

SMES를 포함하는 전력계통의 비선형현상 해석에 관한 연구

論 文
48A-4-5

A Study of Nonlinear Behaviors in Power Systems with SMES

安炳學* · 李炳峻**

(Byonghak Ahn · Byongjun Lee)

Abstract - In general, solving or analyzing nonlinear dynamical equations is very difficult and requires special techniques. To avoid these difficulties, systems are generally linearized in an attempt to predict their behavior. These linearized equations, however, may not predict true system behavior. Therefore, the nonlinear dynamical analysis using bifurcation theory may become a fundamental framework in understanding nonlinear situation in power systems. In this paper, we propose a systematic procedure based on a bifurcation theory to analyze nonlinear behaviors in power systems. We show usefulness of our procedure by applying 3-bus model system. In addition, we consider nonlinear model of SMES and verify the effect of SMES in power system's nonlinear behaviors..

Key Words : nonlinear dynamical analysis, bifurcation theory, SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)

1. 서 론

전력계통은 일반적으로 계통 파라미터를 포함하는 고차 비선형 동적방정식으로 표현된다. 하지만, 이러한 비선형 동적방정식을 직접 해석하기에는 어려움이 많기 때문에, 비선형 방정식을 선형화하여 해석하는 선형해석법이 주로 사용되어지고 있다. 그러나, 최근 들어 전력소비의 급증으로 전력계통이 한계점에서 운용되는 경우가 잦아지면서 선형해석법으로는 설명할 수 없는 주기적 진동, chaos 진동 또는 붕괴와 같은 비선형 현상들이 일어나고 있으며, 이러한 비선형 현상들을 이해하기 위해 비선형 동적 해석법을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 하나가 분기이론[1,2,3,4]을 적용하여 비선형 현상들을 해석하는 연구이다.

분기이론은 시스템 파라미터의 변화에 따라 분기점에서 시스템의 상태가 변하는 것을 설명하는 이론으로서 분기는 크게 두 가지로 나뉘게 된다. 그 중 하나는 평형해의 개수가 바뀌게 되는 정적분기이며, 다른 하나는 주기해의 개수가 바뀌는 동적분기이다. 전력계통에서는 이러한 분기점들의 위치를 통하여 안정한 운전점의 영역을 구분해 낼 수 있기 때문에 분기 이론이 전력계통의 비선형 현상을 해석하는 데 유용하게 사용되어지고 있다.

Lee와 Ajarapu[5,6]는 분기이론을 2개의 발전기와 1개의 부하를 가진 3모선 모델계통에 적용함으로써 비선형 현상이

전력계통에서 발생하는 과정을 밝혀냈으며, 복주기 분기의 연속으로 인한 chaos의 발생과정을 연구하였다. 또한 喜多敏博 등[7]은 자동전압조정기(AVR)가 투입된 발전기의 비선형 현상을 3개의 파라미터를 선택한 다음 2-파라미터 분기도를 이용하여 해석하였으며, Mitani와 Tsuji[8]는 일기-무한대 모선 계통에서의 SSR(Sub-Synchronous Resonance)의 비선형 현상을 분기이론을 적용하여 해석하였다. Ji와 Venkatasubramanian[9,10]은 소형 모델계통에서 분기이론과 normal form 이론을 적용하여 전압-위상각의 동적인 특성을 연구하면서 계통의 준주기 동작을 관찰하였으며, 발전기 여자가가 상하한값을 가질 때의 비선형 현상에 대한 영향을 연구하였다. Makarov와 Dong, Hill[11]은 미소신호 안정도 해석에 분기이론을 도입하였으며 Canizares와 Rosehart는 유도 전동기를 가진 부하를 모델링한 계통에서의 분기현상을 연구하였다[12]. 이와 같은 여러 연구는 분기이론이 전력계통의 비선형 현상 해석에 적합하다는 것을 확인시켜 주었으나, 대부분의 연구가 분기이론에 바탕을 두고 특정한 모델을 통해서 비선형 현상을 관찰하는 수준에 머물렀을 뿐, 체계적인 해석과정을 확립하지는 못했었다.

본 연구에서는 전력계통에 분기이론을 적용하여 비선형 현상을 체계적으로 해석하는 데 있어서 도구가 될 수 있는 비선형 동적해석 통합 알고리즘을 개발하고 이를 모델계통에 적용해 봄으로써 그 효용성을 보이고자 한다. 또한 전력계통의 안정도나 송전능력 증대를 위해 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)의 비선형 모델링을 이용해서 SMES가 전력계통의 비선형 현상에 미치는 영향을 알아본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서는 비선형 현상 해석의 도구가 되는 비선형 동적해석 알고리즘에 대해

* 準 會 員 : 三星電氣 綜合研究所 研究員

** 正 會 員 : 高麗大 電氣·電子·電波工學部 助教授·工博
接受日字 : 1998年 12月 17日
最終完了 : 1999年 3月 5日

여 소개하도록 한다. 3절에서는 2절에서 소개된 알고리즘을 이용, 3모션 모델계통의 비선형 현상을 체계적으로 확인한다. 4절에서는 3모션 모델계통에 SMES를 설치했을 때 비선형 현상에 미치는 영향을 3절에서의 결과와 비교하도록 한다.

2. 비선형 동적해석 알고리즘

본 연구에서 개발하고자 하는 비선형 동적 해석절차는 5단계의 과정으로 이루어져 있다. 해석절차에서는 정적분기점과 Hopf 분기점을 찾아내고, Hopf 분기점으로부터 동적분기점을 찾아낸 후에, 2-파라미터 영역에서 계통의 비선형 현상을 예측한 다음, 이를 확인하는 과정까지를 포함한다. 이 중에 분기점을 추적하는 과정에서는 캐나다 콩코디아 대학의 Doedel 교수에 의해 개발된 고차원의 동적 비선형 모델의 분기현상 해석용 프로그램 AUTO94를 이용하였다. AUTO94는 ODE(Ordinary Differential Equations)로 표현되는 비선형 식이 주어질 때 평형해와 주기해를 추적하면서 평형해일 때는 고유치를 계산하고, 주기해인 경우는 floquet multiplier를 계산하여 분기점들을 찾아낸다. 특히 특정 분기점을 2-파라미터 영역에서 연속적으로 추적할 수도 있다.

이제 비선형 동적해석 알고리즘의 각 단계에 대해 설명하겠다.

