고정자전압제어 전류형인버터에의한 유도전동기의 속도제어

宋 重 鎬°, 尹 泰 雄, 金 光 培

한국과학기술연구원 제어시스템연구실

Speed Control of Induction Motor Driven by Stator Voltage-Controlled CSI

Joong-Ho Song, Tae-Woong Yoon, and Kwang-Bae Kim

Control Systems Lab., KIST

Abstract

This paper presents a comprehensive study on the stability of several control schemes for the induction motor driven by current source inverters. A stator voltage-controlled current source inverter drive system without a speed sensor is investigated in order to find appropriate control schemes, which are primarily based on direct or, alternatively, indirect frequency control scheme. The overall control systems with either voltage control loop or current and voltage control loops provided in addition to each frequency control scheme are analyzed by utilizing the root locus method and simulated by computer to illustrate the validity of this analysis.

1. 서 론

일반적으로 전류형인버터-유도전동기 시스템을 안정하게 운전하기 위하여 전동기속도나 고정자전압을 궤환시켜서 적절한 제어구조를 구성한다. 속도센서없이 고정자전압을 궤환시켜서 제어하는 고정자전압 제어방식은 간단히 일정한 V/Hz 비를 유지할 수있는 제어구조일 뿐만아니라, 고정자 전압이 제어되고 있기때문에 전압형인버터 구동시스템과 유사한 정특성을 가지고있다.[1] 이러한 고정자전압제어 전류형인버터 구동시스템은 상대적으로 속도제어정도가 낮은 Fan, Pump, Blower 등의 부하에 적용되어 산업 현장에서 널리 사용되어오고 있으나, 이 분야에 대해서는 많은 논문이 발표되어있지 않다.

그림1과 같은 ASCI (Auto-Sequentially Commutated Inverter) 에대하여 고정자전압 제어 시스템을 구성하고 이의 안정성을 근궤적법에의하여 고찰한 예가있다.[1]

그림2와 같은 GTO-CSI (GTO-Current Source Inverter) 에 대하여 P전류 및 전압제어기를 사용하고 역시 인버터 스위칭주파수는 설정전압치에 비례되어 결정되는 제어구조에 대하여 시스템의 안정성을 고찰한 예가 있다.[3]

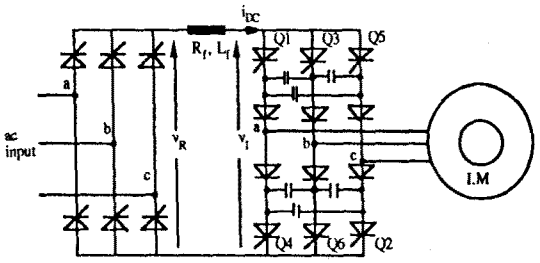


그림1 ASCI

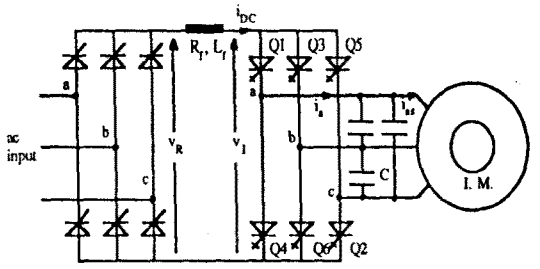


그림2 GTO-CSI

한편, 저자들은 그림2의 GTO를 SCR로 대치한 경우의 LCCSI (Load Commutated CSI) 시스템에 대하여 PI 전류 및 전압제어기를 사용하고, 인버터 스위칭주파수가 실제의 고정자전압치에 맞추어서 간접적으로 결정되는 제어구조에 대하여 해석한 바 있으며, LCCSI 시스템에서는 이러한 간접적인 주파수제어 방법이 필수적임을 밝힌 바 있다.[3]

본 논문에서는 이상의 세가지 전류형인버터 시스템 즉, ASCI, GTO-CSI, LCCSI 각각에 대하여 각종 제어구조들의 시스템 특성을 고찰한다.

