

모터구동밸브의 성능 진단을 위한 모터 토크 분석

권석준, 이상희, 박주문, 성계용*, 이흥호
충남대학교 전기공학과
한국원자력 안전기술원(KINS) *

Motor Torque Analysis for Motor-Operated Valves Performance Evaluation

Seok Jun Kwon, Sang Hoey Lee, Joo Moon Park, Key Yong Sung*, Heung Ho Lee
Department of Electrical Engineering, Chungnam National Univ
Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) *

ABSTRACT

본 논문은 원자력 발전소의 안전에 있어 매우 큰 비중을 차지하는 모터구동밸브(Motor-operated valve : MOV)의 성능진단에 직접 센서를 장착하지 않고 전기신호만을 이용하여 성능진단의 가능성을 보이기 위한 것이다.

모터 토크를 계산하기 위한 두 가지 방법으로서 D-Q frame 변환 방법과 Air-Gap 토크 식을 제시하였고, 계산된 두 토크 값은 정확하게 일치하였다. 부하를 변동하면서 토크미터로 측정된 토크 값과는 1%의 오차범위 내에서 일치함을 확인했다. 따라서 두 토크 식은 모터구동밸브의 성능진단을 위한 식으로 사용해도 좋다는 결론을 얻어낼 수 있었다. 계산된 토크를 주파수 분석함으로써 부하의 변동에 따라서 슬립 및 모터속도 주파수가 변화됨을 알 수 있었다. 즉 주파수 분석을 통해 MOV의 모터 및 구동기 부분의 성능 저하 감시에 유용한 단서를 제공해 줄 것이다.

결과적으로, MOV에서 전기신호의 분석은 시스템의 전기 및 기계적인 성능 저하 감시에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

인 변수를 측정하는 방법들이 채택되고 있다. 이러한 변수들은 밸브 작동의 기본 필요조건을 확인할 수 있는 필수적인 변수중의 하나지만, 이러한 시험 방식은 장기적이고 주기적인 MOV성능 검증에 가장 효과적이고 능률적인 방법을 제공하지는 않는다. 그 이유는 MOV에 설치되는 센서 및 진단장비는 고가이며, 시험일정에 제약을 받는다. 아울러 방사선 피폭의 우려도 있기 때문이다.

최근에 MOV 성능을 평가하고, 기계적인 부하의 변동이나 MOV 이상 요인으로 나타나는 성능저하를 모니터링 하는데 모터에 입력되는 전기적인 신호를 이용한 기술들이 개발되고 있다. MOV 전기-기계적 시스템에서 모터 토크는 구동기 기어, 스템 너트(stem nut)와 같은 여러 가지 변환 인터페이스를 통해 실제 밸브 디스크의 구동력인 스템 토크로 변환되어 진다. 기계적 스템 토크를 추정하는 첫 단계로서 모터토크가 계산되어야 하고, 본 논문에는 모터에 인가되는 3상 전류와 전압을 이용한 D-Q frame 변환과 Air-Gap방법이 모터토크 계산에 이용되었다. 추가로 MOV 부품의 이상을 감시하기 위한 유용한 수단으로서 주파수 분석 방법의 가능성을 확인하기 위해, 계산된 모터 토크의 Frequency domain 분석이 소개된다.

I. 서 론

MOVs는 일반적으로 원자력 발전소에서 중요한 안전 관련 기기로 사용되고 있다. 최근 들어 MOV의 운전성에 많은 의문이 제기되고 이를 해결하기 위해 분석 및 진단기술이 개발되었다. 이러한 진단기술로 일반적으로 적용되는 방법은 밸브의 스템(stem)에 직접적으로 센서를 설치하여 스템 토크와 스템 스트레스와 같은 기계적

II. 토크의 계산

1. D-Q frame 변환 방법

모터 토크 계산의 에러는 시간적으로 변하는 모터 특성의 부적당한 채택으로 인하여 발생한다. 변하지 않는 d-q 기준 frame은 로터의 위치에 관계없이 보다 정확한

결과 값으로 모터를 분석할 수 있게 해준다.

