

모터구동밸브 안전성 평가시 부하율 이상 사례 연구

A Study on the Anomalous ROL in Safety Evaluation of Motor Operated Valve

배연경, 이도환, 지문학, 홍승열

한전 전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

토크스위치로 제어되는 밸브에서 스템에 작용하는 부하에 따라 스위치 트립시 스템 쓰러스트가 변하는 특성을 부하율이라고 한다. 이 부하율의 주된 원인은 부하가 변함에 따라 스템과 스템너트 사이의 마찰계수가 변하기 때문이다. 모터구동밸브의 설계기준 성능평가를 위한 발전소 현장 시험 결과 부하율이 과도하게 나타나는 이상 현상이 발견되었다. 본 논문에서는 발전소의 모터구동밸브 성능 확인 시험 결과를 토대로 부하율 이상이 나타난 밸브에 대한 원인 규명을 수행하였다.

Abstract

Rate-of-Loading(ROL) is defined as the characteristics of change in stem thrust of motor operated valves (MOVs) at torque switch trip as the stem load is changed. The primary cause for this effect results from the variation of friction coefficient between stem and stem nut. Anomalous high ROL phenomenon is sometimes found during in-situ tests for the evaluation of design basis performance of MOVs. The major causes of ROL anomaly are investigated in this study based on the in-site test results.

1. 서론

1997. 6. 13에 발행된 과학기술부 규제요건에 따라 원전 안전관련 모터구동밸브에 대해 설계 기준 재분석 및 현장에서의 정·동적시험이 수행되고 있다. 차압이 없는 상태에서 밸브상태 확인 및 스위치 설정의 적절성을 평가하고 필요한 경우 스위치 설정값을 조절하는 것이 정적진단시험(이하 정적시험이라 함)의 목적이며 동적 진단 시험(이하 동적시험이라 함)은 설계 기준 조건에 가까운 차압 조건에서 유동에 의한 쓰러스트를 확인하기 위해 수행한다. 이 때 정적시험과 동적시험에서 취득된 토크스위치 트립시 쓰러스트간(즉, 설정 쓰러스트)에 차이가 발생하게 되는데 밸브 전후단에 차압이 존재하는 동적 조건에서는 스템의 부하가 정적시험의 경우보다 천천히 증가하여 낮은 쓰러스트값에서 스위치 트립이 일어나기 때문이다. 밸브에서 스템에 작용하는 부하에 따라 스위치 트립시 스템 쓰러스트가 변하는 특성을 부하율(ROL, Rate-of-Loading)이라고 하며 부하율이 과도한 경우에는 정적 시험을 통해 조정된 스위치 설정값이 실제 밸브 동작 조건에서는 적절하지 않게 되어 운전성이 보장될 수 없게 된다.

본 연구에서는 부하율을 소개하고 발전소 모터구동밸브 성능 확인 시험 결과로부터 부하율 이상이 나타난 밸브에 대한 원인 규명을 수행하였다.

2. 부하율(Rate-of-Loading)

2.1 부하율의 정의

부하율 현상은 토크 스위치에 의해 제어되는 게이트 또는 글로브 밸브의 구동기 출력이 스템에 작용하는 부하의 시간 변화율(Load Time History)에 따라 변하는 것으로 정의하며 이 부하율을 정량화하는 데에는 다음 두 가지 방법이 제안되고 있다.

- 방법 1 : $R_{TST}^{TH} = Th_S^{TST} / Th_{DP}^{TST}$ (2-1)

여기서,

Th_S^{TST} = 정적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트

Th_{DP}^{TST} = 동적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트

- 방법 2 : $R_{TST}^{SF} = SF_{DP}^{TST} / SF_S^{TST}$ (2-2)

