

고성능, 다기능의 Rolling Mill DC전동기 제어 시스템 개발

김 경환^{○*}, 조 원준^{*}, 박 일영^{*}, 송 승호^{*}, 박 기원^{*}, 최 창호^{*}, 설 승기^{**}, 지 준근^{**}
포스콘 기술연구소^{*}, 서울 대학교 전기공학과^{**}

Fast Response and Versatility in Digitally Controlled Rolling Mill DC Drives

K.H. KIM^{○*}, W.J. CHO^{*}, I.Y. PARK^{*}, S.H. SONG^{*}, K.W. PARK^{*}, C.H. CHOI^{*}, S.K. SUL^{**}, J.K. JI^{**}
POSCON Co. R&D Center^{*}, Dept. of Electrical Eng. Seoul National University^{**}

Abstract— PERISTOR-3000 loaded with 32 bit DSP(Digital Signal Processor) is a technically advanced versatile dc motor controller in applications with very high requirements for rapid response, control accuracy and reliability. The current controller of PERISTOR-3000 is of the predictive type and gives fast control with both discontinuous and continuous current compared to the conventional PI current control. The speed controller gain is compensated to improve response behavior. PERISTOR-3000 communicates with its host computer, POS-TAR-3200, or any IBM or compatible PC and can be controlled. Dedicated monitoring system for MMI is introduced.

1. 서 론

최근 산업용 전동기의 가변속 구동시스템이 기존의 DC 드라이브에서 벡터 제어 인버터와 같은 AC 가변속 구동시스템으로 대체되는 경향이 점차 확산되고 있다. 제철산업의 Mill 드라이브의 경우도 AC 가변속 구동 시스템은 DC 보다 응답성이 빠르고, 에너지 효율도 높으며, 무엇보다도 유지 보수비용이 최소 DC 경우의 10% 정도라는 장점을 가지고 있다.

그러나 Mill 드라이브의 경우, 기존의 DC 구동시스템이 설치되어 운전중인 제조라인이 AC 로 대체되는 경우는 거의 없다. 따라서 기존의 DC 전동기를 사용하고있는 공장에서는 생산량을 늘리고, 보다 양질의 제품을 생산하기 위해서 고성능

DC 드라이브를 계속 요구하고 있으며, 이러한 보수적 경향은 DC 드라이브의 시장을 여전히 증가시키고 있다. 실제로 1993년도의 미국의 Rolling mill 드라이브의 시장규모는 DC가 \$650백만/년, AC가 \$580백만/년 이었으며, 전동기의 경우도 지난해 DC 전동기가 AC 전동기보다 많이 사용되었다[1].

한편 제철 플랜트의 Mill 구동용 전동기 드라이브는 여러대가 상위 호스트컴퓨터와 1:N 으로 연결되어 다수의 전동기를 연동운전하며 연속으로 제품을 생산한다. 따라서 드라이브간 및 상위 컴퓨터와의 고속 데이터 통신이 필수적이고 제품의 품질향상을 위해 고성능, 고신뢰성이어야 한다. 또한 유지 보수의 편리성을 위해 뛰어난 MMI(Man Machine Interface)기능 그리고 상위롤(Upper roll)과 하위롤(Lower roll)을 별개의 드라이브로 제어할 때 두 롤 사이의 토오크 균형을 제어하기 위한 로드밸런스(Load-Balance) 제어, 스텐드간의 장력을 제어하는 Droop제어등의 각종 보조제어 기능을 가져야하고, 수 천KW급의 대용량이 가능하여야 한다.

이러한 제철플랜트의 Mill 구동용 DC전동기 구동시스템은 아직도 대부분 외국제품에 의존하고 있으며, 실제로 POSCO에서도 국산제품은 전무한 실정이다. DC전동기의 수명이 거의 반영구적인 것을 감안하면 가변속 DC전동기 구동시스템은 AC로 대체 되기까지 수 십년 이상의 상당한 시간 동안 사용될 것으로 전망되며, 따라서 국내 제철산업의 노후된 생산공정의 현대화는 물론 중국을 비롯한 동남아로 제철플랜트를 수출하기 위해서 상위 호스트컴퓨터와 인터페이스가 가능한 고성능, 다기능, 고신뢰성의 Mill 구동용 DC전동기 구동시스템의 국산화개발이 절실히 요구되어져왔다.

