

A Modeling and Optimal Site of SMES for Power System Stabilization

金正勳* · 林載尹** · 李鍾弼***

(Jung-Hoon Kim · Jae-Yoon Lim · Jong-Pil Lee)

Abstract - In this research, ANN modeling method of SMES unit is developed for stability analysis, and the optimal site is selected to maximize stabilization effect of SMES unit.

The ANN is trained by learning data which is obtained through the application of complex test function into the traditional mathematical model. In order to verify the validity of proposed modeling method, fault data of sample power system is applied to both the traditional and the ANN models. When the response of traditional and proposed models are compared, the average error for the active and reactive power are 2.51[%] and 0.24[%], respectively. From the comparison, the relevance of proposed method is validated.

For the transient stability analysis, an application method of the proposed model is presented, and the transient stability performance index, which describes system stabilization effect of SMES at disturbance, is also suggested, and optimal site selection method of SMES is presented. In the viewpoint of the voltage stability, system stabilization criterion of local load bus is presented from P-V curve, and then optimal site which can maximize the voltage stabilization of the whole power system, is decided from the proposed voltage stability performance index.

Key Words : SMES, ANN(Artificial Neural Network), Stability Analysis

1. 서론

매년 계속 증가하는 전력수요에 대해서 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 발전설비, 송전설비가 대규모화 되어가고 있다. 전력계통의 대규모, 대용량화와 더불어 계통의 내외부적인 외란 등은 계통의 안정을 위협하고 있으며, 이에 대한 여러 가지 안정화 대책이 연구되어 오고 있다.

지금까지 많이 연구된 계통 안정화 방법은 발전기의 가감속을 방지하기 위하여 발전기의 기계적 입력, 또는 전기적 출력을 제어하든지, 계통의 전압을 유지하기 위하여 무효전력을 보상해 주는 방식으로써, 유효전력 또는 무효전력 한 요소만을 제어한다고 볼 수 있다. 그러나 전기저항이 영인 초전도 코일에 전류를 흘려 자기에너지 형태로 전기 에너지를 저장하는 SMES (Super-conducting Magnetic Energy Storage; 초전도 저장) 장치는 유효전력과 무효전력을 동시에 제어하여 계통에 충·방전 할 수 있다. 이미 잘 알려진 바와 같이 SMES는 에너지 충방전의 효율이 높고, 응답 특성도 빠르다. 이와 같은 특성으로 전력 계통에서는 여러 목적으로 적용 가능성에 대해 연구가 진행되고 있으며, 특정의 모선에 SMES를 설치한 경우에 동요의 억제 효과가 있다는 것은 이미 확

인되고 있다[1-4]. 그러나 SMES는 건설비용이 높고 항시 저온을 유지할 필요가 있는 단점도 가지고 있으므로, 계통에 SMES를 적용하는 경우, 보다 경제적이고 효과적으로 운용하기 위해서는 SMES의 계통 안정화 효과, SMES의 적정위치 [5,6]등에 대한 전반적인 검토가 요구된다.

SMES의 안정화 효과를 파악하기 위해서는 SMES가 포함된 계통 안정도 해석이 필요하고 안정도 해석을 위해서는 SMES장치 및 각 계통 구성요소에 대한 모델링이 필수적이다. 계통에 연계된 SMES는 크게 하드웨어인 SMES 코일과 이를 제어하는 제어기(controller)로 구성되어 비선형 특성을 가지는 복잡한 제어시스템이다. 그러나 지금까지 SMES의 모델은 정교한 모델이라고 보기 어려운 1차 지연 요소가 포함된 전달함수를 사용하고 있으며, 또한 정교한 수리적 모델링이 가능할지라도 계통의 안정도 해석의 경우 수식의 복잡화에 따른 많은 계산시간이 소요되고, 아울러 모델 결정에 의한 오차로 SMES 모델의 타당성까지 문제가 된다. 특히 계통에 외란이 가해져서 전력동요가 장시간 지속하는 경우 SMES모델의 응답 특성은 안정도 결과에 큰 영향을 줄 것이다. 이와 같은 문제점을 해소하기 위한 SMES의 동특성에 대한 모델링이 요구된다.

본 연구에서는 복잡한 제어 시스템이라도 입출력 자료만 확보해 있으면 학습을 통하여 입출력 관계의 표현이 가능하고, 수리모델과 달리 수식의 복잡화나 차수결정에 의한 오차 등에 구애받지 않고 범용성을 가지는 신경회로망에 의한 SMES의 모델링 방법과 그 결과를 제시하였다.

그리고 SMES의 계통 안정화 효과를 파악하기 위하여

* 正 會 員 : 弘益大 電氣制御工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 大德大 電氣科 教授

*** 準 會 員 : 大德大 電氣科 講士

接受日字 : 1998년 10월 27일

最終完了 : 1999년 4월 19일

SMES를 포함한 과도 안정도와 전압 안정도 해석 방법을 제시하였으며, 안정화 효과를 정량적으로 나타내기 위한 평가함수를 정의하였다. 또한 안정화 효과를 나타내는 평가함수로부터 SMES의 적정 위치 선정방법과 사례연구 결과를 제시하였다.

