전력전자학술대회 논문집 2000. 7.19-22

3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기 직접토크제어의 낮은 스위칭 주파수에서의 토크 리플 저감법

*이교범,**송중호,**최익,*유지윤,***정명길,***한기준,***윤재학
*고려대학교,**한국과학기술연구원,***현대중공업

Torque ripple reduction in DTC of induction motor driven by 3-level inverter with low switching frequency

*K. B. Lee, **J. H. Song, **I. Choy, *J. Y. Yoo, ***M. G. Jung, ***K. J. Han, and ***J. H. Yoon
*Korea Univ., **KIST, ***Hyundai Heavy Ind.

ABSTRACT

This paper presents a torque ripple reduction technique of direct torque control(DTC) for high power induction motors driven by 3-level inverters with the inverter switching frequency limited around 0.5-1kHz level. It is noted that conventional DTC algorithms to reduce torque ripple are devised for applications with relatively high switching frequency above 2-3kHz. A new DTC algorithm, especially for low switching frequency inverter system, illustrates relatively reduced torque ripple characteristics. Simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed control algorithm.

1. 서 론

2레벨 인버터로 구동되는 유도전동기의 직접토크 제어방식에 대해서는 많은 제어 알고리즘[1,2]이 연구 발표되었지만, 3레벨 시스템에 대해서는 그 연구결과가 거의 없는 실정이다. 특히 3레벨의 대용량 시스템에서는 스위칭 소자의 냉각문제로 인해 스위칭 주파수가 1kHz이하로 제한되기 때문에, 기존의 직접토크제어 기법의 스위칭 주파수를 1kHz 이하로 유지하기 위해 히스테리시스 밴드 폭을 크게 하면, 그에 따라 큰 토크리플이 발생하게 되어 소음 및 진동의 문제를 일으키게 된다. 지금까지 발표된 토크리플 저감기법[3,4]은 스위칭 주파수를 2-3kHz이상 유지하는 2레벨의 중,소용량 인버터 시스템에 적합한 알고리즘으로 스위칭 주파수의 제약조건이 있는 대용량 시스템에서는 적합하지 않다.

본 논문은 3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기의 토크리플 저감에 초점을 맞추고 있다. 우선 3레벨 인버터의 직접 토크 제어를 위한 토크 리플 패턴과 저속도 특성 개선을 위한 수정된 스위칭 테이블을 제안하고, 이를 이용하여 새로운 토크 리플 저감법을 제안한다.

2. 3레벨 인버터의 직접토크제어

그림1은 3레벨 인버터의 출력 전압과 기본적인 직접토크제어 기법의 스위칭 선택 방법을 나타낸다. 전전압벡터와 반접압벡터를 히스테리시스 밴드에 의해서 각각 선택하는 2중 토크 히스테리시스 밴드 방법이 그림2에 나타나있다. 기존의 직접토크제어 기법의 스위칭 테이블을 2중 히스테리시스 밴드로 확장하면 표1과 같이 정리할 수 있다.

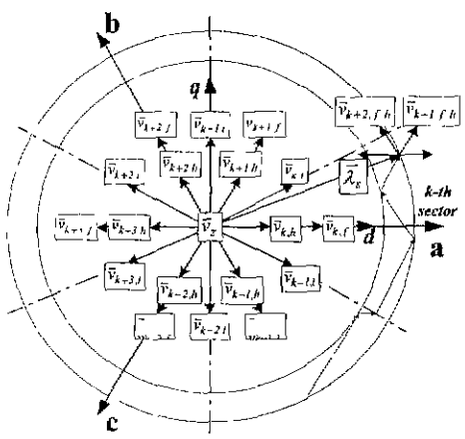


그림 1 3레벨 인버터의 출력 전압 벡터

향상된 운전 성능을 얻기 위해서는 저속도 영역에서 발생하는 고정자 자속의 강하 현상과 토크제어의 난조 문제를 해결하기 위한 새로운 스위칭 전압 선택 방법을 강구할 필요가 있다.

