

원전 안전성 관련 모터구동밸브의 설계기준 성능 평가

박성근

한전 전력연구원 안전분석그룹 책임연구원

김대웅

한전 전력연구원 안전분석그룹 연구원

한 국전력공사는 과학기술부 (MOST)의 규제 권고 사항 이행을 위하여 원자력 발전소의 안전 관련 모터 구동 밸브의 운전성 평가를 위한 프로그램을 1998년부터 개발하였다.

규제 요건의 이행을 위하여는 국내 18개 원전에서 선정된 1,760대의 모터 구동 밸브에 대해 2005년까지 시험 및 해석을 통한 설계 기준 성능 평가를 수행해야 되며, 평가 수행을 위해 밸브가 설치된 유체 계통의 설계검토, 쓰러스트와 토크 해석, 전기 계통 해석, 구동기 성능 해석, 취약부 해석, 여유도 계산, 정적 시험, 동적 시험 및 최종 평가 등에 대한 방법론을 수립하였다.

서론

원전의 안전성 보장은 운전 신뢰성 확보와 더불어 보다 첨예한 관심

사가 되고 있다. 미국은 TMI 사고 이후 원전의 안전성 확보를 위해 폭 넓은 연구 활동을 수행하였다. TMI 사고의 분석 결과에 의하면 만약 PORV의 차단 밸브 (block valve)가 정상대로 닫혔다면 사고는 상당히 완화되었을 것이라고 지적하고 있다. 또한 1985년 미국의 Davis-Besse 원전에서 발생한 주급수 상실 사고에서는 주급수 격리 밸브가 정상적인 전기 신호에 의해 열리지 않았고, 결국 운전원이 hand wheel을 조작하여 열었으며 MOV 고장의 주요 원인은 토크 바이패스 스위치의 설정치가 충분하지 않았던 것으로 밝혀졌다.

미국 NRC에서는 설계 기준 조건에서 밸브의 스위치 설정이 제대로 되었는지 확인할 수 있는 프로그램의 개발과 수행을 원전 운영자들에게 요구하기 위해 IE-Bulletin 85-03을 발행하였으나, 소수의 원

전 운영자들만이 이 요건을 적용하였다.

한편 INEEL(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory)는 6inch 게이트 밸브의 blowdown 시험을 수행한 결과 밸브 제작사들이 제시한 쓰러스트 계산값이 충분하지 않음이 밝혀졌으며, 그 결과로 1989년에 미국 원자력규제위원회는 GL 89-10을 발행하여 원전의 수명 기간 동안 설계 기준 조건하에서 MOV의 운전성 보장을 증명할 수 있는 프로그램의 개발과 수행을 원전 운영자들에게 요구하였다.

GL 89-10의 주요 내용은 설계 기준의 재평가와 적정한 스위치 설정 절차 수립, 시험을 통한 스위치 설정값 변경, 설계 기준 조건하에서 모터 구동 밸브의 운전성 입증 및 발전소 수명 기간 동안의 적절한 스위치 설정값 유지 등이다.

GL 89-10을 수행하는 동안 산업계의 많은 노력으로 인하여 중요한 결과물들이 생성되고 기술이 축적되었다. 미국은 현재까지 대부분의 원전이 GL 89-10의 수행을 완료하였으며 NRC는 1개 원전을 제외한 모든 원전의 수행 결과 보고서를 평가하였다.

GL 89-10에 이어 NRC는 1996년에 GL 89-10을 수행한 밸브들에 대한 주기적 점검을 권고하는 내용의 GL 96-05을 발행하였으며, 미국 산업계는 주기적 점검과 관련하여 밸브의 쓰러스트에 대한 잠재적 영향 요소들의 규명을 보다 원활하게 하기 위해 JOG(Joint Owners' Group)를 결성하였다.

밸브의 운전 횟수 축적과 노화에 의한 밸브 팩터 및 베어링 마찰 계수의 성능 저하와 밸브의 적절한 정적 시험 주기의 결정이 JOG의 주 관심사이며 현재는 임시 프로그램을 마련하여 주기 점검을 수행하고 있다.

