

모터 구동 밸브의 비침투 진단 신호 추출에 관한 연구
Non-Invasive Diagnostic Signature Extraction for Motor-Operated Valves

채 장범
아주대학교 기계공학과

Richard H. Lyon
Massachusetts Institute of Technology

Abstract

This paper is concerned with extracting the diagnostic signature for motor-operated valves (MOV's) non-invasively. A torque estimator is developed and tested to obtain electrical torque of the induction motors which are attached to the MOV's. Inverse filter is used to recover the gear meshing forces from the measured actuator housing vibration, which contain the gear rotation information. Frequency demodulation techniques are performed and an adaptive linear bandpass filter is implemented to improve signal-to-noise ratio. Finally, stand-alone valve experiments are carried out to validate the signature extraction scheme.

1. 서론

모터 구동 밸브는 화학 공장이나 가스 공사 등 유체의 흐름을 조절할 필요성이 있는 곳에서 많이 사용되고 있다. 특히 원자력 발전소와 같이 유체의 조절이 발전소 운영에 필수적이고 그 조절의 실패가 커다란 사고와 직접 관계가 있는 곳에서는 상당한 관심을 갖고 모터 구동 밸브의 상태를 항상 점검하고 있다. 비록 현재 수행되는 점검이 주기적으로 이루어지고 있고 모터 구동 밸브의 상태에 많은 정보를 제공하여 주지만, 점검에 상당히 많은 재원이 투입되고 있고 미래의 고장을 예측하는 데는 실패를 하고 있다. 이에 새로운 개념의 진단 방법이 요구되어졌다. 그리고 진단 방법의 중요한 요구 사항 중의 하나는 진단의 방법이 비침투적이어야 한다는 것이다. 이는 많은 경우에 있어서 진단을 위한 계측기의 부착이 진단을 해야 할 부속품의 변경을 요구한다면 진단을 위해 전 공정을 면줘야 할 경우도 생기고 그 부품이 안전에 직결된 부품이라면 부품의 변경은 상당히 많은 절차와 단계를 요구하기 때문이다.

모터 구동 밸브의 진단 신호 추출에 대하여 언급하기 전에 모터 구동 밸브의 구조와 작동 원리를 간단하게 살펴보기로 한다. 개략적 그림이 Fig.1에 표시되어 있다. 모터 구동 밸브는 크게 세 부분으로 모터부, 구동부 그리고 밸브로 구성되어 있다. 모터는 구동부에 볼트로 연결되어 있고 모터에 연결된 피니언이 구동부의 월 축을 회전시켜 준다. 월은 스플라인된

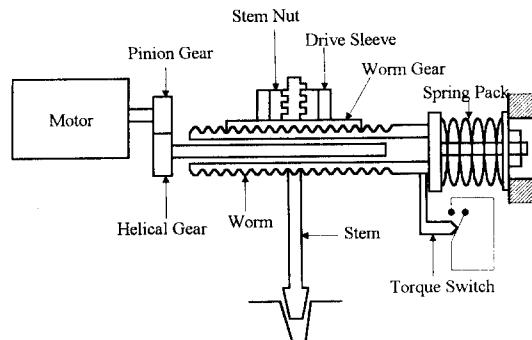


Figure 1. Schematic diagram of Limitorque SMB-000 motor operator

월축에 끼어져 있고 월과 월기어 쌍이 회전의 방향을 바꿔 주어 밸브 스템과 밸브 너트의 작용으로 밸브를 여닫게 된다. 이때 주의하여야 할 부분이 월 끝 단에 놓인 스프링 팩이다. 만일 밸브가 밸브 시트나 방해물에 걸려 더 이상 움직이기 곤란할 때 밸브는 정지하게 된다. 그러나 이때 월은 스플라인된 월 축을 따라 스프링 팩을 압축시키면서 전진하게 되다. 일반적으로 개폐를 하는 모터 구동 밸브는 스프링 팩의 압축 정도에 따라 모터를 정지시키는 토크 스위치로 밸브를 닫고 위치에 따라 모터 구동을 조정하는 위치 스위치로 밸브를 연다.⁽¹⁾

이와 같은 모터 구동 밸브의 상태를 진단하기 위하여는 먼저 진단에 필요한 신호가 무엇인지를 먼저

설정하여야 한다. 많은 검토를 거쳐 필요한 진단 신호는 벨브 거동과 그때 걸리는 힘의 관계로 나타났고 여기서는 이 두 값을 비침투적으로 추정하는 방법을 논하겠다.

