

모터구동밸브 여유도 평가시 불확실성 고려

Consideration of Uncertainty in Motor Operated Valve Margin Evaluation

양승옥, 박성근, 한진호, 김양석

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

1997년 6월 13일 과학기술부에서는, 원자력발전소에 설치된 안전관련 모터구동밸브(MOV)들에 대한 설계기준 검토부터 설계기준 조건하에서의 운전성 시험 및 제어스위치 설정 등에 대한 규제 권고사항을 발행하였다. 본 논문에서는 모터구동밸브(MOV)의 불확실성을 고려한 여유도 평가 및 제어스위치 설정 방법에 대하여 기술하였다.

Abstract

The regulatory recommendation of Ministry of Science and Technology(MOST) dated June, 13, 1997 requires KEPCO to ensure the capability of performing the intended functions for all safety related Motor Operated Valves(MOVs) in nuclear power plant by reviewing MOV design bases, verifying MOV switch setting, testing MOVs under design basis condition and making necessary corrective actions. An evaluation method of MOV operating margin considering uncertainties and control switch setting method are included in this paper.

1. 서론

원자력발전소의 안전관련 모터구동밸브(MOV)는 원자력발전소 운전과 안전에 직결된 설비로서, 모터구동밸브(MOV)의 신뢰성 및 운전성 확보는 매우 중요하다. 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는, 1985년 6월 9일 Davis-Besse 발전소의 주급수 및 보조급수 완전상실사고 이후, 모터구동밸브(MOV) 관련 문제점들의 중요성을 인식하여 안전 관련 계통에 설치되어 있는 모터구동밸브(MOV)들에 대한 설계 검토 및 적절한 제어스위치 설정 및 확인 등의 내용을 포함하고 있는 IE Bulletin 85-03 "Motor-Operated Valve Common Mode Failures during Plant Transient due to Improper Switch Settings"과 Generic Letter 89-10 "Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance"를 발행하였으며, Generic Letter 96-05 "Periodic Verification of Design-Basis Capability of Safety-Related Motor-Operated Valves"를 발행하여 미국내의 GL 89-10 프로그램의 종료를 선언하고, 모터구동밸브(MOV)의 주기점검 프로그램의 설정과 그 효과의 확인 및 가동중 시험을 요구하고 있다.

국내에서는 1997년 6월 13일 과학기술부에서 미국의 규제요건과 유사한 내용의 모터구동밸브(MOV) 안전기능 확인 관련 규제 권고사항을 발행하였으며, 원자력발전소에 설치된 안전관련 모터구동밸브(MOV)들에 대한 설계기준 검토부터 설계조건하에서의 운전성 시험 및 여유도 확보를 요구하고 있다. 이에 따라, 한전 전력연구원에서는 규제범위에 해당하는 모터구동밸브(MOV)의 선정과 설계기준 검토, 설계기준 조건하에서의 모터구동밸브의 구동기 출력 및 최소 스템 요구 힘 등을 평가하는 방법론 및 여유도 확보방안 등에 대한 연구를 수행하게 되었다.

본 발표 논문에서는 위에 언급된 일련의 연구들중 모터구동밸브의 여유도 평가방법에 대해 기술하고자 한다.

2. 본론

여유도란 불확실성을 고려한 최소 요구 스톨스트/토크와 제어 스위치 트립시 구동기가 제공할수 있는 최대 스톨스트/토크의 차이를 의미하며, 모터구동밸브의 여유도 평가시에는 다음과 같은 잠재적인 불확실성 요소를 고려하여야 한다.