한국에서도 지난 수 년 동안 모터 구동 밸브의 문제점이 발견됨에 따라, 1997년 6월 13일 과학기술부는 18개 원전의 모터 구동 밸브들에 대한 성능 평가를 요구하는 규제 권고 사항을 발행하였다.

주요 내용은 원전 사업자는 권고 사항 발행일로부터 2년 안에 설계 기준 검토와 시험 수행 계획을 제출하고, 8년 내로 모든 운전중인 발전

소와 건설중인 발전소에 대해 안전 관련 모터 구동 밸브들에 대한 시험 결과를 제출하는 것으로 되어 있다.

또한 평가 대상 밸브의 시험 수행 2개월 전에 해당 밸브에 대한 설계 기준 검토 결과를 제출하도록 하고 있다. 제한된 기간 동안 18개 원전의 1,760대의 밸브에 대해 평가를 수행하기 위해서는 엄청난 비용과 인력이 투입되어야만 하며 밸브의 시험은 발전소 정지중에만 가능하므로 최대한 시험 시간을 단축해야 하는 어려움이 있다.

따라서 규제 권고 사항의 성공적 이행을 위하여는 최적 수행 계획의 수립이 요구되어 1999년에 영광 1호기를 시범 원전으로 하여 평가를 수행하고 이를 근간으로 하여 전 원전에 수행할 수 있는 안전성 평가 프로그램을 개발하도록 하였다.

평가 방법론

평가 방법론을 보다 명확하게 설명하기 위해 유체 계통 설계 검토, 쓰러스트 및 토크 해석, 전기 계통 해석, 구동기 성능 해석, 취약부 해석, 여유도 계산, 정적 시험 방법, 동적 시험 방법, 최종 평가 방법 등 8개 부분으로 세분하였다.

1. 유체 계통 설계 검토

유체 계통 설계 기준 검토는 안전 관련 모터 구동 밸브가 발전소 수명

기간 동안 동작되고 성능이 유지되어야 하는 최악의 조건을 확인하기 위하여 수행한다. 아래에 열거된 항목들은 밸브의 운전 모드와는 관계 없이 밸브의 설계시 인허가 관련 기본 문서(최종안전성분석보고서, 기술지침서, 계통도면, 밸브도면 등)에 규정되어야 하는 밸브의 일반적인 설계 기준 항목들이며, 밸브 해석 및 시험에 활용된다.

- 디스크 타입
- 평균 시트 직경/디스크 직경
- 밸브의 기능
- 정상 및 사고시 밸브 위치
- 연동 신호
- 지진 등급 및 하중
- 기술지침서상의 행정 시간 요건
- 스템과 배관의 배치
- 고에너지 배관 요건
- 누설 허용 요건

유체 계통 설계 검토 단계에서 가장 중요한 업무 중 하나는 밸브가 운전되는 각 운전 상태에서 배관 구성을 파악하고 밸브에 미치는 차압을 계산하는 것이다. 통상 밸브의 운전시 발생하는 부하는 차압과 패킹 마찰력, 피스톤 효과에 의한 힘 등이며, 이 중 차압에 의해 발생하는 부하가 가장 큰 것으로 알려져 있다. 밸브의 설계 기준 운전 모드는 차압과 배관 압력, 유체의 흐름 방향 및 유량 등에 의한 영향 등을 조합하여 결정한다.

한전은 차압 계산을 위해 몇 가지 방법을 사용하고 있다. 첫 번째 방법은 우선적으로 모터 구동 밸브 차압 계산에 적용하는 것으로 배관 및 배관 구성 기기들에 의한 수두 손실을 무시한 간단한 방법이며 가장 보수적인 방법이다.

동적 시험이 불가능한 밸브의 경우에는 동적 시험을 대체할 수 있는 방법인 EPRI PPM(Performance Prediction Method) 분석 방법을 적용하는데, 이 때 차압 계산은 EPRI SFM(System Flow Model)을 사용하여 수행한다.

차압 계산의 지나친 보수성을 제거하거나, 유체 수격 현상을 고려하여야 할 경우에는 산업계에 널리 사용되는 차압 계산용 상용 코드를 사용할 수도 있다.