2.1 정적 분기점의 탐색

전력계통을 간략히 식 (2.1)과 같이 표현하여 보자.

$$\dot{x} = F(x, p) \tag{2.1}$$

식 (2.1)과 같이 표현되는 계통방정식에서 정적분기점과 Hopf 분기점을 찾는다. 식에서 x 는 계통 상태변수를, p 는 파라미터를 나타낸다. 정적분기점과 Hopf 분기점을 찾기 위해 식 (2.1)로 표현되는 시스템의 평형해의 경로를 추적하게 되며, 동시에 평형해의 안정도를 판별한다.

2.2 동적 분기점의 탐색

Hopf 분기점으로부터 분기되는 주기해 경로를 탐색하면서 동적분기점(복주기 분기점, Cyclic fold 분기점)들을 찾는다. Step 1과 마찬가지로 주기해의 안정도를 판별하게 되는데, Floquet 승수를 계산하여 안정도를 판별한다. 동적분기점은 Floquet 승수의 변화를 추적하여 찾아낸다.

2.3 다중 파라미터 영역에서의 분기점의 탐색

계통 파라미터를 하나에 국한시키지 않고 두 개 이상의 파라미터에 대해 분기점(Saddle node 분기점, Hopf 분기점, 복주기 분기점)들을 연속적으로 찾아내어 파라미터 영역에서 다중 파라미터 분기도를 그림으로써 다중 파라미터 영역에서의 계통동작특성을 도시화한다. 이 때, 계통동작특성은 크게 안정 영역(equilibrium), 주기적 진동 영역(periodic), chaos 진동 영역(chaotic), 붕괴 영역(collapse)으로 나눌 수 있다.

예를 들어 시스템의 Hopf 분기점, 복주기 분기점(PD), saddle node 분기점(SN)을 2-파라미터에 대해 추적한 결과

가 그림 2.1과 같다고 하자. Hopf 분기점은 모두 Supercritical 이라는 가정하에, cyclic fold 분기점은 나타나지 않는 것으로 한다. 그림에서 Hopf 분기점이 일어나기 전까지는 안정 영역이 될 것이며, Hopf 분기점에서 복주기 분기점(PD)까지는 주기적 진동 영역이 된다. 복주기 분기점이 일어난 후에는 붕괴 영역이 되며, saddle node 분기점(SN) 이후도 역시 붕괴 영역이 된다. Chaos 진동 영역은 복주기 분기점 주위의 영역이 되는데 그 이유는 최초로 복주기 분기점이 나타난 후에는 그 주위에서 연속적으로 복주기 분기점이 일어나면서 주기-2, 4, 8을 거쳐서 결국 chaos 진동으로 가기 때문이다. 이러한 모든 가정들은 모두 분기이론에 바탕을 둔 것이다.

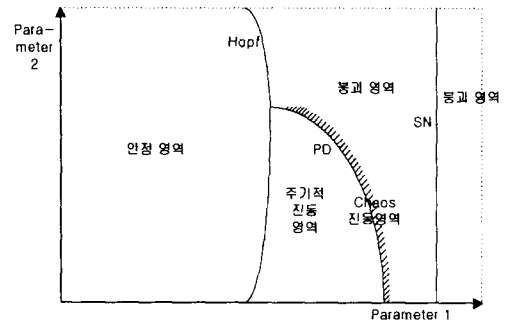


그림 2.1 2-파라미터 분기도의 예

Fig. 2.1 A example of 2-parameter bifurcation diagram

2.4 시간영역 시뮬레이션

특정 운전점에서 시간영역 시뮬레이션을 행함으로써 실제 계통동작(주기적 진동, chaos 진동, 붕괴 등)을 확인한다. 시뮬레이션을 위하여 LSODE라는 fortran용 ODE 시간영역 시뮬레이션 tool을 이용하였다.

LSODE(Livermore Solver for Ordinary Differential Equations)는 net-library에서 제공하는 프로그램으로서 $dt/dy = f$ 의 형태로 이루어진 식을 stiff 법이나 nonstiff 법으로 푼다. Stiff 법의 경우 Adams 법(예측-수정)을 이용했고, nonstiff 법의 경우에는 Backward Differentiation Formula(BDF) 법을 이용했다.

2.4 각종 지수들(Lyapunov exponent, Power spectrum, CRP)의 계산

Chaos 진동이나 주기적 진동과 같은 비선형 현상들이 나타났을 때 이들을 논리적으로 확인시켜 주는 지수들이 필요하게 된다. 특히 Chaos 와 무작위적인 자료를 놓고 비교해 볼 때 시간영역 시뮬레이션의 형태만으로는 구분하기가 매우 어려운 경우가 많다. 이를 명확하게 구분하기 위해서는 지수들의 계산이 필수적이다. 본 논문의 비선형 동적해석 알고리즘에서는 Lyapunov exponent와 Power spectrum, Closed Returns Plot(CRP)을 계산한다. 특히 CRP는 전력계통에서의 비선형 해석에 있어서 새로 도입되는 지수로서 chaos 진동과 무작위적인 자료를 구분하는데 있어서 Lyapunov exponent나 Power spectrum에 비해 훨씬 효과적

이다.

Lyapunov exponent와 Power spectrum에 대해서는 참고 문헌 [5],[6]에서 자세히 설명이 되어 있으며, 본 논문에서는 전력계통에서 비선형 지수로서 새로 도입하는 CRP에 대해서만 설명하겠다.

- CRP(Closed Returns Plot) -

Chaos 진동 궤적은 불안정한 주기해 궤도로 가득 차 있는 형태를 가지고 있다. 이 때, chaos 진동 경로가 그 궤적 중 하나에 아주 가깝다면, 잠깐 동안 가까이에 머무르게 된다. 이 성질이 chaos 진동에서 짧은 간격의 주기성을 나타내게 되므로, 무작위적인 진동과 chaos 진동을 구별 할 수 있는 성질이 된다.

Chaos 진동에서 어느 시간에서의 값 x_i 와 주기 T 시간 후의 값 x_{i+T} 의 차이는

$$\delta = |x_i - x_{i+T}| \quad (2.2)$$

로 구할 수 있으며 이 차이는 연속적인 i 값에 대해 매우 작을 수 있다. 이 결과들을 i 와 T 에 대해서 그리면 주기성의 간격이 평행한 선으로 표현된다. 즉 주기적 진동의 경우에는 CRP에서 수평한 선들이 나타나게 되고, chaos 진동의 경우에는 짧은 평행한 선들이 무수히 나타나게 되는 것이다[13].

