

저장용 및 안정화용 초전도 에너지 저장장치의 투자경제성 및 적정규모 산정에 관한 연구

°김주락\* 이종필\* 임재윤° 김정훈\*  
 충익대학교 전기제어공학과\* 충북대학교 전기공학과\* 대덕대학 전기과°

A Study on Determining an Optimal Size and Economical Investment of SMES

J.R. Kim\* J.P. Lee\* J.Y. Lim° J.H. Kim\*  
 Hong-ik Univ.\* Chungbuk Nat'l Univ.\* Tae-Dok College°

**Abstract** - The superconducting magnetic energy storage (SMES) system which has characteristics of high efficiency and rapid response is a way to maximize a utility's generation and transmission capacity. But SMES is required for much capital and operating cost. Therefore, It is important to determine the optimal size of SMES for constructing and operating.

In this paper, we proposed a method of determining an optimal size of a large scale of SMES for energy storage and a small scale of SMES for stabilizing power system.

1. 서 론

차세대 에너지 저장장치로서 관심이 고조되고 있는 초전도 에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage; SMES)는 유·무효전력을 동시에 제어할 수 있는 장점 때문에 전력시스템에서 부하평준화 및 계통안정화용으로 응용이 고려되고 있다.

SMES의 에너지 저장규모는 사용목적에 따라 달라지는데, 그중 부하평준화에 기여하는 저장용 SMES는 일(日)단위로 에너지를 저장할 수 있는 규모로서 최소한 20MWh는 되어야 한다고 알려져 있다. 그러나 고가의 개발 투자비로 인해 아직 에너지 저장용 SMES의 전력 시스템 적용은 본격적으로 이루어지지 않고 있지만, 2000년대 초반에 전력시스템에 채택될 것으로 전망되고 있다. 한편, 전력시스템의 순시전력보상 등에 이용되는 안정화용 SMES는 0.5MWh~1MWh규모가 적정한 것으로 알려져 있으며, 주요 선진국들은 현재 개발과정을 거쳐 전력시스템에 적용, 운전 준비중(1,2)에 있다. 그러나 SMES의 전력시스템 적용은 고가의 개발비 및 설치비가 소요되므로 국내의 경우 기술자립측면의 연구만 진행되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 SMES의 전력시스템 적용시 문제가 되는 적정투자규모와 경제성을 분석하기 위하여 저장용 SMES의 경우 확률적 운전모형과 최대원리(3)를 이용한 투자계획 모형으로 구성된 적정 규모산정 알고리즘을 제안하고, 안정화용 SMES의 경우 계통 안정화를 위한 기능적 적정규모를 산정하여 그 비용과 이득을 분석하는 방법을 제안한다.

2. 저장용 SMES의 적정규모산정

2.1 운전모형 및 설비한계비용 계산

2.1.1 확률적 운전모형

저장용 SMES의 운전모형에서는 주어진 전력 부하를 만족하면서 SMES와 발전소가 경제적인 운전을 하도록 하여 SMES의 운전에 따른 이득을 구하는 것이 목적이다. 또한 발전기 및 SMES 가능용량의 불확실성을 고려하기 위해 정규분포를 이루는 특성이 비슷한 발전소 및

SMES를 몇 개의 군으로 묶어 이산화법을 사용하였다. 운전모형의 목적함수는 다음과 같다.

$$OC = \sum_{j=1}^N s_j [ \text{Minimize} \sum_{t \in C} \sum_{i \in D} C'(P_i^t, P_c^t, P_d^t) \cdot \Delta T^t ] \quad (1)$$

그리고 제약조건은 다음과 같다.

i) 기본 수급조건

$$\sum_{i \in I} P_i^t = L^t \quad (t \in C \text{ and } t \in D) \quad (2)$$

ii) SMES가 에너지를 충전할 때 수급조건

$$P_c^t = \sum_{i \in I} P_i^t - L^t \quad (t \in C) \quad (3)$$

iii) 에너지 충전시 충전 전력과 에너지에 대한 제약조건

$$\sum_{t \in C} P_c^t \cdot \Delta T^t = E = \sum_{i \in I} E_{SMES,i}^t \quad (4)$$

iv) 각 SMES군의 충전전력의 합은 총 충전전력

$$P_c^t = \sum_{i \in I} P_{SMES,i}^t \quad (t \in C) \quad (5)$$

v) j군의 SMES에 충전된 총에너지

$$E_{SMES,j}^t = \sum_{i \in I} P_{SMES,i}^t \cdot \Delta T^t \quad (6)$$

vi) 에너지 방전시 수급조건

$$P_d^t = L^t - \sum_{i \in I} P_i^t \quad (t \in D) \quad (7)$$

vii) SMES가 에너지를 방전할 때에는 효율이 반영된다.