2. 시스템 모델링

전류형인버터로 구동되는 유도전동기 시스템은

동기속도로 회전하는 dq좌표계에 의하여 표현할 수 있다. 직류링크 전류의 리플, 각 변수의 고조파 성분, 인버터의 전력 손실 등을 무시하면, 선형화된 상태방정식은 다음과 같다.[3, 4]

ASCI와 유도전동기의 모델링:

$$\dot{x} = A x + B u \qquad (1)$$

$$x = [\Delta i_{qs} \quad \Delta i_{qr} \quad \Delta i_{dr} \quad \Delta\omega_r]^T$$

$$u = [\Delta\omega \quad \Delta v_R \quad \Delta T_L]^T$$

$$A = \frac{1}{L_1'}\begin{bmatrix} -R_s L_r & R_r L_m & -\omega_0 L_r L_m & -L_r L_m i_{dro} \\ R_s L_m & -R_r L_s' & -(\omega_0 L_s' - \omega_0 L_s L_r) & L_s L_r i_{dro} \\ \frac{L_1' L_m(\omega_0-\omega_{ro})}{L_r} & L_1'(\omega_0-\omega_{ro}) & \frac{R_r L_1'}{L_r} & -(L_m i_{qso}+L_r i_{qro})\frac{L_1'}{L_r} \\ \frac{3P^2}{8J}L_m L_1' i_{dro} & -\frac{3P^2}{8J}L_m L_1' i_{qso} & \frac{3P^2}{8J}L_m L_1' i_{qso} & -\frac{B}{J}L_1' \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_r}{L_1'} & 0 \\ -i_{dro} & -\frac{L_m}{L_1'} & 0 \\ \frac{L_m i_{qso}+L_r i_{qro}}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{P}{2J} \end{bmatrix}$$

GTO-CSI 및 LCCSI와 유도전동기의 모델링:

$$\dot{x} = A x + B u \qquad (2)$$

$$x = [\Delta i_{qs} \quad \Delta i_{ds} \quad \Delta i_{qr} \quad \Delta i_{dr} \quad \Delta v_{qs} \quad \Delta v_{ds} \quad \Delta i_{DC} \quad \Delta\omega_r]^T$$

$$u = [\Delta\omega \quad \Delta v_R \quad \Delta T_L]^T$$

$$A = \frac{1}{L_1'}\begin{bmatrix} -R_s L_r & -(\omega_0 L_r + \omega_r L_m L_r) & R_r L_m & -\omega_r L_r L_m & L_r & 0 & 0 & -(L_m R_{dro} + L_r L_{dro}) \\ (\omega_0 L_r + \omega_r L_m L_r) & -R_s L_r & \omega_r L_r L_m & R_r L_m & 0 & L_r & 0 & (L_m^2 i_{qro} + L_r L_m i_{qro}) \\ R_s L_m & \omega_r L_r L_m & -R_r L_s' & -(\omega_0 L_s' - \omega_r L_s L_r) & -L_m & 0 & 0 & (L_r L_{dro} + L_s L_r i_{dro}) \\ -\omega_r L_r L_m & R_s L_m & (\omega_0 L_s' - \omega_r L_s L_r) & -R_r L_s' & 0 & -L_m & 0 & -(L_r L_{dro} + L_s L_r i_{qro}) \\ -L_1\frac{1}{3C} & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_1\omega_0 & L_1\frac{2\sqrt{3}}{3CR} & 0 \\ 0 & -L_1\frac{1}{3C} & 0 & 0 & L_1\omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_1\frac{3\sqrt{3}}{L_f\pi} & 0 & -L_1\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ \frac{3P^2}{8J}L_m L_1 i_{dro} & -\frac{3P^2}{8J}L_m L_1 i_{qro} & -\frac{3P^2}{8J}L_m L_1 i_{dro} & \frac{3P^2}{8J}L_m L_1 i_{qro} & 0 & 0 & 0 & -\frac{B}{J}L_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -i_{dro} & 0 & 0 \\ i_{qro} & 0 & 0 \\ -i_{dro} & 0 & 0 \\ i_{qro} & 0 & 0 \\ -v_{dro} & 0 & 0 \\ v_{qro} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{P}{2J} \end{bmatrix}$$

3. 동특성

ASCI의 경우는 식(1), GTO-CSI 및 LCCSI의 경우는 식(2)를 이용하며, 직접적 및 간접적인 주파수제어 방법으로 구분하여, 우선 개루프 시스템의 극점 및 영점을 구하고나서 이에 근거하여 각 제어루프를 추가할 때의 시스템 안정성에 대하여 고찰한다. 출력 캐패시터 C 는GTO-CSI에서 인버터의 PWM패턴에 따라서 상당히 적은 값으로 선정될 수 있으나, 여기서는 6 Step파형을 가정하고 1000μF으로 정하고, LCCSI에서는 450μF으로 정한다. 본 논문에서는 3상 208 V, 10Hp 농형 유도전동기를 다루고 있다.[3]

3.1 직접적인 주파수 제어

이 방법은 기본적으로 인버터 스위칭주파수를 설정전압 기준으로 전동기의 V/Hz 비를 일정하게 유지할 수 있도록 결정하는 방법이다.