시간영역 시뮬레이션 결과만을 놓고 보았을 때는 별다른 차이를 발견할 수 없지만 CRP를 이용하면 정확하게 chaos와 무작위적인 자료를 구분할 수 있다. 특히 CRP는 전력계통의 chaos 해석에 있어서 새로이 도입한 지수로서 chaos와 무작위적인 현상을 구분하는데 있어서 아주 유용한 지수이다. 자세한 응용은 다음 절에서 보이겠다.

이상 설명한 알고리즘에 대한 흐름도가 그림 2.2에 나와 있다.

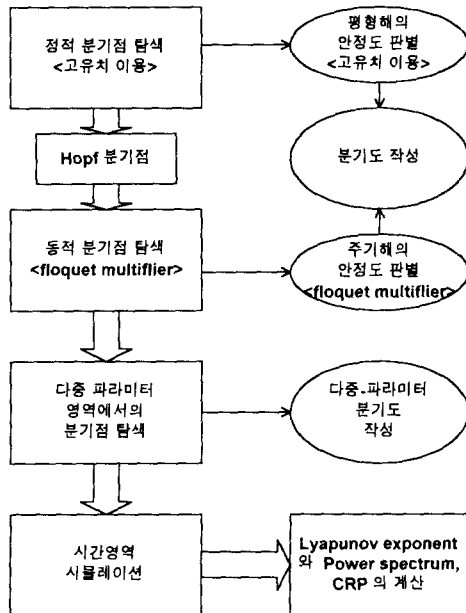


그림 2.2 비선형 동적해석 알고리즘의 흐름도
Fig. 2.2 Flow chart of nonlinear dynamic analysis algorithm

3. 알고리즘의 모델계통에의 적용

2절에서 소개한 비선형 해석절차를 모델계통에 적용하였다. 모델계통은 참고문헌 [5],[11]에서 소개되었던 3모선 모델계통으로서, 파라미터는 부하 유효전력과 부하 무효전력이다.

사례연구에 이용된 3모선 모델계통은 그림 3.1에 나와 있으며 계통 방정식은 식 (3.1)~(3.4)와 같다[11]. 파라미터는 부하 무효전력 Q_1 과 부하 유효전력 P_1 이다. 3모선 모델계통은 대기 발전기와 부하 dynamics까지 고려함으로써 실계통에 근접한 모델로 볼 수 있다.

$$\delta_m = \omega \quad (3.1)$$

$$\dot{\omega} = 16.66667 \sin(\delta - \delta_m + 0.08727) V - 0.16667 \omega + 1.88074 \quad (3.2)$$

$$\delta = 496.8718 V^2 - 166.66667 \cos(\delta - \delta_m - 0.08727) V - 666.66667 \cos(\delta - 0.20944) V + 93.33333 V + 33.33333 Q_1 + 43.33333 \quad (3.3)$$

$$\dot{V} = -78.76384 V^2 + 26.21722 \cos(\delta - \delta_m - 0.01241) V + 104.86887 \cos(\delta - 0.13458) V + 14.52288 V - 5.22876 Q_1 - 7.03268 - 0.392157 P_1 - 0.235294 \quad (3.4)$$

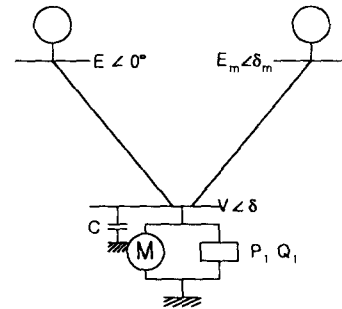


그림 3.1 3모선 모델 계통도
Fig. 3.1 3-bus model system diagram

Step 1 - 정적분기

P_1 값을 0.0으로 고정하고 Q_1 값을 파라미터로 하여 정적분기점과 Hopf 분기점을 찾아내었다(그림 3.2). 그림에서 실선은 안정한 평형해, 점선은 불안정한 평형해를 나타낸다.

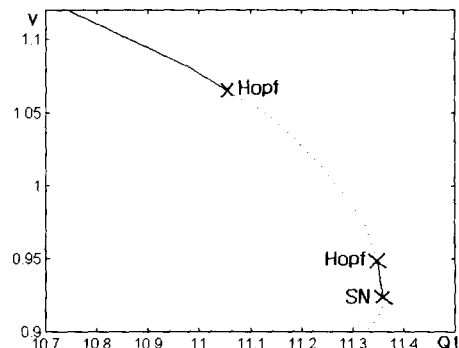


그림 3.2 정적 분기도
Fig. 3.2 static bifurcation diagram

Step 2 - 동적분기

P_1 값이 0.0일 때 Hopf 분기점으로부터 주기해 경로를 탐색한 결과는 그림 3.3과 같다. 그림에서 원으로 표시된 곳은 안정한 주기해를 나타낸다. 그림에는 나타나 있지 않지만 실제로는 복주기 분기점(PD)로부터 새로운 주기해 경로가 분기하고 다시 복주기 분기점이 존재하는 형태가 반복된다. 이 복주기 분기점들은 그림에 나타난 복주기 분기점에서 아주 가까운 곳에 몰려 있는 형태를 가지게 된다. 즉, 최초로 찾아낸 복주기 분기점 주위에서 chaos 진동을 발견해 낼 수 있다. 그렇지만 앞에서 말했듯이 복주기 분기점에서 매우 가까운 곳에서는 주기-1인 진동과 chaos 진동의 중간 단계인 주기-2, 주기-4, 주기-8, ... 등과 같은 진동 형태가 나타나게 된다.