2. SMES의 모델링

2.1 기존의 SMES모델

그림 1과 같이 계통에 연계된 SMES는 크게 하드웨어인 SMES 코일과 이를 제어하는 제어기(controller)가 있다. 제어기는 계통의 상태를 검출하는 변환기 및 증폭기와 이 검출된 상태에서부터 SMES가 충방전해야 할 전력과 A/D 변환기의 점호각 α 를 산정하는 알고리즘을 구현한 하드웨어로 구성된 복잡한 제어 시스템이다. 이 점호각 신호에 따라 SMES장치는 유효전력과 무효전력을 계통으로부터 흡수 및 방출하게 된다. 이와 같은 비선형 특성을 가지고 있는 SMES는 일반적으로 식(1),(2)와 같이 1차 지연 요소가 포함된 전달함수를 사용하고 있다[4,6].

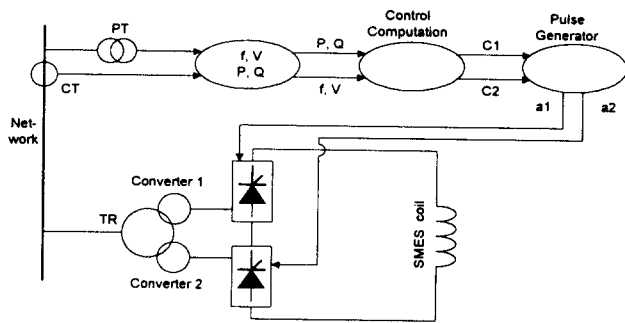


그림 1 SMES 시스템
Fig. 1 Configuration of SMES system

$$P_s = \frac{k_m}{1+sT_m} \cdot \frac{k_a}{1+sT_a} \cdot k_v \cdot \Delta P \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{k_q}{1+sT} \cdot \Delta V \quad (2)$$

여기서 ΔP = SMES 연계 모선의 전력 변화
 ΔV = SMES 연계 모선의 전압 변화

2.2 신경회로망에 의한 모델링

앞에서 언급하였듯이 SMES장치는 많은 구성요소로 이루어져 있는데, 식(1), (2)와 같이 1차 지연 요소로 단순화시켰으므로 정교한 표현이라고 볼 수는 없다. 본 연구에서는 복잡한 시스템의 비선형 특성을 식별(Identification)할 수 있는 다층형 신경회로망(Artificial Neural Network ; ANN)[7]을 이용하여 SMES장치를 모델링하였다.

SMES 장치의 모델링을 위한 신경회로망의 구성은 그림2와 같다. SMES의 운전을 통해 얻어진 입출력 자료를 바탕으로 신경회로망을 이용해서 SMES장치를 모델링하게 된다. SMES 장치의 입력은 ΔP 는 SMES 연계모선의 유효전력 변동이고 출력은 P_{SMES} 이다.

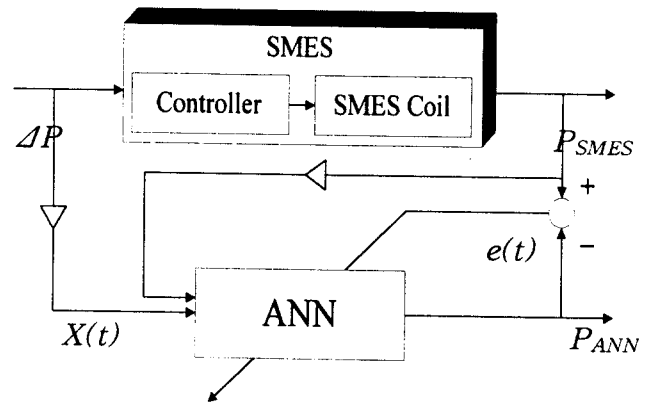


그림 2 신경회로망에 의한 SMES 모델링 구조
Fig. 2 Structure of SMES modeling using ANN

SMES장치의 특성을 모델링하기 위한 신경회로망은 식(3)과 같이 유효전력의 변화량인 입력값과 SMES의 출력값 P_{SMES} 을 토대로 오차 역전과 학습 알고리즘에 의하여 학습을 진행한다. 다층형 신경회로망의 입력층에 입력된 입력값은 중간층의 가중치와의 곱과 합을 연산하고 비선형 함수를 통하여 각 중간층 뉴런을 출력하게 된다. 또한 출력층도 중간층의 출력을 입력으로 하여 전단계와 동일한 방법으로 수행하여 식(4)와 같이 신경회로망의 계산된 출력값 P_{ANN} 을 얻게된다. SMES의 출력값 P_{SMES} 와 신경회로망에서 계산된 출력값 P_{ANN} 의 오차는 식(5)와 같으며, 이와 같은 오차를 최소화하기 위하여 신경회로망의 가중치를 수정하는 것이 학습이다. SMES의 무효전력 출력도 유효전력과 동일한 방법으로 구성하였다.

$$X(t) = [\Delta P(t), \Delta P(t-1), \dots, P_{SMES}(t-1)] \quad (3)$$

$$P_{ANN}(t) = F[X(t)] \quad (4)$$

$$e(t) = P_{SMES}(t) - P_{ANN}(t) \quad (5)$$

여기서, F : 비선형함수

$X(t)$: 입력벡터

3. SMES연계 계통의 과도 안정도 해석과 적정위치

3.1 제안된 SMES를 포함한 과도 안정도 해석

SMES가 포함된 안정도 해석은 발전기의 운동방정식과 계통 방정식 및 SMES 모델 방정식이 필요하다. 본 연구에서는 SMES 모델을 앞절에서 설명된 신경회로망으로 표현하였다.

