

시험용 구동시스템의 제작 및 제어로직 설계

김석근, 이은웅*
전력연구원 발전연구실 *충남대학교 전기공학과

The Fabrication and Control Logic Design of Proto-type Drive System

S.G KIM, E.W LEE*
KEPRI *CHUNGNAM UNIV.

Abstract - A neutron controls a nuclear fission in the core of a reactor. Drive system for in-core neutron detector is an equipment that drives the detector and cable to survey neutron flux in the reactor. The drive system introduced by this paper was designed for mock-up system and fabricated to drive two drivers that having a different function. The system consists of a driver assembly, a power transmission part, and cable storage part. And there is a control panel that contains PLC and inverter. This paper is going to introduce the design and certify the operation status of completed system by control panel. And we conducted the test for torque measurement.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로 내에는 노심(reactor core)내의 핵분열 및 중성자속 측정을 위해 계측기를 케이블 최전단에 부착하여 케이블을 삽입/인출 시키는 구동시스템이 있다. 본 논문에서 다루는 구동시스템은 실험용의 제작된 설비로서 구조적, 기능적으로 다른 기능을 갖춘 두 대의 구동기를 제어하도록 설계, 제작되었으며, 시스템의 구성은 크게 구동 어셈블리와 동력 전달부, 그리고 케이블 스토리지부로 나뉜다. 또한 구동 모터의 제어를 위해 인버터와 PLC가 사용되어 디스플레이 소자와 함께 제어 판넬을 형성한다. 본 논문에서는 구동시스템의 설계, 제작 및 하드웨어적 로직설계를 소개하고 완성된 시스템이 제어판넬에 의해 정상적으로 동작하는지의 상태를 시험하고, 출력토크를 측정하였다.

2. 시스템의 구성 및 제어

2.1 제작목적 및 시스템 구현

원자력발전소 노내 중성자 검출기 구동시스템은 크게 구동기, 통로선택기, 검출기 케이블 등으로 구성된다. 구동시스템의 운전목표는 원자로 노심내의 핵분열 및 중성자속(flux) 측정을 위해 이용되는 계측기(detector)를 케이블의 전단에 부착하여 충분한 힘을 가지고 삽입 및 인출하여 중성자속을 스캐닝 하는 것이다. 플렉시블 급속으로 이루어진 케이블은 길이가 약40m에 달하고 [1] 여러 굴곡을 가진 튜브를 지나기 때문에 삽입거리가 어느 정도 진행된 후 부터는 케이블과 튜브(tube)간에 큰 마찰저항이 발생하여, 케이블이 깊숙히 삽입 되었을때는 매우 큰 저항이 생겨 구동부 역시, 큰 토크를 필요로 한다. 본 고에서 소개되는 실험용설비는 발전소내에서 현재 사용되고 있는 구동기의 구성부품들이 노화되어, 이들 장비의 신개발 및 현장설치에 앞서 시작품으로 완성된 구동기의 성능시험과 발전소 운전요원 교육, 시운전 등을 수행하기 위한 것으로 크게 구동부와 제어부로 나누어진다. 구동부의 구성은 구동 어셈블리와 동

력전달부, 그리고 케이블 저장부로 나누어지며, 제어부는 구동기의 연속적인 삽입/인출 및 자동운전 등을 제어하기 위한 제어판넬로서 PLC, 인버터, 터치판넬(touch panel) 등으로 구성된다. 구동부에 포함된 기타 부품들로는 케이블의 삽입거리 산정을 위한 엔코더와 시스템 장비내부의 습도 및 온도제어를 위한 히터, 온도감지기 등으로 이루어져 있으며, 기타 구동기의 구동을 위한 모터, 감속기, 슬립클리치 등이 있다. 저장 바퀴에 저장된 검출기 케이블은 구동부 나선형(helical) 기어를 통해 노심내 심플(thimble)과 연결되는 튜브 내로 삽입된다. 검출기 케이블은 노심 내 최고 끝단까지 삽입된 후, 인출시에 노심내의 중성자속을 측정하게 되는데, 검출기의 계측신호는 케이블내의 신호선과 슬립링을 통해 제어판넬로 송신된다. 시스템의 제작시 특히 주의해야 할 점으로는 케이블이 최초 삽입되는 튜브 입구와 케이블구동용 기어간에는 약 2~3cm정도 공간이 노출되어 있기

