



### 1. 서론

최근 로봇 구동장치, 크레인 및 각종 산업용 CNC(Computer numerical control) 주축 구동장치 등 신속한 토크 및 속도제어가 필요한 고성능 산업 응용분야에서는 지금까지 토크 과도응답 특성이 우수한 직류기를 사용하고 있는데, 이 DC Motor(직류전동기)는 브러시 및 정류자를 정기적으로 보수해야 하는 단점이 있다. 이와 같은 직류전동기의 문제점은 AC Motor(교류전동기)의 사용으로 상당 부분 개선되어 왔다. 특히, 여러 종류의 교류전동기 중에서도 Induction Motor (유도전동기)는 가격이 상대적으로 저렴하고 견고하여 다양한 전력 응용 분야에 폭 넓게 사용되고 있으며 전력 반도체 기술, PWM(Pulse width modulation) 및 전류 제어 기술, 제어소자, 제어이론 등의 발전으로 고성능 구동분야에서도 직류전동기의 성능에 뒤지지 않는 특성을 보유하게 되었다.

유도전동기의 제어방식에는 벡터제어 이론이 널리 응용되고 있다. 전동기 제어시스템은 산업분야에서 컨베이어, 자동화 로봇, 크레인, 공작기계 등 공장자동화와 LNGC 선박용 전기추진시스템(Electric Propulsion System) 적용에도 필수 요소가 되었다. 뿐만 아니라 전동력의 제어는 가정용 전기제품에서부터 전기자동차, 지하철, 고속전철 등의 운송시스템, 엘리베이터, 자동개폐문 등의 빌딩 자동화에 이르기까지 여러 산업분야에서도 사용된다.

유도전동기와 같은 교류전동기의 가장 큰 장점은 구조가 간단하고 값이 싸서 직류전동기가 지닌 정기적인 보수 및 최대 회전수 제한 등의 구조적인 문제를 극복할 수 있고, 운전특성도 벡터제어의 실현으로 직류전동기에 상응하는 응답특성을 얻을 수 있어 빠른 가감속과 고속 운전이 요구되는 서보시스템 및 공작기계 구동장치 등에 점차 확대되고 있다.

특히, 순시 토크제어나 고성능 속도제어가 필요한 분야에서는 벡터제어 이론과 전력용 반도체 기술의 발달, 고성능 프로세서의 등장으로 유도전동기가 폭 넓게 이용되고 있다.

### 2. DTC (Direct Torque Control)

DTC 방식은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하면서 벡터제어처럼 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않고, 토크의 동적 특성이 전동기의 정수변화에 영향이 적으며, 속도 센서리스제어에 유리하고, 직접 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 직접토크제어 구동 시스템에 대한 연구에 초점을 두었다. 1980년대 중반 일본의 Takahashi와 Noguchi, 독일의 Depenbronk 등에 의해서 처음 제안되었으며, 1995년에는 ABB에 의해 세계 최초로 상품화된 직접토크제어 방식의 인버터가 발표되어 산업용 전동기 드라이브 업계로부터 매우 큰 주목을 받고 있다.

DTC는 모터가 어떻게 동작하는지 알기위해 가장 빠른 DSP(Digital Signal Processor)를 하드웨어로 사용하고 더욱 진보된 수학적 해석을 적용하였다. 그 결과 토크 응답성이 과거 어떠한 AC 혹은 DC 드라이브보다 10배 이상 빠른 성능을 발휘할 수 있다. 다이내믹 속도 정도에서도 피드백 장치없이 DTC 드라이브는 어떠한 개루프(Open-loop) AC 드라이브보다도 8배 이상이나 빠르며 피드백 장치를 사용한 DC 드라이브와도 필적한 만하다.

