

전동기의 경부하진동으로부터 자유로운 새로운 범용인버터

정 강 룰

순천향대학교 정보기술공학부

Motor Light-load Oscillation-free Novel General Inverter

Gang-Youl Jeong

Division of Information Technology, Soonchunhyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 전동기의 경부하진동으로부터 자유로운 새로운 범용인버터를 제안된다. 제안된 범용인버터의 V/f 제어 기법은 벡터방식에 근거하며 전통적인 V/f 제어 기법과는 약간 다른 방식의 제어 기법이다. 제안된 범용인버터의 V/f 제어 기법은 V/f 제어 유도전동기 드라이브 시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 다이나믹 전류보상기를 이용한다. 제안된 시스템이 이론적으로 설명되며 그 성능은 실험결과를 통하여 보인다.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ -a_{12} & a_{11} & -a_{14} & a_{13} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{31} & -a_{34} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r T_r}, \quad a_{12} = \omega_e, \quad a_{13} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r}$$

$$a_{14} = \omega_r \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}, \quad a_{31} = \frac{L_m}{T_r}, \quad a_{33} = -\frac{1}{T_r}, \quad a_{34} = \omega_{sl}$$

$$b_1 = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

L_s, L_r, L_m 고정자, 회전자, 상호 인덕턴스
 R_s, R_r 고정자, 회전자 저항
 ω_e, ω_r 고정자 전기적 각주파수, 회전자 각주파수
 ω_{sl} 슬립 각주파수 (= $\omega_e - \omega_r$)
 T_r 회전자 시정수 (= L_r/R_r)

1. 서 론

유지 및 보수가 매우 간편한 유도전동기에 대한 드라이브 기술이 최근 들어 급격히 발전함에 따라, 최근 산업계에서의 유도전동기 이용이 더욱 더 확대되어 가고 있는 실정이다. 이러한 유도전동기의 제어기법 중에서 V/f 제어 기법을 이용한 범용인버터는 벡터제어인버터의 광범위한 보급에도 불구하고 그 고유의 장점으로 인하여 여전히 유도전동기 드라이브 시스템으로 널리 이용되고 있다. 그러므로 범용인버터가 가지는 장점을 더욱 살리기 위하여 그 단점을 극복하는 것은 범용인버터를 더 잘 이용할 수 있도록 하는 또 하나의 좋은 대안이 될 수 있을 것이다.

범용인버터의 문제점 중의 대표적인 것들로는 고정자 저항의 영향으로 인한 저속 영역에서의 토크 생성 문제와 정상상태(steady-state) 무부하(無負荷) 혹은 경부하(輕負荷) 조건 운전 시의 전동기 진동 현상 등을 들 수 있다^[1]. 이 중에서 현상에서의 전동기 실용 드라이브 상의 주문제점이 될 수 있는 경부하 시의 전동기 진동 문제 해결 방법을 본 논문에서 제안하고자 한다.

2. 수학적인 모델링

2.1 유도전동기 고정자 전류의 다이나믹 모델

d-q 동기좌표계 상에서의 유도전동기 전체 다이나믹 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

여기에서

이고, d-q 동기좌표계 상의 유도전동기 전체 다이나믹 모델에서의 상태변수 x와 입력 u는 다음과 같다.

$$x = [i_{ds} \ i_{qs} \ \lambda_{dr} \ \lambda_{qr}]^T \quad (2)$$

$$u = [v_{ds} \ v_{qs}]^T$$

여기서 i_{ds} 와 i_{qs} 는 각각 d-q축의 고정자 전류이고, λ_{dr} 과 λ_{qr} 은 각각 d-q축의 회전자 자속이며, v_{ds} 와 v_{qs} 는 각각 d-q축의 전동기의 고정자 전압이다.

그런데 d-q 동기 기준좌표계에서의 유도전동기의 전체 다이나믹 모델에서의 자속을

$$\lambda_{dr} = \lambda_r = \text{constant} \quad (= \|\lambda_r\|) \quad (3)$$

$$\lambda_{qr} = 0$$

와 같이 설정하여 다음의 유도전동기 고정자 전류의 다이나믹 방정식(dynamic equation)을 유도한다.