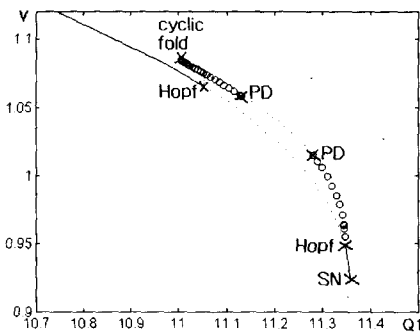


그림 3.3 동적 분기도

Fig. 3.3 dynamic bifurcation diagram

Step 3 - 다중파라미터에 대한 분기점 탐색

관심이 되는 Hopf 분기점, 복주기 분기점(PD), saddle node 분기점(SN)과 cyclic fold 분기점(CF)들을 각각 2-파라미터 영역에서 추적한 결과는 그림 3.4에 나와 있다. 각각의 영역에서 파라미터 값에 따른 동작특성도 나타내었다. 그림에서 점선 부분은 cyclic fold 분기를 나타낸 것으로서 subcritical Hopf 분기와 cyclic fold 분기로 인해 주기해가 평형점 영역에서도 나타나게 되는 지역을 구분한 것이다. 또한 점 E, F, G, H는 각각 영역에서의 동작 특성을 확인하기 위하여 시간영역 시뮬레이션을 행한 위치를 표시한 것으로서 E는 주기적 진동, F와 G는 chaos 진동, H는 붕괴현상을 일으키는 영역에 포함되어 있는 점들이다. 그러나 Step 2에서도 말했듯이 chaos 영역이라고 표시된 곳 중에서 복주기 분기점에 아주 가까운 곳은 주기-2,4 등의 진동이 나타날 수도 있기 때문에 실제적으로 점 F는 주기적 진동 중의 한 가지가 나타나게 될 것이다.

Step 4 - 시간영역 시뮬레이션

2-파라미터 분기도에서 나타낸 특성들을 확인해보기 위해 Step 3에서 지정한 운전점에서 시간영역 시뮬레이션을 행하였다(그림 3.5). 각각의 경우에 대해 시뮬레이션 결과가 그림 3.4에서 나타나는 영역의 특성과 일치함을 알 수 있다. 특히 그림 3.5 (b)에서는 주기-4인 진동이 나타나고 있다. 이것은 주기-1인 기본 진동에서 chaos 진동에 이르는 중간단계에 해당된다.

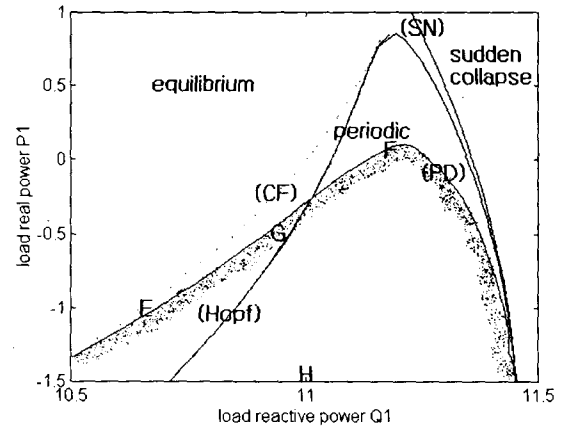


그림 3.4 2-파라미터 분기도

Fig. 3.4 2-parameter bifurcation diagram

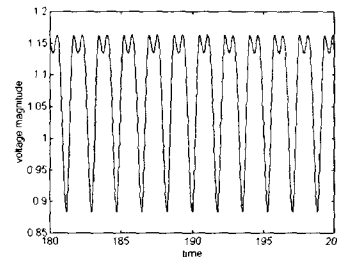


그림 3.5 (a) 주기적 진동 - E ($Q_1=10.65, P_1=-1.0$)

Fig. 3.5 (a) periodic oscillation

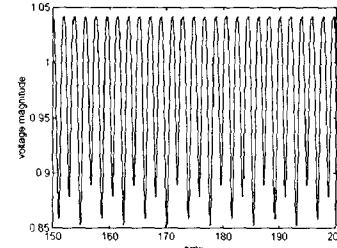


그림 3.5 (b) 주기적 진동 - F ($Q_1=11.2, P_1=0.0$)

Fig. 3.5 (b) periodic oscillation

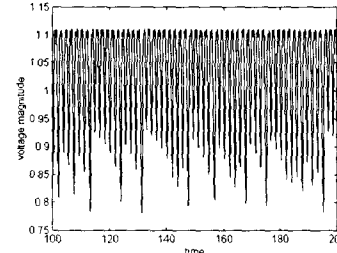


그림 3.5 (c) Chaos 진동 - G ($Q_1=10.93921, P_1=-0.5$)

Fig. 3.5 (c) Chaotic oscillation

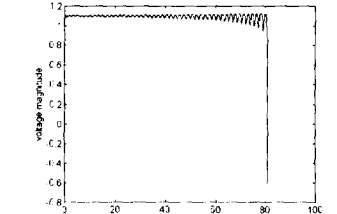


그림 3.5 (d) 진동 후 붕괴 - H ($Q_1=11.0, P_1=-1.5$)

Fig. 3.5 (d) Collapse after oscillation

Step 5 - Lyapunov exponent, Power spectrum, Closed Returns Plot

시간영역 시물레이션을 행한 운전점 중에서 점 E와 F, G 세 가지 진동에 대해서 각각 Lyapunov exponent와 power spectrum 그리고 CRP를 구하였다. 표 5.1에는 가장 큰 Lyapunov exponent만을 구해 놓았다. 주기적 진동인 A, B의 경우에는 0.0, chaos 진동인 경우에는 양수인 0.022가 구해져서 Chaos 진동일 경우의 Lyapunov exponent의 조건 [5,6]을 만족시킴을 알 수 있다.

표 3.1 Lyapunov exponent

Table 3.1 Lyapunov exponent

	maximum lyapunov exponent
주기-1 진동 [E]	0.000
주기-2 진동 [F]	0.000
chaos 진동 [G]	0.022

Power spectrum을 구한 결과는 그림 3.6에 나와 있다. E의 진동의 경우에는 기본 주파수에서만 spike가 나타나고, 주기가 4배가 된 F의 경우에는 기본 주파수 사이의 중간 지점에 고조파들이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 마지막으로 chaos 진동인 G의 경우에는 수많은 spike를 볼 수 있다.