과도 안정도의 해석의 경우, SMES는 방전시에는 발전기로 충전시에는 정전력 부하로 대체하여 수식화 할 수 있으나, 과도안정도 해석 과정에서 전압에 변화에 따른 부하의 응답 특성을 고려하여 등가 어드미턴스로 SMES를 표현하였다. 계통에 고장이 발생하는 경우 과도안정도 계산 과정의 일정한 시점마다 조류 계산이 수행되고 이로부터 얻어진 SMES 연계모선의 전력과 전압의 변화에 따라 SMES의 출력 P_s, Q_s

가 결정되고, SMES의 P_s , Q_s 는 SMES의 연계 모선의 정상 상태 전압값을 이용하여, 식(6)과 같이 각 시점에서의 등가 어드미턴스로 나타냄으로써 계통 변화에 따른 SMES의 출력 변화를 등가 어드미턴스로 나타내도록 하였다.

$$Y_{SMES}(t) = \frac{P_s(t) + jQ_s(t)}{E_s^*{}^2} \quad (6)$$

여기서 E_s : 정상상태에서 SMES 연계 모선전압

$P_s(t), Q_s(t)$: 고장후 t 시점에서의 SMES 유·무 효율력 (충, 방전)

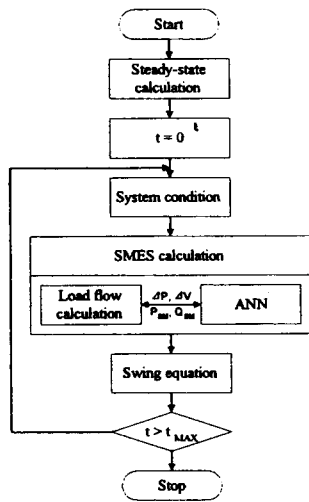


그림 3 SMES가 포함된 과도안정도 해석 과정
Fig. 3 Transient stability analysis with SMES

신경회로망에 의해 표현된 SMES가 포함된 안정도 해석의 과정은 그림 3과 같이 일반적인 기존의 안정도계산 과정[8]과 학습된 신경회로망으로 구성되어 있다. 주어진 계통의 조류 계산을 통하여 정상상태를 파악하고 SMES가 포함된 안정도 해석을 위해서 고장을 상정하고 조류계산을 하게 된다. 조류 계산 결과로부터 각 모선의 계통 상태 변화분을 계산하고, SMES가 연계된 모선의 변화분은 미리 학습된 신경회로망의 입력이 되며 신경회로망의 출력 값은 계통의 안정을 유지하기 위하여 SMES가 흡수 및 방출하는 전력이 된다. SMES의 출력이 결정되면 설명된 등가 어드미턴스로 다시 조류계산을 수행하고 운동방정식을 풀게된다.

3.2 과도 안정도 개선을 위한 SMES의 적정위치

SMES의 특성은 에너지 P, Q를 수 μs로 충,방전 할 수 있는 장점이 있는 것으로 외란시 1차 동요 내에 에너지 충, 방전이 가능하므로 계통의 동요를 효과적으로 억제할 수 있다. SMES계통의 투입에 따른 안정도 개선 효과는 SMES투입 전의 발전기 위상각 변화와 투입후의 변화로부터 유추하였다.

n대의 발전기로 구성된 계통에서 SMES 투입 전의 외란이 발생한 경우 각 발전기의 위상각 δ_i 변화에 대한 평가함수로

다음 식과 같이 정의하였다.

$$J_0 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \int_0^T |\delta_{r0} - \delta_{i0}| \cdot dt \quad (7)$$

여기서 δ_{r0} 는 정상상태에서 기준발전기의 위상각을 의미하고, δ_i 는 SMES가 투입되지 않고 고장 상태에서 i 발전기의 위상각을 의미한다. 그리고 SMES의 투입에 따른 발전기의 위상각 δ_i 변화 특성에 대하여 다음과 같이 표현하였다.

$$J_s = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \int_0^T |\delta_{r0} - \delta_{is}| \cdot dt \quad (8)$$

여기서 T는 고려할 동요의 시간으로 보통 1~2초 정도로 하고 있다. SMES의 투입효과에 대한 지표는 식(7), 식(8)로부터, 다음과 같은 평가 지수를 정의하였다.

$$J = \frac{J_0 - J_s}{J_0} \quad (9)$$

식(9)의 평가지수가 크면 클수록, SMES의 적용에 의해 평가지수 J_s 가 적어진 것으로서, 동요의 진동폭이 적은 것을 의미하므로 과도안정도 개선 효과가 큰 것을 의미하게 된다. 따라서 이 평가지수가 가장 큰 곳이 SMES의 적정위치가 된다.

4 SMES 연계 계통의 전압 안정도 해석과 적정위치

4.1 전압안정도

전압 안정도는 정상적인 계통 운전 상태에서 무효전력의 과도적, 또는 불균형에 의한 비정상적인 계통 전압 저하 현상을 다루는 것이다. 계통 전압의 불안정은 대규모 부하의 밀집과 하계 침투 부하시 정전력 부하인 냉방부하의 급증과 중부하 등에 의한 무효전력의 불평형으로 야기된다.