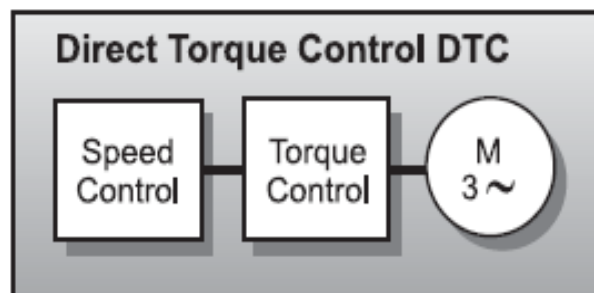


그림 1. Control loop of an AC Drive using DTC

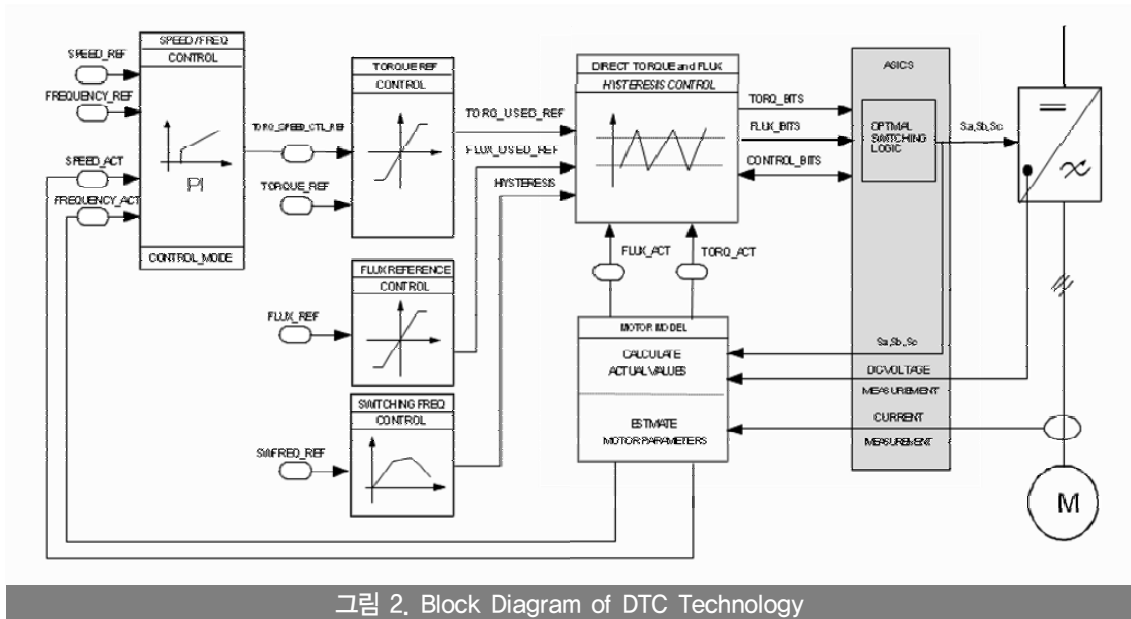


그림 2. Block Diagram of DTC Technology

### 3. DTC (Direct Torque Control) 개념

교류전동기가 높은 성능을 내기 위해 전자기적 토크를 순시적으로 제어할 수 있는 제어기법, 즉 토크 제어기법은 기본적으로 두 가지, 벡터제어와 직접토크제어로 나눌 수 있다.

벡터제어는 독일의 Blaschke, Hasse, Leonhard 에 의해 약 20 여년전에 소개되었고, 현재는 산업계 등 광범위한 부분에서 널리 사용되고 있으며, 반면에 직접토크제어는 일본의 Takahashi 에 의해 약 10 여년전에 소개되었으며 제어의 대상이 속도가 아니므로 전동기의 속도는 인가된 부하에 의해 결정된다. 현재 산업현장에서 널리 사용되지는 않지만 전기철도 분야에서는와 같이 공간이 협소하며, 대용량의 토크를 필요로 하는 제어분야에 응용되고 있다.

