

## 모터구동밸브의 고장 및 성능감시 기술에 대한 연구

권석준, 성계용\*, 이흥호

충남대학교 전기공학과, 한국원자력 안전기술원(KINS) \*

### Study on the Condition and Performance Monitoring Technology of Motor-Operated Valve

Seok Jun Kwon, Key Yong Sung\*, Heung Ho Lee

Department of Electrical Engineering, Chungnam National Univ.

Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) \*

**Abstract** - 본 논문에서는 모터구동밸브의 모터 토크를 전기적인 신호만으로 예측하고, 계산된 모터 토크신호를 주파수영역에서 분석하여 Motor Speed, Slip pole 주파수, WGTM(Worm Gear Tooth Mesh)과 같은 MOV의 기계적 특성 성분을 확인하였다. 또한 모의 고장 실험을 통해 MOV 기계적 고장이 이 특성성분의 변화로 나타나는 것을 확인하므로, 이 정보를 MOV의 고장 감시 기술로 적용할 수 있다. 아울러 전기 신호를 이용하여 Condition Monitoring 기법을 개발하고, MOV 고장 감시 Software를 개발하므로, MOV 주기적 확인에 대비한 규제검증 기술 및 정보를 제공하고자 한다.

### 1. 서 론

최근에 MOV(Motor-Operated Valve) 성능을 평가하고, 기계적인 부하의 변동이나 MOV 이상 요인으로 나타나는 성능저하를 Monitoring 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. 또한 계산된 토크를 주파수 분석하여 MOV 기계적 특성을 파악하고, 이 특성이 MOV 고장 및 성능감시 기술로써 활용될 수 있음을 확인하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 모터 토크의 계산

##### 2.1.1 D-Q 축 변환 식

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.

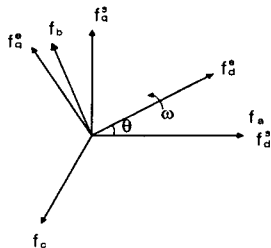


그림 1. 토크 계산을 위한 축변환

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

$$f_{dan}^{wu} = T(\theta) f_{abc} \quad (1)$$

여기서,  $f_{dan}^{wu} = [f_a^{wu} \ f_q^{wu} \ f_n^{wu}]^T$ ,  $f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$

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

여기서,  $\theta$  = rotor position at the reference frame

이를 통해 얻어진 토크식은 아래와 같다.

$$T_s = \frac{P}{4\sqrt{3}} \left\{ (i_b - i_c) \int_0^t ((2V_a - V_b - V_c) - r_s(2i_a - i_b - i_c)) dt \right. \\ \left. - (2i_a - i_b - i_c) \int_0^t ((V_b - V_c) - r_s(i_b - i_c)) dt \right\}$$

여기서, p = the number of motor poles (2)

##### 2.1.1 Air-Gap 토크 식

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

여기서,

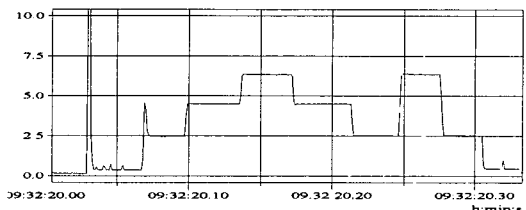
p = number of poles

$i_a, i_b, i_c$  = line currents

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

위 두 방법을 통해, 유도전동기의 토크 계산은 식(2), 식(3)으로 완성될 수 있다. 두 식으로부터 얻어진 시뮬레이션 결과와 토크 메타로 직접 측정된 값이 정확히 일치하는 것을 그림 3에 보였다. 가변 부하 아래에서 실제 값과 계산값의 오차 범위는 1% 이내이다.

이는 스템에 센서를 부착하지 않고 MOV의 스템 torque를 예측할 수 있다는 점에서 이 방법들은 유용한 의미를 갖는다.