$$\sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + v_{ds} \quad (4)$$

$$\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} + v_{qs}$$

2.2 벡터근거 방식의 V/f 제어 기법의 형식화

범용인버터의 V/f 제어 기법은 정상상태 해석에 근거하므로 어느 정도 제어에 한계가 있다. 유도전동기 범용인버터 시스템은 이러한 한계로 인하여 자연적으로 과도상태를 제어할 수 있는 어떠한 수단도 가지지 못한다. 그러므로 이에 따라 유도전동기 고정자 전류의 다이나믹 방정식(4)는 V/f 제어 기법에서의 정상상태 형식(d/dt=0)으로부터 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_e \sigma L_s i_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} \end{aligned} \quad (5)$$

전통적인 V/f 제어 기법으로 동작하는 범용인버터에서의 전압 명령치는 주어진 전기적 각주파수 명령치 ω_e^* 로부터 결정된다. 이 때 ω_e^* 는 전동기의 실제 전기적 각주파수 ω_e 와 같고 ($\omega_e^* = \omega_e$), 여기에서 ω_e^* 는 제어의 편의상 전동기 회전자 각주파수 ω_r 에 근사한 것으로 간주하여 ($\omega_e^* \approx \omega_r$), ω_r 의 명령치 ω_r^* 를 ω_e^* 로 설정하고 ($\omega_e^* \triangleq \omega_r^*$) 슬립 각주파수 ω_{sl} 은 고려하지 않는다 ($\omega_{sl} \triangleq 0$). 그러므로 이상의 사실을 바탕으로 다음과 같은 관계를 이용하여 보다 용이한 V/f 제어가 되도록 한다.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m i_{qs}}{T_r \lambda_r} \quad 0 \triangleq i_{qs} \quad 0 \triangleq \omega_{sl} \quad (6)$$

그리고 V/f 일정 제어 기법이라고도 하는 범용인버터의 V/f 제어 기법은 전압과 주파수의 비 (V/f)를 일정하게 유지함으로써, 궁극적으로 전동기의 고정자 자속을 일정하게 유지하도록 한다. 따라서 V/f 일정 제어 하에서의 i_{ds} 는 결국 정격 고정자 자속을 유지할 때의 고정자 d -축 전류가 될 것임을 예측할 수 있다.

그러므로 위와 같은 서술을 바탕으로, 제안된 범용인버터에서의 전통적인 V/f 제어 기법에 의한 제어 법칙 (control law)은 기존의 전통적인 V/f 제어 기법에서와는 약간 다르게 벡터 방식에 근거하여 다음과 같은 새로운 방식으로 적용한다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^* &= R_s i_{ds} \\ v_{qs}^* &= \omega_e L_s i_{ds} \approx V_{qs,max} \frac{\omega_e^*}{\omega_b} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $V_{qs,max} = \omega_b L_s i_{ds}$ 는 v_{qs} 의 최대치이며, ω_b 는 기저 주파수 (base frequency)이고, ω_e^* 는 고정자의 전기적 각주파수 명령치이다.

3. 전류보상기법을 이용한 제안된 제어 기법

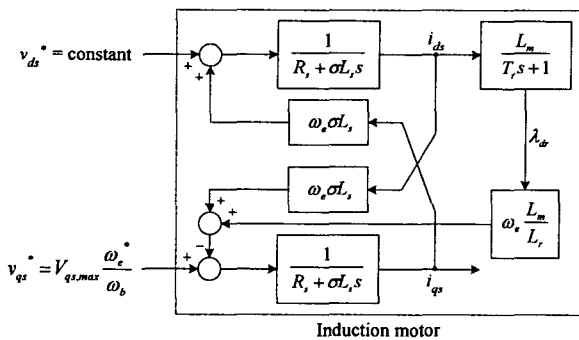


그림 1 벡터방식에 근거한 전통적인 V/f 제어 기법에 의한 유도전동기 범용인버터의 제어 블록 다이어그램
Fig. 1 The control block diagram of an induction motor general inverter by the new conventional V/f control method based on the vector method.

그림 1은 벡터방식에 근거한 전통적인 V/f 제어 기법이 적용된 유도전동기 범용인버터의 제어 블록 다이어그램이다. 전통적인 V/f 제어 기법 (7)이 유도전동기 고정자 전류 시스템 (4)에 인가된다면, 유도전동기 고정자 전류의 다이내믹 시스템은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} &= -R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} + R_s i_{ds} \\ &= \omega_e \sigma L_s i_{qs} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} &= -R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} + \omega_e^* L_s i_{ds} \\ &\approx -R_s i_{qs} \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식 (8)과 (9)로부터 다음의 사실을 각각 알 수 있다.