다음 그림3은 그림1의 전압 벡터도를 12섹터로 균등분할 한 것 중에서 그 일부인 k번째 섹터를 보여주고 있다. 고정자 자속이 반시계 방향으로 회

전한다고 가정할 때, 음영 처리된 하위 서브섹터에 고정자 자속이 위치하는 경우, 표1에서 선정된 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,f}$는 고정자 자속을 증가시키는 성분이 매우 미약하다. 따라서, 전압벡터 $\bar{v}_{k+1,f}$ 대신에 중간전압벡터 $\bar{v}_{k,i}$을 인가하면 이 전압벡터는 고정자 자속을 증가시킬 수 있다. 이러한 전압벡터 선택을 정리하면 다음 표2와 같다.

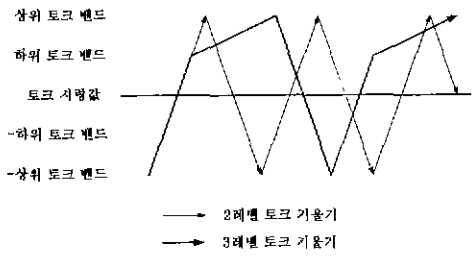


그림 2 토크제어 방법

표 1 스위칭 테이블

$\bar{\lambda}_s$ in sector k		토크		
		↑	⇑	↓
자속	↑	$\bar{v}_{k+1,h}$	$\bar{v}_{k+1,f}$	$\bar{v}_z$
	↓	$\bar{v}_{k+2,h}$	$\bar{v}_{k+2,f}$	$\bar{v}_z$

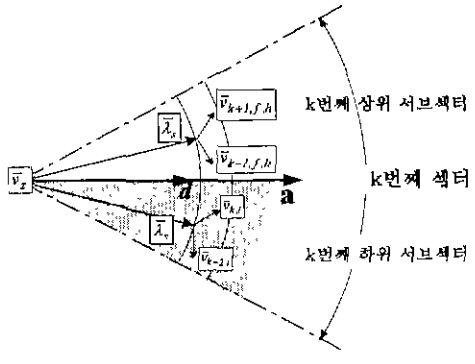


그림 3 저속도 특성을 개선한 전압선정

표 2 수정된 스위칭 테이블

$\bar{\lambda}_s$ in sector k		토크			
		↑	⇑	⇓	↓
자속	↑	$\bar{v}_{k+1,h}$	$\bar{v}_{k+1,f}$	$\bar{v}_{k-1,f}$	$\bar{v}_{k+1,h}$
	↓	$\bar{v}_{k,i}$		$\bar{v}_{k-2,i}$	

3. 토크리플 저감법

3.1 유도전동기 수식

유도전동기의 수식을 고정자와 회전자 자속을 상태로 하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \\ \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma\tau_s} & \frac{L_m}{\sigma\tau_s L_r} \\ \frac{L_m}{\sigma L_s\tau_s} & j\omega_m - \frac{1}{\sigma\tau_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_s \\ \bar{\lambda}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{v}_s \quad (1)$$

여기서, $\tau_r = L_r/r_r$, $\tau_s = L_s/r_s$, $\sigma = 1 - L_m^2/L_sL_r$

토크를 고정자와 회전자 자속으로 표현하면 다음 식(2)와 같다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} Im[\bar{\lambda}_s \cdot \bar{\lambda}_r^*] \quad (2)$$

여기서, P는 전동기 극의 갯수

식(1)의 전동기 수식을 이산화하면 다음과 같다.

$$\bar{\lambda}_{sk+1} = \bar{\lambda}_{sk} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s}\bar{\lambda}_{sk} + \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r}\bar{\lambda}_{rk} + \bar{v}_{sk}\right)t_{sp} \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{rk+1} = \bar{\lambda}_{rk} + \left(-\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r}\bar{\lambda}_{sk} + \left(j\omega_m - \frac{R_r}{\sigma L_r}\right)\bar{\lambda}_{rk}\right)t_{sp} \quad (4)$$

3.2 토크 곡선 계산

식(2), (3), (4)를 이용하여 $k+1$번째 주기의 토크를 기울기의 증가, 감소에 따라 나누어 표현하면 식(5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{{}^{+}\Delta T_{ek+1}}{t_{sp}} = -T_{ek}\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) + \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \cdot Im\{[\bar{v}_{sk} \cdot \bar{\lambda}_{rk}] - j\omega_m[\bar{\lambda}_{sk} \cdot \bar{\lambda}_{rk}]\} \quad (5)$$

$$\frac{{}^{-}\Delta T_{ek+1}}{t_{sp}} = -T_{ek}\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) - \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \cdot Im\{j\omega_m[\bar{\lambda}_{sk} \cdot \bar{\lambda}_{rk}]\} \quad (6)$$

