

VHDL을 이용한 유도전동기의 직접 토크 제어 ASIC 설계

이호재, 김세진, 이병춘, 권영안  
부산대학교 전기공학과

ASIC Design for Direct Torque Control of Induction Motor using VHDL

H.J.Lee, S.J.Kim, B.C.Lee and Y.A.Kwon  
Pusan National University

**Abstract** - Recently many studies have been performed for variable speed control of induction motor. Direct Torque Control(DTC) is emerging technique for variable speed control of PWM inverter driven induction motor. DTC allows the direct control of stator flux and instantaneous torque through simple algorithm. In this paper ASIC design technique using VHDL is applied to DTC based speed control of induction motor. ASIC for DTC based speed control is designed through the description of coordinate transformation, speed controller, stator flux and torque estimator, stator flux and torque controller, stator flux position detector, FSM(Finite State Machine) and inverter voltage switching vector.

Finally the above system has been implemented on the FPGA (XC4052XL-PG411). Simulation and experiment has been performed to verify the performance of the designed ASIC.

1. 서 론

직접 토크 제어(Direct Torque Control: DTC)는 유도전동기의 제어 이론 중에서 벡터제어의 대안 중 하나로 많은 연구가 이루어지고 있으며 그 가운데 가장 주목 받고 있는 이론이다. 직접 토크 제어는 유도전동기 벡터 제어의 복잡한 알고리즘 없이 고정자 자속과 순시 토크를 정밀하고 빠르게 직접 제어 할 수 있는 장점을 가진다[1],[2].

유도전동기 구동 시스템의 구성에서 마이크로프로세서나 DSP를 이용하여 제어부를 구현함으로써 전체시스템을 소형화 하고 연산을 유연화 하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 최근에는 ASIC 회로설계 기술이 개발되면서 전용 프로세서의 설계가 용이하게 되어 많은 분야에서 응용되고 있으며, 유도전동기의 제어를 위한 ASIC설계에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다[3].

하드웨어를 기술 할 수 있는 언어 중 VHDL은 간단한 TTL부터 복잡한 마이크로 프로세서까지 다양한 하드웨어를 설계할 수 있으며, 하드웨어 설계분야에서의 비중이 점점 높아지고 있다. VHDL의 구성은 회로의 입력과 출력에 대한 포트를 기술하는 Entity와 회로의 구조와 동작을 서술하는 Architecture로 구성되며, 회로합성(synthesis)을 거쳐 최종적으로 FPGA, CPLD와 같은 프로그래머블 디바이스에 구현하여 ASIC을 제작하게 된다.

본 연구는 VHDL을 사용한 ASIC 회로설계를 직접 토크 제어를 이용한 유도전동기 속도제어에 응용하는 연구로서 유도전동기의 직접 토크 제어 알고리즘의 동작레벨을 VHDL로 효율적으로 기술하고 시뮬레이션하여 동작을 확인한 후, 회로합성을 거쳐 최종적으로 FPGA를 사용하여 유도전동기의 직접 토크 제어 전용 ASIC을 제작하였으며 제작된 ASIC을 포함하는 유도전동기 구동

시스템을 구성하여 실험을 수행하였다.

2. 유도전동기의 직접 토크 제어

직접 토크 제어는 유도전동기의 고정자 자속과 순시 토크를 전압, 전류 및 고정자 저항으로부터 추정하며, 히스테리시스 밴드폭을 둔 지령 자속과 토크와의 비교를 통해 인버터의 스위칭 벡터를 결정한다. 속도제어는 지령 속도와 속도센서로부터 구한 실제 회전자 속도의 오차를 PI제어 하여 지령 토크를 출력하는 과정에서 이루어진다. 그림 1은 본 연구에서 구성한 전체시스템의 블록도이다.