1) d -축 전류 i_{ds} 에서의 변동은 실제 동작 주파수에 의존한다.

2) 전동기 토크의 함수인 q -축 전류 i_{qs} 에서의 변동은 실제 동작 주파수와는 거의 무관하다.

이러한 사실은 만약 전통적인 V/f 제어 기법으로 동작하는 유도전동기 드라이브 시스템에서 전동기가 특정 동작 주파수에서 진동을 하게 된다면, 그 진동을 억제하기 위하여서는 q -축 전류 i_{qs} 의 변동보다 d -축 전류 i_{ds} 의 변동에 대하여 더 관심을 기울여야만 한다는 것을 말해 준다. 즉, 전통적인 V/f 제어 기법에 의한 유도전동기 드라이브 시스템에서의 전동기 속도는 전기적 동작 주파수에 의존하게 되므로, 전동기의 진동으로 인한 전동기 속도의 변화가 결국 d -축 전류 i_{ds} 에 반영된다는 것을 의미한다는 것이다.

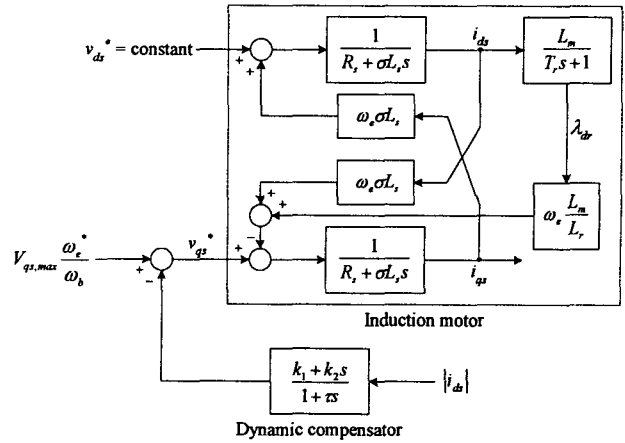


그림 2 제안된 V/f 제어 기법의 제어 블록 다이어그램
Fig. 2 The control block diagram of the proposed V/f control method

그러므로 지금까지 설명한 바와 같이, 정상상태 무부하 혹은 경부하 조건 하에서 동작하는 범용인버터의 V/f 제어 유도전동기 드라이브 시스템에서 유도전동기의 진동 상태를 반영하는 d -축 고정자 전류 i_{ds} 의 진동 성분을 제거하기 위하여, 다이내믹 전류보상기를 이용하는 범용인버터의 새로운 V/f 제어를 다음과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^* &= R_s i_{ds} \\ v_{qs}^* &= V_{qs,max} \frac{\omega_e^*}{\omega_b} - \frac{k_1 + k_2 s}{1 + \tau s} |i_{ds}| \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서 k_1 과 k_2 는 다이내믹 보상기의 이득 (gain)이고 τ 는 저역 필터 (low-pass filter) 회로의 시정수이다. 그림 2는 제안된 V/f 제어 기법의 제어 블록 다이어그램이다.

4. 실험 결과

제안된 V/f 제어 기법의 범용인버터의 유효성을 보이기 위하여 실제 유도전동기 드라이브 시스템에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 이용된 유도전동기의 파라미터는 표1과 같으며, 그림 3은 제안된 V/f 제어 기법의 범용인버터의 전체 시스템 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

그림 4(a)는 정상상태 경부하 조건 중에서 최악의 조건인 무부하 조건으로 전통적인 V/f 제어 기법이 어떠한 보상도 하지 않은 채 공진 주파수에서 동작할 때, 진동하는 고정자 상전류 i_a 의 파형과 직류링크 전압 V_{dc} 의 파형을 보여 준다. 그러나 그림 4(b)는 그림 4(a)와 동일한 조건 하에서 다이나믹 전류보상기를 이용하는 새로운 V/f 제어 기법의 제안된 범용인버터의 전류보상을 한 후의 파형으로써, 동일하게 상전류 i_a 의 파형과 직류링크 전압 V_{dc} 의 파형을 보여주는데, 이것은 제안된 범용인버터의 V/f 제어 기법이 상전류 i_a 의 파형과 직류링크 전압 V_{dc} 의 파형을 상당히 향상시켰음을 보여 준다.