2. 전기적 모터 토크의 측정

먼저 모터에 입력되는 신호를 사용하여 모터 구동 벨브의 상태를 알아보는 방법을 논의 한다. 모터에서 발생되는 토크는 벨브와 구동부에 걸리는 기계적 부하와 평형을 이루게 된다. 이러한 기계적인 부하는 기계부의 고장이 발생하면서 변하게 되고 이는 모터를 통하여 볼 수 있다. 그러나 모터의 토크를 직접 측정할 수 없기 때문에 측정이 가능한 모터에 입력되는 전류와 전압으로 모터의 토크를 평가하는 것이 필요하다.

유도 모터의 토크를 측정하는 많은 방법들이 연구되어져 왔다.^(2,3) 그 중에서 모터에 입력되는 신호를 갖고 토크를 추정하는 방법이 측정의 정확성과 단순성으로 인하여 실용화에 상당히 효과적이라하겠다. 그러나 전의 연구들은 상당히 이상적이어서 곧바로 실제에 응용을 하기 힘들었다. 여기서는 다음의 가정을 토대로 논의 하기로 한다.

1. 고정자의 권선은 고르게 감겨져 있다.
2. 회전자의 자기 인덕턴스는 회전자의 위치에 영향을 받지 않는다.
3. 선형 자장을 가정한다.

우선 3 상 모터는 2 상의 모델로 변환하여 해석하는데 다음과 같이 사용된다.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\cos^2 \frac{\pi}{3} & -\cos^2 \frac{\pi}{3} \\ 0 & \cos^2 \frac{1}{6} \pi & -\cos^2 \frac{1}{6} \pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 X_A, X_B, X_C 는 각기 3 상 신호를 그리고 x_a, x_b 는 각기 2 상 신호를 나타낸다.

2 상 모터에서는 자속(flux)-전류의 관계식은 다음의 형태로 표시될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_R \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} i_s \\ i_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\lambda_s, \lambda_R, i_s$ 그리고 i_R 은 각기 고정자와 회전자의 자속과 전류이다. 행렬 L 은 모터의 인덕션 행렬이다. 이와 같은 표시를 사용하면 토크는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^T & i_R^T \end{bmatrix} \left[\frac{dL}{d\theta} \right] \begin{bmatrix} i_s \\ i_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

위의 식을 다시 정리하면 다음과 같이 표시되는 데 여기서 중요한 점은 모터의 토크가 오직 고정자

단자에서 측정될 수 있는 고정자의 변수로 표시되었다는 점이다. P 는 모터의 극의 수를 의미한다.

$$T = P(\lambda_{sa} i_{sb} - \lambda_{sb} i_{sa}) \quad (4)$$

위의 식으로 전기적 토크를 계산하기 위하여는 모터 입력 전압과 전류로부터 자속을 구해야 한다. 2 상의 두 개의 신호를 아래 첨자 a 와 b로 표시해 왔는데 각각에 해당하는 식이 같으므로 앞으로는 한 개의 신호에 관하여만 표시하기로 한다. 고정자의 자속을 고정자의 전압, 저항 그리고 전류로 표시하면 다음과 같다.

$$\lambda_{sa} = \int_{-\infty}^t [V_{sa} - R_s j_{sa}] dt \quad (5)$$

위 식에서 적분을 수행함에 있어서 구할 수 없는 $t=-\infty$ 일 때의 정보를 요구한다. 이 문제를 해결하기 위해서 위의 식을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \lambda_{sa} &= \int_{-\infty}^{t_o} [V_{sa} - R_s j_{sa}] dt + \int_{t_o}^t [V_{sa} - R_s j_{sa}] dt \\ &= \lambda_{sao} + \int_{t_o}^t [V_{sa} - R_s j_{sa}] dt \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 λ_{sao} 는 미지수이기 때문에 기대값 0 으로 가정하고 또한 적분이 t_o 에서 시작함으로 발생하는 오차를 피하기 위하여 forgetting factor γ 를 도입한다. 그러면 위의 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{sa} = \int_{t_o}^t [V_{sa} - R_s j_{sa} - \gamma \hat{\lambda}_{sa}] dt \quad (7)$$

여기서 $\hat{\lambda}$ 표시는 추정된 값은 의미한다. 위의 추정된 값을 근본으로 모터의 토크를 구하는 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\hat{T} = P(\hat{\lambda}_{sa} i_{sb} - \hat{\lambda}_{sb} i_{sa}) \quad (8)$$

그러나 위의 식은 forgetting factor 를 도입함으로 발생되는 오차를 포함하고 있다. 그래서 다시 정상 상태 조건을 가정하여 발생된 오차를 제거하면 최종적으로 다음 식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{estimator} &= P(\hat{\lambda}_{sa} i_{sb} - \hat{\lambda}_{sb} i_{sa}) \\ &+ \frac{\sqrt{2} P \mathcal{W}_o J}{\omega \sqrt{\gamma^2 + \omega^2}} \sin(\phi - \arctan \left[\frac{\omega}{\gamma} \right]) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 V_o 는 모터 전압의 제곱 평균 제곱근이다.