그림 2는 DTC 에 대한 제어기 구성도를 보여주는데 이 방법은 전동기에서 전압과 전류값을 측정하여 토크와 고정자 자속을 연산하고 매 주기마다 자속과 토크의 지령치와 비교하여 토크의 오차, 자속의 오차가 각각 자속과 토크의 제어 정밀도에 따라 폭이 결정되는 히스테리시스 제어기로 입력된다. 히스테리시스 제어기의 출력은 전압벡터의 룩업 테이블(Look-up table)의 입력으로 사용되며, 여기서 원하는 전압벡터를 찾아 출력한다.

DTC 는 자속과 토크를 독립적으로 제어하므로 빠른 응답성과 정확성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 자속과 토크의 오차를 입력으로 하는 히스테리시스 밴드 폭을 조정함으로써 제어 정밀도와 스위칭 주파수를 가변시킬 수

있다. 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 토크의 동적특성이 전동기 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적으며, 연산시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

하지만 스위칭 주파수가 가변되고, 토크와 속도에 많은 리플이 발생할 수 있으며 저속영역과 기동시 그리고 토크 명령이 변화할 경우 제어특성이 저하될 수 있다는 단점을 가지고 있다.

직접토크제어 루프(Loop)는 자속비교기 (Flux comparator), 토크비교기(Torque comparator), 고정자자속과 토크계산부 (Flux/Torque calculator), 스위칭 벡터 (Switching vector) 선정부로 구성되어 있으며, DTC 는 다음과 같은 장점을 가진다.

- 좌표변환 (Coordinate transformation)이 필요 없다.
- 비간섭 제어(Voltage decoupling control)가 필요 없다.
- 제어기가 감소된다.
- Modulator 를 사용하지 않는다.
- 직접 토크를 제어한다.

### 4. DTC 기본 개념과 이론적용

3 상 정자 좌표계에서 유도전동기의 전압 방정식에 의해 고정자 자속은 식(4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = RI + \frac{d}{dt}\lambda \tag{4.1}$$

식(4.1)에서 고정자 자속의 값을 구하면 식(4.2)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \int (v_s - R_s i_s) dt \\ &= V_s \cdot t - R_s \int i_s dt \\ &= \frac{2}{3} V_{dc} [S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}}] \cdot t \\ &\quad - R_s \int i_s dt + \lambda_s|_{t=0} \end{aligned} \tag{4.2}$$

여기서,  $V_{dc}$  는 직류링크 전압이다.

식(4.2)에서 고정자 저항값은 매우 작기 때문에 전압강하  $R_s i_s$  는 첫째 항에 비해 매우 작다고 가정하고 무시하게 되면 고정자 자속은 고정자 전압의 크기에 비례하고 방향은 같은 벡터로 생각할 수 있다.

상기 관계를 식으로 나타내면 식(4.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \lambda_s \approx V_s \Delta t \tag{4.3}$$

여기서  $\Delta t$  는 샘플링 주기이다.

즉, 고정자 자속은 고정자 전압벡터  $v_s$  와 같은 방향으로 움직인다.  $v_s$  가 유효벡터일 때,  $\lambda_s$  는 인버터의 출력전압 벡터와 일정한 비율의 일정한 속도로 움직이고, 무효벡터일 때는 매우 적은 속도로 움직인다. 따라서 자속의 회전속도는 인버터 출력 전압 벡터의 유효벡터와 무효벡터의 비율에 의해 제어된다.

고정자 자속이  $n$  번째 영역(Sector)에 있을 때 선택되어지는 전압벡터에 대한 의미를 표 1에 나타내었다.

인버터가 출력할 수 있는 8 개의 전압벡터와 현재의 자속벡터에 따라 전동기의 자속과 토크의 선택 방향을 가진다. 스위칭 벡터는 자속의 크기뿐만 아니라 방향까지 고려하여 선택된다.

