

계통안정화를 위한 SMES의 적정위치와 용량설정에 관한 연구

*이재민, *임재윤, °이종필, *김정훈

*홍익대학교 전기제어공학과, *충남전문대학 전기과, °충북대학교 전기공학과

A Study on the Optimal Site and Capacity of SMES for Power System Stabilization

*Jae-Min Lee, *Jae-Yoon Lim, °Jong-Pil Lee, *Jung-Hoon Kim,

*Dept. of Electrical Eng. Hong-Ik University, Seoul, 121-791

*Dept. of Electrical Eng. Chung-Nam Junior College, 305-343

°Dept. of Electrical Eng. Chung-Buk National University, 361-763

Abstract

The superconducting magnetic energy storage (SMES) system is considered to be useful to charge or release an energy in power system because of the high efficiency and quick response. But we need much capital to construct and to operate a SMES. A site and capacity of SMES are important elements for effective operating and planning.

In this paper, we proposed a performance function to determine an optimal site and capacity of SMES according to variety condition of power sytem such as fault point.

In addition, to demonstrate the validity of a proposed method, the simulations were carried out on two-machine 5-bus system.

1. 서 론

국내외에서 주목되고 있는 초전도 에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage ; SMES)는 고효율이고, 고속의 에너지 충방전이 가능하며, 유무효전력을 동시에 제어할수 있는 장점이 있다. 이 때문에 전력계통의 안정화, 부하평준화 장치로서 응용이 고려되고 있다. 지금까지의 연구는 시뮬레이션을 통해서 계통에 SMES를 설치한 경우 동요에 대한 억제효과에 관한 것이 대부분이었다. [1-4].

그러나 SMES는 건설비용이 높고, 항시 저운을 유지하여야 함으로 상당한 보수유지비가 요구되었다. 그러므로, 외란이 발생이 발생했을 때, 주어진 계통에 SMES를 어디에 설치하는 것이 효과적일 것이며, 또한 어느정도의 용량을 설정하는 것이 경제적인가에 대한 검토가 최적운용의 관점으로부터 필요하다.

본연구에서는 계통의 고장위치에 따른 SMES의 적정위치를 시뮬레이션을 통하여 검토하고, 또한 평가함수를 도입하여 고장위치에 따른 적정위치를 선정하였다. 그리고 어떤 위치에서 고장시 SMES의 용량에 따른 억제효과와 적정용량을 설정지표를 제

시하였다.

2. 동요억제를 위한 SMES의 적정위치

2.1 Model

n대의 발전기로 구성된 계통에 m모선에 SMES가 연계되어 있고, 발전기의 과도 리액터스 배후 전압은 일정하다고 하면 발전기의 동요방정식은 식(1)과 같다.

$$M \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad (1)$$

이 때, SMES의 유효전력 충방전은 식(2)와 같이 발전기의 각속도 변화분에 의해 결정되고, 무효전력은 식(3)과 같이 SMES 연계모선의 전압의 변화에 의해 결정되어진다.

$$P_s = \frac{k_1}{1+sT} \Delta u \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{k_2}{1+sT} |\Delta v| \quad (3)$$

여기서 $\Delta w = w_{ref} - w$

$|\Delta v|$: SMES 연계 모선전압 변화

2.2 과도안정도 해석방법

계통에 고장이 발생하는 경우 식(1)로 부터 계산된 각속도와 전압의 변화에 따라 SMES의 P_s , Q_s 가 발생되며, SMES의 P_s , Q_s 는 SMES의 연계 모선의 전압에 의하여 식(4)와 같이 등가 어드미턴스로 표현하여 과도안정도 해석 과정의 조류계산에 이용된다. 식(1)-(3)의 미분방정식은 Runge-Kutta 방법에 의해 계산할수 있다.

$$Y_{SMES} = \frac{P_s + jQ_s}{V_s^2} \quad (4)$$

여기서 V_s : SMES 연계 모선전압

P_s , Q_s : SMES 유무효출력 (충,방전)

2.3 고장위치에 따른 SMES 적정위치 결정

고장조건과 고장위치에 따른 SMES의 적정위치 선정은 계통의 어떠한 지점의 고장 조건하에서 SMES를 설치가능한 각모선에 연결하여 각각의 과도안정도 해석 결과인 발전기들의 각속도와 상차각 변화로부터 SMES 효과를 정성적으로 분석할 수 있다. 또한 어떠한 지점의 고장에 대한 동요억제를 위한 SMES 설치장소의 결정은 다음과 같은 평가함수에 의해 찾을 수 있다.

$$PI = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\delta_{1t} - \delta_{2t}| \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{PI_{ij(R)} - PI_{ij(F)}}{PI_{ij(R)}} \quad (6)$$

여기서 i : SMES 설치 모선

j : 고장 발생 모선

$PI_{ij(R)}$: SMES 설치 이전의 PI 값

$PI_{ij(F)}$: SMES 설치 이후의 PI 값

$|\delta_{1t} - \delta_{2t}|$: 발전기의 상차각

3. 동요 억제를 위한 SMES 적정용량

어떠한 고장에 대한 효과적으로 동요억제를 하기 위한 적정 SMES 용량은 용량을 증분시켜서 시뮬레이션을 실행하여 각 용량에 대하여 식(6)과 같이 평가함수를 얻을 수 있다. 이때 설정된 고장에 대해 효과적으로 동요억제를 크게 하는 최적 SMES의 용량은 식(7)에 의해 결정될 수 있다.