그림 4에 나타낸 1기-1부하 모델의 전압 안정도를 고려하면, 부하에 공급되는 유효, 무효전력은 선로의 리액턴스 X, 조상설비 어드미턴스 Y, 송전단 전압 V_s , 수전단 전압 V_r , 위상차 θ 에 대해서 다음과 같이 나타낼수 있다.

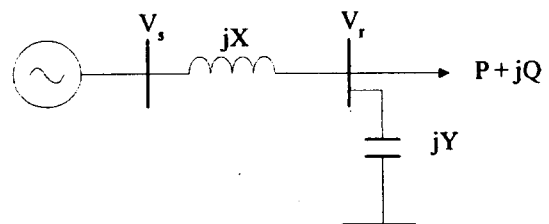


그림 4 1기-1부하 모델 계통
Fig. 4 Simple power system

$$P = \frac{V_s V_r \sin \theta}{X} \quad (10)$$

$$Q = \frac{V_s V_r \cos \theta}{X} - \left(\frac{1}{X} - Y\right) V_r^2 \quad (11)$$

위식으로 부터 위상차 θ 를 제거하고 수전단 전압 V_r 과 부하모선 P의 관계로 정리하면 식(12)와 같다.

$$V_r = \sqrt{\frac{\frac{V_s^2}{X^2} - 2P\left(\frac{1}{X} - Y\right) \pm \sqrt{\frac{V_s^4}{X^4} - 4P\left(\frac{1}{X} - Y\right) \frac{V_s^2}{X^2} - 4P^2\left(\frac{1}{X} - Y\right)^2}}{2\left(\frac{1}{X} - Y\right)^2}} \quad (12)$$

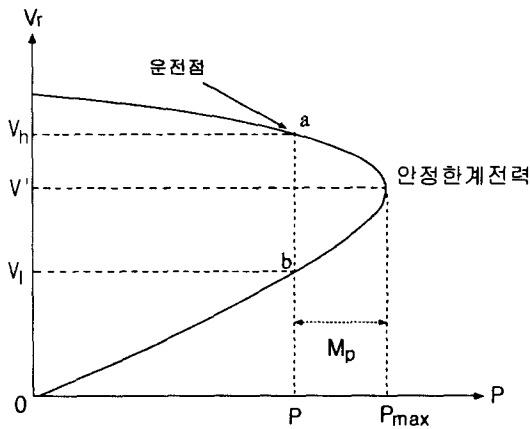


그림 5 계통의 P-V곡선
Fig. 5 P-V curve in power system

식(12)는 부하 P의 변화에 대해서 수전단 전압 V_r 이 어떠한 변화를 하는 가를 보여주고 있는 식이다. 즉 계통측의 발전기 전압, 선로임피던스, 조상용량으로부터 정해지는 송전 특성을 나타내고 있다. 식(12)의 P를 변화시키며 얻는 곡선을 P-V곡선이라고 하고 그림 5와 같다. 송전 가능한 전력은 한계가 있고, 이때의 전력을 안정한계전력을 P_{max} , 안정한계전압을 V' 이라 하고 M_p 는 유효전력 여유로 전압안정도의 지표로 사용되기도 한다. 이와 같은 안정한계는 식(12)이 중근을 갖는 상태이며, 그리고 서로 다른 실근을 갖는 경우는 전압의 안정한계보다 높은 영역의 해와 낮은 영역의 해를 얻게 된다. 즉 동일한 부하에 대해서 2개의 값을 갖게 되는데, 안정 판별은 dV/dP 의 부호에 따라 결정된다. dV/dP 의 부호가 음인 경우, a점의 경우 부하의 감소시 전압의 상승에 의해 부하가 증가되어 원래의 운전점으로 되돌아가는 반면에, 이와 반대의 경우는, b점의 경우 부하의 감소시 전압이 감소하고 그에 따라 더욱 부하가 감소되어 전압 감소를 초래하여 결국 전압 붕괴를 맞게 된다.

4.2 제안된 SMES를 포함한 전압안정도 해석과 적정위치

계통에 조상설비가 설치되면 그 안정한계전력이 증가하는 송전특성은 이미 많은 연구에서 밝혀졌다. SMES장치는 유효전력과 무효전력을 동시 또는 개별적인 제어가 가능하므로

무효전력을 제어하는 조상설비의 기능을 대신할 수 있다.

또한 SMES를 부하단에 설치하는 경우 SMES의 운전에 따라 무효전력을 보상하는 경우, 그림 6과 같은 P-V 송전 특성을 갖게 된다. SMES가 설치되기 전의 부하단 부하는 P_0 이며, 이때 전압은 V_0 에서 운전되고 있다(b점). 그리고 SMES가 설치되면 P-V곡선은 우측으로 이동된 것과 같은 특성을 보이며, 이때 동일한 부하 조건의 경우 부하단의 전압은 V_{sm} 으로 상승하게 된다(a점). 그러나 역으로 SMES 설치 후에도 부하단의 전압을 초기 운전전압인 V_0 로 유지한다면, 초기 부하 P_0 에서 P_{sm} 으로 증가된 부하를 감당할 수 있게 된다(c점). 즉 계통의 전압에 대한 안정도 여유가 증가된 것을 의미하며, SMES 설치에 따른 효과를 상대적으로 비교하기 위하여 전압 안정화 효과 지표(CP_i)는 SMES 투입에 따른 안정도 여유와 각 부하단의 부하 크기를 고려하여 식(13)과 같이 정의하였으며, 안정화 지표가 클수록 SMES의 위치에 따른 계통의 전압 안정성 효과가 큰 것을 의미하므로, 안정화 지표를 사용하여 계통 안정화를 위한 SMES장치의 적정 위치를 선정할 수 있다.

