

3 레벨 인버터로 구동되는 유도전동기 직접 토크제어의 저속운전 성능 개선  
 박영민\*,최세경\*,이세현\*,이교범\*\*,유지윤\*\*,송중호\*\*\*,최익\*\*\*  
 현대중공업\*,고려대학교\*\*,한국과학기술연구원\*\*\*

AN OBSERVER-BASED DTC OF INDUCTION MOTORS DRIVEN BY 3-LEVEL INVERTER FOR IMPROVING LOW SPEED OPERATION

J.H.YUN\*,S.K.CHOI\*,S.H.LEE\*,K.B.LEE\*\*,J.Y.YOO\*\*,J.H.SONG\*\*\*,I.CHOI\*\*\*  
 Hyundai Heavy Industries\*, Korea University\*\*, KIST\*\*\*

**ABSTRACT** - Direct torque control algorithm for 3-level inverter-fed induction motors is proposed. Conventional selection method of the stator voltage vector shows problems of stator flux drooping phenomenon and undesirable torque control appeared especially at the low speed operation. To overcome these problems, a proposed method uses intermediate voltage vectors, which are inherently generated in 3-level inverters. An adaptive observer is also employed to estimate some state-variables and motor parameters, which takes a deep effect on the performance of the low speed operation. Simulation and experiment results verify effectiveness of the proposed algorithm.

1. 서 론

직접 토크 제어(DTC: Direct Torque Control)에 의한 유도전동기가 산업용 응용분야에 광범위하게 사용되고 있다. DTC 방식은 빠른 토크 응답성, 간단한 제어기 구조, 전동기 파라미터 변동에 의한 강인성 등의 장점을 가지고 있고 유도전동기에 속도 센서의 부착 없이 구현이 가능하다. 그래서 DTC 알고리즘은 소용량에서부터 대용량 전동기 구동으로 적용이 확산되고 있다[1,2]. 2 레벨로 구동되는 인버터의 경우 여러 형태의 DTC 기법이 많은 문헌에 보고되었지만 3 레벨 인버터의 경우는 매우 저조하다. 특히 전력용 반도체 소자의 냉각을 고려해서 인버터 스위칭 주파수가 1KHz 이하로 제한되는 고압 대용량 3 레벨 인버터 응용분야의 DTC 알고리즘 적용에 대한 보고는 전무한 상태이다. 본 연구는 3 레벨 인버터로 구동되는 유도전동기의 저속 운전 영역에 대해 주로 고찰해 보았다. 3 레벨 DTC 인버터를 위해 간단한 히스테리시스 제어기법을 연구했고 저속운전 영역에서 나타나는 고정자 자속 강하를 해결하는 새로운 기법을 제시했다. 2 레벨 인버터 시스템에서 고정자 자속강하 문제를 해결하기위해 가변 스위칭 섹터 또는 개선된 Look-up Table 활용 등 여러 방법이 이용되었다[3,4]. 또한 DTC 성능을 향상시키기 위해 넓은 속도 영역에서 고정자 자속, 회전자 속도, 고정자 저항을 추정하는 적응 전자원 관측기[5] 적용했다.

2. 본 론

2.1 3레벨 인버터의 DTC

DTC 원리와 3 레벨 인버터 시스템의 토크 제어 기법에 대해 설명한다. 그림 1은 3 레벨 인버터 출력 전압의 전형적인 공간전압 벡터를 나타낸 것이다. 여기서 z, h, i, f는 zero, half, intermediate, full 전압을 각각 나타낸다. 3 레벨 인버터에는 27개의 스위칭 전압 벡터 선택이 가능하고 2 레벨 인버터보다 확실한 인버터 스위칭 전압 벡터 선택이 복잡하다.