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial w_s} \leq \epsilon_0 \quad (7)$$

여기서 w_s : SMES 용량

ϵ_0 : SMES 최적 용량지표

또한 계통의 고장에 대한 동요억제 효과 SMES에 의해 나타나기 시작하는 최저용량, 즉 임계용량은 식(8)로부터 결정될 수 있다.

$$P \geq \epsilon_c \quad (8)$$

여기서 ϵ_c : SMES 임계 용량지표

4. 사례연구

4.1 샘플계통

전력계통 안정화를 위한 SMES 적정위치와 용량을 결정하기 위한 샘플계통으로 그림1과 같이 2기 5모선 계통으로 구성하였다[5].

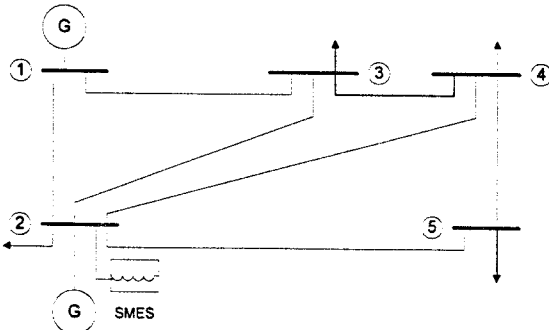


그림 1. 2기 5모선 샘플계통

4.2 고장위치에 따른 SMES 효과

계통의 모선5에 3상단락의 고장제거시간이 0.12초인 동일한 고장 조건에서 SMES를 모선 2에 설치한 경우와 설치하지 않은 경우, 그림 2의 발전기 상차각과 각속도의 변화로부터 SMES의 도입 효과를 파악할 수 있다.

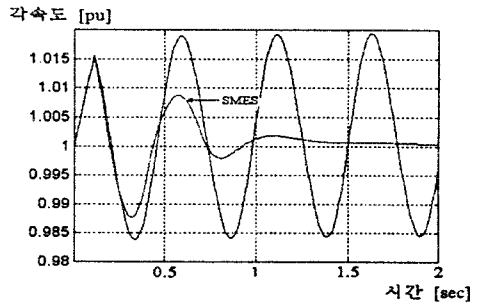
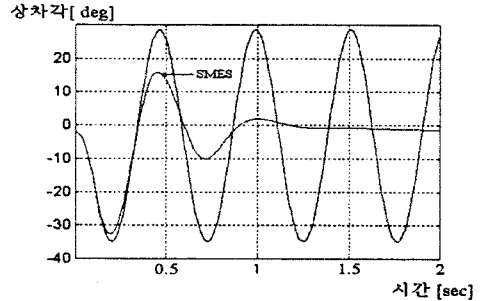


그림 2. SMES 설치시 위상각과 각속도의 변화

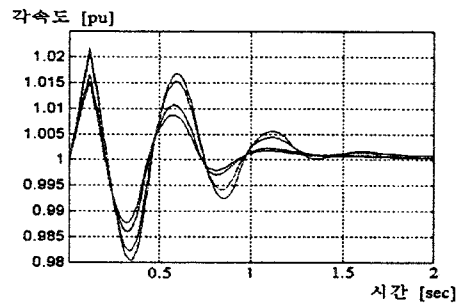
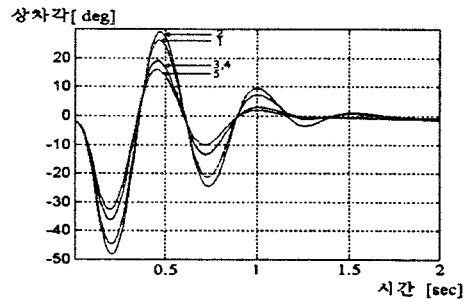


그림 3. 모선 2 SMES 설치시 고장별 발전기의 상차각과 각속도

SMES가 모선2에 설치되어 있고, 각 5개 모선에서 3상 단락 고장을 상정 하였을 때 발전기 상차각과 발전기 2의 각속도는 그림 3과 같다. 이와 같은 고장에서는 모선2에 설치한 경우 5모선 고장에 대해

서 가장 억제 효과가 있음을 볼 수 있다. 또한 설정된 평가 함수를 도입하여 각 고장 위치별, SMES 위치에 따른 평가 지표를 계산 한 결과는 표1과 같다. 고장 5모선의 경우는 평가 지표가 가장 큰 모선 2에 SMES를 설치하여야 할 것이며, 이것은 그림 3의 결과와도 일치한다. 그리고 표1에 의하면 사례연구 대상의 샘플 계통에서는 SMES의 위치는 중요와 직접적인 관계가 있는 발전기 모선이 중에서 적은 출력을 갖는 발전기에 설치하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또한 SMES에 의한 효과는 부하가 큰 모선 고장시 발휘함을 알 수 있다.

