

포항가속기의 2GeV 선형가속기 변처 제어용 스텝 모터 제어기 개발

김성철, 이기선, 노준택, 남상훈
포항공과대학교 가속기연구소

Development of stepping motor controller for Buncher control at PLS 2GeV Linac

S.C.Kim, G.S.Lee, J.T.Noh, S.H.Nam
Postech PLS/PAL

Abstract - 포항가속기의 선형가속기 buncher 및 pre buncher 시스템은 가속기 건설 시에 중국의 IHEP로부터 도입된 것이다. 전체적인 시스템은 완성되었으나, 그 동안 몇 가지의 문제점이 있어, 제한된 조건하에서 사용하였다. 이와 같은 문제점을 해결하여 선형가속기 기계장치를 이용한 연구를 활성화하고 보다 나은 전자빔을 공급해 주기 위하여 일부 기계장치를 포함한 모터 및 구동부, 제어부 등에 대한 성능개선을 하였고 현장 시험과 설치를 완료하였다. 특히 모터는 설치가 간단하고 정밀한 제어를 할 수 있는 5선 식 5상 스텝 모터를 사용하였고, 구동부는 MOSFET을 이용한 정 전류 초핑 방식을 채택하여 크기와 발열량을 줄였다. 그리고, 제어부는 4축의 독립된 유닛이 단일의 RS485 직렬 접속에 의해서 원격으로 제어가 가능하도록 구성하였다.

1. 서 론

포항가속기연구소 선형가속기의 pre injector에서는 전자총을 출발한 초기의 빔 조절을 스텝 모터를 이용하여 한다. Pre injector는 가속기에서 아주 중요한 요소로 전자총을 출발한 전자빔이 가속되기 쉽게 일정한 규격으로 조절하여 주는 역할을 한다. 포항가속기의 pre injector 시스템은 가속기 건설 시 중국의 IHEP로부터 도입된 것으로 모터 회전에 대한 센스가 부정확하여 스텝 모터의 정확한 제어가 되지 않고 제어에 대한 반복 재현이 되지 않았다. 이러한 이유로 pre injector에서 가속기에 대한 연구에 많은 지장을 주어 왔었다. 급변에 이러한 것들을 개선하여 pre injector에서 빔에 대한 연구를 활성화시키기 위하여 설치가 간단하고 정밀 제어가 가능하며 컴퓨터를 이용하여 쉽게 제어 및 감시할 수 있는 스텝 모터 제어기를 개발하였다. 제어기의 개발은 설치가 쉽고 정밀 제어가 가능한 5상 5선 식 스텝 모터를 대상으로 하였다. 가속기의 pre injector 시스템은 buncher phase shifter, buncher attenuator, pre-buncher phase shifter 그리고 pre-buncher attenuator로 구성되는데 이들 4개의 요소를 각각 제어하기 위하여 4개의 독립된 스텝 모터와 이를 각각에 대한 독립된 제어기가 필요하다. 가속기는 특성상 전자총, 전자석전원장치, modulator 등 다양한 장치에 대한 유기적인 원격제어를 하여야 한다. 이번에 개발된 스텝 모터 제어기는 로컬 모드에서의 매뉴얼 제어는 물론 직렬통신을 이용하여 원격 제어도 가능하도록 개발하였다. 본고에서는 당 연구소에서 개발한 2상 및 5상 스텝 모터 제어기에 대하여 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 스텝 모터에서 권선 저항과 인덕턴스

스텝 모터의 권선에는 저항과 인덕턴스 성분이 존재하는데 이 두 가지 요소가 모터의 성능을 제한하는 주된 성분이다. 권선의 저항은 모터에서 발열과 전력손실에 가장