s_1, s_2는 식(5)에서 전전압벡터와 반전압벡터가 각각 인가되었을 때의 토크 기울기를 나타내고, s_3는 식(6)에서 영전압벡터가 인가되었을 때의 토크 기울기를 나타낸다. 식(5),(6)로부터 토크 기울기는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$s_1 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} + \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} \cdot \{-v_{ds}\lambda_{qs} + v_{qs}\lambda_{ds} - \omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr})\} \quad (7)$$

$$s_2 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} + \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r} \cdot \left\{-\frac{1}{2}(v_{ds}\lambda_{qs} - v_{qs}\lambda_{ds}) - \omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr})\right\} \quad (8)$$

$$s_3 = -\frac{T_e}{\sigma\tau_s} - \frac{3PL_m}{4\sigma L_s L_r}\omega_m(\lambda_{ds}\lambda_{dr} + \lambda_{qs}\lambda_{qr}) \quad (9)$$

여기서, $\sigma\tau_s = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}\right)^{-1}$

토크 기울기 s_1, s_2, s_3 가 한 스위칭 주기 내에서 일정하다고 가정하면 토크 기울기는 그림4와 같이

정의할 수 있다. 전전압벡터, 반전압벡터, 영전압벡터가 한 스위칭 주기 내에 순서적으로 인가된다. 이러한 토크 기울기 곡선에서 전압벡터가 바뀌는 시점, t_{s1}, t_{s2}를 토크 리플이 최소화가 되도록 결정해 줄 수 있다.

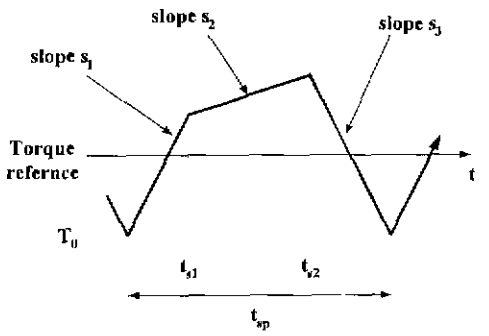


그림 4 토크 기울기

3.3 토크리플 저감법

앞서 구한 토크 기울기의 값을 이용하여 스위칭 주기 t_{sp}동안 토크리플 제곱값은 다음과 같이 구한다.

$$
\begin{aligned}
T_{e.ripp}{}^2 &= \frac{1}{t_{sp}} \int_0^{t_{s1}} (s_1 t + T_o - T_{e.ref})^2 dt \\
&+ \frac{1}{t_{sp}} \int_{t_{s1}}^{t_{s2}} (s_2 t - s_2 t_{s1} + s_1 t_{s1} + T_o - T_{e\ ref})^2 dt \\
&+ \frac{1}{t_{sp}} \int_{t_{s2}}^{t_{sp}} (s_3 t - s_3 t_{s2} + s_2 t_{s2} - s_2 t_{s1} + s_1 t_{s1} \\
&\qquad + T_o - T_{e.ref})^2 dt
\end{aligned}
\tag{10}
$$

위의 식(10)의 $T_{e.ripp}{}^2$ 의 t_{s1}, t_{s2}에 대한 편미분을 통해서 토크리플이 최소화되는 스위칭 시점을 결정할 수 있다. 식(11)을 계산하여 스위칭 시점의 후보값을 식(12)와 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$
\frac{\partial\, t_{e.ripp}{}^2}{\partial\, t_{s1}} = 0\,, \quad \frac{\partial\, t_{e\ ripp}{}^2}{\partial\, t_{s2}} = 0 \tag{11}
$$

$$
t_{s1} = \frac{1}{2(2s_1 - s_2)} \left(L_0 \pm \sqrt{L_2} \right) \tag{12}
$$

$$
t_{s2} = \frac{2(T_{e\ ref} - T_0) - 2(s_1 + s_2)t_{s1} - s_3 t_{sp}}{2s_2 - s_3} \quad or \quad t_{sp} \tag{13}
$$

