

3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기 직접토크제어의 저속성능 개선

論 文

49B-10-8

An Improvement on low Speed Operation Performances of DTC for 3-level Inverter-fed Induction Motors

李 教 範* · 宋 重 鎬** · 崔 翼** · 金 光 培** · 柳 志 潤***

(Kyo-Beum Lee · Joong-Ho Song · Ick Choy · Kwang-Bae Kim · Ji-Yoon Yoo)

Abstract - A direct torque control algorithm for 3-level inverter-fed induction motors is presented. Conventional voltage selection methods provoke some problems such as 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. In the proposed algorithm, both subdivision of the basic switching sectors and applications of intermediate voltages improve the low speed operation characteristics. This algorithm basically considers applications in which direct torque controlled induction motors are fed by 3-level inverters with low switching frequency around 500Hz. An adaptive observer is also employed to bring better responses at the low speed operation, by estimating some state-variables, motor speed and motor parameters which take a deep effect on the performance of the low speed operation. Simulation and experiment results verify effectiveness of the proposed algorithm.

Key Words : direct torque control, 3-level inverters, low speed operation

1. 서 론

최근 점점 여러 산업분야에서 응용되고 있는 유도전동기의 직접토크제어(DTC; Direct Torque Control) 방식은 빠른 토크응답속도, 좌표변환이 필요없는 간단한 제어루프, 전동기 정수 변동에 대한 견고성 등의 여러 우수한 특성을 가지고 있다. 또한 직접토크제어 방식은 유도전동기에 속도센서를 장착하지 않고 운전하는 고성능 속도센서리스 제어 방식의 하나로 쉽게 응용될 수 있다. 이 제어방식은 중소용량 중심에서 대용량으로 그 응용범위가 확대되고 있다[1-6].

2레벨 인버터로 구동되는 유도전동기의 직접토크제어 방식에 대해서는 많은 제어 알고리즘들이 연구 발표되었으나, 3레벨 인버터 시스템에 대해서는 그 연구결과가 거의 없는 실정이다. 대용량 인버터가 가지고 있는 하나의 주요한 특징은 인버터 스위칭 주파수가 대체로 1kHz를 넘지 않는 수준에 있다는 점이다. 이는 스위칭소자의 냉각문제 때문에 스위칭 주파수를 이 이상으로 올리는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있기 때문이다. 따라서, 직접토크제어방식을 3레벨 인버터에 적용하기 위해서는 이러한 스위칭 주파수의 제약점을 고려하여야 한다.

본 논문은 속도 센서가 없는 3레벨 인버터로 구동되는 유

도전동기의 저속도 운전특성 개선에 초점을 맞추고 있다. 3레벨 인버터의 기본적인 히스테리시스 중심의 직접토크제어 방식을 먼저 설명한 후, 저속도 특성 개선을 위한 알고리즘을 제안한다. 기본적인 직접토크제어 방식으로 유도전동기를 구동하면 전동기의 속도가 저속도인 경우, 고정자자속 감하현상이 일어난다. 또한 저속도 운전 영역에서 전동기의 발생 토크제어가 원활하지 못한 문제점이 발생한다. 이러한 문제들은 2레벨 인버터 시스템에서도 기본적인 히스테리시스 중심의 직접토크제어방식을 사용하면, 동일하게 발생하는 문제들이다. 2레벨 인버터에서는 역전압벡터의 인가나, 스위칭 섹터의 위상회전등의 방법을 통하여 이 문제들을 해결하려 하고 있다[7-9]. 본 논문에서는 3레벨 인버터의 중간전압 벡터의 적절한 선택을 통하여 저속도 영역에서의 고정자자속과 전동기 토크의 제어 성능을 대폭 향상시키고 있다. 나아가서, 저속도 성능 향상을 위하여 고정자자속, 전동기 속도, 전동기 토크, 고정자저항 등을 적응 전차원 관측기(adaptive full-order observer)를 이용하여 추정한다. 시뮬레이션 및 실험결과는 제안하는 알고리즘의 성능과 유용성을 뒷받침해준다.

2. 3레벨 인버터의 직접토크제어

3레벨 인버터를 위한 기본적인 직접토크제어 방식에 대하여 설명한다. 다음 그림 1은 3레벨 인버터가 만들어 내는 출력전압의 공간 전압벡터 표현을 보여주고 있다. 그림에서 아래첨자 z, h, i, f 는 각각 영전압(zero-voltage), 반전압(half-voltage), 중간전압(intermediate-voltage), 전전압(full-voltage)을 나타내고 있다. 3레벨 인버터에서는 총 27개의

* 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 韓國科學技術研究院 知能制御研究센터 責任研究員

*** 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 教授·工博

接受日字 : 2000年 6月 19日

最終完了 : 2000年 10月 21日

전압벡터가 존재하므로, 인버터 전압의 선택이 2레벨 인버터에서 보다 더 복잡하게 된다.