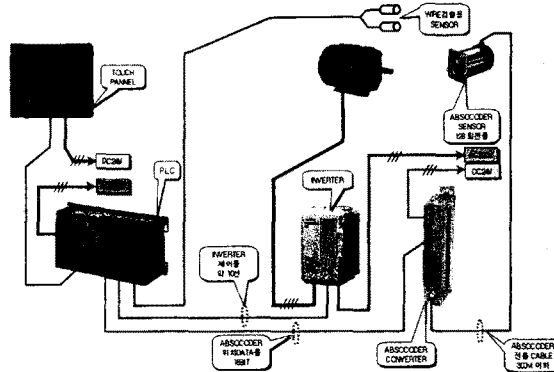


그림 1. 전기 배선도

때문에 튜브속의 케이블과 튜브간에 약간의 저항만 생겨도 케이블이 더 이상 삽입되지 못하고 외부로 미끄러져 나오고, 케이블의 재질이 플렉시블 급속케이블이기 때문에, 중심부에 대해 외경이 항상 일정하지 않고 원주방향으로 ±10%의 신축성이 존재하기 때문에 [2] 케이블에 충분한 힘을 전달하기 매우 어려워 구동부의 설계시 케이블을 잡아주는 상, 하측 기어의 정밀도 뿐만 아니라, 튜브에 손상을 입히지 않고 튜브를 정확하고 견고하게 잡아주도록 설계하는 것이 매우 중요하다.

2.2 설계요건 및 로직 구성

본 시스템이 비록 실험용 장비이긴 하지만, 실제로 발전소에 설치될 구동시스템의 형태를 최대한 갖추어야 하기 때문에 제어 콘솔(console) 및 각 기기 간의 인터페이스를 하는데 있어서 신호선 또는 전원용 케이블의 배선설계도 매우 중요한 부분을 차지한다. 한 예로 원자력발전소 격납용기(containment vessel)내부에는 온도, 습도의 환경이 좋지 않아 인버터를 구동기에서 멀리 떨

표 1. CV내 설계환경 및 요건

환경	온도	최대 약 45℃	
요인	상대습도	최대 98%	
	압력	최대 대기압	최소 -0.3 psig
	방사능	최대 10 ⁴ R	
전원	발전소 1차측	460V AC, 3상, 60Hz	
	시험용	220V AC, 3상, 60Hz	
성능요건	Drive Speed	High 72ft/min	Low 12ft/min
	위치 분해능	High 12 in	Low 0.5in
	위치 신뢰도	±0.2in	

어진 곳에 설치함으로써 인버터에 불필요한 전원선 또는 신호선이 추가로 설치되는 경우가 발생한다. 표.1 은 원자력 발전소 내 구동기의 설치환경 및 성능조건 등을 기술한 것이다[3]. 특히 주목 할 점은 실내온도가 45℃까지 올라가기 때문에 인버터를 판넬내에 설치 할 경우에는 밀폐된 공간의 온도는 50℃ 이상 올라갈 수 있음을 고려해야 한다[4]. 이 온도에서는 인버터의 정상운전을 보장할 수 없기 때문에 인버터의 설치는 구동기 근처에 설치하는 것을 배제하고 격납용기 외부로 설치하는 것이 안전하므로 구동기 및 인버터 간 인터페이스 라인을 20m 이상이 되도록 하였다.

기타 모터, 감속기 등 구동시스템의 구성에 필요한 구성 기기에 관한 규격 및 설계요건은 표. 2 와 같다.