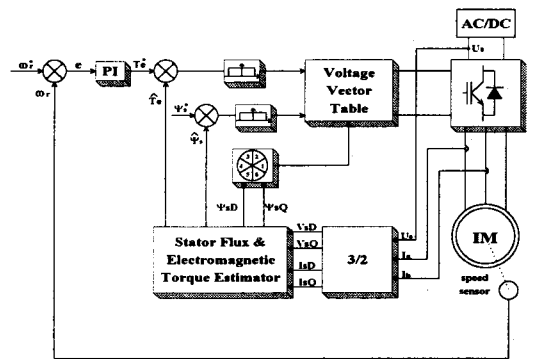


그림 1. DTC에 의한 유도전동기 구동 시스템

유도전동기 고정자 자속과 순시 토크는 인버터의 입력 DC전압과 스위칭 상태, 전류센서의 입력값 그리고 고정자 저항의 값으로 추정해낼 수 있다. 고정자기준 좌표계에서 DQ축의 전압과 전류는 다음과 같다.

$$V_{sD} = \frac{2}{3} U_0 (S_A - \frac{S_B + S_C}{2}) \tag{1}$$

$$V_{sQ} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_0 (S_B - S_C) \tag{2}$$

$$I_{sD} = I_{sA} \tag{3}$$

$$I_{sQ} = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{sA} + 2I_{sB}) \tag{4}$$

단,  $S_A, S_B, S_C$  : 각상의 스위치 on, off

상기한 전압과 전류로부터 고정자자속은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Psi_{sD} = \int (V_{sD} - R_s I_{sD}) dt \tag{5}$$

$$\Psi_{sQ} = \int (V_{sQ} - R_s I_{sQ}) dt \tag{6}$$

단,  $R_s$  : 고정자 권선저항

고정자 자속의 크기는 다음과 같다.

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_{sD}^2 + \Psi_{sQ}^2} \quad (7)$$

토크는 추정된 자속과 측정전류로부터 다음과 같이 구해 질 수 있다.

$$T_e = P(\Psi_{sD}I_{sQ} - \Psi_{sQ}I_{sD}) \quad (8)$$

단,  $P$  : 쌍극수

고정자 자속의 위치 벡터와 고정자 자속과 토크의 히스테리시스 제어기 출력에 의해 결정 될 수 있는 인버터 전압 벡터는 다음과 같다.

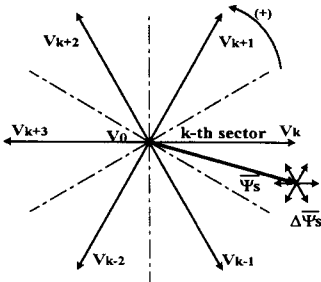


그림 2. 고정자 자속의 위치 벡터

표 1. 사용 가능한 인버터 전압 벡터

	$T_e \uparrow \Psi_s \uparrow$	$T_e \uparrow \Psi_s \downarrow$	$T_e \downarrow \Psi_s \uparrow$	$T_e \downarrow \Psi_s \downarrow$
solution A	$V_{k+1}$	$V_{k+2}$	$V_0, V_7$	$V_0, V_7$
solution B	$V_{k+1}$	$V_{k+2}$	$V_k$	$V_0, V_7$
solution C	$V_{k+1}$	$V_{k+2}$	$V_k$	$V_{k+3}$

유도전동기의 속도제어를 위하여 지령속도와 실제 회전자 속도의 오차를 PI 제어하고 다음과 같은 지령 토크를 결정한다.

$$t_e^* = K_p(\omega_r^* - \omega_r) + K_i \int (\omega_r^* - \omega_r) dt \quad (9)$$

- 단,  $K_p$  : 속도 제어기의 적분이득
- $K_i$  : 속도 제어기의 비례이득
- $\omega_r^*$  : 지령 회전자 속도
- $\omega_r$  : 실제 회전자 속도

이상에서 기술한 직접 토크 제어 알고리즘을 이용하여 유도전동기 속도제어 시스템을 VHDL로 기술하고 ASIC을 설계한다.

