

TCSC의 Damping 제어를 이용한 SSR 제어

전진홍, 전영환, 김지원, 김태현, 김학만, 국경수  
한국전기연구소 FACTS & Power Quality 연구 그룹

SSR Control by Damping Controller of TCSC

Jinhong Jeon, Yeonghan Chun, Jiwon Kim, Taihyun Kim, Hakman Kim, Kyungsoo Kook  
FACTS & Power Quality Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper presents an auxiliary TCSC controller designed for damping SSR. Damping controller for SSR is designed in frequency domain for suppressing resonance. The SSR phenomenon and the performance of damping controller simulated by using PSCAD/EMTDC. In this simulation, the power system model for SSR is IEEE benchmark Model and TCSC is simplified to controllable impedance model.

형(서론에 언급했듯이 간략화된 제어 가능한 임피던스 모형)으로 구성되어 있다. 해석 대상 계통은 PSCAD/EMTDC로 구현하였으며 구현된 전체 계통도는 그림 1과 같다.

1. 서론

전력을 전송할 때 발생하는 손실을 최소화하기 위하여 여러 가지 보상 기구들이 고안되어 계통에 직병렬로 투입되고 있다. 이러한 보상 기구들이 계통에 직병렬로 투입됨에 따라 보상기가 설치되어 있는 계통과 터빈-발전기가 단일 혹은 복수개의 결합된 시스템의 고유진동 주파수(시스템의 동기주파수 이하인)로 전기에너지가 주고 받는 공진현상이 발생하게 된다. 이러한 공진현상을 SSR(Subsynchronous Resonance)이라고 한다. SSR은 여러 개의 터빈과 발전기 여자가 한축에 길게 연결되어 있는 발전기에 전기-기계적인 공진현상을 유기하므로써 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 축진동형 발전기를 제작하고 이를 전력계통 시뮬레이터에 연계하는 연구를 수행하고 있다. 이 연구의 결과로 본 논문에서는 EMTDC/PSCAD를 이용한 SSR 현상의 모의해석과 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)의 감쇄 진동 제어기(보조 제어기) 설계와 설계된 제어기를 이용한 SSR 제어 효과의 모의해석에 대하여 설명하고자 한다. 감쇄 진동 제어기는 공진 주파수의 크기와 위상을 고려하여 주파수 영역에서 설계되었다. SSR 현상 모의를 위한 계통 모형은 IEEE Benchmark model을 이용하였으며, TCSC는 제어 가능한 등가 임피던스 모형으로 간략화하여 모의하였다.

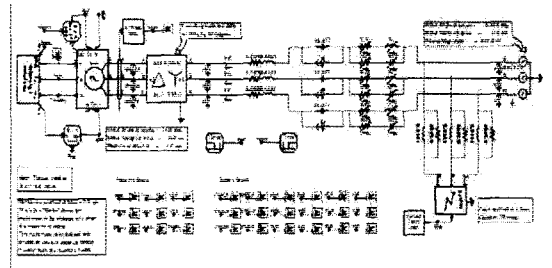


그림 1. 전체 해석 대상 계통

본 연구에서 축의 전기-기계적 진동을 구형하기 위해 사용된 다관성 증기터빈 발전기 모형은 4개의 관성으로 구성된 터빈부, 여자기, 발전기 회전자로 구성되어 있으며 이들을 연결하는 축을 스프링으로 모의한 spring-mass 시스템 모형이 사용되었다. 모의에 사용된 각종 파라미터들은 참고문헌 [1]에 자세히 기록되어 있다.

2.2 감쇄 진동 제어기

본 논문에서는 SSR을 감쇄 시키기 위해 TCSC를 이용하고 TCSC에 SSR 감쇄를 위한 보조 제어 신호를 인가하는 보조 제어기를 설계할 목적으로 하였다. 따라서, TCSC의 주 제어기 알고리즘은 모두 생략하였으며, 또한 모의 간략화를 위해 TCSC도 제어 가능한 임피던스 모형으로 간략히 모의하였다. 본 논문에서 설계된 제어기는 선로의 유효전력을 제어 입력으로 하여 선로에 흐르는 유효전력에 진동이 발생할 때 진동을 감쇄하기 위한 임피던스 지령치를 TCSC에 인가하는 보조 제어기로 설계되었다.

