

PWM 인버터의 스위칭 지연시간에 따른 유도전동기의 불안정현상 해석

(The Analysis for the Induction Motor
Instability Caused by PWM Inverter Dead Time)

白壽鉉* · 金 龍**

(Soo-Hyun Baek · Yong Kim)

요 약

본 연구에서는 Colby등이 제안한 PWM 인버터의 등가회로를 이용하여 PWM 인버터의 스위칭 지연시간이 유도전동기 구동시스템의 불안정현상에 미치는 영향을 다루었다.

Colby등이 제안한 등가회로는 유도전동기 구동시스템의 불안정현상의 해석에 매우 효과적이었으며, PWM 인버터의 스위칭 지연시간은 유도전동기 구동시스템의 1차측 저항의 증가에 영향을 미치게 되지만 유도전동기의 안정운전이 이루어지는 주파수영역에서는 스위칭 지연시간의 대소가 유도전동기의 안정운전에 큰 영향을 미치지 못함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we study the influence of PWM Inverter dead time on the Instability of Induction Motors using equivalent PWM Inverter model introduced by Roy S. Colby.

We know that the model is effective for the analysis of I. M system instability, and dead time influence on increasing the primary resistance of I. M in the stable frequency region, does not affect the stable driving I. M by means of computer simulation.

1. 서 론

유도전동기는 직류전동기에 비해 많은 장점을 지니고 있으나 제어성능이 뒤지는 단점으로 인하여 정속도를 요구하는 분야에 주로 이용되어 왔다.

그러나 최근 유도전동기에 대한 우수한 제어이

론의 확립^{1), 2)}과 제어장치의 개발에 힘입어 유도전동기를 서보전동기로 사용하는 등 그 응용범위가 확산되는 추세에 있다. 현재 유도전동기의 가변속구동을 위해 PWM 인버터가 제어장치로 널리 이용되고 있는데 PWM 인버터의 경우 PWM 스위칭시 직류전원의 단락방지를 위해 스위칭 지연시간이 반드시 필요하게 된다. PWM

*正會員：東國大 電氣工學科 教授

**正會員：大林專門大學 制御計測科 助教授

接受日字：1993年8月24日

인버터에 있어서 스위칭 지연시간은 인버터의 출력파형을 왜곡시키는 원인으로 되며 그 결과 PWM 인버터와 정현적인 3상 전원사이에는 차이가 발생하게 된다. 또한 스위칭 지연시간동안 유도전동기는 회생동작을 하게 됨에 따라 유도전동기에는 진동이 발생된다. 이러한 현상은 유도전동기가 저속, 경부하로 운전되는 경우 더욱 현저한데 이를 유도전동기의 불안정현상이라 한다.³⁾

그러므로 PWM 인버터의 스위칭 지연시간은 유도전동기가 불안정현상을 일으키게 되는 원인 중의 하나가 되며, 이에 대해 많은 연구결과가 보고되어 있다.^{4), 5)}

한편 스위칭 지연시간이 유도전동기의 불안정 현상에 미치는 영향을 해석하기 위해 다양한 형태의 PWM 인버터 모델이 제안되었으나 Colby^[5] 등이 제안한 모델은 매우 간단하고, 정밀한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Colby등이 제안한 모델을 이용하여 유도전동기 구동시스템을 상태모델로 표현하며 이 모델에 대해 불안정영역과 안정영역에서의 토크 응답특성을 비교함으로써 유도전동기 구동시스템의 불안정현상에 대한 스위칭 지연시간의 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

2. 유도전동기의 구동시스템

그림 1은 PWM 인버터의 주회로 구성을 나타낸다. 유도전동기의 운전에서 가장 바람직한 전류의 파형은 정현파인 경우로 이 때 에너지의 효율은 최대가 되며 전동기의 소음도 최소화된다. 그러나 스위칭소자를 이용한 인버터로 정현파 전류를 전동기에 공급한다는 것은 불가능하므로 순변환기의 직류전압을 고정하고 역변환기의 출력전압을 여러 개의 펄스로 구성하여 각각의 펄스폭을 변조제어하는 PWM 방식을 이용하여 출력파형을 정현파에 근사하게 하는 방식이 주로 이용되고 있다.

