

직접토크제어에 의한 전기추진선박의 추진전동기 속도 및 토크제어에 관한 연구

김종수† · 오세진* · 김성환**

(원고접수일 : 2009년 7월 2일, 원고수정일 : 2009년 8월 8일, 심사완료일 : 2009년 9월 9일)

A Study on the Speed and Torque Control of Propulsion Motor for Electric Propulsion Ship by Direct Torque Control

Jong-Su Kim† · Sae-Gin Oh* and Seung-Hwan Kim**

Abstract : An induction motor based on DTC(Direct Torque Control) is being increasingly used in various industrial applications. DTC offers faster torque response and better speed control with lesser hardware and processing costs in compared with other controlled drives. This study was to evaluate performance of DTC for induction motor of electric propulsion ship. The simulation results indicated good speed and torque response from the low to middle speed range. Also, DTC has advantages such as the independency on motor parameter.

Key words : Direct Torque Control(직접토크제어), Torque response(토크응답), Electric propulsion ship(전기추진선), Motor parameter(전동기 정수)

1. 서 론

직접토크제어는 벡터제어처럼 전동기의 자속과 토크를 정확하고 빠르게 제어하면서도 제어 알고리즘은 오히려 단순하고 전동기의 정수 중에서 고정자 저항의 정보만을 필요로 하므로 정수 변동에 대한 영향이 적다는 특징이 있다^[1].

직접토크제어는 순시 토크와 순시 자속을 독립적으로 제어하는 방법으로 자속과 토크의 지령치를 입력받아 유도전동기의 고정자 전압과 전류의 정보

를 이용해 추정된 현재의 자속 및 토크와 비교하여 오차를 계산한 후 히스테리시스 밴드를 거쳐 매 연산 주기마다 그 오차를 가장 최소화하기 위한 전압 벡터를 선정하여 출력하는 방법이다^{[2]-[5]}.

최근에 대형 LNG운반선박 등에서 전기추진시스템의 사용이 증가되고 있는 추세이며 추진전동기로는 경제성과 유지 및 관리성 측면에서 장점이 많은 유도전동기가 사용되고 있다^{[6]-[7]}. 유도전동기는 직류전동기의 성능에 뒤지지 않는 특성을 보이기 위해서 전력 반도체 기술, PWM 및 전류 제어 기술, 제어소자 등이 필요하며 고성능의 속도 및 토

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자계공학부, E-mail:jongskim@hhu.ac.kr, Tel:051-410-4831)

* 한국해양대학교 운항훈련원

** 한국해양대학교 선박전자계공학부

크제어를 위해서는 적합한 제어이론의 개발이 필요하다.

또한, 전기추진시스템이 가지고 있는 문제점에는 전력변환장치에 의한 고조파 발생과 전동기의 대형화로 인한 권선의 온도 증가로 전동기 파라미터가 변동하여 속도 및 토크제어의 어려움 등이 있다.^[8] 특히, 유도전동기는 고정자와 회전자의 독립적인 구조로 인해 회전자 권선의 냉각이 어려우므로 회전자 권선의 파라미터 변동에 영향이 적은 제어알고리즘의 사용이 절실하다고 할 수 있다.^[8]

본 논문에서는 고정자 저항의 정보만을 필요로 하므로 정수 변동에 대한 영향이 비교적 적은 직접토크제어 방식을 전기추진선박의 추진전동기 제어알고리즘으로 적용함으로써 속도 및 토크 응답특성과 전동기 파라미터 변동에 대한 강인성을 알아본다.

2. 직접토크제어

2.1 직접토크제어알고리즘

Fig. 1은 직접토크제어(DTC) 방식에 대한 제어기 구성도를 보여주는데 이 방법은 전동기에서 전압(v_s)과 전류(i_s)값을 측정하여 고정자 자속(λ_s)과 토크(T_e)를 연산하고 매 주기마다 자속(λ_s^*)과 토크(T_e^*)의 지령치와 비교하여 자속과 토크의 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. 직접토크제어는 전압벡터를 독립적으로 제어하므로 빠른 응답성과 정확성을 얻을 수 있으며 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 토크의 동적특성이 전동기 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적다. 또한, 직접토크제어는 좌표변환 및 비간섭 제어가 필요 없으며, 제어기가 감소되고 Modulator를 사용하지 않으므로 연산시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 직접토크제어 루프는 자속비교기, 토크비교기, 고정자 자속과 토크계산부, 스위칭벡터 선정부로 구성되어 있다.

