

직접토크 제어방식을 이용한 유도전동기 구동에 관한 연구

안용상*, 김연충*, 이정호*, 원충연*, 송호범**
*성균관대학교, **동양공업전문대학

A Study on Induction Motor Drives by The Direct Torque Control Technique

Y. S. Ahn*, Y. C. Kim*, J. H. Lee*, C. Y. Won*, H. B. Song**
*Sungkyunkwan University, **Dongyang Technical College

Abstract

Direct Torque Control method for an Induction Motor is presented which is quite different from field-oriented control. It carries out a precise and quick control of the stator flux and electromagnetic torque of an IM without calling for coordinate transformation, speed measurement, and stator current control. In principle, moreover, DTC operation requires only the knowledge of the stator resistance.

1. 서론

최근 고속응답과 함께 높은 정밀도가 요구되는 산업계의 다양한 응용 분야에서 인버터를 이용한 교류전동기의 구동이 점점 증가하고 있다. 현재 순시 토크 제어나 고성능 속도 제어가 필요한 분야에서는 벡터제어(Field Oriented Control, FOC) 이론과 전력용 반도체 기술의 발달로 유도전동기가 폭 넓게 이용되고 있다.[1]

유도전동기의 고성능 구동을 위하여 일반적으로 벡터제어가 널리 이용되고 있다. 벡터제어는 매우 빠르고 정확하게 전동기의 자속 및 토크를 제어할 수 있지만 시스템의 비용이 크고 제어 알고리즘도 매우 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 벡터제어의 이러한 단점을 극복하기 위해 자속과 토크의 빠른 응답을 얻을 수 있으면서도 벡터제어의 복잡한 제어 알고리즘을 줄이기 위한 제어방법으로서 직접토크제어(Direct Torque Control, DTC)이론이 등장하였다. 직접토크 제어는 벡터제어처럼 전동기의 자속과 토크를 정확하

고 빠르게 제어하면서도 제어 알고리즘은 오히려 단순하고 전동기의 정수 중에서 고정자 저항의 정보만을 필요로 하므로 정수 변동에 대한 영향이 비교적 적다는 특징이 있다. 이런 관점에서 직접토크제어는 유도전동기 구동의 새로운 제어 방법으로 제시되고 있다.[2]

직접토크제어는 순시 토크와 순시 자속을 독립적으로 제어하는 방법으로 자속과 토크의 지령치를 입력받아 유도전동기의 고정자 전압과 고정자 전류 정보를 이용해 추정된 현재의 자속 및 토크와 비교하여 히스테리시스 밴드를 거친 오차를 근거로 하여 매 연산주기마다 그 오차를 가장 최소화하기 위한 전압벡터를 선정하여 출력하는 방법이다.[3][4]

본 논문에서는 직접토크 제어방식을 구현하여 시물레이션을 통해 자속과 토크가 정확하게 제어됨을 확인하였다.

2. 본론

2-1. DTC의 기본 개념

이 방법은 전동기에서 측정된 전압과 전류의 값을 측정하여 토크와 고정자 자속을 연산하고 매 주기마다 자속과 토크의 지령치와 비교하여 토크의 오차, 자속의 오차가 각각 자속과 토크의 제어정밀도에 따라 폭이 결정되는 히스테리시스 제어기로 입력된다. 히스테리시스 제어기의 출력은 전압벡터의 look-up table의 입력으로 사용되며 여기서 원하는 전압벡터를 찾아 출력한다. 직접토크제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어하므로 빠른 응답성과 정확성을 얻을 수 있는 장점이 있다.

자속 벡터의 선택은 단지 히스테리시스 밴드 내에서의 크기에만 관계되는 것이 아니라 회전방향과도 관계가 있다.