여기서,

$$
\begin{aligned}
L_0 &= 2\{(T_{e.ref} - T_0) + 2(s_1 - s{-}2)t_{sp}\} \\
L_1 &= s_2 t_{s2}^2 - s_3 t_{s2}^2 - s\, T_0 t_{sp} + 2\, T_{e.ref} t_{sp} - 2 s_2 t_{s2} t_{sp} \\
&\quad - 2 s_3 t_{s2} t_{sp} - s_3 t_{sp}^3 \\
L_2 &= L_0^2 - 4(2s_1 - s_2) L_1
\end{aligned}
$$

각각의 토크 기울기의 값이 그림5의 시뮬레이션 결과와 같이 속도의 변화에 따라 변한다. 그러므로 최종적으로 식(12),(13)의 스위칭 시점의 후보값에서 식(10)의 2차 편미분값의 부호를 확인하고, 스위칭 시점의 후보값에서와 한 스위칭 주기의 구간 끝값인 0일때의 값과 t_{sp}일때의 값의 크기를 비교하는 다소 복잡한 과정을 통해 최적의 스위칭 시점을 결정한다.

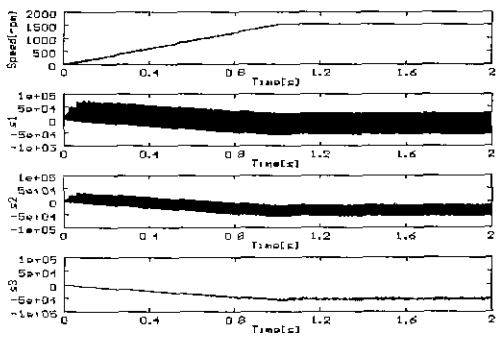


그림 5 속도변화에 따른 토크 기울기

그림5의 시뮬레이션 결과를 보면 토크 리플이 그림 6과 같이 기울기 s_1, s_2는 완만해지고, 기울기 s_3는 급격해짐을 알 수 있다. 그림7은 저속 영역과 고속 영역에서, 제안한 알고리즘을 통해 구한 토크 리플이 최소화되는 스위칭 시점이다.

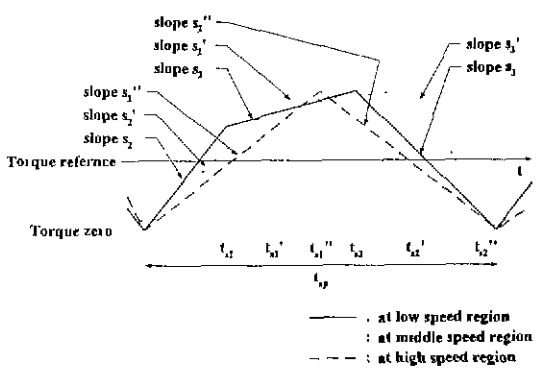
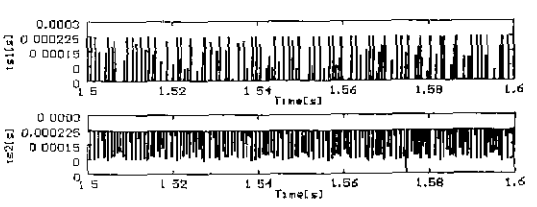
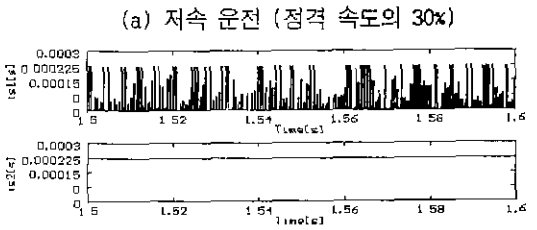


그림 6 속도변화에 따른 토크리플 패턴의 변화



(a) 저속 운전 (정격 속도의 30%)



(b) 고속 영역 (정격 속도 운전)