큰 영향을 준다. 권선과 모터의 크기 및 온도 특성은 권선에서의 최대 허용 전력 소비량을 제한한다. 전력손실은 $P_R = R I_M^2$ 이다. 모터를 최대 허용 전력 소비량에서 사용할 시에 효율적이다. 만약 모터가 최대 전력소비량 이하로 동작한다면 더 작은 크기의 모터로 대체될 수 있음을 의미한다. 인덕턴스는 모터 토크 전류변화를 저지하므로 고속운전을 제한한다. 전압이 인가될 때 전류 증가는 $i(t) = (\frac{V}{R})(1 - e^{-t/(L/R)})$ 로 표현되며 초기에는 $\frac{dI}{dt}(0) = \frac{V}{L}$ 의 비율로 증가하고 최종적으로 $I_{MAX} = \frac{V}{R}$ 값에 도달한다. $t = t_0$ 순간에 인가된 전압이 제거되면 $\frac{dI}{dt}(0) = -(\frac{V}{L})$ 의 초기 비율로 $i(t) = (\frac{V}{R})(e^{-t/(L/R)})$ 로 감소한다. 모터의 토크는 대략 전류에 비례하여 증가하고 최대 토크는 스텝 주파수가 증가하면 감소한다. 모터의 인덕턴스를 극복하고 고속운전을 시키기 위하여 전류 상승비율을 증가시키던지 시정 수를 감소시켜야 한다. 그리고 저항의 증가는 결과적으로 전력 손실을 증가시킨다. 따라서 고속운전을 시키기 위하여 V/L의 비율이 적절 하여야 한다. 따라서 권선을 흐르는 전류는 가능한 한 높은 전압을 사용하고 인덕턴스를 낮게 유지하여야 한다. 인덕턴스와 저항이 낮은 모터가 높은 전류 정격을 가진다.

2.2 스텝 모터의 구동

스텝 모터의 구동회로는 상 권선에 흐르는 전류와 자속 방향을 바꾸어주고 그리고 구동하기 위하여 권선을 통하여 흐르는 전류의 양을 제어하며 고속운전을 위하여 가능한 범위에서 전류의 상승/하강 시간을 짧게 하는 역할을 한다. 스텝 모터를 스텝 시키기 위하여 각 상에 독립적으로 전류가 흐르는 방향을 바꾸어 주어 자속 방향을 변화시켜야 한다. 모터에 흐르는 전류의 방향을 바꾸어 주기 위하여 양방향 혹은 단방향 구동을 하여야 한다.

2.2.1 양방향 구동

전류 방향을 바꾸어주기 위하여 4개의 스위치로 구성된 H-브릿지가 이용된다.(그림 1) 양방향 구동방법은 상당 1개의 권선이 요구된다. 2상 모터는 2개의 권선이 있으며 따라서 연결선은 4개이다.

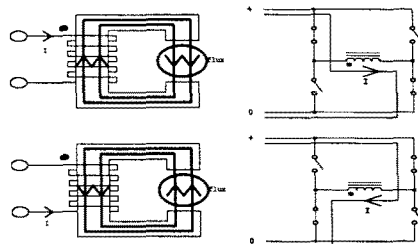


그림 1 스텝 모터의 양방향 구동

2.2.2 단방향 구동

단방향 구동방법은 센타 탭 혹은 상당 권선이 2개로 분리된 모터에서 요구되는 방법이다. 자속의 방향은 전류가 권선의 1/2로부터 나머지 1/2로 옮겨짐으로써 반전된다. 이 방법은 상당 2개의 스위치가 요구된다.(그림 2.) 이 구동방법은 권선의 절반만을 이용하게되어 동일한 출력에서 양방향 구동에 비하여 손실이 2배가된다.