당사는 POSCO에서 축적한 Mill 드라이브에 대한 경험을 바탕으로 전류지령치를 2.77 msec 이내에 오버슈트(Overshoot) 없이 추종할 수 있는 고성능 DC전동기 구동시스템을 개발하여 최대 1750마력의 주기Mill을 비롯하여 100여대의 전동기가 인동운전되는 Bar Rolling Mill Line에 적용하였다. 그림1.은 당사제품을 적용하여 자동차용 판스프링을 생산하고 있는 Bar Mill Line중의 일부공정인 Finishing Mill부분이다.

본고에서는 당사가 개발한 고성능 DC전동기 제어 시스템에 대해 기술한다.

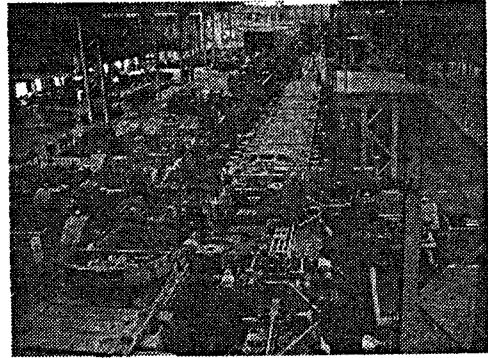


그림.1 Bar rolling mill line

2 시스템의 구성

그림2.는 당사가 개발한 Mill 구동전용의 DC전동기 제어장치인 PERISTOR-3000의 전체 구성도이다. 32비트 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 전류지령치를 5.5msec 이내에 추종할 수 있는 고성능의 전류제어 알고리즘을 구현하였으며, 전동기의 속도 및 전압 그리고 전류제어를 비롯한 Mill구동에 필요한 각종 보조제어 기능에서 Thyristor의 게이트신호 발생까지 모두 소프트웨어로 처리하였다.

기본적으로 33점의 디지털 I/O를 가지며 확장 가능한 구조로 되어있다. 사용자가 프로그램 할 수 있는 3 채널의 아날로그 입력을 가지고 있으며, 또한 4 채널의 디지털-아날로그 컨버터를 통하여 사용자가 170개의 제어변수중 임의의 제어 변수를 출력 할 수 있도록 설계되어 있다. 트레이스 메모리는 사용자가 선택한 제어변수에 대해 55 μ sec의 샘플링시간으로 고장 전후의 상세한 값들을 저장하고 있다. 상위 호스트컴퓨터와의 인터페이스를 위한 통신포트를 가지고 있으며 IBM PC와의 통신을 위한 RS232C 포트를 가지고 있다.

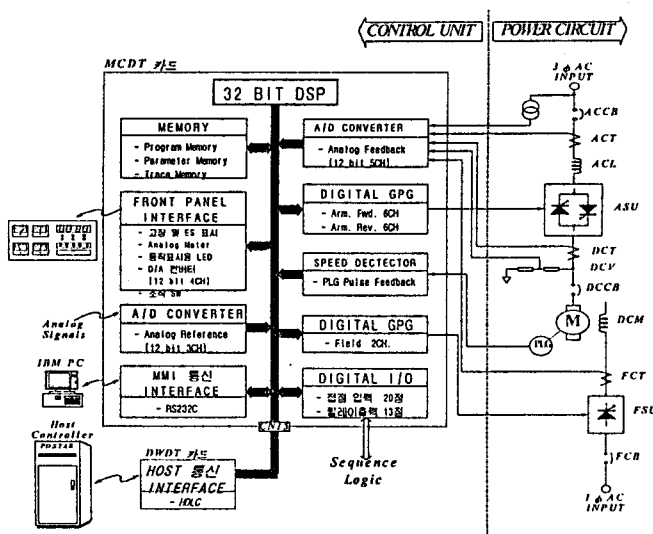


그림.2 PERISTOR3000 시스템 구성도

3 호스트컴퓨터와의 통신

당사의 DC전동기 구동시스템인 PERISTOR3-000은 전용의 호스트컴퓨터인 DDC(Direct Digital Controller),POSTAR3200,에 그림.3과 같이 1:N 으로 연결되어 DDC로 부터 속도,전류, 전압등의 여러가지 지령치를 수신하고, 반대로 각각의 DC 드라이브는 전동기의 실제 속도, 전압, 전류등을 DDC에 전송하며 운전된다. 한편 DC 드라이브는 상위 DDC와 수백 미터이상 떨어져 있으며 노이즈등, 공장환경이 매우 취약하므로 이것들을 고려한 통신 제어시스템의 설계가 필요하다.

