

모터 구동밸브 성능 및 고장감시 기술개발

주형준, 박주문, 오성업, 성세진
충남대학교

Development of Condition and Performance Monitoring Technology of MOV

Hyung Jun Joo, Joo Moon Park, Sung Up Oh, Se Jin Sung
Chungnam National University

ABSTRACT

This paper is to see the availability of electrical signatures as a means for evaluating performance of MOVs which are extensively used in safety-related systems in nuclear plants. To estimate motor torque, two methods such as d-q frame conversion and air-gap method are suggested and estimated results are compared with measured values. The error between measured and estimated torques is within acceptable error bound with below 1 % under varied load. Frequency domain analysis of calculated torque has been done as well. It is shown that monitoring of peak frequency could give useful clues to detect anomalies of MOV.

1. 서론

MOV는 보편적으로 안전에 관련이 깊은 원자력 발전에 쓰이고 있다. 근래에 팔목상대한 규정조치와 응용도구 등의 주의가 MOV의 안전에 많은 관심이 주어지고 있다. 이런 안전관련 을 위해 직접 MOV에 설치되는 센서기반의 측정이 기계적인 변수 즉 스템토크와 쓰러스트 같은 기계적인 변수의 직접 센서를 통한 측정이 적용되어 왔다. 이런 종류의 측정은 각 밸브의 설계 기본개념과 요구조건을 확신하는데 필요한 측정이다. 하지만 직접 센서를 통한 측정은 효과적으로 시험하는 것이 어렵고 장기적이고 주기적인 MOV 운동성 평가에는 적합하지 않다. 최근에는 몇몇의 모터에 유입되는 전기 신호를 이용한 기술들이 MOV의 동작과 Monitoring의 평가를 위해 개발되고 있다. 보편적인 MOV의 전기기계 계기들에서 모터의 토크는 스템토크로 변환된다. 이 스템토크는 실제의 밸브디스크를 밀거나 당기는 힘을 제공한다. 그림

1과 같은 액추에이터의 기어나 스템의 너트같은 동력전달장치의 다양한 힘의 이동을 통해 d-q 변환과 에어 갭 방식의 모터의 3상전압원과 전류원을 이용한 방법이 제공되며 전기적인 신호의 주파수 영역의 해석 방법 등이 실행될 수 있음을 보여준다. 또한 이런 주파수 영역을 해석방법이 MOV의 상태감시에 유용한 가치가 있음을 보여준다.

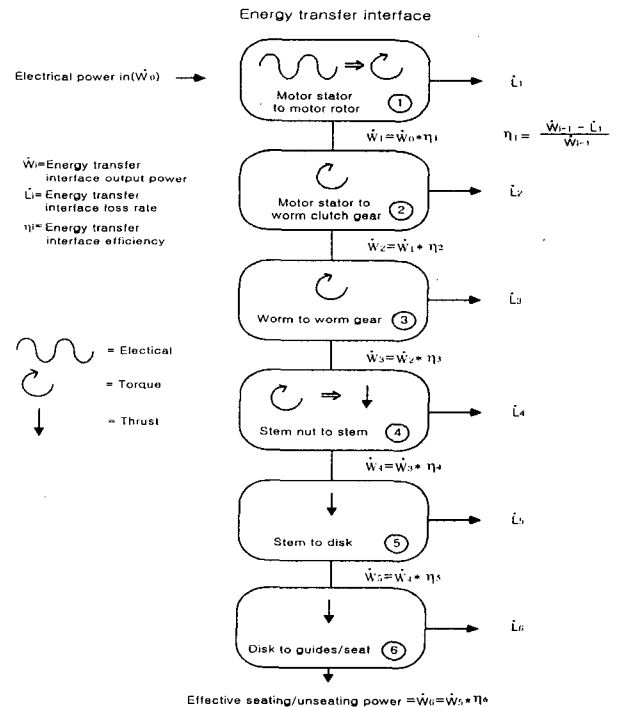


그림 1 MOV의 에너지전달과정
Fig. 1 simplified Energy transfer schematic

2. 토크 계산법

2.1 D-Q축 변환방식

유도전동기의 시변 미분방정식으로 나타나는 매우

복잡한 식을 보다 쉽게 해석하기 위하여 변수 변환을 하게 되는데, d-q 변환은 3상의 복잡한 수식을 2상의 d축과 q축으로 변환함으로써 직류기의 해석과 비슷하게 하기 위함이다.