- 제어 스위치 반복성
- 진단장비 및 측정센서의 불확실성
- 부하율
- 스프링 팩 풀림
- 스템 팩터 변동(윤활 저하 등)

이러한 불확실성들의 결합된 영향을 평가하기 위해서는 불규칙적 불확실성 요소들

(즉, 토크 스위치 반복성, 측정의 정확성 등)과 규칙성을 갖고 있는 불확실성 요소들 (부하율 영향 등)을 구분하여야 한다. 각 원인의 최대 영향을 단순히 더하는 가장 보수적인 접근방법을 사용하는 대신에, 각 불확실성 요소들의 특성을 고려한 좀더 정밀한 통계학적 접근방법을 사용하여 결합하는 것이 필요하다. 이러한 통계학적 접근 방법을 사용한 불확실성들의 결합에 의해 여유도를 평가를 현실화할 수 있다.

현재, 이들 불확실성 요소에 대한 해석적 접근은 구동기 출력 스트레스에 따른 스팀 요소 변동에 대해서는 가능하나, 나머지 4개의 불확실성 요소에 대한 해석적 계량은 불가능하다.

본절에서는 이러한 불확실성 요소의 크기 예측시 고려할 점, 원인 등 관련 데이터들을 좀더 구체적으로 살펴 보겠다. Fig. 1에 불확실성 요소를 고려한 최소 요구 스트레스/토크, 최대 구동기 출력과 현재 스위치 설정치 등의 관계가 도식화되어 있다.

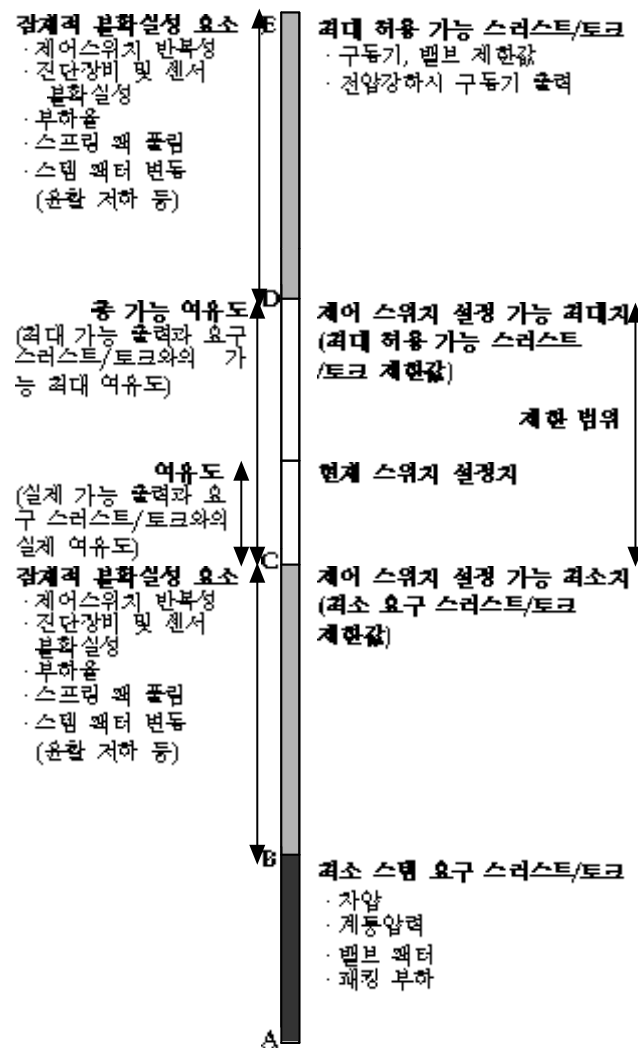


Fig. 1 Typical MOV margin components

2.1 불규칙적 불확실성

불규칙적 불확실성은 제어 스위치 반복성, 진단장비 및 측정센서 등의 불확실성 요

소로 구성되며 이 값은 아래식과 같이 각 요소의 제곱을 더한 뒤 제곱근을 구하는 SRSS(Square Root of Sum of Squares)방법에 의해 구한다.

$$\text{총 불규칙 불확실성} = \sqrt{TE_1^2 + \dots + TE_n^2 + (TSR^2 \text{ or } LSR^2)} \quad (1)$$