3. 진동을 이용한 신호 추출

밸브의 거동을 정확히 알기 위하여 모터 구동 벨브의 구동부 외벽에 부착한 가속도계에서 측정된 진동 신호를 분석한다. 진동은 기어가 맞물려 회전할 때 기어의 맞물림 힘에 의해 발생되고 그 진동은 구조부를 통하여 구동부 외벽에 전달된다. 그런데 벨브의 거동을 알 수 있는 중요한 정보는 기어의 맞물림 힘에 포함되어 있으므로 측정된 외벽의 진동으로부터 기어의 맞물림 힘을 추정하여야 한다. 진동이 발생하여 전달됨에 따라

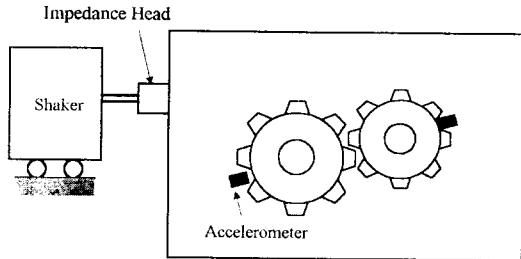


Figure 2. Accelerometer attachment on a gear pair for transfer function measurement

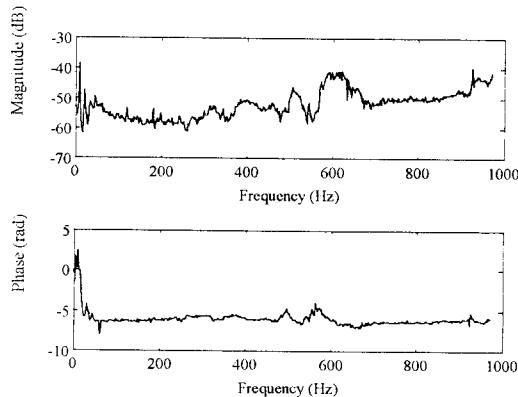


Figure 3. Transfer function between pinion gear set and housing vibration

구조의 특성과 신호 전파의 경로에 따라 진동 신호는 본래의 파형을 잃고 왜곡된다.⁽⁴⁾ 이 왜곡된 파형을 다시 본래 진동 원의 파형으로 복원시켜야 기어의 움직임 정보를 알 수 있다. 전파로 인한 왜곡 현상을 제거하기 위하여는 진동 원과 계측점 사이의 전달 함수를 구함으로서 가능하다. 기어의 맞물림 힘과 외벽의 진동 사이의 전달 함수를 구하는데 있어서는 크게 두 가지 고려할 사항이 있다. 먼저 구동부 외벽의 진동은 측정하기 쉬우나 기어의 맞물림 힘을 측정하기란 실제로 거의 불가능하다. 그러므로 reciprocity theorem을 사용하여 기어의 맞물림 힘을 직접 측정하는 대신 외벽에 알고 있는 힘을 가하여 기어의 움직임을 측정하여 구하고자 하는 전달 함수를 구할 수 있다. 두 번째로 기어의 맞물림 힘에 상응하는 기어의 움직임을 측정하는데 있어서 기어의 맞물림 힘은 두 기어가 서로 상대운동을 함으로서 발생되기 때문에 단순히 기어 하나의 진동을 측정해서는 않되고 한 쌍의 기어의 상대 움직임을 측정해야 한다. 이를 위해서는 소형의 가속도계를 양 기어의 대칭되는 곳에 장착하고 오직 회전 성분만을 측정하여야 한다. Fig. 2에 실험의 개략도를 나타내었고 Fig. 3에 구해진 전달 함수를 나타내었다. 이렇게 구한 전달 함수를 이용하여