2.1 PWM 인버터의 스위칭 지연시간

그림 1에서 인버터 각 상의 트랜지스터는 직류

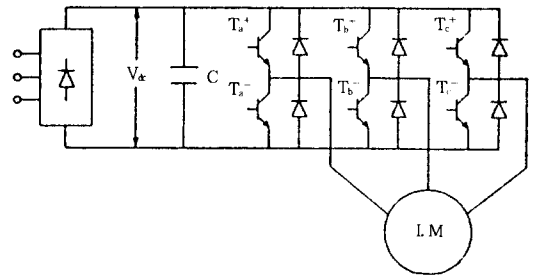


그림 1. PWM 인버터의 주회로 구성
Fig. 1. The PWM inverter - induction motor system

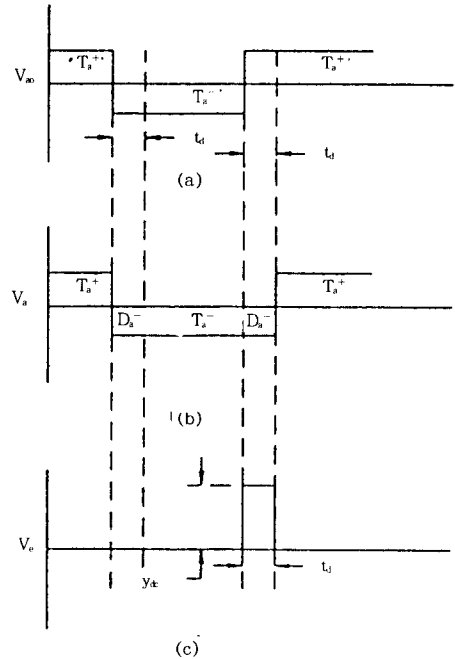


그림 2. 인버터의 지연시간과 오차전압
Fig. 2. The dead time and error voltage of inverter

전원의 단락방지를 위해 on 상태가 되는 것을 피할 수 있도록 지연시간을 두며, 이 시간동안 인버터의 출력전압은 스위칭신호가 아닌 부하전류의 극성에 의해 제어된다.

그림 2는 인버터 출력에 대한 스위칭 지연시간과 그로 인한 오차전압을 나타낸다. 그림 2(a)는 스위칭 지연시간이 0인 이상적인 경우의 1상에

대한 출력전압의 파형을 나타내며, 그림 2(b)는 실질적인 출력전압의 파형을 나타낸다. 그림 2(c)는 실질적인 전압 V_a 와 이상적인 전압 V_{a0} 사이의 차 V_e 를 나타낸다. 여기서 오차전압 V_e 의 폭은 지연시간 t_d 와 같으며, 진폭은 직류전원 V_d 와 같다. 또한 극성은 부하전류의 극성과 같다. 일반적으로 PWM 스위칭 주파수는 구동시스템의 동작 주파수에 비해 높게 설계된다. 그러므로 여러 스위칭주기에 걸쳐 오차전압의 크기를 평균함으로써 오차전압의 효과를 산정할 수 있게 된다.

그림 3은 인버터 출력의 한 주기에 대한 오차전압을 나타낸 것이다. 한 주기에 대한 오차전압의 평균치 ΔV_e 는 직류전원전압 V_{d0} , 지연시간 t_d , 스위칭 주파수 f_c 의 함수로 되며 식 (1)로 표현된다.

$$\Delta V_e = f_c V_{d0} t_d \quad (1)$$

식 (1)로부터 스위칭 지연시간에 의해 발생하는 오차전압은 유도전동기가 경부하로 운전될 때 불안정현상의 원인이 됨을 알 수 있다.

2.2 인버터의 등가회로 모델

일반적으로 PWM 인버터는 정현파인 기준신호와 높은 주파수의 삼각파를 비교하는 방식에 의해 스위칭신호를 발생한다. 지연시간이 0인 경

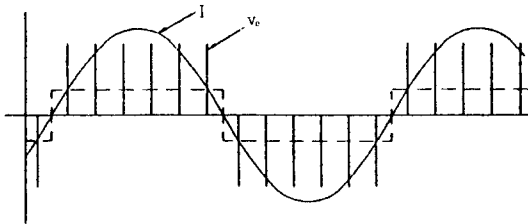


그림 3. 인버터 출력의 한 주기에 대한 오차전압
Fig. 3. The error voltage during one cycle of inverter output

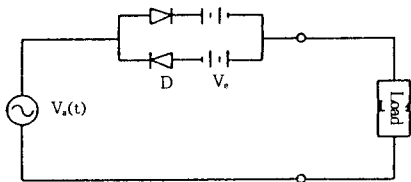


그림 4. 지연시간을 포함한 1상당 PWM 인버터 등가회로
Fig. 4. The equivalent circuit for one phase PWM inverter including dead time

우 PWM 스위칭신호의 여러 주기에 대한 인버터 출력전압의 평균치는 기준 신호에 비례하게 된다. 기준신호 $r_a(t)$ 와 1상에 대한 인버터 출력전압의 평균치 $V_a(t)$ 는 식 (2), (3)으로 표현된다.

$$r_a(t) = M \sin(\omega_a t), \quad 0 < M < 1 \quad (2)$$

$$V_a(t) = \frac{V_{d0}}{2} M \sin(\omega_a t) \quad (3)$$

여기서 M 은 변조지수이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 스위칭 지연시간은 구형파의 오차전압으로, 인버터의 평균전압에 포함된다. 또한 다이오드와 직류전압 (ΔV_e)는 부하전류의 극성에 대한 직류 오프·셋 전압을 나타낸다. 그림 4는 Colby등이 제안한 1상당 인버터 모델을 나타낸다.