그림.4는 PERISTOR-3000이 전용의 상위 호스트컴퓨터인 당사의 POSTAR3200과의 데이터 통신을 위한 통신제어 구성도이다. 통신을 담당하는 CPU는 SIU (Serial Interface Unit)가 내장된 통신전용 인칩 마이크로 프로세서인 인텔사의 8344를 사용하였으며 DC 드라이브측의 DSP와 DPRAM을 통해 메모리를 공유하고 있다.

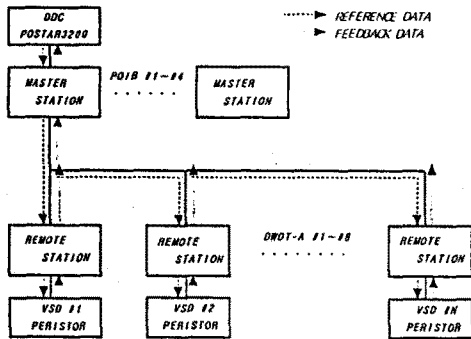


그림.3 DDC와의 NETWORK 구성

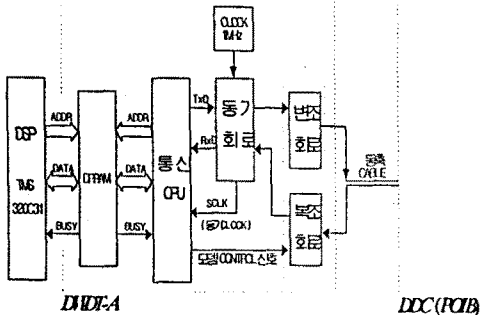


그림.4 통신 제어 Block diagram

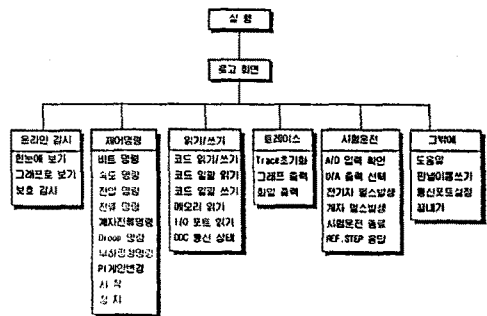
프로토콜은 HDLC(High Level Data Link Communication) 를 이용하였으며, 변조방식은 1 MHz의 기본주파수를 데이터의 변화에 따라 주파수 분할하는 f/2f 변조방식을 이용하였다. DPRAM의 더블엑세스에 대한 처리는 각각의 CPU가 DPRAM의 비지(Busy)신호를 받아 인터럽트로 처리한다. 통신의 기본 사양은 표1.과 같으며 관련 소프트웨어의 구성은 참고문헌[13]에 표현되어 있다.

통신 Protocol	HDLC
Data Link	Multipoint
접속방식	1 : N
전송방식	반이중 BIT SERIAL
기본전송속도	1 Mbps
전송거리	최대 1 km
전송 CABLE	동축 Cable
변조방식	1/2f (Biphase-M)
에러검출	CRC (16BIT)

표.1 통신 기본사양

4. 전용의 모니터링 시스템

사용자 위주의 보다 편리한 MMI(Man Machine Interface)를 위해 사용자가 일반 노트-북 컴퓨터를 이용하여 전동기및 PERISTOR3000을 감시, 제어할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 그림.5와 같은 풀-다운 메뉴방식의 구조를 가지며 다음과 같은 특징을 갖는다.



□ □ 표시는 비드모형 수동 및 자동 모드.

그림.5 MMI Pull-down 메뉴

■ 온-라인 감시

전동기의 제어상태를 온-라인으로 보여준다(그림.6). 윗 부분의 시스템 회로도도 전동기를 포함한 시스템 전반의 제어상태 및 동작상황을 나타내고 아랫부분은 사용자가 선택한 항목에 대해 그 순시값을 막대 그래프로 표시한다.

