

냉간압연용 1MVA IGBT 인버터의 개발

손요찬¹, 김용석¹, 전석호¹, 정대웅¹, 석줄기¹, 송승호¹, 설승기¹,
권병기², 박기우², 신원창², 조용상², 이진섭², 최창호²
¹서울대학교 공과대학 전기공학부 ²포스콘 기술연구소

A New Approach to Advanced Cold Mill Drive Systems

Yo-ch'an Son¹, Yong-Seok Kim¹, Seok-Ho Jeon¹, Dae-Woong Chung¹, Jul-Ki Seok¹,
Seung-Ho Song¹, Seung-Ki Sul¹, Byung-Ki Kwon², Ga-Woo Park²,
Won-Chang Shin², Eung-Sang Cho², Jin-Seop Lee², Chang-Ho Choi²
¹Seoul National University ²POSCON Corporation

Abstract - 오늘날 철강 냉간압연의 응용분야에서는 고성능의 장력제어와 높은 신뢰도, 역률 개선, 공장의 생산성 향상 등을 요구하고 있다. 기존의 직류전동기를 대체하는 가변속 교류전동기 구동시스템과 고주파 PWM, 그리고 높은 역률을 보장하는 PWM 컨버터에 의해 이러한 요구사항들은 만족될 수 있다. 이 논문에서는 위에서 언급된 제어요건을 보장하는 철강 생산 설비용 1MVA급 압연시스템을 설명한다. 본 시스템은 하나의 ac/dc PWM 컨버터와 각각 700kW 유도전동기를 구동하는 두대의 PWM 인버터로 구성되어 있다. 제어 알고리즘은 TMS320C40 디지털 신호처리 프로세서(이하 DSP) 시스템을 이용하여 구현하였다.

1. 서 론

많은 기계 시스템에서 가변속 교류전동기 구동을 통해 성능과 생산성, 그리고 에너지 효율을 높일 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 가변속 교류전동기 구동시스템은 산업계에 더욱 더 많이 적용되고 있으며, 또한 기존의 직류전동기 구동시스템을 대체하고 있다. 철강 압연분야에서는 공장의 생산성 증가와 비용절감의 측면을 고려하여 인버터로 구동되는 유도전동기를 적용하고자 한 몇몇 시도가 있었다[1, 3]. 압연 분야의 특별한 제어요건을 만족시키기 위해 구동시스템은 넓은 속도의 범위에서 철판에 일정한 장력이 가해지도록 정확한 토오크 제어를 해주어야 한다. 따라서 이는 고성능 장력제어를 보장하는 복잡한 제어방법을 요구한다[4, 5]. 또한 철강 압연처리의 생산성을 증가시키기 위해 전동기의 일정 출력범위는 가능한 한 넓어져야 한다.

최근에는 정류와 동시에 전체 시스템의 동적 성능과 입력 라인의 역률을 향상시키고 회생능력을 가진 ac/dc PWM 컨버터가 요구된다. 이로 인해 변압기와 전선, 그리고 부가적인 전기 기기의 공간

확보에 따른 비용이 낮아지게 된다. 게다가 고성능의 마이크로프로세서에 의해 모든 제어함수를 값비싼 하드웨어가 아닌 소프트웨어로 구현하는 것이 가능해졌다.

이 논문에서는 하나의 ac/dc PWM IGBT 컨버터와 각각 700kW 유도전동기를 구동하는 두대의 PWM IGBT 인버터로 이루어진 고성능 1MVA급 교류 압연 구동시스템을 소개한다. 4대의 인버터를 병렬하여 각각의 전동기의 구동에 사용하며 3대의 인버터를 병렬하여 PWM 컨버터를 동작시킨다. 전동기의 최대 토오크를 발생시키는 일정 출력 영역을 얻기 위한 제어 알고리즘이 사용되었고, 그 결과 1:5 약계자 영역을 얻을 수 있었다[6]. 모든 알고리즘은 향상된 계산능력을 제공하는 TMS320C40 DSP 시스템을 이용해 구현하였다. 이 냉간압연 구동시스템은 광양에 위치한 포항제철주식회사(POSCO)에서 1997년 7월부터 완전 가동될 예정이다.

2. 본 론

2.1 시스템의 구성

그림 1은 냉간압연 라인의 구성도이다. 관심의 대상인 롤링 압연시스템은 payoff reel, tension reel 과, 공정라인(pinch rolls, deflector rolls, side trimmer와 컨베이어 등으로 구성)의 3가지 주요부분으로 이루어져있다. payoff reel과 tension reel의 구동은 pinch roll과 deflector roll 등 다른 구동시스템과 독립적이다. 그러나 이것들은 기계적으로 물려있기 때문에 시동과 정지조건동안 모든 전동기의 속도제어기의 출력은 같은 비율로 증가 혹은 감소해야 전체 공정라인에 걸쳐서 일정한 장력을 제어할 수 있다. 따라서 모든 속도제어기는 속도의 변화와 부하에 의한 외란에 대해 모두 같은 페루프 제어특성을 갖게 하였다.