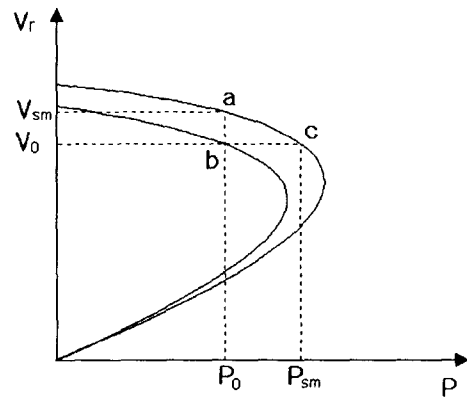


그림 6 부하모선에 SMES 투입에 따른 P-V 곡선
Fig. 6 P-V curve with SMES in load bus

$$CP_i = \frac{P_{smi} - P_{0i}}{\sum_{i=1}^n P_{0i}} \quad (13)$$

여기서, P_{0i} : i 부하모선의 초기 운전시 부하(V_0)

P_{smi} : i 부하모선에 SMES 투입시 부하(V_0)

5. 사례연구

5.1 사례계통

본 연구에서 사용된 샘플 계통은 그림7과 같은 3기 9모선 계통[8]을 사용하였다.

과도안정도 분석을 위해서 부하모선에 인접한 7번모선 또는 9번모선에서 3상지락고장이 발생하고 0.2초후에 제거되었을 때, SMES가 없는 경우와 각 부하모선에 SMES가 연결되

어 있는 경우에 대해 발전기 위상각의 변화를 분석하였고, 전압안정도 분석을 위해서 부하모선에 SMES가 없는 경우와 설치된 경우에 대해 계통의 부하를 점점 증가시키며 조류계산을 반복하며 각 모선의 전압변화를 분석하였다.

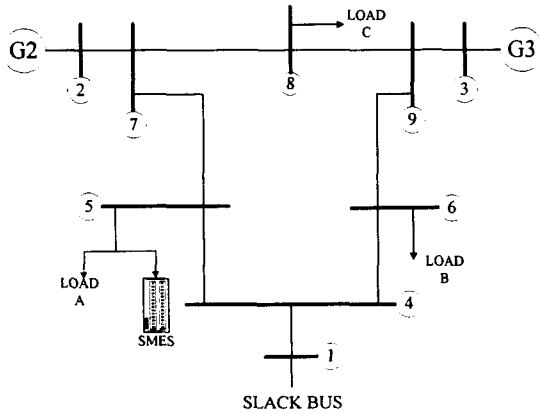


그림 7 샘플 계통
Fig. 7 Sample power system

5.2 신경회로망에 의한 SMES 모델링 결과

신경회로망의 학습을 위한 SMES의 입출력 자료를 얻기 위해, 식(17)과 같은 함수에 의해 입력자료를 얻은 후 식(1), (2)와 같은 SMES의 수리적 모델에 입력시켜 SMES모델의 출력을 얻었다. 이와 같이 얻어진 그림 8과 같은 입출력 자료를 이용해서 2.2절에서 설명된 방법으로 신경회로망에 의한 SMES모델을 구축하였다.

$$g(u(t)) = 0.7\sin(\pi u(t)) + 0.2\sin(2\pi u(t)) + 0.1\sin(5\pi u(t)) \quad (17)$$

여기서, $u(t) = \sin \frac{2\pi t}{250}$

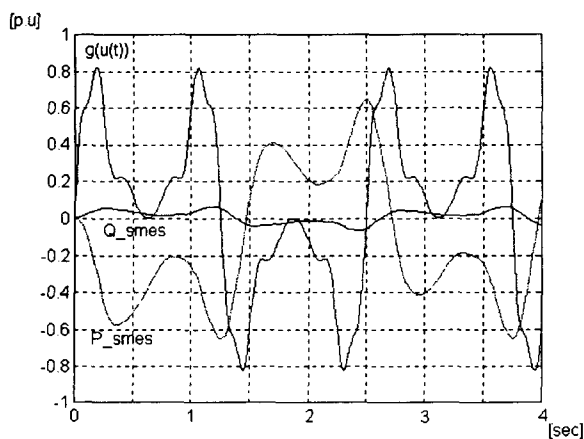
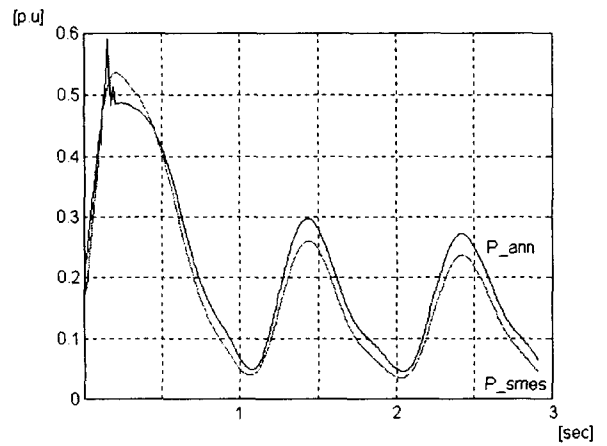


