2004 춘계학술발표회 논문집 한국원자력학회

제어봉 위치지시기의 영구자석 노화 및 출력신호 오차 예측

Estimation of Permanent Magnet Aging and Output Signal Error in Control Rod Position Indicator

유제용, 김지호, 허형, 김종인, 지성균

한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

일체형원자로에 사용될 볼스크류형 제어봉구동장치(CEDM)는 최소이송 거리가 이송거리가 0.25mm로 작고 무붕산 운전요건에 적용할 경우에는 제어봉만으로 노심 반응도를 조절해야 한다. 따라서 제어봉의 위치정보는 노심보호계통 설계에 매우 중요하기 때문에 신뢰성이 우수하고 정확 도가 높은 위치지시기의 개발이 필요하여 분해능을 향상시킨 4채널 제어봉 위치지시기를 설계개 발 제작하였다. 본 논문에서는 상부하우징 안쪽에 설치되는 영구자석의 노화와 위치지시기집합체 의 분압회로내의 저항들의 오차에 기인되는 전압신호의 오차를 예측하여 설계에 반영하였다.

Abstract

The integral type reactor currently under development at the Korea Atomic Energy Research Institute is being designed with a soluble boron free operation and the use of nuclear heating for the reactor start-up. These design features require a Control Element Drive Mechanism (CEDM) for the Integral reactor to have a fine-step movement capability as well as a high reliability for a fine reactivity control. Also the reliability and accuracy of the information for the control rod position is very important to the reactor safety as well as the design of the core protection system. The position indicator is classified as a Class 1E component because the rod position signal of the position indicator is used in the safety related systems. In this paper, the estimation of permanent magnet aging in the upper pressure housing and the signal error due to the resistors error in the voltage divider circuit was performed. These estimation results were considered in the design of the control rod position indicator.

1. 서론

볼스크류형 CEDM에 쓰이는 제어봉 위치지시기는 빈번한 제어봉의 이동에도 변위 측정 성능 을 유지해야 한다. 또한 제어봉 위치지시기는 제어봉의 실제 위치를 측정하는 역할을 하므로 위치 지시기의 신호는 제어계통 신호와 독립적이어야 하고 측정된 위치신호도 만일의 고장에 대비하여 신호 채널이 다중화 되어야 한다. 따라서 위치지시기에서 나오는 안전 계통의 신호는 높은 신뢰성 과 정확성을 가져야 한다. 볼스크류형 CEDM에서 필요로 하는 위치지시기는 기존 상용로에서 쓰 였던 위치지시기 형태에서 한 단계 더 진보된 성능을 가지도록 설계 제작되어야 한다. 제어봉 위 치지시기의 측정원리는 영구자석의 위치를 상부압력용기 밖에 위치한 리드스위치가 상부압력용기 내에 위치한 영구자석의 자력을 감지하여 영구자석을 위치를 알아내고 이를 통해 제어봉의 위치 를 유추하는 것이다. 하지만 고온 고압 상태에 위치한 영구자석은 시간이 갈수록 자력이 약화되는 노화현상이 일어날 가능성이 매우 높다. 따라서 위치지시기 설계 시 미래에 일어날 영구자석의 노 화 현상을 가정하고 노화현상 발생 시에도 위치지시기가 제대로 동작하는지 평가해야 한다.

또한 제어봉의 위치는 분압회로를 통하여 출력되는 전압의 크기를 통해 알아내기 때문에 분압 회로 안의 전기소자의 오차에 기인하는 출력 전압신호 오차를 미리 예측하여야 정확한 제어봉 위 치를 알아낼 수 있다. 본 논문에서는 기본설계에 따라 제작된 위치지시기 시제품에 대한 영구자석 의 노화예측 및 전압신호 오차 분석에 대하여 논의하자고 한다.