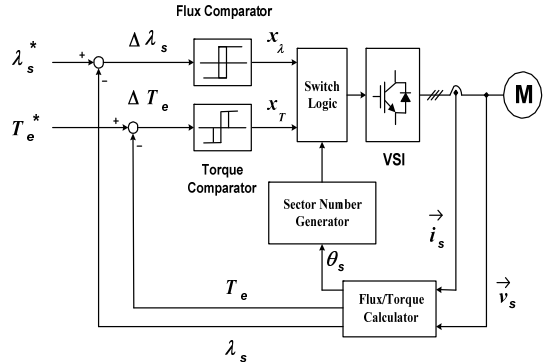


Fig 1 Control block diagram for direct torque control

2.2 유도전동기의 직접토크제어 개념과 이론

유도전동기의 고정자 자속은 고정자 전압의 크기에 비례하고 방향은 같은 벡터로 생각할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \lambda_s \approx V_s \Delta t \tag{1}$$

여기서, λ_s 는 고정자 자속, V_s 는 고정자 전압, Δt 는 샘플링 주기이다.

즉, 고정자 자속은 고정자 전압벡터 \vec{V}_s 와 같은 방향으로 움직인다. \vec{V}_s 이 유효벡터일 때, λ_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 n번째 영역 [Sector]에 있을 때 선택되어지는 전압벡터에 대한 의미를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Selected vector and means

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)	Back ward negative voltage vector
V(0)	Zero voltage vector

Fig. 2는 직접토크제어의 개념도로서 스위칭 벡터와 자속벡터를 나타낸 것이다. 히스테리시스 밴드 안에서 스위칭 벡터의 선택에 따라 회전하고 있는 자속의 궤적을 나타내고 있다. 자속은 맥동이 있는 원의 궤적을 그리면서 회전하게 된다.

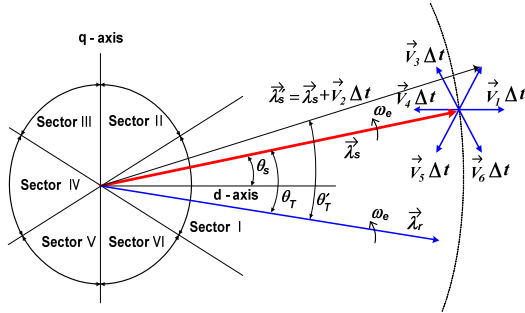


Fig. 2 Conception of direct torque control

식 (2)는 자속의 히스테리시스 밴드를 나타내고 있다.

$$(|\lambda_s|^* - \Delta|\lambda_s|/2) \leq (|\lambda_s|) \leq (|\lambda_s|^* + \Delta|\lambda_s|/2) \quad (2)$$

자속 벡터의 선택은 히스테리시스 밴드 내에서의 크기에만 관계되는 것이 아니라 회전방향과도 관계가 있다. 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 와 \vec{V}_3 을 선택한다. 일단 자속이 결정되면 토크는 식 (3)에 의하여 결정되어진다.

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{\omega L_s L_r} \lambda_s \lambda_r \sin \theta_T \quad (3)$$

토크 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. 토크는 회전방향에 따라 두 가지의 경우로 나누어진다.

$$T_e^* - \Delta T_e \leq T_e \leq T_e^* \quad \lambda_s \text{가 시계 방향 회전할 때}$$

$$T_e^* \leq T_e \leq T_e^* + \Delta T_e \quad \lambda_s \text{가 반시계 방향 회전할 때}$$

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 시계 방향으로 회전시키기 위한 유효벡터가 선정된다.

