

부하율이 모터구동밸브의 토크 스위치 설정시에 미치는 영향
ROL Effect on Torque Switch Setting in Motor Operated Valve

한 진호* , 강 신철 , 이 도환
한국 전력 전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

회전하지 않고 상하로 움직이는 스템이 달인 모터 구동 밸브에서 밸브에 작용하는 부하에 따라 구동기 토크와 쓰러스트 사이의 관계가 변한다는 사실이 경험적으로 알려져 있다. 이는 부하가 작용하는 조건에 따라 윤활 모드에 의한 윤활막의 상태가 변하여 스템과 스템너트 사이의 마찰이 달라지기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 부하율 효과를 정량적으로 평가하는 방법을 소개하고 발전소 시험 결과와 비교해 보았다.

ABSTRACT

Experience showed that valves with rising, non-rotating stems and operators can be susceptible to change in the relationship between torque and stem thrust as a result of change in stem load time history. This is mainly a result of changes in the coefficient of friction at the stem/rotor interface due to a squeeze film effect which allows mixed mode lubrication to occur under rapid loading conditions. In this study, several methods of introducing ROL are introduced and the test results at Nuclear Power Plant are presented.

1. 서론

회전하지 않고 상하로 움직이는 스템의 모터 구동밸브(MOV)에서 부하가 스템에 작용하는 비율에 따라 구동기의 토크와 스템의 쓰러스트사이의 관계가 변하는 사실이 과거의 경험을 통해 알려져 있다. 이러한 현상을 부하율 영향이라고 하며 이로 인해 토크 스위치로 제어되는 밸브의 경우 실제 동작시 나타나는 쓰러스트가 스위치 설정시와는 다른 문제점이 나타난다. 이는 동일한 토크 값에서 스위치가 작동하여도 토크가 쓰러스트로 변환되는 과정에 따라 쓰러스트 값이 변하기 때문

이다. 실제로 설계 기준 조건에 해당하는 부하가 작용하는 경우에는 진단시 토크 스위치 트립때 얻어진 쓰러스트 값만큼 힘이 제공되지 않아 그 기능을 수행하지 못하는 경우가 나타났다.

일반적으로 밸브의 제어 스위치 설정은 발전소 예방 정비 기간 중 진단 시험을 통해 수행된다. 시험은 차압이 존재하지 않는 경우에 수행되며 이 경우를 정적시험(static test)이라 한다. 밸브의 닫힘 행정시 디스크가 시트에 도달하면, 디스크에 작용하는 부하가 급속히 증가한다. 반면에 유량과 차압이 존재하는 설계 기준 조건하에서는 스템에 작용하는 부하가 서서히 증가하며 토크 스위치 트립시의 쓰러스트가 정적시험의 경우보다 작게 나타난다. 이러한 부하율 변화에 따른 쓰러스트의 차이 때문에 토크 스위치 설정이 부족하게되어 밸브의 운전성에 문제가 생기는 경우가 있다. 따라서 부하율을 정량적으로 예상하여 이를 고려한 토크 스위치 설정이 이루어져야한다.

본 연구에서는 부하율 영향이 나타나는 원인과 정량화 방법을 소개하고 국내 발전소에서 수행된 시험결과를 적용해보았다.

2. 모터구동밸브의 작동

그림1, 2는 각각 모터구동밸브의 밸브 부분과 구동기부분을 개략화한 것이다.

모터의 구동력은 워م과 워م기어를 통해 스템너트에 전달된다. 스템너트는 회전 운동을 하며 회전에 의한 마찰력이 내부의 스템에 전달되어 스템을 상하 운동시킨다. 스템이 아래로 움직이면, 밸브의 디스크가 하강하고 시트에 도달하면 스템의 움직임이 멈추고 워م이 전진하게 된다. 워م의 전진에 따라 스프링 팩이 압축되고 일정 변위에 이르면 토크스위치가 트립되어 모터로 공급되는 전원을 차단한다. 따라서 토크 스위치의 설정위치가 스프링팩 변위의 어디냐에 따라 트립시의 토크 값과 스템 팩터로 표현되는 변환 과정에 따라 쓰러스트 값이 결정된다. 스템 팩터는 스템 나사의 기하학적 형상과 마찰계수에의해 결정된다. 기하학적 형상은 변하지 않으므로 변환 과정이 변한다는 것은 마찰계수가 변함을 의미한다.