2. 작동원리

상부압력용기 내부의 연장봉 상부에는 제어봉과 함께 상하 운동하는 영구자석이 설치되어 있 으며 이 영구자석의 위치에 비례하여 상부압력용기 외벽에 설치된 위치지시기는 계단식 직류 전 압신호를 출력한다. 위치지시기는 제어봉의 위치를 20mm 간격으로 감지할 수 있도록 설계되며 영구자석의 이동에 따라 항상 두 개 또는 세 개 위치에 해당하는 리드스위치가 닫히게 된다. 20mm 간격의 제어봉 위치정보는 두 개 위치의 리드스위치가 닫혔을 때의 출력전압에 의하여 결 정된다. 작동의 신뢰성 확보를 위하여 각 위치에는 두 개씩의 리드스위치가 설치된다. 제어봉 위 치지시기는 그림 1과 같이 볼스크류형 CEDM의 상부압력용기 주위에는 리드스위치를 이용한 4대 의 위치지시기집합체가 독립적으로 설치된다. [1, 2] 위치지시기집합체는 리드스위치와 저항으로 연결된 분압회로에 의해 결선 되어 있어서 각각의 리드스위치의 닫힘에 합당되는 전압신호가 출 력된다. [3]

4대의 위치지시기집합체 중 2대에는 제어봉의 상한, 하한을 지시할 수 있는 비안전등급의 상부 한계스위치, 하부한계스위치가 위치지시기 센서와 독립적으로 설치되어 있다. 제어봉 위치지시기 의 구성부품은 크게 위치감지용 영구자석, 리드스위치 및 전기적 분압회로로 나눌 수 있다. 특히 영구자석과 리드스위치는 위치지시기의 정밀도 및 신뢰도와 관계가 있는 부품으로 제품의 선택과 배치는 매우 중요하다. [4, 5, 6, 7]



그림 1 위치지시기 장착도

위치지시기 집합체는 리드스위치와 저항을 이용한 분압회로로 이루어져 위치지시 센서 역할을 수행하며 4채널로 이루어져 있다. 상하부 한계스위치는 제어봉이 작동영역 밖으로 이송될 경우 운 전원에게 경보신호를 제공하는 비안전 등급 신호이다. [8]

3. 영구자석의 노화 예측

일반적으로 영구자석은 ALNICO Magnet, Ferrite Magnet, Rare-Earth Magnet 그리고 Bonded Magnet로 크게 4종류로 나눈다. 각 부류의 대표적인 영구자석들 중에서 가장 큰 자기에 너지를 가지는 영구자석이 네오디뮴 자석(Nd-Fe-B Magnet)이다. 따라서 동일한 자기세기를 얻을 수 있도록 영구자석을 배치할 때, 네오디뮴 자석을 사용하면 다른 종류의 영구자석을 사용할 때 보다 영구자석의 크기를 줄일 수 있다. 또한 네오디뮴 자석은 자성을 유지하고자하는 성질의 정도 를 나타내는 보자력(Hc)이 상용로 위치지시기에서 사용하고있는 알리코 자석 보다 5배 이상 크므 로 시간이 지남에 따라 자연 발생되는 감자현상이 알리코 자석 보다 현격히 작다는 장점이 있다. 상부압력용기 주위에 설치된 위치지시기집합체 내의 리드스위치를 닫치게 하는 자기에너지를 갖 는 네오디뮴 영구자석을 상부압력용기 내부에서 움직이는 연장봉에 부착시키면 네오디뮴 영구자 석은 크기가 작기 때문에 상부압력용기 높이를 줄일 수 있고 결국에는 제어봉구동장치의 전체 길 이를 줄일 수 있다. 네오디뮴 자석의 자기적 특성은 다음과 같다.