■ TRANDING GRAPH

전동기의 실제속도, 전압, 전류를 비롯하여 170여가지의 항목들의 순시파형을 그래프로 출력한다(그림.7). 샘플링 시간이 최소 55μsec이고 그래프의 상한값과 하한값을 조절하는 수직확대 기능을 가지므로 사용자는 오실로스코프가 필요없이 원하는 항목을 보다 편리하고 자세히 관찰할 수 있다.

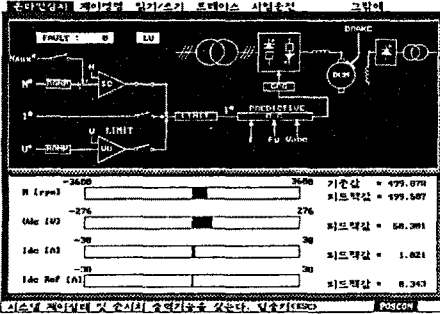


그림.6 온-라인 감시화면

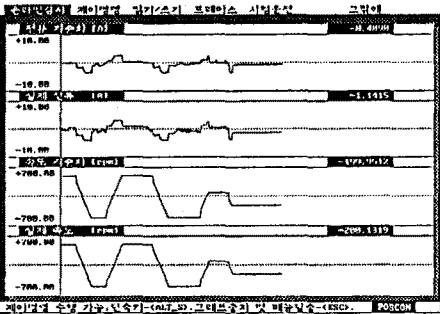


그림.7 TRANDING GRAPH 화면

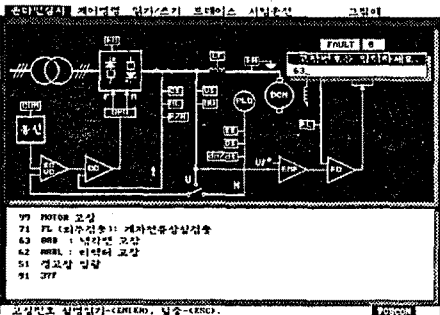


그림.8 고장감시 및 진단 화면

■ 고장감시 및 진단

전동기 및 제어시스템에 고장이 발생하면 경고 메시지를 통해 고장발생을 나타내며, 고장의 종류와 그 원인 및 조치방법을 상세하게 알려준다(그림.8).

■ TRACE

고장이 발생하면 사용자가 선택한 제어변수에 대해 55μsec의 샘플링 시간으로 고장 전후의 상세한 값들을 저장하고 있는 트레이스 메모리의 값들을 화일 또는 그래프로 재생할 수 있다(그림.9). 따라서 고장의 원인을 분석하거나 인텔리전트 고장진단의 데이터로 활용 할 수 있다.

■ 제어 및 읽기/쓰기

사용자가 IBM PC로 전동기를 제어 또는 시험운전할 때 필요한 메뉴를 제공하며 이때 사용자는 속도제어기 또는 전압제어기의 PI 게인을 실시간으로 조정하며 전동기의 제어상태를 감시할 수 있기 때문에 제어기의 최적게인을 쉽게 설정할 수 있다. 또한 사용자가 각종 제어정수[3]들을 입력하거나 일괄로 읽기/쓰기를 할 수 있는 메뉴를 제공하며 아나로그 I/O, 디지털 I/O, 메모리, 그리고 상위의 통신상태 등을 보여준다.

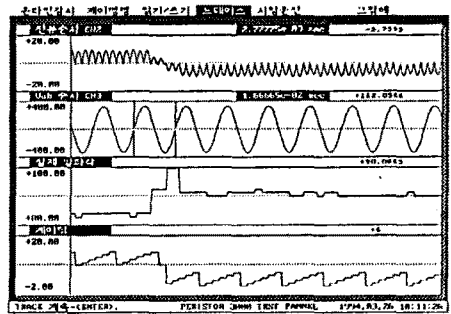


그림.9 TRACE 화면

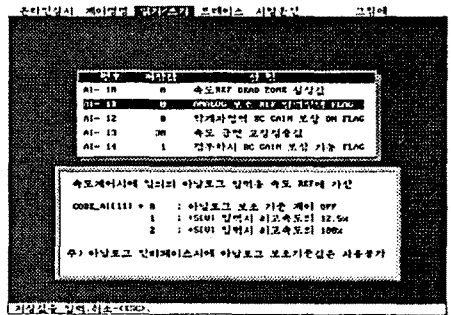


그림.10 코드 읽기/쓰기 화면

5. 고성능 전류 제어

전동기의 안정한 속도제어를 위해서는 빠른 전류응답특성이 필수적이다. 특히 축이 길어서 상당한 토션(Torsion)을 갖는 압연기와 같은 부하의 안정한 속도제어를 위해서는 더욱더 고성능의 전류제어가 요구된다.