3. 유도전동기 구동시스템의 선형화 상태모델

그림 5는 Colby등이 제안한 인버터의 등가회로와 유도전동기를 결합한 구동시스템을 나타낸다.

그림 5에서 유도전동기는 파라미터의 비선형성으로 인하여 비선형성이 매우 강한 기기이므로, 유도전동기의 동특성이나 안정도를 해석할 경우 정상상태 동작점 주위에서 선형화한 선형방정식이 주로 이용된다. 또한 해석의 편의를 위해 dq

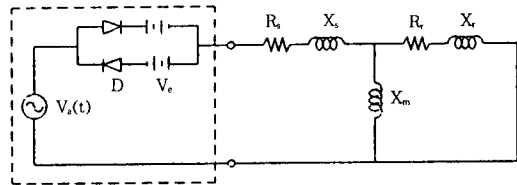


그림 5. 유도전동기 구동시스템의 1상당 등가회로
Fig. 5. The equivalent circuit for one phase driven system

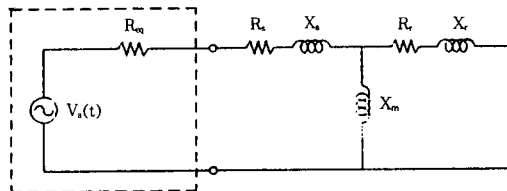


그림 6. 유도전동기 구동시스템에 대한 선형 등가회로
Fig. 6. The linearized equivalent circuit for driven system

축 변환을 이용하여 3상 유도전동기를 2상 유도전동기로 보고 해석하는 경우가 대부분이다. Colby등은 식 (4)로 표현된 등가전원저항 R_{eq} 의 개념을 도입하여 그림 6과 같은 인버터의 선형 등가회로를 도출하였다.

$$R_{eq} = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta V_{cs}}{I_1} = \frac{4}{\pi} \frac{f_{ctd} V_{dc}}{I_1} \quad (4)$$

여기서 I_1 은 부하전류 피크치의 기본과분 따라서 그림 6의 선형 등가회로는 동기 회전좌표계를 이용하여 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{qs} \\ \Delta V_{ds} \\ 0 \\ 0 \\ \Delta T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_{eq} + (p/\omega_b)X_s & f_r X_s \\ -f_r X_s & R_s + R_{eq} + (p/\omega_b)X_s \\ (p/\omega_b)X_m & sf_r X_m \\ -sf_r X_m & (p/\omega_b)X_m \\ X_{mkr} & -X_{mkr} \\ (p/\omega_b)X_n & f_r X_m \\ -f_r X_s & (p/\omega_b)X_m \\ R_s + (p/\omega_b)X_r & sf_r X_m \\ -sf_r X_r & R_r + (p/\omega_b)X_r \\ -X_{mks} & X_{mqs} \\ 0 \\ 0 \\ -(X_{mks} + X_{rkr}) \\ (X_{mqs} + X_{rkr}) \\ -2HP \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qs} \\ \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{qr} \\ \Delta i_{dr} \\ \frac{\Delta \omega_r}{\omega_b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

$p = d/dt$: 미분 연산자, s : 슬립, f_r : 주파수비 (ω_e/ω_b)

ω_b : 기준 각주파수, ω_e : 전원 각주파수, ω_r : 회전 각속도

ΔV_{qs} , ΔV_{ds} : 1차측 전압의 q축, d축 성분의 미소 변동분

Δi_{qs} , Δi_{ds} : 1차측 전류의 q축, d축 성분의 미소 변동분

Δi_{qr} , Δi_{dr} : 2차측 전류의 q축, d축 성분의 미소 변동분

R_s : 2차측 저항, R_r : 2차측 저항

R_{eq} : 인버터에 대한 등가저항

X_s : 1차측 리액턴스 ($= X_{ls} + X_m$)

X_r : 2차측 리액턴스 ($= X_{lr} + X_m$)

X_m : 자화 리액턴스, X_{ls} , X_{lr} : 1, 2차측 누설리액턴스

T_1 : 부하토크, H : 관성모멘트

식 (5)에서 미분 연산자가 포함된 항을 분리하여 정리하면 식 (5)는 식 (6)의 형태로 표현될 수 있다.