토크메타로 측정된 토크값

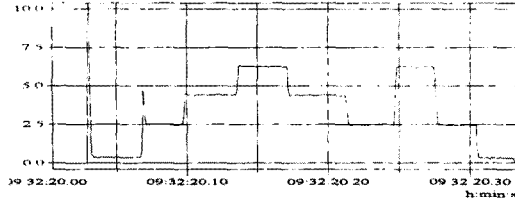


그림 2. D-Q 축변환 및 Air-gap 토크식으로 계산된 토크값

## 2.2 토크 주파수 분석

식(2) 또는 식(3)을 통하여 계산된 토크는 모터의 결합과 특성을 분석하는 데에 이용될 수 있다. 주파수 영역은 시간영역에서는 찾을 수 없는 MOV의 기계적 특성을 나타낼 수 있다. 그림 3은 토크값의 주파수 해석을 통해 60Hz이하의 여러 값이 존재하는 것을 보여주고 있다. 이론적으로 이 값은 Slip Frequency, Motor speed, WGTM(Worm Gear Tooth Mesh), Drive Sleeve Frequency, Motor bearing outer race Frequency를 나타내고, 다음과 같이 정의된다.

$$SF \text{ (Slip Frequency)} = (\text{동기속도} - \text{실제속도}) \times (\text{모터 pole 수}) \quad (4)$$

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

$$AMS = 60 \times [ 30 - (SF/4) ] \quad (5)$$

$$WGTM = \text{Motor Speed} (\text{분석을 통해 결정됨}) \times \text{MPT} / \text{WSGT} \quad (6)$$

$$\text{MPT} = \text{모터 피니언 이빨의 수} \quad (6)$$

$$\text{WSGT} = \text{웜 축 기어 이빨의 수} \quad (6)$$

$$\text{Drive Sleeve Frequency} = \text{WGTM} / \text{WGT} \quad (7)$$

$$\text{WGT} = \text{웜기어 이빨의 수} \quad (7)$$

여기서, AMP의 단위는 rpm, 다른 값들은 Hz 이다.

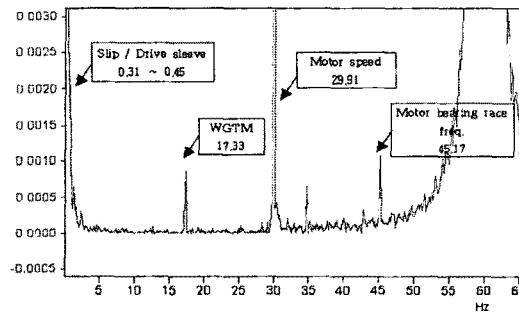


그림 3. 정상 상태의 MOV 모터토크 주파수 분석 결과

## 2.3 모의 고장 실험

MOV 세트 내부 부속에 손상을 낸 후, 전기신호 분석 결과를 확인하여, MOV 고장을 감지할 수 있는 요소를 찾아내었다.

### 2.3.1 모터 피니언 기어 고장

그림 4는 MOV에서 모터를 분리한 상태이고, 모터 피니언 기어의 고장 전후의 상태가 그림 5에 나타나있다. 손상된 피니언 기어를 장착한 후의 MOV 토크값의 주파수 분석결과를 그림 6에 나타내었다.

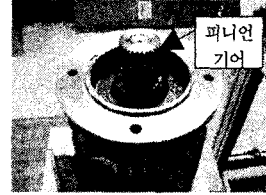


그림 4. MOV 구동 모터와 모터 피니언 기어



그림 5. 모터 피니언 기어 (마모 전-좌, 후-우)

