}, \\ & \Delta T_{ripple} = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{2L\sigma} T_{sw} \\ & \text{if } \Delta T > \Delta T_{ripplemin}, \\ & \Delta T_{ripple} = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{2L\sigma} T_s + \Delta T \end{aligned} \quad (15)$$

4. 히스테리시스밴드의 크기 결정

히스테리시스 밴드폭의 값을 작게 선택하면 높은 주파수를 만들어 스위칭 주파수의 제한은 식(10)과 식 (15)에서와 같은 허용될 수 있는 히스테리시스 밴드를 초과하여 자속리플과 토크오차를 발생시킨다. 이와 반대로 히스테리시스 밴드의 높은 값은 자속리플과 토크의 오차를 동시에 증가시킨다.

식 (10) 과 식 (15)으로부터 개선된 직접토크제어의 적용을 제안한다. 이 방법은 유도전동기의 직접 토크제어 방식에서 자속과 토크 히스테리시스 밴드의 상위 제한과 하위 제한을 계산하기 위한 블록이 하나 더 추가되고 스위칭 주파수를 일정하게 설정하였다.

인버터의 최대 스위칭 주파수가 설정되고 자속과 토크 리플의 최소값은 각각 $\Delta \lambda_{smin}$ 과 $T_{ripplemin}$ 이다. 최소 리플을 얻기 위한 자속과 토크의 히스테리시스밴드 크기는 식 (10) 과 식 (15)으로부터 식 (16)과 식 (17)과 같이 얻어진다.

$$\Delta \lambda = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{V}_s \cdot T_s \quad (16)$$

$$\Delta T = \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{L\sigma} T_{sw} - \frac{P(\bar{\lambda}_s \times \bar{V}_s)}{L\sigma} T_s \quad (17)$$



Fig. 2 Hysteresis Band Amplitude Calculator

그러므로 히스테리시스밴드의 크기를 계산하기 위한 블록은 Fig. 2에서 보는바와 같이 입력은 스위칭 주파의 제한, dc 단자 전압, 자속크기와 샘플링 시간이 된다.

이 블록은 식 (16)와 식 (17)를 자속과 토크 히스테리시스밴드 비교기의 크기를 계산하기 위해서 이용한다. 이 블록을 이용한 히스테리시스 밴드 비교기의 크기는 제한된 스위칭 주파수가 가지는 자속과 토크리플의 최소값을 얻기 위해서 변동시킨다.

5. 시뮬레이션

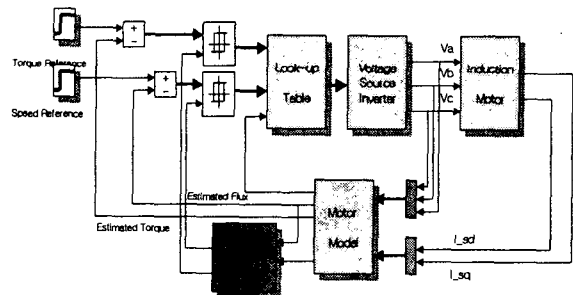


Fig. 3 Online Hysteresis Band Amplitude Calculator of DTC Block Diagram

Fig. 3은 제안된 DTC의 시뮬레이션에 적용된 블럭 다이어그램을 나타낸다. 시뮬레이션을 위해 적용된 파라미터는 각각 $R_s=1.77$ [Ω], $R_r=1.34$ [Ω], $L_s=5.25$ [H], $L_r=4.57$ [H], $L_m=139.0$ [H], $\lambda_s=0.8$ [Wb], $V_{dc}=700$ [V], $f_{samp}=20k$ [Hz], $P=4$, $J=0.025$ [Nm] 이다.

새로운 블록을 가진 제안된 직접토크제어방식은 토크 리플과 자속리플이 토크와 자속리플의 최소값으로 제한되고 스위칭 주파수를 20K[Hz]로 일정하게 된다. 그러므로 자속과 토크 리플, 뿐만 아니라 전류왜곡도 상당부분 감소되는 것을 Fig. 4에서부터 Fig. 7에서의 출력파형을

통해서 확인 할 수 있었으며, 이는 유도전동기의 직접토크제어방식이 더욱 효율적이며 유연한 직접토크제어 방식이 수행되었음을 알 수 있다.