$$E pX = FX + U \quad (6)$$

또한 식 (6)은 식 (7)의 선형 미분방정식 형태로 변환되는 것이 유도전동기의 해석에 편리하다.

$$pX = AX + BU(E)^{-1}FX + (E)^{-1}U \quad (7)$$

여기서,

$$A = (E)^{-1}F \quad (8)$$

$$B = (E)^{-1} \quad (9)$$

$$X = [\Delta i_{qs}, \Delta i_{ds}, \Delta i_{qr}, \Delta i_{dr}, \Delta \omega_r/\omega_b] \quad (10)$$

$$U = [\Delta V_{qs}, \Delta V_{ds}, \Delta V_{qr}, \Delta V_{dr}, \Delta T_1] \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{\omega_b} \begin{bmatrix} X_s & 0 & X_m & 0 & 0 \\ 0 & X_s & 0 & X_m & 0 \\ X_m & 0 & X_r & 0 & 0 \\ 0 & X_m & 0 & X_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2H\omega_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F = \begin{bmatrix} R_s + R_{eq} & f_r X_s & 0 & f_r X_m & 0 \\ -f_r X_s & R_s + R_{eq} & -f_r X_m & 0 & 0 \\ 0 & sf_r X_m & R_r & sf_r X_r & -(X_{mks} + X_{rkr}) \\ -sf_r X_m & 0 & -sf_r X_r & R_r & (X_{mqs} + X_{rkr}) \\ X_{mkr} & -X_{mkr} & -X_{mks} & X_{mqs} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. 유도전동기 구동시스템의 안정도 해석

식 (7)은 선형화된 벡터-행렬 미분방정식으로 X 는 선형 시스템의 상태벡터, U 는 구동함수이다.

만약 구동함수 U 가 0을 만족한다면 식 (7)은 비강제 선형 미분방정식이 되며, 해는 $X = \exp(Atk)$ 가 된다.

여기서 k 는 초기조건에 따라 결정되는 벡터이며, $\exp(Atk)$ 는 상태천이 행렬로 시스템의 비강제응답을 나타낸다. 시간이 무한대로 접근함에 따라 상태천이 행렬의 모든 요소들이 점근적으로 0에 수렴한다면 시스템의 국부적인 안정이 이루어지며, 이는 시스템의 특성 방정식의 모든 근들

이 (-)의 실수부를 갖게 됨을 의미한다. 여기서 시스템의 특성 방정식은 식(14)로 정의된다.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (14)$$

식 (14)에서 A는 시스템 행렬, I는 단위행렬, λ 는 특성방정식의 근으로 시스템의 고유치를 나타내므로, 이를 해석하여 시스템의 안정여부를 판단할 수 있게 된다.

4.1 이상적인 유도전동기 구동시스템

유도전동기는 저속운전이나 경부하 운전시 부적절하게 설정된 파라미터 혹은 인버터의 지연시간, 인버터의 직류측 필터에 포함된 고조파등이 원인이 되어 불안정현상을 일으키게 된다.

출력파형이 정현파인 이상적인 인버터의 경우 스위칭 지연시간은 존재하지 않으며, 그 결과 유도전동기 구동시스템의 불안정현상은 인버터의 스위칭 지연시간과는 무관하게 된다.

그림 7은 이상적인 인버터로 유도전동기를 $s = 0.001$ 로 운전하는 경우 불안정현상을 발생하는 주파수영역을 나타내며, 그림 8은 V-f 평면상에서 유도전동기의 불안정한 운전영역을 나타낸다.

그림 7로부터 이상적인 인버터로 구동되는 유도전동기의 경우 $f_r : 0.385 \sim 0.63$ 의 주파수 범위에서 불안정하게 됨을 알 수 있다. 또한 그림 8로

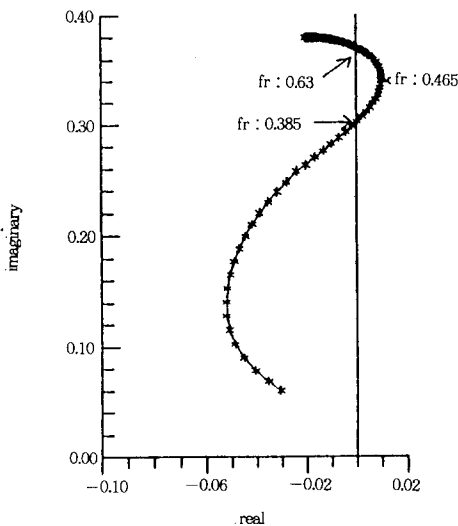


그림 7. 불안정현상을 일으키는 동작주파수 영역
Fig. 7. The operating frequency region for instability

부터 V/f운전시 유도전동기의 입력전압에 따라 불안정영역의 폭이 변화됨을 알 수 있다.