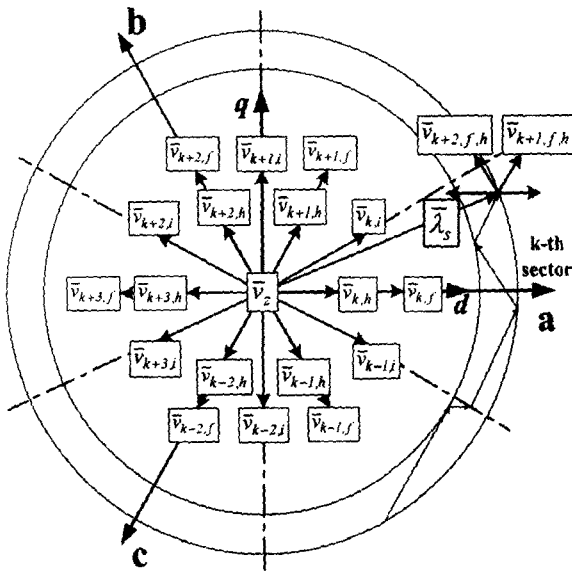


그림 1 3레벨 인버터의 출력전압
Fig. 1 Output voltage vectors of 3-level inverters

유도전동기의 고정자 전압관계식에서 고정자 저항에서의 전압강하를 무시하면, 한 전압채어 샘플링 기간 동안의 인버터 출력전압과 고정자 자속 변화분 사이의 관계는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Delta \bar{\lambda}_s = (\bar{v}_s - \bar{i}_s R_s) T_s \approx \bar{v}_s T_s \quad (1)$$

여기서, \bar{v}_s 는 인버터 출력전압 벡터, T_s 는 전압채어 샘플링 주기를 나타낸다. 이 식은 고정자 전압 벡터의 적절한 선정에 의하여 고정자 자속을 제어하는 것이 가능함을 보여주고 있다. 즉, 하나의 샘플링 기간 동안에 발생하는 고정자 자속 변화량의 크기는 인가되는 전압크기와 샘플링 주기의 곱한 값에 의하여 결정되며, 고정자 자속 변화량의 벡터방향은 인가되는 전압벡터의 방향과 일치한다.

고정자 자속과 회전자 자속 사이의 관계는 다음 식 (2)와 같다.

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

여기서, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 이다. 발생하는 전동기 토크의 관계식은 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \bar{\lambda}_s \cdot \bar{\lambda}_r \\ &= \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \bar{\lambda}_s \bar{\lambda}_r \sin \theta_{sr} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 전동기 토크는 고정자 자속 및 회전자 자속의 크기와 두 자속 사이의 위상각에 의해 결정됨을 보여주고 있다. 전동기 속도는 다음 식 (4)와 같이 계산 될 수 있다.

$$\omega_r = \frac{\left(\lambda_{dr} \frac{d\lambda_{gr}}{dt} - \lambda_{gr} \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \right)}{|\bar{\lambda}_s|^2} - \frac{2 T_e R_r}{3 P |\bar{\lambda}_s|^2} \quad (4)$$

그림 1은 고정자 자속이 k 번째 섹터에 위치해 있다고 가정할 때, 해당되는 고정자 전압 벡터의 선정에 대하여 설명해 주고 있다. 전압 벡터 $\bar{v}_{k+2,f,h}$ 와 $\bar{v}_{k+1,f,h}$ 는 고정자 자속과 회전자 자속의 위상각을 증대시키게 된다. 따라서 전동기의 발생 토크는 이 2가지 전압벡터에 의하여 증가하게 된다. 한편, 고정자 자속은 $\bar{v}_{k+1,f,h}$ 전압이 인가되면 증가하게 되고, $\bar{v}_{k+2,f,h}$ 전압이 인가되면 자속은 감소하게 된다. 만일 반전압이 인가되면 그 자속과 토크의 증가분량이 그만큼 줄어들게 된다.

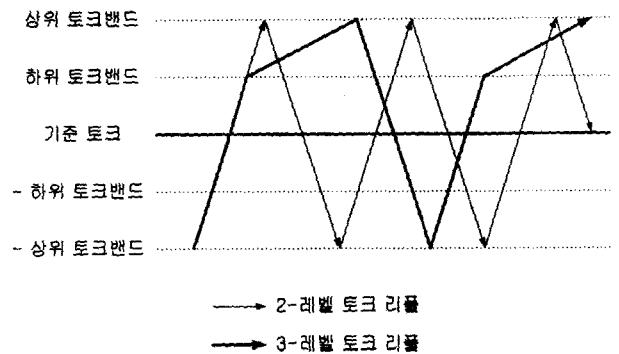


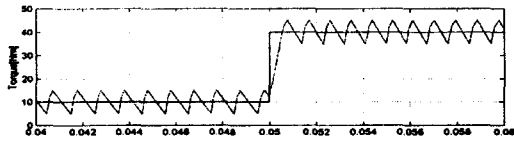
그림 2 토크제어 방법
Fig. 2 Torque slope pattern of 3-level inverter