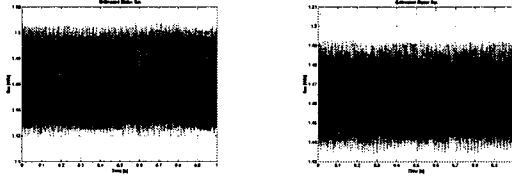


Fig. 4 Stator Flux for $\Delta\lambda=0.0073$ [Wb] $\Delta T=0.6322$ [Nm] and Proposed strategy

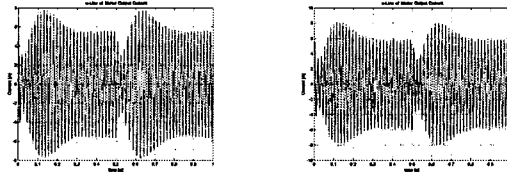


Fig. 5 Line current for $\Delta\lambda=0.0073$ [Wb] $\Delta T=0.6322$ [Nm] and Proposed strategy

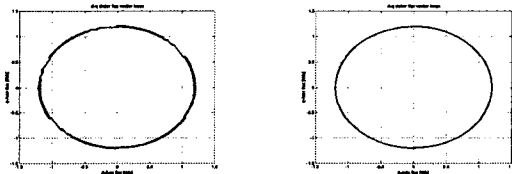


Fig. 6 Stator Flux Vector Locus for $\Delta\lambda=0.0073$ [Wb] $\Delta T=0.6322$ [Nm] and Proposed strategy

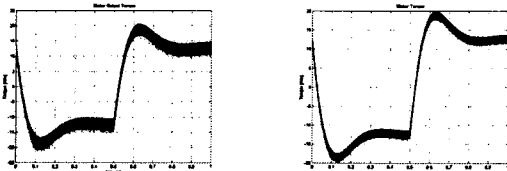


Fig. 7 Electromagnetic Torque for $\Delta\lambda=0.0073$ [Wb] $\Delta T=0.6322$ [Nm] and Proposed strategy

6. 결 론

유도전동기의 직접토크제어에서 자속과 토크 히스테리시스밴드의 크기는 토크와 자속 리플의 크기에 큰 영향을 미친다. 이러한 밴드에 대해서 높은 값을 선택하는 것은 리플을 증가시키는 원인이 되고 밴드의 낮은 값을 선택하는 것은 인버터의 스위

칭 손실을 증가시켜 스위칭 손실을 크게 하는 이유가 된다. 따라서 본 연구에서는 자속과 토크리플의 영향을 먼저 분석하고 제한된 스위칭 주파수에 대해서 밴드의 적절한 값을 계산하기 위한 방법을 제안하였다. 이렇게 최적의 히스테리시스 밴드 크기를 결정하는 방식을 이용하여 자속리플과 토크리플을 줄일 수 있으므로 최소 스위칭 손실과 최소 노이즈하에서 동작되는 유도전동기의 직접토크제어를 위한 최적한 방법을 제안하였고, 그 결과를 시뮬레이션을 통해서 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. Casadei, G. Serra, A. Taxi "Effects of flux and Torque Hysteresis Band Amplitudes in Direct Torque control of Induction Machines" IAS 1994, pp. 299-304
- [2] S. Vaez-Zadeh, G.H. Mazarei "Open Loop Control of Hysteresis Band Amplitudes in Direct Torque Control of Induction Machines", IEE 2000.
- [3] N. Mohan, Advanced Electric Drives : Analysis, Control and Modeling using Simulink, published by Mnpere, 2001
- [4] Peter Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, 1998.
- [5] R.D.F Rossi, B.R. Menezes, and S.R. Silva, "Vector Control of Voltage Fed Three-Phase Inverters : Variable Switching Regions", IEEE PESC Proc., Vol. 1, pp. 219~224, 1994.
- [6] M. Depenbrock, "Direct Self-Control(DSC) of Inverter-Fed Induction Machine", IEEE Trans on Power Electronics, Vol. 3, No. 4, pp. 420~429, 1998.
- [7] Hamid A. Toliyat, Huangsheng Xu, "A Novel Direct Torque Control(DTC) for Five Phase Induction Motor", IEEE Trans On Power Electronics, Vol. 1, No. 2, pp. 250~258, 2000.