

Steel Rotor를 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 이상신호에 관한 실험적 연구

An Experimental Study About The Fault Signal of Flywheel Energy Storage System with Steel Rotor

조성원† · 배용채* · 이육륜* · 김희수* · 이두영*

Sung-Won Cho, Yong-Chae Bae, Wook-Ryun Lee, Hui-Soo Kim, Doo-Yong Lee

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장장치 (FESS : Flywheel Energy Storage System)는 전기에너지를 회전운동에너지로 변환하여 필요시 다시 전기에너지로 변환 할 수 있는 장치로써 효율적인 에너지 저장과 손실에너지의 최소화가 요구되어진다.⁽¹⁾ 플라이휠의 경우 일반적인 회전체에 비해 매우 복잡한 형상을 가지고 있으며, 이러한 복잡한 형상에 의해서 다양한 동특성 및 결함들이 발생한다.

본 논문은 플라이휠 시험 운행 중 발생한 결함 중 thrust collar에서 발생했던 결함에 대하여 진동신호를 기반으로 한 분석 및 특이 주파수에 의한 결함 사례를 기술 하였다.

2 회전체 모델

플라이휠 회전체의 설계 부분에서 고려해야 할 사항은 AMB에서 발생하는 반경 방향의 강성(K_r) 과 감쇠 (C_r), 축방향의 강성 (K_t)과 감쇠 (C_t) 이다. L 은 질량중심에서 수직 베어링 작용점까지의 거리이다.

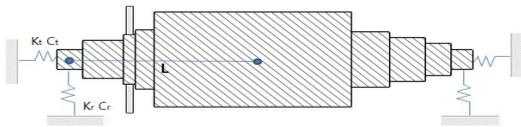


Fig. 1 Modeling of Flywheel System

플라이휠 회전체의 설계 부분에서 고려해야 할 사항은 AMB에서 발생하는 반경 방향의 강성(K_r) 과 감쇠 (C_r),

† 교신저자; 조성원
E-mail : hl0z02@nate.com
Tel : (042) 865-5626, Fax : (042) 865-5627

* 한전전력연구원
** 한전전력연구원

축방향의 강성 (K_t)과 감쇠 (C_t) 이다. L 은 질량중심에서 수직 베어링 작용점까지의 거리이다.⁽²⁾

$$M\ddot{x} + (G+D)\dot{x} + (H+S)x = q \quad (1)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_i \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} m\epsilon\Omega\cos\Omega t \\ m\epsilon\Omega\sin\Omega t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_p \\ 0 & 0 & -J_p & 0 \end{bmatrix} \quad H = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_p \\ 0 & 0 & -J_p & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} C_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L^2 C_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L^2 C_r \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} K_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L^2 K_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L^2 K_r \end{bmatrix}$$

$$q = \{x \ y \ \theta_x \ \theta_y \}$$

3 진동 데이터 분석

(1) 회전체 구조

플라이휠 에너지 저장장치의 회전체는 Steel로 제작되었으며 주요 구성은 Fig. 2와 같다.

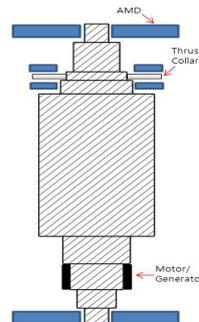


Fig. 2 Steel Rotor AMB and Motor/Generator 즉 전기에너지를 회전운동에너지로 다시 회전운동에너지를 전기에너지로 변환 할 수 있는 Motor/Generator, 최 상부

와 최하부에서 회전체의 좌우 운동을 제어 하는 Radial AMB, 상하 부분의 운동을 제어 할 수 있도록 영구자석과 전자석으로 구성되어 있는 Trust AMB로 구성 되어 있다.

이 회전체의 목표 운전 속도는 18000 RPM으로 고속 운전을 하게 된다.

(2) 결함 및 신호 분석

본 연구에서 사용된 Steel Rotor의 경우 목표운전속도까지 이상 없이 승속 한 후 하강하는 도중 약 15000RPM에서 Fig. 3과 같이 1X성분이 과대하게 생성되면서 과도한 진동이 발생하였다.