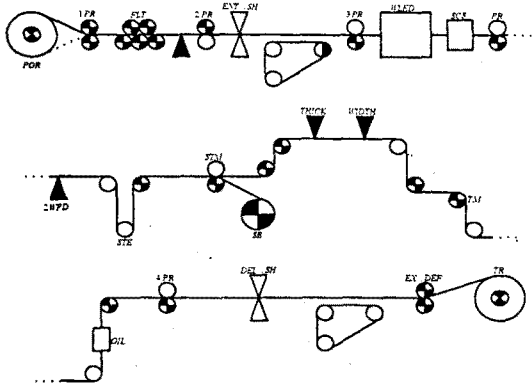


그림 1. Posco 냉간압연 라인의 구성도

2.2 냉간압연 구동시스템

2.2.1 IGBT 인버터의 병렬운전

스위칭 속도와 손실, 편의성의 측면 때문에 전력 변환 분야에서 IGBT 응용분야는 더욱 넓어지고 있으며, 대용량 분야에서 GTO를 대체하고 있다. 그러나 전류용량이 증가함에 따라 주어진 전류용량을 충족시키기 위해서 여러 인버터를 병렬 운전해야 한다. 따라서 본 구동시스템에서는, 그림 2에 나와 있듯이, PWM 컨버터 또는 인버터가 리액터 L_s 를 통해 서로 병렬 연결되어 있다. 리액터의 값은 각 인버터의 부하전류를 평형 시키면서 순환전류가 최소화하도록 선택하였다. 최종 출력전류만이 제어되고 공유 리액터에서의 각각의 전류는 제어되지 않는다. 공간 벡터 PWM[7]에 기초한 PWM기법이 사용되었으며 스위칭 주파수는 대략 2.5kHz이다.

2.2.2 장력제어와 넓은 속도 범위에서의 동작

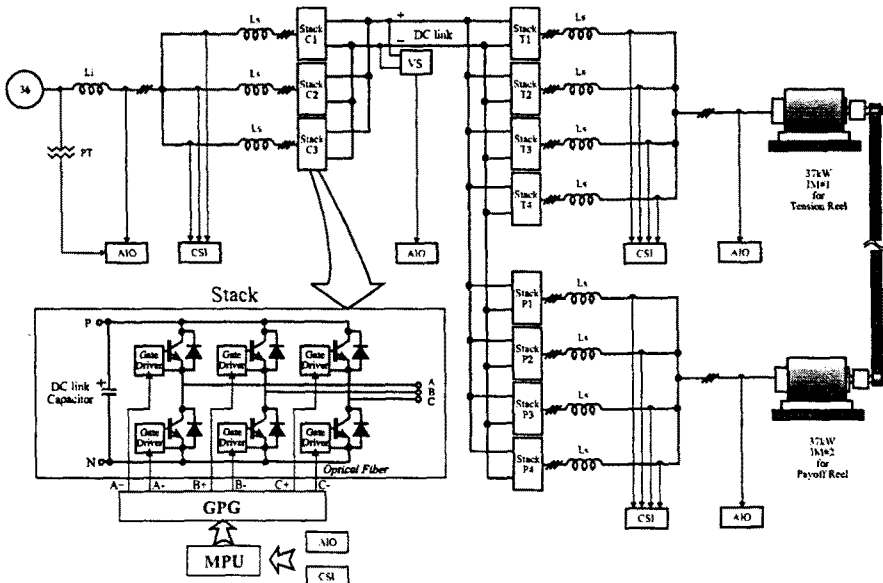


그림 2. 1000 KVA IGBT 인버터 시스템의 구성도

고성능의 토크 제어와 빠른 가감속을 구현하기 위해 회전자기준 직접 벡터제어방식이 전체 동작 범위에서 채택되었다. 또한 회전자 자속 관측기는 저속에서의 전류 모델과 고속에서의 전압모델[8]이 결합된 필터의 개념을 이용하여 설계 되었다. 이 자속 관측기는 고속 영역에서 매개 변수의 영향을 덜 받을 뿐 아니라 저속 영역에서 잡음과 측정 오차에 대해 강인한 특성을 가진다. PWM 인버터의 벡터제어는 운전 중에 속도와 토크를 정확하게 제어할 수 있도록 전류와 전압, 주파수를 자동적으로 제어한다. 속도제어기는 토크 지령치를 발생 시키는데 이것은 순시적인 전동기 전류의 지령치에 관계된 값이다. 순시전류는 고정자 전류와 회전자 자속 벡터를 서로 직각으로 유지하게끔 제어되고 따라서 최대 토크를 발생시킨다.

