

계통안정화용 SMES의 운전특성을 고려한 모델링과 과도안정도 해석

이종필*, 남상천*, 임재윤*, 김정훈*
 *충북대학교 전기공학과, *대덕대 전기과, °홍익대학교 전기·제어공학과

SMES Modeling with Consideration of Operating Characteristics and Transient Stability Analysis

Jong-Pil Lee*, Sang-Cheon Nam*, Jae-Yoon Lim*, Jung-Hoon Kim*
 *Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National Univ.,
 *Dept. of Electrical Eng. Tae-Dok College,
 °Dept. of Electrical Eng. Hong-Ik Univ.,

Abstract - Super-conducting Magnetic Energy Storage(SMES) system is considered to be useful unit to power system stabilizer because of high efficiency and quick response. For effective operating of SMES, we need much studies on accurate modeling and interface characteristics of SMES.

In this paper, we propose useful method to SMES modeling using Artificial Neural Network. Interface technique of proposed model and criterion of stabilization effect is presented.

In addition, to demonstrate the validity of proposed method, the simulations were carried out on 3-machine 9-bus system.

1. 서 론

초전도 에너지 저장장치(Super-conducting Magnet Energy Storage : SMES)는 고효율, 빠른 응답특성, 유·무효전력 동시제어가 가능하기 때문에 계통 안정화 장치로서 고려되고 있다. 그러나 SMES 장치는 건설비용이 높고, 항상 저온으로 유지해야 하므로 상당한 유지비가 요구된다. 따라서 SMES장치의 효율적인 운용을 위해서는 SMES의 정확한 모델링과 계통 연계특성 [1,2]에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 계통 안정화용 SMES 장치를 계통에 연계하여 운용하는 경우, 계통 상태의 변화에 따른 SMES 장치의 운전 특성 등을 수학적 모델이 아닌 신경회로망을 이용한 모델링 방법을 제시하였다. 그리고 SMES장치가 포함된 계통에서 SMES의 계통 안정화 효과를 해석하는 경우, 제안된 신경회로망에 의한 SMES장치의 모델의 적용 방법을 제안하였다. 또한 계통에 SMES 장치의 설치 위치에 따른 안정화 효과를 정량적으로 나타내기 위하여, SMES 장치의 위치에 따른 발전기들의 위상각 변화를 근거로 안정화 지표를 제안하였다. 아울러 기존의 SMES장치의 수학적 모델을 기준으로 제안된 모델링 방법의 타당성을 사례연구를 통해 보였으며, 계통 해석시 제안된 모델의 적용 방법과 SMES의 설치 위치에 따른 안정화 효과에 관련한 지표를 사례연구 결과로 제시하였다.

2. 초전도 에너지 저장장치의 모델링

2.1 SMES 제어기 모델링

초전도 에너지 저장장치는 저장효율이 높고 대용량화가 가능하면서 유·무효전력제어에 있어서 매우 빠른 응답속도를 가지기 때문에 부하평준화 장치나 계통안정화 장치로 전력계통에 적용될 수 있다.

SMES는 크게 초전도 코일, 전력변환부, 그리고 제어

및 보호장치로 나눌 수 있다.

계통에서 요구하는 P_{SMES} , Q_{SMES} 는 SMES제어장치에서 그림1의 블록도에서와 같이 계산되고, 이 값에 의해 SMES는 출력을 내게된다. SMES는 전력변환기로 고속제어가 가능하기 때문에 시정수가 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러므로 SMES제어기의 출력을 SMES의 출력으로 간주할 수 있다.

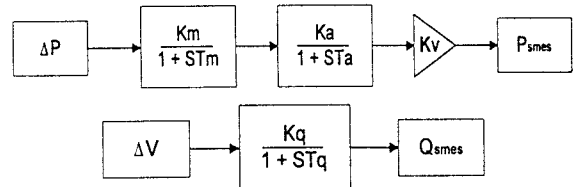


그림 1. 기존의 SMES 제어기

2.2 초전도 에너지 저장장치의 운전특성

SMES는 그 용도에 따라 제어기의 구성이 결정되며 중요한 제어변수는 SMES에 흐르는 직류전류가 되고 이는 싸이리스터의 점화각을 변화시켜 제어하게 된다. 또한 그 제어방식에 따라 유효전력제어, 유·무효전력 동시제어 등으로 구분된다. 현재는 GTO를 사용한 유·무효전력 동시제어가 사용되고, 일부구간에만 유효전력 우선제어방식이 사용된다. GTO를 이용할 경우 4상한 운전이 가능하다.