역필터(Inverse filter)를 만들어 측정된 진동 신호로부터 기어의 맞물림 힘을 재생 시킨다.⁽⁵⁾

다음으로는 재생된 기어의 맞물림 힘에서 기어의 움직임 정보를 빼어 내는 일이다. 피니언 기어의 속도는 피니언 기어의 맞물림 힘의 신호를 Frequency demodulation 함으로써 얻을 수 있다. 이는 기어의 맞물림 힘이 기어가 회전하면서 기어가 맞물리고 다시 떨어질 때마다 신호의 변화를 주기 때문이다. 본 연구에 사용된 모터 구동 벨브의 피니언 기어의 맞물림 주파수는 약 540 Hz이다. 여러 성분의 신호가 기어 맞물림 힘에 포함되어 있기 때문에 먼저 신호의 잡음(noise)를 제거해야 하여야 하는데 기어의 맞물림 주파수 근처, 즉 540 Hz 근처에서 Bandpass filtering을 수행한다. 그런데 구동 시켜 주는 모터는 유도 모터로 부하가 걸리면 부하 양에 따라 회전 속도가 변하는 특성을 갖고 있다. 그러므로 단순히 고정된 중간 주파수의 Bandpass filtering을 수행하면 관심 있는 성분을 제거할 위험도 내포하고 있다. 그래서 단순한 Bandpass filtering 대신 분석되는 신호의 주파수 성분을 먼저 확인한 후 그에 따라 중간 주파수를 변경 시켜 주는 Adaptive Bandpass filtering을 수행하여야 한다. 여기서 또한 주의하여야 할 사항은 기어의 움직임을 알아내는데 중요한 요소가 신호의 크기가 아니고 각(phase) 이므로 inverse filter로 재생된 신호의 각 성분을 잡음을 제거하면서 다시 왜곡시켜서는 않된다. 그러므로 Adaptive Bandpass filter는 반드시 linear phase의 특성이 있어야만 한다.

Frequency demodulation 방법에는 주변에서 흔히 볼 수 있는 FM 라디오에서 사용되는 Phase lock loop이나 신호의 파형을 보고 주파수 성분을 추출해 내는 zero crossing, 신호의 에너지를 계산하여 주파수의 순간값을 구하는 Teager Energy Operator, Hilbert Transform 그리고 시간과 주파수를 동시에 보여 주는 Wigner-Ville distribution 등 상당히 많이 존재한다. 여기서는 신호 성분을 추출해 내는데 가장 강인한 방법인 Wigner-Ville distribution과 신호를 모델화하여 주파수 성분을 찾는 Parametric modeling 법을 사용하였다.

4. 모터 구동 벨브의 실험

위에서 설명한 신호 추출 방법을 직접 실험을 통하여 검증하기로 한다. 실험의 개략도가 Fig. 4에 보여진다. 모터에 입력되는 3상의 전류와 전압이 측정되어 2절에서 설명된 토크 추정 방법에 의해 출력 토크가 추정된다. 이는 실제로 모터 구동 벨브의 스프링 팩

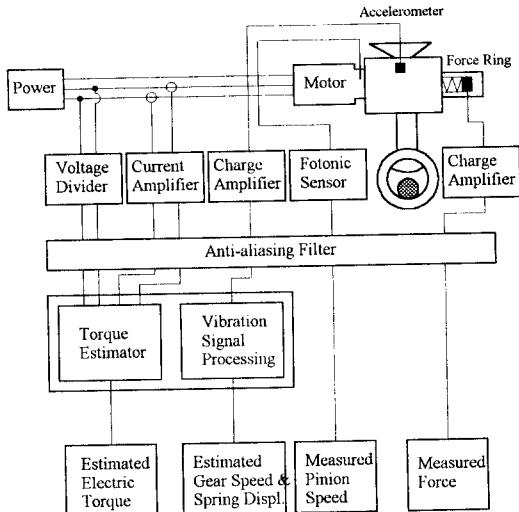


Figure 4. Stand-alone valve experiment set-up.

뒤에 힘 측정계를 놓아 측정된 힘을 힘과 토크와의 관계를 이용하여 변환된 측정 토크와 비교하였다. Fig. 5 에 비교를 나타냈는데 측정 토크는 모터가 정지하여도 계속 힘이 존재함으로 토크가 그대로 존재함을 나타내고 추정된 토크는 입력된 전압과 전류를 근본으로 계산되기 때문에 모터가 정지하면 그 값이 0 으로 되지만 추정치와 측정치가 상당히 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