냉간압연 라인에서 공장의 생산성을 증대시키기 위해 전체 속도 범위에서 가능한 최대 토크를 유지하는 제어방식이 사용되었으며 그 결과 1:5의 약 계자 영역을 얻을 수 있었다. 전류와 전압의 제한된 조건하에서 토크를 극대화하기 위한 전동기의 자속 수준은 전체 약계자 영역에서 최적으로 제어 된다[6].

2.2.3 역률 제어

그림 3은 3상 PWM IGBT 컨버터를 이용한 역률 제어시스템의 구성도이다. PWM컨버터는 그림 2에 나타나 있듯이 직류단을 통해 여러 대의 인버터에 공통으로 연결되어 있다. 모든 인버터는 IGBT 전력소자를 사용하고 각각의 커패시터 뱅크(capacitor bank)를 가지고 있다. 교류 전동기의 유효 또는 무효전력은 직류단 캐패시턴스(bus capacitance)에 의해 공급되고, 시스템의 역률은 전체 속도범위에 걸

쳐서 거의 1이 된다. 그러나 입력 전원의 불균형시에는 컨버터 전달함수의 양의 방향 시퀀스 성분과 입력 전압의 음의 방향 시퀀스 성분을 외적(cross product)한 값으로 출력에서 낮은 차수의 고조파가 발생된다[9]. 만약 원하는 출력이 P^* 이라면 전류 지령치는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^*}{E_m} C \begin{bmatrix} e_a^* \\ e_b^* \\ e_c^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 e_a^* 와 e_b^* 는 각각 고정 좌표계에서 d축과 q축의 입력 상전압이다. C는 다음과 같은 좌표 변환 행렬이다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 E_m 은 동기좌표계에서 저역통과 필터(Low-pass filter)에 의해 처리된 d축과 q축의 상전압의 크기이다. 이러한 제어 기법을 이용하면 무효 전류 지령치 i_d^* 는 전원이 균형시에는 0이 되지만 불균형시에는 출력 전압과 입력 전류의 고조파를 제거하기 위해 0이 아닌 값을 가지게 된다.

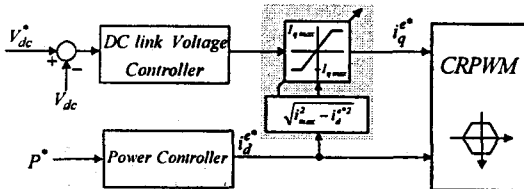


그림 3. 전원의 불균형을 고려한 역률 제어 시스템

2.2.4 DSP의 다중처리기능

모든 알고리즘은 고수준의 병렬처리 기법을 사용하여 높은 계산능력을 제공하는 TMS320C40 DSP 시스템을 이용해 구현하였다. 이는 40MHz의 클럭 속도로 동작하며 초당 40MFLOPS(mega-floating point operations)의 수행능력이 있다. 이 시스템은 랙(rack) 구조로 되어있으며 그림 2와 같이 주 연산처리 부분(MPU ; Main Processing Unit), 아날로그 입출력(AIO), 디지털 입출력(DIO), 게이트 펄스 발생기(GPG)와 전류 공유 인터페이스(CSI)로 구성되어 있다.

2.3 실험 결과

공정 라인에서의 운전에 앞서 제어의 응답과 정확도를 평가하기 위하여 컨버터와 인버터, 유도전동기를 테스트하였다. 전동기 상수를 측정하였으며 측정의 정확도는 여러 실험을 통해 확인되었다. 이 상수값들을 표 1에 나타내었다.

표 1. 유도전동기의 정격과 상수값

정격 출력(kW)	700
정격 전원 전압(V)	600
극수	12
기본 속도(r/min)	240
최고 속도(r/min)	1200
관성 모멘트(Kg-m ²)	360
고정자 저항(Ω)	0.00648
회전자 저항(Ω)	0.00542
상호 인덕턴스(mH)	5.516
순시 인덕턴스(mH)	0.475

그림 4에서 컨버터 초기동시의 각부 파형을 도시하였다. 직류단 전압이 초기 충전시 870V에서 지령치 1070V를 추종하는 동안 d축 전류는 역률 1제어를 위해 0으로 제어된다.