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 정지좌표계에서의 고정자 쇄교자속의 α 축과 β 축의 값으로부터 식 (4), (5), (6)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\vec{\lambda}_s = \lambda_{\alpha s} + j\lambda_{\beta s}$$

$$= \int (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt + j \int (v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \quad (4)$$

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{\alpha s}^2 + \lambda_{\beta s}^2} \quad (5)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \right) \quad (6)$$

여기서, $v_{\alpha s}, v_{\beta s}, i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ 는 측정된 고정자 전압과 전류이다.

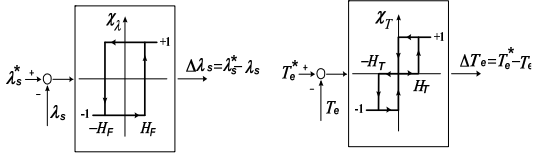
그러므로, 토크는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{\beta s} \lambda_{\alpha s} - i_{\alpha s} \lambda_{\beta s}) \quad (7)$$

Fig. 3(a)는 자속 히스테리시스 제어기를 나타내고 있다. 고정자 자속의 경우 자속의 값이 항상 양의 값을 가지므로 비교기 출력 $|\lambda_s|$ 는 2단계 (1,0)로 구성된다. 즉 고정자 자속의 오차가 양의 히스테리시스 밴드 H_F 보다 클 경우에는 $|\lambda_s| = 1$ 이 되고, 고정자 자속오차가 음의 히스테리시스 밴드 $-H_F$ 보다 작을 경우에는 $|\lambda_s| = 0$ 으로 된다.

Fig. 3(b)는 직접토크제어방식의 인버터에서 사

용되는 토크 히스테리시스 제어기를 나타낸다. 일반적으로 자속 히스테리시스 비교기와 달리 정방향과 역방향의 토크 지령에 대해 모두 추종이 가능하도록 출력 ΔT_e 는 3단계(-1.0.1)가 된다.



(a) Flux Comparator (b) Torque Comparator
Fig 3 Characteristics of flux and torque hysteresis comparators

Table 2는 이러한 자속과 토크 히스테리시스 비교기 특성을 근거로 만들어지는 최적 스위칭 전압 벡터의 룩업 테이블을 나타낸 것이다.

Table 2 Optimum switching voltage vector look-up table

Comparator Output		Sector					
x_λ	x_T	I	II	III	IV	V	VI
+1	+1	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_1
+1	0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0
+1	-1	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_5
-1	+1	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_2
-1	0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0	\vec{V}_0
-1	-1	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_4

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 시스템

직접토크제어(DTC) 방식에 의한 선박의 전기추진용 대형 유도전동기의 속도 및 토크제어의 특성을 고찰하기 위해 먼저 저속영역 및 중속영역에서의 지령속도에 대한 추종성능 및 토크특성을 알아보고 직접토크제어(DTC) 방식의 가장 큰 장점인 파라미터 변동에 대해서 자속 및 토크제어에 강인성을 보이는 특성을 시뮬레이션을 통해 알아본다. 부하인가는 속도를 고려한 전부하 상태에서 시뮬레

이션 하였다.

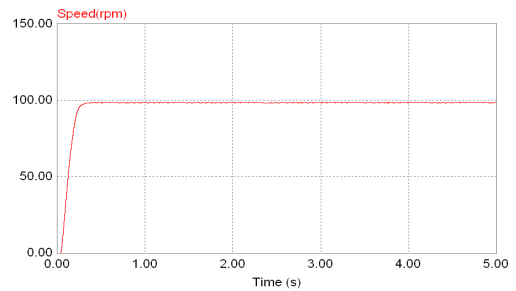
시뮬레이션에 사용된 추진전동기인 유도전동기의 각종 파라미터는 Table 3 과 같다.