그림 2는 3레벨 인버터에 적용되는 2중 히스테리시스밴드 토크 제어 방법을 보여주고 있다. 2레벨 인버터와 비교할 때, 하위 토크밴드가 추가로 설정되어 있음을 보게된다. +하위밴드는 정회전 시에 사용되고, -하위밴드는 역회전 시에 사용된다. 예를 들어, 전동기가 정회전하고 있는 경우, 발생 토크가 -상위밴드 이하로 줄어들면, 적절한 전압이 인가되어 토크를 빠르게 증가시키게 된다. 이 발생 토크가 +하위밴드에 다다르면, 인가되고 있던 전압은 해당 반전압으로 대체시켜서 토크의 증가를 완화시킨다. 이어서 발생 토크가 +상위밴드에 다다르면, 영전압을 인가하여 발생 토크를 감소시킨다. 역회전 시에는 고정자 자속의 회전 진행 방향이 역방향이 되도록 정방향에서 적용한 규칙과 비슷한 방법이 그대로 적용된다. 스위칭전압 벡터의 선정규칙과 정회전 및 역회전 시의 토크 및 자속의 제어특성이 각각 표 1과 그림 3에 나타나 있다. 그림 3의 토크 응답특성 중에서 확대된 토크리플 특성을 보면, 그림 2에서 도시한 기본적인 직접토크제어 알고리즘의 동작 특성을 보여 주고 있다. 토크제어 특성이나 고정자 자속의 제어 특성은 모두 원활한 특성을 보여주고 있음을 그림 3에서 볼 수 있다.

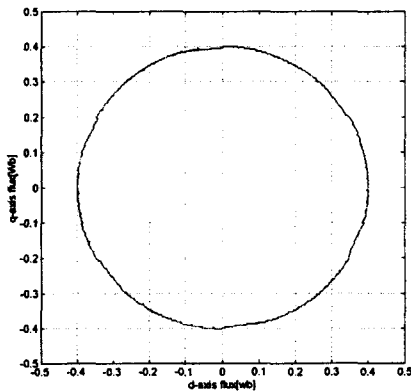
표 1 기본적인 스위칭방법

Table 1 Basic voltage selection

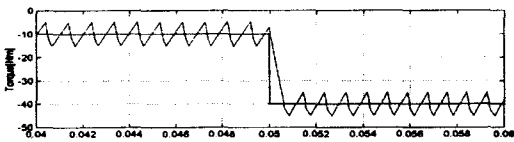
λ_r 가 k 섹터에 위치		토크		
		↑	↑	↓
자속	↑	$\bar{v}_{k+1,k}$	$\bar{v}_{k+1,f}$	\bar{v}_z
	↓	$\bar{v}_{k+2,k}$	$\bar{v}_{k+2,f}$	\bar{v}_z



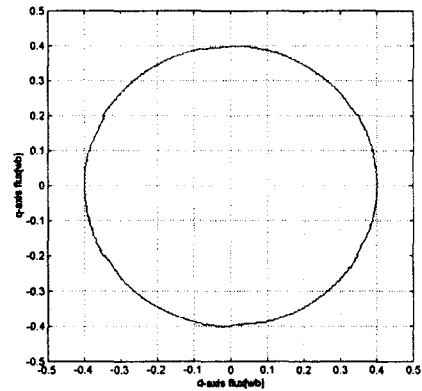
(a) 토크제어 (정방향)
(a) Torque control (forward direction)



(b) 자속제어 (정방향)
(b) Flux control (forward direction)



(c) 토크제어 (역방향)
(c) Torque control (reverse direction)



(d) 자속제어 (역방향)
(d) Flux control (reverse direction)

그림 3 3레벨 직접토크제어의 동작
Fig. 3 Basic 3-level DTC operation

이상의 직접토크제어 알고리즘을 저속도 영역에서 적용하면, 그림 4에서 보는 바와 같이 고정자 자속 강하 현상이 일어난다. 이 현상은 그림 1의 전압선택 관계를 보면서 다음과 같이 설명될 수 있다. 그림 1의 $k-1$ 번째 섹터에서 k 번째 섹터로 진입하는 경우, k 번째 섹터의 경계부근에서 표 1과 같이 선택되는 고정자 자속을 증가시킬 수 있는 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,k}$ 는 실제적인 자속증가 유효성분이 거의 없는 상태를 알 수 있다. 이러한 현상은 전동기 속도가 낮은 경우 자속크기를 감소시키는 문제를 일으키게 된다.

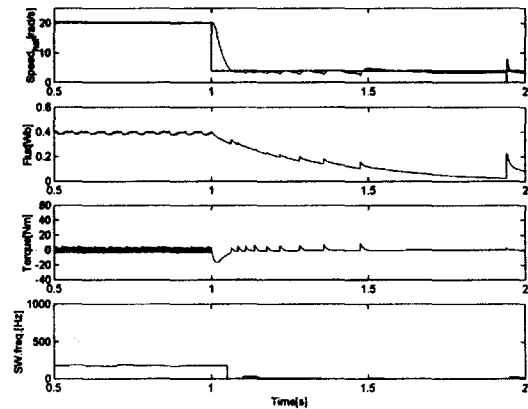


그림 4 기본 직접토크제어의 저속도 특성
Fig. 4 Low speed performance of the basic DTC

저속도 영역에서 발생하는 다른 하나의 문제는 더 이상 영전압이 그림 2에서와 같이 발생 토크를 줄이는 역할을 할 수 없다는 점이다. 이 이유는 저속도에서 고정자 자속의 회전 속도가 낮기 때문에 영전압이 인가된 경우, 고정자 자속과 회전자 자속의 위상각 차가 효과적으로 줄어들지 못하기 때문인 것으로 알려져 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 보

통 역전압 벡터를 인가하는 방법을 사용하지만, 스위칭 주파수의 증가 및 토크 리플의 증가 등을 일으키게 된다.