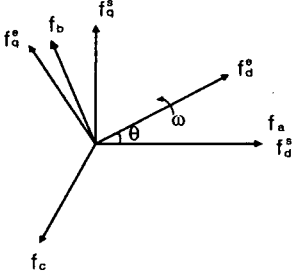


그림 1. Frame conversion for torque estimation

그림 1과 식(1)에 보인 것처럼, frame 변환을 통하여 3상 모터의 전압, 전압, 전류를 d-q 기준 frame으로 변환할 수 있다.

$$f_{dqn}^w = T(\theta) f_{abc} \quad (1)$$

여기서, $f_{dqn}^w = [f_d^w \ f_q^w \ f_n^w]^T$, $f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix}$$

여기서, θ = rotor position at the reference frame

이 식으로부터, 모터 stator에서 d-q축 전압을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \\ V_{ns} &= r_s i_{ns} + p \lambda_{ns} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, p = differential operator

모터의 flux를 계산하기 위하여, 식(3)에서 등가회로의 모터 파라미터, d-q frame 전압, 전류가 사용된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= \int_0^t (V_{ds} - r_s i_{ds}) dt \\ \lambda_{qs} &= \int_0^t (V_{qs} - r_s i_{qs}) dt \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, r_s = stator winding resistance

λ_{ds} = motor magnetic flux of d axis

λ_{qs} = motor magnetic flux of q axis

i_{ds} = motor current of d axis

i_{qs} = motor current of q axis

위 식으로부터 얻어진 stator 전류와 stator flux를 이용하여, 식(4)에서 모터 토크를 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

여기서, p = the number of motor poles

2. Air-Gap 토크 방법

다음 전압 식은 3상 armature winding에 대한 것이다.

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{d\lambda_a}{dt} + r i_a \\ v_b &= \frac{d\lambda_b}{dt} + r i_b \\ v_c &= \frac{d\lambda_c}{dt} + r i_c \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ = flux linkages of windings a, b, and

c.

r = the phase resistance

식(5)으로부터 flux linkage가 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \int (v_a - r i_a) dt \\ \lambda_b &= \int (v_b - r i_b) dt \\ \lambda_c &= \int (v_c - r i_c) dt \end{aligned} \quad (6)$$

동손(銅損)과 식(6)으로부터 권선에 저장된 에너지에 대한 term을 감안하면, air-gap torque 식은 식(7)에서 전압과 전류 항으로 변경된다.

$$T = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{3}} \left(\begin{aligned} &(i_a - i_b) \cdot \int [v_{ca} - R(i_c - i_a)] dt \\ &- (i_c - i_a) \cdot \int [v_{ab} - R(i_a - i_b)] dt \end{aligned} \right)$$

(7)

여기서,

p = number of poles

i_a, i_b, i_c = line currents

R = half of the line-to-line resistance value

위 두 방법을 통해, 유도전동기의 토크 계산은 식(4), 식(7)으로 완성될 수 있다. 두 식으로부터 얻어진 시물레이션 결과는 정확히 일치하는 것을 그림 3에 보였다. 그림 2에 토크미터로 직접 측정된 토크 값을 나타냈고 그림 3은 d-q frame 변환과 air-gap 방법을 통해 구해진 토크를 나타냈다. 가변 부하 아래에서 실제 값과 계산 값의 오차 범위는 1%이내 이다.

이는 스텝에 센서를 부착하지 않고 MOV의 스텝 torque를 측정할 수 있다는 점에서 이 방법들은 유용한 의미를 갖는다고 생각할 수 있다.