그림 9, 10, 11은 유도전동기를 무부하운전할 때 자유 가속 기간중 토크 특성곡선을 나타낸 것으로, 그림 9, 11의 경우 안정 주파수영역인 $f_r = 0.35$, $f_r = 1.0$ 으로 운전시킨 경우이며, 그림 10은 불안정 주파수영역인 $f_r = 0.46$ 으로 운전하는 경우를 나타낸다.

그림으로부터 불안정영역의 범위내에서 운전하는 경우 토크의 진폭이 상대적으로 커짐을 알 수 있다.

4.2 인버터의 스위칭 지연시간이 불안정현상에 미치는 영향

본 연구에서는 식 (5)의 시스템 행렬 A에 된 스위칭 지연시간을 변수로 시스템행렬의 고유치를 구하여 인버터의 스위칭 지연시간이 유도전동기 구동시스템의 불안정현상에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 12는 V-f 평면상에서 스위칭 지연시간이

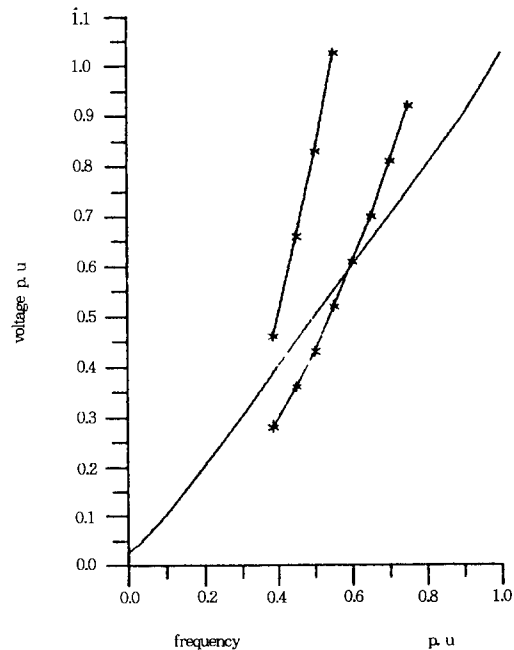


그림 8. 유도전동기의 불안정운전 영역
Fig. 8. The instability region of induction motor

15 μ s, 25 μ s, 30 μ s인 경우에 대해 V/f운전시 발생하는 불안정영역을 나타낸 것으로 15 μ s의 경우 f_r : 0.435 ~ 0.725, 25 μ s의 경우 f_r : 0.465 ~ 0.85,

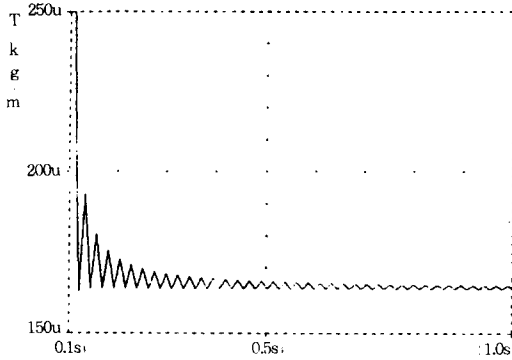


그림 9. 자유 가속 기간중 토크특성 ($f_r=0.35$)
Fig. 9. The torque characteristic during free acceleration ($f_r=0.35$)

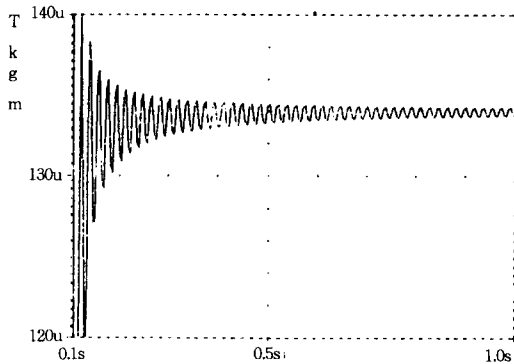


그림 10. 자유 가속 기간중 토크특성 ($f_r=0.46$)
Fig. 10. The torque characteristic during free acceleration ($f_r=0.46$)

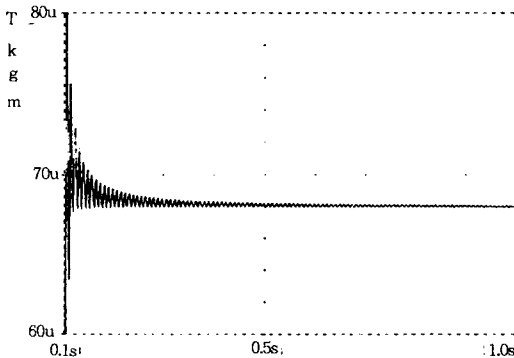


그림 11. 자유 가속 기간중 토크특성 ($f_r=1.0$)
Fig. 11. The torque characteristic during free acceleration ($f_r=1.0$)

30 μ s의 경우 f_r : 0.455~0.85범위의 주파수영역에서 불안정하게 됨을 알 수 있다. 또한 그림 13은 주파수비 $f_r=0.35$, 그림 14는 $f_r=0.46$, 그림 15는 $f_r=1.0$ 으로 운전하는 경우 토크의 응답특성을 나타낸다.

