

벡터제어 시스템에 의한 유도 전동기의 속도제어와 토오크 특성에 관한 연구

황락훈*, 장은성*, 남우영*, 조상로*, 신양호*, 조문택**, 이춘상***, 나승권****
 세명대학교*, 대원과학대**, 명지대학교***, 강원직업전문학교****

A Study on torque characteristics and rapid response control of induction motor by vector control system.

L. H. Hwang,* E. S. Jang,* W. Y. Nam,* I. K. Ahn,** M. T. Cho,** H. J. Joo**
 C. S. Lee,*** and S. K. Na ****
 Semyung Univ*, Daewon science Coll**, Myongji Univ***, Kangwon VTI****

ABSTRACT

In this paper, the speed control system of induction motor was proposed using vector control algorithm and space voltage vector PWM method to improve the dynamic performance of induction motor.

The control system is composed of the PI controller for speed control and the current controller using space voltage vector PWM technique. The high-speed calculation and processing for vector control is carried out by TMS320C31 digital signal processor and IGBT module. The proposed scheme is verified through digital simulations and experiments for 3.7[kw] induction motor and shows good dynamic performance.

방식을 사용하여 자속의 회전각 위치를 알아내었다. 시스템의 전류제어부를 구현하는데는 공간전압 벡터 PWM 제어방식을 사용하였다. 그리고 제어 시스템 설계에서 센서리스 벡터제어 알고리즘의 고속 연산처리를 위해 TMS320C31 DSP를 CPU로 사용하였다. 또한, 공간전압벡터 PWM 관련 회로나 인터페이스 회로 등은 EPLD로 처리하여 신뢰성이 높은 시스템을 구성하였다. 제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위해 3.7[KW]용량의 농형 유도전동기에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 검토하고, 부하로는 동일한 용량의 직류발전기를 MG세트로 구성하여 실험에 사용하였다. 그 결과 시스템의 응답속도가 빠르고 기준속도나 부하토크의 변화에 대한 과도응답특성이 우수함을 확인하였다.

1. 서 론

본 논문에서는 개선된 자속추정기를 적용하여 보다 넓은 속도범위에서 회전자 자속을 정확하게 추정하여 구동시스템의 동작특성을 향상 시키고자 한다. 구체적으로 살펴보면, 고정자 전압의 적분항을 순수 적분대신 저역통과 필터로 구성한 전압모델 자속추정기를 구현하여 자속을 추정하고, 전동기 운전속도가 낮은 영역에서 전압모델 자속추정기의 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 폐루프 적분 방식의 자속크기보상 알고리즘을 도입하여 필터의 차단 주파수를 높이고 이를 통해 드리프트 문제를 해결하는 한편 추정자속의 오차를 보상하여 자속추정의 정확도를 높였다. 또한 추정된 자속값을 이용한 회전자 속도추정기를 구성하여 속도를 추정하고 이를 속도정보로 사용하였다. 그리고, 정지축에서 회전축으로의 변환각에 대한 정보는 간접벡터제어

2. 유도전동기의 벡터제어 모델링

2.1 고정좌표계 모델링

3상 고정좌표계에서 전동기의 전압방정식을 표현하기 위하여 그림 2.1과 같은 3상 유도전동기의 고정자 권선 $a - \hat{a}, b - \hat{b}, c - \hat{c}$ 에 각각 다음과 같은 전류가 흐르는 것으로 가정한다[1],[2] 이때 각 상의 전류를 벡터로 나타내며 이것을 공간전류벡터(space current vector)라 정의한다. 공간 벡터는 공간적으로 원주를 따라 정현적으로 분포된 복소량을 물리량으로 나타낼 수 있으며 복소평면상에서 각 상의 공간전류벡터는 다음과 같이 복소수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{as}(t) \\ i_{bs} &= a i_{bs}(t) \\ i_{cs} &= a^2 i_{cs}(t) \end{aligned} \tag{1}$$

이들 3상 공간전류벡터의 합성전류벡터는 다음과

같다.