제어기에서 계산된 계통의 요구전력이 그 운전영역의 안에 있을 경우는 그 양을 모두 출력할 수 있지만 계통의 요구전력이 그 운전영역을 초과하는 경우에는 유효전력을 우선해서 출력하고 무효전력은 SMES가 낼 수 있는 가장 근접한 값을 출력하게 된다.

3. 신경회로망을 이용한 SMES모델링과 안정도 해석

3.1 신경회로망을 이용한 SMES모델링

수리적 모델에서는 계통안정도 해석시 수식이 복잡해지기 때문에 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 모델의 차수결정과 모델결정에 따라 그 모델의 특성이 달라지므로 모델의 타당성까지도 문제가 될 수 있다. 그러나, 신경회로망을 이용하는 경우에는 입·출력 자료만 확보되면 모델링이 가능하므로 수식의 복잡화나 차수결정, 모델결정에 의한 오차 등에 무관한 범용성을 가지고 있다. SMES의 유효전력 출력을 식별하기 위한 신경회로망은 식(1)과 같이 유효전력의 변화량을 입력변수로, 그리고 출력 변수로는 SMES의 유효전력 출력을 사용하여 학습하였다. 신경회로망에 의한 계산된 출력은 식(2)와 같이 비선형함수인 시그모이드 함수를 이용하였

다. 식(3)은 참값에 해당하는 SMES의 출력과 신경회로망에서 계산된 출력의 편차로 오차를 나타내며, 이와 같은 오차를 최소화하기 위하여, 모델인 신경회로망의 가중치를 수정한다. SMES의 무효전력 출력도 유효전력과 동일한 방법으로 구성하였다. 사용된 다층형 신경회로망의 입력층과 출력층은 각각 11개의 뉴런과 1개의 뉴런으로 구성되었으며, 은닉층은 20개의 뉴런으로 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

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

$$P_{ANN}(t) = F[X(t)] \quad (2)$$

$$e(t) = P_{SMES}(t) - P_{ANN}(t) \quad (3)$$

여기서, F : 비선형함수

$X(t)$: 입력벡터

3.2 SMES모델의 안정도 해석 적용 알고리즘

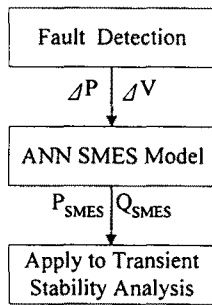


그림 2. SMES 모델의 안정도 해석 적용

계통에 고장이 발생하는 경우 어떤 시점에 있어서 발전기의 동요방정식과 조류계산에 의해 각 모선의 유, 무효전력과 모선전압을 계산하게 된다. 그리고 계산된 유, 무효전력은 다음 시점의 동요방정식 계산에 적용하게 되는데 이때 SMES가 설치되어 있는 모선에서의 유효전력과 전압의 변화량을 식(2)와 같이 학습된 SMES모델의 입력값으로써 얻어진 출력값을 다음 시점의 동요방정식과 조류계산에 포함시켜 SMES의 안정도 효과를 볼 수 있다.

SMES의 계통안정화 효과를 분석하기 위해 다음과 같은 평가함수를 사용하였다.

$$PI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (4)$$

$$COI = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k |PI_{i(REF)} - PI_{i(SMES)}| \quad (5)$$

여기서 δ_i : i 발전기의 위상각

$PI_{(REF)}$: SMES 설치 이전의 PI값

$PI_{(SMES)}$: SMES 설치 이후의 PI값

4. 사례 연구

4.1 샘플 계통

본 연구에서 사용된 샘플 계통은 그림3과 같은 3기 9모선 계통을 사용하였다[3].