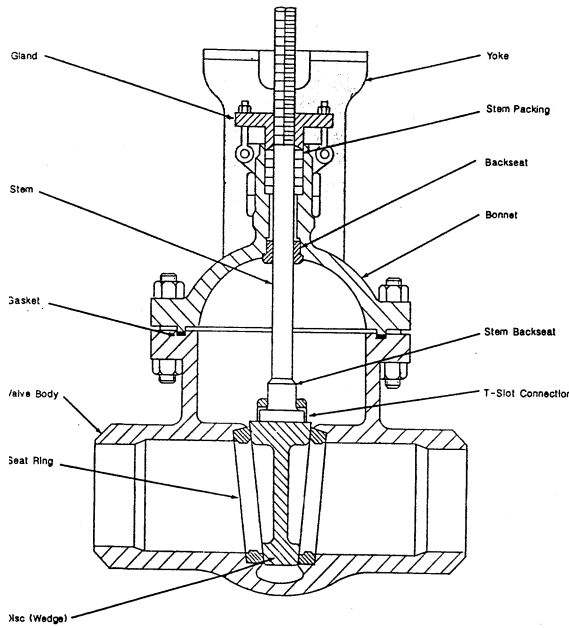


Fig. 1 Typical Bonnet Gate Valve

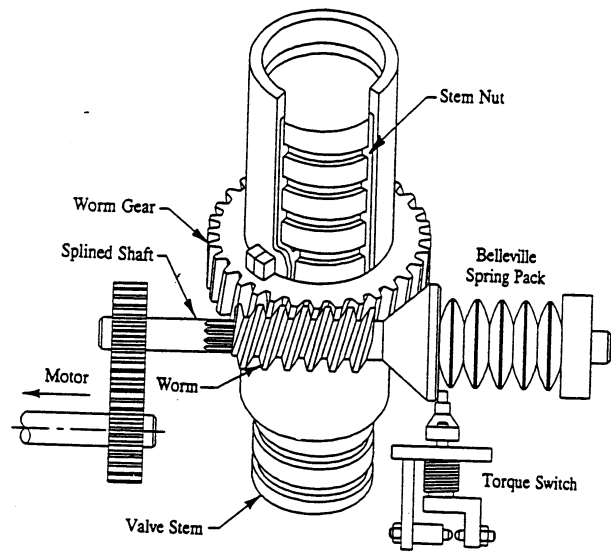


Fig. 2 MOV Driving Components

3. 정의

부하율 효과라는것은 단어에서 보듯이 부하의 크기와 시간에 따른 변화율이 중요한 인자로서, "스텨에 부하가 작용하는 비율에 따라 토크 스위치 트립시, 스텨에 작용하는 쓰러스트의 변화"로써 정의된다. 그림 3,4에 이 현상이 잘 나타나있다. 한편으로는 토크 스위치 설정값은 스프링 팩의 변위에 의해 결정되므로 쓰러스트와 스프링 팩 변위사이의 관계 변화의 관점에서 인식되기도 한다.

이러한 부하율에 따른 구동기의 민감도 변화를 정량화하는데 다음 2가지 방법이 사용된다.