$$i_s = i_{as} + i_{bs} + i_{cs}$$

고정자의 공간전압벡터와 공간 쇄교 자속벡터는 다음 (2)식과 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s^s = \frac{3}{2} \{v_{as}(t) + a v_{bs}(t) + a^2 v_{cs}(t)\} \quad (2)$$

$$\lambda_s^s = \frac{2}{3} \{\lambda_{as}(t) + a \lambda_{bs}(t) + a^2 \lambda_{cs}(t)\} \quad (3)$$

따라서 공간벡터를 사용한 3상 고정좌표계의 고정자 전압방정식은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s^s = R_s i_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt} \quad (4)$$

그리고 전류는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s^s = \frac{2}{3} \{i_{as} + a i_{bs} + a^2 i_{cs}\} \\ = i_{\alpha s} + j i_{\beta s} \quad (5)$$

그리고, 3상 고정좌표계를 α, β 로 표시되는 2축 고정좌표계로 변환하는 관계는 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러나, 유도전동기의 동작특성을 해석하기 위하여 모델링할 때 회전자 변수를 고정자 좌표계로 변환하여 좌표계를 통일시키는 것이 편리하다. 따라서 좌표변환은 고정자측의 1상당 권수 N_s 와 회전자측의 등가권수 N_r 의 비 $n(=N_s/N_r)$ 와, 고정자 좌표계의 기준축(α 축 또는 β 축)에 대한 회전자의 위치 θ_r 을 고려하여 회전자측 변수를 고정자측으로 변환하면 다음과 같이 나타낸다.

2.2 동기좌표 모델링

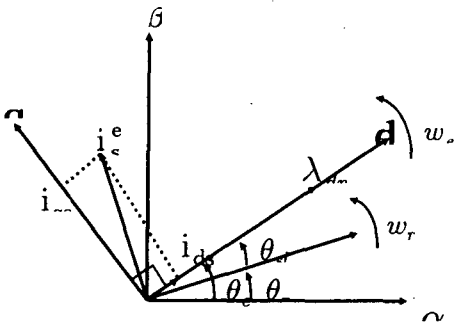


그림 1. 고정 좌표계와 동기회전 좌표계의 관계

전동기로부터 측정하고 θ_{sl} 은 전동기 상수를 이용하여 계산한 다음 다시 θ_r 을 전항 보상방법으로 θ_e 를 얻을 수 있다. 회전자 쇄교자속 및 고정자 전류의 벡터도를 나타내면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr} - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{ds} - w_{sl} \lambda_{qr} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qr} - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{qs} + w_{sl} \lambda_{dr} = 0 \quad (8)$$

타여자 직류전동기와 같은 제어특성을 얻기 위해서 회전자 쇄교자속을 d 축에 일치시켜 제어하는 것이 바람직하므로 이 관계를 식 (7),(8)의 첫 번째 식에 적용하면 다음 식(9)와 식 (10)과 같이 된다

$$\lambda_{qr} = 0, \quad \frac{d\lambda_{dr}}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$\tau_r \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + \lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (10)$$

2.3 유도 전동기 벡터제어

동기속도로 회전하는 d-q좌표축, 고정자에 고정된 $\alpha-\beta$ 좌표축과 회전자의 기준축을 나타내면 다음과 같다. 여기서 고정자의 α 축을 기준으로 하는 d 축의 회전각 θ_e 는 그림 2의 블록도를 나타내었다.

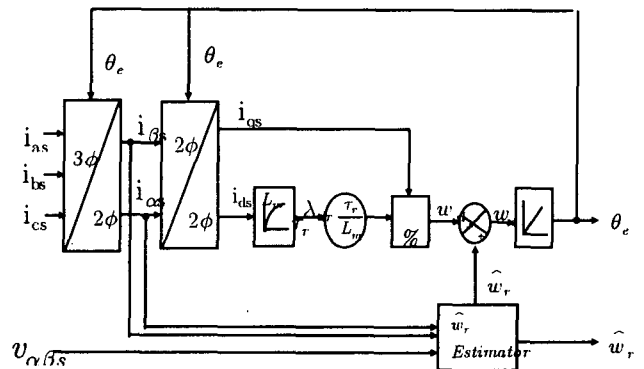


그림 2. 자속각 연산 블록도

전동기-부하 시스템 방정식은 식 (11)에 나타낼 수 있다.