이상적인 인버터로 구동되는 경우와 마찬가지로 그림 7의 안정영역인 $f_r=0.35$, $f_r=1.0$ 로 운전하는 경우 스위칭 지연시간의 영향은 무시할 수 있는 정도이며, 불안정영역인 $f_r=0.46$ 으로 운전하는 경우 스위칭 지연시간이 증가됨에 따라 더욱 불안정하게 됨을 알 수 있다.

표 1은 본 연구에 사용된 3상 유도전동기의 정격과 파라미터를 나타낸다.

4.3 비교 및 검토

그림 9, 10, 11은 이상적인 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기의 자유 가속 기간중 토크특성을 나타낸다. 그림 9는 $V/f=0.35$, $s=0.001$, 그림 10은 $V/f=0.46$, $s=0.001$, 그림 11은 $V/f=1.0$, $s=0.001$ 로 운전하는 경우를 나타낸다.

$V/f=0.35$ 의 경우 약 $1.64 \times 10^{-4}[\text{kg} \cdot \text{m}]$, V/f

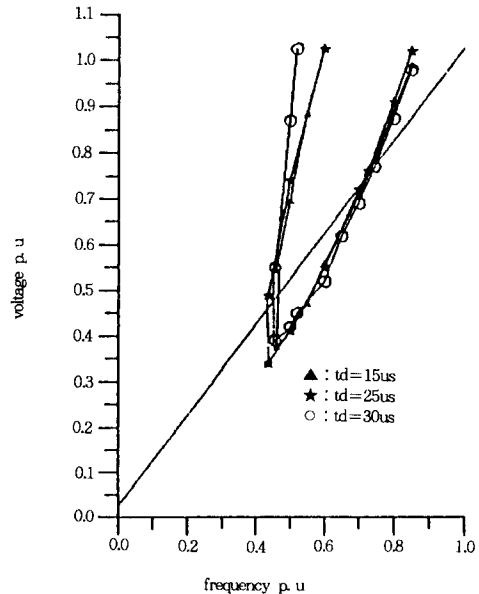
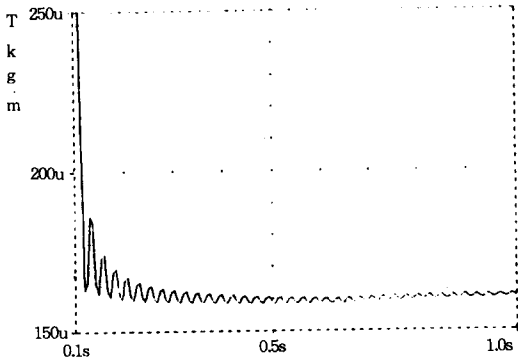


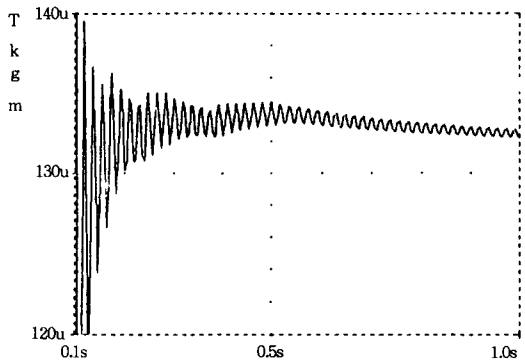
그림 12. 지연시간에 대한 유도전동기 구동시스템의 불안정영역
Fig. 12. The instability region of PWM inverter-I, M system for dead time

=0.46인 경우 약 $1.34 \times 10^{-4} [\text{kg} \cdot \text{m}]$, $V/f=1.0$ 의 경우 약 $6.85 \times 10^{-4} [\text{kg} \cdot \text{m}]$ 의 토크가 발생되

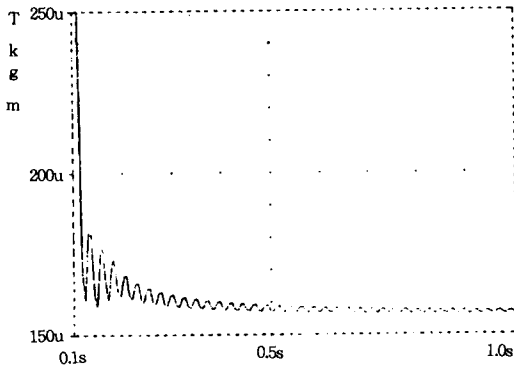
며 $V/f=0.35, 1.0$ 에 대해 0.46의 경우 진동의 폭이 크며 그 결과 유도전동기 구동시스템은 V/f