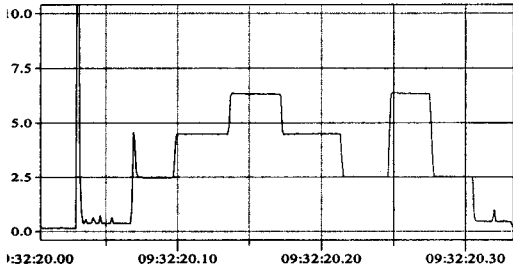


그림 2. Measured torque by torque meter

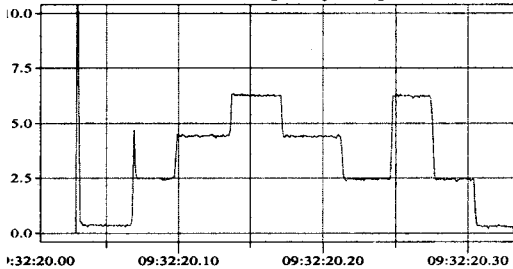


그림 3. Estimated torque by d-q frame conversion and air gap

III. 토크 주파수 분석

일단 식(4) 또는 식(7)을 통하여 토크를 계산하면, 얻어진 토크는 모터의 결함과 특성을 분석하는 데에 이용될 수 있다. 산된 토크는 전류와 전압의 조화(harmonic)이기 때문에, 모터의 특성을 분석할 때 전류보다 토크를 이용하는 것이 더욱 유리하다. 주파수 영역은 시간영역에서는 찾을 수 없는 slip 주파수와 모터 speed를 나타낼 수 있다. 그림 4에 60Hz 이하로 2개의 peak가 있는, 토크의 주파수 분석 결과를 나타냈다. 이 두 개의 peak는 slip과 모터 회전속력 주파수로 알려져 있다.

Slip 주파수는 다음과 같이 정의된다

$$SF = (\text{동기속력} - \text{실제속력}) \times (\text{모터 pole 수}) \quad (8)$$

따라서 모터 속력의 변화는 slip 주파수 변화로써 감지할 수 있다. 예를 들어, 4극 교류(60Hz) 유도 전동기의 실제 모터 스피드(AMS)는 다음과 같은 slip 주파수에 의해 결정된다

$$AMS = 60 \times [30 - (SF/4)] \quad (9)$$

여기서, SF 및 AMP의 단위는 각각 Hz 와 rpm이다. Slip 주파수의 변화는 모터 손상을 나타낸다. 고 진폭의 slip pole과 주변에 연속적인 harmonic 은 모터의 전기 혹은 기계적 불균형을 나타내는 것이다.

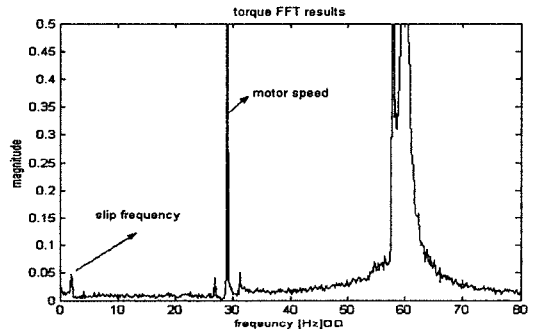


그림 4. Frequency spectra of motor torque

전기적 불균형은 rotor bar 손상과 관련된 일반적인 징후가 될 수 있다. 그림 5와 표 1은 부하변화에 따른 모터 속력의 변화를 나타낸 것이다. 관찰되는 모터 속도 주파수는 모터 부하(토크)의 증가에 따라 감소한다. 또한 모터 속력은 slip 주파수와 관련되기 때문에, 그림 6에서 모터 토크가 증가함에 따라 slip 주파수가 커지는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 slip 주파수가 모터 속도 보다 부하의 변동에 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

표 1. The change of motor speed and slip frequency due to torque change

No	torque(N.m)	RPM	SF[Hz]
1	0	1794	0.67
2	2.25	1780	1
3	4.22	1768	1.33
4	6.37	1754	1.5
5	7.35	1746	1.83
6	8.43	1738	2