$$T_M = J \frac{dw_m}{dt} + B w_m + T_L \quad (11)$$

여기서 w_m 은 전동기 회전자의 기계적 각속도 이므로 전기적 각속도 w_r 에 의해

$$w_m = \frac{2}{P} w_r \quad (12)$$

식 (11)의 유도전동기 발생토크 T_M 은 고정자의 q

축 전류 i_{qs} 와 회전자의 쇄교자속 λ_{dr} 만의 함수라는 것을 알 수 있다. 그러므로 λ_{dr} 을 일정한 값으로 유지하고 i_{qs} 를 제어하면 빠른 토크제어 특성을 얻을 수 있다.

또, 식 (13)에서 알 수 있는 바와 같이 유도전동기에서 고정자의 d축 전압 및 q축 전압은 각각 역기전력항을 포함하고 있다. 이 항은 제어성능을 저하시키며 이를 고려하게 되면 제어 알고리즘이 복잡하게 되므로 고정좌표계에서 전압은 및 등가회로에서와 같은 관계를 유지하면서 제어가 되도록 고려하면 인버터에 대한 d축 및 q축 지령 전압은 식 (13)에 대해 각각 d축 및 q축의 교차 성분을 보상하여 제어한다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p(L_r i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr})$$

= d축 PI전류제어기의 출력 (13)

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + pL_r i_{qs}$$

= q축 PI전류제어기의 출력 (14)

2.3 회전자의 전압 모델 속도추정기

유도전동기 속도 센서리스 벡터제어 방식은 고정자 전류와 전압값에 의해 자속을 추정하고, 전류와 추정자속값을 이용하여 회전자 속도를 추정하는 방식이다. 따라서 속도 센서리스 벡터제어 방식의 동작특성을 향상시키기 위해서는 정확한 자속추정이 요구된다.

본 논문에서는 보다 넓은 속도범위에서 정확한 회전자 자속을 추정하기 위해 개선된 자속추정기를 적용하여 정밀도가 높은 자속추정 알고리즘을 제시하고, 또한 추정된 자속값을 이용한 회전자 속도추정기를 구성하여 회전자 속도를 추정하고자 한다.

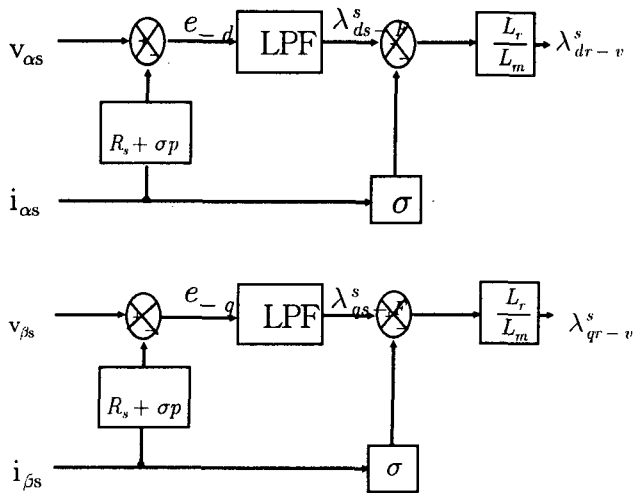


그림 3. 전압모델 자속추정기

그림 3의 회전자 자속추정 과정을 살펴보면, 고정자 전압의 적분항을 순수 적분기 대신 저역통과 필터로 구성한 전압모델 자속추정기를 구현하여 자속을 추정하고, 전압모델 자속추정기로 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결기 위하여 폐루프 적분 방식의 자속보상알고리즘을 도입하여 필터의 차단주파수를 높이고 이를 통해 드리프트 문제를 해결하며, 동시에 PI제어기를 이용하여 자속 추정시 오차를 적절한 크기로 보상하여 자속의 크기가 변화하는 상태에서도 왜곡을 최소화시켜 정밀도 높은 회전자 자속을 추정하였고, 추정 자속과 역기전력의 관계를 그림 4에 나타내었다. 또한, 속도 연산기에 관한 시뮬레이션도를 그림 5에 나타내었다.