첫 번째 설명한 보수적 차압 계산 방법에 비해 SFM과 상용 코드 사용 방법은 계산을 위해 계통 및 밸브에 대한 많은 정보가 필요하므로 소요 비용이 증가하게 된다.

설계 기준 조건에서 유체의 동적 상태를 계산하기 위해서는 아래의 변수들이 조사되어야 한다.

- 유체 형태
- 유체 흐름 방향
- 설계 유량
- 유체 온도

설계 기준 사건의 대기 온도 또한 이 단계에서 분석해야 할 중요한 변수이며, 이는 전기 계통 해석 및

구동기 성능 분석에 활용된다.

2. 쓰러스트 및 토크 해석

설계 기준 조건에서 모터 구동 밸브가 동작되기 위해서는 구동기가 최소 요구 쓰러스트 이상의 힘을 낼 수 있도록 설계되어야 한다.

일반적으로 쓰러스트/토크는 3 단계를 통해 평가되어진다. 쓰러스트의 최초 계산은 정적 시험 전에 토크 스위치의 설정치와 설정창(target window)을 결정하고, 그 성능이 부족할 것으로 예상되는 밸브의 예비품을 미리 준비하는 데 목적이 있다.

다음 단계는 정적 시험을 수행한 후 진단 장비를 사용하여 측정된 실제 패키징 쓰러스트를 적용하여 쓰러스트/토크를 재계산하고 토크 스위치 설정치를 보다 정확하게 결정하는 단계이다.

밸브 디스크가 밸브 시트로 운전 시 요구되는 스템 쓰러스트는 밸브 팩터 방법에 의해 알 수 있다.

정적 시험 단계까지 게이트 밸브 및 글로브 밸브의 밸브 팩터는 각각 0.5 및 1.1을 가정하여 적용한다.

밸브 팩터는 차압을 극복하기 위해 요구되는 쓰러스트를 차압과 밸브 오리피스 면적으로 나눈 것으로 정의된다. 만약 동적 시험이 설계 기준 조건보다 낮은 차압에서 수행되었다면 측정된 밸브 팩터 및 베어링 마찰 계수를 외삽하여 설계 기준

조건에서의 최소 요구 쓰러스트/토크값을 얻을 수 있다.

이 때 패키징 쓰러스트/토크는 정적 시험 때 측정된 값을 사용하며, 밸브 팩터와 베어링 마찰 계수는 이전에 가정된 값과 실제 측정된 값이 비교되어진다. EPRI PPM 코드는 동적 시험이 수행되지 않는 밸브에 적용되어 최소 요구 쓰러스트/토크를 계산하는데 사용된다.

게이트 및 글로브 밸브의 설계 기준 조건에서의 최소 요구 쓰러스트 계산에는 아래와 같은 변수들의 가정값 또는 시험에 의해 측정된 값이 사용된다.

- 밸브 팩터
- 피스톤 효과
- 패키징 쓰러스트

버터플라이 밸브의 경우 그 계산 방법이 EPRI NP-7501 보고서에 기술되어 있다.

최소 요구 토크 계산시 필수적인 변수들은 다음과 같다.

- 베어링 마찰 계수
- 시트 토크
- 패키징 토크
- 동수력 토크 계수
- 정수력 토크

3. 전기 계통 해석

구동기에서 발생하는 최대 유용 가능 토크는 모터에 입력되는 전압에 직접적으로 관련된다. 전기 계통 해석에서는 설계 기준 조건에서 모

터 기동시 모터에 공급되는 최소 전압을 계산하며, 그 결과는 구동기 성능 분석의 입력 자료로 사용된다.

교류 모터(AC motor)의 전압 강하 해석은 한국 표준형 원전(KNSP : Korean Standard Nuclear Power Plant)의 전력 계통 설계에 적용되었던 ELMS-AC 코드를 사용한다.

전기 계통 해석은 발전소 설계 단계에서 제공되어지는 전압 강하 계산서를 기본으로 하며 유체 계통 해석 단계에서 해당 밸브의 설계 기준 운전 모드가 결정되면 이 운전 모드와 관련된 전력 공급 계통이 ELMS-AC 코드에 모델링된다.