유도전동기 방정식으로부터 고정자 저항의 전압강하를 무시하면 인버터 출력전압 벡터와 고정자 자속변화 사이의 관계는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$d\bar{\lambda}_s = (\bar{v}_s - \bar{i}_s R_s) t_{sp} \approx \bar{v}_s t_{sp} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{v}_s$ : 인버터 출력전압 벡터  
 $t_{sp}$ : sampling 주기

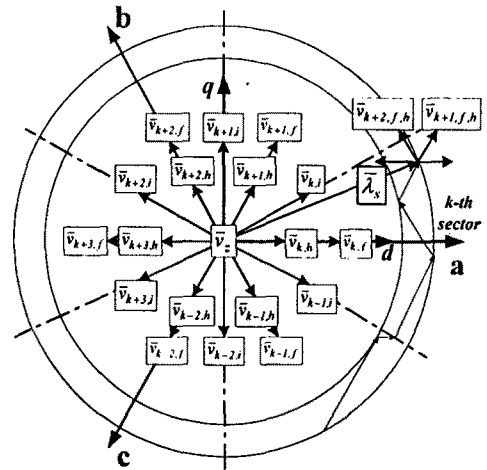


그림 1. 3 레벨 인버터 출력 전압

식(1)은 공급된 고정자 전압벡터가 고정자 자속 변화를 발생함을 나타낸 것이다. 고정자 자속 변화의 크기는 공급전압 벡터와 샘플링 주기의 적(積)에 비례한다. 고정자 자속 변화의 벡터적 방향은 선택된 전압 벡터의 방향과 같게 유지된다. 고정자와 회전자 자속은 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$\bar{\lambda}_r = \frac{L_m}{L_s} \frac{1}{1 + s\sigma\tau_r} \bar{\lambda}_s \quad (2)$$

여기서,  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

그리고 전자기적 토크는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \bar{\lambda}_s \cdot j \bar{\lambda}_r = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \lambda_s \lambda_r \sin\theta_r \quad (3)$$

식(3)으로부터 토크는 고정자 자속 크기와 회전자 자속에 대한 고정자 자속의 위상각에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

고정자 자속 벡터가 k-th 섹터에 있다고 가정하면 각 고정자 전압 벡터의 선택은 그림 1과 같이 표현할 수 있다.  $\bar{v}_{k+2,f}$  과  $\bar{v}_{k+1,f}$  의 선택은 고정자 자속과 회전자 자속 사이의 위상각을 증가시킬 수 있다. 결과적으로 신개된 토크는  $\bar{v}_{k+2,f}$  혹은  $\bar{v}_{k+1,f}$  의 적용에 의해 증가시킬 수 있다. 그리고 그림 1은 고정자 자속은  $\bar{v}_{k+1,f}$  의 선택에 의해 증가되고  $\bar{v}_{k+2,f}$  의 선택에 의해 감소함을 볼 수 있다. 만약 half 전압벡터가 선택된다면 토크의 기울기를 줄일 수 있다.

그림 2에 표시한 2 중 토크 히스테리시스 밴드 방법은 3 레벨 인버터에 적용된다. 토크가 음(-)의 상위 히스테리시스 밴드로 하강하면 토크를 증가시킬 수 있는 적절한 큰 전압 벡터가 선택된다. 그리고 제어된 토크가 양(+)의 하

위 히스테리시스 밴드에 근접하면 full 전압 벡터를 half 전압 벡터로 변경시킨다. 만약 토크가 양(+)의 상위 히스테리시스 밴드를 접하게 되면 zero 전압 벡터를 인가하여 토크 값을 감소시킨다. 역 방향 운전에도 이와 같은 규칙이 동일하게 적용되며, Table 1에 스위칭 Look-up Table을 나타내었다.

