

축 진동형 발전기 시뮬레이터의 진동 모드 해석

전영환*, 전진홍*, 조진호**, 김지원*, 김태현*
 *한국전기연구원 FACTS&PQ 연구 그룹, **창원대학교 제어계측공학과

The analysis for torsional vibration of M/G set simulator

Yeung-Han Chun*, Jin-Hong Jeon*, Jin-Ho Jo**, Ji-Won Kim*, Tai-Hyun Kim**
 *Korea Electrotechnology Research Institute, **Chang-Won National University.

Abstract - In this paper, we present the modeling and resonance frequency of M/G set simulator, which is designed for SSR (Subsynchronous Resonance) phenomenon. Resonance frequency analysis is performed by modeling and simulation. This simulation is preparation for experiments. So, simulation scenario is constructed in basis of detail experiments and simulation is performed by Matlab.

요사항은 다음과 같다.

- ▶ 직류 전동기
출력: 10kW, 전압: 220V, 전류: 52A, 타여자방식, 계자전압: 150V, 속도: 1800rpm, 중량: 223kg
- ▶ 동기 발전기
출력: 5kVA, 전압: 220V/380V, 극수: 4극, 타여자방식, 속도: 1800rpm

축 진동형 발전기 시뮬레이터는 발전기축과 전동기축의 비틀림각을 측정해야 하므로 각축에 엔코더를 부착하였으며 부착된 엔코더의 사양을 다음과 같다.

- ▶ 엔코더(Encoder)
4096 펄스/회전, 정격회전 1800rpm, 0.088° /펄스

축 진동형 발전기 시뮬레이터는 실험동 건물 1층에 위치하고 있으며 제어실은 2층에 위치하고 있다. 이 거리가 대략 50m 정도가 되므로 엔코더는 line-drive 방식의 출력을 발생시키며 잡음의 영향을 최소화하기 위해 twist pair의 shield 전선을 사용하였다.

실제 발전기는 여러 개의 터빈과 발전기, 여자가 동 일 회전축에 길게 연결되어 있어 여러 개의 공진 주파수를 가지게 된다. 그러나 축 진동형 발전기 시뮬레이터는 직류 전동기와 동기 발전기로만 구성되어 있다. 따라서, 여러 종류의 공진 주파수를 모의하기 위해서는 발전기나 전동기의 회전관성(inertia)을 변화시키거나 회전축을 변화하여 공진 주파수를 구형해야 한다. 본 연구에서 사용되는 시뮬레이터에서는 회전관성은 일정하게 두고 발전기와 전동기를 연결해주는 축을 변화시켜 공진 주파수를 구현하였다. 이를 위해 시뮬레이터에 사용되는 축은 스텐인레스강으로 제작되어 있으며 그 지름은 각각 16, 23, 30, 33, 39 mm로 하였다.

위에서 설명한 축 진동형 발전기 시뮬레이터는 그림 1과 같다.

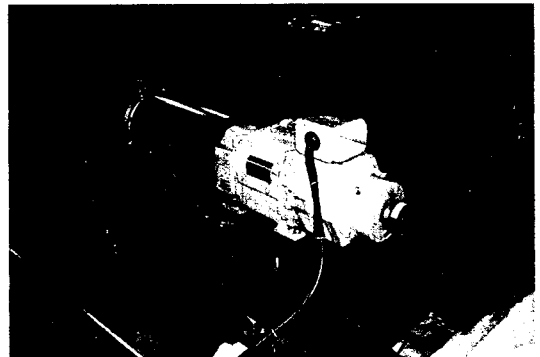


그림 1. 축진동형 발전기 시뮬레이터

1. 서 론

전력을 전송할 때 발생하는 손실을 최소화하기 위하여 여러 가지 보상기들이 고안되어 계통에 직병렬로 투입되고 있다. 이러한 보상기들이 계통에 직병렬로 투입됨에 따라 보상기가 설치되어 있는 계통과 터빈-발전기가 단일 혹은 복수개의 결합된 시스템의 고유진동 주파수(시스템의 동기주파수 이하인)로 전기에너지를 주고받는 공진현상이 발생하게 된다. 이러한 공진현상을 SSR(Subsynchronous Resonance)이라고 한다. SSR은 여러 개의 터빈과 발전기 여자가 동 일축에 길게 연결되어 있는 발전기에 전기-기계적인 공진현상을 유지하므로써 발전기 축에 과도한 스트레스를 가하게 되고 이러한 스트레스가 과도하게 되면 결국 발전기의 축이 부러지는 고장을 발생시키기도 한다. 위의 SSR 현상은 앞으로 각종 보상기가 설치될 우리나라 계통에서 충분히 고려해야 할 현상이며 이 현상을 모의 해석하기 위해 한국전기연구소에서는 축 진동형 발전기를 제작하고 이를 전력계통 시뮬레이터에 연계하는 연구를 수행하고 있다 이 연구의 결과로 본 논문에서는 제작된 축 진동형 발전기의 진동 모드 해석을 위하여 축 진동형 발전기의 모형을 수립하였으며 수립된 모형을 이용하여 Matlab을 이용한 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험은 실제 진동 모드 해석을 위한 실험의 사전 검토단계로 실행되었으며 실제 실험상황을 충분히 반영할 수 있도록 하였다. 위의 결과를 이용하여 제작된 축 진동형 발전기의 진동 모드를 결정하였다.