7번모선 또는 9번모선에서 3상지락고장이 발생하고 0.2초후에 제거되었을 때, SMES가 없는 경우와 각 부

하모선에 SMES가 연결되어 있는 경우에 대해 발전기 위상각의 변화를 분석하였다.

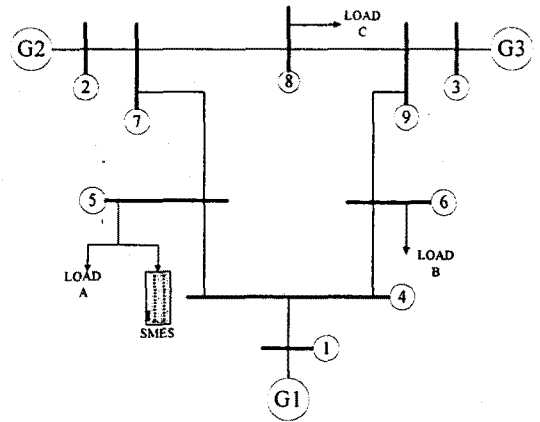


그림 3. 샘플 계통

4.2 신경회로망을 이용한 SMES모델링 결과

신경회로망을 학습시키기 위해 식(6), (7)과 같은 함수에 의해 SMES의 수학적 모델의 입력신호를 만들어 SMES모델의 출력을 얻었다. 이렇게 얻어진 입력력 자료를 이용해서 신경회로망에 의한 SMES모델을 구축하였다.

$$u(t) = \sin \frac{2\pi t}{250} \quad (6)$$

$$g(u(t)) = 0.7 \sin(\pi u(t)) + 0.2 \sin(2\pi u(t)) + 0.1 \sin(5\pi u(t)) \quad (7)$$

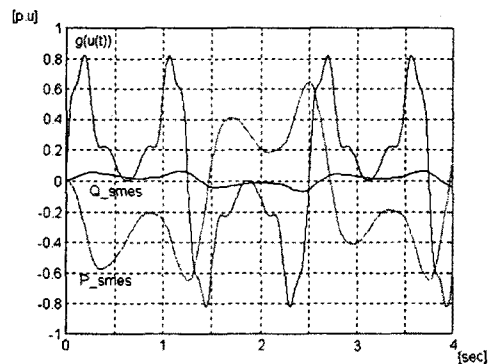
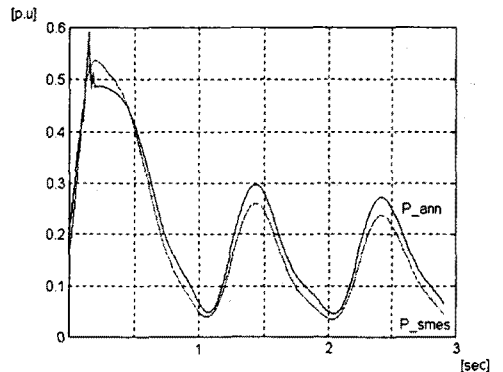
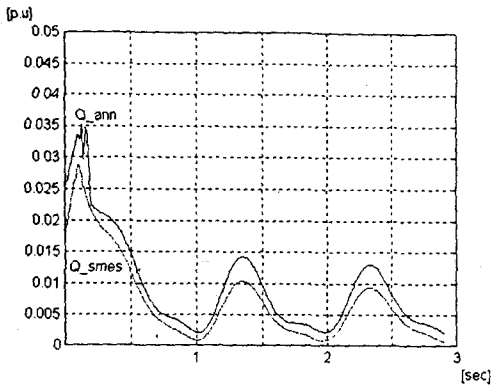


그림 4. 신경회로망 학습자료



(a) 유효전력



(b) 무효전력

그림 5. 학습된 신경회로망에 의한 SMES출력 추정

이러한 학습자료로 학습한 후 위의 샘플계통에서 얻은 자료를 사용해서 신경회로망의 학습 정도를 확인한 결과 유효전력에 대한 오차는 2.51[%], 무효전력에 대해서는 0.24[%]로 그림5와 같이 매우 정확히 모델링 되었음을 알 수 있다.