개루프 시스템 :

표1 직접적인 주파수제어 방법에서의 개루프 극점 및 영점

	ASCI		GTO-CSI		LCCSI	
	극점	영점	극점	영점	극점	영점
$\Delta i_{DC}/\Delta v_R$	-18.34±j6.43 6.57±j22.32	-8.22±j16.78 4.86	-65.17±j171.3 -80.3±j973.8 11.57±j28.61	-67.19±j1690 -86.19±j936.1 -4.93±j14.88 8.78	-60.98±j1001 -97.06±j271.9 19.19±j44.82	-62.29±j992.9 -113.8±j249.5 26.46±j19.32 -8.5
$\Delta v_s/\Delta v_R$		-19.38 -357.4 -17.49±j2.16	-17.37 -22.7	-24.66±j1365 -182.0 -5.33±j41.24 -11.48	-35.86 5.71	-504±j750.4 77.81±j50.42 -82.12 -9.78

전압 제어루프만 사용하는 경우[1]

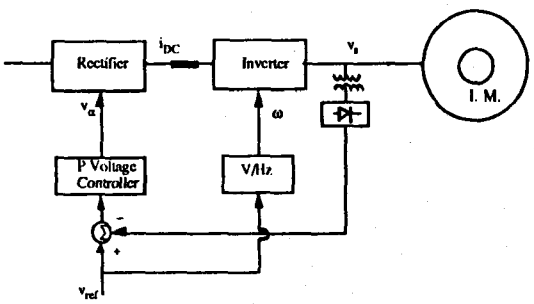
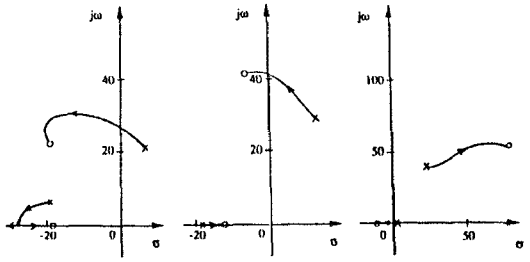


그림3 직접적인 주파수제어 및 전압 제어루프를 채택한 제어구조

각 인버터 시스템의 전달함수 $\Delta v_s/\Delta v_R$ 의 근궤적을 전압 제어기의 이득을 증가시켜 가면서 그려보면 그림4와 같다.

전류 및 전압 제어루프를 사용하는 경우[2]

이 제어구조는 특히 ASCI시스템에서 가장 널리 사용되고 있으며, 각 인버터 시스템에서 전류 및 전압 제어기 이득을 변화시킬 때의 전달함수 $\Delta v_s/\Delta i_{ref}$ 의 근궤적을 그림6에서 보여주고 있다.



(a) ASCI (b) GTO-CSI (c) LCCSI

그림4 직접적인 주파수제어 및 전압 제어루프 시스템에서의 근궤적

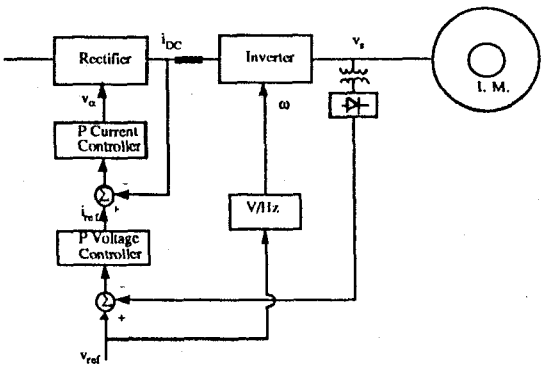
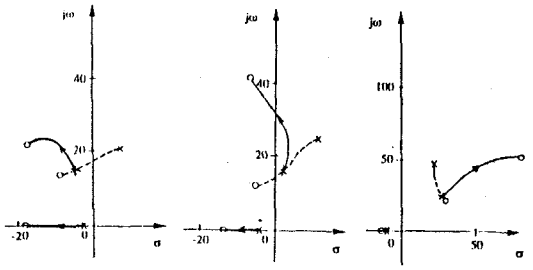


그림5 직접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어루프를 채택한 제어구조



(a) ASCI(k_i=2) (b) GTO-CSI(k_i=5) (c) LCCSI(k_i=10)

그림6 직접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어 루프 시스템에서의 근궤적

그림4와 6으로 부터 LCCSI시스템은 직접적인 주파수제어 방법으로는 안정화시킬 수 없음을 알 수 있다.