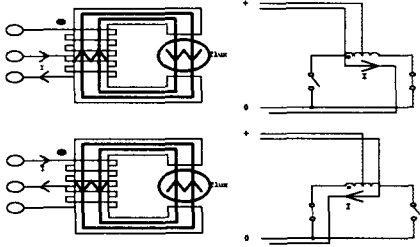


그림 2. 스텝 모터의 단방향 구동

2.2.3 2상 스텝 모터의 full-bridge driver

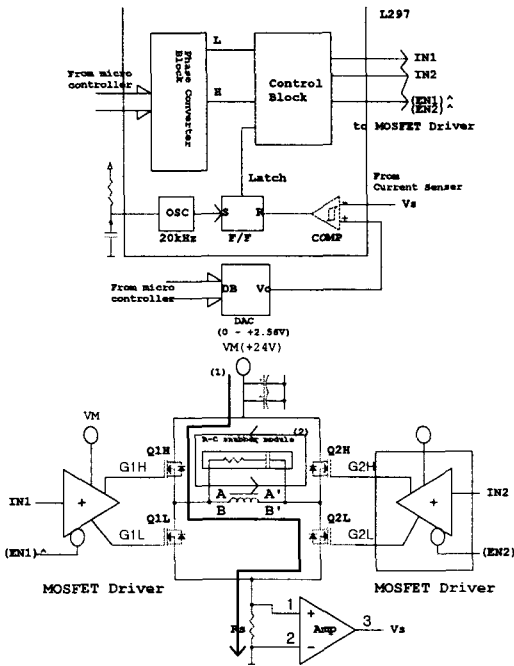


그림 3. 2상 스텝 모터의 상 여자, current feedback, Full-Bridge coil driver에 대한 block diagram

그림 3은 2상 스텝 모터의 구동에 대한 개념도이다. 동작은 다음과 같다. 우선적으로 (EN1) 및 (EN2)는 'L' IN1은 'H', IN2는 'L'가 되면 MOSFET Driver IC의 출력은 G1H → 'H', G1L → 'L', G2H → 'L', G2L → 'H'가 되어 full bridge 구성의 MOSFET은 Q1H, Q2L은 온, Q1L, Q2H는 오프 상태가 된다. 이에 따라서 모터의 코일에는 경로 ①과 같은 전류가 흐르게 된다. 전류 검출저항 Rs의 전류는 연산 증폭기를 통하여 전압으로 변환되고 이는 상 여자 IC인 L297 내부에 있는 전압 비교기의 (-) 입력 측에 인가된다. 그리고 전압 비교기의 (+) 입력 측에는 미리 설정된 기준전압이 인가

되어 모터의 코일에 흐르는 전류를 제어할 수 있도록 한다. 모터의 코일에 흐르는 전류가 상승함에 따라 전압 비교기는 출력이 반전되고, flip-flop의 출력도 리셋 상태가 된다. 이와 동시에 상 여자 IC 내부회로의 조합에 의하여 IN2가 'H' 상태로 출력된다. 이에 따라 MOSFET driver IC 출력은 G1H → 'H', G1L → 'L', G2H → 'H', G2L → 'L'로 되고 MOSFET Q1H, Q2H는 온, Q1L, Q2L은 오프 상태가 된다. 따라서 모터의 코일에는 경로 ②와 같은 전류가 흐르게 된다. 한편으로 경로 ②와 같은 전류 루프가 구성되면 전류검출저항 Rs에 흐르는 전류가 없어지고 검출전압 Vs는 낮아지게 된다. 이에 의하여 전압 비교기는 'H'로 되어 flip-flop의 리셋을 해제한다. 이러한 상태에서 20kHz 정도의 고정 주파수로 인가되는 발진회로에 의하여 flip-flop은 다시 셋 상태가 된다. 셋 상태가 되면 앞에서 설명한 과정대로 모터 코일에 경로 ③과 같은 전류를 흐르게 하는 동작을 반복하게 된다. 이러한 정 전류 초핑 과정에서 모터 코일에 존재하는 인덕턴스 성분에 의하여 모터에 흐르는 전류는 급격하게 사라지거나 증가하지 않고 일정한 크기의 리플을 가지면서 정 전류를 유지하게 된다.