표 2. 기기별 설계요건

기기	설계요건	규격
모터	출력	0.75 kW
	주파수/회전수	60 Hz/1600 rpm
	전압/전류	220V / 3.8A
감속기	감속비	30/1
인버터	출력정격용량	3.1 kVA
	정격전류	8 A
	출력주파수범위	2~400 Hz
	제어방식	soft-PWM 방식
	직류제동시간	0~10 초
	다단속도선택	최대 15속
슬립 클러치	동작허용온도	-10~50 ℃
	휠 토크 설정범위	10~70 lb
스프링 모터	토크 설정치	14 kgf-m
	토크 설정치	1.3~2.0 kgf-m

2.3 부품 배치

그림 2는 2개의 구동기를 갖는 구동시스템중 구동기 I(drive unit I)의 배열이다. 구동기II(drive unit II)의 배열도 구동기I의 형태와 거의 유사하며, 다만 구동기II에는 구동지지부 나선형 기어의 상부에 위치한 아이들기어(idle gear)와 연결된 별도의 엔코드 II가 설치된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 감속기(worm reducer)에 연결된 모터는 인버터를 거쳐서 PLC와 연결되며, 인코더, 근접 스위치, 온도 센서 등도 PLC와 연결된다. 또한, 구동기와는 별도로 터치 판넬이 PLC와 연결되어 인버터와 함께 제어 판넬에 부착된다. 그림에서 나타난 3개의 근접 스위치는 검출기 케이블의 인출시 최 전단에서 더 이상 인출되지 않도록 하기 위해 구동부 전단 약 30 cm 지점에 설치된 안전(safety) 스위치와 삼입/인출의 중심점이 되는 인출(withdraw) 스위치, 그리고 검출기 케이블의 최종 삼입단의 위치에 부착된 끝점(End-point) 스위치이다.

3 시스템 제어

3.1 PLC 고속 카운터 및 제어 배선도

구동기의 제어를 위한 제어 판넬은 구동기 I 과 II를

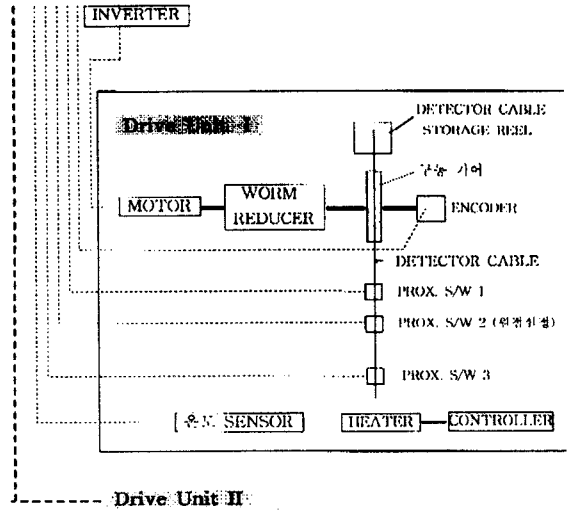


그림 3. 부품 배치도

동시에 제어할 수 있도록 설계되었다. 본 시스템에 적용된 인코더는 증분형(incremental type)으로 컨버터를 거쳐 제어 판넬로 연결된다. 인코더는 케이블을 직접 구동시키는 나선형 구동부에 설치되어 있다. 헬리컬 구동부 및 아이들 기어부에도 인코더가 설치된 구동기 I과는 달리 케이블의 삼입 및 인출시 검출기의 현재 위치를 파악하는 것이 주 목표이다.

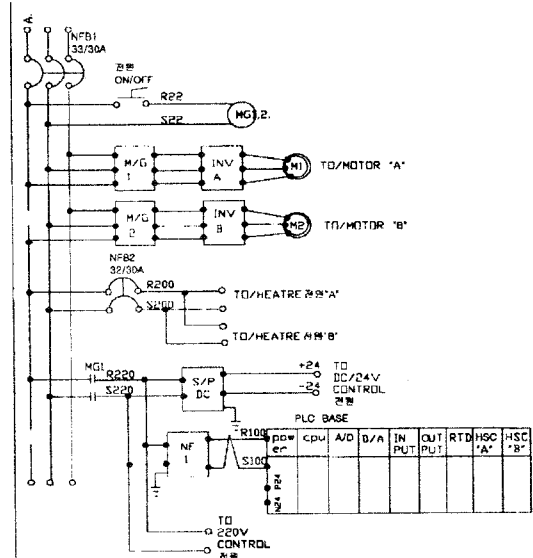


그림 3. 제어 전원 배선도

그림 3은 구동기의 제어 전원배선도를 나타낸 것으로 3상 220V의 전원이 배선용차단기(NFB 또는 MCCB)를 거쳐 PLC, 인버터 및 히터 등에 결선 되었으며, 2대의 인버터 전원 ON/OFF 및 PLC와의 연계동작을 위해 마그네틱 접촉 코일 및 전자 접촉기를 이용한 시퀀스 제어 로직을 이용하였다. 또한 각종 제어신호를 생성하기 위해 24V의 직류전원이 PLC에 결선 되었다.