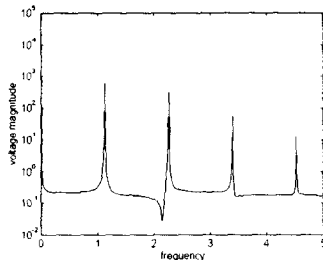


그림 3.6 (a) 주기 1 - E
Fig. 3.6 (a) periodic 1 - E

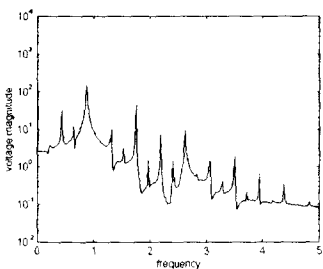


그림 3.6 (b) 주기 4 - F
Fig. 3.6 (b) periodic 4 - F

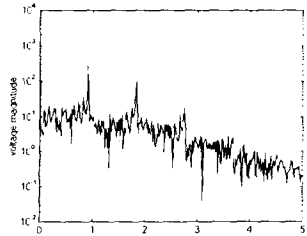


그림 3.6 (c) Chaos 진동 - G
Fig. 3.6 (c) Chaotic oscillation - G

CRP를 구한 결과는 그림 3.7에 나와 있다. CRP의 경우에는 주기적 진동인 점 E와 F의 경우에는 여러개의 수평선들이 규칙적으로 배열하고 있다. 또한 그림 3.7 (c)를 보면 상당히 많은 수평선들이 나타나고 있음을 볼 때, 점 G에서 나온 결과가 단순한 잡음이 아닌 chaos 진동임을 확인할 수 있다. 그러나 주기적 진동과는 다르게 수평선들이 계속 연결되어 있지가 못하고 끊어져 있음을 볼 수 있다. 그렇지만 무작위적인 자료의 CRP와 비교했을 때는 주기적 성질이 상당히 크다는 것을 보여주고 있다.

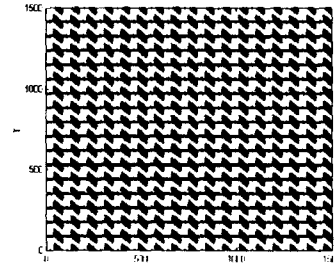


그림 3.7 (a) 주기 1 - E
Fig. 3.7 (a) periodic 1 - E

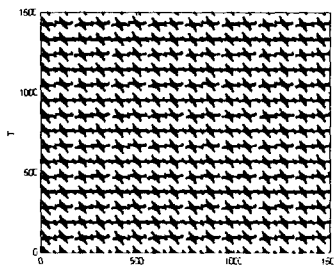


그림 3.7 (b) 주기 4 - F
Fig. 3.7 (b) periodic 4 - F

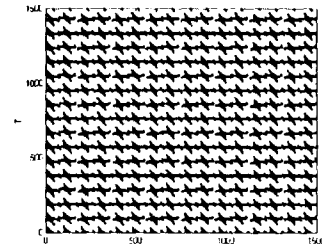


그림 3.7 (c) Chaos 진동 - G
Fig. 3.7 (c) Chaotic oscillation - G

4. SMES를 투입한 경우의 비선형 현상

4.1 SMES의 역할과 비선형 모델링

최근 들어 전력사용이 급증하면서 전력계통도 대규모 대용량화되고 있다. 또한 전력계통은 일반적으로 발전기와 부하사이가 멀리 떨어져 있기 때문에 미소적인 외란이 가해졌을 때 damping oscillation이 발생하는 경우가 많은데 이러한 oscillation은 일반적으로 길이가 긴 tie 선로를 가로지르는 동기회전에 의한 때가 많다. 따라서 이의 안정화 대책이 필요한데, 지금까지의 계통안정화 대책은 발전기의 가감속을 방지하기 위하여 발전기의 기계적 입력이나 전기적 출력을 제어하거나 계통 전압 유지를 위하여 무효전력을 보상하는 것 등으로서 최근에 실제로 많이 사용되는 것이 발전기에서

는 PSS(Power System Stabilizer)이고, 송전선로에서는 SVC(Static Var Compensator)이다. 그러나 PSS는 oscillation을 감쇠시키기에 불충분한 것으로 알려졌으며, 위의 기법들은 대부분 유효전력 또는 무효전력 중에 한 요소를 제어한다.

SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)는 초전도체를 이용한 에너지 저장 장치로서 최근에 관심을 끌고 있다. 즉 전기저항이 0인 초전도 코일에 전류를 흘려 자기 에너지 형태로 전기에너지를 저장하는 것으로서 유효전력과 무효전력을 동시에 제어(충방전)할 수 있다. 초전도체를 이용한 SMES의 가장 큰 장점은 효율이 95% 이상으로서 기존 양수발전과 같은 에너지 저장 장치의 70%대와 비교할 때 매우 효율적이라는 점과 thyristor를 이용한 전력전자 기술을 이용, 응답 특성이 매우 빠르다는 것이다. SMES는 전력계통에 다음과 같은 목적으로 이용될 수 있다.

(i) 심야시간대와 같이 전력이 남을 때 전력을 저장하고 peak 부하시에 전력을 공급함으로써 전력 소비 추이의 평준화를 기할 수 있다. 이는 양수발전이나 battery와 같은 용도로서 SMES의 가장 기본적인 역할이다.

(ii) SMES 내의 thyristor의 점호각을 조절함으로써 계통의 damping oscillation을 감쇠시키는 역할을 한다[14].

(iii) 부하 모선의 주파수를 조절할 수 있다.

SMES를 이루는 주된 요소는 thyristor에 의해 조절되는 AC/DC 변환기이다. 변환기 내의 thyristor의 점호각을 조절함으로써 초전도 코일에 가해지는 전압을 조절하여 원하는 전력 조류를 만들어 낼 수 있다. SMES가 계통선로에 접속되었을 때의 개략적인 구조도가 그림 4.1에 나와 있다.

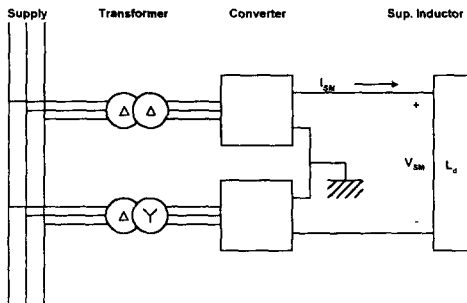


그림 4.1 SMES의 구조도
Fig. 4.1 Structure diagram of SMES

계통에 연계된 SMES는 크게 하드웨어인 SMES 코일과 이를 제어하는 제어기로 구성되어 비선형 특성을 가지는 복잡한 제어시스템이다. 따라서 SMES의 동특성에 대한 비선형 모델링이 요구되어진다.

SMES의 주요한 요소는 초전도체 코일과 AC/DC 변환기이다. 그림 4.1을 보면 2개의 변환기는 각각 Y-Δ와 Y-Y로 연결된 3상 변압기를 통해서 선로와 연결되어 있다. 변환기는 초전도 코일에 $\pm V_{SM}$ volt의 전압을 인가하게 된다. 변환기의 AC 방향에서는 에너지 수송이 없을 때의 전압과 전류의 위상각은 90° 차이가 나게 되고, 최대로 충전되었을 때에는 차이가 0° , 최대로 방전되었을 때에는 180° 의 차

이가 나게 된다. 이 때, 충전과 방전은 점호각 α 의 변화에 의해서 조절된다. 또한 전류 I_{SM} 의 방향은 바뀌지 않기 때문에 출력 P_{SM} 은 양수, 음수의 값을 모두 가질 수 있는 α 의 함수가 된다[15].