여기서,

$$SF = Tq / Th = \frac{d \times (0.96815 \times \frac{1}{\pi \times d_{\pi ch}} + \mu)}{24 \times (0.96815 - \mu \times \frac{1}{\pi \times d_{\pi ch}})} \quad \text{for ACME thread}$$

l = 스템 리드

$d_{\pi ch} = D_s - \frac{D}{2}$

D_s = 스템 직경

p = 스템 피치

μ = 스템 마찰 계수

SF_{DP}^{TST} = 동적시험에서 토크스위치 트립시 스템팩터

SF_S^{TST} = 정적시험에서 토크스위치 트립시 스템팩터

일반적으로 동일한 스위치 설정값에 대해 정적시험보다 차압이 존재하는 동적시험에서 토크스위치가 낮은 값에서 트립되기 때문에 동적시험의 쓰러스트값이 정적시험의 쓰러스트값보다 작아지고 R_{TST}^{TH} 은 1.0보다 커지게 된다. 반면, 스템팩터의 경우 동적시험에서보다 정적시험에서 그 값이 낮게 나타나므로 R_{TST}^{SF} 는 1.0보다 커진다.

현재 모터구동밸브의 설계기준 성능 평가시 부하율은 방법 1의 R_{TST}^{TH} 에서 1을 차감하여 아래 식으로 평가하며 본 논문에서 백분율로 표시된 부하율은 식 (2-3)에 100을 곱한 것이다.

$$ROL = R_{TST}^{TH} - 1 \quad (2-3)$$

그림 2.1, 2.2, 2.3은 EPRI 시험결과로부터 얻은 전형적인 부하율 현상에 대한 그래프이다.[참조(1)] 그림 2.1은 닫힘 행정 동안 동일한 토크스위치 설정값에 대해 정적 및 동적시험에서 스위치 트립시 쓰러스트값의 차이를 보여주고 있다. 그림 2.2와 2.3은 스프링 팩 변위와 토크, 쓰러스트의 관계를 나타낸 것이다. 특히, 그림 2.2는 토크스위치 트립시 토크도 정적시험과 동적시험간에 차이가 있음을 보여주고 있다.