그림 8 신경회로망의 학습자료
Fig. 8 Learning data for ANN

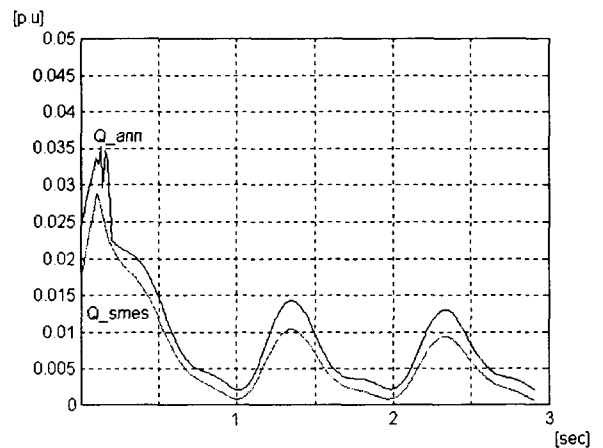
사용된 다층형 신경회로망의 입력층과 출력층은 각각 11개의 뉴런과 1개의 뉴런으로 구성되었으며, 은닉층은 20개의 뉴

런으로 구성되었다. 학습은 오차 역전파 학습 알고리즘을 이용하였고, 초기 학습율을 0.06으로 한 후 학습이 진행됨에 따라 학습 효과를 높이기 위해 오차의 변동에 따라 학습율이 바뀌도록 하였다.

이러한 학습자료로 학습한 후, 그림7의 샘플계통에서 9번 모선의 3상 단락고장을 상정해서 얻은 SMES 연계모선의 ΔP , ΔV 자료를 사용해서 식(1), (2)의 SMES 수리모델과 학습된 신경회로망 모델에 각각 입력시킨 결과 그림 9와 같이 유효전력에 대한 오차는 2.51[%], 무효전력에 대해서는 0.24[%]로 신경회로망에 의해 매우 정확히 모델링 되었음을 알 수 있다.



(a) 유효전력
(a) Active power



(b) 무효전력
(b) Reactive power

그림 9 SMES의 수리모델 및 신경회로망 모델의 응답 결과
Fig. 9 The response of mathematical and ANN models

5.3 SMES가 포함된 과도안정도의 해석결과와 적정위치

4.2절에서 학습된 신경회로망 모델을 샘플계통의 각 부하모선에 연계했을 때, 고장별, SMES의 용량 및 설치위치별 안정화 지표는 식(8),(9)에 의해 계산한 결과 표1과 같다.

표 1 각 고장에 대한 평가함수값

Table 1 Performance index for each fault case

고장 위치	용량	SMES 설치위치		
		5번모선	6번모선	8번모선
9번모선 고장	0.10	12.40	12.11	12.77
	0.15	14.08	13.17	14.40
	0.20	14.95	13.87	15.14
7번모선 고장	0.10	11.79	12.12	12.89
	0.15	14.56	14.00	15.09
	0.20	16.04	14.35	16.14

표1에서 SMES를 부하모선에 설치할 경우 8번 모선에 설치했을 경우가 가장 효과적으로 계통을 안정화 할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 8번 모선이 사고지점으로부터 가까운 위치에 있고, 부하의 용량도 가장 작기 때문에 안정화 효과가 큰 것으로 사료된다. 또한 SMES의 용량이 클수록 계통 안정화 효과가 커짐을 사례연구로부터 확인할 수 있다.

그림10 ~ 그림12는 9번모선에 고장이 발생하고, SMES가 없는 기준 경우와 SMES가 8번모선에 설치되어 있는 경우의 각 발전기들의 위상각 변화를 보이고 있다.

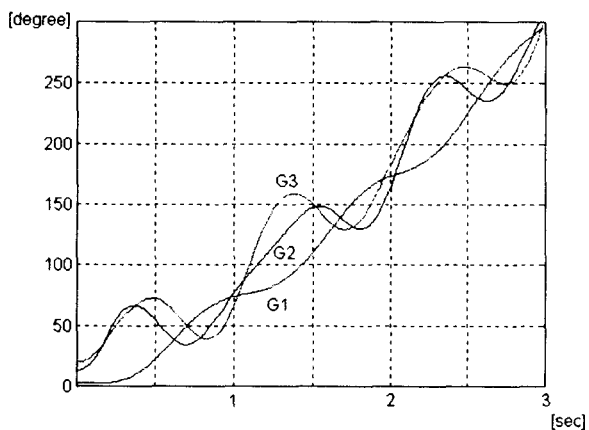


그림 10 9번모선 고장에 대한 발전기들의 위상각
Fig. 10 Generator phase on fault (bus 9)

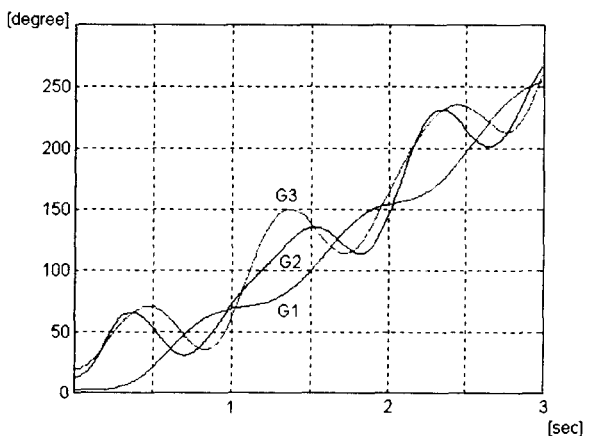


그림 11 8번모선에 용량 15[MVA]의 SMES를 설치했을 때 발전기들의 위상각
Fig. 11 Generator phase with 15[MVA] SMES at bus 8

SMES가 설치되어 있는 경우 SMES의 용량을 0.15 [p.u](15[MVA])로 제한했기 때문에 SMES의 유효·무효전력 출력이 계통이 요구하는 만큼 충분히 되지 못하고 제한을 받는 것이 그림12에서 보이고 있다. 유효전력 우선제어 모드로 동작하기 때문에 SMES의 유효전력이 0.15[p.u]일 때 무효전력의 출력은 없다.