한편 싸이리스터 컨버터로 구동되는 DC전동기는 컨버터의 출력전압(또는 점호각), 전동기의 속도 및 정수에 따라 다르지만 일반적으로 정격전류의 약 10% 이하부터, 크게는 약 40% 정도까지 불연속 전류모드로 운전된다. 전류의 불연속 운전구간에서는 전류가 연속인 경우와는 달리 모델링이 어렵기 때문에 기존의 전류제어는 단지 연속 전류 운전모드만을 고려한 PI제어기를 사용하였다. 그러나 이러한 제어기는 전류의 불연속모드에서 컨버터의 비선형 특성때문에 전류응답성이 느려지게 되어 결과적으로 시스템의 동특성을 저하시킨다[4].

컨버터의 이상적인 전류응답특성은 전류지령치가 변화했을때 전류의 연속,불연속모드에 상관없이 싸이리스터의 한 도통모드인 60° (2.77msec, 360Hz)이내에 오버슈트(Overshoot) 없이 전류지령치를 추종하는 것이다.

당사는 컨버터의 수학적 관계식을 기본으로 한 예측전류제어 방식으로 이러한 고성능의 전류 응답특성을 구현할 수 있는 고성능 전류제어기를 개발하였다. 이 전류제어기는 기존의 PI전류제어기와 비교할때 어떠한 운전조건에서도 최적의 토오크 응답특성을 얻을수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림.11는 PERISTOR-3000의 예측전류제어기

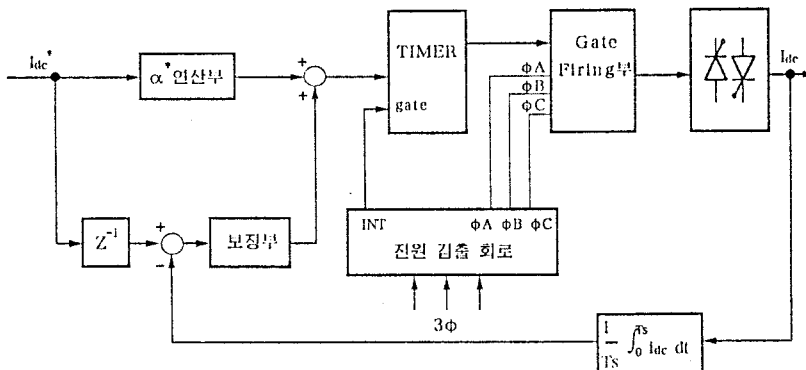


그림.11 예측전류제어기의 Block diagram

의 블럭도이며 제어원리는 다음과 같다.

그림12.에서 $\alpha < \omega t < \beta$ 의 구간에서 전원전압이 전동기에 가해지게 되는데 이때 식(1)의 전압방정식이 성립한다.

$$V(\omega t) = R_a i(\omega t) + \omega L_a \frac{di(\omega t)}{d(\omega t)} + E_g \quad (1)$$

$$V(\omega t) = V_p \sin(\omega t); E_g = Kn$$

여기서

- V motor terminal voltage
- E_g motor converter electromotive force(CEMF)
- R_a lumped armature resistance
- L_a lumped armature inductance
- K CEMF constant
- n motor speed
- V_p peak supply voltage

주어진 α 에 대하여 식(1)의 해를 구하면 전류가 연속 또는 불연속인가에 따라 다음과 같이 표현된다.