Table 3 Parameters and system constants of induction motor used for simulation

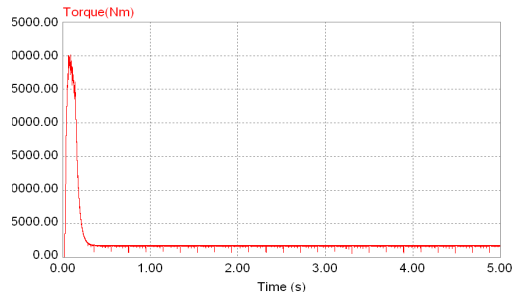
정격출력	6000[kW]	L_s	1.49[mH]
정격전압	3300[V]	R_r	0.07[Ω]
정격전류	1200[A]	L_r	0.35[mH]
극수	6	L_m	48[mH]
R_s	0.0167[Ω]	J	169[kgm ²]

3.1 시뮬레이션 결과

Fig. 4(a)와 (b)는 속도지령이 100[rpm]인 경우의 속도 및 토크응답으로서 속도응답 특성이 우수하며 토크리플은 정상상태에서 10[%] 이내로써 10~15[%] 이내인 기존 방식들과 비교할 만한 응답을 보인다.

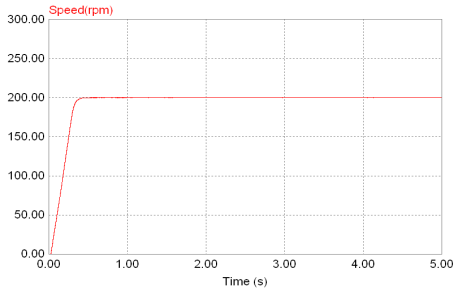


(a) Motor Speed

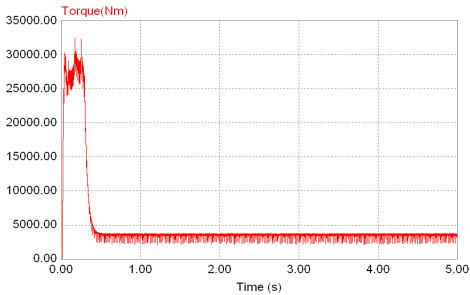


(b) Torque

Fig. 4 Simulation responses for step change of speed setting (0→100[rpm])

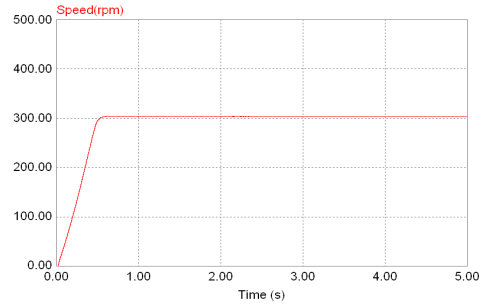


(a) Motor Speed

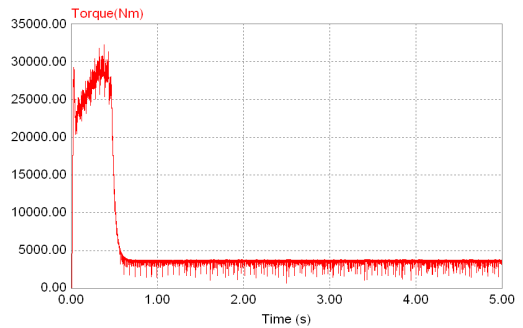


(b) Torque

Fig. 5 Simulation responses for step change of speed setting (0→200[rpm])

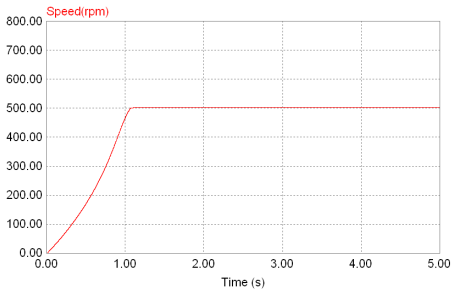


(a) Motor Speed

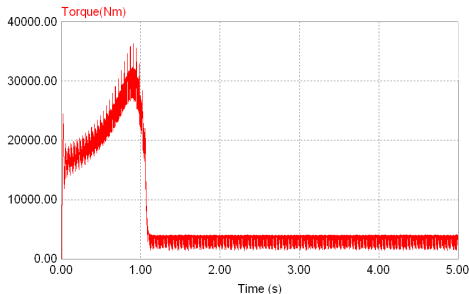


(b) Torque

Fig. 7 Simulation responses for the change of rotor resistance(increased by 30%)



(a) Motor Speed



(b) Torque

Fig. 6 Simulation responses for step change of speed setting (0→500[rpm])

Fig. 5(a)와 (b)는 속도지령이 200[rpm]인 경우의 속도 및 토크응답으로서 속도응답이 양호하고 토크응답도 정상상태에서 기존 방식들의 10~15[%] 이내임을 알 수 있다.