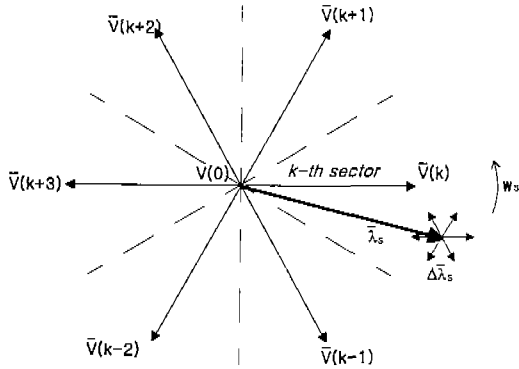


그림 2-3. 임의의 위치에서 선택되어지는 자속벡터

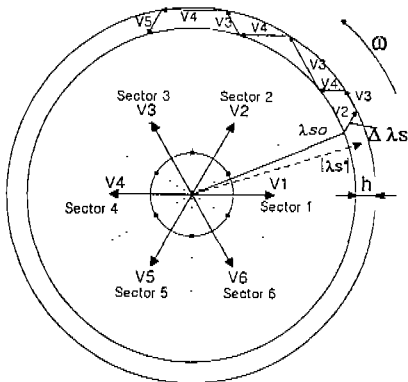


그림 2-4. 스위칭 벡터의 선택에 따라 회전하는 자속의 궤적

그림 2-4에서 살펴보면 sector 1에 자속이 위치할 때 선택할 수 있는 다음의 스위칭 벡터의 방향은 먼저 시계방향으로 자속이 회전하고 있을 때 자속이 히스테리시스 밴드의 하한선에 접하면 $\vec{V}(6)$ 을 선택하게 되고 히스테리시스 밴드의 상한선에 접하면 $\vec{V}(5)$ 를 선택하게 된다. 마찬가지로 반시계 방향으로 회전하고 있을 때에는 $\vec{V}(2)$ 과 $\vec{V}(3)$ 을 선택한다. 일단 자속이 결정되면 토크는 식 (2-6)에 의하여 결정되어진다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \text{Real} (j \vec{\lambda}_s \dot{\vec{i}}_s) \quad (2-6)$$

토크의 값 T_e 가 토크 지령치 T_e^* 에 닿았을 때, T_e 는 인버터의 스위칭 주파수를 줄이기 위해서 최대한 천천히 감소하는 것이 좋다. 즉, 인버터의 스위칭 벡터 중에 무효벡터를 사용하는 것이 좋다.

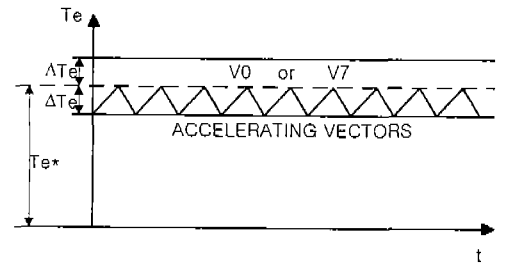


그림 2-5. 시계방향에서의 토크의 궤적

그림 2-5는 시계방향으로 회전하는 경우의 토크의 제어 방법이다. 토크는 회전방향에 따라 두가지의 경우로 나뉘어진다.

즉,

$$T_e^* - \Delta T_e \leq T_e \leq T_e^* \quad (2-6)$$

λ_s 가 시계 방향으로 회전할 때

$$T_e^* \leq T_e \leq T_e^* + \Delta T_e \quad (2-7)$$

λ_s 가 반시계 방향으로 회전할 때

λ_s 가 시계방향으로 회전한다고 가정하면, T_e 가 T_e^* 에 닿으면 λ_s 를 정지시키고 T_e 를 줄이기 위해 무효벡터가 선택되어진다. 반대로 T_e 가 $T_e^* - \Delta T_e$ 에 닿으면 자속을 시계방향으로 회전시키기 위한 유효벡터가 선택된다.

이를 종합해 보면 표 2-2와 같은 스위칭 테이블을 만들 수 있다.

자속의 위치 판별은 식 (2-8)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \quad (2-8)$$

표 2-2. 스위칭 테이블

T	λ	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
1	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
0	1	V0	V7	V0	V7	V0	V7
0	-1	V0	V7	V0	V7	V0	V7
-1	1	V3	V4	V5	V6	V1	V1
-1	1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

3. 시뮬레이션

논문에서 제안한 직접토크제어 알고리즘을 구현하고 특성분석을 위해 실험에 앞서 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)과 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션을 하였고 스위칭 테이블등을 구현하기 쉽고 연산속도가 빠른 ACSL로 파형을 나타내었다. 실제 시스템의 부하는 유도전동기이므로 유도전동기의 전류와 전압을 고찰하기 위해 2상 정지 좌표계의 d-q 등가회로를 이용하여 전동기를 모델링 하였다.