- 잔류자속밀도 (Br): 11.7 - 12.1 KGs

- 보자력 (Hc) : 10.8 11.5 KOe
- (BH)max : 33 35 MGOe

리드스위치의 리드가 닫히는데 필요한 기자력값을 Pull In Value로 정의하고 단위는 Ampere-Turn(AT)으로 나타내고 있다. 설계 제작된 위치지시기집합체 내에 사용된 리드스위치의 Pull In Value는 40-45AT 이다. 리드스위치의 Ampere Turn(AT)으로 나타낸 감도에 상응하는 자속밀도에 대한 감도는 테스트 코일의 형상과 코일 권선수를 이용하여 아래 식을 통하여 얻을 수 있다. [9]

테스트 코일의 중심점에서의 Magnetic Flux Density는 아래 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$B^* = \mu_0 H \ 10^4 = (4\pi \times \ 10^{-7})(10^4) H = 0.0126 H$$
 (1)

Here

- B^* : Equivalent magnetic flux density
- ▶ : 진공에서의 투자율
- H : Magnetic Flux Intensity [AT/m]

식 (1)을 다시 정리하면 아래 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 N은 코일 권선수, I는 전류이며 *l*은 테스트 코일의 높이이다.

$$B^* = 0.0126 \ (\frac{NI}{l}) \tag{2}$$

선택된 리드스위치의 Pull-In 범위가 40-45 Ampere Turn이므로 이 AT값과 테스트 코일의 치 수를 이용하여 리드스위치가 닫히는데 필요한 자속밀도(Flux density)를 아래와 같이 구할 수 있 다.

 $B^*_{low} = 0.0126 \ (40/0.0222) = 22.7 \ Gauss$ (3)

$$B_{high}^* = 0.0126 \ (45/0.0222) = 25.5 \ Gauss$$
 (4)

그 결과 상부압력용기 내부에 있는 영구자석에 의해서 생성되는 자속밀도(Magnetic flux density) 가 최소한 22.7 Gauss 이상 되어야만 리드스위치를 동작시킬 수 있다.

위치지시기용 리드스위치를 이용하여 모든 위치에서 리드스위치가 항상 2개 또는 3개가 닫히도록

자속집속기를 설계하고자 한다. 자속집속기를 이용하지 않고 영구자석만으로 리드스위치를 닫치게 할 경우 영구자석으로 인한 자속밀도 분포가 광범위하게 퍼지고 중앙부근의 최대 자속밀도 값이 크 지 않기 때문에 필요이상의 리드스위치가 닫히게 된다. 따라서 영구자석 중앙에서의 자속밀도 값 향 상과 리드스위치를 동작시킬 수 있는 자속밀도 값 이상 되는 범위의 축소를 위해서 자속집속기가 필 요하다. 영구자석이 존재하는 높이에 위치하는 리드스위치가 항상 2개 또는 3개가 닫치게 하기 위해 서는 영구자석의 중심을 기준으로 리드스위치가 존재하는 위치에서 리드스위치의 닫힘영역이 20mm-60mm가 되어야 한다. 그림 3은 네오디뮴 영구자석을 사용하여 설계된 자속집속기의 영구자 석의 중심에서 리드스위치가 존재하는 위치까지의 거리에서 자속분포를 해석한 그림이다. [6]



그림 3 리드스위치 위치에서 자속집속기에 의한 자속분포

해석 결과에서 알 수 있듯이 투자율이 1.02인 비자성 캔을 사용하고 리드스위치 (40-45AT)를 이 용할 경우 닫힘에 필요한 22.7 Gauss 또는 25.5 Gauss 이상 되는 자속밀도 영역이 영구자석의 중심 을 기준으로 약 41 mm - 44 mm 임을 알 수 있다. 따라서 설계된 자속집속기와 리드스위치 (40-45AT)를 사용할 경우 영구자석이 존재하는 위치에서 리드스위치는 항상 2개 또는 3개 닫히게 된다. 동일한 출력전압에 대한 영구자석의 위치는 영구자석의 열화에 따른 자기장의 변화에 따라 달 라지게 되는데 수명말기(EOL)에서도 영구자석의 이동에 따라 항상 두 개의 리드스위치 닫힘과 세 개의 리드스위치 닫힘이 번갈아 발생되어야 한다. (영구자석의 열화정도는 추후 실험으로 검증되어 야 함) 이러한 관계를 도식적으로 나타낸 그림이 그림 4 이다.

