

SSR을 제어하기 위한 직렬 보상 캐패시터에 관한 연구

김성남*, 이승환**, 이훈구**, 김용주***, 한경희°, 정연택°
 대호건설*, 충남전문대학**, 동양공업전문대학***, 명지대학교°

A study on series compensation capacitors to control subsynchronous resonance

Sung-Nam Kim*, Seung-Hwan Lee**, Hoon-Goo Lee**, Yong-Joo Kim***,
 Kyung-Hee Han°, Yon-Tack Chung°

Dae Ho Construction Co.*, Chung Nam Junior Col.**,
 Dong Yang Technical Junior Col.***, Myong Ji Uni.°

Abstract

This paper was to determine the feasibility of controlling subsynchronous resonance(SSR) by the fast modulation of series compensation capacitors. The presence of subsynchronous currents in the system was detected by a subsynchronous relay which was modeled by the transient analysis of control systems (TACS) in the electromagnetic transients program (EMTP). The capacitor segments were switched by bi-directional thyristor switches.

The paper proved that effective control of SSR can be obtained only by the detuning of the system and the removal or blocking of subsynchronous energy from the system.

1. 서론

무효전력을 보상하기 위한 송전계통에 단락 또는 지락에 의한 돌발사고 등이 나타나게 되면, 기계적 공진에 의한 SSR이 발생하게 되며 이러한 SSR은 발전기 터빈의 날개라든가 축을 파괴시켜 엄청난 큰 손실을 가져오게 한다[1].

그래서, IEEE Working Group은 First Benchmark 모델인 기본형은 1977년에, 더욱 보편적인 Second Benchmark 모델은 1984년에 발표하여 SSR에 관한 여러 가지의 다양한 연구기법과 대책을 연구하도록 하였다.[2,3].

그후 N.G. Hingorani는 차동기에너지를 제거하기 위해 N.G.H방법을 발표하는 등, 직렬보상캐패시터를 갖는 송전계통에서의 SSR을 제거하고자 하는 많은 연구논문들이 발표되었다[4]. 그러나 이러한 모든 방법들은 각 계통 라인마다 그 방법들을 설치해야 하는 번거로움과 그에 따른 비용 또한 상당한 비용을 차지하고 있다.

본 연구의 목적은 SSR을 제어하기 위한 방법의 개발과 동시에 양호한 직렬보상을 유지하는데 있다. 여기에 사용한 시스템은 기본형인 First Benchmark 모델을 선택하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였으며, 스위칭 동작을 비롯하여, 차동기에너지를 검출하는 검출기와 릴레이등을 E.M.T.P의 T.A.C.S에 의해 설계하였다.

시뮬레이션은 축의 토오크와 계통의 선전류 및 캐패시터 뱅크의 소자전압들을 계산하였고, 발전기 축의 토오크가 발전하는 것을 플로트하여 제어하기 전과 제어하고 난 후를 비교하여 송전

계통이 안전하게 동작되는 것을 확인하므로 서 본 연구의 우수성을 입증하였다.

2. 시스템

2.1 First Benchmark 모델

First Benchmark 모델은 발전기와 무한모선으로 된 수전단의 또다른 정현전압원 사이에 한 개의 송전선로로 구성되어 있으며, 기계 및 회로정수는 Navajo Project으로부터 제공된 실제의 값이다.

그림1은 First Benchmark 모델의 등가회로이다.

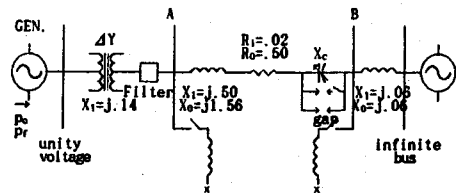


그림1. First Benchmark 모델

터빈 발전기의 회전자는 6개의 시스템으로 HP, IP, LPA, LPB, GEN, EXC로 구성되어 있으며, 정상상태의 기계적 토오크는 HP, IP, LPA, LPB에 각각 30%, 26%, 22%, 22%씩 분담되어 있다. 여기정상상태 토오크는 0으로 가정한다.

송전선로에는 정상분과 영상분의 임피던스를 사용하여 모델화하였고, 계통의 무효전력은 29.9μF의 직렬 캐패시터에 의하여 보상된다. 이 캐패시터들은 10개의 소자로 구성되어 있으며 E.M.T.P 다이리스터 모델에 의해 스위치 된다. 다이리스터들은 역병렬로 접속되어 있으며, 스위칭에 따른 열에 의한 보호는 0.05Q의 저항에 의해 보호되도록 하였으며 턴-온할 때의 다이리스터의 발생 열은 캐패시터로 방전된다.