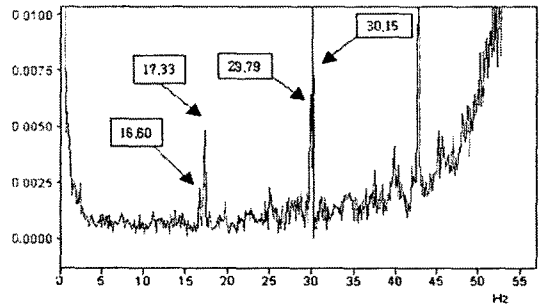


그림 6. 고장 MOV 토크신호 주파수 분석 결과

그림 3의 정상 상태 MOV 분석결과와 비교해 볼 때 Motor Speed 성분과 WGTM성분이 변이를 일으킨 것을 확인할 수 있다. 그 이유로는 마치 고속으로 달리던 자동차의 클러치를 밟았다 뺐 경우 속도가 증가했다가 감소하는 것처럼, 모터 피니언 기어의 이빨 간격이 증가해 액추에이터 쪽의 부하 기어와 맞물리지 않고 무부하 회전하는 순간의 Motor Speed와 순간적으로 맞물려 돌아갈 때의 부하 회전 Motor Speed의 두가지 속도 성분이 발생하는 것을 예측할 수 있다. 그리고 WGTM 부근 신호가 증가하였다.

### 2.3.1 모터 피니언 기어 고장

모터의 동력을 스템 축으로 전달해 주는 중요한 부속인 웜기어의 손상이 MOV 전기신호에 미치는 영향을 알아보기 위해 MOV 본체를 분해하였다. 그림 7은 스템 축과 직접 연결되는 Sleeve 봉치와 웜기어가 연결된 모습이다. Sleeve 봉치에 손상된 웜기어(그림 8)를 장착하여 그 특성의 변화를 살펴보았다. 그림 9에 있다.

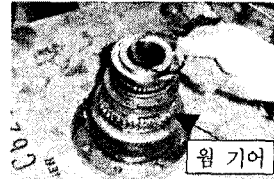


그림 7. Sleeve 봉치 및 웜 기어



그림 8. 웜기어 (마모 전-좌, 후-우)

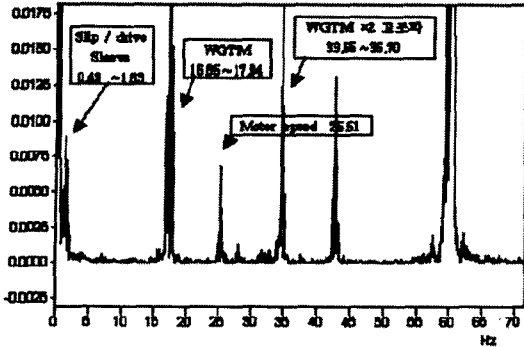


그림 9. 고장 MOV 토크신호 주파수 분석 결과

내부 기계적 환경의 변화(MOV 본체 내부의 윤활유를 제거로 인한 마찰 증가, 워밍 기어 고장 및 이로 인한 부하 축 동력 전달의 불균형)로 인해 Motor speed 성분 줄어들고 거칠어졌으며, WGTM의 부근 신호가 크게 증가했다. 워밍 기어의 고장 때문에 함께 맞물려 있는 워밍 Shaft의 힙 전달에 불균형이 생기고, 이로 인해 모터 피니언기어와 워밍 Shaft 기어가 불규칙한 속도로 회전하기 때문에 WGTM 신호의 변화가 일어난 것을 예측할 수 있다. 또한 모터의 회전에 많은 변화가 발생함으로 Slip pole frequency가 이동하고, 그 성분이 증가한 것을 확인할 수 있다.

그림 10에 전력 신호에서도 워밍 기어의 고장으로 인해 이상 신호가 발생한 것을 확인할 수 있다. 스텝 스트러스트의 증가 즉, 부하가 증가하면서 워밍 기어의 고장으로 인한 효과가 전력 신호의 이상으로 나타났다. 이상 신호가 발생한 것은 위와 동일하게 워밍 기어와 맞물려 있는 워밍 Shaft의 힙 전달의 불균형으로 인해 Motor의 구동 전력이 변동했기 때문이다. 그림에서 고장 신호가 주기성을 띤 것은 한쪽 부분만 손상을 입은 워밍 기어의 회전 때문이다.