영구자석의 노화에 관한 추후 실험에 앞서 전자기해석 [6]을 통해 영구자석의 노화를 예측한 그

래프는 그림 5와 같다. NdFeB 영구자석의 열적노화를 가정하고 최종 설계된 자속집속기를 이용 하여 리드스위치 설치 선상에서의 자속밀도 분포를 계산한 결과로서 NdFeB_high_10% loss와 NdFeB_high_50% loss 선은 네오디뮴의 최대 Br(12.1 kGs)과 Hc(11.5 kOe) 값을 각각 10%와 50% 감소시켜 적용한 계산 결과이며, NdFeB_low_10% loss, NdFeB_low_20% loss, NdFeB_low_30% loss 선은 네오디뮴의 최소 Br(11.7 kGs)과 Hc(10.8 kOe) 값을 각각 10%, 20%, 30% 감소시켜 적용한 계산 결과이다. 계산결과에서 알 수 있듯이 영구자석의 중심에서는 영구자 석의 노화로 인해 그림 5의 초기장착 상태의 영구자석에 의한 피크값 보다 NdFeB_high_50% loss 선과 NdFeB_low_30% loss 선이 각각 약 52 Gauss와 약 32 Gauss 정도 자속밀도가 약해지는 것 을 알 수 있었다. 또한 리드스위치 (40-45AT)가 닫힘에 필요한 22.7 Gauss 또는 25.5 Gauss 이상 이 되는 자속밀도 영역은 NdFeB_high_50% loss인 경우는 각각 약 32mm와 약 29mm이고 NdFeB_low_30% loss인 경우는 각각 약 38mm와 약 35mm이다.

따라서 리드스위치 닫힘에 필요한 22.7 Gauss 또는 25.5 Gauss 이상이 되는 자속밀도 영역이 초기장착 상태의 영구자석에 의한 영역보다 각각 약 12mm 와 약 6mm 정도 줄어드는 결과를 얻 었다. 하지만 이 두 가지 경우 모두 리드스위치를 동시에 2개 위치 이상 닫히게 할 수 있는 영구 자석의 최소 영역인 20mm보다 크기 때문에 위치지시기의 성능에는 이상이 없다. 따라서 영구자 석이 노화로 인해 NdFeB_high_50% loss 및 NdFeB_low_30% loss 상태가 되더라고 해석적으로는 위치지시기의 성능에 지장이 없는 것으로 판단된다.



그림 4 열적노화에 의한 자속세기의 변화 예측



그림 5 열적노화에 따른 영구자석의 리드스위치 설치 선상에서의 자속밀도분포

4. 출력전압의 오차분석

위치지시기의 위치검출 분압회로도는 그림 6과 같다. 입력전원 V_{in} 은 15 VDC, 출력전원 V_o 는 영구자석의 위치(제어봉의 위치)에 따라 3.0V에서 9.8V 까지 변하며 영구자석이 20mm 이동시마 다 0.2V의 전압변동이 발생한다. 이러한 전압 변동량 및 각 위치에서 출력되는 전압값은 아래와 같은 분압회로식에 의해서 계산한 것이다. 이때 입력전원 V_{in} (15 VDC)의 입력오차는 ±0.025V 이 내 이다.

$$V_o = \frac{R_{\odot} + R_{\odot} \times (\mathrm{E} \mathrm{\overline{\mathcal{A}}} \ \mathrm{d} \mathrm{\underline{\mathcal{L}}} - \mathrm{d} \mathrm{d} \mathrm{\underline{\mathcal{A}}})}{R_{\odot} + R_{\odot} + 35 \times R_{\odot}} \cdot V_{in}$$
(5)