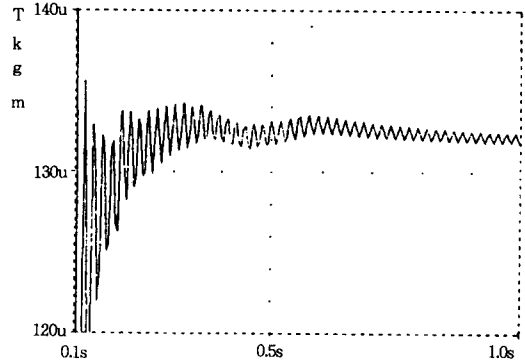
(a) $td=15\mu\text{s}$



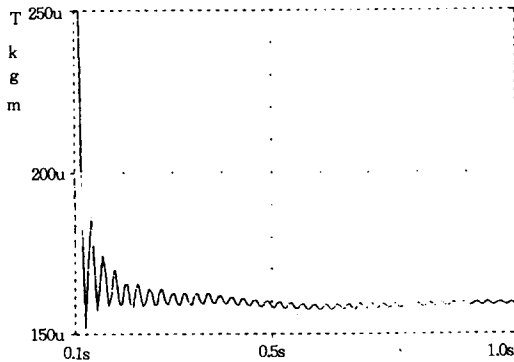
(a) $td=15\mu\text{s}$



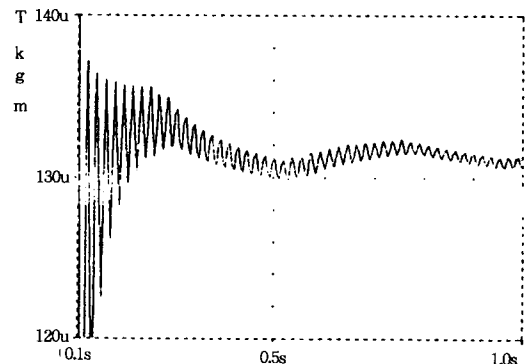
(b) $td=25\mu\text{s}$



(b) $td=25\mu\text{s}$



(c) $td=30\mu\text{s}$

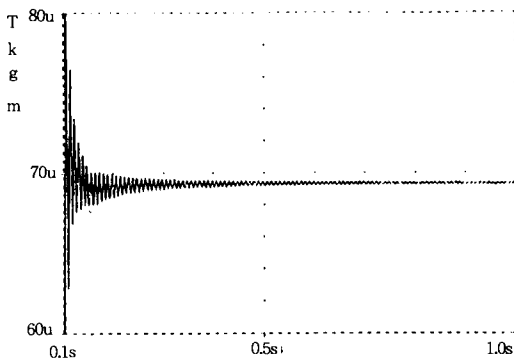


(c) $td=30\mu\text{s}$

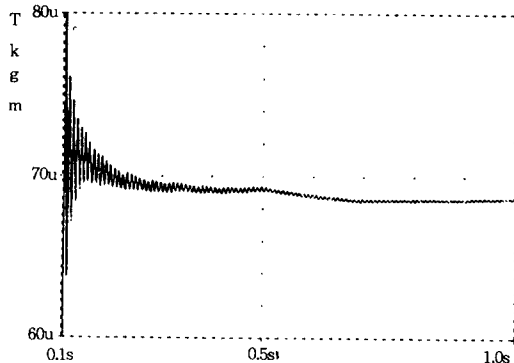
그림 13. 지연시간에 대한 자유 가속 기간중 토크특성 ($f_r=0.35$)
Fig. 13. The torque characteristic for dead time during free acceleration ($f_r=0.35$)

그림 14. 지연시간에 대한 자유 가속 기간중 토크특성 ($f_r=0.46$)
Fig. 14. The torque characteristic for dead time during free acceleration ($f_r=0.46$)

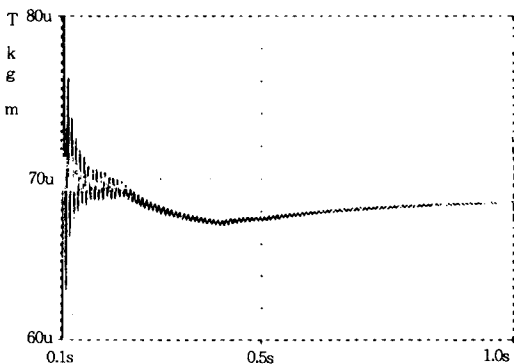
=0.35, 1.0인 경우와 비교할 때 상대적으로 불안정함을 알 수 있다.