2. 본 론

2.1 축 진동형 발전기 시뮬레이터

본 연구에서 사용되는 축 진동형 발전기는 전동기-동기발전기, 송전선 모델 및 송전선 모의사고 발생기, 부하장치 및 각각의 제어장치와 감시운용장치로 구성된 KERI 시뮬레이터 설비 중 발전기/터빈의 축 진동 시스템을 모델링하기 위한 전동기-축-발전기 시스템이다. 축 진동형 발전기는 기계적으로 축 비틀림 진동이 제대로 구현될 수 있도록 정밀하게 제작되었으며 직류전동기, 동기발전기, 탄성축, 직류전동기 및 동기발전기 각각의 축에 부착된 엔코더, 직류전동기 제어장치, 동기발전기 계자 제어장치 등으로 구성되며, 전동기와 발전기의 주

2.2 모델링

축 진동형 발전기 시뮬레이터의 모델링은 크게 전기적 인 부분과 기계적인 부분의 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 전기적인 부분은 직류전동기 부분이 되며 기계적인 부분은 2자유도의 회전진동계 부분이 된다.

직류 전동기의 계자와 전기자의 회로도에는 그림 2와 같이 생각할 수 있다.

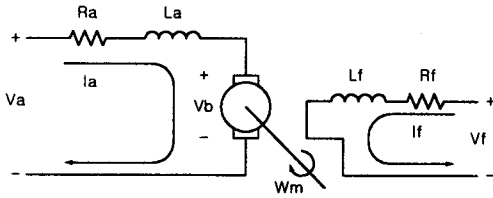


그림 2. 직류 전동기 회로도

그림 2의 회로도를 이용한 직류 전동기의 모델은 식(1) ~ 식(3)과 같다.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_b \quad (1)$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2)$$

$$V_b = k_b \phi \omega_m, \quad T_m = k_t \phi i_a \quad (3)$$

기계적인 부분의 2자유도 회전진동계는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

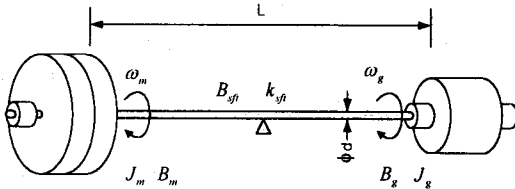


그림 3. 2자유도 회전진동계

그림 3에서 발전기와 전동기는 각각 회전관성으로 나타내고 이를 연결하는 축을 탄성축으로 생각하였다. 그림 3의 2자유도 회전진동계의 모델을 식(4)~식(6)과 같다.

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_{sft} \quad (4)$$

$$T_{sft} = J_g \frac{d\omega_g}{dt} + B_g \omega_g + T_g \quad (5)$$

$$T_{sft} = B_{sft}(\omega_m - \omega_g) + k_{sft}(\theta_m - \theta_g) \quad (6)$$

위의 2자유도 회전진동계에서 탄성축의 탄성계수는 원판의 비틀림 진동운동으로부터 유도할 수가 있다. 원판의 비틀림 진동을 간략히 나타내면 그림 4와 같다.

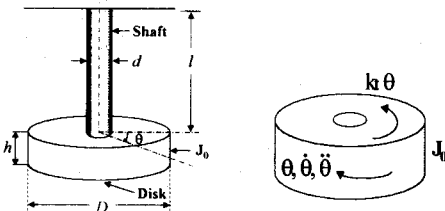


그림 4. 원판의 비틀림 진동

장체가 특정 기준 축을 중심으로 진동하는 것을 비틀림 진동(torsional vibration)이라고 한다. 이 때 물체

의 운동은 각 변위로 측정된다. 비틀림 진동 문제에서 복원 모멘트(restoring moment)는 탄성 부재의 비틀림에 의해 나타나거나, 힘 또는 우력의 불평형 모멘트에 의해 일어난다. 그림 4는 한 끝이 고정된 원형 고체축의 다른 끝에 극 질량 관성모멘트 J_0 의 원판이 달려 있는 것을 보여준다. 축 고정단에 대한 원판의 회전각을 θ 로 하면 이는 또한 축의 비틀림을 나타낸다. 원형 축에 대한 비틀림 이론으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$M_t = \frac{GJ\theta}{l} \quad (7)$$