3.2 간접적인 주파수제어

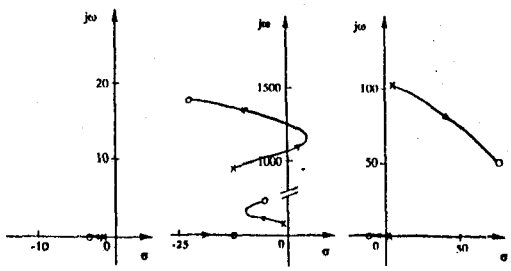
이 방법은 기본적으로 인버터 스위칭주파수를 설정전압 기준으로 하지않고, 실제로 검출한 전동기의 고정자 전압을 기준으로하여 전동기의 V/Hz 비를 일정하게 유지할 수 있도록 결정하는 방법이다.

개루프 시스템 :

표2 간접적인 주파수제어 방법에서의 개루프 극점 및 영점

	ASCI		GTO-CSI		LCCSI	
	극 점	영 점	극 점	영 점	극 점	영 점
$\Delta i_{DC}/\Delta v_R$	- 151.3 - 1352 -1.03 - 16.65	- 1432 - 0.33 - 77.15	- 103.6±j1714 - 11.4±j951.2 - 37.49±j59.33 - 1.47±j9.22	- 106.9±j1690 - 15.7±j912.4 - 31.36±j60.51 - 0.08 - 24.6±j1365 - 182.0 - 5.33±j41.24 - 11.48	- 72.84±j1032 - 47.61±j315.4 2.73±j109.7 - 72.97 0.56	- 72.99±j1022 - 33.05±j308.6 - 45.42±j40.42 - 4.93 - 504±j750.4 77.81±j50.42 - 82.12 - 9.78
$\Delta v_s/\Delta v_R$		- 122 - 1768 - 2.48 - 16.49				

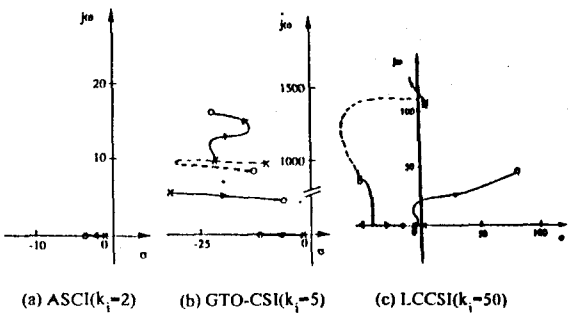
전압 제어루프만 사용하는 경우:



(a) ASCI (b) GTO-CSI (c) LCCSI

그림7 간접적인 주파수제어 및 전압 제어루프 시스템에서의 근궤적

전류 및 전압 제어루프를 사용하는 경우[3]



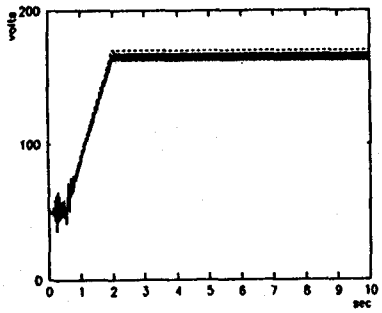
(a) ASCI(k_i=2) (b) GTO-CSI(k_i=5) (c) LCCSI(k_i=50)