저속도 영역에서 발생하는 고정자 자속의 강하 현상과 토크 제어의 난조 문제를 해결하기 위한 새로운 스위칭 전압 선택 방법을 강구할 필요가 있다.

3. 저속도 운전 특성개선

앞 절에서 기술한 기본적인 스위칭 방법으로는 저속도 영역에서의 직접토크제어 성능의 저하를 가져오게 된다. 고정자 자속의 강하문제는 2레벨 인버터 시스템에서 사용하고 있는 기준좌표축의 회전이나 전압 스위칭 섹터의 회전에 의하여 해결 될 수 있으나, 3레벨 인버터에서는 중간전압 벡터를 사용하는 방법이 더 바람직 할 것이다. 또한 영전압 벡터 대신하여 중간전압 벡터를 인가하면, 저속도 영역에서의 토크제어를 원활히 할 수 있게 된다.

다음 그림 5는 그림 1의 전압 벡터도를 12-섹터로 균등 분할한 것 중에서 그 일부인 k 번째 섹터를 보여주고 있다. 그림 5에서 k 번째 섹터는 하위 서브섹터와 상위 서브섹터로 균등 구분되어 있으며, 고정자 자속이 반 시계 방향으로 회전한다고 가정한다. 음영처리 된 하위 서브섹터에 고정자 자속이 위치하는 경우, 표 1에서 선정된 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,f}$ 는 고정자 자속을 증가시키는 성분이 매우 미약하다. 따라서, 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,f}$ 대신에 중간전압 벡터 $\bar{v}_{k,i}$ 을 인가하면 이 전압 벡터는 고정자 자속을 증가시킬 수 있다. 이어서 고정자 자속이 상위 서브섹터에 진입하면 토크를 증가시킬 때는 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,f,h}$ 를 사용하고, 토크를 감소시킬 때는 영전압 벡터 대신에 전압벡터 $\bar{v}_{k-1,h}$ 을 사용한다. 이러한 전압 벡터의 선정은 다음 표 2와 같으며 저속도 영역에서 이용한다.

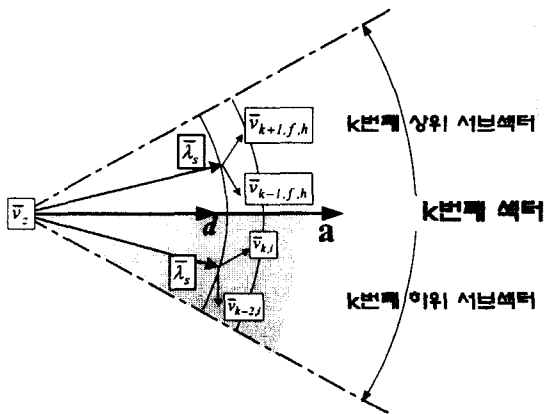


그림 5 저속도 특성을 개선한 전압선정
Fig. 5 Switching method for low speed operation

다음 파형들은 속도의 지령값이 20rad/s에서 4rad/s로 감소하였을 때, 속도의 추정값, 자속의 크기, 토크, 스위칭 주파수의 값을 나타낸 것인데 그림 6은 1.4초에서 정격 계단 부하가 인가되었을 때의 저속도 응답 파형이고, 그림 7은 정격 부하가 인가된 상태의 저속도 응답 파형이다. 1초에서의

급격한 속도변화에 따른 토크값의 떨어지는 현상은 속도 지령치를 따라가기 위한 속도 제어기 출력의 영향이라고 볼 수 있다. 속도 제어기의 적절한 이득 조정을 통해 정격이내의 값으로 조절할 수 있다. 그림 6, 7로부터 이상에서 제시하고 있는 알고리즘의 유용성을 그림 4의 결과와 비교할 때 확실히 알 수 있다. 고정자 자속의 강하문제와 토크 제어의 어려움 등의 문제가 해결되었다.