### 3. 직접 토크 제어 ASIC 설계

직접 토크 제어 알고리즘의 ASIC 설계를 위해 VHDL을 사용하여 제어 시스템의 동작레벨을 좌표 변환기, 속도제어기, 고정자 자속 및 토크 추정기, 고정자 자속 및

토크 제어기, 고정자 자속 위치 검출기, FSM(Finite State Machine) 및 인버터 전압 벡터로 나누어 기술하였다.

### 3.1 좌표변환기

인버터 입력 DC전압과 인버터의 스위칭 상태 그리고 고정자 전류의 입력값으로 고정기준좌표계의 DQ축 성분의 전압과 전류로 변환 시키며, 곱셈기와 감산기 그리고 이전의 스위칭 상태를 기억하는 레지스터로 구성된다.

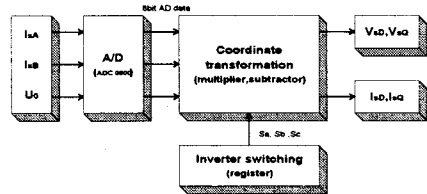


그림 3. 좌표변환기의 블록도

### 3.2 속도제어기

속도센서의 펄스입력을 4채배 하여 실제 회전자 속도를 구하는 속도 검출기를 포함하고, 지령 속도와 오차를 PI제어 하여 지령 토크를 출력한다. 속도 검출기는 샘플링 타이밍을 결정하는 타이머와 속도 센서의 펄스 신호를 계량하는 카운터, D플립플롭, 4채배 회로로 구성된다.

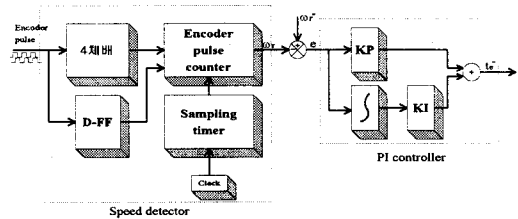


그림 4. 속도제어기의 블록도

### 3.3 고정자 자속 및 토크 추정기

고정자 자속 및 토크 추정기의 연산은 식(5)-(8)에 의

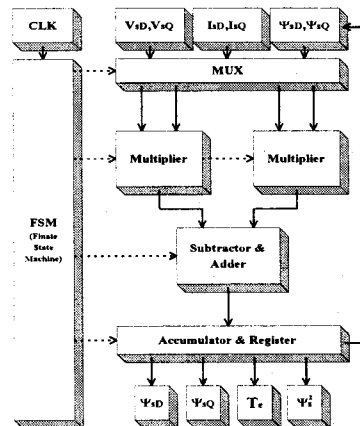


그림 5. 고정자 자속 및 토크 추정기의 블록도

해 이루어진다. 연산의 형태가 유사하므로 하나의 Architecture를 설계하여 4번의 반복연산을 통하여 고정자 자속과 토크를 추정하도록 하였다. 반복연산은 FSM을 설계하여 제어 신호의 반복을 구현하였다. 자속의 크기 연산에서 제곱근 연산 대신 제곱연산을 하였으며 곱셈기로는 16×16bit 병렬곱셈기를 사용하였다.

### 3.4 고정자 자속 및 토크 제어기

고정자 자속 및 토크 제어기는 히스테리시스 제어기이며, 밴드폭인  $\Delta\psi_s$ 와  $\Delta T_e$ 의 결정은 시스템의 동작에 큰 영향을 미치므로 외부 입력으로 몇 가지 경우를 선택할 수 있도록 구성하였다.

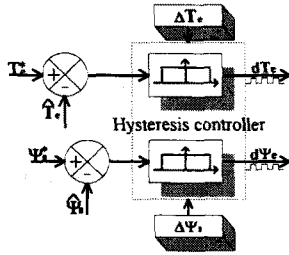


그림 6. 고정자 자속 및 토크 제어기의 블록도

### 3.5 고정자 자속의 위치 검출기

고정자 자속 위치 검출기는 고정자 자속 추정기의 출력인 DQ축 성분 자속의 부호와 표 2의 특정한 연산 결과의 부호로 결정되어진다.

