

센서없는 유도전동기 벡터제어

에너지자원기술 개발지원센터
전기1팀장 고 요

1. 개요

현재 산업체에서 사용되고 있는 동력원으로서 가장 널리 쓰이고 있는 것이 유도전동기이다. 유도전동기는 운반·하역 기계, 식품가공 기계, 섬유·제지기계, 제철, 시멘트산업 등 전산업에 걸쳐 각종 기계장치들의 동력구동원으로 사용되고 있는데 이는 구조가 간단하고 보수·유지가 거의 필요없으며 내구성이 강하고 가격이 저렴하다는 유도전동기 특유의 장점에 기인한 것이다.

국내 유도전동기의 시장을 보면 대부분의 전동기가 상용전원에 의한 직입기동방식으로 사용되고 있어 기동시에 소요되는 전류가 통상운전시 사용 전류의 약 6~10배에 달하여 에너지효율의 저하와 기계의 손상의 원인이 되고 있는 현실이다.

따라서 근년에 점차 인버터의 사용범위가 늘어나고 있는 추세이다.

유도전동기의 인버터구동에서는 일반적으로 Volts/hertz(V/F) control 방식 구동방식이 사용되고 있는데, 이 방법은 Hardware 및 구동알고리

즘을 가장 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있으며 일정 부하 하에서 정속운전하는 경우에는 큰 무리없이 전동기를 구동할 수 있어 가장 널리 쓰이는 방식이다. 그러나 가변속 제어가 필요한 경우에는 속도명령의 변화에 대한 매우 복잡한 형태의 Feed-forward 보상이 필요하며, 경험에 의존한 각종 V/F pattern 및 가감속 pattern을 사용하여야만 한다. 또한 통상운전의 경우는 상용전원에 의한 운전보다도 에너지의 소모가 늘어나는 경향이 있다. 더욱이 근본적으로 개루우프(Open-Loop) 형태의 제어방식이기 때문에 부하 변화에 의한 속도의 변동을 보상할 수가 없다는 단점을 가지고 있다.

따라서 강인한 속도제어를 하기 위해서는 속도 검출기로부터 속도를 검출해 내어 이를 되먹임시켜 폐루우프(Closed loop)로 속도제어 루우프를 형성하는 것이 필요하다. 그러나, Tacho-generator나 Encoder와 같은 속도검출기를 유도전동기 회전축에 부착하면 유도전동기 고유의 내구성, 신뢰성이 저하되고 배선에 의한 시스템 불안정을 유발할뿐더러, 가격이 상승하게 되는 단점이 있다.

이 때문에 속도검출기 없이 속도를 추정해내어 페루우프로 속도를 제어하는 방법이 각국에서 오래전부터 연구되어 왔으며 국내에서는 서울대학교 제어계측공학과 비선형시스템 제어연구실에서 이에 대한 연구를 꾸준히 계속하여 상당한 수준까지 그 기술이 축적되었다.

한편 유도전동기는 구조가 간단한 반면 그 동적 특성에 비선형성이 매우 강하고, 변수들이 상호 간섭된 것이어서 고성능의 속도제어가 상당히 어렵다. 이러한 이유로 유도전동기를 고성능으로 제어할 수 있는 제어기술에 대한 연구가 전세계적으로 꾸준히 계속되어 왔으며, 마이크로 프로세서(Microprocessor)의 비약적인 발전에 힘입어 복잡한 제어이론의 실제의 시스템에의 적용도 매우 활발하게 이루어짐에 따라 유도전동기의 제어기술은 진일보하게 되었다. 특히 최근에는 유도전동기의 고성능 제어를 가능하게 하는 제어방법으로 FOC(Field Oriented Control) 방식 혹은 소위 Vector Control이라 불리는 방법이 개발되었는데, 이 방법은 복잡한 유도전동기 특성을 분리시켜 자속성분과 토오크성분으로 나누어서 따로 제어할 수 있도록 해 줌으로써 직류전동기(DC motor)와 같이 용이하게 고성능의 제어를 가능하게 하는 방법이다.