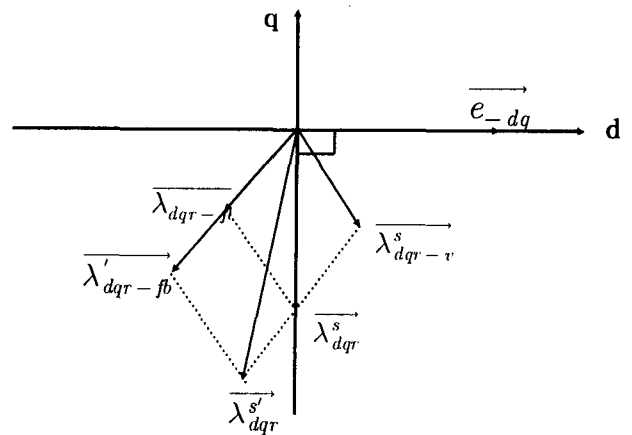


그림 4. 추정자속과 역기전력의 벡터도

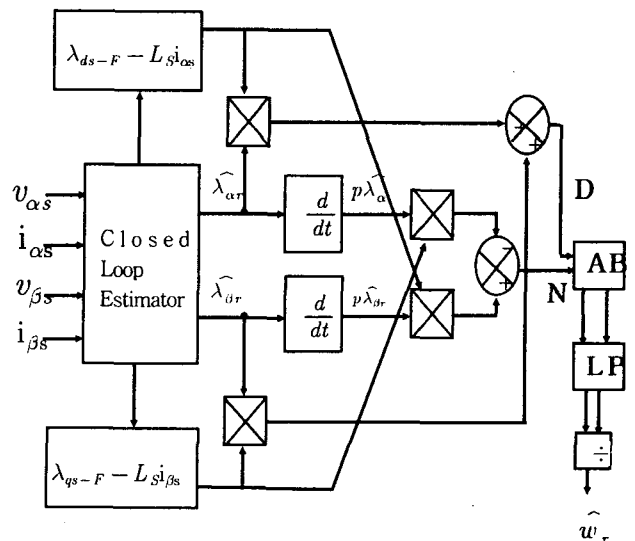


그림 5. 속도연산기

그림 6은 마이크로프로세서는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로서 속도제어, 전류제어, 입출력제어 등을 담당하게 된다. 시스템 제어에 필요한 내부적인 시간을 계산하여 각종 입력 데이터 및 측정 데이터를 바탕으로 많은 연산을 수행하고 그 연산결과에 따라 인버터에 제어신호를 출력하며, 시스템의 제어상태를 외부로 출력하기도 한다. 이와 같은 내부적인 연산처리는 대부분 부동소수점 연산을 행하며 또한 매우 고속의 처리를 요구하므로, 본 시스템에서는 이러한 성능을 가진 Texas Instrument사의 32bit DSP 소자인 TMS320C31을 사용하였다.

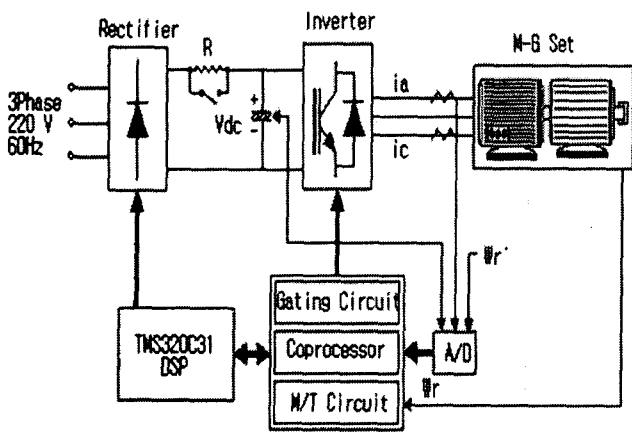


그림 6. 전체시스템의 구성

인터페이스는 마이크로 프로세서 제어와 전력변환 제어 사이에 동작지령이나 검출신호 등을 상호 전달하고, 콘트롤러가 외부에 상태를 출력하거나 외부에서 콘트롤러에게 각종 지시를 내릴 수 있는 입·출력 기능을 수행하는 부분이다. CPU 주변에는 클럭발생회로, 메모리, 리셋회로, 어드레스 및 데이터버스 버퍼 등으로 구성되는 CPU 관련 기본회로들과 coprocessor가 설치되어 있다. 여기서 Coprocessor는 ADMC201을 사용하였으며 이는 외부에서 측정된 전압, 전류의 아날로그 신호와 속도지령을 Coprocessor안에 내장되어 있는 ADC를 통하여 마이크로 프로세서에 공급하며, 데드타임을 처리하는데 사용된다.

3. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 전류·전압모델 자속 추정기에 의해 추정된 자속 값을 폐루프 자속보상기를 통하여 속도 연산기에 적용함으로써 시스템의 유용성과 성능을 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기는 5[HP], 220[V], 60[Hz], 4극이며, 정격속도는 1730[rpm]의

사양을 이용 하였다.

그림 7은 정·역 운전시 폐루프 자속 추정기에 의해 추정된 자속을 살펴보기 위한 시뮬레이션 파형이다. 회전자 추정속도는 $\hat{\omega}_r$ 이고 추정된 d축 및 q축 자속은 λ_{dr}^s 과 λ_{qr}^s 이다. 전동기를 무부하 상태에서 기준 속도 400[rpm]로 램프 기동하고, $t = 0.5[\text{sec}]$ 에서 기준 속도를 -400[rpm]으로 램프 변화시키며, 다시 $t = 1.3[\text{sec}]$ 에서 이를 400[rpm]으로 램프 변화시켰을 때의 응답특성을 시뮬레이션한 결과 파형이다.

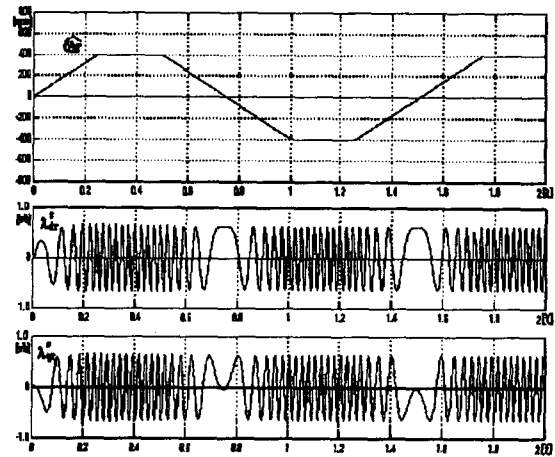


그림 7. 정·역 운전시 자속추정 특성

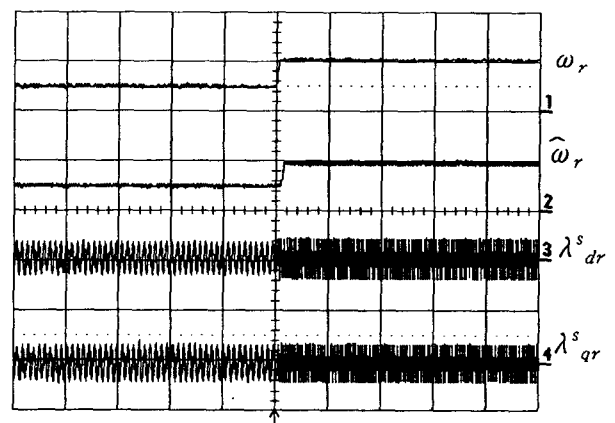


그림 8. 기준속도 변화시 추정속도

그림 8은 ω_r^* 을 500[rpm]에서 1000[rpm]으로 가변하였을 때 추정한 회전자 속도파형과 폐루프 자속 추정기에 의해 추정된 d축 및 q축 자속파형이다. 속도 추정기에서 추정한 회전자 속도 $\hat{\omega}_r$ 이고, 폐루프 자속추정기에 의해 추정된 자속은 λ_{dr}^s 과 λ_{qr}^s 이다. 기준속도 가변시 원활하게 자속추정이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 유도 전동기의 속응 제어와 토크 제어. 하기위해서 회전자 자속 추정 시 페루우프 자속크기의 보상 알고리즘을 적용하여 필터의 차단 주파수를 높이고, 추정자속의 오차를 적절한 크기로 보상하여 자속의 크기가 변화하는 상태에서도 왜곡을 최소화 시켜 정밀도 높은 자속을 추정하였다. 고정자 전류와 추정된 자속을 이용한 회전자 속도 추정기를 구성하여 속도추정에 의해서 속응제어와 토크제어를 원활하게 수행할 수 있게 된 것을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Ohtani, N. Takada, and K. Tanaka, "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", IEEE Trans Indus Appli., vol 28, no. 1, pp. 157~164, 1991.