M_t : 비틀림 θ 를 발생시키는 토크, G : 전단계수, l : 축 길이

J : 축 단면의 극 관성 모멘트 ($\frac{\pi d^4}{32}$, d : 축 지름)

원판에 평행 위치로부터 θ 만큼 변위가 발생하면 축에는 크기 M_t 의 복원토크가 만들어진다. 그러므로 이 축은 스프링상수 k_t 의 비틀림 스프링으로 작용한다. 따라서, 스프링상수 k_t 는 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$k_t = \frac{M_t}{\theta} = \frac{GJ}{l} = \frac{\pi G d^4}{32l} \quad (8)$$

앞에서 유도한 전기적인 부분과 기계적인 부분의 모델링을 종합하여 입력 토크에 대한 전동기와 발전기의 회전속도에 대한 전달함수를 구하여 보면 식(9)~식(10)과 같다.

$$\frac{\omega_m}{T_m} = \frac{J_g s^2 + (B_g + B_{sft})s + k_{sft}}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (9)$$

$$\frac{\omega_g}{T_m} = \frac{B_{sft} s + k_{sft}}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (10)$$

$$a_1 = J_g J_m, \quad a_2 = J_m (B_g + B_{sft}) + J_g (B_m + B_{sft}),$$

$$a_3 = B_m B_g + k_{sft} (J_m + J_g) + B_{sft} (B_m + B_g),$$

$$a_4 = k_{sft} (B_m + B_g)$$

2.3 축 진동 해석

축 진동형 발전기 시뮬레이터의 고유진동주파수는 입력토크에 대한 발전기와 전동기의 회전속도의 전달함수 해석으로부터 찾아낼 수 있다. 이를 위해 앞 절에서 유도한 전달함수를 이용하여 보드선도를 그려보고 그려진 보드선도로부터 시스템의 고유진동주파수를 찾아내었다. 시스템의 특성함수를 구하기 위한 각 상수는 표 1에 나타내었다.

표 1. 축진동 발전기 시뮬레이터 상수

항목	상수
회전자 인덕턴스 (R_a)	60.0 [mH]
회전자 저항 (L_a)	0.51 [Ω]
토크 상수 (k_t)	1.0241 [Nm/A]
역기전력 상수 (k_b)	1.12 [V/(rad/sec)]
전동기 회전관성 (J_m)	0.732 [kgm ²]
발전기 회전관성 (J_g)	0.1338 [kgm ²]
축 길이 (L_{sft})	0.3 [m]
축 지름 (D_{sft})	0.016, 0.023, 0.030, 0.033, 0.039 [m]
축 전단계수 (G_{sft})	74.1×10^9 [N/m ²]
회전 저항 (B_m, B_g, B_{sft})	0.0001 [N/(rad/sec)]

축 지름이 16mm 일 경우의 입력 토크에 대한 발전기 회전속도와 전동기 회전속도의 보드선도는 각각 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5와 그림 6에 나타난 바와 같이 발전기와 전동기 모두 같은 주파수에서 공진점을 가지고 있으며 그 값은 대략 118.5 rad/sec가 되며 이를 주파수로 환산하면 18.86 Hz가 된다. 이러한 결과를 각각의 축에 대하여 정리하면 표 2와 같다.

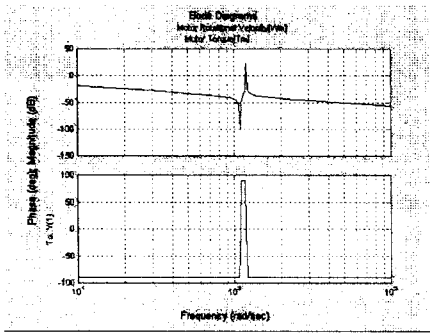


그림 5. 입력 토크에 대한 전동기 속도

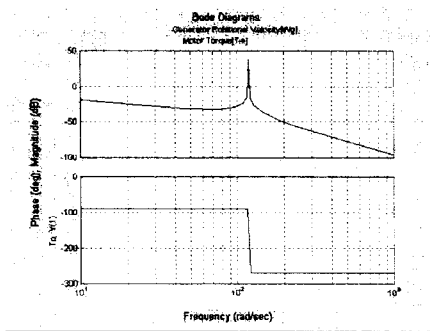


그림 6. 입력 토크에 대한 발전기 속도

표 2. 축 지름에 따른 공진주파수

축 지름	공진 주파수
16 [mm]	18.86 [Hz]
23 [mm]	38.98 [Hz]
30 [mm]	66.32 [Hz]
33 [mm]	80.25 [Hz]
39 [mm]	112.08 [Hz]

