

원전용 제어봉구동장치의 해석적인 신뢰성 비교 평가

권순만, 안종보, 천종민, 이종무, 신종렬
한국전기연구원

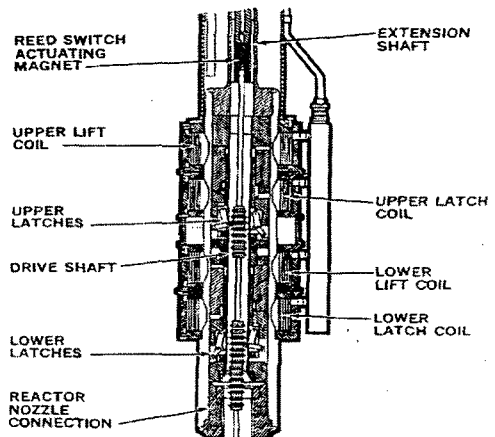
A Comparative Reliability Evaluation of Rod Control Mechanisms with Corresponding for Nuclear Power Plants

S. Kwon, J. B. Ahn, J. M. Cheon, J. M. Lee, and J. R. Shin
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper deals with a comparative evaluation of the reliability of control rod drive mechanisms including their driving methods for nuclear power plants. Basically there exist two types of electromagnetic-jack-type drive mechanisms in commercial use that are called as Control Rod Drive Mechanism and Control Element Drive Mechanism. Each type has corresponding drive sequence to make the movements of insertion and withdrawal.

A state-space model is derived for each model graphically. Then the evaluation of the reliability is carried out on the programming tool called SHARPE. The evaluation does not give any meaningful numerical values for the reliability but just shows a relative degree to each other in view of reliability.

되나 4개의 코일을 가진 경우에는 2개의 부분 피치로서 한 스텝을 움직이게 되어 있어 그 구동 시퀀스가 서로 다른 형태로 되어 있다.



(가) 4개의 코일을 가진 구동장치

1. 서 론

그동안 상대적으로 국내 기술개발이 낙후되어 있던 원전용 계측제어시스템 기술이 본격적으로 개발되고 있다 [1]. 이 사업의 한 개발분야로서 제어봉구동장치 제어기기 개발이 진행되고 있다. 제어봉구동장치란 원전에서 원자로내의 열출력을 제어하는 핵심 요소중의 하나인 제어봉을 구동하는 중요한 장치이다. 따라서 이 장치의 신뢰성 확보는 원전의 신뢰성확보에 직결되는 중요한 요소중의 하나라고 할 수 있다.

국내에서 이용되고 있는 제어봉구동장치의 대표적인 것으로는 두 가지가 있는데 모두 전자기적인 원리를 이용하여 잭(Jack)과 전기자(Armature)를 움직여 그 목적하는 동작, 즉 삽입 및 인출을 행하게 된다 [2]. 두 가지 형식의 큰 차이는 구동을 위한 전력공급용 코일이 각각 3가지와 4가지(3,4)로 다르게 되어 있는데 이에 따라 그 구동방식도 차이가 나게 된다.

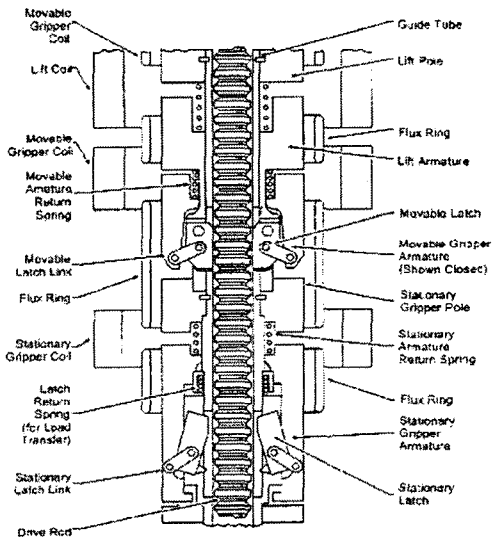
본 논문에서는 이러한 구동방식의 차이를 포함하는 제어봉구동장치의 신뢰성을 두 가지 경우에 대해 같은 조건인 경우에 대해 비교해 본다.

2. 본 론

2.1 제어봉구동장치의 특징

국내의 원전에서 대표적으로 사용되고 있는 제어봉구동장치의 개략적인 모양은 다음 그림 1과 같다. 그림 1의 (가)에 표시된 것이 4개의 코일을 가진 형식으로 주로 표준원전에 적용되어 있으며 (나)에 표시된 것이 Westinghouse사의 원전에 적용되어 있는 3개의 코일을 가진 형식이다.