Volts/Hertz control 방식의 Inverter의 내부 구조를 살펴보면, 출력전압의 제어에 있어서 PWM(Pulse Width Modulation) 방법을 사용하고 있고, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)나 Power Transistor 또는 MOSFET 등의 전력소자를 사용하고 있다는 점 등으로 H/W면에 있어서 Vector 제어기와 크게 다르지 않다. 또한, 최근에는 DSP(Digital Signal Processor) Chip 등의 고성능의 마이크로 프로세서가 개발되었고

이들의 가격도 또한 기존의 마이크로 프로세서의 수준으로 하락하였기 때문에 Vector 제어기와 같은 고성능 유도전동기 제어 알고리즘의 실현이 경제성을 상실하지 않는 범위내에서도 가능하게 되었다. 그러므로 기존의 V/F 방법의 Hardware와 DSP Chip에 의한 새로운 제어 방법을 결합함으로써, 기존의 직류전동기 제어수준에 필적하는 성능을 가진 저가격 고성능 유도전동기 제어시스템을 개발할 수 있게 되었다. 이러한 저가격, 고성능 유도전동기 제어기는 날로 고도화 되어가는 산업계의 동력 구동원으로서 그 수요가 크게 증대되고 있기 때문에 개발이 매우 시급한 실정이다.

2. 연구개발 목표사양 및 연구내용

가. 연구개발 목표사양

본 연구의 목표는 0.4KW~3.7KW 용량의 유도전동기 가변속 제어기의 다음과 같은 성능을 가지면서 가격이 저렴하고 전동기구동에 소요되는 에너지를 최소한으로 하는 범용 가변속 유도전동기 제어시스템의 개발을 목표로 한다.

나. 연구개발 내용

본 연구에서 개발하고자 하는 유도전동기 제어시스템의 제어 알고리즘 및 H/W 개발에 관한 상세 내용 및 범위는 다음과 같다.

(1) 고성능 유도전동기 제어알고리즘 개발

일반적으로 농형 유도전동기는 동기 속도 ω_s 로 회전하는 d-q 좌표계에서 볼 때 (그림 2.2.1)과 같이 등가회로로 표시할 수 있다.

유도전동기의 발생 Torque T_e 는 식(2.2.1)로

1	최대 적용 모터 용량(KW)	0.4/0.7/1.5/2.2/3.7
2	정격출력전류(A)	3.2/4.8/6.4/9.6/16
3	전원전압 및 주파수	1) 단상/3상. 200-230V 50/60Hz 2) 허용전압변동 : ±10% 3) 허용주파수변동 : ±5%
4	제어방식	1) 정현파 PWM 방식 2) 속도 센서 미사용 Algorithm 구현 3) 부하변동(20% 이내)에 대한 속도 변동 최소구현(1% 이내)
5	주파수 제어 범위	0.1 - 400Hz
6	주파수설정분해능	1) 지령주파수 < 100Hz 경우 : 0.01Hz 2) 지령주파수 > 100Hz 경우 : 0.1Hz
7	출력주파수분해능	0.01Hz (1/30,000)
8	과부하내량	정격출력전류의 150%, 1분간
9	주파수설정신호	DC 0 ~ +10V, 4 - 20mA
10	가감속시간	0.1-6,000초(가속/감속시간 독립설정)
11	제동 TORQUE	약 20%
12	보호기능	1) 전자 THERMAL에 의한 모터 보호 2) 순간과전류/과부하/과전압 발생시 3) 과열/순간정전/부족전압 발생시 4) STALL 방지
13	특수 내장 기능	1) VECTOR제어 기능 2) 속도 SENSORLESS 기능 3) PARAMETER 추정 기능 4) 에너지절약기능 : 기존 V/F대비 소모전력 15% 절감
14	환경 사양	1) 옥외 사용 : -10℃ ~ +40℃ 사용 2) 외형 : 0.4KW = 60×250×150 0.7/1.5KW = 75×250×210 2.2/3.7KW = 150×250×210 3) 저소음화 : 30Hz 운전 주파수시 45dB 이하

주어진다.

$$T_e = \frac{3pM}{2L_r} (\varphi_{dris} - \varphi_{qris}) \quad (2.2.1)$$

유도전동기 등가회로(그림 2.2.1)에서 ω_s 는 기존의 Volts/Hz 방법의 입력주파수지령과 같

은 의미를 가지는 것으로 Vector control에서는 ω_s 를 다음과 같이 설정하여 Slip을 제어함으로써 유도전동기의 Torque 및 회전자 Flux를 독립적으로 제어할 수 있게 하고 있다.