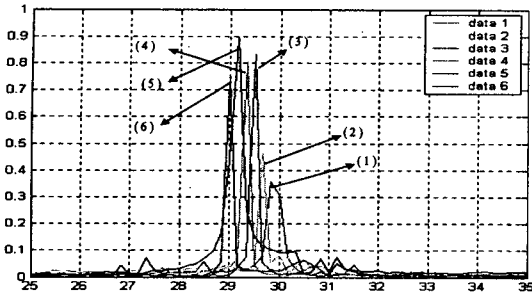


그림 5. The shift of motor speed due to load change

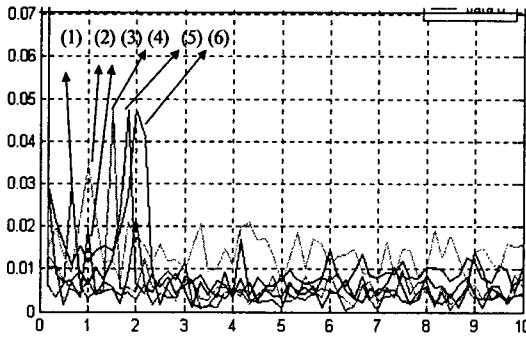


그림 6. The shift of slip frequency due to load change

IV. MOV 진단의 간단한 예

그림 7 은 시간 영역에서 MOV 구동기 모터의 전력 신호를 나타낸다. 이 신호는 밸브의 seating과 unseating에 관계되어 나타나는 과도 현상과 같은 일반적인 gate 밸브 행정의 특징을 포함한다. 이 점은 전류신호 또한 비슷하다. 밸브의 행정 동안에 구동 전류의 변화는 스템 패킹 마찰 부하의 변화를 보여준다. 스템 패킹 마찰과 관계된 부하는 스템 이동의 초기점에서 처음으로 관찰되고, 그 특징은 그림 8 (open to close stroke)에서 보다 쉽게 보여진다. 그림 7의 신호는 초기 스템의 이동, 밸브의 seating, 밸브의 unseating 등 모터구동의 특성점들이 모터 전력의 신호로 잘 관찰될 수 있음을 보여준다. 그림 7의 open- to-close 행정의 끝 부분은 밸브 디스크가 밸브 seat에 접촉하여 안착될 때, 모터 구동부하를 증가시킨다. 주어진 설정치에서 torque switch가 작동되므로 모터의 전력이 차단되는 점을 보여준다.

그림 8은 open-to-close 행정에서 밸브 스템 이동이 일어난 초기상태를 보여준다. 무부하 전력(no load power)은 웜 기어의 lug가 구동 sleeve와 접촉하기 전까지 웜 기어의 자유회전과, 다음에 스템너트-스템간 나사가 맞물리기 전에 일어나는 구동 sleeve의 회전 에 의해 발생하는 시간지연의 결과로 인해 나타난다.

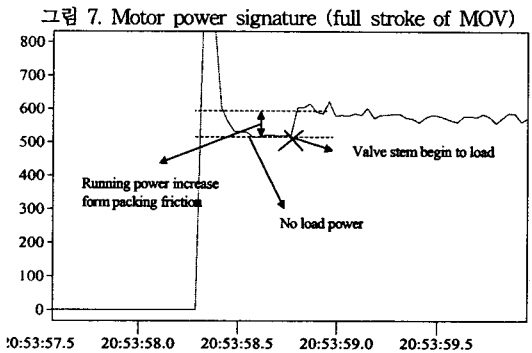
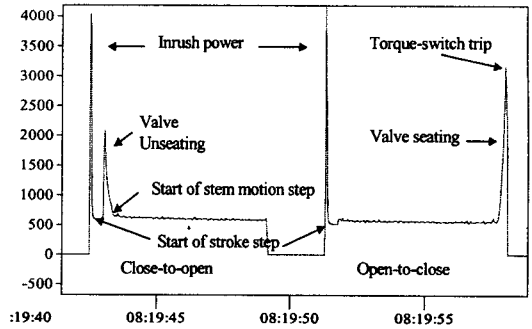


그림 8. Motor power signature (open-to-close stroke)

그림 9의 데이터는 현장에 설치되어 있는 MOV 구동기와 동일한 종류의 실제 MOV 구동기로부터 얻어진 모터토크의 주파수분석 결과이다. Slip 주파수와 모터 속력에 추가하여, worm gear tooth mesh (WGTm) 주파수가 모터 토크 frequency 스펙트럼에 관찰된다. WGTm의 peak 주파수의 변화는 worm gear의 기계적 변화를 의미한다. 그림 7에서 9까지처럼, MOV 모터의 전기적 신호는 모터의 토크를 계산하고, 전기-기계적 이상을 감시할 수 있는 유용한 도구로서 사용될 수 있다.