표 1. 고장위치별 SMES위치에 따른 평가지표 P

고장위치 SMES위치	모선 1	모선 2	모선 3	모선 4	모선 5
모선 1	0.6087	0.5862	0.6641	0.6657	0.6837
모선 2	0.6552	0.6344	0.6943	0.6953	0.7115
모선 3	0.6095	0.5866	0.6627	0.6641	0.6836
모선 4	0.6092	0.5862	0.6631	0.6638	0.6828
모선 5	0.6093	0.5858	0.6674	0.6678	0.6776
$P_{I(R)}$	26.4698	28.4260	22.0419	21.9262	20.1261

4.3 SMES 용량에 따른 효과

고장에 따른 SMES용량의 효과를 파악하기 위하여 4.2절의 사례연구에서 평가지표가 전반적으로 큰 경우로 모선 5 고장에서는 모선 2에 SMES를 설치하는 것이 유리하다고 보았다. 이때의 적정용량을 결정하기 위하여 고장제거시간이 0.12초일 경우에서 SMES의 점점 용량을 증분하여 시뮬레이션 한 결과 SMES의 용량에 따른 각속도의 변화는 그림 4와 같았으며, SMES 용량별 평가지표는 그림 5와 같이 나타내었다.

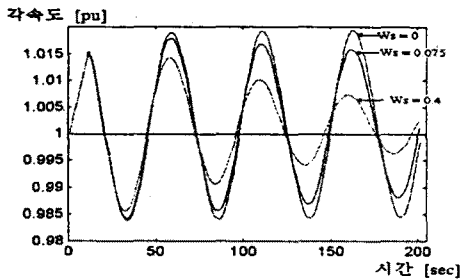


그림 4. SMES 용량에 따른 각속도의 변화

그림 5의 결과, 평가 지표는 용량이 적은 부분에서는 급격히 증가하다가 어떤 용량 이후 부터는 용량이 증가하여도 평가지표 변화는 없다. 이것은 이에 설정된 용량의 SMES가 주어진 고장 조건에서 중요 억제가 충분히 반영되어 이후의 용량에 대해서는 SMES의 효과가 완화되었음을 의미한다. 그림 5의 경우 경제적이고 효과적인 적정용량은 $W_{so} = 0.4$ [p.u] (400MVA), 임계용량은 $W_{sc} = 0.075$ [p.u] (75MVA)로 된다.

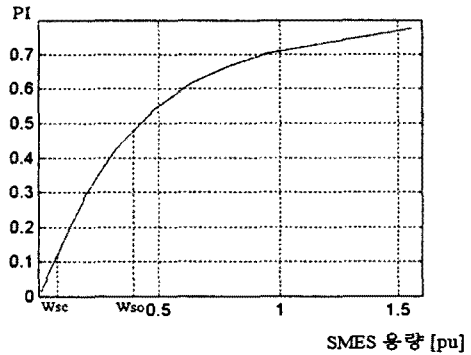


그림 5. SMES 용량에 따른 평가 지표

5. 결론

계통안정화를 위한 SMES의 적정위치와 용량에 관한 연구로 SMES를 포함하는 과도안정도 해석을 위한 SMES의 표현 방법과 각 조건에 따른 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 그리고 정량적인 방법에 의하여 위치를 선정하기 위하여 평가함수를 도입하였다. 또한 설정된 고장에 따른 최적의 SMES용량을 결정하기 위하여 평가함수를 도입하고, 본 연구 방법을 사례연구를 통해서 검토하였다. 앞으로, 본 연구의 검토와 보안을 위해서 대규모 계통에 적용하여 다양한 사례연구 결과의 제시와 함께, 용이하게 SMES의 적정 위치 및 용량 결정을 위한 알고리즘을 개발할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Yasunori Mitani, Kichiro Tsuji and Yoshishige Murakami, "Fundamental Study on the System Capacities of SMES for the Stabilization of Power System" IEE Japan, Vol 109-B, No 6, pp 251-257, 1989
- [2] 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
- [3] Yasuharu Ohsawa, Hajime Miyachi 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
- [4] Hideki Fujita, Masuo Goto and Yukio Kito "Improvement 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
- [5] Glenn W. Stagg, Ahmed H. El-Abiad "Computer Methods in Power System Analysis" MCGRAW-HILL, 1968, pp. 368-399