3개의 코일을 가진 구조에서는 삽입 및 인출동작이 Movable Gripper Armature의 한 피치로서 수행이



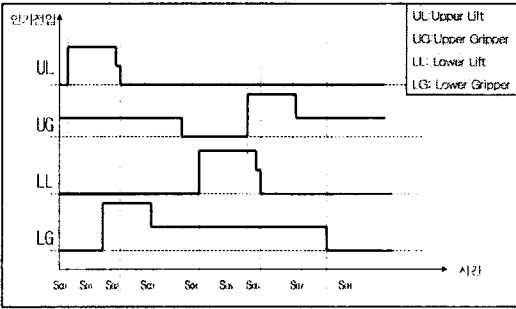
(나) 3개의 코일을 가진 구동장치

그림 1. 제어봉구동장치

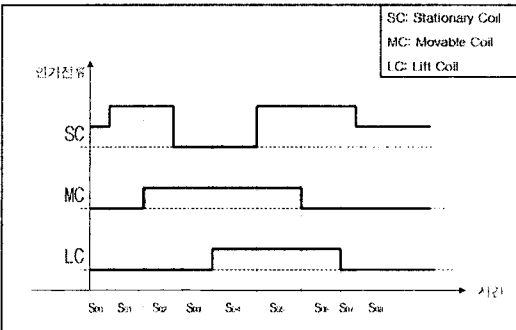
2.2 구동 시퀀스의 예 (인출동작)

다음 그림 2는 두 가지 형식에 대해 인출동작시의 구동 시퀀스를 나타낸다. 먼저 (가)는 그림 1에서의 (가)에 대한 구동 시퀀스를 나타내는 데 각 구형파형은 각각의 코일에 가해지는 구동전압을 나타낸다. state-space 모델링에 이용하기 위해 그림에서 각 state를 S₀₀부터 S₀₈로 표시하였다. 그림으로부터 S₀₀와 S₀₈은 같은 state임을 알 수 있다.

마찬가지로 그림 1의 (나)의 구조에 대한 구동 시퀀스는 그림 2의 (나)와 같이 표시할 수 있으며 여기서도 각 state는 S₀₀로부터 S₀₈까지로 표시된다.



(가) 4개의 코일형에 대한 구동시퀀스(인출시)



(나) 3개의 코일형에 대한 구동시퀀스(인출시)

그림 2. 인출동작에 대한 구동 시퀀스 비교

2.3 신뢰성 평가 대상 및 조건

신뢰성을 비교 평가하기 위해서는 먼저 동일한 전제조건을 필요로 한다. 따라서 여기서는 다음과 같은 조건을 고려하기로 한다.

가. Fault는 전기적인 사항만을 고려한다. 즉, Timing 회로/Gating 회로/ 전력변환장치부 등의 부분적 고장, 코일의 단선 등만을 고려하며 기계적으로는 Fault-free로 가정한다.

나. Error는 코일의 power 입력의 On/Off의 2-레벨(또는 High/Low/Ground의 3-레벨)만 존재한다고 가정한다.

다. Failure는 지령된 삽입/인출 동작의 완료 유무와 제어봉의 Drop 등을 의미한다.

라. Fault는 동시에 두 가지 이상 일어나지 않는다.

마. 제어봉의 한 step 인출/삽입 동작시에 두 가지 이상의 Fault는 일어나지 않는다.

바. Transient Fault는 무시한다. 즉 fault stuck-at-H/L/G의 형태뿐이다.

사. Fault의 유무에 상관없이 한 step 동작내의 모든 substep을 위한 제어동작은 계속되어 완료된다.

아. Substep 동작완료 체크 기능 포함하지 않는다.

자. 별도의 Drop 방지 로직이 없는 것으로 가정한다.

차. 그림 1의 (가)형식에서 substep 동작완료에 따르는 High/Low transition fault는 무시한다.

2.4 구동시퀀스 분석

2.4.1 시퀀스 분석 예(4개의 코일 형식)

다음의 표 1은 4개의 코일 형식에 대해 인출시의 구동 시퀀스를 분석한 것이다. 표의 우측 부분에 표시한 바와 같이 각 문자는 여러 가지 결과를 나타내고 있다.