2. 본론

2.1 모의 해석 모형

본 논문에서 사용된 해석 대상 계통 모형은 다관성 발전기 모형을 포함하는 1기 무한대 계통으로 IEEE SSR Working Group에 의해 제안된 IEEE First Benchmark 모델을 기본으로 하였다[1]. 해석 계통은 SSR 현상을 모의하기 위한 다관성 증기터빈 발전기 모형과 변압기, 송전선로, 직렬보상 캐패시터, 사고모의를 위한 상정사고 발생장치, SSR의 제어를 위한 TCSC 모

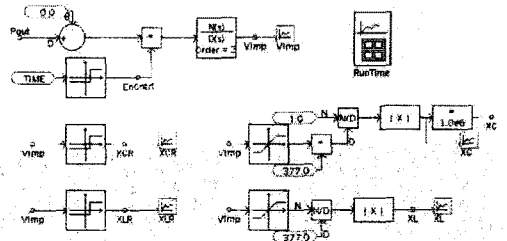


그림 2. 제어기 구성

그림 2는 본 논문에 사용된 제어기의 구성을 나타낸 그림이다. 제어기는 선로의 유효전력을 입력으로 하며 제어기에 의해 TCSC의 임피던스 지령치를 출력으로 하며 제어기 Enable 신호에 의해 제어가 시작된다. 제어기 출력으로 발생한 임피던스 지령치는 TCSC가 임피던스 모형으로 구현되어 있으므로 각각 인덕턴스 모드인지 캐패시턴스 모드인지를 판별하는 부분과 이를 인덕터와 캐패시턴스로 계통에 인가하는 부분으로 구성되어 있다.

제어기는 모의 대상 시스템의 SSR을 감쇄시킬 수 있도록 SSR의 주요 모드 부근의 제환 이득 및 위상을 조절하여 설계하였다. 설계된 제어기의 Bode 선도는 그림 3과 같다.

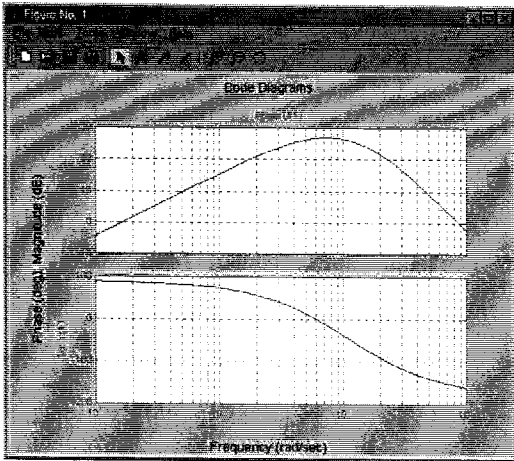


그림 3. Bode 선도

설계된 제어기는 시스템의 주요 동요 모드에서 대략 10정도의 이득과 100° 정도의 위상지연이 이루어지고 있음을 그림 3의 보드 선도를 보아 알 수 있으며, 설계된 제어기의 다음과 같은 극점과 영점을 가지는 3차 시스템이다.

극점 : 0.6366, 1.2732, 1.5915  
 영점 : 0.0

설계된 보조 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{60s}{0.7752s^3 + 2.7141s^2 + 2.9845s + 1.0}$$

### 2.3 모의 해석

본 논문에서 모의 해석은 PSCAD/EMTDC V3.0을 이용하였다. 모의 해석과 관련된 전력 계통의 각 파라미터들은 IEEE Benchmark model에서 제시된 파라미터를 이용하였다. 모의 해석에서 각 시스템 모델의 초기값 설정을 위해 발전기와 무한 모선의 전압은 1.0 p.u.에서 1.0 p.u.까지 0.2초 동안 증가하며 위상각은 각각 -14.9°와 -3.813°로 설정하였다. 단관성 터빈 발전기의 모의를 위한 spring-mass 시스템의 초기값 설정을 위해 0.9초까지 발전기는 전압원 모형으로 동작하고 0.9초부터 단관성 터빈 모형이 동작하게 된다. 또한 동기 발전기는 단관성 터빈 모형의 초기화가 이루어지고 안정화된 1.0초부터 동작하게 된다. 따라서 본 모의에서 1.0초까지는 단관성 터빈 발전기 및 전체 시스템의 초기화를 위해 동작되는 구간이다. 전체 시스템의 초기

화가 이루어진 후 1.5초에 3상 지락사고를 발생시켰으며 발생한 지락사고는 75msec후에 제거되도록 하였다. 그림 4는 TCSC가 투입되지 않은 상태에서의 Base Case에 해당하는 모의 파형이다.

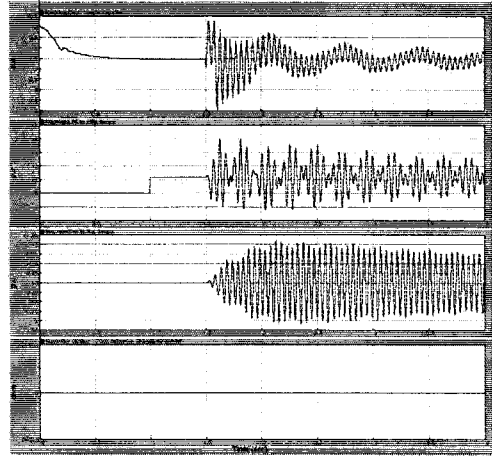


그림 4. 모의 해석 결과(제어 없을 경우)

그림 4의 모의해석 결과는 위에서부터 발전기 출력 유효전력, LPA-LPB의 축 토크, 발전기-여자기 축 토크, TCSC 임피던스 지령치를 나타낸다.