여기서 초전도 코일의 전력, 전압, 전류의 관계는 다음 식들과 같다.

$$I_{SM} = 1/L_d \cdot V_{SM} \tag{4.1}$$

$$P_{SM} = V_{SM} I_{SM} \tag{4.2}$$

또한 저장되는 에너지의 양은

$$W_{SM} = W_{SO} + \int_{t_0}^t P_{SM}(\tau) d\tau \tag{4.3}$$

여기서

$$W_{SO} = \frac{1}{2} L_d I_{SM0}^2 \tag{4.4}$$

DC 전압값 V_{SM} 은 thyristor의 점호각 α 에 의해서 조절된다. K_a 와 T_a 가 각각 loop 이득과 시정수라고 할 때, SMES의 thyristor 점호각 제어 loop에 대한 식은 식 (4.5)와 같다.

$$\Delta V_{SM} = \frac{K_a}{1 + sT_a} \Delta \alpha \tag{4.5}$$

여기서 V_{SM} 과 I_{SM} , α 의 값은 모두 상하한치를 가지게 된다. $\Delta \alpha$ 의 경우에는 90° 를 전력수급이 없는 점호각이라고 할 때 α 는 0° 와 180° 사이의 값을 가지므로 $\Delta \alpha$ 의 상하한 값은

$$|\Delta \alpha| \leq \pi/2 \tag{4.6}$$

이제 비선형 방정식을 얻기 위해서 식 (4.2)의 양변을 미분하면

$$\dot{P}_{SM} = V_{SM} \dot{I}_{SM} + I_{SM} \dot{V}_{SM} \tag{4.7}$$

식 (4.1)과 식 (4.5)를 식 (4.7)에 대입하면

$$\dot{P}_{SM} = V_{SM}^2/L_d - V_{SM} I_{SM}/T_a + I_{SM} K_a \Delta \alpha / T_a \tag{4.8}$$

식 (4.1)과 식 (4.8)이 기존 모델계통의 비선형 모델에 SMES를 표현하는 비선형식으로 추가되는 것이다. SMES의 장점 중의 하나가 유효 전력을 동시에 제어할 수 있는 점이라고 했지만 본 연구에서는 식 (4.8)과 같이 유효전력만을 제어하는 모델을 선정하였다.

앞에서도 말했듯이 초전도 코일로부터의 전력의 공급과 소비는 식 (4.8)에서도 볼 수 있듯이 점호각 α 에 의해서 결정되므로, 계통의 전기적인 진동을 조절할 수 있는 것이다. 여기서 점호각의 변화분인 $\Delta \alpha$ 를 결정하는 방법은 참고문헌 [15]의 $\Delta \omega$ 와 비례해서 변화시키는 방법과, 참고문헌 [16]에서 설명한 계통의 안정화를 위한 최적의 $\Delta \alpha$ 값을 찾는 기법이 있다. 본 논문의 사례연구에서는 ω 와 비례해서 $\Delta \alpha$ 를 변화시키는 비선형 모델을 3모선 모델계통의 부하 모선에 적용하여 비선형 동적해석 절차를 거침으로써, SMES가 계통의 비선형 현상에 미치는 영향을 관찰하고자 한다.

4.2 SMES 투입모델과 기존 모델과의 비교

이제 4.1절의 3모선 모델계통에 3절에서 소개된 SMES의 비선형 모델을 도입하여 3모선 모델계통의 부하모선에 SMES를 투입하는 예를 보기로 한다. 이를 위해 식 (3.1)~

(3.4)과 식 (4.8)을 접목하여 다음 식 (4.9)~(4.13)의 계통방정식을 도출하였다.

$$\delta_m^* = \omega \tag{4.9}$$

$$\omega = 16.66667 \sin(\delta - \delta_m + 0.08727) V - 0.16667 \omega + 1.88074 \tag{4.10}$$

$$\delta = 496.8718 V^2 - 166.66667 \cos(\delta - \delta_m - 0.08727) V - 666.66667 \cos(\delta - 0.20944) V - 93.33333 V + 33.33333 Q_1 + 43.33333 \tag{4.11}$$

$$V = -78.76384 V^2 + 26.21722 \cos(\delta - \delta_m - 0.01241) V + 104.86887 \cos(\delta - 0.13458) V + 14.52288 V - 5.22876 Q_1 - 7.03268 - 0.392157 P_1 - 0.235294 - 0.392157 P_{SM} \tag{4.12}$$

$$P_{SM} = V^2/0.5 - P_{SM}/0.026 + (P_{SM}/V) \times 1.83 \times \beta \omega / 0.026 \tag{4.13}$$

식 (4.13)에서 β 는 점호각과 발전기 각속도간의 관계를 정의하는 제어정수이다. 즉, 본 연구에서는 점호각을 조절하는 값으로서 발전기 각속도를 정한 것이다. 또한 식 (4.8)에서 V_{SM} 으로 표시된 SMES의 단자전압을 부하모선의 전압인 V 와 같다고 가정하였다.

본 연구에서는 SMES의 투입에 계통의 비선형성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 점을 비교하였다.

- 1) 분기도상에서의 비교(Hopf 분기점의 위치)
- 2) 2-파라미터 분기도에서의 비선형 진동 영역의 크기
- 3) 시간영역 시뮬레이션 결과의 비교(동일한 파라미터 값)
- 4) 제어정수 β 의 값에 따른 Hopf 분기점 유형의 변화

4.2.1 분기도상에서의 비교

그림 4.2에 SMES가 투입된 모델의 분기도가 나와 있다. 파라미터 P_1 은 0.0으로 고정된 채로 Q_1 을 파라미터로 정하였고 $\beta=1.0$ 의 값을 가진다. 그림 4.2의 분기도와 비교해 볼 때, Hopf 분기점 사이에 나타나는 비선형 영역이 상당히 축소되었음을 볼 수 있다. 이 결과를 정확한 수치로 비교한 것이 표 4.1에 나와 있다. 표 4.1은 P_1 을 0.0으로 했을 때 두