표 1. Selected vector and definition

$V_n$	Radial positive voltage vector
$V_{n+1}$	Forward positive voltage vector
$V_{n+2}$	Forward negative voltage vector
$V_{n+3}$	Radial negative voltage vector
$V_{n-1}$	Backward positive voltage vector
$V_{n-2}$	Backward negative voltage vector
$V_0$	Zero voltage vector

그림 3 은 직접토크제어의 개념도로서 스위칭 벡터와

자속벡터를 나타낸 것이다. 히스테리시스 밴드 안에서 스위칭 벡터의 선택에 따라 회전하고 있는 자속의 궤적을 나타내고 있다. 자속은 그림 4 와 같이 맥동이 있는 원의 궤적을 그리면서 회전하게 된다.

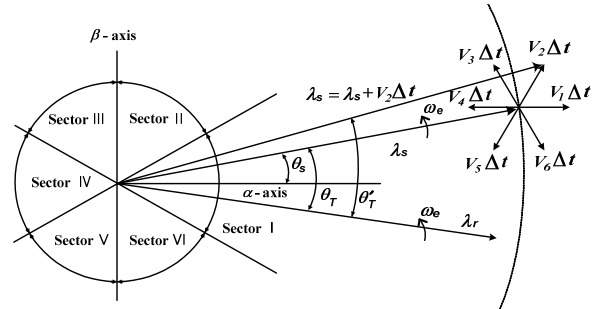


그림 3. Conception diagram of direct torque control

식(4.4)는 자속의 히스테리시스 밴드를 나타내고 있다.

$$(|\lambda_s|^* - \Delta \lambda_s|/2) \leq (|\lambda_s|) \leq (|\lambda_s|^* + \Delta \lambda_s|/2) \tag{4.4}$$

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

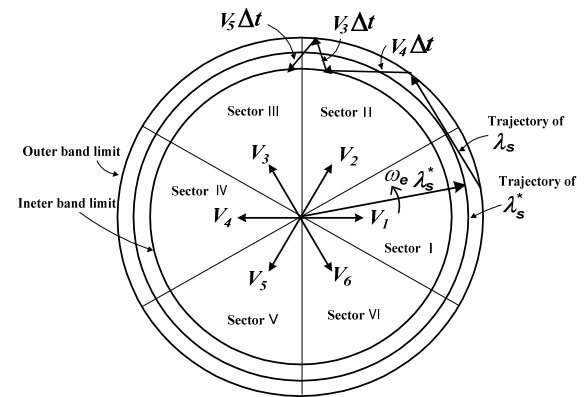


그림 4. Trajectories of the stator flux  $\lambda_s$  and its reference  $\lambda_s^*$  with  $x_T=1$

예를 들면, 먼저 시계방향으로 자속이 회전하고 있을 때 자속이 히스테리시스 밴드의 하한선에 접하면  $v_6$  을 선택하게 되고, 히스테리시스 밴드의 상한선에 접하면  $v_5$  을 선택하게 된다.

마찬가지로 반시계 방향으로 회전하고 있을 때에는  $v_2$  와  $v_3$  을 선택한다. 일단 자속이 결정되면 토크는 식(4.5)에 의하여 결정되어진다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\lambda_s| |\lambda_r| \sin \theta_T \tag{4.5}$$