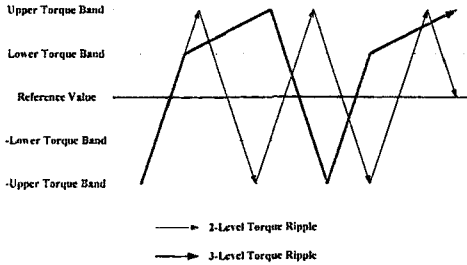


그림 2. 3 레벨 인버터 토크 기울기 패턴

$\lambda_s$ 가 k-th 섹터에 위치한다고 가정하면 토크를 증가시키기 위한 가능한 전압벡터는  $\vec{v}_{k+1,f}$ ,  $\vec{v}_{k+1,h}$ ,  $\vec{v}_{k+2,f}$ , 및  $\vec{v}_{k+2,h}$ 이다. 이들 전압 벡터 중에서 이중 토크 히스테리시스 밴드와 고정자 자속 조건을 고려해서 하나의 전압 벡터가 선택되어진다. 그러나 토크를 감소시키기 위해서는 전압벡터  $\vec{v}_z$ 만이 선택되어진다.

TABLE 1. Switching Look-up Table

$\lambda_s$ in sector k	Torque			
	↑	↑↑	↓	
Flux	↑	$\vec{v}_{k+1,h}$	$\vec{v}_{k+1,f}$	$\vec{v}_z$
	↓	$\vec{v}_{k+2,h}$	$\vec{v}_{k+2,f}$	$\vec{v}_z$

위에서 설명한 3 레벨 DTC 알고리즘의 효과를 검증하기 위해 몇 가지 시뮬레이션을 수행 하였고, 속도추정은 아래의 방정식을 토대로 한 속도 추정기에 의해 수행하였다.

$$\omega_r = \left( \lambda_{dr} \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - \lambda_{qr} \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \right) / \left( |\lambda_s|^2 - \frac{2T_e R_r}{3p|\lambda_s|^2} \right) \quad (4)$$

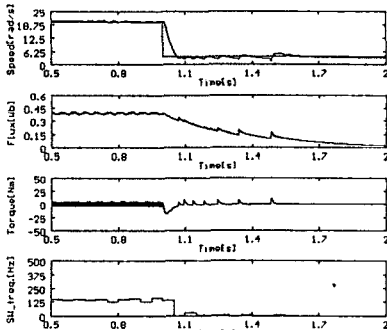


그림 3. DTC의 지속 운전 특성

위에서 언급한 DTC 스위칭 기법은 지속 운전시 고정자 자속의 비자성(非磁性)현상이 발생됨을 그림 3에 나타내고 있다. 그림 1에서 본 것처럼 두 섹터 경계에서는 고정자 자속을 확실하게 증가시킬 수 있는 유효 전압벡터가 없다. 그래서 회전하는 고정자 자속 벡터가 하나의 섹터에서 다른 섹터로 위치를 이동한다. 지속운전에서 성능을

저하시키는 다른 문제는 zero 전압 벡터의 선택이다. 저속영역에서 zero 전압은 합성 위상각 감소(the resultant phase angle reduction)가 낮은 고정자 주파수값 때문에 쉽게 얻을 수 없어 토크 감소 제어를 효과적으로 확실하게 할 수 없다. 3 레벨 DTC의 기본적인 스위칭 방법은 저속도 운전 영역에서 이러한 문제들을 극복하기 위해 수정되어야 한다.

## 2.2 저속운전 스위칭 방법

전절에서 설명한 것처럼 기본 DTC 알고리즘의 문제는 저속영역 운전시 고정자 자속 강하와 zero 전압벡터의 적용이다. 비자화(Demagnetization) 영향은 유도전동기의 비선형성에 의해 주로 발생된다. 이 문제는 고정자 자속 벡터가 하나의 섹터에서 다른 섹터로 변경직후 나타난다. 저속영역에서 zero 전압벡터 적용으로 성능을 저하시키는 현상은 방정식(2),(3)으로부터 쉽게 이해할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 역전압 벡터가 zero 전압벡터 대신 토크를 감소시키기 위해 적용된다. 이 방법으로 저속영역에서 토크의 빠른 감소를 얻을 수 있으나 스위칭 주파수 및 토크 리플을 증가시킬 수 있다. 기본 스위칭 Look-up Table은 저속 운전 영역에서 발생하는 이러한 문제를 해결할 수 없다. 비록 비자화 문제가 2 레벨 인버터에서와 같은 방법으로 기준축 및 스위칭 섹터 회전에 의해서 해결할 수 있어도 zero 전압벡터 적용에 의해 발생하는 현상은 쉽게 해결할 수 없다. 그래서 이 문제를 해결하기 위해 새롭게 수정된 Look-up Table이 저속 영역에서 적용되어야 한다. 3 레벨 인버터에서 intermediate 전압벡터는 2 레벨 인버터에서 적용된 기준축 및 스위칭 섹터 회전없이 비자화 문제를 해결할 수 있다.