여기서, TE_i : 진단장비 및 측정센서의 불확실성

TSR : 토크스위치 반복성

LSR : 리미트스위치 반복성

2.1.1 제어스위치 반복성(Control Switch Repeatability)

토크 스위치 반복성(TSR: Torque Switch Repeatability) 토크 스위치가 제어 스위치로 사용되는 경우 설정된 토크 스위치 트립시 구동기의 출력 토크가 일정하지 않고 각각 다르게 나타나는 현상을 고려하는 값으로서 구동기 제작사가 제공하는 값을 적용한다. 설정된 토크 스위치에 대한 구동기의 출력 스톱/토크는 웜과 웜기어, 스프링 팩과 하우징 그리고 웜축(웜 샤프트)의 키홈(spline), 그리고 스프링 팩의 stiffness 등에서의 마찰계수의 변화에 따라서도 변화한다.

리미트 스위치 반복성(LSR: Limit Switch Repeatability) 제어스위치가 리미트 스위치인 경우에도 모터-구동기에 의한 불확실성 요소들이 존재한다. 즉, 모터-구동기 모델과 사이즈, 설계와 제작의 차이 등이 스위치 설정시 고려되어야 한다. 구동기/제어 스위치 반복성에 대한 성능 데이터는 제작사나 실험에 의해 얻을 수 있다.

2.1.2 진단 장비 및 측정센서의 불확실성(TE_i)

최근 다양한 유형의 밸브 스템의 스톱/토크를 측정하는 MOV 진단장비들이 상용화 되어 있다. 이러한 장비들의 측정방법과 원리들은 서로 다르며, 스템 스톱/토크와 관련된 여러 다른 파라미터들을 직접 혹은 간접적인 방법으로 측정한다. 각 진단장비의 측정 정확성은 MOV에 장착하여 사용할 때의 물리적인 문제뿐만 아니라 장비 고유의 특성에 따라 다르다.

진단장비 및 측정 센서의 불확실성은 진단장비 자체, 측정에 사용되는 센서, 변환기(Transducer)의 불확실성으로 구성된다. 스톱/토크 값에 대해서는 스톱/토크 센서의 불확실성 값, 토크 값에 대해서는 토크 센서의 불확실성 값을 사용한다.

진단 장비 및 센서의 불확실성값은 진단장비 제작사 제공값을 사용한다.

2.2 규칙적 불확실성

규칙적인 불확실성은 부하율, 스프링 팩 풀림과 스템 윤활 저하 등과 같은 종속적인 불확실성 요소들로 구성되며 규칙성을 가지므로 단순 합산한다.

$$\text{총 규칙적 불확실성} = \text{ROL} + \text{SPR} + \text{SLD} \quad (2)$$

여기서, ROL : 부하율

SPR : 스프링 팩 풀림

SLD : 스템 윤활 저하

2.2.1 부하율(ROL: Rate of Loading or Load Sensitive Behavior)

MOV가 높은 차압상태에서 동작될 때 부하율 변화로 인하여 주어진 토크 스위치 설정값에 비해 구동기 출력 스트레스가 감소하는 현상이 관찰되었다. 발전소 테스트 자료와 최근 산업계의 결과에 의하면, 높은 차압조건에서 MOV를 시험하였을 때 토크 스위치 작동시의 스트레스가 5 내지 10% 감소하는 것이 일반적인 것으로 나타났다. 경우에 따라서는 25%나 스트레스가 감소하는 경우도 있다.

현재로서는, 이 잠재적인 불확실성 요소를 예측할 수 있는 해석적인 방법은 없으며, 시험과 해석을 통한 부하율 영향의 정량화와, 이 현상에 대한 이해를 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 정적/동적 실측(In-situ) 시험만이 대상 MOV에 대한 이 불확실성 요소 정량화에 대해 유일하게 신뢰성 있는 방법으로 알려져 있다. 경우에 따라, 다른 발전소나 동일 발전소내의 유사한 운전 상황의 MOV에 대한 시험 결과를 대상 MOV의 부하율에 의한 불확실성 값으로 고려할 수 있다. 즉, 부하율을 예측할 수 있는 해석적인 방법은 없으므로 다른 발전소나 동일 발전소내의 유사한 운전 상황의 모터 구동 밸브에 대한 시험 결과를 이용하여 값을 구한다.