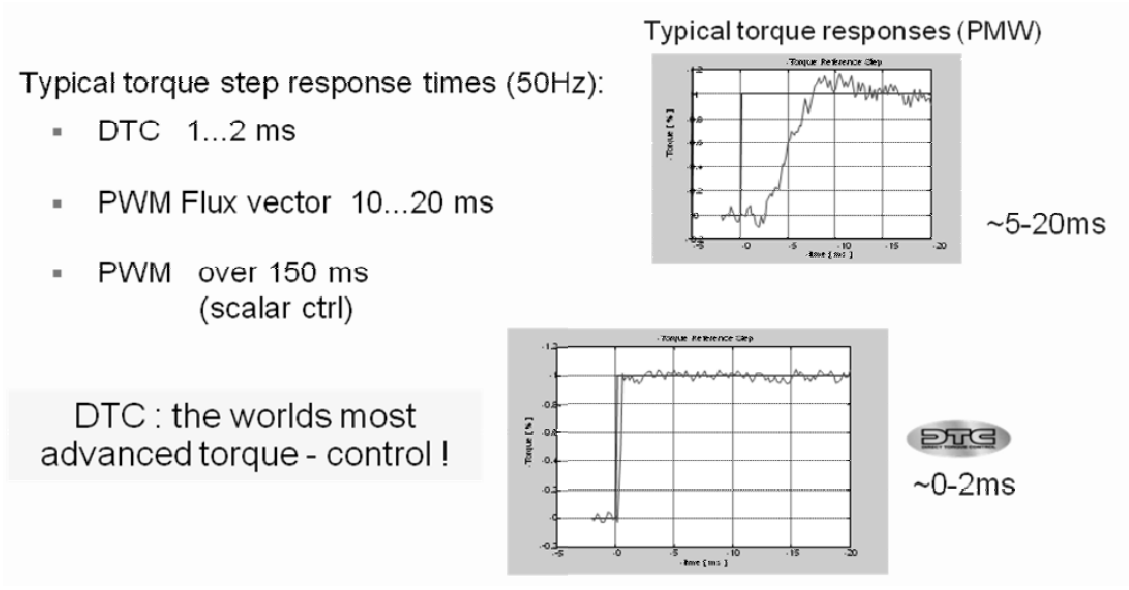


그림 5. Technology - Performance Reference

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

최적 스위칭 전압벡터 룩업 테이블 (Optimum switching voltage vector look-up table)에서 최적 전압벡터를 계산하기 위해서는 고정자 쇄교자속의 위치 정보를 알아야 한다. 이 위치정보는 정자좌표계에서의 고정자 쇄교자속의  $\alpha$ 축과  $\beta$ 축의 값으로부터 식(4.6.1), (4.6.2), (4.6.3)를 이용하여 얻을 수 있다.

$$\lambda_s = \lambda_{\alpha s} + j\lambda_{\beta s} \quad (4.6.1)$$

$$= \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt + j \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt$$

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (4.6.2)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \right) \quad (4.6.3)$$

여기서,  $v_{\alpha s}, v_{\beta s}, i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ 는 측정된 고정자 전압과 전류이다. 그러므로, 토크는 식(4.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{\beta s} \lambda_{\alpha s} - i_{\alpha s} \lambda_{\beta s}) \quad (4.7)$$

### 맺음 말

DTC는 유도전동기의 완전한 새로운 종류의 제어기법이다.

매우 효율적으로 전동기와 결속하고 전력 제어를 놀라운 성능으로 수행한다. 정확하고 빠른 토크제어를 저속에서조차 피드백없이 이룰 수 있다.

DTC 방식은 중소용량 중심에서 대용량으로 그 응용범위가 확대 되고 있어, 본 기술보고 기술한 DTC 방식의 유도전동기의 속도제어는 실제 산업분야에 응용하면 서보시스템의 고성능화할 수 있다. 또한, 현재 조선소에서 건조 중인 LNG Carrier(DF-DE), Cruise, Drillship 등의 전기추진시스템(Electric Propulsion System) 구동장치로 사용 수 있으며, 해양플랜트(LNG-FPSO, FPSO, FSRU 등)와 같은 특수목적선 등의 Electric motor drive 제어 알고리즘 분야에도 광범위하게 적용할 수 있다.

### 참고 문헌

A new direct torque control method of induction motor for torque ripple reduction, 한국마린엔지니어링학회지, 제 32-8권 P. 1061-1067.

ABB Drive - Technical guide book,



#### 김덕기

- 1975년생
- 2009년 한국해양대학교 공학박사
- 현 재 : 현대중공업 조선사업본부  
FLNG전담팀/과장
- 관심분야 : LNG-FPSO, LNGC, LPGC,  
FSRU, DRILLSHIP, SUBSEA
- 연 락 처 : 052-203-8441
- E - mail : sense315@hhi.co.kr