(전류 연속시)

$$i(\omega t) = \frac{V_p}{Z} \sin(\omega t - \phi) - \frac{E_g}{R_a} + \frac{V_p}{Z} 2 \sin \frac{\pi}{6} \cos(\alpha + \frac{\pi}{6} - \phi) \cdot \frac{e^{-\frac{R_a}{\omega L_a}(\omega t - \alpha)}}{1 - e^{-\frac{R_a}{\omega L_a} \frac{\pi}{3}}} \quad (2)$$

(전류 불연속시)

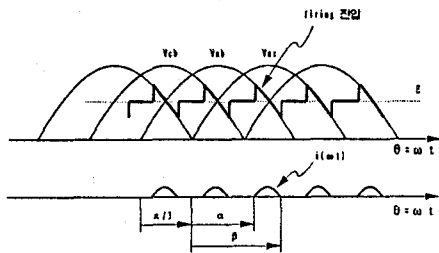
$$i(\omega t) = \frac{V_p}{Z} \sin(\omega t - \phi) - \frac{E_g}{R_a} - \left[\frac{V_p}{Z} \sin(\alpha - \phi) - \frac{E_g}{R_a} \right] e^{-\frac{R_a}{\omega L_a}(\omega t - \alpha)} \quad (3)$$

식(2),(3)은 $\alpha < \omega t < \beta$ (연속전류모드의 경우 $\beta = \alpha + \pi/3$)의 구간에서는 실제 전동기에 흐르는 순시전류를 표현하고 있다. 따라서 식(2),(3)의 60° 동안의 전류평균값이 전류지령치와 일치하는 점 효과 α 를 알면 고응답의 전류제어가 가능하게 된다. 그림.11의 점효과 연산부에서는 점효과 α 를 식(4)와같이 연산한다.

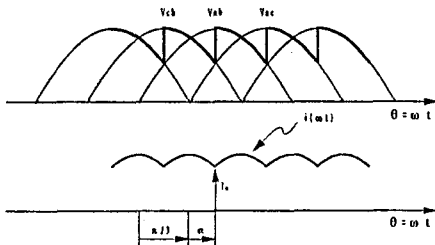
$$\alpha = \begin{cases} \cos^{-1} \frac{\pi(E_g + R_a I_{ref} + \Delta I K_d)}{3V_p} & \text{전류불연속} \\ \cos^{-1} \frac{E_g}{V_p} + \frac{\pi}{6} \left(1 - \frac{I_{ref}}{I_{oc}}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{전류연속} \end{cases} \quad (4)$$

보정부는 잘못된 전동기 정수값에 의한 정상상태 에러를 제거한다[13].

그림.13는 예측전류제어의 실제 시험결과이다. 보이는 바와 같이 전류의 연속, 불연속모드에 상관없이 2.27msec 이내에 지령치를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.



(a) 불연속 전류 모드



(b) 연속 전류 모드

그림.12 컨버터의 전압, 전류 파형

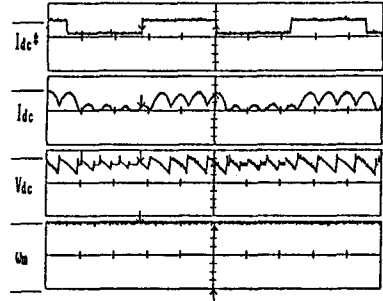


그림.13 전류 응답 특성
(전류기준값 변화 주기 : 11 msec)

6. 고성능 속도 제어

6.1 Spindle Torsional Vibration Control

제철플랜트의 압연기의 부하구조는 그림.14와 같이 Multi-mass 형태로 구성되어 있다. 일반적으로 압연기에서 사용되는 압연기의 기계적 공진 주파수는 수Hz~수십Hz로, 이러한 주파수에서 속도제어계는 불안정 하게 되기 쉽다. 종래에는 이 문제를 해결하기 위하여 속도제어기의 게인을 낮추는 등의 초보적인 방법을 사용하였으나 이것은 만족스런 특성을 얻을 수 없었다. 최근에는 현대제어이론을 응용하여 이 문제점을 개선하기 위한 많은 연구가 계속되고 있다[11] [12].

당사는 상태기환 제어기법을 이용하여, 축진동을 억제할 수 있는 속도제어기를 구현하였다. 그림.15는 그 제어블록도이며, 그림.16은 실제 실험결과이다. PI 제어기와 비교할때 과도상태에서 진동이 없고 오버슈트없이 목표치에 도달함을 알 수 있으며 결과적으로 속도 제어계의 특성이 향상됨을 알 수 있다.