모터 토크의 계산 에러는 모터의 부적절한 시간 변화 특성에 기인한다. d-q 고정축은 모터가 로터의 위치에 관계없이 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있는 모터 해석이 가능하게 한다. 이 축변환을 통하여 3상의 모터 전력, 전압, 전류는 그림 2와 식 1에서 보여지는 것처럼 d-q축으로 변환될 수 있다.

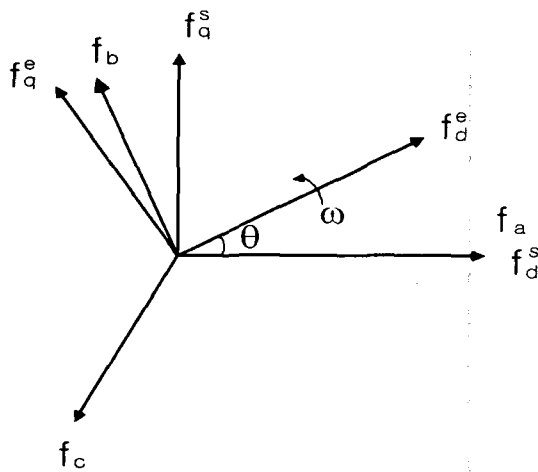


그림 2 축변환토크계산식

Fig. 2 Frame conversion for torque estimation
위 그림은 3상의 좌표축과 정지좌표계, 회전좌표계 d-q축과의 관계를 나타내는 그림이다.

$$f_{dq}^w = T(\theta) f_{abc} \quad \text{이고}$$

$$f_{dq}^w = [f_d^w \quad f_q^w \quad f_n^w]^T, \quad f_{abc} = [f_a \quad f_b \quad f_c]^T \text{일 때}$$

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

$\theta =$ 기준축에서 로터위치, $\omega =$ 각속도
윗식으로부터 모터 스테이터의 전압식을 얻을 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
 $r_s =$ stator winding resistance

$\lambda_{ds} =$ motor magnetic flux of d axis

$\lambda_{qs} =$ motor magnetic flux of q axis

$i_{ds} =$ motor current of d axis

$i_{qs} =$ motor current of q axis

모터의 플럭스를 계산하기 위해 만일 스테이터의 비교 축이 $\omega = 0$ 이라고 하면 식 2은 식 3로 변환될 수 있다.

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

식 3로부터 스테이터의 전류와 스테이터의 플럭스를 이용하여 모터토크는 식 4과 같이 계산되어진다.

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

여기서 P 는 모터의 극수이다.

2.2 에어갭 토크식

다음은 3상의 아마추어 권선의 전압식이다.

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

$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 a,b,c 권선의 누설자속.

$r =$ the phase resistance

식 5로부터 자속의 결합은 다음과 같이 얻어진다.

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

식 6에서 권선에 저장되는 에너지로부터 동손을 빼버리면 에어갭 토크 식은 식 7로 선간전압과 전류의 형태로 변화하게 된다.

$$T = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{3}} \begin{pmatrix} (i_a - i_b) \cdot \int [v_{ca} - R(i_c - i_a)] dt \\ -(i_c - i_a) \cdot \int [v_{ab} - R(i_a - i_b)] dt \end{pmatrix} \quad (7)$$

p = 극수,
 = line currents
 R = half of the line-to-line resistance value

위의 두가지 방법으로부터 인덕션 모터의 토크 계산은 식 3과 5을 통하여 얻어질 수 있다. 두 개의 식으로부터 얻어진 모의된 결과 값이 그림 3에 나타나 있다. 그림 4은 토크 메터를 통하여 직접 얻어진 토크값이다. 부하의 변화 환경 하에서의 실제의 값과 계산된 값과의 에러폭은 1%미만으로 계산되어진다. 이것은 두가지 방법이 직접적인 센서를 통하지 않는 벨브 스템토크의 계산방법이 될 것을 의미한다.