전원 계통의 모선(bus)에 대해 설계 단계에서 계산된 값과 새로운 모델에 대해 계산된 값이 일치하지 않으면, 이전의 모델과 새로운 모델을 상호 비교하여 정확한 값을 파악하고 수정한다.

다음 단계는 ELMS-AC 모델을 모선에서부터 모터 제어 센터(MCC : Motor Control Center)로 확장하는 것이다. MCC에서 밸브 모터까지의 온도 보상을 고려한 임피던스는 직접 측정하거나 케이블 관련 보고서에 의해 알 수 있으며, 열동계전기(TOR)의 임피던스도 ELMS-AC 코드에 입력된다.

역률(power factor), 효율, 기동역률, 회전자 전류 비율 등의 모터 자료도 분석 코드에 입력해야 한다.

위의 입력 과정이 완료되면 모터 단에서의 전압 해석이 가능해진다.

4. 구동기 성능 해석

구동기는 설계 기준 조건하에서 최소 요구 쓰러스트 및 토크를 극복할 수 있는 힘이 발생되도록 설계되어야 한다. 구동기 성능의 제한 요소로는 전압 강하 상태에서의 구동기 출력 성능과 구동기 정격 부하 및 최대 스프링 팩 제한치가 있다.

구동기 성능 해석은 제작사마다 방법론이 다르며, 여기에서는 미국의 리미토크(Limitorque) 구동기에 제한하여 설명한다.

리미토크 구동기는 Limitorque Technical Update 98-01과 93-03에 의해 전압 강하 상태에서의 구동기 토크를 계산한다.

먼저, 구동기의 최대 출력을 알기 위해서는 전압 강하시의 모터 출력 토크를 알아야 하는데, 이것은 전기 계통 해석에 의해 구해진 전압 강하 결과에 의해 계산된다. 전압 강하 상태에서의 구동기 출력 토크는 전압 강하시의 모터 출력 토크와 전체 기어비, pullout 효율(pullout efficiency), 적용 계수 및 온도 저하 계수에 의해 얻어진다.

온도에 의한 성능 저하는 설계 기준 사건 동안 대기 환경 온도의 상승과 운전중 온도 상승에 의해 모터 권선의 저항 증가로 인하여 발생한다. 온도 저하 계수는 아래의 변수

들에 의해 예측되어진다.

- 155℃ 초과시 토크 상실 (Limitorque TU 93-03)

- 최대 대기 환경 온도

- 전행정 시간

- 모터 최초 구동 시간

밸브의 전행정 시간은 행정 거리 및 전부하시의 모터 속도, 전체 기어비, 스템 리드(lead) 등에 의해 계산되어진다.

전압 강하시의 구동기 토크 계산을 위한 pullout 효율(pullout efficiency)은 운전중 스톱 발생 및 기동시 중 가장 큰 값을 사용하는데, 이 때 pullout 효율은 중부하(重負荷) 상태에서 모터의 기동 혹은 느린 끌림 동작(lugging)시 적용되는 변수이다.

적용 계수는 제작사에서 제시한 표준 모터와 현장에 설치된 모터와의 차이를 고려하고, 공급되는 전압의 변동을 고려하여 보수적 값인 0.9를 사용한다.

구동기의 정격 쓰러스트/토크는 구동기의 설계 운전 횟수 동안 구조적으로 견딜 수 있는 쓰러스트/토크를 의미하며, 일반적으로 그 값은 제작사에서 제공되며 최대 스프링 팩 설정 토크도 제작사에서 제공한다. 리미트 스위치로 제어되는 경우 구동기의 최대 유용 토크는 전압 강하 상태에서의 구동기 출력 토크 또는 구동기 정격 토크보다 작은 값을 가지며, 토크 스위치로 제어되는 경

우는 위의 두 가지 경우 외에도 최대 스프링팩 설정치에 의해 최대 유용 토크가 제한된다.

게이트 및 글로브 밸브의 구동기에서 발생하는 회전 운동과 토크는 스템 너트와 스템의 기어 물림에 의해 스템의 상하 운동과 쓰러스트로 각각 변환되므로 전압 강하 상태에서의 구동기 출력 쓰러스트와 최대 허용 스프링팩 쓰러스트는 토크와 스템 팩터의 상관식으로 계산되어진다. 이 때 스템팩터는 스템의 형상과 스템 및 스템너트 사이의 마찰에 의해 결정된다.