전원 임피던스는 49.18mH이고, 이 계통에 제어 전략상 실험을 위한 SSR을 발생시키기 위하여 인위적으로 전원 임피던스에 지락접지사고를 유발시켰으며, 이 고장장애는 계통이 다시 정상상태로 운전이 되도록 하기 위하여 3사이클후에 제거시킨다. 부하는 컴퓨터 시뮬레이션상에서 발전기와 무한송전선로사이의 위상변이에 의해 투입되는 방법을 적용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 전원은 E.M.T.P의 50형의 전원을 사용하였다. 연구를 위한 발전기 모델은 882[MVA], 60[Hz]이다.

2.2 기본원리

SSR의 발생에 관하여 이미 알고 있는 보상선의 각각의 레벨 아래, 계통의 운전이 필요하다. 고유값해석은 이것을 결정하는데 사용되었다. 이 해석은 백분을 직렬보상의 기능으로서 계통에 비감쇠 진동의 플로트를 제공하였으며, 비감쇠되던 될수록 계통은 불안정하게 된다.

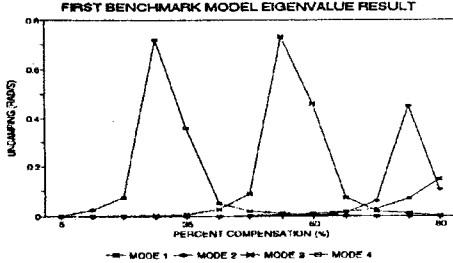


그림 2. First Benchmark 모델의 고유값

그림 2는 First Benchmark 모델에서 고유값해석의 결과를 나타낸 것이며, 이 결과는 APS회사로부터 제공받은 것이다.

그림 2는 각모드마다 보상해야 할 임계값에 해당하는 SSR발전의 현저한 모드를 보여주고 있다. 제어 전략상의 실험을 위해 보상의 임계값 중의 하나인 모드4($X_c/X_l=28.7\%$)를 선택하였다.

그림3은 First Benchmark 모델을 EMTP에 의해 컴퓨터 시뮬레이션을 한 것으로 다이리스터를 제어하지 않았을 경우를 해석한 결과이며, 무부하시의 동작을 시뮬레이션했다.

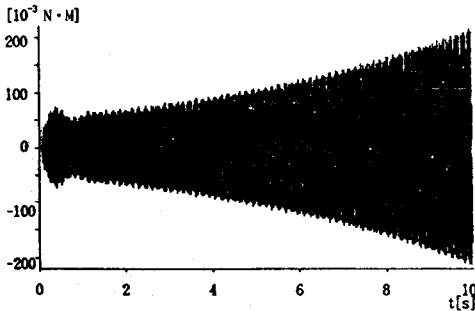


그림 3. First Benchmark 모델의 축의 토크(제어하기 전)

이 그림은 계통을 제어하지 않았을 때, 토크가 계속해서 발전하는 것을 나타내고 있다. 이러한 토크의 발전은 축에 엄청난 손상을 주는 결과를 초래할 것이다.

3. 제어방법

3.1 일반적인 방법

이 논문의 목적은 직렬 보상 캐패시터의 신속한 조정에 의해 차동기발진을 제어하기 위한 방법을 개발하는 것이다.

전력계통에 있어서 차동기에너지를 제어하기 위해 사용된 접근 방법은 이 계통조정에 의해 전기와 기계적 계통사이의 결합의 감소와 이 계통으로부터 차동기에너지의 제거이다. 직렬보상 캐패시터는 계통의 무효전력을 보상하기 위해 사용되지만, Detuning(이조)는 계통의 비감쇠 양을 감소한다. 예를 들면, First Benchmark 모델인 경우, 계통이 보상된 28.7%에서 동작될 때 가장 심한 SSR이 발생하게 된다. 이것은 그림 2의 고유값

의 임계값으로부터 확인될 수 있다.

다이리스터의 점호에 의해 캐패시터는 방전되고 계통으로부터 차동기에너지가 제거된다. 차동기에너지의 제거는 시스템에 있어서 SSR을 제거하는 것으로 기대된다. 그러므로 직렬보상캐패시터가 28.7%되는 점에서 차동기에너지를 제어할 수 있다면, 이 방법은 보다 더 좋고 빠른 제어를 위해 사용될 수 있을 것이다.