St.	U	L	L	전압	St.	U	L	L	전압	St.	U	L	L	전압	
	L	G	G	S		L	G	G	S		L	G	G	S	
S00	G	H	G	S	S30	G	H	G	S	S60	G	H	G	S	
S01	G	H	G	SF	S31	G	H	G	D	S61	G	H	G	D	
S02	G	H	H	SF	S32	G	H	H	SF	S62	G	H	H	N	
S03	G	G	G	D	S33	G	G	G	N	S63	G	G	H	D	
S04	H	H	G	N	S34	H	H	G	SF	S64	H	H	H	SF	
S05	H	H	G	S	S35	G	G	G	S	S65	G	H	H	S	
S06	H	H	G	H	N	S36	G	G	G	D	S66	G	H	G	N
S07	H	H	H	SF	S37	G	G	H	N	S67	G	H	H	SF	
S08	H	H	H	C	SF	S38	G	G	H	N	S68	G	H	H	SF
S09	H	G	G	D	S39	G	H	G	H	SF	S69	G	G	H	D
S10	H	G	G	S	S40	H	G	H	SF	S70	H	H	G	SF	
S11	H	H	H	SF	S41	H	G	H	N	S71	H	G	G	D	
S12	H	G	G	D	S42	H	G	H	N	S72	G	H	H	SF	
S13	H	G	G	S	S43	G	H	G	H	SF	S73	G	G	H	D
S14	G	H	G	N	S44	H	G	H	SF	S74	H	H	G	SF	
S15	H	H	G	H	S	S45	G	H	H	S	S75	H	G	G	S
S16	H	H	G	D	S46	G	H	G	D	S76	G	H	G	SF	
S17	H	H	H	SF	S47	G	G	H	SF	S77	G	H	G	SF	
S18	H	G	G	H	D	S48	G	H	H	N	S78	G	G	G	D
S19	G	H	G	N	S49	H	G	H	SF	S79	H	H	G	N	

H	High/Low
G	Ground
CF or D	Critical Failure (Drop)
S	Stop
N	Normal
SF	Safe Failure

표 1. 4코일 구조에 대한 구동 시퀀스 분석표

Failure의 분류 중에는 Critical과 Safe 두 가지가 있음을 알 수 있는데 Safe Failure란 제어봉이 낙하하지 않고 동작도 일어나지 않는 상태, 즉 stuck된 것을 의미한다.

2.4.2 시퀀스 분석 예(3개의 코일 형식)

표 2는 3개의 코일 구조에 대해 인출시의 구동 시퀀스를 분석한 것이다. 이 표에서는 앞의 경우에서 보지 못했던 상태로서 PN(Pseudo Normal)이 있는데 이것은 동작은 일어나나 기기 전체가 정상상태는 아닌 것을 의미한다.

St.	SC	MC	LC	전압	St.	SC	MC	LC	전압	St.	SC	MC	LC	전압
S00	L	G	G	S	S30	G	L	G	S	S60	H	G	L	S
S01	G	G	G	D	S31	G	L	L	N	S61	H	G	G	N
S02	H	G	G	N	S32	G	G	G	D	S62	H	L	L	PN
S03	L	G	L	SF	S33	L	L	G	SF	S63	L	G	L	SF
S04	L	L	G	PN	S34	H	L	G	SF	S64	G	G	L	D
S05	H	G	G	S	S40	G	L	L	SF	S70	H	G	G	S
S06	L	G	N	SF	S41	L	L	N	SF	S71	L	G	G	N
S07	L	G	G	D	S42	G	G	L	D	S72	H	L	G	SF
S08	H	L	G	N	S43	L	L	L	N	S73	L	G	G	N
S09	L	G	G	SF	S44	H	L	L	N	S74	G	G	G	D
S10	H	L	G	S	S50	H	L	L	S	S80	L	G	G	S
S11	H	G	G	D	S51	H	L	G	SF	S81	G	G	G	D
S12	H	L	L	SF	S52	H	G	L	N	S82	H	G	G	N
S13	L	L	G	SF	S53	L	L	L	SF	S83	L	G	L	SF
S14	G	L	G	N	S54	G	L	L	D	S84	L	L	G	PN

H	High
L	Low
G	Ground
CF or D	Critical Failure (Drop)
S	Stop
N	Normal
SF	Safe Failure
PN	Pseudo-normal

표 2. 3코일 구조에 대한 구동 시퀀스 분석표

구동 시퀀스 상의 몇 가지 동작의 예를 들면 다음과 같다.

가. Case 1: D
 S01, S11, S21, S32, S54, S64, S74 → D
 S42→S52→S60→S70→S80→(S10)→(S20)→D

나. Case 2: SF
 S03→S12→S22→S31→S40→S50→S60→S71→S83→...
 S14→S23→S33→S43→S53→S63→S73→S80→...
 S34→S44→S50→S60→S70→S82→...
 S41→S51→S61→S70→S80→...

다. Case 3: PN
 S04→S13→S20→S30→S40→S50→S62→S72→S84→...

2.5 Markov 모델

지금까지 도출한 인출동작에 대한 시퀀스 분석을 두 가지 경우에 대해 Markov 모델을 이용하여 나타내면 다음 그림3과 4가 된다.