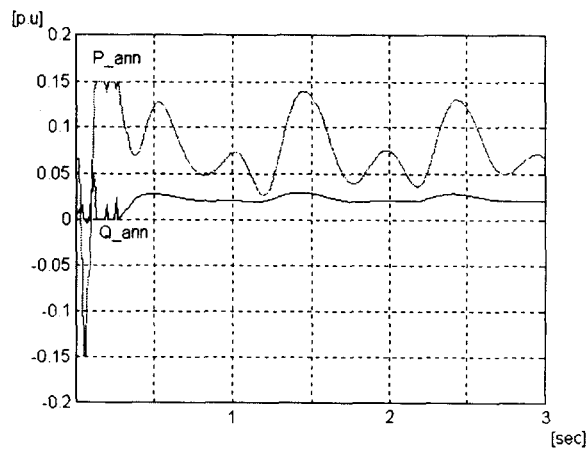


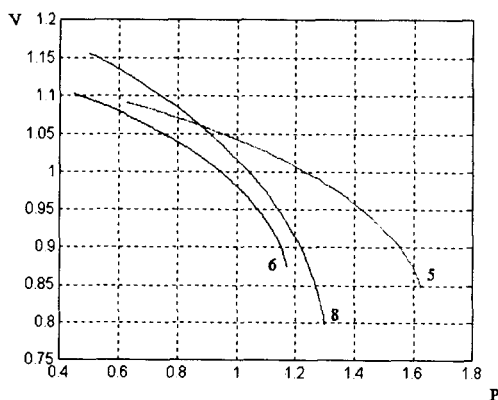
그림 12 SMES의 출력
Fig. 12 Output of SMES

5.4 SMES가 포함된 전압안정도의 해석결과와 적정위치

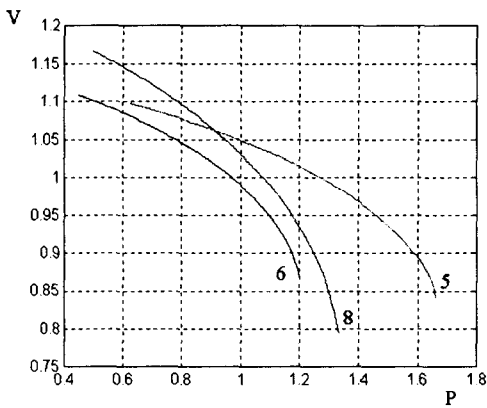
제안된 안정화 지표에 의한 SMES 적정 위치를 결정하기 위해 다음과 같은 전제조건을 바탕으로 시뮬레이션 하였다.

1. SMES의 위치는 각 부하모선을 대상으로 한다.
2. 각 부하모선에 설치될 SMES의 용량은 사례연구별 동일하게 적용한다.
3. 각 부하모선에서 부하의 증가는 동일한 역률의 유지를 전제로 한다.
4. 부하가 증가하여도 슬랙모선을 제외한 발전기의 출력은 변화하지 않는다.
5. SMES는 정상상태에서 무효전력만을 출력한다.

SMES의 무효전력만 제어하는 조건에 따라 부하모선인 5, 6, 8에 SMES의 용량이 S=+j0.036인 것과 S=+j0.15인 것을 각각 부하 모선에 설치하였다.

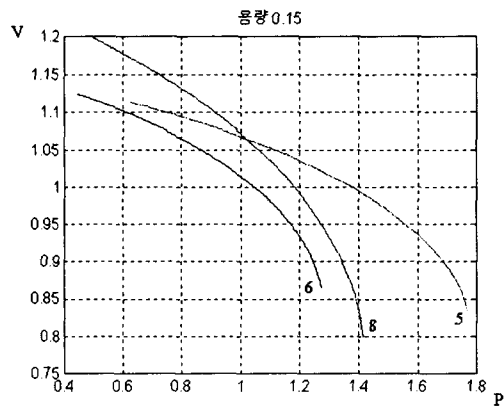


(a) SMES가 없는 경우
(a) Without SMES



(a) SMES 8, $Q_{SMES} = j0.036$

(b) SMES 8, $Q_{SMES} = j0.036$



(c) SMES 8, $Q_{SMES} = j0.15$

(d) SMES 8, $Q_{SMES} = j0.15$

그림 13 부하모선의 P-V 곡선
Fig. 13 P-V curve of load bus

표 2 SMES 위치에 따른 안정화 지표
Table 2 Performance index according to SMES site

SMES		부하모선			
용량	위치	5	6	8	전체계통
0.036	5	0.0099	0.0043	0.0063	0.0206
	6	0.0060	0.0071	0.0063	0.0194
	8	0.0099	0.0071	0.0111	0.0282
0.150	5	0.0437	0.0214	0.0254	0.0905
	6	0.0278	0.0314	0.0238	0.0830
	8	0.0437	0.0329	0.0460	0.1225