그림8 간접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어 루프 시스템에서의 근궤적

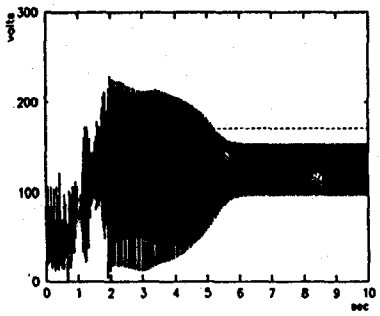
4. 시뮬레이션

그림9, 10은 각 인버터 시스템의 대표적인 예로서 ASCI시스템에서는 간접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어루프를 갖춘 시스템 (K_i=10, Kv=300), GTO-CSI시스템에서는 직접적인 주파수제어, 전압제어루프를 갖춘 시스템을 (Kv=5), LCCSI시스템에서는 간접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어루프를 갖춘 시스템에 (Ki=50, Kv=0.9) 대하여, 각각 고정자전압 크기와 전동기속도의 응답 특성을 보여주고 있다. ASCI시스템은 본 논문에서 다루고 있는 모든 제어구조에서 P 제어기만으로도 충분히 우수한 성능을 보여주고 있으나, GTO-CSI와 LCCSI 시스템은 P 제어기

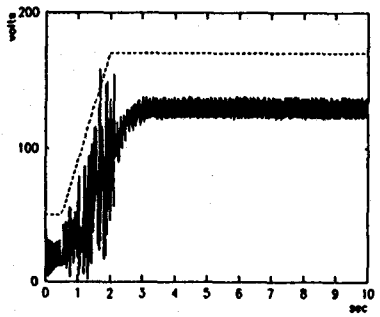
사용에따른 큰 정상상태 오차와 순시 변동특이 큰 응답 특성을 보여주고 있다.



(a) ASCI

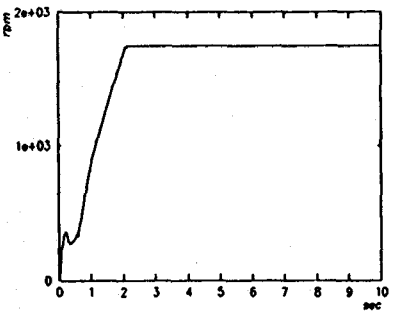


(b) GTO-CSI

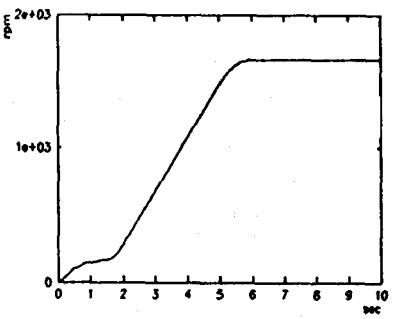


(c) LCCSI

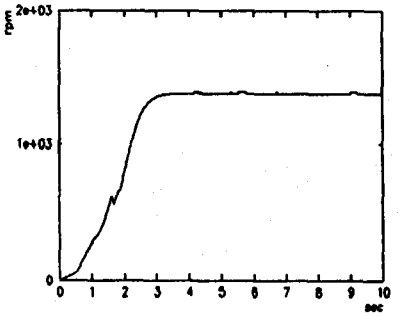
그림9 기동시의 고정자전압



(a) ASCI



(b) GTO-CSI



(c) LCCSI

그림10 기동시의 전동기속도

6. 결 론

본 논문에서는 직접적 및 간접적인 주파수제어, 전류 및 전압 제어루프등으로 이루어지는 여러가지 제어구조들의 제어특성을 고찰하였다. 간접적인 주파수제어 방식은 ASCI와 GTO-CSI 시스템의 극점을 모두 안정한 영역으로 이동시킬 뿐만 아니라, LCCSI 시스템에서는 시스템의 안정화에 반드시 필요한 역할을 하고있다.

참 고 문 헌

[1] M.A. Abbas and D.W. Novotny," The Stator Voltage-Controlled Current Source Inverter Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Appl., IA-18, No.3, pp 219~229, 1982.

[2] R. Itoh, " Stability of induction motor drive controlled by current-source inverter", IEE Proc. Pt. B, Vol.136, No.2, pp83~88, 1989.

[3] 송중호, 윤태웅,김권호,김광배, " 負荷轉流式 電流形 인버터-유도전동기 시스템의 제어 특성", 전기학회 논문지, 제39권 10호, pp 1029~1036, 1990.10.

[4] E.P. Cornell and T.A. Lipo, " Modeling and design of controlled current induction motor drive systems", IEEE Trans. Ind. Appl., IA-13, No.4, pp 321~330, 1977.

[5] T.A. Lipo and E.P. Cornell, " State-Variable Steady-State Analysis of a Controlled Current Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Appl. IA-11, No.6, pp 704~712, 1975.