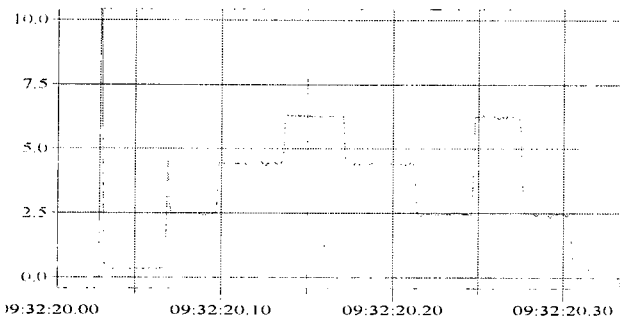


그림 3 D-Q축변환방식과 air-gap방식으로 얻어진 토크
 Fig. 3 Estimated torque by d-q frame conversion and air gap

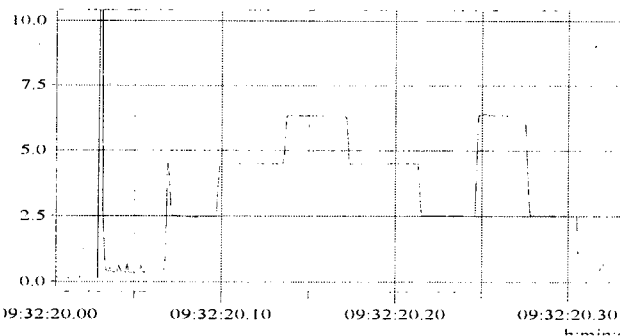


그림 4 토크메터를 통하여 얻어진 토크값
 Fig. 4 Measured torque by torque meter

3. 토크의 주파수분석

토크가 식 4과 7에 의해 계산되어지고 나면 그 결과값인 토크 신호는 모터의 고장이나 특성해석에 이용될 수 있다. 계산되어진 토크값은 전압과 전류의 조합으로 이루어졌기 때문에 전류를 통한 모터 특성해석보다 유용하게 된다. 주파수 영역에서는 시간영역에서는 나타나지 않는 슬립 주파수와 모터의 스피드와 같은 정보를 표현한다. 그림 5는 토크값의 주파수해석을 통하여 60Hz이하의 두 개의 값

이 존재하는 것을 보여주고 있다. 이론적으로 이 두 값은 슬립주파수와 모터속도 주파수를 나타낸다.

슬립 주파수는 다음과 같이 정의된다.

$$SF = (\text{synchronous speed} - \text{actual speed}) \times (\text{number of motor poles}) \quad (8)$$

모터 속도의 변화는 슬립주파수의 변화로 얻어진다. 예를 들면 실제의 4극 AC 60Hz의 유도전동기의 모터 속도는 다음식과 같이 슬립주파수를 통하여 얻어진다.

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

where, SF is in hertz and AMS is in rpm.

슬립주파수의 변화는 모터 성능저하의 좋은 지표가 된다. 전기적인 부조화는 로터바의 손상과 관련된 일반적인 현상이다.

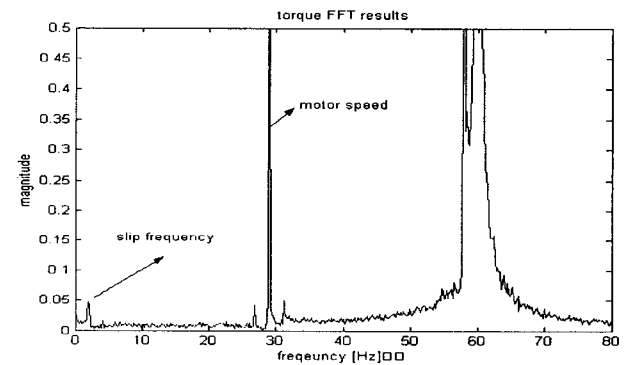


그림 5 모터토크의 주파수 분석
 Figure 5. Frequency spectra of motor torque

그림 6과 표 1은 부하의 변화에 따른 모터 속도 주파수의 변화를 설명하고 있다. 관측되는 모터 속도 주파수는 모터의 부하가 많아질수록 떨어진다.