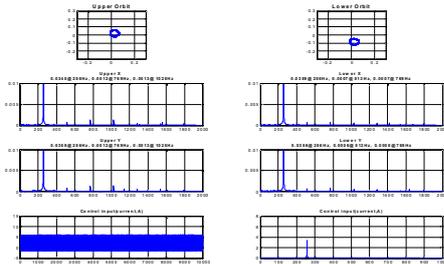


Fig. 3 Fault Signal of Steel Rotor

진동의 원인을 규명하기 위하여 시스템을 분해, 점검한 결과 thrust collar 부분에서 물결모양의 변형과 Bolt 부분에서 약 1mm 정도의 변형이 발생하였으며, 이로 인해 회전체 결함이 발생한 것으로 판단되었다. 따라서 정확한 원인을 파악하기 위해 상용해석프로그램을 이용하여 원심력에 의한 영향에 대하여 분석하여 보았으며, Trust Collar의 Bolt부분에서 허용응력을 넘어선 원심응력이 발생하였다.

따라서 trust collar의 재료를 교체하는 한편 Trust Collar를 지지 하고 있던 bolt의 개수를 늘려 응력 분산을 할 수 있도록 설계변경을 하였다.

그 결과 원심응력에 의한 Trust Collar의 변형은 없었으며, 승속 및 감속 시 결함이 발생하지 않았다.

이후 여러 번의 테스트 과정에서 thrust collar의 문제는 없었으나 감속 중 약 6700RPM에서 변위 상승과 함께 회전체 제어불능상태가 되었다.

Waterfall 선도를 이용하여 분석한 결과 Fig. 4와 같이 운전속도와 무방하게 지속적으로 발생하고 있는 112.5Hz의 특이주파수가 발생하고 있었음을 확인 할 수 있었으며, 이 특이주파수와 운전속도가 일치되는 순간 제어불능 상태가 되었음을 알았다. 또한 특이주파수의 1/2X 성분인 56.25Hz가 순간적으로 과대하게 생성되어 있음을 알 수 있었다.

회전속도에 동기 되어 상승 또는 하강하지 않았기 때문에 회전체에서 발생한 것이 아닌 것으로 판단되며, 외력에 의한 노이즈 혹은 전기에 의한 노이즈로 예상이 된다.

하지만 결함을 확인하기 위해 재점검을 수행하였으나 플라이휠 자체의 특이 사항은 없었으며, 재조립 후 운행 시 동

일한 현상은 보이지 않았다. 추후 이에 관련된 실험을 통하여 정확한 원인을 규명할 예정이다.

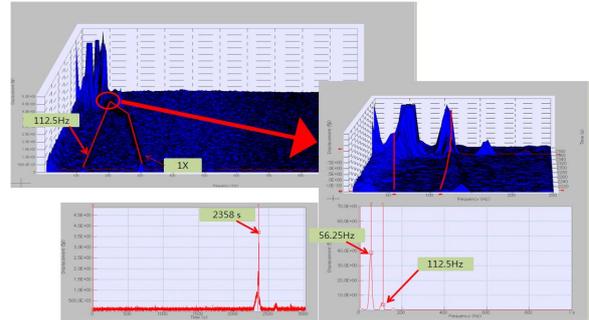


Fig. 4 Steel Rotor Upper Side Waterfall Signal

4. 결 론

1. 플라이휠 회전 중 발생한 과도한 1X 성분에 의하여 결함이 발생 되었다. 이것은 시 운전 중 Thrust Collar가 받는 원심응력이 허용응력보다 높아서 영구 변형이 발생하였고, 이로 인해 Unbalance가 커지게 됨에 따라 1X성분이 과도 하게 생성 되었다. 이것을 해결하기 위하여 Thrust Collar의 원심응력이 허용범위 안에 있을 수 있는 재질로 바꿈과 동시에 응력집중이 많은 Bolt의 개수를 늘임으로 하여 문제를 해결 하였다.

2. AMB에서 발생된 것으로 추정되는 특이주파수가 지속적으로 회전체를 가진 하고 있는 상황에서 회전체의 회전주파수와 일치함으로써 회전체의 변위가 AMB의 제어범위 이상으로 커짐으로 인하여 회전체의 제어 불능 상태가 되었을 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) 김동진 외 1997 “하이브리드 복합재 플라이휠 로터의 최적설계” 대한기계학회논문집 A권 제 22권 제 7호 pp.1287-1298
- (2) 장웅재 외 2000 “플라이휠 시스템의 에너지 저장/발생 시 동역학적 안정성 연구” 한국정밀공학회지 제 17권 제 12호 pp.151-156
- (3) Timothy P. Dever “Magnetic Bearing Controller Improvements for High Speed Flywheel System” NASA/TM.2003-212733
- (4) John M. Vance "Rotordynamics of Turbo Machinery" John Wiley & Sons 1988