그림 13은 제시한 용량의 SMES를 부하모선 8에 설치 유무에 따른 부하모선들의 P-V곡선을 나타내고 있다. SMES 설치에 따른 정량적인 효과를 식(16)에 의하여 계산한 결과 표2와 같고, SMES의 출력이 j0.036인 경우에는 SMES를 8번에 설치했을 때 전체 계통의 안정화 지표가 0.0282, SMES의 출력이 j0.15인 경우에는 SMES를 8번에 설치했을 때 전체 계통의 안정화 지표가 0.1225로 가장 큰 효과가 있음을 알 수 있다. SMES의 설치위치를 기준으로 보았을 때, SMES설치 모선의 안정화 효과가 가장 큰 것을 볼 수 있으나 각 부하모

선을 기준으로 보면 8번 모선에 SMES를 설치하는 것이 가장 큰 안정화 효과를 가져옴을 알 수 있다. 그리고 각 부하 모선의 송전특성을 고려하는 계통 전체의 측면에서 보면, SMES의 최적의 적정 위치는 부하모선 8이다.

6. 결론

본 연구는 안정도 해석을 위한 SMES 장치의 모델링과 SMES에 의한 계통 안정화 효과를 극대화하기 위한 SMES의 적정 위치를 선정하는 것이다.

기존의 수학적 모델에 복잡한 시험함수를 적용하여 얻은 SMES 장치의 입출력 자료로 신경회로망을 학습시켰다. 제안된 모델의 타당성 검토를 위해 샘플계통에 고장을 상정해서 취득한 자료를 SMES의 수학적 모델과 학습된 신경회로망 모델에 적용시켰다. 두 모델의 응답을 비교한 결과 유효전력과 무효전력에 대한 오차가 각각 2.51[%], 0.24[%]로 제안된 방법의 타당성이 확인되었다.

계통의 과도안정도 해석을 위해 기존의 수학적 모델에 의한 해석과는 달리 제안된 SMES 신경회로망 모델의 적용 방법을 제안하였고, 외란시 SMES에 의한 계통안정화 효과를 정량적으로 나타내는 평가지수를 제시해서 계통안정화를 위한 SMES의 적정위치 선정방법을 보였다. 또한 전압안정도의 측면에서는 송전특성을 나타내는 P-V곡선으로부터 SMES 설치에 의한 부하모선별 계통 안정화 지표를 제시하였다. SMES위치별로 국부적 안정화 효과가 가장 큰 부하모선을 제시된 안정화 지표로부터 알 수 있었고, 아울러 전체 계통의 전압안정성을 극대화할 수 있는 적정위치를 구했다.

본 연구는 95년 기초전력공학공동연구소 연구비지원에 의한 결과임. (과제번호 : 95-지-08)

참 고 문 헌

- [1] Hideki Fujita, Masuo Goto and Yukio Kito, "Improve ment of Dynamic Stability in a Multi-Machine Power System by Means of SMES with Active Power Modulation Controlled by Frequency Deviation" IEE Japan, Vol 113-B, No. 1, pp. 42-48, 1994
- [2] Chi-Jui Wu, Yuang-Shung Lee "Application of simul taneous active and reactive power modulation of superconducting magnetic energy storage unit to damp turbine-generator subsynchronous oscillations " IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 8, No. 1, pp 63-70, 1993. 3.
- [3] Kazuhiko Ogimoto, "A Study of Damping of Power Oscillations by Superconducting Magnetic Energy Storage Unit", IEE Japan, Vol. 113-B, No. 6, pp. 665-673, 1993

- [4] Y. Mitani, K. Tsuji, Y. Murakami, " Application of Superconducting Magnet Energy Storage to Improve Power System Dynamic Performance", IEEE Trans. Vol. 3, No. 4, pp. 1418-1425, 1988
- [5] Yasunori Mitani, Kichiro Tsuji and Yoshishige Murakami, "A Method for Evaluation the stabilizing Effect of SMES in Power System" IEE Japan, Vol. 104-B, No. 9, pp. 17-24, 1984
- [6] Yasuharu Ohsawa, Hajime Miyauchi and Muneaki Hayashi, "Stabilizing Control for Power System by Means of Superconducting Magnetic Energy Storage" IEE Japan, Vol. 105-B, No. 1, pp. 23-30, 1985
- [7] Jack M. Zurada, Artificial Neural Systems, West, 1992, pp.16-235.
- [8] Paul M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability , IEEE Press, 1994, pp. 13-45.

저 자 소 개



김 정 훈 (金正勳)

1955년 9월 13일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1989년 미국 Penn. State Univ. 방문교수. 현재 홍익대 전자전기공학부 교수, 학부장.

Tel : (02) 320-1621

E-mail : kimjh@wow.hongik.ac.kr



임 재 윤 (林裁尹)

1961년 8월 4일생. 1984년 충북대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 대덕대학 전기과 교수.

Tel : (042) 866-0332

E-mail : jylin@mail.ddc.ac.kr



이 중 필 (李鍾弼)

1970년 12월 14일생. 1996년 충북대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 대덕대학 전기전자계열 강사.

Tel : (042) 866-0332

E-mail : jjpp@chollian.net