2.2.2 스프링 팩 풀림(SPR: Spring Pack Relaxation)

토크 스위치 제어인 경우 일정기간동안 스프링 팩이 압축되어 있으면 워셔의 풀림 현상이 나타나고 스프링의 프리 로드를 감소시켜 출력 토크를 감소시키게 된다. 이 현상을 고려하기 위한 값은 구동기의 모델에 따라 워셔 풀림의 정도는 다르게 나타나나 최대 5%를 적용한다.

2.2.3 스템 윤활 저하(SLD: Stem Lubrication Degradation)

스템 윤활 저하는 시간이 경과함에 따라 스템과 스템 너트 사이의 윤활이 저하되어 스템 팩터가 변화하는 현상을 의미한다. 스템팩터는 토크와 스트레스의 비로 정의되며 MOV 여유도 결정에 있어서 가장 중요한 부분을 차지한다. 여기서, 스템팩터는 스템과 스템 너트사이의 마찰계수 등을 이용하여 계산할 수 있으나 정적시험을 통해 확인되어야 한다.

전술하였듯이 설계기준 스템 팩터의 결정은 밸브의 운전 여유도 결정에서 중요한 부분이다. 밸브의 스템과 스템 너트의 경우 토크와 스러스트의 변환은 마찰 계수가 유일한 인자이며 부하의 변화에 따라 변한다는 것을 알고 있다. 만약 실험이 설계 기준 상태의 발전소에서 실제로 수행된다면 운전 마진의 결정은 간단하겠으나 이 실험이 용이하지 않은 경우 설계 기준보다 낮은 상태의 결과로부터 외삽법 등 해석적인 방법으로 유추하는 경우 그 적정성을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 밸브 작동시 부하와 윤활 현상의 반응을 해석하는 것은 대단히 어렵다.

2.3 불확실성을 고려한 최소 요구 스러스트/토크와 최대 허용 스러스트/토크 조정

2.1과 2.2에서 기술한 불확실성 요소를 고려하여 최소 요구 스러스트/토크값과 허용 가능 최대 스러스트/토크값을 조정한다.

2.3.1 최소 요구 스러스트/토크 제한값

최소 요구 스러스트/토크는 불확실성 요소들에 의해 증가되며 이를 계산하기 위해 아래와 같이 조정계수(AF: Adjustment Factor)를 구한다.

2.3.1.1 토크 스위치 제어시

토크 스위치가 제어 스위치인 경우는 물론이고 리미트 스위치가 제어 스위치인 경우에도 토크 스위치를 설정해야하는 경우에 적용한다.

스러스트. 최소 스템 요구 스러스트는 2.1의 불규칙적인 불확실성 요소와 2.2의 규칙적인 불확실성 요소의 합만큼 증가하므로 조정 계수는 이 두 요소의 합이 된다.

$$AF_{Tb} = \text{총 불규칙적 불확실성} + \text{총 규칙적 불확실성} \\ = \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} + ROL + SPR + SLD \quad (3)$$

토크. 최소 스템 요구 토크는 2.1의 불규칙적인 불확실성 요소와 2.2의 규칙적인 불확실성 요소중 스프링 팩 풀림만 고려한다. 이때의 조정 계수와 조정된 토크는 다음과 같다.

$$AF_{Tt} = \text{총 불규칙적 불확실성} + \text{스프링팩 풀림} \\ = \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} + SPR \quad (4)$$

2.3.1.2 리미트 스위치 제어시

리밋 스위치가 제어 스위치인 경우, 최소 요구 스러스트/토크는 변화하지 않는다.