3.2 제어목표

구동기의 제어대상은 삼입/인출을 연속적으로 반복하는 케이블이다. 케이블은 표면에 나선형의 나사가 돌출

되어 있어 헬리컬 기어등에 의해서 미끄러짐 없이 이송이 가능하다. 케이블의 길이는 약 40여 미터 정도이며 [2], 케이블의 코어부에 신호를 전달하는 절연용 피복을 제외하고는 대부분이 금속으로 이루어져 있어 케이블 자체의 무게가 20~25kg에 달하므로 케이블이 구동기에서부터 원자로 내부까지의 튜브를 지날때는 적지 않은 저항을 받으므로 구동기는 케이블의 이송을 제어함에 있어서 인출 혹은 삽입에 대하여 어느 정도의 충분한 토크를 가져야 하며, 여러 단계의 속도설정이 가능하게 하는 것이 운전하는데 훨씬 유리하다.

3.3 제어 파라미터 구성

구동 소프트웨어는 PLC 제어용 FPST 소프트웨어를 이용하였으며, 프로그래밍은 단계적 기호 편집(Ladder Symbol Edit)방식을 이용하였다[5]. PLC의 운전은 CPU 유니트내에 내장되어 있는 RAM으로 운전하도록 설정하여 RAM 운전방식을 채택하였다. 본 구동시스템은 시운전 및 시험용으로 제작된 만큼, 케이블의 자동 삽입/인출이 가능하도록 하였고 명령된 구역 내에서만 수십 차례 반복구동이 가능하도록 설계 하였으며, 비상상황시, 긴급정지기능을 부가하여 시스템의 안전에 만전을 기하였다. 또한, 구동기의 운전특성을 초기 설정하기 위해 파라미터 설정이 가능하도록 메뉴를 구성하였다. 구동기 I에는 엔코드가 1개 장착되었으며, 구동기 II에는 케이블 구동부의 회전량 측정 뿐만 아니라, 실제 케이블의 삽입 또는 인출 위치를 파악할 수 있도록 엔코드 2개가 장착되어 있다. 각각의 구동기 메뉴에는 엔코더의 분해능력에 따라 펄스당 진행거리를 설정할 수 있는 설정치 입력 윈도우가 포함되며, 구동부의 삽입/인출속도를 설정할 수 있도록 저속과 고속 뿐만 아니라, 운전자가 원하는 속도의 선택을 직접 입력할 수 있도록 구현하였다.

4 케이블 출력 토크 측정

4.1 실험장치 구성

실험장치의 구성은 힘(force) 토크센서를 구동부 전방 30 cm 거리에 지그(gig)를 이용하여 장착하고, 토크센서로 부터의 신호선을 토크 측정 소프트웨어가 내장된 PC에 연결하여 구성하였다.

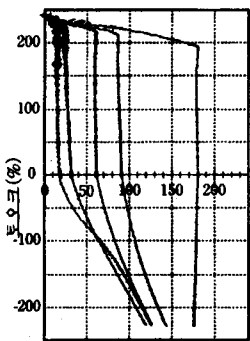


그림 4. 속도-토크 특성

토크 실험장치의 실험방법은 감속기 출력단의 회전수를 24rpm으로 하고 초당 케이블의 진행거리가 31.6 cm 되도록 하여 토크센서에 직각으로 충돌하도록 하였다. 케이블의 진행속도(초당 진행거리)의 산출내역을 보면, 헬리컬 구동기어의 공칭 지름이 25.2 cm 이므로 1회전시의 케이블 진행거리는 79.16 cm ($2\pi r$)가 된다. 따라서 24rpm은 초당 0.4회전이 되므로 진행거리 31.6 cm가 된다.