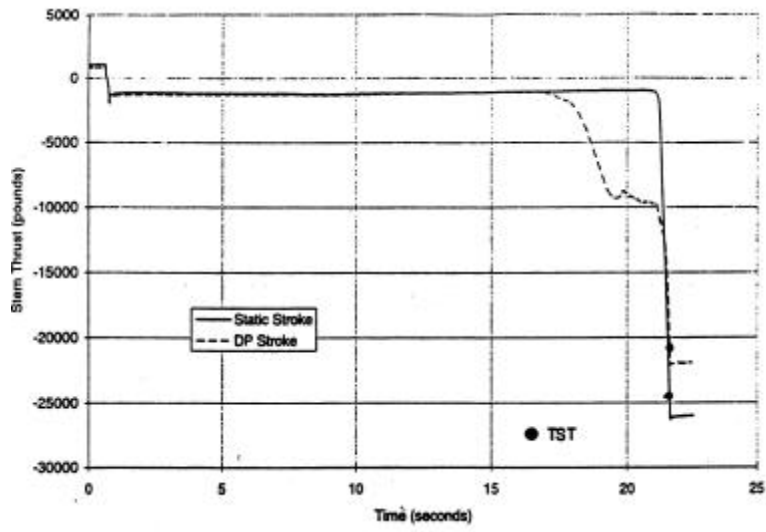


그림 2.1 Load Time History

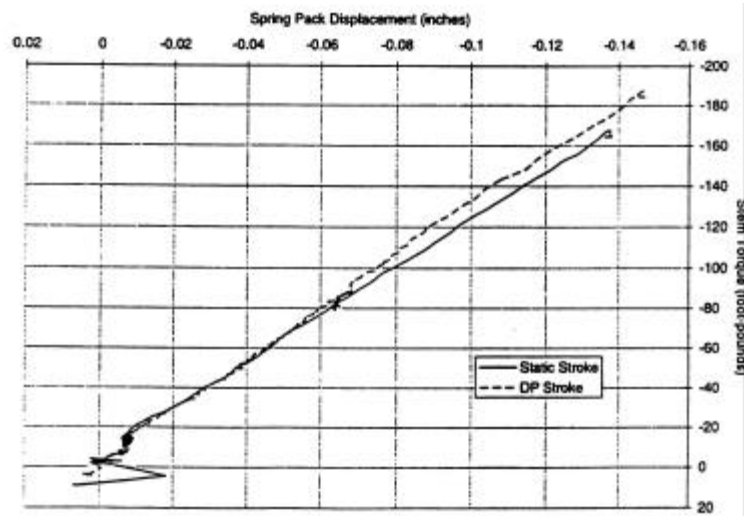


그림 2.2 Torque Change with Spring Pack Displacement

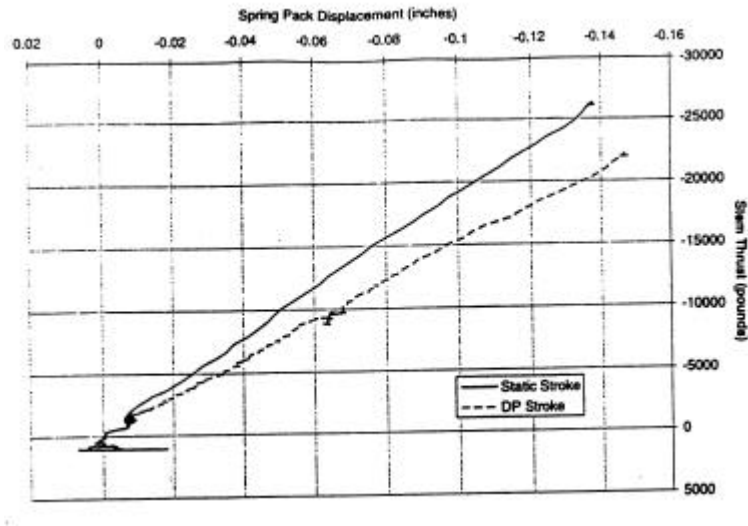


그림 2.3 Thrust Change with Spring Pack Displacement

2.2 부하율의 원인

그림 2.1로부터 정적시험과 동적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트에 차이가 있는 것을 알 수 있다. 정적시험보다 차압이 존재하는 동적시험에서 토크 스위치 트립시 쓰러스트가 낮게 나타나고 있다. 이는 스템과 스템 너트 사이의 마찰계수(Coefficient of Friction)에 의한 것으로 설명된다. 정적시험의 경우 차압이 존재하지 않으므로 밸브 스템이 빠른 속도로 움직이게 된다. 이 때 스템과 스템너트 사이에 존재하는 윤활유는 접촉면에서 빠져나가지 못하고 스템너트가 윤활유에 의해 미끄러지므로 마찰계수가 낮아지게 된다. 이를 "Squeeze Film Effect"라고 한다.

그러나 동적시험의 경우 차압이 존재하여 밸브 스템이 천천히 움직이게 되면 스템과 스템너트 사이의 윤활유가 빠져 나올 수 있게 된다. 이렇게 되면 금속과 금속이 접촉하게 됨으로써 마찰이 증가하고 마찰계수도 높아지게 된다. 스템 마찰 계수가 변하면 스템과 스템 너트사이에서 스템토크가 스템 쓰러스트로 바뀔 때 영향을 미치기 때문에 부하율 현상이 발생하게 되는 것이다.

그림 2.4는 정적 시험과 동적시험을 통해 측정된 스템과 스템너트 사이의 마찰계수 변화를 나타낸 그래프이다.[참조(1)] 동적시험의 스템마찰계수가 정적시험에 비해 높게 나타나고 있다. 이러한 경향을 보이는 것은 위에서 기술한 바와 같이 차압이 작용하면서 스템의 움직임이 느려지고 이에 따라 윤활유가 빠져나가면서 마찰이 증가하기 때문에 나타나는 것으로 설명될 수 있다.