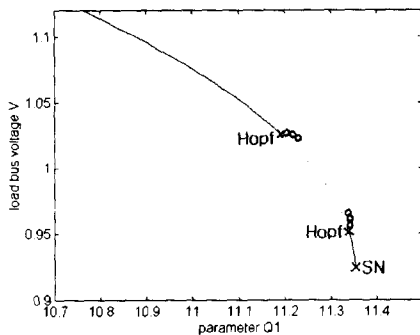


그림 4.2 1-파라미터 분기도 ($P_1=0.0, \beta=1.0$)
Fig. 4.2 1-parameter bifurcation diagram

표 4.1 SMES 투입여부에 따른 분기점의 Q_1 값

Table 4.1 Q_1 of the bifurcation points with and without SMES

	Hopf 1	Hopf 2	Saddle node
기존 모델	11.05571	11.34854	11.35872
$\beta = 0.1$	11.0844	11.34201	11.35404
$\beta = 1.0$	11.19396	11.34201	11.35404

개의 Hopf 분기점과 한 개의 saddle node 분기점이 일어나는 Q_1 값을 정리한 것이다. SMES가 투입되지 않은 경우와 비교할 때 SMES의 투입으로 인하여 Hopf 분기점이 더 큰 Q_1 값에서 발생하고 있다. 또한 β 값이 커질수록 더욱 큰 Q_1 값에서 Hopf 분기점이 일어남을 볼 수 있다. 그렇지만 saddle node에 의한 계통의 붕괴는 오히려 조금 빨리 일어남을 확인할 수 있다.

4.2.2 2-파라미터 분기도에서의 비선형 진동 영역의 크기

이제 2-파라미터 분기도에서 SMES를 투입함에 따라 비선형 영역들이 어떤 형태를 보이는지 살펴보자(그림 4.3). β 의 영향도 알아보기 위하여 β 의 값이 1.0, 0.1인 두 가지 경우와 기존 모델의 경우를 비교하였다. 그림에서 보듯이 SMES의 투입에 따라 Hopf 분기점에 의해 생기는 비선형 영역이 큰 폭으로 축소되고 있음을 알 수 있다. 특히 β 의 값이 커질수록 그 영향은 더욱 커지고 있다.

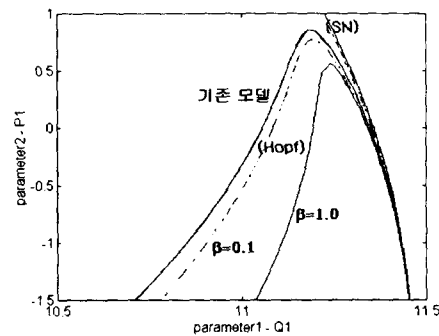


그림 4.3 SMES 투입여부에 따른 2-파라미터 분기도
Fig. 4.3 2-parameter bifurcation diagram with and without SMES

4.2.3 시간영역 시뮬레이션 결과의 비교

3절에서 이미 시간영역 시뮬레이션을 행하였던 그림 3.4의 E, F, G 점 중에서 E, F점과 동일한 파라미터 값을 가지는 경우의 시간영역 시뮬레이션을 SMES를 설치한 모델에서 확인함으로써 그 효과를 확인하고자 한다.

그림 4.4를 보면 주기-1이었던 점 E는 진동이 뚜렷이 감소되고 있음을 볼 수 있고, 주기-4였던 점 F는 주기-1 진동으로 되었음을 볼 수 있다. 따라서 SMES의 설치가 계통의 비선형 현상을 안정시키는데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

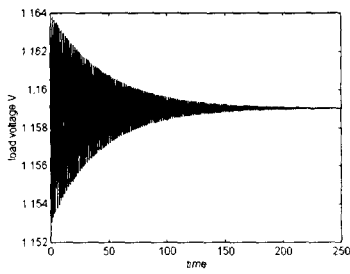


그림 4.4 (a) 시간영역 시뮬레이션($Q_1=10.65, P_1=-1.0$)

Fig. 4.4 (a) Time domain simulation

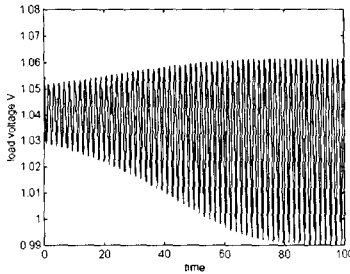


그림 4.4 (b) 시간영역 시뮬레이션($Q_1=11.2, P_1=0.0$)

Fig. 4.4 (b) Time domain simulation

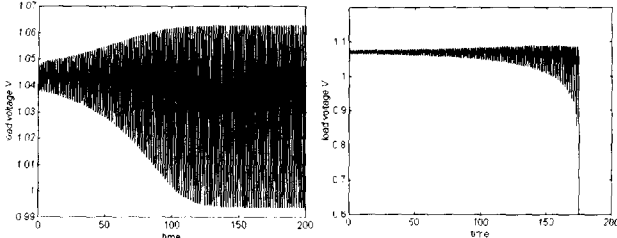
표 4.2 β 값에 따른 Hopf 분기점의 유형

Table 4.2 Type of Hopf bifurcation point dependent on β

제어정수 β 값	Hopf 분기점의 유형
0.001	subcritical
0.1	subcritical
0.3	subcritical
1.0	supercritical

4. 2. 4 제어정수 β 에 따른 Hopf 분기점 유형의 변화

SMES를 투입한 3모선 모델계통에서 일어나는 분기현상의 특징 중 하나는 제어정수 β 의 값에 따라 Hopf 분기점의 형태가 변한다는 것이다. 그 결과가 다음 표 4.2에 나와 있다. 표를 보면 β 의 값이 커질수록 Hopf 분기점의 subcritical 에서 0supercritical 로 바뀌고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Hopf 분기점에서의 안정도를 확인하기 위하여 시간영역 시뮬레이션을 행한 결과인 그림 4.5를 보면 β 의 값이 커짐에 따라 Hopf 분기점이 안정화됨을 볼 수 있다.



(a) supercritical Hopf 분기점 ($\beta=1.0$) (b) subcritical Hopf 분기점 ($\beta=0.1$)

(a) supercritical Hopf bifurcation point (b) subcritical Hopf bifurcation point

그림 4.5 시간영역 시뮬레이션

Fig. 4.5 Time domain simulation

즉, subcritical 인 경우는 계통이 붕괴하지만 supercritical 인 경우는 계통이 안정한 진동을 하게 된다. 또한 그림 4.6에서는 두 번째 파라미터였던 P_1 을 0.0의 상수로 고정시키고 제어정수 β 를 두 번째 파라미터로 하여 작성한 2-파라미터 분기도가 나와 있다. 그림을 보면 제어정수의 값이 커짐에 따라 Hopf 분기점에 의해 구분되어지는 비선형 영역이 줄어들고 있으며 특히 $\beta > 4.2$ 인 경우에는 진동 영역이 존재하지 않게 된다.