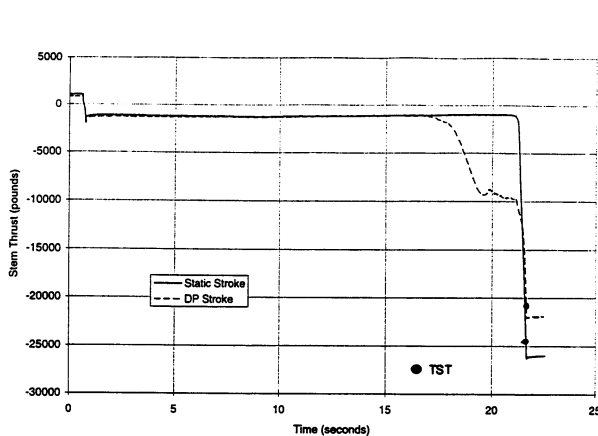


Fig. 3 Load Time History

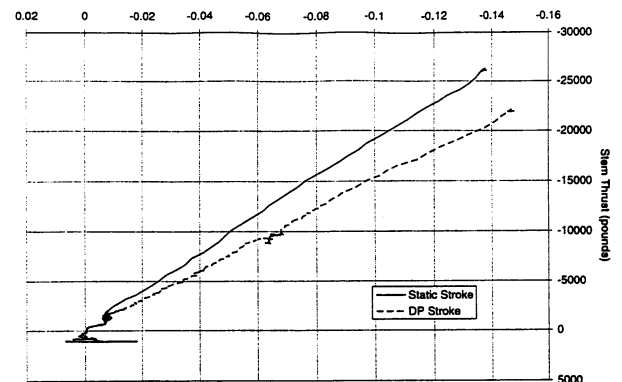


Fig. 4 Thrust Change with Spring Pack Displacement

방법 1 : 정적조건과 동적 조건하에서의 토크 스위치 트립시 쓰러스트의 비율

$$ROL_{Tsr}^{TH} = \frac{Th_S^{TST}}{Th_{DF}^{TST}}$$

Th_S^{TST} : 정적 조건에서 토크스위치 트립시 쓰러스트

Th_{DF}^{TST} : 동적 조건에서 토크스위치 트립시 쓰러스트

정적조건에서의 쓰러스트가 동적 조건에서의 쓰러스트보다 크면 부하율(ROL)이 1.0보다 크게된다.

방법 2 : 정적조건과 동적 조건하에서의 토크 스위치 트립시 스템 팩터의 비율

$$ROL_{Tsr}^{SF} = \frac{SF_{DF}^{TST}}{SF_S^{TST}}$$

SF_S^{TST} : 정적 조건에서 토크스위치 트립시 스템 팩터

SF_{DF}^{TST} : 동적 조건에서 토크스위치 트립시 스템 팩터

정적조건에서의 스템팩터가 동적 조건에서의 스템팩터보다 작으면 부하율(ROL)이 1.0보다 크게 된다.

스템팩터는 토크와 쓰러스트의 비로써 스템과 스템 너트 사이의 인자들에 의해 결정되며 그 값이 작을수록 효율이 높다는 것을 의미하며 ACME나사인 경우 다음과 같이 정의된다.

$$SF(ft) = \frac{\text{Torque}}{\text{Thrust}} = \frac{d \times (0.96815 \times \frac{1}{\pi \times d} + \mu)}{24 \times (0.96815 - \mu \times \frac{1}{\pi \times d})}$$

d = stem diameter

l = stem lead

μ = thread friction coefficient

스템 팩터와 스템 나사의 기하학적 정보가 있으면 마찰계수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu = \frac{0.96815 \times (24 \times SF - \frac{1}{x})}{24 \times SF \times \frac{1}{x \times d} + d}$$

마찰계수가 작을수록 스템 팩터값은 작아진다.

4. 부하율 영향의 원인

스템과 스템 너트사이의 윤활시의 마찰은 윤활 영역에 의해 영향을 받는다. 경계 윤활은 윤활막 사이의 압력에 의해 생성되는 산화 막의 강도에 의해 결정되며 이 막이 미끄럼 표면의 거친 부분을 통해 금속 접촉면에 윤활을 공급한다. 부하가 일정하거나 천천히 증가하는 경우에는 이러한 경계 윤활이 마찰 과정을 지배하며 마찰계수는 대략 0.1과 0.15 사이에 존재하는 것으로 알려져있다. 수력학적 윤활영역(Hydrodynamic Lubrication Regime)에서는 표면이 가압된 막에 의해 분리되며 마찰계수는 0.01정도로 경계 윤활보다 훨씬 작다. 나사면의 속도는 일정한 수력학적 윤활을 얻기에는 너무 느려 경계 윤활이 발생하고 부하의 변화가 급속한 경우에 이 효과가 나타난다.

나사면 사이의 부하가 증가하면서, 접촉면의 압력이 증가하고 두 면 사이의 거리가 감소한다. 부하 증가 속도가 커지면 윤활액이 접촉면에서 흘러나갈 시간이 충분치 않고 순간적으로 가압 윤활막이 형성되어 경계 윤활보다 마찰계수가 작게 나타난다. 윤활액이 경계면에서 빠져나가면 경계 윤활로 복귀되고, 복귀되는데 걸리는 시간은 접촉면과 윤활유의 물성, 시팅 전 부하의 크기와 작용시간에 따라 다르다.

반대로 부하가 서서히 증가하는 경우 윤활액이 접촉면에서 빠져나갈 시간이 충분하고 경계 윤활상태가 된다.

5. 평가 방법

미국 전력 연구소에서는 모터 구동 밸브의 성능 진단 프로그램 개발을 위해 15

개 밸브에 대한 발전소 현장 시험 결과와 별도로 실험 장치를 구성하여 34개 밸브에 대해 시험을 수행하여 그 결과를 수집하였다.