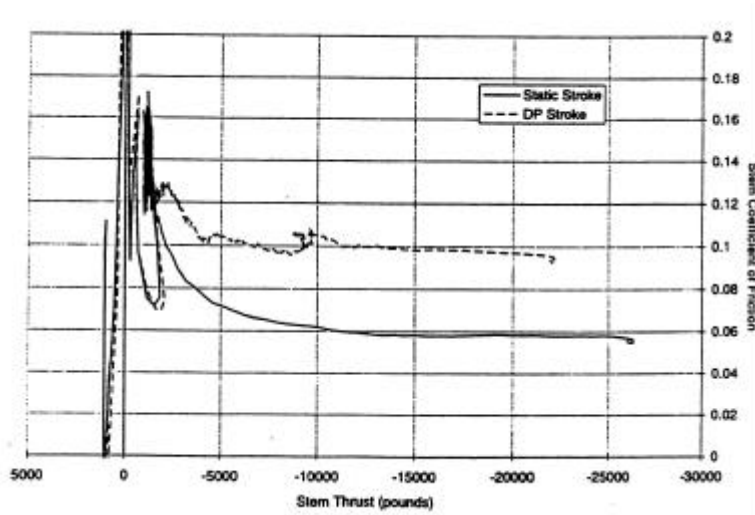


그림 2.4 Coefficient of Friction Change

3. 이상부하율 현상의 원인

3.1 비교대상밸브 선정

이상 부하율 현상의 이해와 원인을 규명하기 위해서는 정상적인 부하율 현상이 나타나면서 제작 사양이 동일한 밸브를 비교하는 것이 가장 좋으나, 동일 밸브에 대한 시험수행 결과가 없어 다른 발전소의 동일 계통에 설치된 밸브를 비교 대상 밸브(밸브 A, B)로 선정하였다.

A, B는 5년 정도 운전된 발전소에 설치된 밸브이며, C는 아직 상업 운전이 시작되지 않은 발전소에 설치되어 있는 밸브이다. 표 3.1은 비교대상 밸브들의 부하율 현상에 영향을 미칠 수 있는 주요사항 및 운전조건을 나타낸 것이다.

표 3.1 평가대상 밸브 자료

밸브명	구동기 타입	회전수	전체기어비	스텝직경	윤활유	설계기준차압	측정센서
A	SMB1	1900	32.13	1.75	MOBIL EP0	1761.8	QSS
B	SMB1	1900	32.13	1.75	MOBIL EP0	1761.8	QSS
C	SMB2	1620	37.0	1.496	EP2	1919.3	ETT/QSS

표 3.2 평가대상 밸브의 부하율 및 R_{TST} 값

밸브명	부하율(%)	R_{TST}^{TH}	R_{TST}^{SF}	$\frac{T_{qTST}^{동적}}{T_{qTST}^{정적}}$
A	19	1.19	1.28	1.08
B	14	1.14	1.18	1.04
C	41	1.41	1.16	0.82

2절에서 나타낸 바와 같이 밸브 A, B, C에 대한 부하율의 특성을 다음의 세 가지 그래프로 나타내었다.

- 1) Thrust versus time
- 2) Coefficient of friction(COF) versus thrust
- 3) Torque versus spring pack displacement

그림 3.1~3.3은 밸브 A와 B에 대한 그래프이고 그림 3.4~3.6은 밸브 C에 대한 그래프이다. 그림 3.1과 3.4는 각 밸브의 정적 및 동적시험에서 토크 스위치 트립시 쓰러스트(그래프의 끝 지점)의 변화를 보여주고 있으며, 이 차이가 부하율을 의미한다. 그림 3.2와 3.5는 정적 및 동적 시험에서 스템마찰계수의 변화를 보여주고 있으며 그림 2.4와 같이 정적시험보다 동적시험에서 스템마찰계수가 전체적으로 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 3.3과 3.6은 토크와 스프링 팩 변위를 나타내는 것이다. 밸브 A, B의 경우 정적 및 동적 시험에서 토크와 스프링 팩 변위는 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 밸브 C의 경우 정적과 동적시험에서 토크와 스프링 팩 변위가 매우 다르게 나타나고 있는 것을 보여 주고 있는데 이로 인해 밸브 C의 부하율이 밸브 A와 B에 비해 상당히 높게 나타나는 것으로 추정된다.