표 2. 고정자 자속 위치 결정 테이블

Sector	I	II	III	IV	V	VI
Sign	(001)	(010)	(011)	(100)	(101)	(110)
$\psi_{sD}$	+	+	-	-	-	+
$\psi_{sQ}$	+(-)	+	+	+(-)	-	-
$\frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{sD}  -  \psi_{sQ} $	+	-	-	+	-	-

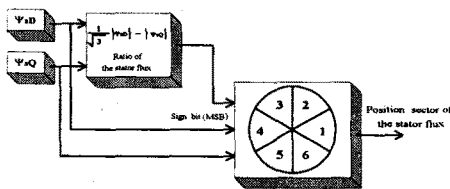


그림 7. 고정자 자속 위치 검출기의 블록도

## 4. 실험결과 및 검토

본 연구에서 제작한 유도전동기 구동시스템은 FPGA, 게이트 드라이브, A/D 컨버터, 3상 PWM 인버터 및 유도전동기 등으로 구성된다. 본 실험에 사용된 유도전동기는 3상 220V, 3마력 전동기이다. 또한, 직접 토크 제어를 이용한 유도전동기 속도제어 전용 ASIC의 구현을 위해 사용된 칩은 Xilinx사의 XC4052XL-PG411으로서 PGA타입, 411핀의 FPGA이다. 그림 8은 VHDL로 기술된 제어 알고리즘이 구현된 Chip의 내부 회로 상태를 보여주고 있으며 그림 9는 무부하시 지령 속도 500rpm과 1000rpm인 경우의 실험 결과이다.

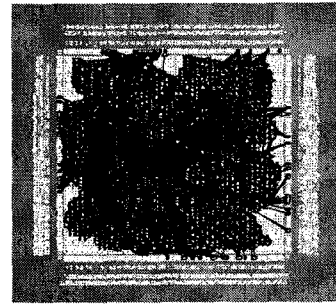
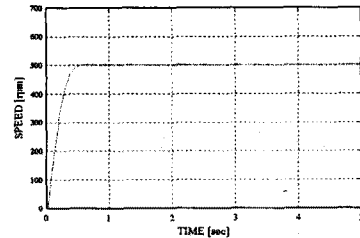
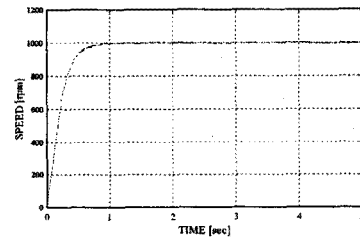


그림 8. 설계된 FPGA의 내부회로



(a) 지령 속도 500rpm 인 경우



(b) 지령 속도 1000rpm 인 경우

그림 9. 유도전동기 속도응답 실험결과

## 5. 결론

본 연구에서는 직접 토크 제어를 이용하여 유도전동기의 속도제어를 수행할 수 있는 전용 원리를 구현하기 위해 제어알고리즘을 하드웨어 기술언어인 VHDL을 통해 기술하였고, 회로합성을 거친 후 최종적으로 FPGA를 사용하여 직접 토크 제어를 이용한 유도전동기 속도제어 ASIC을 설계하였으며, 제작된 ASIC을 포함하는 유도전동기 구동시스템을 구성하여 실험을 수행한 결과 양호한 동작특성을 보여준다.

### (참 고 문 헌)

- [1] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor", IEEE, IA-22, No.5, pp.820-827, 1986
- [2] G. Buja, D. Casadei and G. Serra, "DTC-based strategies for induction motor drives", IEEE/IECON, vol.4, pp. 1506 -1516, 1997
- [3] F. Aubepart, P. Poire, C. Girerd, Y. A. Chapuis and F. Braum, "Design and simulation of ASIC-based system control : application to direct torque control of induction machine", IEEE/ISIE, vol.3, pp.1250 -1255, 1999.