$$E_{SMES,j}^t = \eta E_{SMES,j}^t \quad (8)$$

viii) 방전 시간대에서의 방전전력과 에너지의 제약조건

$$\sum_{t \in D} P_d^t \cdot \Delta T^t = \eta E = \sum_{i \in I} E_{SMES,i}^t \quad (9)$$

ix) j군의 SMES의 방전 총 에너지

$$E_{SMES,j}^t = \sum_{t \in D} P_{SMES,j}^t \cdot \Delta T^t \quad (10)$$

x) 방전시간대 j군 SMES의 방전전력과 총 방전전력

$$P_d^t = \sum_{i \in I} P_{SMES,i}^t \quad (t \in D) \quad (11)$$

xi) 발전기의 출력에 대한 제약조건

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad i=1, \dots, k, t=1, \dots, NT \quad (12)$$

xii) SMES의 충전 또는 방전전력에 대한 제약조건

$$P_{SMES,j}^t \leq P_{SMES,j}^t \leq P_{SMES,j}^{\max} \quad j=k+1, \dots, n \quad (13)$$

xiii) 초전도 코일의 크기에 따른 충전에너지의 범위

$$E_{SMES,j}^t \leq E_{SMES,j}^t \leq E_{SMES,j}^{\max} \quad j=k+1, \dots, n \quad (14)$$

xiv) t시간에서 충전할 수 있는 최대 에너지

$$P_{SMES,j}^t \cdot \Delta T^t \leq \min \left\{ E_{SMES,j}^{\max} - \sum_{i=0}^{t-1} P_{SMES,j}^i \cdot \Delta T^i, P_{SMES,j}^{\max} \cdot \Delta T^t \right\} \quad (15)$$

이때,  $P_{SMES,j}^t \cdot \Delta T^t = E_{SMES,j}^t - \sum_{i=0}^{t-1} P_{SMES,j}^i \cdot \Delta T^i \quad (t \in C)$

xv) 식(13)의 최소에너지에 대한 제약조건

$$P_{SMES,j}^t \cdot \Delta T^t \geq \max \left\{ E_{SMES,j}^{\min}, P_{SMES,j}^{\min} \cdot \Delta T^t \right\} \quad (t \in C) \quad (16)$$

단,  $E_{SMES,j}^{\min}$ 가 충전된 후에는  $P_{SMES,j}^{\min} \cdot \Delta T^t$ 가 선택된다.

xvi) t시간에서 방전할 수 있는 최대 에너지

$$\sum_{i=0}^{t-1} P_{SMES,j}^i \cdot \Delta T^i \leq \min \left\{ E_{SMES,j}^t - \sum_{i=0}^{t-1} P_{SMES,j}^i \cdot \Delta T^i, \sum_{i=0}^{t-1} P_{SMES,j}^i \cdot \Delta T^i \right\} \quad \text{단, } (t \in D) \quad (17)$$

이와 같은 운전모형의 흐름도는 그림 1과 같다.

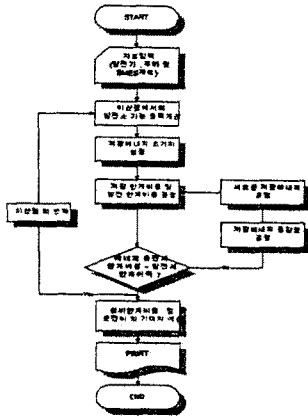


그림 1. 운전모형 흐름도

### 2.1.2 설비한계비용

설비한계비용은 설비를 한 단위 증설하였을 때 발생하는 운전비와 공급지장비의 증분비용을 말하는 것으로 투자결정에 있어 중요한 지표가 된다. 본 논문에서는 설비한계비용을 부하 및 발전출력의 불확실성을 고려하여 그 확률에 대한 기대치로 나타내며, 운전모형에서 SMES의 최대충전용량과 최적 저장수준에 따른 모든 경우의 수를 고려하여, 이 중 실제로 발생하는 경우에 대한 설비한계비용계산의 접근법을 제안한다.