2.3 5상 스텝 모터 driver 개발

그림 4, 5, 6은 5상 스텝 모터의 구동에 대한 것이다. 우선적으로 G1H → 'L', G1L → 'L', G2H → 'H', G2L → 'H'로 설정되면 브릿지 회로를 구성하는 MOSFET은 Q1H와 Q2L이 온 상태가 되고 Q1L과 Q2H는 오프 상태가 된다. 이 상태에서 모터 코일의 전류는 루프 ①에 표시한 바와 같이 Q1H, Q2L을 통하여 전류검출저항 Rs로 흐른다. 전류검출 저항은 op amp.에 의하여 전압으로 변환되고 이는 다시 전압비교기의 (-) 단자에 인가된다. 전압 비교기의 (+) 단자는 전압설정을 위한 기준전압을 인가해주게 되어 설정전류 이상의 전류 레벨이 되면 전압비교기의 출력을 반전시키면서 flip-flop의 상태를 제어해 주게된다. flip-flop의 출력은 상 제어 로직(PAL로 구성됨)에 enable/disable 신호로 인가되어 초핑 회로의 구동에 직접 관여하게 된다. 이와 같은 회로구성에서 루프 ①의 동작 중에 전류의 양이 증가하면 검출전압의 출력이 커지고 전압 비교기의 출력은 'L' 상태로 된다. flip-flop의 출력도 'L'로 리셋 상태가 되고 상 제어 로직에 의하여 모든 MOSFET을 오프 상태가 되도록 제어하게 된다. 즉, G1H → 'H', G1L → 'L', G1H → 'H', G2L → 'L'로 되어 Q1H, Q1L, Q2H, Q2L 모두 오프 상태로 동시에 변화게 된다. 하지만 모터의 코일에 흐르는 전류는 인덕턴스 성분에 의하여 루프 ②와 같이 전류검출저항, Q1L의 내장 클램프 다이오드, 모터 코일 및 Q2H의 내장 클램프 다이오드를 통하여 계속 흐르게 된다. 이와 같은 경로로 모터 코일 전압이 반전 하게되면 전류검출전압은 (-)값으로 낮아지고 점차 영볼트로 회복된다. 이와 같이 급격하게 (-)로 발생하는 스파이크 전압 성분으로부터 op amp를 보호하기 위하여 op amp 입력단에 별도의 클램프 다이오드가 있게된다. 전류검출전압이 낮아진 상태에도 모터 코일에는 어느 정도의 전류가 흐르게 되고 외부 발진회로를 통해서 공급되는 타역식 초핑 회로에 의하여 전체회로는 반복동작을 하게된다. 본 회로의 구성의 경우에 방전 루프 ②에서 전류 검출저항 Rs를 통하여 전류가 흐르므로 방전 시간이 짧아져 고속동작에 유리하다.

2.4 개발된 2상 및 5상 스텝 모터 제어기의 사양

2.4.1 2상 스텝 모터 제어기의 사양

- * 구동방식 : 2상 bipolar 구동(4선식)
- * 전류 제어 방식 : 20kHz 타역식 정전류초핑 방식

- * 설정 전류범위 : 0 ~ 5A/motor coil
- * 상 여자방식 : full step(200 steps/Rev)
half step(400 steps/Rev)
- * 구동속도 : 0 ~ 3000rpm(20kpps at half step)
- * 구동속도 : 정속 모드
가/감속 모드(rate 가변가능)
- * 모터 전원전압 : 24 ~ 36V DC(조정가능)
- * 제어방식 : 마이크로 프로세스에 의한 프로그램 제어
모든 제어 및 모니터링 변수가 프로그램 처리 됨
- * closed-loop 제어 모드 : 광학식 incremental 엔코더와 리미트 스위치 등과 연동하여 설정된 조건에 따라 가/감속 구동을 실행하는 모드

2.4.2 5상 스텝 모터 제어기의 사양

- * 구동방식 : 5상 pentagon 구동(5선식)
- * 전류 제어 방식 : 20 kHz 타이어식 정전류 초핑 방식
- * 설정 전류범위 : 0 ~ 5A/motor coil
- * 상 여자방식 : full step(500 steps/Rev)
half step(1000 steps/Rev)
- * 구동속도 : 0 ~ 6000rpm
(100kpps at half step)
- * 구동속도 : 정속 모드
가/감속 모드(rate 가변가능)
- * 모터 전원전압 : 15 ~ 50V DC(조정가능)
- * 제어방식 : 마이크로 프로세스에 의한 프로그램 제어
모든 제어 및 모니터링 변수가 프로그램 처리 됨
- * closed-loop 제어 모드 : 광학식 incremental 엔코더와 리미트 스위치 등과 연동하여 설정된 조건에 따라 가/감속 구동을 실행하는 모드