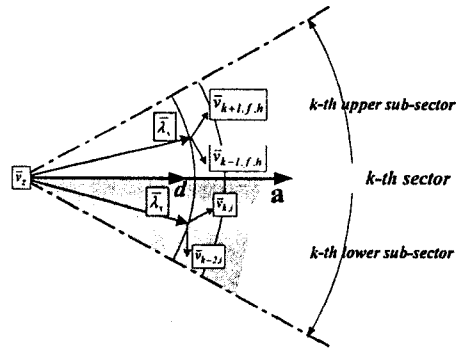


그림 4. 저속 운전시 스위칭 방법

TABLE 2. Modified Look-up Table

$\lambda_s$ in sector k	Torque				
	↑	↑↑	↓	↓↓	
Flux	Upper sub-sector	$\vec{v}_{k+1,h}$	$\vec{v}_{k+1,f}$	$\vec{v}_{k-1,f}$	$\vec{v}_{k-1,h}$
	Lower sub-sector	$\vec{v}_{k,j}$		$\vec{v}_{k-2,j}$	

그림 5에서처럼 스위칭 섹터는 정밀하게 고정자 전압 벡터를 선택하기 위해 12개 섹터로 나누어진다. k-th 섹터는 하위 서브섹터와 상위 서브섹터로 세 분리되고 각각 30°의 폭을 가진다. 하위서브 섹터에서 Table 1에 따라 결정된 고정자 전압 벡터  $\vec{v}_{k+1,f}$ 는 고정자 자속을 증가시키게 된다. 만일 intermediate 전압벡터  $\vec{v}_{k,j}$ 가  $\vec{v}_{k+1,f}$  대신에 선택된다면 비자화 문제는 해결된다. 두 섹터 경계에

서 효과적으로 자화 영향을 얻기 위해, 특히 저속영역에서 Table2에 나타낸 것 같은 수정된 Look-up Table를 사용한다. 기본 Look-up Table에서 수정된 Look-up Table로의 전환은 고정자 자속 크기의 감소량을 검출함으로써 수행할 수 있다. 고정자 자속 크기가 최소 고정 레벨 이하일 경우 기본 Look-up Table의 Table1은 수정된 Look-up Table의 Table 2로 교체되어진다

만일 고정자 자속이 상위 서브 섹터 내에서 움직이면 적절한 전압 벡터가 Table2에 따라 결정된다. 이 선택은 토크 제어를 위해 zero 전압벡터 대신 역전압 벡터를 선택하는 것을 제외하고 Table1과 기본적으로 동일하다. 그림 5는 정격속도의 약 1% 속도영역에서 수정된 Look-up Table를 사용한 DTC 저속운전을 나타낸 것이다. 이 그림을 통해 스위칭 주파수의 증가없이 비자화 및 zero 전압 벡터의 문제를 효과적으로 해결했음을 알 수 있다. 제안된 제어 방법의 성능이 저속운전을 위해 타당하다는 것을 알 수 있다.