3-1. 시뮬레이션을 위한 유도전동기의 모델링

시뮬레이션을 위해 유도전동기의 전압방정식을 이용하여 유도전동기를 모델링하였다.

그림 3-1은 직접토크제어의 전체적인 SIMULINK 모델이다.

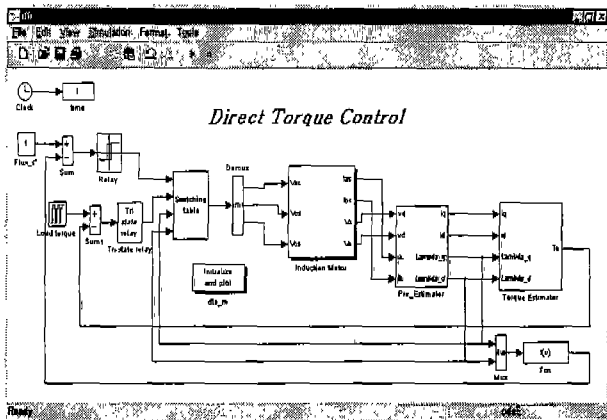


그림 3-1. DTC의 기본적인 블럭도

스위칭 테이블은 MATLAB m-file로 설계하여 SIMULINK의 S-function을 이용하여 연결하여 설계를 하였다.

3-2. 시뮬레이션 결과 및 검토

직접토크제어기를 통한 토크제어를 시뮬레이션을 해 보았다. 그림 3-2.부터 3-6.는 모두 자속과 토크의 히스테리시스 밴드폭을 정격토크와 정격자속의 5%로 설정한 경우의 파형이다. 전동기에 인가되는 토크와 자속의 리플밴드는 peak to peak로는 10%가 되고 비교적 리플폭이 크을 알 수 있다. 그리고 이때의 스위칭 주파수는 약 500[Hz]근처에서 유지된다. 토크는 정격치로 유지하다가 약계자 영역을 넘어서면 속도에 반비례하며 감소한다. 전동기자속은 역시 약계자 영역에서부터 감소한다.

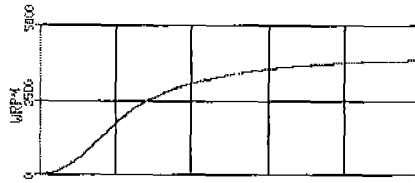


그림 3-2. 전동기 속도

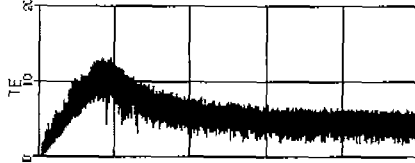


그림 3-3. 전동기 발생 토크

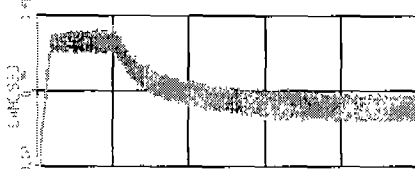


그림 3-4. 전동기 자속

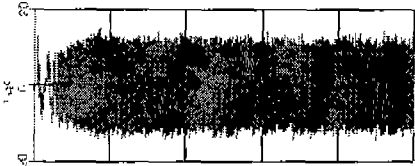


그림 3-5. 전동기 전류

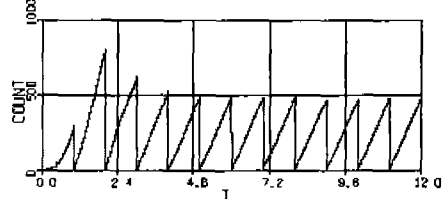


그림 3-6. 스위칭 주파수

그림 3-7.부터 3-11.는 모두 자속과 토크의 히스테리시스 밴드폭을 정격토크와 정격자속의 1%로 설정한 경우의 파형이다. 밴드를 좁힌만큼 토크리플은 감소하지만 스위칭 주파수는 1[kHz]가까이 상승함을 알 수 있다.