방법 1: 정적조건에서의 쓰러스트 값으로부터 조정

$$Th_{TST,DP} = 0.76 \times Th_{TST,S}$$

이 방법은 동적조건시의 쓰러스트는 정적시 값의 76% 까지 감소할 수 있다는 가장 보수적인 접근이다.

방법 2 : 정적조건에서의 마찰계수로부터 조정

$$f_{DP} = f_s + 0.046$$

정적 조건에서의 마찰계수를 구하고 조정된 마찰계수로 다시 스템팩터를 계산하고 정적조건에서의 토크 스위치 트립시 토크값에 적용하여 동적시 쓰러스트 값을 예측

$$Th_{TST,DP} = TQ_{TST,S} \div SF(f_{DP})$$

방법 3 : 시팅전 스템 부하가 증가된 상태의 쓰러스트 값으로부터 조정

정적 조건이 아닌 약간의 차압, 또는 차압은 없으나 가압된 조건에서 초기 웨징시와 트립시의 쓰러스트 값을 측정한다. 다음 식을 이용하여 웨징시 쓰러스트를 나사면 압력으로 변환한다.

$$P_{Thread} = \frac{Thrust}{\pi \times (OD - TDP) \times TDP}$$

OD : Stem Diameter

TDP : Thread Depth

P_{Thread} : Thread Pressure

다음 식을 이용하여 교정 계수를 구하고 토크 스위치 트립시의 쓰러스트에 반영한다.

$$CF = 0.76 + (1 - 0.76) \times \frac{TP}{25000}$$

$$Th_{DP} = CF \times Th_{DT}^{TST}$$

방법 4 : 시팅전 스템 부하가 증가된 상태의 마찰계수 값으로부터 조정

방법 3과 같이 나사면 압력을 구하고 아래와 같은 교정계수를 이용하여 마찰계수를 조정한다. 조정된 마찰계수로 계산된 스템 팩터를 이용하여 쓰러스트 값을 계산한다.

$$CF = 0.046 - 0.046 \times \frac{TP}{45000} \quad \text{for } TP \leq 10,000 \text{ psi}$$

$$f_{Corrected} = f_{DP} + CF$$

$$Th_{DP} = \text{Torque}_{DP}^{TST} \div SF(f_{Corrected})$$

6. 시험 결과

아래 Table 1은 원자력 발전소에서 수행된 정적, 동적 시험을 통해 얻어진 부하율 영향을 정리한 것이다. 쓰러스트 기준에서는 최고 14%, 스템팩터 기준에서는 13%의 부하율 영향이 나타났고, 동적시험시 오히려 부영향이 나타나는 경우도 있었다.

밸브 번호	R_{TST}^{Th}	R_{TST}^{SF}
1	1.028	1.093
2	0.991	1.033
3	1.140	1.044
4	1.045	1.138
5	0.897	0.949
6	0.782	0.741

Table 1 Nuclear Power Plant ROL Effect

밸브 번호	정적시험	동적시험	방법1	방법2
1	4562	4438	3467	3865
2	2679	2704	2036	2259
3	16081	14107	12221	13173
4	7240	6927	5502	6026
5	1648	1836	1252	1328
6	6635	8484	5042	5620

Table 2 시험 결과와 예측값 비교(단위:lb)

Table2 는 정적과 동적 시험 결과를 방법 1과 2로 예측한 값을 비교한 것이다. 방법1의 값이 2보다 작은 값을 예측하며 실제 동적 시험시 나타난 값보다 훨씬 작다.

7. 결론

기존의 평가 방법은 과도하게 보수적인 면이 많으므로 운전 여유도가 작은 밸브에 대해서 적용할 경우에는 구동기의 용량이 부족하다는 평가 결과가 나타난다. 따라서 과도한 보수성을 감소시키고 정확한 결과를 도출할 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

특히 기존의 방법은 부하의 크기에 상관없기 때문에 이를 고려한 시험을 통해 그 상관관계를 정립해야 할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) EPRI, "EPRI MOV Performance Prediction Program - Methods to Address ROL in Torque Switch Controlled MOVs", 1994, EPRI TR-103226
- (2) EPRI, "Application guide for MOV in Nuclear Power Plant, Final Report", 1990, NP-6660-D
- (3) Steele, R. Russel, M.J., DeWall, K.G., and Watkins, J.C., "Load Sensitive Behavior in Motor-Operated Valves", NUREG/CP-0123
- (4) INEEL, "Gate valve and Motor-Operated Valves Research findings", 1995, NUREG/CR-6100