4.3 SMES가 포함된 계통의 과도안정도 해석

4.2절에서 학습된 신경회로망 모델을 샘플계통의 각 부하모선에 연계했을 때, 고장별, SMES용량별, SMES 설치위치별 안정화 지표는 식(4), 식(5)에 의해 계산한 결과 표1과 같다.

표1 각 고장에 대한 평가합수값

고장위치	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 8번모선에 설치했을 경우가 가장 효과적으로 계통을 안정화 할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 8번모선이 사고지점으로부터 가까운 위치에 있고, 부하의 용량도 가장 작기 때문에 안정화 효과가 큰 것으로 생각된다.

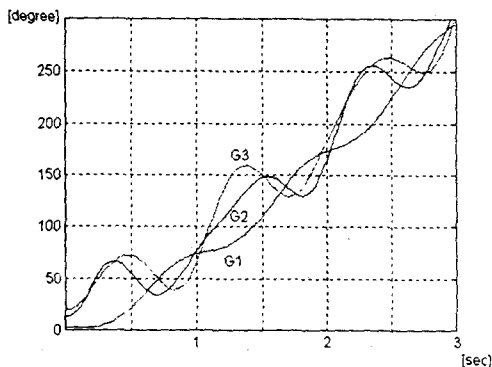


그림 6. 9번모선 고장에 대한 발전기들의 위상각 변화기준

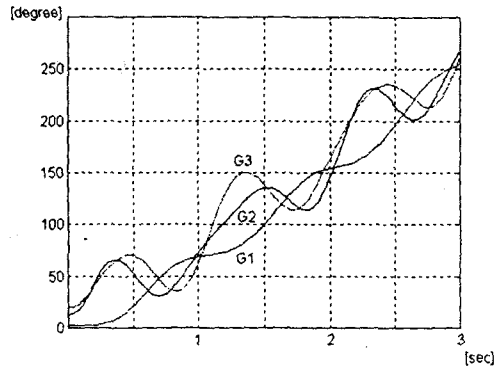


그림 7. 8번모선에 용량 15(MVA)의 SMES를 설치했을 때 발전기들의 위상각 변화

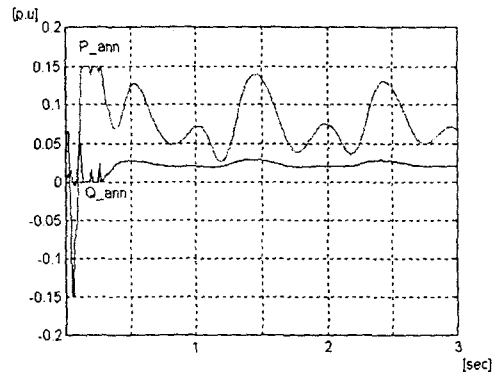


그림 8. SMES의 출력

그림6~그림8은 9번모선에 고장이 발생하고, SMES가 없는 기준 경우와 SMES가 8번모선에 설치되어 있는 경우의 각 발전기들의 위상각 변화를 보이고 있다. 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 제한받는 것이 그림8에서 보이고 있다. 유효전력 우선제어 모드로 동작하기 때문에 SMES의 유효전력이 0.15(p.u)일 때 무효전력의 출력은 없다.

5. 결 론

본 연구에서는 계통안정화용 SMES장치를 기존의 수학적 모델을 기준으로 신경회로망을 이용한 모델링 방법과 제안된 모델을 계통의 과도안정도 해석에 적용하는 방법을 제시하였고 사례연구를 통해 그 유용성을 보였다. 또한 고장위치, SMES의 위치 및 용량에 대해 각각 평가지표를 이용해서 SMES의 계통안정화 효과를 정량적으로 표시하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여
기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] 기초전력공학공동연구소, "초전도 전력기기의 적정 규모의 선정 및 계통 적용기술 개발(중간보고서)", 95-지-08, 1997, 8.
- [2] 이재민 외, "계통안정화를 위한 SMES의 적정위치와 용량설정에 관한 연구", 하계학술대회 논문집, pp. 794-796, 1997, 7.
- [3] Paul M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Press, pp. 13-45, 1994