표 2 개선된 전압선정방법

Table 2 Modified voltage selection

$\bar{\lambda}_r$ 가 k 섹터에 위치		토크			
		↑	↗	↓	↘
자속	상위서브섹터	$\bar{v}_{k+1,h}$	$\bar{v}_{k+1,f}$	$\bar{v}_{k-1,f}$	$\bar{v}_{k-1,h}$
	하위서브섹터	$\bar{v}_{k,i}$		$\bar{v}_{k-2,i}$	

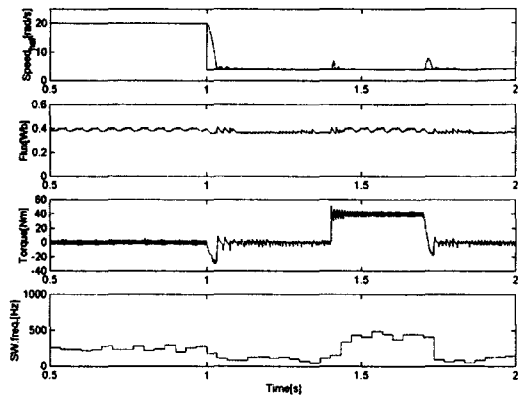


그림 6 개선된 저속도 특성
(정격계단부하 인가, 1.4~1.7초)

Fig. 6 Improved performances in the low speed operation
(rated step load condition, 1.4-1.7 sec)

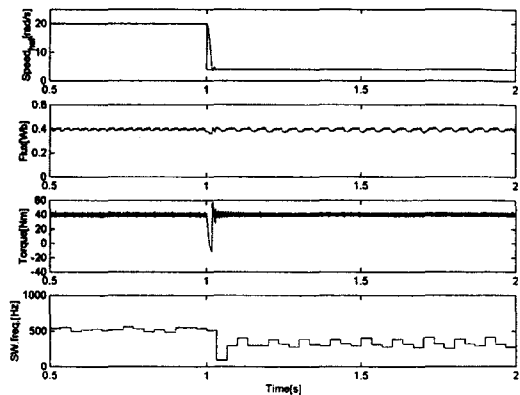


그림 7 개선된 저속도 특성 (정격부하인가)

Fig. 7 Improved performances in the low speed operation
(rated load condition)

4. Adaptive observer-based control

속도센서가 없는 고성능 유도전동기 제어시스템을 구축하기 위하여 직접토크제어 방식을 사용하면 전동기 속도, 전동기 발생 토크, 고정자 자속 등에 관한 정확한 정보가 필요하다. 특히 저속도 영역 운전에서 앞서 기술한 전동기 관계식을 중심으로 하는 직접토크제어방식을 사용했을 때의 전동기 속도, 전동기 자속, 전동기 토크 값들의 오차는 상당히 크게 나타나고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 전차원 관측기(full-order Luenberger observer)를 이용하는 적응 관측기(adaptive observer)를 채택하고 있다 [10].

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A} \hat{x} + B v_s + G(\hat{i}_s - i_s) \quad (5)$$

여기서, $\hat{x} = [\hat{i}_{ds} \ \hat{i}_{qs} \ \hat{\lambda}_{dr} \ \hat{\lambda}_{qr}]^T$
 $v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T$, $\hat{i}_s = [\hat{i}_{ds} \ \hat{i}_{qs}]^T$
 $i_s = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$,

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\omega}_r \\ 0 & -a_{11} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\omega}_r & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} \\ \frac{L_m}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & -\hat{\omega}_r \\ 0 & \frac{L_m}{\tau_r} & \hat{\omega}_r & -\frac{1}{\tau_r} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = -\left(\frac{\hat{R}_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r}\right)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T$$

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$$

$$\tau_r = L_r / R_r$$

$$g_1 = (k-1) \left(-\left(\frac{\hat{R}_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r}\right) - \frac{1}{\tau_r} \right)$$

$$g_2 = (k-1) \hat{\omega}_r$$

$$g_3 = (k^2 - 1) \left((\sigma L_s L_r) \left(\frac{\hat{R}_s}{\sigma L_s L_m} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r L_m} \right) + \frac{L_m}{\tau_r} \right) - (\sigma L_s L_r) (k-1) / L_m \left(\left(\frac{\hat{R}_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r} \right) - \frac{1}{\tau_r} \right)$$

$$g_4 = -(\sigma L_s L_r) (k-1) \hat{\omega}_r / L_m$$

$$\hat{\omega}_r = K_p (e_{ids} \hat{\lambda}_{qr} - e_{iqs} \hat{\lambda}_{dr}) + K_i \int (e_{ids} \hat{\lambda}_{qr} - e_{iqs} \hat{\lambda}_{dr}) dt \quad (6)$$

여기서, $e_{ids} = i_{ds} - \hat{i}_{ds}$, $e_{iqs} = i_{qs} - \hat{i}_{qs}$

이상의 관측기(observer) 관계식을 고려한 전체 제어시스템의 블록도는 그림 8과 같다. 이 그림 구성은 속도제어기, 토크 및 자속 비교기, 개선된 전압선택 알고리즘, 적응 관측기(adaptive observer), 3레벨 인버터 및 전동기로 되어 있다. 적응 관측기(adaptive observer)에서는 전동기의 고정자 저항을 온라인 추정(on-line estimation)하도록 하고 있다. 고정자 저항은 직접토크제어 방법에서 가장 제어성능에 영향을 미치는 시스템 파라미터인 것으로 알려져 있다. 다음 식은 고정자 저항의 추정과 관련된 식이다.