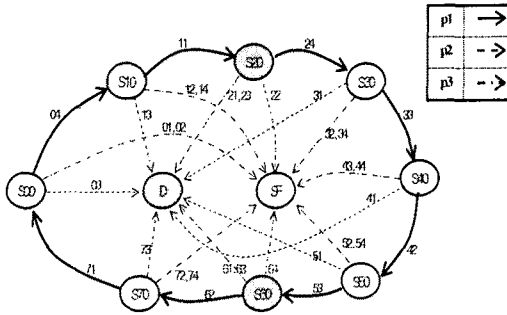


그림 3. 4코일 구조에 대한 Markov 모델(인출시)

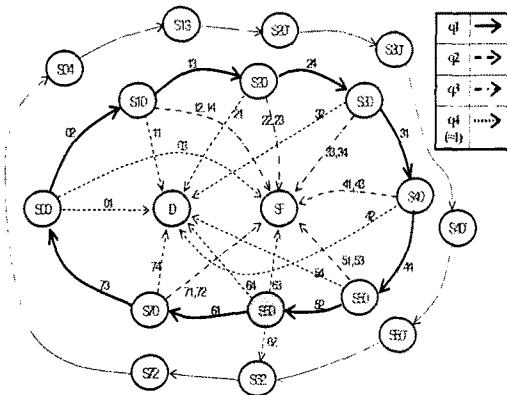
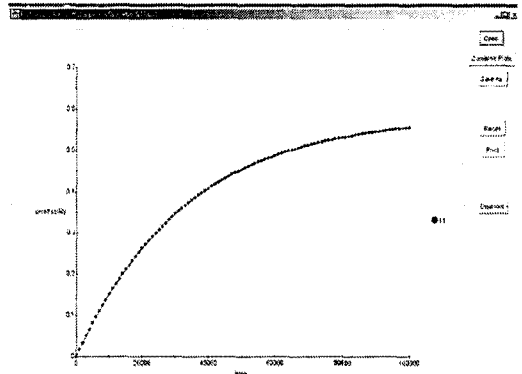


그림 4. 3코일 구조에 대한 Markov 모델(인출시)

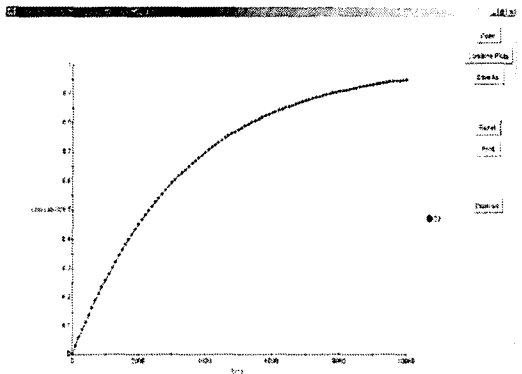
2.6 Unreliability 비교

Reliability를 비교하기 위해서는 unreliability를 비교하여도 된다. 본 연구에서는 각 코일의 공급전력에 대하여 동일한 고장 조건을 가정하며 모든 state 중 D, SF, PN state를 unreliable state로 정하여 분석을 수행한다. 그 결과를 다음 그림 5에 나타내었는데 그림에서 보는 바와 같이 3코일 구조가 4코일 구조에 비해 본 연구에서 가정한 조건하에서는 reliability가 낮음을

알 수 있다.



(가) 4코일 구조의 unreliability



(나) 3코일 구조의 unreliability

그림 5. Unreliability 평가 결과

3. 결 론

국내 가동원전에 사용되고 있는 제어봉구동장치의 신뢰성을 그 구동방식을 포함하여 몇 가지 가정하에서 비교했을 때 4코일 형식이 신뢰성이 상대적으로 높은 것으로 결과가 나왔다. 분석을 위한 각 종 가정 및 조건은 보다 실제에 가깝도록 조정이 필요하며 아울러 구동장치를 구동하는 전력회로를 포함한 신뢰성 분석과 나아가 제어기를 포함한 전 시스템에 대한 분석이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- (1) 김국현, "원전 제측제어시스템 개발", 2001. 2., 한국전기연구원
- (2) "Rod Control Systems", 1982. 7., Westinghouse
- (3) "제어봉 제어계통", 1997, 한국전력공사 원자력발전처
- (4) "SHARPE User's Manual", 2000, Duke University
- (5) Alain Pages & Michel Gondran, "System Reliability: Evaluation and Prediction in Engineering", 1986, Springer-Verlag
- (6) Barry W. Johnson, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems," 1989, Addison-Wesley