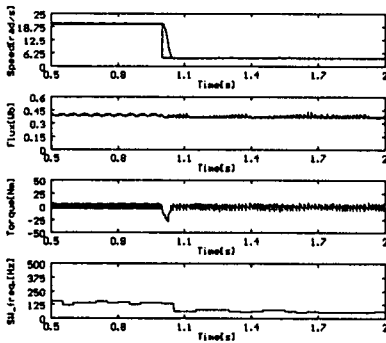


그림 5. 저속에서 개선된 성능

### 2.3 적응 관측기 구조의 제어

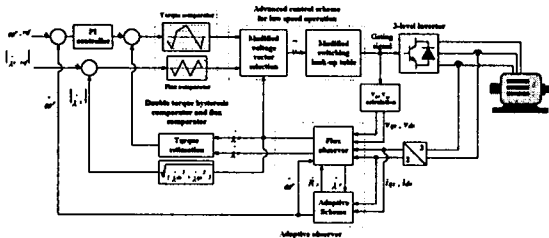


그림 6. 제안된 제어 구조의 개략도

속도제어기, 토크 및 자속 비교기, 수정된 look-up table, 적응관측기, 3 레벨 인버터로 구성된 개략적인 제어구조를 그림 6에 나타내었다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위해 시뮬레이션과 실험을 저속운전에 초점을 맞추어 수행하였다. 모든 시뮬레이션 결과는 무부하, 동일한 Sampling 주파수 (120[μs])에서 수행하였다. 제안된 제어 시스템의 실험장치는 그림 7과 같으며, 7.4[KW] 유도전동기, 전력회로, TMS320C40을 포함한 주제어기 보드 DS1003, I/O 보드 DS4001 및 A/D 보드 DS2001로 구성된다. 그림 8은 저속 운전시 속도 및 토크 추정을 나타내고 있는데 속도 추정치가 정격 속도의 1%이내의 오차를 가지는 양호한 결과

를 얻었다.

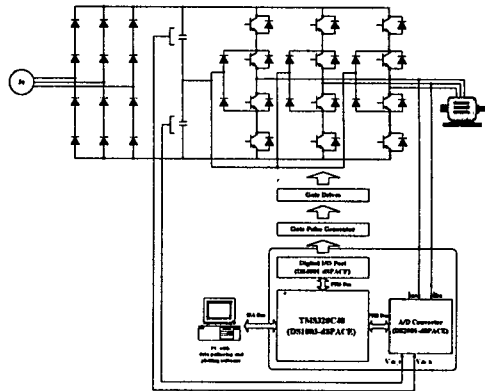


그림 7. 실험 장치

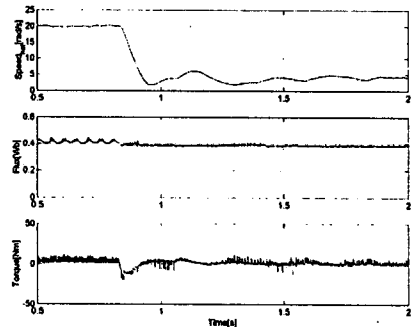


그림 8. 실험 결과

### 4. 결론

고압 대용량 3 레벨 인버터에 개선된 DTC 알고리즘을 적용한 토크 및 자속 제어법을 제시했다. 비자화 영향 및 zero 전압벡터의 적용은 저속 운전시 성능을 저하시키므로 intermediate 전압 벡터를 사용한 개선된 Look-up Table을 제안하여 문제를 해결했다. 적응관측기는 전동기 속도 추정에 대해 양호한 성능을 얻기 위해 적용되었다.

### [참고 문헌]

1. G. Buja, D. Casadei, and G. Serra, "Direct Stator Flux and Torque Control of an Induction Motor: Theoretical Analysis and Experimental Results", IECON'98, T50-T64, 1998
2. James N. Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Without an Encoder", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 2, pp. 333-341, 1997
3. CG Mei, SK Panda, JX Xu, and KW Lim, "Direct Torque Control of Induction Motor - Variable Switching Sectors", PEDS'99, pp. 80-85, 1999
4. D. Alfonso, G. Gianluca, M. Ignazio, and P. Aldo, "An Improved Look-up Table for Zero Speed Control in DTC Drives", EPE'99, 1999
5. H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 344-348, 1993