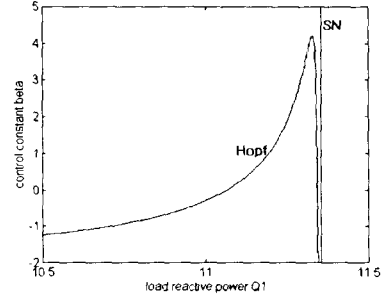


그림 4.6 제어변수와 무효전력에 대한 2-파라미터 분기도

Fig. 4.6 2-parameter bifurcation diagram dependent on β and Q_1

5. 결 론

본 연구에서는 전력계통의 비선형 현상을 체계적으로 해석하는 도구가 되는 비선형 동적해석 알고리즘을 개발하였고 이를 3모선 모델계통에 적용해 봄으로써 그 효용성을 확인하였다. 또한 3모선 모델계통에 SMES를 설치하였을 때 비선형 현상에 미치는 영향을 비교하였다.

비선형 동적해석 알고리즘은 3절에서 나온 결과와 같이 비선형 현상 해석에 효과적임이 확인되었으며, 특히 2-파라미터 분기도를 이용하면 파라미터 영역에서의 계통상태의 정확한 예측이 가능하였다. 또한 새로운 지수인 CRP를 도입함으로써 chaos와 무작위적인 자료와의 차이를 명확히 구분할 수 있게 되었다. 이러한 비선형 해석 알고리즘의 확립은 전압붕괴와 같은 단조불안정 현상이나 다지역간 주파수 진동 및 장주기 진동 등과 같은 진동형태의 불안정 현상, 이와 같은 불안정 진동의 전이에 의한 chaos 등과 같은 문제를 이해하기 위한 기본적인 틀이 될 수 있을 것이다.

SMES의 전력계통에의 투입은 여러가지 비교결과를 볼 때, 파라미터 영역에서 진동 영역을 큰 폭으로 축소시킬 수 있었으며, 계통의 진동을 감쇠시키는 데 매우 효과적임이 확인되었다. 또한 제어정수의 값에 따라 Hopf 분기점의 안정

도도 향상시킴을 알 수 있었다. 결국 SMES의 투입은 계통의 비선형 진동 현상을 완화시킬 수 있고 안정도를 향상시키는 데에 있어서 매우 효과적인 방법이 될 수 있다. 특히 제어정수값을 적절히 선정하게 되면 계통의 진동 현상을 완전히 제거할수도 있음을 보였다.

현재 전력계통의 비선형 현상의 해석은 모델링의 어려움과 컴퓨터 계산능력의 한계로 인해 모델계통에 머물러 있다. 하지만, 차후 연구가 진행됨에 따라 실제계의 비선형 해석도 가능하리라 여겨진다. 또한, SMES 뿐만 아니라

FACTS기기와 같은 각종 전력계통 기기들에 대한 비선형 모델 개발과 이에 따른 해석도 중요한 연구라고 생각된다.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 단기과제(과제번호:97-013) 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] R. Seydel, *Practical Bifurcation and Stability Analysis from equilibrium to chaos - second edition*, Springer-Verlag, 1994

[2] T. S. Parker and L. O. Chua, *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*, Springer-Verlag, 1989

[3] S. Wiggins, *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag, 1990

[4] Chin-Woo Tan, Matthew Varghese, Pravin Varaiya and Felix Wu, *Bifurcation, Chaos and Voltage Collapse in Power Systems*, EPRI Technical Report, May 1993

[5] V. Ajarapu and B. Lee, "Bifurcation Theory and Its Application to Nonlinear Dynamical Phenomena In An Electrical Power System", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.7, No.1, February, 1992, pp. 424-431

[6] B. Lee and V. Ajarapu, "Period-doubling route to chaos in an electrical power system", *IEE Proceedings-C*, Vol.140, No.6, November 1993.

[7] 喜多敏博, 外, "高AVRゲインによって生じるカオス動揺とその発生領域", *日本電気學會 平成9年 電力・エネルギー部門全國大會論文紙*, 1997. 8

[8] Yasunori Mitani and Kiichiro Tsuji, "Bifurcations Associated with Sub-Synchronous Resonance", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.1, February 1998

[9] Weijun Ji and V. Venkatasubramanian, "Dynamics of a Minimal Power System : Invariant Tori and Quasi-Periodic Motions", *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I:Fundamental Theory and Application*. Vol.42, No.12, December 1995

[10] W. Ji and V. Venkatasubramanian, "Hard-limit Induced Chaos in a Fundamental Power System Model", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 18, No. 5, July 1996

[11] Yuri V. Makarov, Zhao Yang Dong and David J. Hill, "A General Method for Small Signal Stability Analysis", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.3, August 1998

[12] C. A. Canizares and W. Rosehart, "Bifurcation Analysis of Induction Motor Loads for Voltage Collapse Studies", *Proceedings of the North American Power Symposium(NAPS)*, MIT, November 1996

[13] H. Kim, *Applicability of Chaotic System in Hydrologic Time Series*, PhD thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1997

[14] Y. Mitani, K. Tsuji, Y. Marakami, "Application of Superconducting Magnet Energy Storage to Improve Power System Dynamic Performance", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 1418-1425, 1988

[15] I. El-Amin, M. Hussian, "Application of Superconducting Coil for Transient Stability Enhancement", *Electric Power System Research*, Vol. 17, pp. 219-228, 1989

[16] A. H. M. A. Rahim, A. M. Mohammad, "Improvement of Synchronous Generator Damping Through Superconducting Magnetic Energy Storage Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 4, December 1994

저 자 소 개



안 병 학(安炳學)
1974년 11월 10일 생. 1997년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동대학교 미세소자공학과 졸업(석사). 현재 삼성전기 종합연구소 연구원.

Tel : (02) 3290-3242
E-mail : leeb@eeserver.korea.ac.kr

이 병 준(李炳峻)
전기학회 논문지 제 48A권 3호 참조
Tel : (02) 3290-3697
E-mail : hakson@samsung.co.kr