$$\frac{d}{dt} \hat{R}_s = -\lambda_1 (e_{ids} \hat{i}_{ds} + e_{iqs} \hat{i}_{qs}) \quad (7)$$

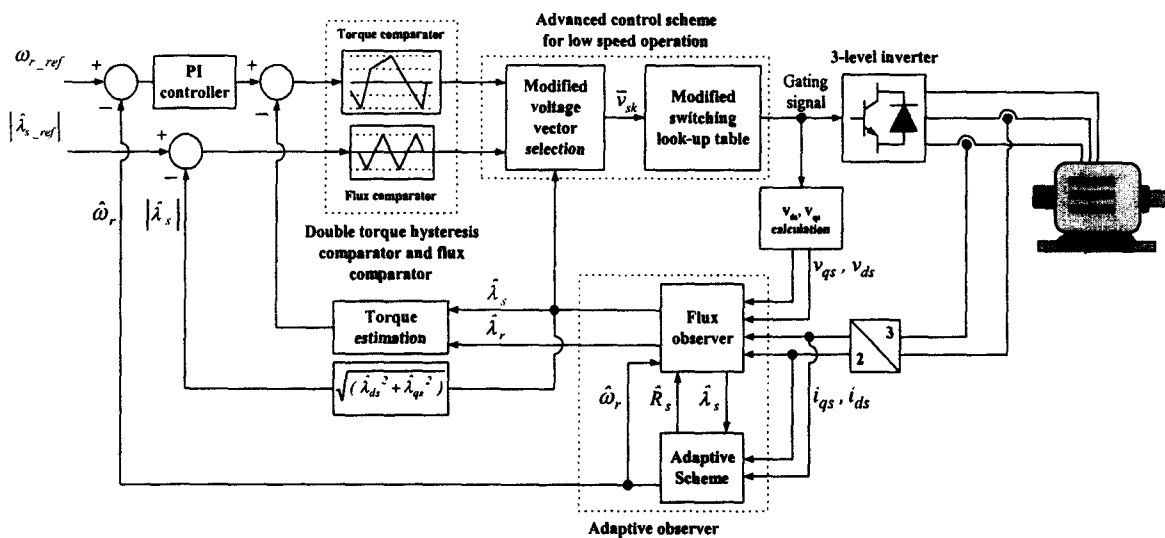
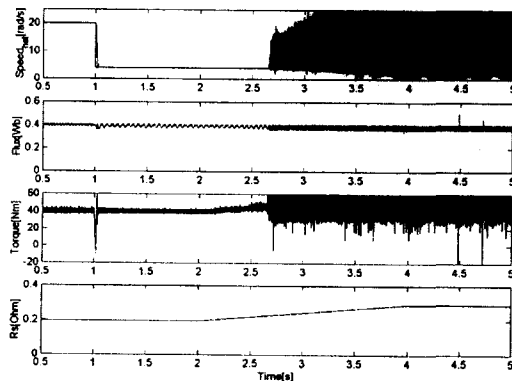


그림 8 전체 제어 블록도

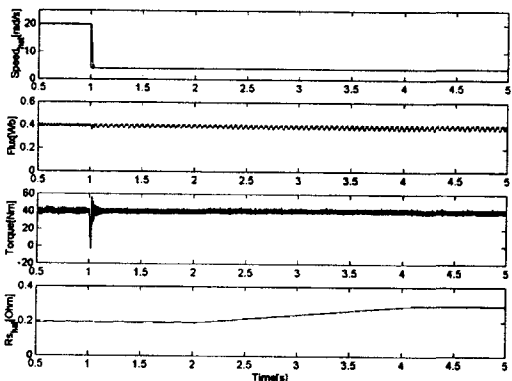
Fig. 8 Schematic diagram of the proposed control strategy

5. 시뮬레이션 및 실험

제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 본 논문에서는 주로 저속도 특성에 초점을 맞추고 있다. 시뮬레이션과 실험에는 정격용량 7.4kW, 정격속도 1740rpm, 정격전류 29.4A, 정격부하 40Nm, 선간전압 220V의 4극 유도전동기를 사용하였다.



(a) 고정자 저항을 추정하지 않을 경우
(a) Without stator resistance estimation



(b) 고정자 저항을 추정할 경우
(b) With stator resistance estimation

그림 9 고정자 저항 변화에 따른 응답특성 (정격부하)
Fig. 9 Responses against stator resistance change (rated load condition)

그림 9는 정격부하 인가시에 고정자 저항 추정을 하지 않은 관측기를 이용한 직접토크제어와 고정자 저항 추정을 하는 관측기를 이용한 직접토크제어의 저속도 성능을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 각각 고정자 저항이 150%정도 증가 변화하였을 때의 전동기 속도, 고정자 자속, 토크 등의 응답특성을 나타내고 있다. 그림 9의 (a)의 결과로부터 저속도 영역의 직접토크제어에서는 고정자 저항의 변동에 따라서 제어능력이 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있고, 고정자

저항에 민감한 직접토크제어 알고리즘의 보완을 위해서 고정자 저항을 추정하는 관측기를 이용한 직접토크제어에서는 장인한 제어성능을 보여주고 있다. 제어 알고리즘의 직접토크제어 부분은 90μs의 샘플링 주기를 가지고, 적응 관측기 (adaptive observer) 부분은 30μs의 샘플링 주기를 가지고 수행되었다.