4.1 실험 및 분석

식 (1)은 일반적인 모터정격토크(T_M)를 구하는 식을 나타낸 것으로 주파수가 커질수록 정격토크는 감소하는 것을 알 수 있다.

$$T_M = 974 \times \frac{\text{모터정격출력} [kW]}{\text{정격회전속도} [rpm]} [kgf \cdot m] \quad (1)$$

위 식(1)에서 0.75kW의 정격과 24rpm으로 회전하는 모터의 정격토크는 약30(kgf·m)가 됨을 알 수 있다.

실질적으로 나선형 기어를 통해 구동기 측에서 튜브로 삽입되는 케이블의 출력토크의 측정을 위해 실험장치의 구성은 힘 혹은 무게의 측정을 위해 사용되는 로드 셀(load cell)의 일종인 힘 토크 측정기(force torque sensor)를 이용하였다. 실험을 위한 힘 토크센서는 6방향에 대한 토크를 계산할 수 있는 센서이나 본 실험에서 수행한 것은 중심 축 방향(z방향)에 대한 힘(Force)의 측정이다. 720 rpm으로 회전하는 모터에 대해 구동부의 전방 30cm 지점에서 케이블을 충돌시켜 힘 토크 센서 힘의 크기를 측정하였다.

본 시험용 시스템의 구성은 제작시 충분한 힘을 내도록 설계하는 것이 단순한 문제는 아니었다. 일반적으로 모터의 용량과 기어비, 혹은 구동용 나선형기어의 지름 크기 등의 조합으로 얼마든지 원하는 힘을 만들어 낼 수 있지만, 케이블의 굽힘 유연성 보존 때문에 케이블과 접촉하는 나선형기어의 지름을 작게 할 수가 없었다. 따라서, 기어의 지름이 제한된 상태에서는 모터의 용량이 커질 수 밖에 없어, 작은 크기로 충분한 토크를 출력하기 위한 기본목적과 상반되어 시스템 설계가 쉽지 않았다.

5. 결 론

현재, 발전소에 설치되어 있는 구동시스템의 구동부의 진단 즉, 케이블 삽입부에서 케이블의 충돌시험을 실시했을 때, 이물질이 존재하지 않는 이상적인 상태에서 최대 힘은 약 16kg·f (35파운드)가 필요하다[2]. 본 실험에서 나타난 힘의 크기는 40 kg·f 였으므로 케이블을 구동시키는 데는 충분한 힘을 내고 있다는 것을 알 수 있으며, 가장 깊은 삽입거리인 40m 지점까지 케이블을 밀어 넣을 때 도 튜브전단, 삽입부에서 케이블이 튀어나오는 현상은 없었으며, 모터 역시 충분한 토크를 발생하였다. 또한, 구동기와 연계한 제어판넬의 기능시험에서도 특정 범위내에서 수십차례 반복 구동시키는 동작과 가변속도의 설정 및 제어를 정상적으로 수행 하였으며, 케이블의 이동 중 현재의 진행거리를 정확히 계산하여 터치판넬상에 디스플레이 하였다.

본 연구의 시험용 노내 증성자 검출기 구동시스템의 제작 및 운용기술은 실제 발전소에 설치될 설치원형 구동시스템의 제작에 큰 도움이 될 것이다. 차기에는 케이블의 출력 토크측정에 있어서 튜브 삽입부 뿐만 아니라, 각 구간별 토크 측정하여 비선형으로 설치된 튜브에 대한 구동기의 케이블 토크 특성을 관찰하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전력연구원, "고리1호기 노내 증성자 검출기 구동설비 국산화 개발", 중간보고서, 2000
- [2] Westinghouse Nuclear Energy System, "Technical Manual for In-core Instrumentation", Ko-ri Unit 1, 1969
- [3] 전력연구원, "노내 핵계측 설비분석 보고서", TM, 1999
- [4] 전력연구원, "고리1호기 노내 핵 계측 제어 논리 분석 보고서", TM, 1999
- [5] 김석곤, 이은용, 신창훈, 송성일 "프로토 타입 원자로 증성자 검출기 구동시스템 구동프로그램 설계", 전기학회 하계학술대회는논문집 B권, pp675-677, 2001