3.2 변환된 리액턴스 제어 방법

3.2.1 캐패시터의 연속적인 스위칭

직렬보상캐패시터는 10개의 세그먼트로 나뉘어져 있고 각 세그먼트는 2개의 양방향의 다이리스터 스위치에 의해 제어된다. 이것을 보다 섬세한 보상의 이조를 하기 위해 사용되었지만, 송전계통의 효율적인 운전은 고정된 수준의 보상이 요구된다. 예를 들면, First Benchmark 모델에서 원하는 보상수준은 28.7%일 때이다. SSR이 계통에서 발생될 때, 시스템은 계통의 보상을 바꾸면서 이조를 한다. 이러한 이조는 시스템을 비감쇠 레벨로 끌어내리고, 계통에서의 발전을 제거시킬 것이다.

이 시스템은 먼저 단락전지 사고에 의해 교란시킨후, SSR의 발생은 차동기계전기에 의해 송전전류를 모니터링하여 확인되며, 이 계전기는 필터세트로 구성하였고, 필터는 가속형이며, 시스템의 절점주파수와 조화를 시킨다. 이들 필터는 60HZ의 주파수를 제거시키고, 차동기전류의 실효값만을 계산해 낸다. 이 계전기도 EMTP로 모델화하였다. 계전기의 출력은 양방향 스위치의 스위칭으로 제어되도록 하였다. 차동기전류가 이미 선택된 최소값보다 클 때는, 다이리스터 스위치는 캐패시터의 세그먼트를 단락시키기 위해 동작한다. 만일 차동기전류의 크기가 감소하였다면, 캐패시터들은 회로로 재부입 될 것이고, 복귀된 기본 보상수준으로 원위치 될 것이다. 이와 같은 캐패시터 세그먼트의 제어가 계통을 이조하게 하는 것이다.

3.2.2 개선된 NGH 설계방법

NGH-SSR 제어설계의 근본원리는 그림 4에서 보는 바와 같이 전원의 기본주파수인 60[Hz]의 파형[Vc]에 DC전압 또는 차동기주파수[Vss]가 결합하게 되면, 전압 파형[Vct]의 반주기는 정상적인 60[Hz]의 반주기인 $1000/120=8.33[ms]$ 보다 크거나 혹은 작게 되는 경우가 발생하게 된다. 이때, 결합된 전압 파형인 Vct로부터 DC 또는 차동기주파수를 제거시킨다면, 그때의 반주기는 전원주파수와 같은 8.33[ms]로 되어 계통은 정상적으로 운전이 될 것이다.

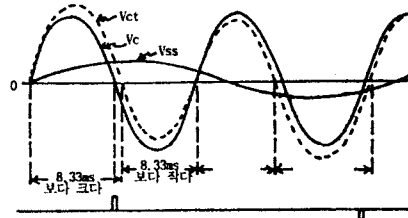


그림 4. 차동기주파수와 결합된 기본주파수(60[Hz])

그림 4는 차동기주파수(Vss)와 전원의 기본주파수(Vc)를 결합한 파형(Vct)을 나타낸 것이다. 이 NGH-SSR 제어설계는, 원하

는 주기가 8.33[ms]를 초과하는 반주기로 되었다면, 단지 캐패시터 전하를 소비시키는 방법만으로 되어있다.

그러나 본 논문에서는, NGH방법과는 달리, 캐패시터 단락 스위치의 점호각을 연속적으로 변경시켜 캐패시터 세그먼트가 단락 되는 AC주기 부분을 계통의 차동기전류로 만들었다.

차동기전류는 계통의 차동기전류의 크기를 측정하여 비례 점호각으로 바꾸었다.

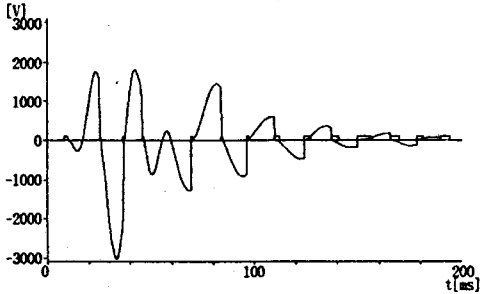


그림 5. 캐패시터 전압과 점호각

그림 5는 스위치 되고 있는 캐패시터 세그먼트의 양단전압을 보이고 있다. 여기서, 캐패시터 양단의 전압의 크기에 따라 점호각이 변화되는 것과 시간이 지나감에 따라 전압의 크기도 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있으며, 이에 차동기에너지가 제거됨을 확인할 수 있다.