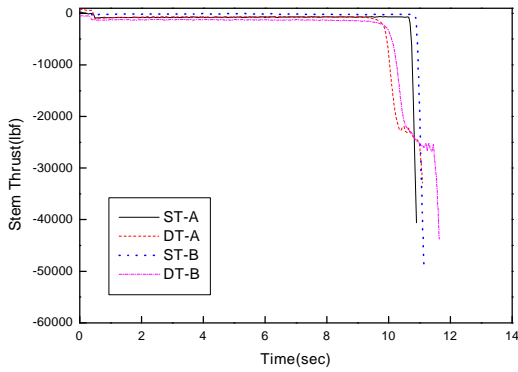


그림 3.1 Time Load History of Valve A & B

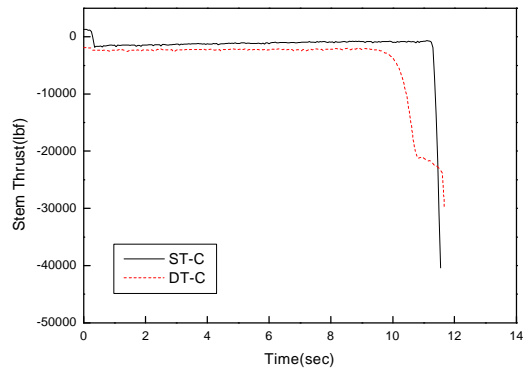


그림 3.4 Time Load History of Valve C

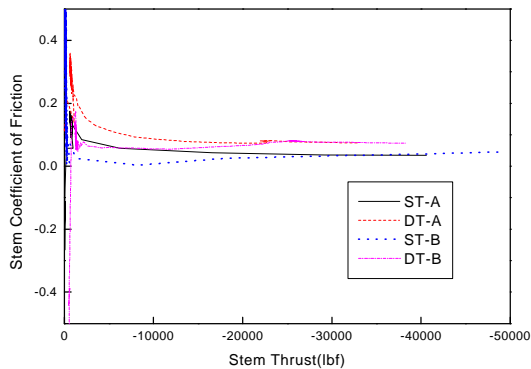


그림 3.2 Coefficient of Friction Change of Valve A & B

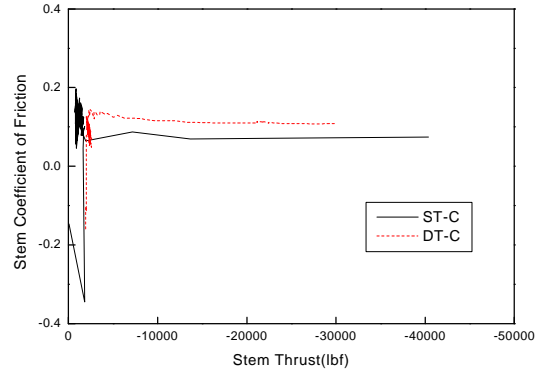


그림 3.5 Coefficient of Friction Change of Valve C

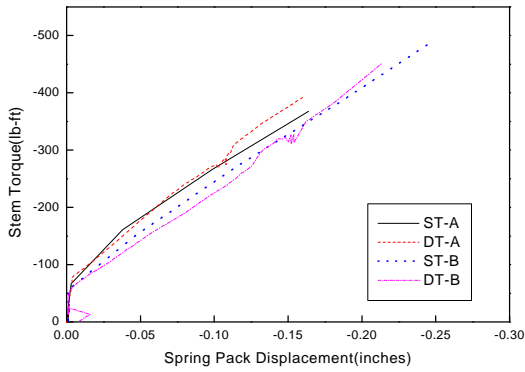


그림 3.3 Torque Change with Spring Pack Displacement of Valve A and B

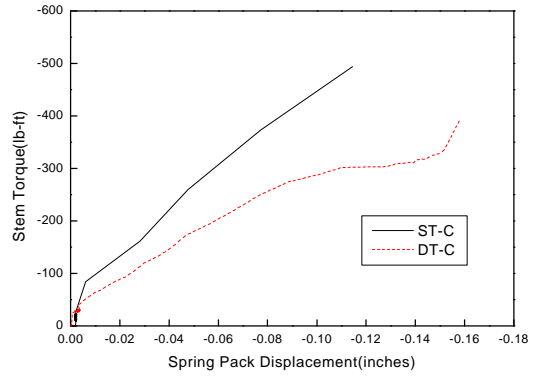


그림 3.6 Torque Change with Spring Pack Displacement of Valve C

3.2 이상 부하율 밸브의 실제 부하율

그림 3.7은 밸브 C에 대한 스템 쓰러스트와 스템 토크간의 관계를 보여주고 있다. 정적 시험과 동적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트 차이에 의한 부하율은 구간 1~3에 해당한다.