그림 10은 실험 장치의 구성도를 보여주고 있다. 제어기는 TMS320C40을 탑재한 DS1003 주 제어기 보드(main controller board), DS4001 I/O board, DS2001 A/D board로 구성되어 있다. 제어 알고리즘의 샘플링 주기는 90μs이고, 적응 관측기(adaptive observer)의 샘플링 주기는 30μs이다. 이중 히스테리시스 토크 비교기에서 상위밴드는 정격 토크의 10%, 하위밴드는 상위밴드의 40%로 정하여, 스위칭 주파수가 0.5kHz-0.8kHz를 유지하도록 하였다.

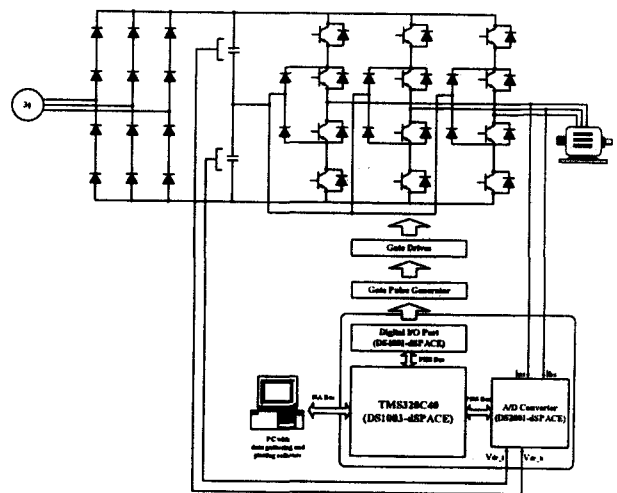


그림 10 실험장치 구성
Fig. 10 Experimental set-up

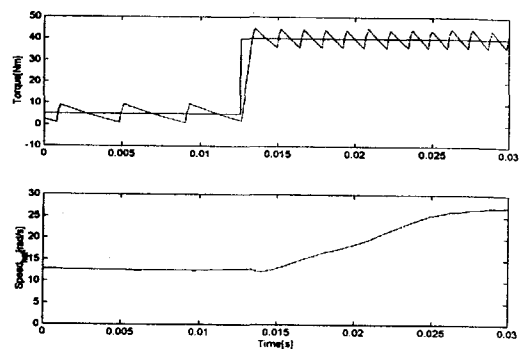


그림 11 토크 계단응답 특성
Fig. 11 Torque step responses

그림 11은 토크의 계단응답(step response)의 실험결과를 보여주고 있다. 이 결과로부터 토크의 계단응답(step response)은 대략 1ms임을 알 수 있고, 앞서 제안하였던 3 레벨 인버터 구동을 위한 토크 패턴을 실험 파형을 통해 확

인할 수 있다. 그림 12는 정역운전 특성을 보여주고 있고, 그림 13은 전동기 속도, 고정자 자속, 전동기 토크 등의 응답특성을 보여주고 있다. 그림 14는 고정자 저항의 온라인 추정(on-line estimation) 성능을 보여주고 있다. 이상의 실험 결과는 앞서 기술한 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 성능을 보여주고 있다고 말할 수 있다.