- [2] P. L. Jansen, Robert D. Lorenz, "Observer-Based Direct Field Orientation : Analysis and Comparison of Alternative Methods", IEEE Trans Indus Appli., vol 30, no. 4, pp. 945~953, 1994.
- [3] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers", IEEE Trans Indus Appli., vol 28, no. 5, pp. 1054~1061, 1992.
- [4] J. HU and B. WU, "New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux Over a Wide Speed Range", IEEE PESC'97, pp. 1075~1081, 1997.

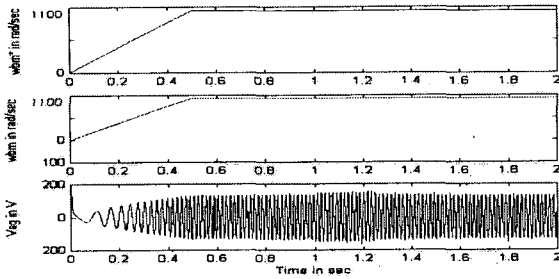


그림 9. 부하기준속도 변화 가변시 응답특성

그림 10은 부하 토크를 스텝으로 변동시켰을 때의 과도응답 특성을 나타내는 실험 파형이다. 기준속도는 1000[rpm]로 일정하게 유지하면서, 무부하에서 정격부하의 1/2부하로 스텝 증가시키고, 다시 무부하로 스텝 감소시킨 경우 회전자 속도 추정기에 의한 구동 시스템의 부하특성을 보여주고 있다. 엔코더에서 측정된 회전자 속도 ω_r , 디지털 필터를 인가하여 추정된 속도는 $\hat{\omega}_r$, 토크분 전류 i_{qs} , 고정자 전류는 i_a 이다. 부하토크가 스텝으로 변동하더라도 시스템은 안정되게 응답함을 알 수 있다. 그림 11은 시스템 구동시 각 부분의 속도특성을 나타내고 있으며 양호한 특성을 나타내고 있다,

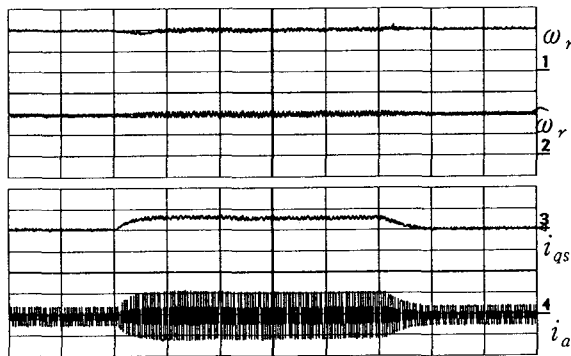


그림 10. 부하가변시 응답특성

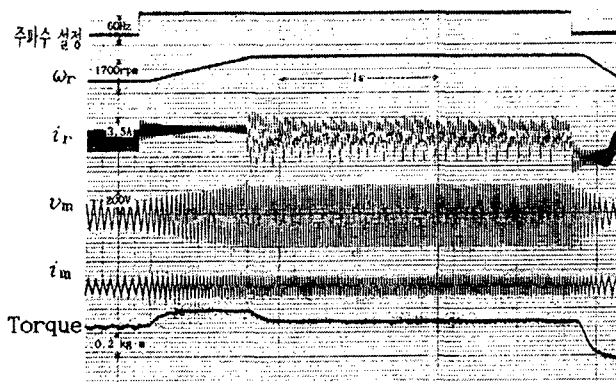


그림 11. 구동 시스템의 부하응답 특성