이처럼 MOV 내부의 부속의 고장이 구동기 모터의 전기신호의 분석을 통해 예측된다는 것을 확실히 할 수가 있다.

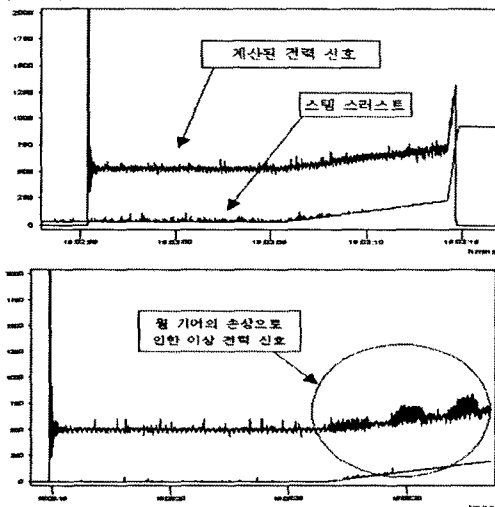


그림 10. 워밍 기어 고장 전후의 전력 신호 변화

### 2.3 고장 감시 Software

MOV에 특별한 진단 장비를 사용하지 않고 MCC에서 데이터 취득 장치(DAS)를 통해 얻어진 전기신호를 분석하고, 또는 수식을 통해 전력(Power) 및 모터 토크

신호로 변환하여 분석함으로써 MOV의 건전성을 확인하는 데는 여러 가지 단계의 과정을 거쳐야 한다.

현재 개발 중인 MOV 감시 Software를 통해 데이터를 간편한 조작으로 분석할 수 있게 하였고, 건전한 상태와 비교 분석함으로써 MOV의 성능 및 고장을 예측할 수 있도록 기능을 제공하게 하였다.

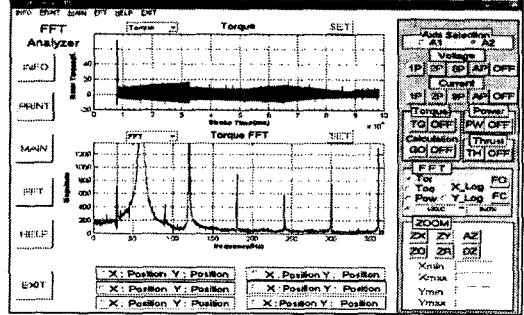


그림 11. 개발중인 MOV 고장 감시 Software

### 3. 결 론

D-Q 축 변환과 Air-gap 토크식의 두 가지 방법으로 계산된 모터 토크신호를 주파수영역에서 분석하여 Motor Speed, Slip pole 주파수, WGTM(Worm Gear Tooth Mesh)과 같은 MOV의 기계적 특성 성분을 확인하였다. 또한 모의 고장 실험을 통해 MOV 기계적 고장이 이 특성성분의 변화로 나타나는 것을 확인하므로, 이 정보를 MOV의 안전성 평가의 요소로 적용할 수 있다.

앞으로 본 논문에서 제시된 주파수 영역 분석 기법을 좀더 보완하고, 신호분석기법을 추가하면 전기신호를 이용한 MOV 안전성평가 기술의 활용이 가능할 것으로 기대된다. 아울러 차후 연구에서는 모터 토크와 스텝 힙과의 관계를 정량적으로 진단하는 연구가 필요하다. 연구 개발 중인 통합 감시 프로그램을 개발하여 MOV 작동 고장 진단 기술의 기반을 마련 하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [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 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
- [8] Joo Moon Park " Motor Torque Analysis for Motor-Operated Valves Performance Evaluation" Chungnam Nat. Univ. 2002