정적시험시 토크스위치 트립시의 쓰러스트를 기준으로 하였을 때, 예상되는 동적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트로 부하율을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{42587 - 39100}{42587} \times 100 = 8.2\%$$

동적시험시 토크스위치 트립시 쓰러스트를 기준으로 하였을 때, 예상되는 정적시험에서 토크스위치 트립시 쓰러스트를 이용하여 계산한 값은 아래와 같다.

$$\frac{34655 - 30100}{34655} \times 100 = 13.1\%$$

밸브 C가 정상적으로 토크스위치가 트립되었다고 가정했을 때 부하율은 표 3.2에 나타난 41%가 아닌 8~13% 정도로 판단된다. 이러한 결과로부터 밸브 C의 부하율이 실제 부하율보다 높게 평가된 것은 토크스위치 트립시 쓰러스트가 변해서 나타난다는 것 외에 다른 현상이 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

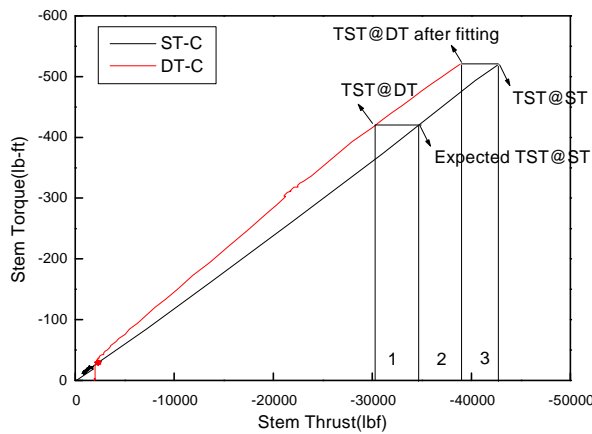


그림 3.7 Stem Thrust and torque change of Valve C

3.2 스프링 팩의 문제점

그림 3.8은 그림 3.3과 3.6을 하나의 그래프에 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

- 1) 정적시험에서 스템토크와 스프링 팩 변위를 살펴보면 밸브 C는 밸브 A에 비해 스프링 팩 변위에 대한 스템토크값 변화가 훨씬 크다는 것이다. 또한 밸브 C는 동적시험에서 측정된 스프링 팩 변위에 대한 스템 토크의 변화율이 정적 시험의 변화율에 비해 급격히 작아지는 것을 보여 준다.
- 2) 동적시험에서 보면 토크스위치 트립지점에 가까워지면서 스프링 팩 변위는 변하지만 스템 토크값이 변하지 않는 구간이 생기는데, 이는 스프링 팩은 계속 압축되지만 스템토크를 전달하지 못하기 때문이다.

위의 결과로부터 스프링 팩 자체, 또는 구동기 구동력을 스템에 전달 시켜주는 부품에 문제가 있을 수 있다고 판단된다.

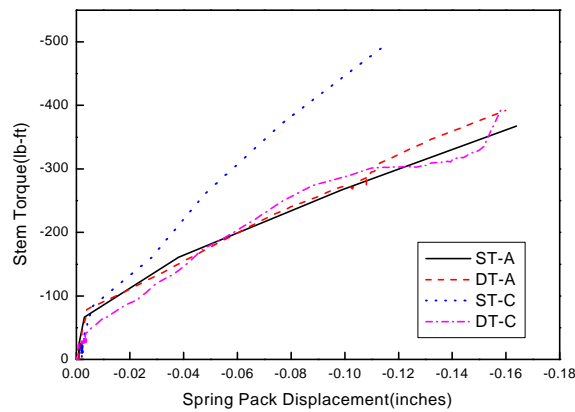


그림 3.8 Torque Change with Spring Pack Displacement of Valve A and C

3.3 토크스위치의 문제점 및 기타원인

웜 (Worm)에서 스템으로의 토크 전달 과정을 설명하기 위해 구동기 형태를 그림 3.9에 나타냈다.