설계 기준 검토 단계에서는 스템 팩터를 보수적인 가정값을 사용하며, 추후 시험을 수행하여 측정된 스템 팩터값이 사용되어진다.

5. 취약부 해석

취약부 해석은 설계 기준 운전 상태에서 밸브 각 부품의 최대 허용 쓰러스트/토크를 해석하는 데 목적이 있다.

구동기의 최대 허용 쓰러스트/토크는 밸브 부품이 견딜 수 있는 허용 하중(쓰러스트/토크)에 제한되어진다. 각 밸브 부품의 허용 쓰러스트/토크 계산은 밸브 부품에 가해지는 구동기 하중, 유체의 압력 하중 및 지진 하중 등에 의한 응력(stress)과 적절한 허용 응력을 등가로 놓는 전형적인 힘 균형 방정식과 수직 및 전단 또는 굽힘 응력 해

석 방정식을 기본으로 한다.

밸브 동작시 열림과 닫힘시 하중이 다르게 나타나므로 각 밸브 부품의 허용 하중은 열림 및 닫힘에 대해 각각 해석하여야 한다.

연성의 재질로 구성된 부품은 구조적 파괴없이 항복 응력이 발생되므로 굽힘과 비틀림 응력을 해석하기 위한 단순 소성 방법(simplified plastic method)이 적용된다.

일반적으로 요크 플랜지, 구동기 플랜지, 요크 클램프, 스템-디스크 연결부 등이 이러한 부품으로 구분된다. 단순 소성 방법에서는 굽힘 응력을 받는 부품에 대해 형상 계수(shape factor)를 사용한다.

최대 허용 쓰러스트 계산의 첫 번째 과정은 분석 대상 부품의 지진 가속도 영향을 결정하는 것이다. 지진 가속도는 수평 및 수직 방향에 동시에 적용되며, 지진 가속도와 허용 쓰러스트/토크는 개별적으로 고려되어야 한다.

허용 응력은 통상 재료 항복 응력(yield strength)을 적용하며, 이 값은 ASME B & PV Code Section II, ASTM이나, 다른 참고 자료로부터 구한다.

아래의 부품들은 게이트/글로브 밸브의 취약부 해석시 주요 대상 부품들이다.

- 스템
- 요크 다리, 요크 플랜지, 요크 클램프

- 베어링 리테이너 홈 (retainer groove)
- 구동기 플랜지
- 디스크-스템 연결부
- 본넷 목(neck), 본넷 볼트
- 버터플라이 밸브의 취약부 해석 대상 주요 부품은 다음과 같다.

- 디스크와 스템
- 전단 핀
- 스템 키(key)
- 요크 플랜지 볼트
- 구동기 플랜지 볼트
- 구동기 지지대
- 디스크-스템 연결부

6. 여유도 계산

운전 여유도는 구동기의 유용 쓰러스트/토크와 불확실성 효과가 반영된 밸브의 최소 요구 쓰러스트/토크값의 차이로 정의되며, 그 크기는 최소 요구 쓰러스트/토크에 대한 %로 표시된다. 토크 스위치로 제어되는 밸브의 경우 구동기 유용 쓰러스트/토크는 정적 시험시 측정된 토크 스위치 트립시의 값을 사용하고, 리미트 스위치로 제어되는 경우는 구동기 최대 유용 쓰러스트/토크와 취약부 분석에 의한 최대 허용 쓰러스트 중 작은값을 사용한다.

앞에서 설명한 바와 같이 최소 요구 쓰러스트/토크는 3 단계에 걸쳐 평가되어진다. 그 첫 번째가 순수 계산에 의한 최초 스위치 설정 단계이며, 두 번째는 정적 시험 단계,

마지막으로 동적 시험 단계에서 평가되어진다.