그림 5에서 보여주고 있는 점호각은 다음과 같은 선형 관계식으로 표현된다.

$$\alpha(I_{ss}) = 180 - [k * I_{ss}] \quad (1)$$

k는 비례상수로서 0.25, I_{ss} 는 계통의 차동기전류(실효치)이다.

그림 5에서와 같은 점호각은 160~180도 사이에서 이루어지고 있는데, 이는 필터에 의해 검출되는 차동기전류에 의해 식 (1)과 같이 표현되는 것이다.

그림 6은 계통에 관련된 차동기전류의 변화에 따라 점호각도 따라서 변화하는 것을 나타내었다. 차동기전류의 측정은 차동기 필터와 차동기주파수 성분의 실효치 계산에 의해 구해진다.

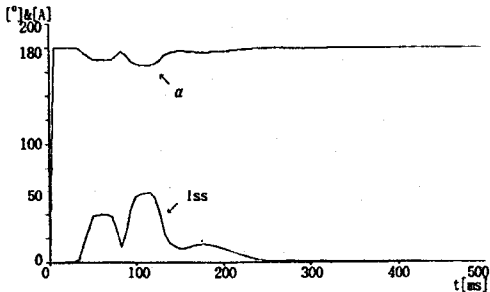


그림 6. 점호각과 차동기전류

그림 5와 6에서 알 수 있는 바와 같이 1사이클 (0.017초)에서 접지사고를 인가하고 3사이클 (0.05초)에서 이 고장상태를 제거 하면, 0.017초부터 차동기의 실효값전류(I_{ss})가 검출된다.

검출된 I_{ss} 의 값이 증가하게 되면, 점호각은 160°에 가까워지고, I_{ss} 의 값이 감소하게 되면, 점호각은 180°에 가까워져서 결국에는 차동기에너지가 제거되어 I_{ss} 가 나타나지 않게 된다. 점호각이 180°로 된다는 것은 I_{ss} 가 제거되었다는 것을 의미하

며 기본주파수 60[Hz]만으로 동작하기 때문에 점호각이 180°로 되는 것이다. 점호각에 따라 그림 5와 같이 캐패시터가 단락 되어 차동기에너지가 제거되는 것입니다.

계통에 차동기전류가 나타나지 않거나 그 크기가 작을 때, 직렬보상캐패시터는 계통에 또 다시 재투입되어 무효전력을 보상하기 위해 정상적인 운전을 하게 될 것이다.

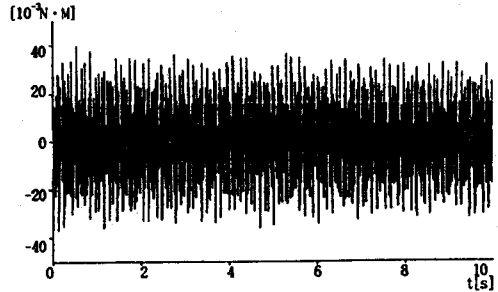


그림 7. First Benchmark 모델의 축의 토크(제한한 후)

그림 7은 First Benchmark 모델의 결과이다. 이것은 축의 토크 발진이 줄어들는 것을 확인하기 위하여 본래의 그림을 5배 확대한 것이다.

4. 결론

본 논문은 송전계통에서 발생하는 SSR을 신속히 제어하는 것으로, 계통으로부터 차동기전류를 EMTP의 TACS 프로그램에 의해 실제한 차동기전류로 검출하였으며, 이를 EMTP에 의해 모델 화하여 캐패시터 세그먼트를 2중 직렬형 다이리스터 스위치에 의해 제어하였고, 캐패시터를 스위칭하는 방법은 궤환 루프 시스템으로 모델 화하였다.

이 연구는 SSR의 효과적인 제어에 의해 계통의 차동기 에너지를 제거 또는 억제시키고 계통을 離調함으로써 그 우수성을 입증하였다.

Reference

- [1] G. G. Karady, Hoon-Goo Lee, Scott Helbing and Pramod parihar "Advanced Concept Studies Related Flexible AC Transmission System" EPRU Project, RFP4000-6, 1992.
- [2] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group "First Benchmark Model for computer simulation of Subsynchronous resonance" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No.5, pp. 1565-1572, Sep/Oct, 1977.
- [3] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group "Second Benchmark Model for computer simulation of Subsynchronous resonance" IEEE/PES 1984 Summer Meeting, Seattle, Washington, pp. 1-8, July 15-20, 1984.
- [4] N. G. Hingorani "A new Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque - part I" IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1852-1855, April, 1981.