(a) $t_d=15\mu s$



(b) $t_d=25\mu s$



(c) $t_d=30\mu s$

그림 15. 지연시간에 대한 자유 가속 기간중 토크 특성 ($f_r=1.0$)
 Fig. 15. The torque characteristic for dead time during free acceleration ($f_r=1.0$)

표 1. 3상 유도전동기의 정격 및 파라미터

Table 1. The ratings and parameters of 3-phase Induction Motor

R_s : 0.038[p.u]	R_r : 0.018[p.u]
X_{ks} : 0.148[p.u]	X_{kr} : 0.148[p.u]
X_m : 2.71[p.u]	H : 0.045[p.u]
정격 전압 : 220[V]	정격 파수 : 60[Hz]
정격 출력 : 0.75[kW]	정격 슬립 : 0.045

그림 12는 PWM 인버터의 스위칭 지연시간이 바뀌에 따라 유도전동기 구동시스템의 불안정영역이 변화되는 모습을 나타낸 것으로 스위칭 지연시간의 증가에 따라 불안정영역의 하한 주파수가 증가됨을 알 수 있다. 즉 지연시간이 15us의 경우 $f_r=0.435\sim 0.725$, 25us의 경우 $f_r=0.465\sim 0.745$, 30us의 경우 $f_r=0.47\sim 0.745$ 범위로 이동함을 알 수 있다.

그림 13, 14, 15는 스위칭 지연시간에 대한 자유 가속 기간중 토크특성을 나타낸 것으로 (a)는 스위칭 지연시간이 15us, (b)는 25us, (c)는 30us인 경우이다. 그림 13은 $f_r=0.35$ 인 경우로 스위칭 지연시간이 0인 이상적인 인버터로 구동되는 경우의 토크특성과 거의 동일하며 이는 유도전동기 구동시스템이 안정함을 의미한다.

그림 14는 $f_r=0.46$ 인 경우로 스위칭 지연시간이 증가함에 따라 토크의 진동이 커지게 되며 이는 유도전동기의 구동시스템이 스위칭 지연시간의 증가에 따라 더욱 불안정해짐을 의미한다.

그림 15는 $f_r=1.0$ 인 경우로 스위칭 지연시간의 증가는 유도전동기 구동시스템의 불안정현상에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 Colby등이 제안한 PWM 인버터의 등가회로를 이용하여 유도전동기 구동시스템을 간략하게 나타내었으며, PWM 인버터의 지연시간이 저속, 경부하로 운전되는 유도전동기 구동시스템의 안정도에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하였다.

그 결과 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- 1) 유도전동기 구동시스템의 불안정현상 해석

에 있어서 Colby등이 제안한 PWM 인버터의 등가회로는 매우 유효하였으며,

2) PWM 인버터의 스위칭 지연시간은 유도전동기 구동시스템에 있어서 1차측 저항의 크기를 증가시키는 작용을 하며, 스위칭 지연시간의 증가로 유도전동기 구동시스템은 더욱 불안정하게 된다.

3) 유도전동기의 안정운전이 이루어지는 주파수영역에서는 PWM 인버터의 스위칭 지연시간의 대소가 유도전동기의 안정운전에 큰 영향을 미치지 못한다.

앞으로 PWM 스위칭시 발생하는 고조파나 인버터 직류측에 포함된 필터등에 대해 이들이 유도전동기 구동시스템의 불안정현상에 미치는 영향까지 고려하고 이에 대해 최적 PWM 기법이나 또는 특정 고조파 제거법등을 이용한 고조파 특성의 개선이 이루어진다면 유도전동기는 보다 효율적으로 광범위하게 이용될 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) F. Blasche, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines", Siemens Rev., vol.34, pp. 217~220, 1972.
- 2) Sakae Yamamura et al., "Voltage type control of induction motor by means of field acceleration method", JIEE-B, vol.104 no.7, pp. 449~453, 1984.
- 3) Ryuzo Ueda et al., "Experimental results and their simplified analysis on instability problems in PWM inverter induction motor drives", IEEE Trans. on Ind. App., vol.25, no.1, pp. 86~95, Jan/Feb, 1989.
- 4) 村井由宏 et al., "PWM インバータで駆動される誘導電動機の安定性について", 日本電気學會論文誌 B-60, pp. 467~474, 1985.
- 5) Roy S. Colby et al., "Simplified model and corrective measures for induction motor instability caused by PWM inverter blanking time", in Conf. Rec., 1990 IEEE IAS Ann. Mtg., pp. 678~684.