진동을 이용하여 밸브의 위치를 알아내는 실험에서는 가속도계를 구동부의 외벽에 부착하여 진동 신호를 받아들여 증폭한 후, 3 절에서 설명된 진동 신호 분석 과정을 거친다. Fig. 6 에 그 결과를 나타내었다. Fig. 6 의 (a) 는 피니언 기어의 순간 속도를 나타낸다. 밸브의 위치를 정확히 알려면 월이 월축을 따라 미끄려져 스프링 패을 압축시키면서 발생되는 오차도 보정하여야 하고 또한 스프링 패의 압축 정도는 그 자체도 상당히 진단에 중요한 정보를 제공하기 때문에 월의 속도를 Fig. 6 의 (b) 에 표시하였다. 월의 속도는 그림에서 보다시피 약 20 Hz 이기 때문에 일반적으로 잡음이 많아 3 절에서 설명한 방법처럼 진동의 신호를 기어의 맞물림 힘으로 변경시킨 후 기어의 맞물림 힘을 분석하여 구하기 힘들다. 그러므로 다른 곳에서 월의 정보를 찾아야 하는데 피니언 기어에 월의 정보가 있다. 다시 말해 월과 월기어가 서로 맞물릴 때마다 월의 이에 걸리는 부하가 변하게 되고 그 영향이 피니언 기어에 전달되어 피니언의 속도가 변하기 때문이다. 그러므로 피니언 기어의 속도 변화가 월 기어의 속도가 되는데 이 정보를 Parametric modeling 법을 사용하여 추출하였다. 위의 두 속도 성분의 차가 바로 스프링

Comparison between estimated torque and calculated torque

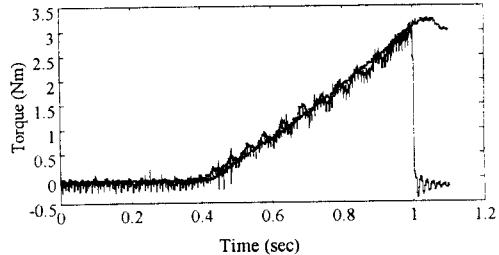


Figure 5. Comparison between the estimated electric torque and calculated torque from measured spring pack forces.

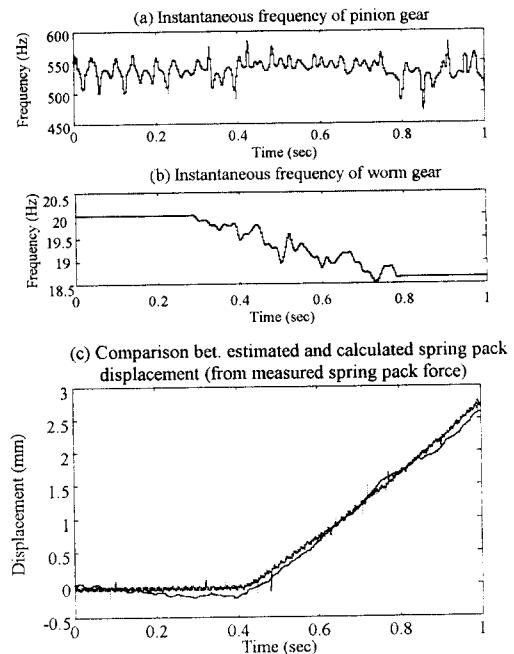


Figure 6. Estimated pinion, worm meshing frequency and spring pack compression.

패의 압축 거리가 되는데 이렇게 추정한 압축 거리와 실제로 측정된 압축 거리와의 비교가 Fig. 6 의 (c) 에 있다. 상당히 잘 맞음을 알 수 있다.

5. 결론

모터 구동 밸브의 진단을 위한 두 가지 신호를 재생해 내는 방법을 개발하기 위하여 연구가 수행되었다. 모터에 입력되는 전압과 전류를 측정하여 모터의 전기적 토크 출력을 추정하였고 구동부 외벽에 장착한 가속도계의 진동 신호를 분석하여 밸브의 거동과 스프링 패의 압축 거리 또한 재생하였다. 두 방법은

실험적으로 검증이 되었고 그 결과 본 연구에서 제시한 방법이 상당히 잘 추정함을 나타내 주었다.

6. 참고문헌

1. Limitorque manual
2. T. Holt, "Measurement of Electromagnetic Air Gap Torque Produced by a Synchronous Motor During Starting", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981, pp. 2059-2067
3. J.S. Hsu, H.H. Woodson and W.F. Weldon, "Possible Error in Measurement of Air-Gap Torque Pulsations of Induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, March 1992, pp. 202-208.
4. R.H. Lyon, Machinery Noise and Diagnostics, Butterworth, Cambridge, 1987.
5. Jangbom Chai, "Inverse Filter Design for Recovering Gear Meshing Force Signature", Proc. of SEM 한국지부, August 1995.