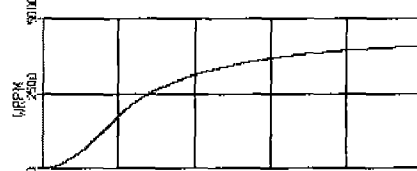


그림 3-7. 전동기 속도

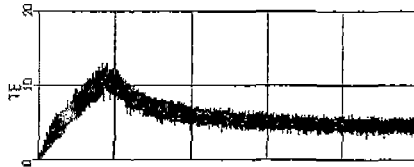


그림 3-8. 전동기 발생 토크

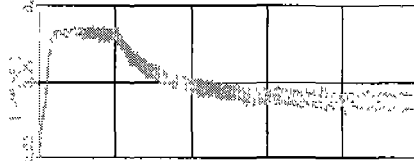


그림 3-9. 전동기 자속

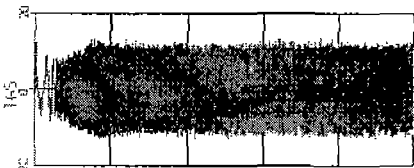


그림 3-10. 전동기 전류

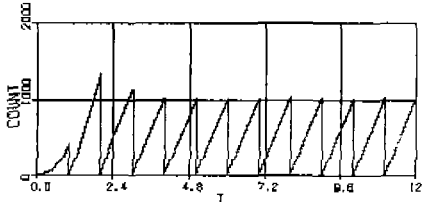


그림 3-11. 스위칭 주파수

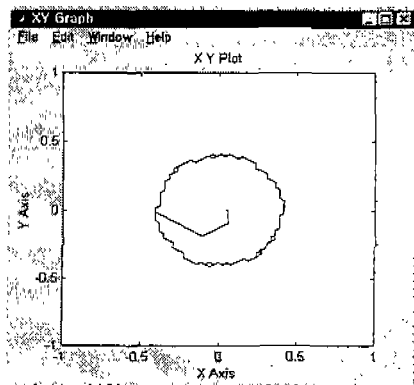


그림 3-12. 자속의 리사쥬도형

그림 3-12은 MATLAB/SIMULINK에서 구현한 자속의 리사쥬도형이다.

4. 결론

본 논문에서는 밀링머신, 전기철도분야나 기타 분야 등 공간은 협소하지만 대용량과 정확한 토크의 제어를 요구하는 많은 분야에서 사용되어질 수 있는 직

접토크제어기법을 제안하였으며 시뮬레이션을 통하여 본 연구의 타당성을 입증하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 벡터제어는 빠르고 정확하게 자속과 토크를 제어할 수 있지만 제어알고리즘이 복잡하고 하드웨어적으로도 부담이 크므로 직접토크제어를 구현하여 복잡한 제어 알고리즘을 줄이면서도 정확하고 빠른 자속과 토크의 응답을 얻을 수 있었다.
- 2) 직접토크제어는 실제 시스템에 적용시킬 때 부가적인 하드웨어장치가 필요 없기 때문에 비용의 부담을 감소시킬 수 있다.
- 3) 저속에서의 문제점을 해결하기 위해 자속의 연산 방법을 개선한다면 저속에서 고속까지 정확한 제어를 할 수 있다.
- 4) 향후과제로 시뮬레이션을 바탕으로 실제 시스템에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", 1986.
 [2] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 5, Sept./Oct. 1986, pp.820~827.
 [3] Pekka Tiitinen, "The Next Generation Motor Control Method, DTC, Direct Torque Control", International Conference on Power Electronics, Drives & Energy System for Industrial Growth Proceedings. Vol. 1. 1996. pp. 37~43.
 [4] G. Buja, D. Casadei and G. Serra, "DTC-Based Strategies for Induction Motor Drives", IECON'97, pp.1506~1516.

Inverter	TYPE	Voltage	Current
IPM	PM100CSA060	600[V]	100[A]
Induction Motor	Power	Voltage	Current
	3HP[2.2kW]	220/380[V]	9.0/5.2[A]

표. 3상 인버터와 유도전동기 정격