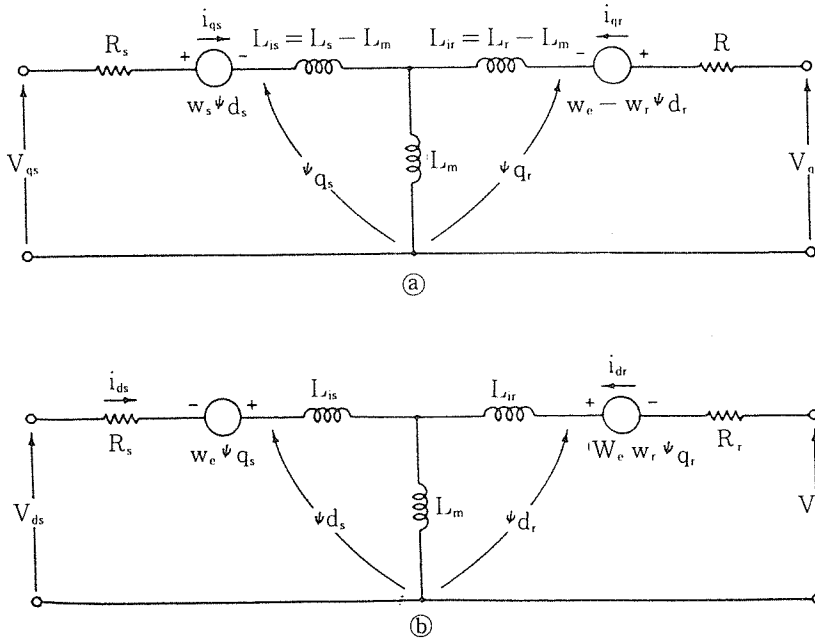
$$\omega_s = p\omega_r + \frac{MR_r}{L_r} \frac{i_{qs}}{\varphi_{dr}} \quad (2.2.2)$$

$$\omega_r = \frac{(-B\omega_r + K_T\varphi_{dr}i_{qs} - T_L)}{J} \quad (2.2.3)$$

CRPWM(Current Regulated Pulse Width Modulation) 방법에 의해 고정자 전류를 직접 제어하고 ω_s 를 식 (2.2.2)와 같이 설정하면 유도전동기는 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

식 (2.2.3)은 타여자 직류전동기의 동적 특성과 같기 때문에 유도전동기를 손쉽게 고성능으로 제어할 수 있게 되어 공작 기계의 정밀 Servo용 등으로 사용할 수가 있다.

$$\varphi_{dr} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + \frac{MR_r}{L_r} i_{ds}$$



(그림 2.2.1) d-q회전 좌표계에서의 유도전동기 등가회로

(2) 속도추정 알고리즘 개발

앞(1절 1.)에서 기술한 Vector 제어 방법 및 Closed-Loop 속도제어를 구현하기 위해서는 회전자 속도정보를 알아야 한다. ω_r 을 알기 위해 회전자축에 속도검출기를 부착하게 되면 전술한 바와 같이 유도전동기 고유의 장점이 사라지기 때문에 속도검출기를 사용하지 않고 ω_r 을 추정하는 알

고리즘에 대한 연구가 오래전부터 진행되어 왔는데, 그 일례로 유도전동기의 발생 Torque를 측정하거나, 회전자 기전력을 측정하여 회전자 속도를 계산하는 방법이 제시되어 있고, 또한 MRAS (Model Reference Adaptive System)를 적용한 연구결과도 발표되어 있다.

Vector제어 방법에 있어서 회전좌표계와 고정

좌표계 간의 좌표변환은 ω_s 를 적분한 값 θ_s 를 사용하는 방법이 있고, 직접 회전자자속을 고정자 좌표계에서 측정하여 이 정보에 의해 변환하는 방법이 있는데 후자의 방법은 유도전동기의 Parameter 변화에 영향을 받지 않는 장점이 있기는 하나 자속검출기의 설치가 어렵고 실용성이 없으므로 전자의 방법을 주로 사용한다. 일반적으로 다음 식 (2.2.4)에 의해 ω_r 을 사용하지 않고 회전자자속 φ_{xr} , φ_{yr} 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\varphi_{xr} &= \frac{L_r}{M} \left[\int_0^t (V_{xs} - R_s i_{xs}) dt - \sigma L_s i_{xs} \right] \\ \varphi_{yr} &= \frac{L_r}{M} \left[\int_0^t (V_{ys} - R_s i_{ys}) dt - \sigma L_s i_{ys} \right]\end{aligned}\quad (2.2.4)$$

여기서,

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \text{ (Leakage coefficient)}$$

그러나 식 (2.2.4)에 의해 회전자자속 φ_{xr} , φ_{yr} 을 구하기 위해서는 순수적분기(Pure integrator)가 필요하다. 실장에 있어서의 순수적분기는 입력 Offset 등과 같은 Bias 성분에 매우 민감하기 때문에 일반적으로 1차 지연 요소를 갖는 LPF(Low Pass Filter)로 이를 대체하여 사용하고 있어서 회전자자속 추정에 오차를 수반하게 되며, 특히 저속 운전시에는 그 오차가 커지게 된다. 이에 따라 순수적분기를 사용하지 않고 회전자자속을 추정할 수 있는 새로운 알고리즘의 개발이 필요하다.