2.4 축 진동 모의

축 진동형 발전기 시뮬레이터의 실제 공진 주파수를 측정하기 위해서는 앞 절의 해석과 마찬가지로 시스템의 전달함수를 측정하여야 한다. 이는 control signal analyzer인 HP3563을 가지고 측정할 수 있으며 측정을 위한 실험방법은 그림 7과 같다. 그림 7과 같이 시스템을 구성한 후 발전기 시뮬레이터 제어기의 전류 기준치를 측정장비로부터 설정한 후 발전기와 전동기의 회전 속도를 출력해 주면 그림 5와 그림 6의 결과를 얻을 수 있고 이를 바탕으로 시스템의 공진 주파수를 설정할 수 있다. 현재 실험을 위해 제어기를 구성하고 있으며 실험 결과는 추후에 발표할 예정이다. 이러한 실험을 하기 위해 앞서 유도한 모델을 기준으로 matlab을 이용한 모의를 하였다. 실제 실험과 같은 가정으로 전류 제어기의 기준치를 60초까지 0Hz에서 30Hz까지 증가시켜 발전기와 전동기의 축 비틀림을 측정하였다. 모의 결과와 모의를 위한 프로그램은 각각 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 모의 결과로 보아 축 진동형 발전기 시스템은 앞 절의 전달함수를 통한 해석과 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 모의 실험 시에는 전류 기준치가 과도하게 설정되어 축이 부러지지 않도록 적정한 값을 설정할 수 있도록 해야 한다. 모의 결과로 보아 대략 2.0 A 정도의 설정치를 인가하며 적당한 크기의 축 비틀림을 얻을 수 있을 것으로 생각되며, 또한 축 부러짐을 방지할 수 있을 것으로 생각된다.

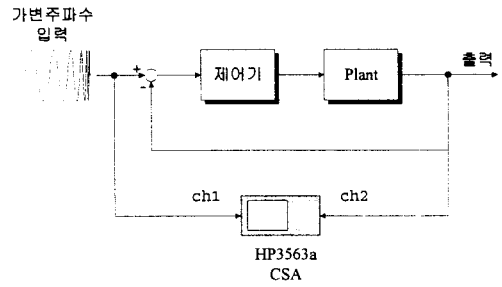


그림 7. 시스템 특성 검토를 위한 실험 방법

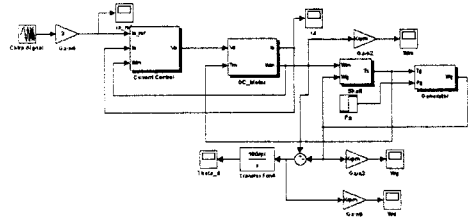


그림 8. 실험을 모의한 simulink 프로그램



그림 9. 모의 결과(비틀림각)

3. 결 론

본 논문에서는 SSR 현상 모의를 위한 축 진동형 발전기 시뮬레이터의 공진 주파수 측정에 필요한 축 진동 모드 해석에 대하여 살펴보았다. 이를 위해 현재 제작되어 있는 축 진동형 발전기 시뮬레이터의 제반 사양에 대하여 고찰하였으며 이를 통한 시스템의 모델링 결과를 제시하였다. 또한, 제시된 모델을 통해 시스템의 보드선도를 살펴보고 축 진동 모드를 해석하였으며 공진 주파수도 찾아내었다. 축 진동 모드 해석을 위한 실험 방법을 제시하였으며 실험을 위한 모의 결과를 통해 해석 결과와 모의 결과가 일치함을 보였다. 향후 연구 내용으로는 해석 결과와 모의 결과로부터 실제 실험 결과와의 비교, 검토가 필요하며 얻어진 결과를 이용하여 실제 SSR 현상을 발생시키고 이를 FACTS 기기로 제어하여 SSR을 감쇄시키는 연구가 추진될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.M. Anderson, B.L.Agrawal, J.E.Van Ness, Subsynchronous Resonance in Power Systems, IEEE Press, New York, 1990
- [2] 박노길 외 5공역, 기계 진동학, Rao 2판, 반도 출판사, 1999
- [3] 한국전기연구원, 2관성 M/G Set 사양서, 1999
- [4] 김종식, 동적 시스템 및 제어공학, 청문각, 1994