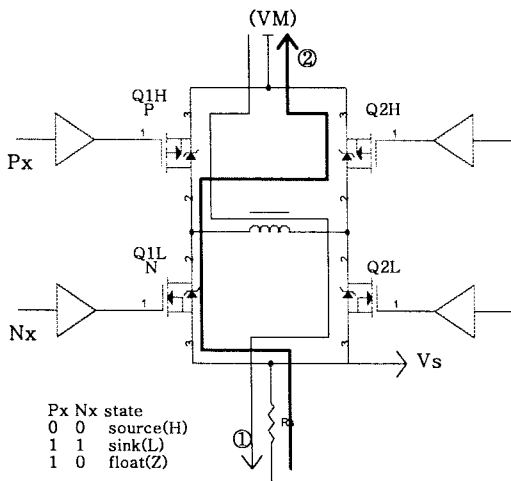


그림 4. 5상 스텝 모터의 구동

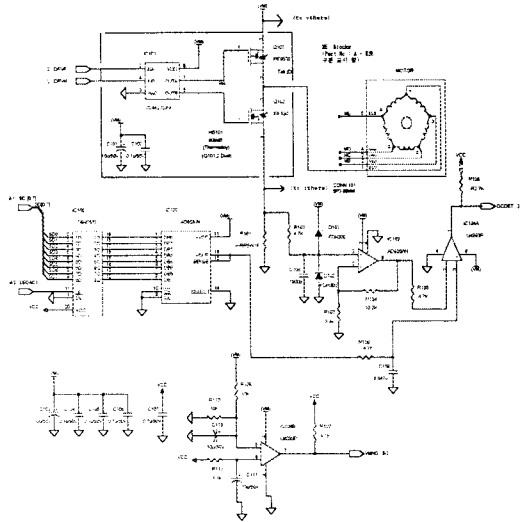


그림 5. 5상 스텝 모터 driver(1)

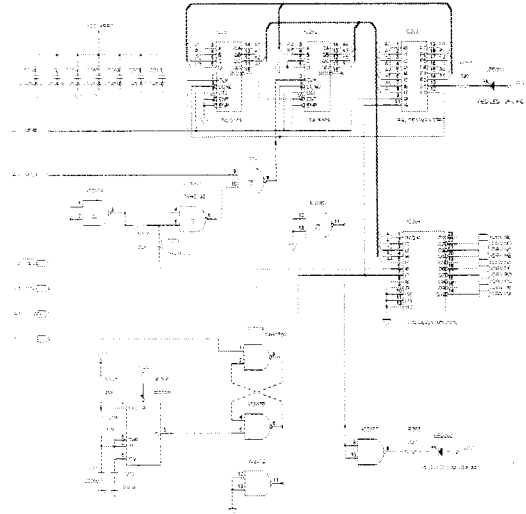


그림 6. 5상 스텝 모터 driver(2)

3. 결 론

스텝 모터의 구동 및 제어에는 여러 가지의 요소 기술이 복합되어 있다. 전력제어 및 로직 설계, 데이터 변환 등의 기본 기술과 노이즈를 억제하면서 실장 시키는 기술도 필요하다. 마이크로 스텝 구동이나 고속의 페 루프 구동을 위해서는 전기와 전자적인 설계요소에 많은 노력을 기울여야 하고 기계적인 요소까지 설계, 검토를 해야하므로 복합기술이 된다. 향후에도 이러한 목표를 달성하기 위하여 설계 및 제작에 많은 노력을 하여 개선해야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 백수현 외, "미세 스텝 변화에 따른 LPM의 정전류 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A 권, pp. 148 - 150, 1996
- [2] Erricson "Industrial Circuit Application note", www.erricson.com, pp. 1 - 7, 1999