표 1 실험에 이용된 유도전동기의 파라미터
Table 1 The parameters of the induction motor used in the experiments

파라미터	수 치	파라미터	수 치
R_s	0.3 Ω	R_r	0.45 Ω
L_r	65.9 mH	L_m	61.94 mH
L_s	65.2 mH	$T_r = L_r/R_r$	145 msec
정격전압	220 V	정격전류	14.3 A
용량	3.7 kW	극수	poles=4

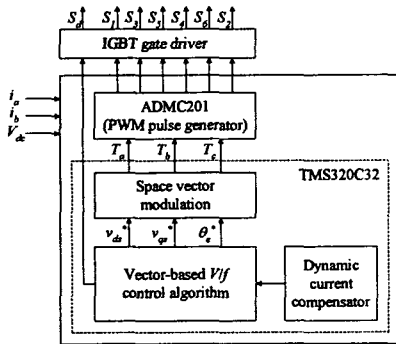
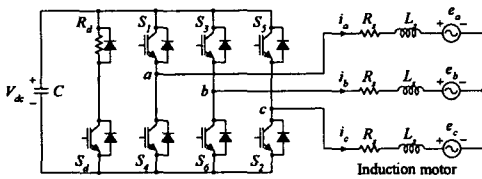
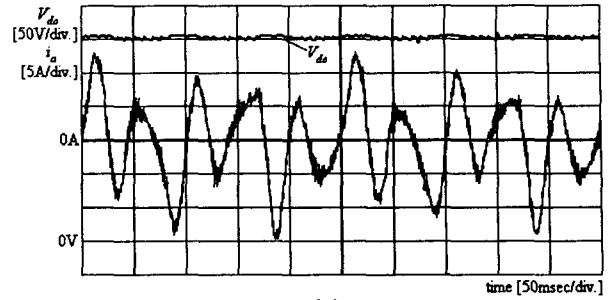


그림 3 제안된 V/f 제어 기법의 전체 시스템 블록다이어그램
Fig. 3 The total system block diagram of the proposed V/f control method

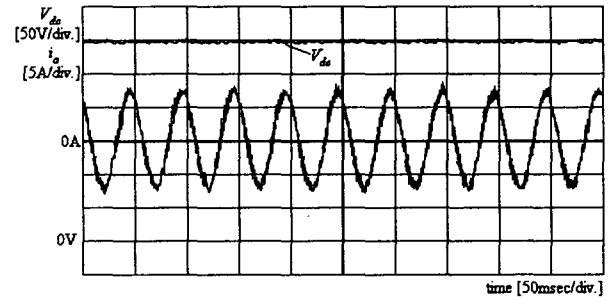
5. 결 론

본 논문에서는 전동기의 경부하진동으로부터 자유로운 새로운 범용인버터를 제안하였다. 제안된 V/f 제어 기법에서 이용하는 전통적인 V/f 제어 기법은 벡터방식에 근거하는 새로운 형식의 V/f 제어 기법으로써 기존의 전통적인 V/f 제어 기법과는 약간 다른 방식의 제어 기법이다. 제안된 범용인버터의 V/f 제어 기법은 V/f 제어 유도전동기 드라이브 시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 다이나믹 전류보상기를 이용하였다. 이 기법은 구현이 매우 용이하며, V/f 제어 유도전동기 드라이브 시

스템의 불안정성 유발의 원인이 되는 전동기 진동 현상을 완전히 제거하는 제어 기법이다.



(a)



(b)

그림 4 무부하, 공진 주파수에서의 유도전동기의 고정자 상전류 파형과 직류 링크 전압 파형:

- (a) 전통적인 V/f 제어 기법
(b) 제안된 V/f 제어 기법

Fig. 4 The waveform of stator phase current and DC-link voltage at the resonant frequency under no load condition:

- (a) The conventional V/f control method
(b) The proposed V/f control method

참 고 문 헌

- [1] R. H. Nelson, T. A. Lipo, and P. C. Krause, "Stability Analysis of a Symmetrical Induction Machine", IEEE Transactions on Power Application System, Vol. PAS-88, No. 11, pp. 1710-1717, November 1969.
- [2] L. Ben-Brahim, "Improvement of the Stability of the V/f Controlled Induction Motor Drive Systems", Proceedings IECON '98, pp. 859-864, 1998.
- [3] A. Gastli and M. Nobuyuki, "Stator Flux Controlled V/f PWM inverter with Identification of IM Parameters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 4, pp. 334-340, August 1992.
- [4] J. H. Youm and B. H. Kwon, "An Effective Software Implementation of the Space-Vector Modulation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 4, pp. 866-868, August 1999.
- [5] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emani-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 292-300.