최대 유용 구동기 쓰러스트/토크 및 최소 요구 쓰러스트/토크에 적용되는 불확실성은 규칙적(bias) 불확실성과 불규칙적(random) 불확실성으로 나누어진다. 불확실성의 적용 계수는 여유도를 쓰러스트 기준으로 할 것인지 또는 토크 기준으로 할 것인지와 스위치 설정 방식에 따라 다르게 적용된다.

여유도 계산시 고려되어야 할 주요 불확실성 인자는 다음과 같다.

- 진단 장비의 불확실성
- 토크 스위치의 반복성
- 부하율
- 스프링 팩의 완화
- 스템 윤활 저하

부하율은 토크 스위치 트립 시험에서 구동기 출력 쓰러스트값이 정적 조건과 동적 조건에서 다르게 나타나는 현상이며, 정적 조건과 동적 조건에서 발생한 쓰러스트값 차이를 동적 조건의 쓰러스트로 나누는 값으로 정량화할 수 있다.

7. 정적 시험 방법

정적 시험은 모든 안전 관련 모터 구동 밸브에 대해 유량과 차압이 없는 상태에서 시험을 수행한다.

시험의 목적은 밸브의 성능 저하와 이상 상태를 진단하여 보수의 필요성을 확인하고 안전성 평가에 필요한 밸브 성능 정보를 취득하며,

구동기 스위치를 적절하게 설정하는 데 있다.

각 밸브의 최초로 수행한 정적 시험 결과는 추후 밸브 시험 결과와의 비교를 위한 기본 정보로 활용된다.

밸브를 정비하기 전에 밸브의 상태를 확인하기 위한 진단 시험을 as-found 시험이라 하며, 이 때는 스위치의 재설정이나 정비를 하지 않은 상태에서 수행한다.

as-found 시험을 통하여 아래의 변수들에 대한 성능 저하 상태를 확인할 수 있다.

- Bent valve stem
- Non-locking gear set
- Inadvertent or inertial back-seating
- Hydraulic locking
- Broken worm gear tooth
- Malfunctioning torque or limit switches

만약 진단 시험을 통하여 밸브의 운전성에 영향을 미칠 수 있는 성능 저하 현상이 발견되면 적절한 조치를 한 후 as-left 시험을 수행하며 packing gland nut의 조정과 스템 윤활 작업 등도 통상 as-left 시험전에 수행한다.

as-left 시험에서는 스프링 팩킹의 확인, 리미트 스위치와 토크 스위치의 재설정, 행정 시간 등이 승인 기준에 적합하지 확인되어야 하며, 필요하다면 스프링팩을 조절하거나 스위치를 재설정 후 기준을

만족할 때까지 as-left 시험을 반복 수행한다.

정적 시험 동안 취득된 진단 신호 중 주요 포인트의 값은 기록하여 스위치 설정, 운전 여유도 계산, 운전성 확인 및 추후 수행하는 시험 결과와의 비교 등에 활용된다.

진단 신호 중 기록해야 할 주요 항목은 다음과 같다.

- 운전중 쓰러스트/토크
- 최대 쓰러스트/토크
- 시팅시의 쓰러스트/토크
- 제어 스위치 트립시의 쓰러스트/토크
- 토크 스위치 트립시의 스템 팩터
- 언시팅시의 쓰러스트/토크

8. 동적 시험 방법

최소 요구 쓰러스트를 결정하기 위해서는 밸브 팩터, 베어링 마찰 계수, 동수력 토크 계수, 부하율 등 다양한 변수들이 필요하며, 이 값들은 정적 시험에서는 확인되지 않는다. 즉 위의 값들은 동적 시험 전까지는 가정값을 사용하며, 유량과 차압이 존재하는 동적 시험을 통하여 밝혀진다.

동적 시험은 설계 기준 조건에서의 온도보다 낮은 온도에서 시험을 수행할 경우 밸브 팩터가 커지므로 보수적인 결과가 도출되며, 모터 구동 밸브 운전성 확인의 신뢰성 확보를 위해서는 설계 기준 차압과 동일

하거나 유사한 차압에서 시험을 수행해야 한다.