6.2 Load Balance Control

그림.14에서 두대의 전동기가 각각 별개의 제어 장치에 의해서 속도제어모드로 운전되고 있을 때, 실제 압연중 상위롤과 하위롤의 토크를 균등하게 제어 할 필요가 있는데 이것이 로드밸런스제어이다. 그림.17는 PERISTOR-3000의 로드밸런스 제어 블록도이다.

6.3 속도 제어기의 Gain 보상

PERISTOR-3000의 속도 제어기는 PI 제어기를 기본으로 여러 운전조건에 따라 PI Gain이 가변되는 구조를 가지고 있다. 이들 기능을 간략히 설명하면 다음과 같다.

속도 제어기의 게인은 2 단계로 설정 가능한 구조를 가지고 있어 재료가 처음 롤(Roll)에 진입할 때와 같이 급격한 부하가 예측되는 경우 높은 게인으로 운전되고 정상 압연모드로 되면 정상 게인으로 운전된다. 또한 전동기가 속도검출의 샘플링 시간동안 약 1개 정도 펄스가 검출되는 초저속으로 운전될 때, 그리고 경부하시 전류 지령치가 정(+), 부(-)로 진동하여 제어계가 불안정할 때는 속도 제어기의 게인을 자동적으로 감소시켜 제어계를 안정시킨다. 약제자 영역에서는 응답특성을 개선하기 위해 자속과 반비례적으로 게인을 증가시키는 구조로 되어 있다.

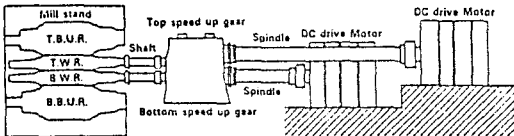
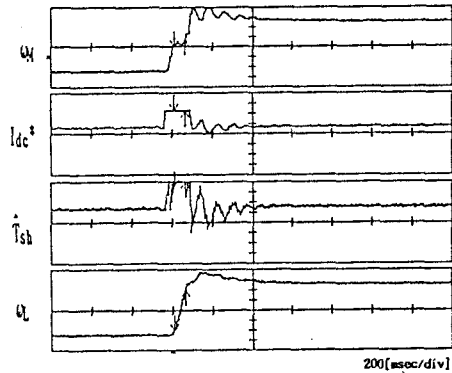
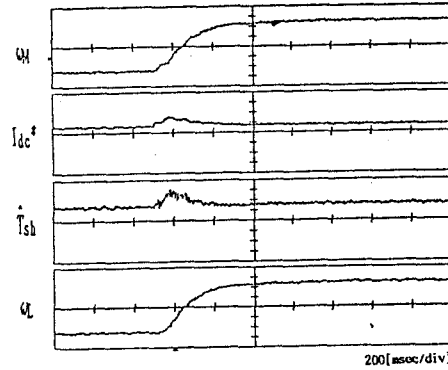


그림.14 압연기의 기계구조



(a) 보상전의 경우



(b) 보상후의 경우

그림.16 속도 응답 특성

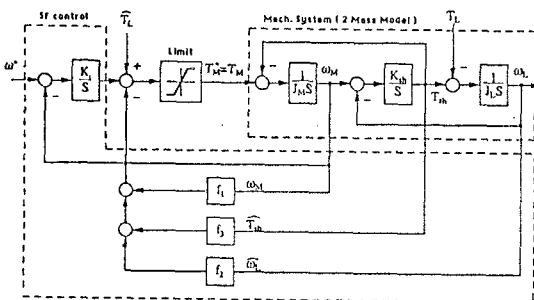


그림.15 축진동 제어 Block diagram

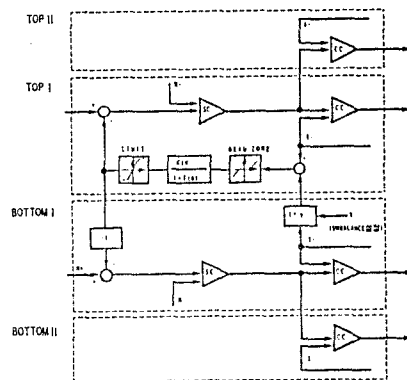


그림.17 Load-balance 제어 Block diagram

7. 결 론

전류저령치를 2.77msec 이내에 추종 할 수있는 예측전류방식의 전류제어기와 계인보상기능을 갖는 속도제어기, 그리고 상위 호스트 컴퓨터와의 통신기능, IBM PC상에서의 감시제어기능및, 전동기의 연동제어에 적합한 각종 보조제어기능을 갖는 고성능 DC전동기 제어장치를 개발하였다.