그림 4의 모의해석 결과로부터 제어가 이루어지지 않을 경우에 계통에 사고가 발생하면 발전기의 출력에 SSR 현상이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 터빈의 각부와 발전기와 여자기 사이에서도 전달 토크에 공진이 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, 이 때 발생한 공진의 주요 모드는 각각 15.71 Hz, 20.21 Hz, 25.55 Hz, 32.28 Hz가 중첩되어 나타나고 있음을 알 수 있다.(이는 참고문헌 [1]의 결과와 동일하다.)

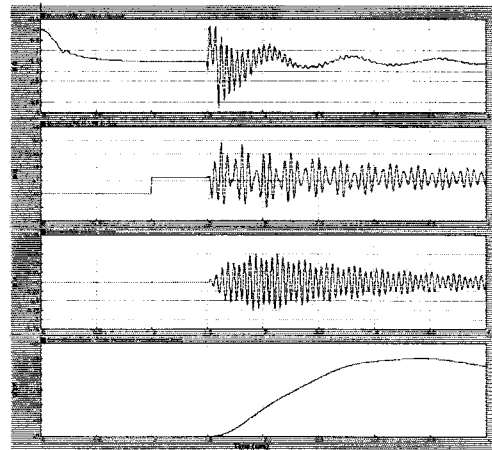


그림 5. 모의 해석 결과(제어기 동작)

그림 5는 제어기를 1.0초에서 동작시켰을 경우의 모의 해석 결과이다. 그림 4와 마찬가지로 위에서부터 발전기 출력 유효전력, LPA-LPB의 축 토크, 발전기-여자기 축 토크, TCSC 임피던스 지령치를 나타낸다.

그림 4의 각 결과와 그림 5의 각 결과를 비교하여 보면

제어기가 동작하지 않을 경우의 발전기 출력 유효전력, 터빈간의 축 토크, 발전기-여자기 축 토크에서 발생한 SSR의 각 공진 모드가 감쇄되고 있음을 알 수 있다. 그림 5의 결과로 보아 TCSC에 의한 감쇄 진동 제어기에 의해 계통의 SSR 현상이 제어됨을 알 수 있다. 그림 5의 제어 결과에서 나타난 것처럼 TCSC의 보조 제어 장치로 설계된 감쇄 진동 제어기는 시스템의 정상 상태에서는 제어 출력이 0으로 동작하고 있지 않음을 알 수 있으며 또한 모의 해석 시간을 좀 더 길게 지속시켜 확인해 본 결과 역시 SSR 현상이 모두 제거되고 난 이후에도 제어 출력은 0으로 됨을 확인하였다. 이 때, 제어기의 출력은 최대  $20\Omega$  정도가 되었으며 이는 대략 60mH 정도의 인덕턴스가 TCSC에 의해 계통에 인가된 것에 해당한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 TCSC의 보조 제어기로서 감쇄 진동 제어기를 설계하고 그 결과를 SSR 현상에 적용하여 성능을 검증하였다. SSR 현상을 모의하기 위하여 IEEE Benchmark model을 이용하였으며, 모의 해석은 EMTDC를 이용하였다. 제어기는 감쇄를 원하는 모드의 주파수 대역에서 적절한 이득과 위상지연을 인가하는 방법을 이용하였으며 그 결과를 모의해석에 적용하여 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 때까지 반복하여 원하는 제어기를 설계하였다. 제어기의 위상지연 정도를 얼마로 하느냐에 따라 제어기의 제어 출력형태와 제어효과가 변하였다. 위상 지연량이 작은 경우 제어기의 제어 출력은 SSR의 주요모드와 같은 주파수로 응답하였으나 감쇄효과가 크지 않았고, 위상 지연량이 많은 경우 제어기의 제어 출력은 SSR의 주요 모드보다 작은 주파수로 느리게 응답하였으나 감쇄효과는 우수하였다. 이는 계통의 선로 임피던스의 변화에 의해 전체 시스템의 감쇄 효과가 증가하여 SSR 현상이 빠르게 감쇄된 것으로 생각되어진다. 추후 연구에서는 본 논문의 연구 결과를 바탕으로 한 시뮬레이터 적용 연구와 본 논문에서 제시한 제어 효과에 대한 이론적인 해석이 이루어질 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- (1) IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group Power System Engineering Committee, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96 No. 5, pp 1565-1572, September/October 1977
- (2) P.M. Anderson, B.L.Agrawal, J.E.Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, IEEE Press, New York, 1990
- (3) N.G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS*, IEEE Press, New York, 2000