만일 어떤 방법을 사용하든지 오차없이 회전자자속을 추정할 수 있다면 회전자 속도 ω_r 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$p\omega_r = \frac{\varphi_{xr}\varphi_{yr} - \varphi_{yr}\varphi_{xr}}{\varphi_{xr}^2 + \varphi_{yr}^2} +$$

$$\frac{MR_r}{L_r} \frac{\varphi_{xr}i_{ys} - \varphi_{yr}i_{xs}}{\varphi_{xr}^2 + \varphi_{yr}^2} \quad (2.2.5)$$

즉, 회전자자속정보 및 유도전동기 Parameter를 이용하여 속도검출기 없이 회전자 속도를 추정할 수 있다. 또한 최적의 자속을 계산하여 불필요한 여분의 자속을 생성하는데 소모되는 에너지를 없앴으로써 전동기 구동에 소비되는 에너지량을 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 고성능 Speed sensorless 제어를 위한 회전자자속 추정방법 및 유도전동기 Parameter 추정방법을 제시하여 실제 시스템에 적용하였다.

(3) 파라미터 추정 알고리즘 개발

유도전동기의 제어성능을 향상시키기 위해서는 대상이 되는 유도전동기의 Parameter를 정확히 알아내는 것이 필요하다. 초기 기동전의 유도전동기 Parameter를 추정할 수 있는 알고리즘 및 운전중 변화하는 Parameter를 On-line으로 추정하는 알고리즘을 개발하여 DSP를 통해 실현시킨다.

(4) DSP회로 설계 및 알고리즘 장착

DSP를 사용하여 속도 추정알고리즘, Vector 제어알고리즘 및 전동기 Parameter 추정알고리즘 등을 Coding하여 실시간 처리가 가능하도록 하며 DSP회로 설계시 최소한의 부품이 들어가도록 고려한다.

(5) 저가격 인버터 Hardware 설계

IGBT를 사용하고 설계시 전력회로부의 PCB화를 통해 유지, 보수성을 높이고 크기를 줄인다. DC link 전압은 220V의 교류입력전압을 기준으로 하며, 사용되는 각종 소자에 필요한 전원전압은 SMPS(Switched Mode Power Supply) 방식

으로 만들어 뱀으로써 전원부의 실장면적을 크게 줄인다. 저용량대(0.7KW) Inverter의 설계, 제작을 목표로 하며 추후 용량을 증가(2.2KW)시킬 수 있도록 한다. 무엇보다도 가격 경쟁력을 갖도록 최대한 저가격화를 도모한다.

용자의 편리를 최대한 도모한다. 이는 차후 시장에서의 경쟁력을 위해서는 필수적이다.

3. 응용과 향후의 과제

마지막으로 일본의 제조회사의 시방을 소개하고 적용 예를 표로 나타내었다.

(6) 사용자 인터페이스 설계

사용자와의 Interface는 제품화를 고려하여 사

〈표 1〉 센서없는 벡터제어의 시방 (예)

항 목	시 방
속 도 범 위	1 : 50(범용 모터) 36~1,800rpm 1 : 75(전용 모터) 24~1,800rpm
속 도 정 밀	±0.5%(상기 속도제어범위에서)
토 크 제 어 범 위	1 : 50
토 크 정 밀 도	±3%
시 동 토 크	150%
과 부 하 내 량	150% 1분간

〈표 2〉 센서없는 벡터제어의 적용 예

	용 도	채 용 이 유
1	매 엽 인 쇄 기	생력화, 신뢰성 향상
2	신 문 운 전 기	속도 센서 설치곤란
3	제 지 기	도공기에 루파롤의 소형화, 생력화 펠프 가공기의 생력화, 고정밀도화
4	철 강 냉 간 압 연 기	롤 교환용 이동대차, 센서 케이블 제거
5	전 기 자 동 차	생력화, 코스트 다운(검토중)