실제로 자동차용 판스프링을 생산하고있는 BAR Mill Line에 적용하여 상품생산에 성공하였으며, 현재 3000IIP 용량의 POSCO의 Break-down Mill에 적용중이다.

진술한 바와 같이 제철플랜트의 Mill 구동용 DC전동기 구동 시스템은 대부분 수입에 의존하여 왔으며, 따라서 기간산업의 대외의존도 탈피및 제철플랜트의 해외수출 측면에서 크게 기여 할 것으로 기대되며 제지, 시멘트등의 비슷한 공정을 갖는 산업분야에도 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

제철플랜트에서의 DC드라이브는 그의 보수적 경향으로 인해 AC로 대체되기 전까지 오랫동안 사용될 것이지만 AC로의 대체는 필연적이고, Mill 구동 AC Drive 역시 외국 상품에 의존하고 있어 매가와트급까지 가능한 고성능 AC 드라이브에 대한 상품 개발이 절실히 요구된다.

참고문헌

- [1] G.Kuebler, "Mill Drives Battle:AC vs. DC", MetalProducing, vol.33, pp.29-53, Nov. 1993.
- [2] G.Joos and E.D.Goodman, "Modeling the Discontinuous Conduction Mode in Converter-fed Drives," IEEE Trans.Ind. Appl.,vol.IA-21,no 1,pp.274-278,1985.
- [3] G.Joos and T.H.Barton, "Four-quadrant DC Variable Speed Drives Design," IEEE. Proc.,vol. 63, pp.1660-1668, Dec.1975.
- [4] Toshitaro J. Takeuchi, *Theory of SCR Circuit and Application to Motor Control*, TOKYO ELECTRICAL ENGINEERING COLLEGE PRESS, 1968.
- [5] R.Kennel and D.Schroder, "Predictive Control Strategy for Converters," IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, pp.415-422, 1983.
- [6] D.Schroder, H.Warmer, "Predictive Speed and Current Control for D.C. Drives," EPE FIRENZE, vol.2, pp.108-113, 1991.
- [7] 설승기 외, "예측 전류 제어기를 사용하는 압연용 직류전동기 구동 시스템," 대한전기학회 논문지,vol.41, no.12, pp.1387-1396,Dec.1992.
- [8] T. D.Collings and W. J.Wilson,"A Fast-Response Current Controller for Microprocessor-based SCR-dc Motor Drives," IEEE Trans. Ind.Appl., vol.IA-27, no. 5, pp.921-927, Sep./Oct. 1991.
- [9] P.C.Tang, S.S.Lu, and Y.C.Wu, "Microprocessor-Based Design of a Firing Circuit for Three-Phase Full-Wave Thyristor Dual Converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-29, no.1, pp.67-73, Feb. 1982.
- [10] L.A.Schlabach, "Conduction Limits of a Three-phase Controlled Converter in Inversion," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22, pp.298-303, Mar./Apr. 1986.
- [11] T.HARAKAWA and T.KAWAGUCHI, "Digital Control in Iron and Steel-making Processes", Automatica, vol. 29, no.5, pp.1185-1202, 1993.
- [12] 송승호, "A Speed Controller for Torsional Vibration Suppression of 2-mass Motor Drive System", 서울대학교, 석사학위 논문, 1993년 2월.
- [13] 김경환, "제철 PLANT의 고성능 DC DRIVES", 대한전기학회, Vol.43, No.2, pp111-119, FEB. 1994.
- [14] "PERISTOR-3000 사용자 매뉴얼", POSCON 기술연구소, Vol.2, 1994
- [15] "PERISTOR-3000 Reference 매뉴얼", POSCON 기술연구소, Vol.2, 1994
- [16] "PERISTOR-3000 시험운전 매뉴얼", POSCON 기술연구소, Vol.2, 1994