이때 전압변동은 리드 스위치 사이의 저항값에 따라 달라지며 그림 6에서 그라운드에 연결된 5번 저항값은 600 <u>Q</u>±0.1%, 6번은 1000 <u>Q</u>±0.1%, 7번은 40 <u>Q</u>±0.1%의 저항이 설치된다. 매 스텝마다 2개의 리드스위치가 직렬로 연결되어 있는데 그 이유는 리드스위치를 장시간 사용할 경우 리드스 위치 리드의 탄성력이 줄어들어 닫힘 후 영구자석이 존재하지 않는 데도 불구하고 다시 열려지지 않는 경우에 대비하기 위함이다. 식(5)에서 출력전압 V₀는 리드스위치가 2개 위치에서 닫힌 경우 와 3개 위치에서 닫힌 경우에 대하여 각각 다른 전압을 나타내다. 본 설계에서는 제어봉 위치신호 로 2개 위치 리드스위치가 닫힌 경우에 대한 출력전압 값을 사용한다. 본 설계에서 제어봉 영구자 석이 어떤 특정위치(예 100mm)에 있을 때의 출력전압은 아래와 같다.

$$V_o(100) = \frac{600 + 40 \times 5}{600 + 1000 + 35 \times 40} \cdot 15 = 4[V]$$



그림 6 위치지시기의 위치검출 분압회로

입력전원과 저항의 오차는 20mm 간격의 각각의 위치에서 발생되는 출력전압의 오차만을 발생 시키므로 자료처리함에서 출력전압을 처리하여 해당 위치(거리정보)를 추출할 때 이용되는 알고리 즘에 영향을 미칠 뿐이다. 하지만 사용된 리드스위치의 동작 최소 AT의 범위에 기인되는 오차는 위치지시기 내의 리드스위치가 동시에 2개가 닫히는 영구자석의 위치가 바뀌므로 실질적인 위치 지시기의 오차라 할 수 있다.

표 1과 표2는 위치지시기의 입력전원 Vin(15 VDC)의 입력오차가 +0.025V 일 경우와 40 Q +0.1%의 오차의 저항일 경우 출력전압을 계산한 표이다. 계산결과에서 알 수 있듯이 입력전압 오 차(0.025V)에 의한 출력전압 오차는 최하부에서는 0.005V이고 상부로 갈수록 점차 누적되어 최상 부에서는 최대 0.0163V까지 증가하는 것을 알 수 있고 마찬가지로 저항 40 Q의 0.1% 오차에 의한 출력전압 오차는 최하부에서는 0.000V이고 상부로 갈수록 점차 오차가 누적되어 증가하여 최상부 에서는 최대 0.0068V까지 증가하는 것을 알 수 있다. 결론적으로 분압회로의 계산식에 의해 두 가 지 오차는 상부로 갈수록 증가하고 저항에 의한 오차보다는 입력 전압에 의한 오차의 크기가 2배 정도 큼을 알 수 있다. 출력전압으로부터 20mm 간격의 위치를 도출할 때는 입력전원 오차와 저 항 오차가 합산되어 가장 오차가 커지는 경우인 위치지시기의 최상부(680mm) 출력전압을 기준으 로 해야 한다.

- 입력전원 오차와 저항 오차를 고려한 680mm에서 출력전압의 범위는 다음과 같다.

위치	기준전압	출력전압
(mm)	(∨)	(∨)
0	3.0	3.0000
20	3.2	3.2002
40	3.4	3.4004
60	3.6	3.6006
80	3.8	3.8008
100	4.0	4.0010
120	4.2	4.2012
140	4.4	4.4014
160	4.6	4.6016
180	4.8	4.8018
200	5.0	5.0020
220	5.2	5.2022
240	5.4	5.4024
260	5.6	5.6026
280	5.8	5.8028
300	6.0	6.0030
320	6.2	6.2032
340	6.4	6.4034
360	6.6	6.6036
380	6.8	6.8038
400	7.0	7.0040
420	7.2	7.2042
440	7.4	7.4044
460	7.6	7.6046
480	7.8	7.8048
500	8.0	8.0050
520	8.2	8.2052
540	8.4	8.4054
560	8.6	8.6056
580	8.8	8.8058
600	9.0	9.0060
620	9.2	9.2062
640	9.4	9.4064
660	9.6	9.6066
680	9.8	9.8068