설계 기준 차압에 근접할수록 가정된 불규칙적 불확실성 변수들이 감소되며, 이것은 밸브의 운전 여유도를 보다 많이 확보해주는 역할을 한다. 만약 설계 기준 차압 조건보다 낮은 차압 상태에서 시험을 수행한다면 다양한 차압 조건에서 시험을 수행한 후 설계 기준 차압으로 외삽을 하는 대체 방법이 있다.

이 경우 적정한 외삽을 하기 위하여는 충분히 여러 구간에서의 차압 조건에서 시험을 수행하여야 한다. 또한 동적 시험시 유량의 방향은 설계 기준 사전시의 유량 방향과 같아야 한다. 버터플라이 밸브의 경우는 베어링 마찰 계수와 동수력 토크 계수가 차압에 의한 변수가 아니므로 다양한 차압 조건에서의 시험이 필요하지 않다. 동적 시험 동안에는 아래의 변수들이 실시간으로 취득되어야 한다.

- 쓰러스트(게이트/글로브)
- 토크(버터플라이)
- 압력
- 유체 온도
- 유량
- 스프링팩 변위
- 모터 전류
- 제어 스위치 동작

9. 최종 평가

최종 평가는 모터 구동 밸브가 설

계 기준 조건하에서 운전 제한 조건이나 구조적 제한 조건을 초과하지 않고 목적된 안전 기능을 수행할 수 있는지를 평가하는 것이다.

운전 여유도 평가시 스팀 팩터와 패킹 쓰러스트/토크, 시트 토크, 토크 스위치 트립 쓰러스트/토크 등은 as-left 시험에서 취득한 값을 사용하고, 밸브 팩터와 베어링 마찰 계수, 동수력 토크 계수, 부하율 등은 동적 시험 결과로부터 통계적으로 계산한 값을 사용한다.

통계적 방법에는 발생 가능한 불확실성들을 포함하기 위해 95% 신뢰도 분석법을 적용한다. 만약 밸브가 목표 여유도를 만족하지 못하면 설계 기준 조건에 대한 보다 상세한 분석이 수행되어야 한다.

상세 분석은 유체 계통 해석 단계에서 차압 계산시 적용된 보수성을 배제하고 보다 실제 운전 조건에 근접한 조건에서의 차압을 재분석하는 것으로부터 시작하여, 그 다음 단계로는 전기 계통 해석에서 계통 운전 시나리오상의 보수성을 배제한 재해석 수행을 할 수 있다.

상세 분석은 설계 기준 분석 결과에 대한 재평가뿐만 아니라 여유도 계산에 사용된 시험에 의해 측정된 값들의 적절성 재평가도 포함된다.

최종 평가에서는 as-left 결과의 만족 여부를 판정하며 만족 여부 판정 기준은 다음과 같다.

- 운전 여유도 부족 여부

- 토크 스위치 트립 및 언시팅시 과도 쓰러스트/토크 발생 여부
- 행정 시간 만족 여부
- 스위치 설정의 적절성
- 스톨(stall)의 가능성
- 지나친 비정상 현상 혹은 성능 저하 여부

만약 as-left 결과가 불만족으로 판정되면 불만족 사항을 해결하기 위해 위에서 언급한 항목들을 포함한 일련의 조치 계획이 수립된다.

한국의 모터 구동 밸브 안전성 평가 프로그램 추진 현황

한전에서는 안전 관련 모터 구동 밸브들의 안전성 평가 프로그램을 영광 1호기의 시범 평가 프로그램을 성공적으로 수행한 후 1999년 11월 22일부터 전원전에 확산 적용하고 있다. 2000년 10월 현재까지 전체 1,760대 평가 대상 모터 구동 밸브중 324대에 대한 최초 설계 기준 검토가 완료되었다.

이 중 154대의 밸브들에 대해 정적 시험을 수행하였고, 버터플라이 밸브 4대를 포함한 53대의 밸브들에 대해 동적 시험을 수행하였다.