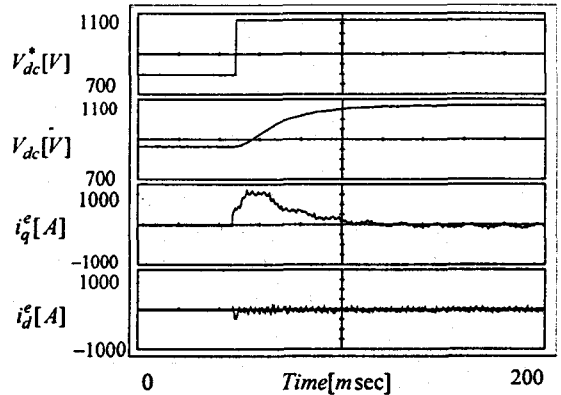


그림 4. 컨버터의 초기 기동

전동기의 속도 지령치 값이 300r/min에서 -300r/min으로 급하게 바뀔 때, PWM 컨버터의 회생 제동시 역률 1 제어 특성을 그림 5에 나타내었다. 전원 전류의 위상은 전원 전압에 대해 180도 차이가 나게되고 직류단 전압이 일정한 수준을 유지하도록 제어된다.

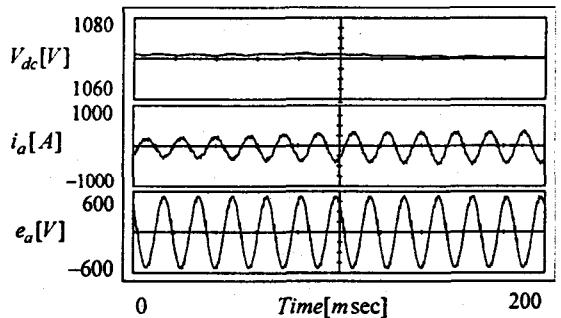


그림 5. 회생 운전시 역률제어

유도 전동기를 정격의 500%로 가감속시킬 때의 제어특성을 그림 6에 나타내었다. 위에서부터 q축 전류, d축 자속, 속도, d축 전류를 도시하였다. 이로부터 모든 속도 영역에서 안정된 운전이 이루어짐을 알 수 있다.

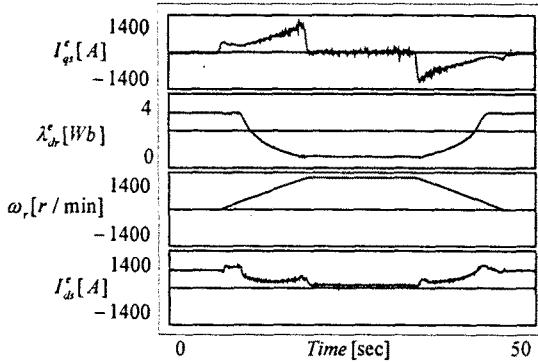


그림 6. 일정 출력 영역에서의 동적 특성

3. 결 론

이 논문에서는 한대의 ac/dc PWM IGBT 컨버터와 각각 700kW 유도전동기를 구동시키는데 필요한 두대의 전압형 PWM IGBT 인버터로 구성된 고성능 1000 KVA 냉간압연 구동 시스템을 설명하였다. 전체 시스템의 용량을 늘리기 위해서 인버터의 병렬운전 시스템이 제공되었다. 전동기의 최대 토크를 발생시키는 일정 출력영역을 얻기 위한 제어 알고리즘이 사용되었다. 모든 알고리즘은 고수준의 병렬처리기술을 사용하여 높은 계산능력을 제공하는 TMS320C40 DSP를 사용하여 구현되었다. 이 냉간압연 구동 시스템은 광양에 있는 포항제철주식회사(Posco)에서 1997년 7월 완전 가동될 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] K. Ishihara et al., "AC drive system for tension reel control", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 1, Jan./Feb., pp.147-153, 1985.
 [2] H. Hakata et al., "Application strategies for AC rolling mill drives", in IAS Conf. Rec., pp.1141-1147, 1991.
 [3] H. Okayama et al., "Large capacity high performance 3-level GTO inverter system for steel main rolling mill drives", in IAS Conf. Rec., pp.174-179, 1996.
 [4] G. Monaco and H. Meyer, "Critical parameters and load cell tension control in Stelco's no. 3 galvanizing line", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-8, no. 6,

Nov./Dec., pp.749-760, 1972

[5] N.A. Ebler et al., "Tension control : dancer rolls or load cells", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 4, July/Aug., pp.727-739, 1993.
 [6] S.H. Kim and S.K. Sul, "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 4, July/Aug., pp.787-794, 1995.
 [7] H.W. Van der Broeck and H.C. Skudelny, "Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, no. 1, pp.142-150, 1988.
 [8] Jong-Woo Choi, Dae-Woong Chung and Seung-Ki Sul, "Implementation of field oriented induction machine considering iron loss", in APEC'96 Conf. Rec., Mar., pp.375-379, 1996
 [9] P.N. Enjeti and P.D. Ziogas, "Analysis of a static power converter under unbalance : a novel approach", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 37, no. 1, pp.91-93, 1990.
 [10] Texas Instrument, "TMS320C4x User's Guide", 1993.