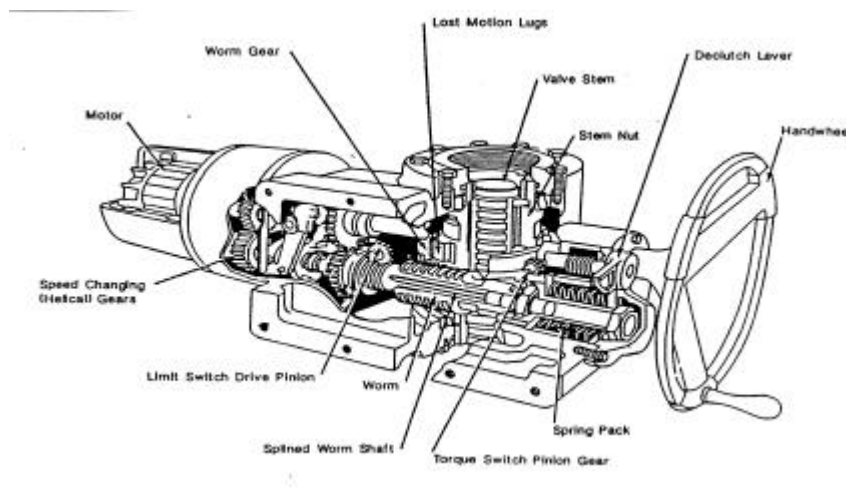


그림 3.9 Motor Operated Cutaway View

모터 토크는 구동기에서 다음의 과정을 통해 스템 토크로 전환된다. 모터의 구동력은 워م과 워 기어가 회전하면서 드라이브 슬리브를 통해 스템으로 전달된다. 이때 스플라인 워 축 (Splined Worm Shaft)은 스프링 팩을 압축하고 일정 변위가 되면 토크스위치가 트립된다. 스프링 팩이 건전하다고 가정할 때, 밸브 C의 이상 부하율은 워 기어와 드라이브 슬리브에 동력 전달이 원활 하지 않아 나타나는 것으로 판단된다. 또한 표 3.2로부터 정적 및 동적시험에서 트립 토크의 비율이 밸브 A나 B의 경우 5~10%미만이지만 밸브 C의 경우 20% 가까이 차이가 나는 것으로 보아 토크 스위치 자체의 문제일 가능성도 배제할 수는 없다.

상기의 결과로부터 밸브 C는 정기 정비시 토크 스위치, 스프링 팩, 드라이브 슬리브, 워 기어 등의 부품을 점검하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

지금까지 설계기준 성능평가 결과 부하율이 높게 평가된 밸브에 대하여 그 원인을 분석하였다. 본 연구에서 분석한 대상 밸브가 부하율이 높게 평가되는 이유는 정적시험에 비해 동적시험에서 스프링 팩 변위에 대한 스템 토크 변화율이 급격히 감소하기 때문이다.

검토결과 실제적인 부하율은 8~13%정도이지만, 평가된 부하율이 40%이상 나오는 것은 부하율 현상 외에 다른 조건이 작용한 것으로 보인다. 이 원인으로는 토크스위치, 스프링 팩 또는 모터토크를 스템토크로 전환시키는 워프 워 기어, 드라이브 슬리브 등의 부품에 이상이 있을 것으로 판단되며 이에 대한 점검 및 상세 분석이 필요할 것으로 판단된다.

이번 이상 부하율 사례를 통해 진단시험 및 시험 데이터의 해석이 중요하다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 밸브의 운전 여유도가 충분하여 현재의 성능에는 문제가 없다고 할지라도 밸브가 정상 상태가 아닌 상태에서 운전될 경우에는 시간에 따른 성능저하가 가속화될 수 있기 때문이다.

6. 참고문헌

- (1) EPRI, "EPRI MOV Performance Prediction Program-Methods to Address Rate-of-Loading in Torque Switch Controlled MOVs", 1994. 11, EPRI TR-103226
- (2) EPRI, "Addendum 4 to TR-103237-R2 : Use of Static Closure Data for Determining the Stem-to-Stem Nut Coefficient of Friction at Unwedging, 1999. 12, EPRI TR-113989
- (3) Crane, "Review of Dynamic Testing of AF-046", 2001. 7
- (4) 한진호 등, 1999, "부하율이 모터구동밸브의 토크 스위치 설정시에 미치는 영향", 한국원자력학회 '99 추계학술발표회 논문집.
- (5) Crane, "NRC GL 89-10 Pilot Implementation Program-Motor Operated Valve Program Documents and Related MOV Information", 1994
- (6) EPRI, "Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants" 1999. 9, EPRI TR-106563