표 1 입력전압 오차 0.025V일 표 2 40옴 저항 오차 0.1%일 경우 경우 출력전압 출력전압

따라서 출력전압을 20mm 간격의 위치정보로 환산할 때는 실제 위치지시기에서 출력되는 전압 이 입력전원과 저항 오차가 없을 때 계산된 매 20mm 마다 출력되는 기준전압을 기준으로 ±

경우 출력전압				
위치	기준전압	출력전압		
(mm)	(∨)	(∨)		
0	3.0	3.0050		
20	3.2	3.2053		
40	3.4	3.4057		
60	3.6	3.6060		
80	3.8	3.8063		
100	4.0	4.0067		
120	4.2	4.2070		
140	4.4	4.4073		
160	4.6	4.6077		
180	4.8	4.8080		
200	5.0	5.0083		
220	5.2	5.2087		
240	5.4	5.4090		
260	5.6	5.6093		
280	5.8	5.8097		
300	6.0	6.0100		
320	6.2	6.2103		
340	6.4	6.4107		
360	6.6	6.6110		
380	6.8	6.8113		
400	7.0	7.0117		
420	7.2	7.2120		
440	7.4	7.4123		
460	7.6	7.6127		
480	7.8	7.8130		
500	8.0	8.0133		
520	8.2	8.2137		
540	8.4	8.4140		
560	8.6	8.6143		
580	8.8	8.8147		
600	9.0	9.0150		
620	9.2	9.2153		
640	9.4	9.4157		
660	9.6	9.6160		
680	9.8	9.8163		

0.03V이내 들어오면 해당 20mm 간격의 위치정보로 환산하고 각 단계의 기준전압을 기준으로 ±
0.03V이내의 새로운 위치전압이 출력되기 전 까지는 현재의 표시위치를 유지하는 알고리즘을 적
용하면 순조로이 출력전압에서 위치정보를 환산할 수 있을 것이다.

5. 결론

볼스크류형 CEDM은 대용량 상용원자로와 달리 미세조정 기능이 중요하므로 실제 제어봉의 위치를 감지하여 안전계통에 위치신호를 보내는 위치지시기의 개발은 중요한 개발분야이다. 볼스 크류형 CEDM의 운전 특성을 고려하여 위치지시기는 높은 정밀도와 신뢰도를 가지고 있어야 한 다. 이를 위해 영구자석을 포함한 선정된 부품들을 전자기 해석을 통해서 추후 발생이 예상되는 되는 영구자석의 노화현상과 출력전압의 오차를 계산하였다. 계산결과, 설계/제작 된 위치지시기 의 성능이 노화현상이나 출력전압의 오차가 모두 설계기준 오차 범위 안에 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문서

- [1] 유제용 외 다수, 제어봉 위치지시기의 설계기술 분석-KAERI/AR-551/99, 한국원자력연구소, 1999
- [2] 유제용 외 다수, "Development of Linear Pulse Motor Type Control Element Drive Mechanism for SMART", International Conference on Nuclear Engineering, ICONE9-No.318, 2001
- [3] 유제용 외 다수, SMART CEDM의 제어봉 위치지시기 개념설계, pp. 105, '99 추계
 원자력학술발표회 요약집, 1999
- [4] 유제용 외 다수, 일체형원자로 SMART의 제어봉 위치지시기 개발, pp. 921, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집(D), 2001
- [5] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기용 자속집속기 설계, 2002 춘계
 원자력학술발표회, 2002
- [6] 유제용 외 다수, SMART 제어봉 위치지시기에 쓰이는 리드스위치의 자기장 및 히스테리시스 분석, 2002 추계 원자력학술발표회, 2002
- [7] 유제용 외 다수, Development of Magnetic Flux Concentrator of Position Indicator for SMART CEDM, ANS 2002 Winter Meeting, 2002
- [8] 유제용 외 다수, 볼스크류형 CEDM용 제어봉 위치지시기의 예비 성능시험, 2003 춘계 원자력학술발표회, 2003
- [9] Aleph Reed Switches Products Catalog, 1999