동적 시험이 불가능한 밸브의 경우는 EPRI PPM을 사용하여 평가를 수행하도록 되어 있으며, 현재 시험을 수행하지 않는 67대의 밸브중 46대에 대해 PPM 해석을 수행하였다. 나머지 21대 밸브의 경우

〈표〉 발전소별 모터 구동 밸브 안전성 평가 프로그램 수행 현황

	발전소	설계 기준 검토	정적 시험	동적 시험	PPM	최종 평가
1	고리1	16	-	-	-	-
2	2	14	14	8	6	14
3	3	34	-	-	-	-
4	4	18	18	7	4	18
5	영광1	32	-	-	-	-
6	2	22	22	7	7	18
7	3	34	-	-	-	-
8	4	15	15	5	4	14
9	울진1	17	17	10	7	17
10	2	-	-	-	-	-
11	3	18	18	6	8	18
12	4	18	18	4	8	16
13	월성1	14	14	4	2	6
14	2	24	18	2	-	-
15	3	24	-	-	-	-
16	4	24	-	-	-	-
합 계		324	154	53	46	121

는 설계기준 차압이 매우 낮아 정적 시험 결과만으로도 밸브의 안전성 평가를 충분히 할 수 있어서 동적 시험 및 PPM 해석을 수행하지 않았다. 또한 동적 시험을 수행한 밸브의 결과는 동일 그룹으로 분류된 다른 밸브의 평가에 활용된다. 〈표〉는 한국의 모터 구동 밸브 안전성 평가 프로그램의 진행 상황을 보여 주고 있다.

한전은 모터 구동 밸브 안전성 평가 프로그램을 수행하면서 몇 가지 중요한 점들을 알게 되었다.

첫째, 제작사에서 최초로 제공한 밸브의 스위치 설정치는 상당수가 적절하지 않은 것으로 판정되었으며, 정적 시험을 수행하여 스위치 설정치를 적절하게 변경하였다.

또한 스팀 윤활 상태의 중요성이 새롭게 인식되어졌다. 스팀에 윤활유 주입을 다시 하면 윤활유 주입 전의 상태(as-found)보다 스팀의 마찰 계수가 현저히 낮아짐이 확인되었으며 대부분의 밸브에서 스팀 마찰 계수가 0.15보다 낮음이 발견되었다. 이는 밸브의 유지 보수에 있어서 적절한 윤활 주입 주기가 매우 중요하다는 것을 의미한다.

또한 몇몇 밸브들의 부하율이 불확실성 값으로 가정한 10%보다 크게 나오는 것이 시험을 통하여 확인되었으며, 이는 밸브의 안전성 입증에 있어서 설계 기준 조건에서 수행하는 동적 시험이 중요하다는 것을

입증하는 것이다.

결론

한전은 지난 2년 동안 정부의 규제 권고 사항 이행을 위해 적극적으로 대처해 왔으며, 특히 설계 기준 검토 및 시험 절차와 방법론을 개발하기 위해 많은 노력을 하였다.

이 과정에서 많은 수의 밸브들에 대하여 각각의 설계 기준 조건에서의 안전성을 확인하기 위해 해석과 시험을 수행하였다.

현재까지 성취한 결과들을 바탕으로 한전에서는 발전소 전수명 기간 동안 모터 구동 밸브의 운전성 보장을 위한 주기적 점검 프로그램의 개발에 주력할 예정이다. 주기적 점검의 주목적은 밸브의 스위치 설정치를 계속 적절하게 유지하는 데 있다. 미국에서의 경험에 의해 이미

밝혀진 바와 같이 밸브의 운전 상태와 관련한 주요 변수들이 운전 시간의 경과와 운전 횟수의 증가에 따라 성능이 저하되며, 이 변수들의 변화와 성능 저하에 대한 추이를 감시하기 위해서는 주기적인 성능 확인 시험이 필요하다.

주기적 점검에 대한 미국의 JOG 프로그램과 해외 경험 자료는 한국의 최적 주기적 점검 프로그램 개발에 포괄적으로 이용될 것이다.

또 하나의 중점 추진 사항은 주기적 시험과 정비 활동을 포함하는 모터 구동 밸브 안전성 평가 전산 프로그램을 개발하는 것이다. 개발되는 전산 프로그램으로 밸브의 설계 기준 해석 및 시험 결과에 대한 평가가 보다 용이하게 수행될 것으로 기대되며, 모터 구동 밸브 안전성 평가 프로그램의 신뢰성과 효율성을 증대시켜 줄 것이다. ☞