$$AF_{T_R} = AF_{T_Q} = 0 \quad (5)$$

2.3.1.3 최소 요구 스러스트/토크 제한값 (토크 스위치 설정 가능 최소값)

설계검토시에 구한 최소 스템 요구 스러스트/토크에 불확실성 요소를 고려하여 최소 요구 스러스트/토크 제한값을 구한다.

$$F_{R\min} = F_R \times (1 + AF_{T_R}) \quad (6)$$

여기서, $F_{R\min}$: 최소 요구 스러스트 제한값

F_R : 최소 요구 스러스트

AF_{T_R} : 스러스트 관련 조정 계수

$$T_{R\min} = T_R \times (1 + AF_{T_Q}) \quad (7)$$

여기서 $T_{R\min}$: 최소 요구 토크 제한값

T_R : 최소 요구 토크

AF_{T_Q} : 토크 관련 조정 계수

2.3.2 최대 허용 스러스트/토크 제한값

최대 허용 스러스트/토크는 불확실성 요소들에 의해 감소되며 이를 계산하기 위해 아래와 같이 조정계수(AF: Adjustment Factor)를 구한다.

2.3.2.1 토크 스위치 제어시

토크 스위치가 제어 스위치인 경우는 물론이고 리밋 스위치가 제어 스위치인 경우에도 토크 스위치를 설정해야하는 경우에 적용한다.

스러스트. 최대 허용 스러스트는 2.1의 불규칙적인 불확실성 요소만큼 감소한다.

$$\begin{aligned} AF_{T_R} &= \text{총 불규칙적 불확실성} \\ &= \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} \end{aligned} \quad (8)$$

토크. 최대 허용 토크도 불규칙적인 불확실성 요소만큼 감소한다.

$$AF_{T_Q} = \text{총 불규칙적 불확실성}$$

$$= \sqrt{TE_1^2 + TE_2^2 + TSR^2} \quad (9)$$

2.3.2.2 리밋 스위치 제어시

리밋 스위치가 제어 스위치이고 토크 스위치 바이 패스가 98%인 경우에 해당한다.

스러스트 최대 허용 스러스트값은 부하율과 스템 윤택 저하에 의해 감소한다.

$$AF_{Tb} = ROL + SLD \quad (10)$$

토크 리밋 스위치 제어시 최대 허용 토크는 변화하지 않는다.

$$AF_{Tt} = 0 \quad (11)$$

2.3.2.3 허용 가능 최대 스러스트/토크 제한값 (토크 스위치 설정 가능 최대값)

구동기 출력 성능평가지 구한 허용 가능 최대 스러스트/토크에 불확실성 요소를 고려하여 허용 가능 최대 스러스트/토크 제한값을 구한다.

$$F_{A,max} = \frac{F_A}{(1 + AF_{Tb})} \quad (12)$$

여기서, $F_{A,max}$: 허용 가능 최대 스러스트 제한값

F_A : 허용 가능 최대 스러스트

AF_{Tb} : 스러스트 관련 조정 계수

$$T_{A,max} = \frac{T_A}{(1 + AF_{Tt})} \quad (13)$$

여기서, $T_{A,max}$: 허용 가능 최대 토크 제한값

T_A : 허용 가능 최대 토크

AF_{Tt} : 토크 관련 조정 계수

2.4 구동기 출력 설정값 평가 및 재설정

2.4.1 토크 스위치 설정 및 여유도

현재 설정된 토크값(T_{CST})은 구동기 제작사가 제공하는 Generic Spring Pack 차트에서 구한 후 정적시험을 통해 이를 확인한다. 정적시험 결과 확인된 토크값이 2.3.1에서 구한 최소 요구 토크 제한값보다 작으면, 토크스위치를 설정할 수 있는 범

위내에서 최소 요구 토크 제한값과 최대 허용 가능 토크 제한값사이에 토크 스위치를 설정한다.