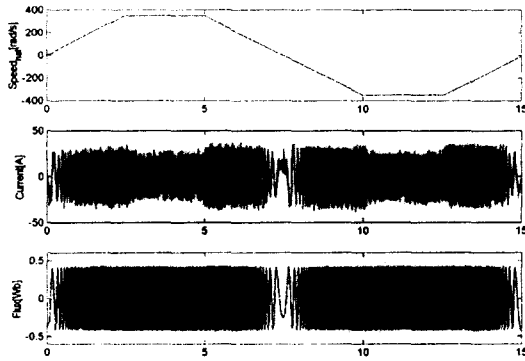


그림 12 정역운전 특성
Fig. 12 Forward/reverse operation

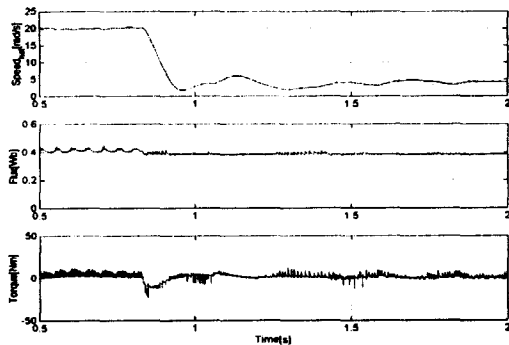


그림 13 제어특성 실험결과
Fig. 13 Experimental system responses

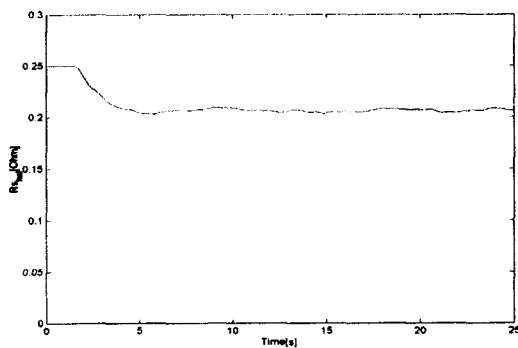


그림 14 고정자 저항 추정
Fig. 14 Stator resistance estimation

6. 결 론

인버터의 스위칭 주파수가 낮은 대용량 3레벨 인버터 응용을 위하여 저속도 운전특성을 개선시킨 새로운 3레벨 인버터구동 직접토크제어 방식을 제안하였다. 저속도 운전 시 나타나는 고정자 자속의 강하 문제와 토크제어의 난조 문제를 해결할 수 있는 방법으로서, 3레벨 인버터에서의 중간 전압벡터를 이용하는 알고리즘을 제시하였다. 또한 적응 관측기(adaptive observer)를 채택하여 저속도에서의 속도 및 토크 제어 특성을 더욱 향상시켰다. 본 논문에서는 10kW급의 실험실 모델을 대상으로 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 향후, 제시한 알고리즘을 수 MW급 3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기의 직접토크제어 시스템에의 응용을 집중 연구할 것이다.

감사의 글

본 연구는 현대중공업(주)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [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*, pp. T50-T64, 1998.
- [2] James N. Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control without an Encoder," *IEEE Trans. Indus. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 333-341, March/April, 1997.
- [3] P. Vas, W. Drury, and A. F. Stronach, "Present and Future of Drives, Sensorless and Artificial Intelligence Application," *EPE'97*, pp. 4.573-4.578, 1997.
- [4] F. Busschots, B. Renier, and R. Belmans, "Direct Torque Control: Application to Crane Drives," *EPE'97*, pp. 4.579-4.584, 1997.
- [5] Sohail Malik, and Dieter Kluge, "ACS 1000-world's first standard AC drive for medium-voltage application," *ABB Review*, pp. 4-11, 1998.
- [6] P. K. Steimer, J. K. Steinke, and H. E. Gruning, "A reliable interface-friendly Medium Voltage Drive based on the robust IGCT and DTC technologies," *IAS'99*, pp. 1505-1512, 1999.
- [7] CG Mei, SK Panda, JX Xu, and KW Lim, "Direct Torque Control of Induction Motor-Variable Switching Sectors," *PEDS'99*, pp. 80- 85, 1999.
- [8] D. Alfonso, G. Gianluca, M. Ignazio, and Perfetto Aldo, "An Improved Look-up Table for Zero Speed Control in DTC Drives," *EPE'99*, 1999.
- [9] Y. A. Chapuis, T. Kosaka, and N. Matsui, "Performance Improvement in start up Condition for DSP-Based Direct Torque Control of an Induction

Machine," *IPEC-Tokyo 2000*, pp. 1189-1194, 2000.
[10] H. Kubota, and K. Matsuse, "Speed Sensorless
Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor

Resistance Adaptation," *IEEE Trans. Indus. Appli.*,
vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, Sep./Oct.. 1994.

저 자 소 개



이 교 범 (李 敎 範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 전기전
자공학부 졸업. 1999년 동 대학교 제어계
측공학과 졸업(석사) 1999년~현재 고려대
학교 전기공학과 박사과정. 한국과학기술
연구원 학연학생.

Tel : 02-958-5748, Fax : 02-958-5749
E-mail : beum@amadeus.kist.re.kr



김 광 배 (金 光 培)

1941년 2월 15일생. 1967년 서울대 전기
공학과 졸업. 1978년 미MIT대 CAES 연
수. 1990년 서울대 대학원 제어계측공학
과 졸업(공학). 현재 한국과학기술연구원
지능제어연구센터 책임연구원. 당 학회 회장

Tel : 02-958-5751, Fax : 02-958-5749
E-mail : kbkim@amadeus.kist.re.kr



송 중 호 (宋 重 鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대 전기공
학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과
졸업(석사). 1993년 KAIST 전기 및 전자
공학과 졸업(공학). 1995~1996년 Univ. of
Wisconsin-Madison Visiting Scholar. 현
재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원.

Tel : 02-958-5756, Fax : 02-958-5749
E-mail : jhsong@amadeus.kist.re.kr



유 지 윤 (柳 志 潤)

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 전기
공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학
과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다대학
전기공학과 졸업(공학). 1987~1991년 창
원대 공대 전기공학과 조교수. 현재 고려

대 전기·전자·전파공학부 교수
Tel : 02-3290-3227, Fax : 921-0163
E-mail : jyyoo@elec.korea.ac.kr



최 익 (崔 翼)

1956년 6월 5일생. 1979년 서울대 전기공
학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과
졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과
졸업(공학). 현재 한국과학기술연구원 지
능제어연구센터 책임연구원.

Tel : 02-958-5755, Fax : 02-958-5749
E-mail : ick@amadeus.kist.re.kr