Fig. 6(a)와 (b)는 속도지령이 500[rpm]인 중속인 경우의 속도 및 토크응답으로서 속도응답이 양호하고 토크응답도 정상상태에서 기존 방식들의 10~15[%] 이내임을 알 수 있다.

Fig. 7(a)와 (b)는 파라미터 변동에 대한 강인성을 확인하기 위해서 회전자 저항을 30% 임의로 증가하였을 경우의 속도 및 토크 응답특성이며 시뮬레이션 결과 속도응답이 우수하고 토크리플도 10[%] 이내임을 확인하였다.

4. 결 론

직접토크제어는 자속과 토크를 독립적으로 제어하므로 빠른 응답성과 정확성을 얻을 수 있는 장점

이 있으며 제어 알고리즘은 타 방식에 비하여 단순하고 전동기의 정수 중에서 고정자 저항의 정보만을 필요로 하므로 정수 변동에 대한 영향이 비교적 적은 특징이 있다. 이러한 특성을 가진 직접토크 제어 방식을 이용하여 전기추진선박의 추진전동기를 제어함으로써 전동기의 저속 및 중속 영역에서 속도응답이 양호하고 토크응답도 정상상태에서 기존 방식들의 10~15[%] 이내임을 알 수 있었다. 또한, 운전 중 파라미터의 변동에도 속도응답이 우수하고 토크리플도 10[%] 이내의 강인한 제어 특성을 보임을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] P. Tiitinen, "The next generation motor control method, DTC direct torque control." Proceedings of the IEEE Intl. Conf. on Power Electronics, Drives, and Energy Systems for industrial Growth, pp. 37-43, 1996.
- [2] T.G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, and L. M. Tolbert, "Direct torque control of induction machines using space vector modulation.", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 5, pp. 1045-1053, 1992.
- [3] U. Baader, M. Depenbrock and G. Gierse, "Direct self-control of inverter-fed induction machine: A basis for speed control without speed measurement." IEEE Trans. Indus. Appl., Vol. 28, No. 3, pp. 581-588, 1992.
- [4] G. Buja, D. Casadei and G. Serra, "DTC-Based Strategies for Induction Motor Drives", IECON' 97, pp. 1506-1516, 1997.
- [5] G. Buja, D. Casadei and G. Serra, "Direct stator flux and torque control of an induction motor: Theoretical analysis and experimental results",

IEEE' 98, pp. T50-T64.

- [6] David Gritter, Swarm S. Kalsi, and Nancy Henderson, "Variable speed electric drive options for electric ships", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 347-354, 2005.
- [7] 문양경, "LNG운반선 전기 추진 계통의 개요", 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 31, No. 6, pp. 16-28, 2007.
- [8] Damir Radan, "Power electronic converters for ship propulsion electric motors", Marine Cybernetics-Energy Management Systems, ABB Marine AS/2007.

저 자 소 개



김종수(金宗洙)

1970년 6월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998, 2002년 동 대학원 졸업(석사, 박사) 현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 조교수
※관심분야:전동기속도제어, 전력전자, 인버터



오세진(吳世眞)

1972년 5월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2000, 2003년 동 대학원 졸업(석사, 박사), 2월 현재 한국해양대학교 운항훈련원 실습전담교원
※관심분야:전동기속도제어, 인버터 및 컨버터



김성환(金成煥)

1954년 11월생, 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1990년 부경대학교 대학원 졸업(석사), 1998년 부산대학교 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수
※관심분야 : 전동기속도제어, 인버터 및 컨버터