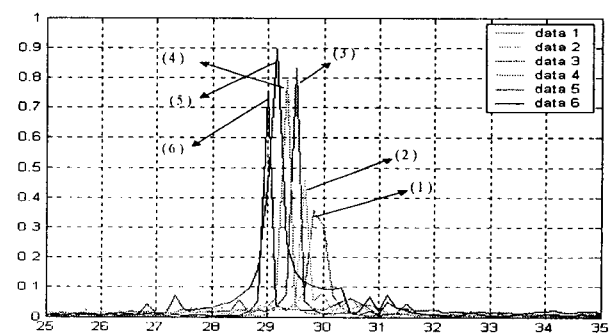


그림 6 부하변화에 따른 모터스피드의 변화
 Figure 6. The shift of motor speed due to load change

모터의 속도가 슬립 주파수와 관련이 있기 때문에 그림 7에서와 같이 모터 토크가 증가하게 되면 슬립주파수가 오른쪽으로 이동하며 증가되는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한 슬립주파수가 모터의 속도보다 더욱 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다.

표 1 토크변화에 따른 모터스피드와 슬립주파수의 변화
Table 1. The change of motor speed and slip frequency due to Torque change

No	torque(N.m)	RPM	Slip Freq.[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

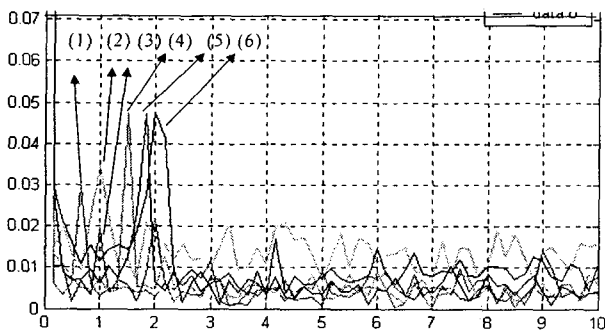


그림 7 부하변화에 따른 슬립주파수의 변화
Figure 7. The shift of slip frequency due to load change

3. 결 론

본 논문에서 Motor operated valve의 평가의 방법으로서 전기신호를 이용하는 것이 가능함을 제시하였다. 모터 토크를 3상의 전압신호와 전류신호만으로 계산하기 위해 D-Q 축변환방식과 에어갭 방식을 제안하였다. 두 방식으로부터 계산되어진 결과는 서로 정확히 일치하였고 부하가 변동시에 실제의 센서를 통하여 얻어진 토크값과의 에러율이 1% 미만임을 확인하였다.

이것은 위의 토크계산방법이 밸브에 실제의 센서를 부착하지 않고 기계적인 토크를 얻을 수 있음을 확인하였다.

계산되어진 토크 신호는 주파수 영역에서 해석되었으며 모터의 부하가 증가하면 관측되어지는 모터의 속도 주파수는 감소하게 되고 슬립의 주파수는 증가하게 된다. 이것은 슬립주파수가 모터의 속도보다 부하의 변화에 대하여 민감함을 보였다. 실제

의 밸브 시스템의 평가에서 원기어 같은 구성 성분들은 주파수 영역에서 표현됨을 알 수 있다.

즉 MOV의 평가의 구성요소들이 주파수영역에서의 피크 값을 관측함으로써 얻어질 수 있음을 의미한다.

전기신호만으로 토크의 변화나 모터의 기계적인 변형등을 관측하거나 모터의 상태를 관측할 수 있음을 확인하였다.

이 연구는 BK21충남대학교 정보통신양성사업단의 지원을 받았음

참 고 문 헌

- [1] Stan Hall. "Validation of Motor-Operated Valve Frequency Domain Analysis Techniques". ASME valve and pump testing. NUREG/CP-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". UREG/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". IEE E 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", IEEE Proc., Vol. 133, Pt. B, No. 3, PP. 169-179, May 1986