여유도는 최종 설정된 T_{CSR} 와 2.3.1에서 구한 $T_{R,min}$ 을 이용하여 구한다.

$$\text{여유도} = \frac{T_{CSR} - T_{R,min}}{T_{R,min}} \times 100 \% \quad (14)$$

여기서, T_{CSR} : 토크 스위치 트립시 토크 값

$T_{R,min}$: 최소 요구 토크 제한값

2.4.2 리밋 스위치 설정 및 여유도

일반적으로 밸브 열림시에는 리밋 스위치가 제어 스위치가 되고, 이때 리밋스위치 설정은 모터 및 구동기의 관성효과를 고려하여 백시팅이 발생하지 않도록 설정한다. 보통 밸브 닫힘시에는 토크 스위치가 제어 스위치가 되나 설계시 제어 회로가 리밋 스위치인 경우도 있으며, 이 경우 리밋스witch는 유체 흐름을 완전 차단할 수 있는 위치에 설정한다.

리밋 스위치가 제어 스위치이고 토크 스위치 바이패스가 98%인 경우 2.3.1에서 구한 $T_{R,min}$ 과 2.3.2에서 구한 $T_{A,max}$ 값을 이용하여 여유도를 구한다.

$$\text{여유도} = \frac{T_{A,max} - T_{R,min}}{T_{R,min}} \times 100 \% \quad (15)$$

3. 결론

본 발표 논문에서는 원자력발전소의 안전관련 계통에서 사용되는 모터구동밸브의 여유도 평가시 고려해야 할 불확실성 요소들, 그리고 이 불확실성 요소들과 최소 스템 요구 스트레스/토크 및 최대 허용 가능 스트레스/토크, 제어스위치 설정범위 및 여유도 평가 방법론에 대하여 기술하였다.

본론에서도 언급하였듯이 안전관련 모터구동밸브의 제어스위치 설정과 여유도 평가시 여러 가지 불확실성 요소들을 고려하였으며, 이 불확실성 요소들중 구동기 출력 스트레스에 따른 스템 요소의 변동을 제외한 나머지 4개의 불확실성 요소들은 모두 해석적 계량이 어려워 대부분 가장 보수적인 가정값을 적용하였다. 따라서 이 방법들은 그 적용에 있어 크게 무리는 없지만 매우 보수적인 방법이라 할 수 있다.

따라서, 향후 여유도 평가의 현실화를 위해서는 이러한 불확실성 요소들에 대한 보다 정밀한 예측방법에 대한 연구들이 수행되어 지나치게 보수적인 가정값들의 보수성을 제거해 나가야할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) NRC, 1989, "Motor-Operated Valve Testing and Surveillance: Generic Letter 89-10".
- (2) 과학기술부 규제 권고사항, 1997, "모타구동밸브 및 동력구동게이트밸브 규제요건: 원검71233-205
- (3) EPRI, 1990, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants, Final Report: NP-6660-D".
- (4) EPRI, 1992, "EPRI MOV Performance Prediction Program - MOV Margin Improvement Guide: TR-100449".
- (5) EPRI, 1998, "Thrust Uncertainty Method: Addendum 2 to EPRI TR-103237-R2".
- (6) EPRI, 1994, "MOV Performance Prediction Program-Stem Thrust Prediction Method for Anchor/Darling Double Disk Gate Valves: TR-103232".
- (7) EPRI, 1994, "MOV Performance Prediction Program-Globe Valve Model Report: TR-103227".
- (8) EPRI, 1998, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants (Revision of EPRI/NMAC NP-7501), Volume 2: Butterfly Valves : TR-106563-V2".
- (9) Ivan, L. Belts, Richard G. Simmons, 1994, "Validation of TVA's GL 89-10 MOV Design Methodology", *Proc. of the Third NRC/ASME Symposium on Valve and Pump Testing*, Vol. 2. pp. 219-232.
- (10) EPRI, 1998, "Performance Prediction Methodology Implementation Guid-Revision 2: TR-103244-R2".
- (11) EPRI, 1994, "System Flow Model Description Report: TR-103225".