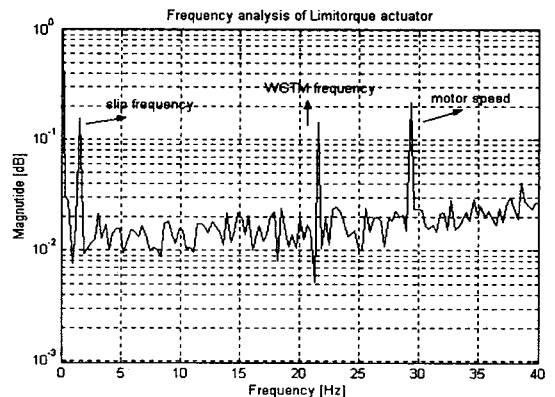


그림 9. Motor torque frequency spectrum analysis

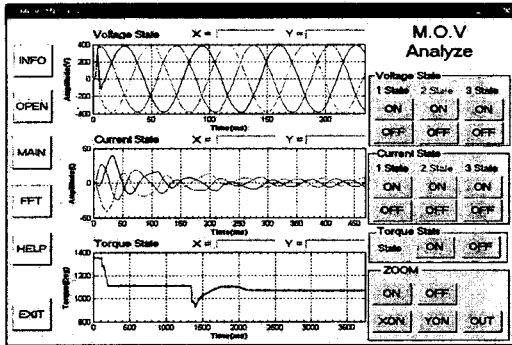


그림 10. 개발중인 MOV Analyzer

상기의 모터토크 계산 및 주파수 분석을 통한 기본적인 진단기술을 바탕으로 그림10과 같이 GUI 환경에서 통합 감시 프로그램을 개발하고, 정상적인 상태의 토크 신호 주파수 스펙트럼과 고의 고장 실험을 통해 얻은 토크 신호의 주파수 변화를 비교하여 고장을 진단할 수 있는 데이터 베이스를 구축하고 한다. 또한 이 데이터를 이용하여 MOV 자동고장 진단 기술의 기반을 마련하고자 한다.

V. 결 론

이 논문은 MOV의 기계적 이상을 감시하고 성능을 진단하는데 전기적인 신호의 유용성을 보이는데 그 목적이 있다. 모터 토크를 계산하기 위해, 3상 전류와 전압을 이용하여 d-q frame 변환과 air-gap torque 방법의 두 가지 방법이 제시되었고, 두 방법의 계산 결과가 정확히 같다는 것을 보였다. 아울러, 변동 부하에 대해 측정된 토크 값과 계산된 값의 오차 범위가 1% 이하로 일치하였다. 이들 방법은 스텝에 센서를 부착하지 않고 기계적 스텝 토크를 예측하는 기초를 제공한다. 계산된 토크 신호를 주파수영역에서 분석하였고, 모터의 부하(토크)가 증가함에 따라 관찰된 모터 속도 주파수는 감소하고, slip 주파수는 증가하는 사실이 예상된 것과 같이 확인되었다. 실제 펌프 시험에서 구동기의 worm gear와 같은 특성 성분은 주파수영역에서 그 특징이 표현된다. 이는 peak 주파수 감시가 MOV 내부 구성품의 이상을 찾아내기 위한 유용한 실마리를 제공한다는 것을 의미한다. 결과적으로, 모터에서의 전기 신호가 모터 용량을 계산하고, 전기-기계적 이상을 감시하는 유용한 도구가 될 수 있다는 것을 기대할 수 있다.

차후 연구로서 GUI 환경에서 통합 감시 프로그램을 개발하여 MOV 자동 고장 진단 기술의 기반을 마련하고자 한다.

참고문헌

- [1] Stan Hall. "Validation of Motor-Operated Valve Frequency Domain Analysis Techniques". ASME valve and pump testing. NUREGCP-0152 Vol. 2, pp 23-35, July 1998.
- [2] H.D.Haynes. "Aging and Service Wear of Electric Motor-Operated Valves Used in Engineered Safety-Feature Systems of Nuclear Power Plants". NUREG/CR-4234. ORNL-6170/V. Vol.2 RV. August 1989.
- [3] John S. Hsu, "Monitoring of defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation". IEEE transactions on industry applications, Vol.31. No.5, September/October 1995.
- [4] D.F.Cox and D.A.Casada, "Review of Monitoring and Diagnostic Methods for Motor-Operated Valve". ORNL/NCR/LTR-94/09. August 1994.
- [5] Gentile G et al. "Analysis Approach of Induction Motor Stator Faults to On-Line Diagnostics," ICEM90, Cambridge, MA, 1990, pp.491-497
- [6] Penman J and Tavner PJ, "Condition Monitoring of Electrical Machines", Wiley & Sons, New York, 1987
- [7] Steele ME, Gaydon NG, and Ward BA, "Monitoring Large Generators and Motor", IEE Proc., Vol. 133, Pt. B, No. 3, PP. 169-179, May 1986