그림 7 스위칭 시점: t_{s1}, t_{s2}

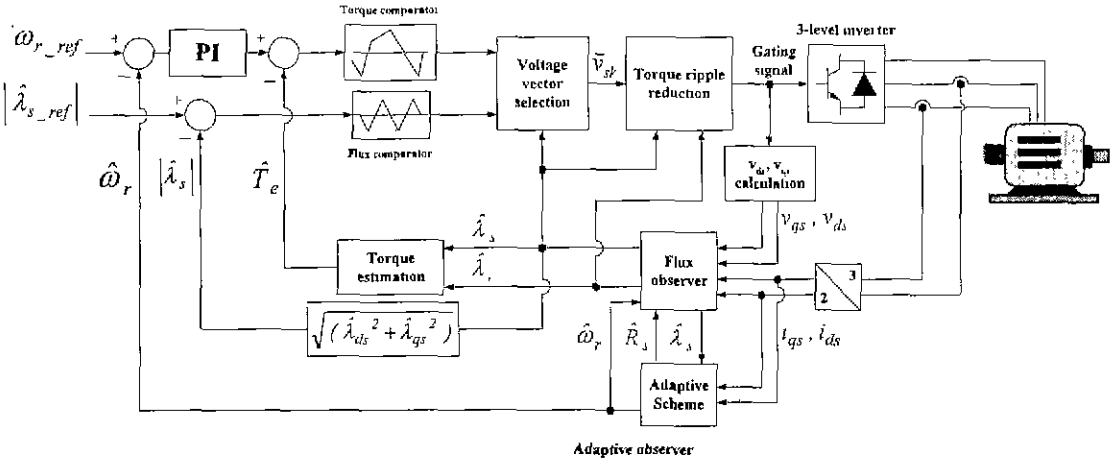
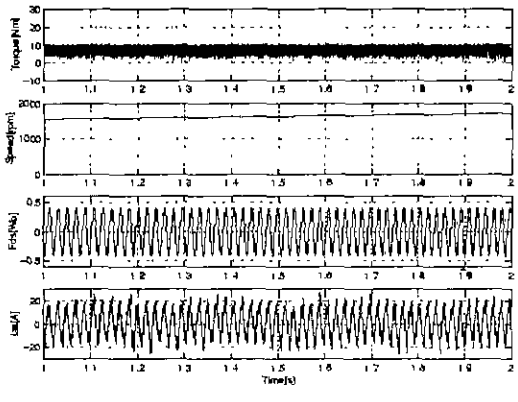


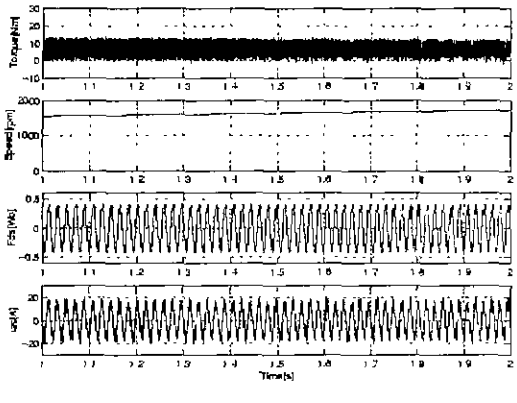
그림 8 제안된 제어기법의 전체 블록도

4. 실험 결과

그림9는 그림8의 제안된 제어기법의 토크 응답 특성을 나타낸다. 토크리플의 현격한 감소효과를 볼 수 있다.



(a) 제안된 알고리즘



(b) 기존의 알고리즘

그림 9 토크, 속도 추정값, d축 자속, 상전류 (정격 운전)

5. 결론

본 논문에서는 대용량 3레벨 인버터로 구동되는 유도전동기 직접토크 제어의 토크 리플 패턴과 저속 영역의 응답 특성 향상을 위한 수정된 스위칭 테이블을 제안하였다. 제안한 토크 리플 패턴과 수정된 스위칭 테이블을 이용하여 새로운 토크 리플 저감법을 제안한다. 제안된 토크리플 저감법은 0.5 -1.2kHz의 스위칭 주파수에서 기존의 직접 토크 제어에 비해 만족할만한 토크 리플 저감 효과를 나타낸다.

참 고 문 헌

[1] M. Bertoluzzo, G. Buja, and R. Menis, "Analytical Formulation of the Direct Control of an Induction Motor Drives," *ISIE'99* Tutorial, pp. PS14-PS20, 1999.

[2] James N. Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control without and Endoder," *IEEE Trans. Indus. Appli.*, vol. 33, no. 2, pp. 333-341, March/April, 1997.

[3] E. Flach, "Design of a Kalman Filter for Direct Mean Torque Control," *EPE'99*, 1999.

[4] Jun-Koo Kang, and Seung-Ki Sul, "New Direct Torque Control of Induction Motor for Minimum Torque Ripple and Constant Switching Frequency," *IEEE Trans. Indus. Appli. vol.* 35, no. 5, pp. 1076-1082, Sep/Oct., 1999.

[5] 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.