#### 2.1.2.1 SMES의 최대 용량만큼 충전하는 경우

각 부하구간에서 SMES의 최대 용량만큼 전력을 충전하는 경우의 설비한계비용은 다음과 같이 두 경우로 나누어 생각할 수 있다.

- i) 부하 시간대에서 SMES의 용량이 최적 저장 수준보다 적은 경우 : SMES의 용량이 한 단위 증가하면 에너지 한 단위를 더 충전하여 SMES효율만큼 방전을 하므로 단위에너지의 충전비용과 방전으로 인한 이득의 차이만큼 설비한계비용이 발생한다.
- ii) 부하 시간대에서 SMES의 용량이 최적 저장 수준과 같거나 큰 경우 : SMES의 용량이 한 단위 증가하여도 최적 저장수준을 넘어 에너지를 충전할 수 없기 때문에 설비한계비용은 발생하지 않는다.

#### 2.1.2.2 SMES 최대 용량만큼 충전하지 않는 경우

각 부하구간에서 SMES 용량만큼 에너지를 충전하지 못하는 경우에는 SMES 설비를 한 단위 더 투자하여도 기존의 SMES 설비에 에너지를 충전할 수 있는 여유가 있기 때문에 설비한계비용은 발생하지 않는다.

## 2.2 적정 투자규모 선정

최적 투자규모 선정을 위한 경제모형은 고려 대상기간 동안만 SMES가 운전한다고 보아 검토대상기간 말기에 잔존가치를 최소화하는 한계기간모형을 채택하였다.

목적함수인 총비용은 투자비, 운전비, 공급지장비 및 잔존가치로 구성되며, 이를 최소화하기 위해 최적화 기법인 최대원리를 도입하여 최적조건을 산출한다. 조건식으로 나타나는 투자수익은 설비한계비용, 투자단가 및 잔존가치를 이용하여 계산되며 이 결과를 이용하여, 설비의 새로운 투자용량을 결정하게 된다. 최대경사법을 이용한 반복계산을 통하여 투자수익이 허용오차 범위 이내로 수렴하면 최적 투자량이다.

## 3. 안정화용 SMES의 경제성분석

### 3.1 경제성 분석 개요

안정화용 SMES의 경제성분석은 총비용 비교법으로 총비용과 총이득을 비교하는 방법을 채택한다. 한편, 안정화용 SMES는 전력시스템 적용시 위치와 용량에 따라 안정화 효과가 다르게 나타나므로 경제성분석시 지역선정과 기능적 적정규모의 산정이 선행되어야 한다. 그 후 SMES의 비용과 이득을 계산하여 비교하게 된다.

### 3.2 SMES 및 대상기의 적정 규모 선정

안정화용 SMES와 비교 대상기의 규모산정은 동일한 계통에서 동일한 안정화효과를 발휘해야 하는 전제조건이 만족되어야 한다. 예를 들어 계통의 전압유지 측면을 고려한다면, 계통내 전압유지를 위한 SMES의 적정규모 및 같은 효과를 가진 SVC의 규모를 산정한다. 이때 SVC의 비용이 SMES의 이득이 되며 기동비용 절감, 순동예비력 확보, 과도 안정도 향상 등의 효과를 비유화하여 이득을 분석한다.

### 3.3 안정화용 SMES의 경제성 분석

#### 3.3.1 안정화용 SMES의 비용

안정화용 SMES의 비용은 참고문헌[2]을 기초로 curve-fitting을 통해 식 (17)과 같이 유도하였다.

$$C_{SMES} = 23.35 + 0.05783 \cdot X + 0.000045 \cdot X^2 \quad (17)$$

단,  $C_{SMES}$ : SMES 비용(M\$)     $X$ : SMES용량(MVA)

#### 3.3.2 안정화용 SMES의 이득분석

안정화용 SMES의 전력시스템 적용시 발생하는 영향들은 전압안정도 향상, 과도안정도 향상, 부하추종, 기동비용 절감, 비례제한의 보상, 발전기의 최적 부하분담, 환경적가치 등이 있다.

이러한 이득들의 분석 방법은 두가지가 있는데 첫째, 동일한 기능을 발휘하는 기기들의 규모를 선정하여 그 비용을 SMES의 이득으로 추정하는 방법과 둘째, 안정화용 SMES로 인하여 전력시스템에 나타나는 영향들을 비유화하여 이득을 추정하는 방법이 있다.

본 논문에서는 이 두가지 방법의 절충안을 사용하여 안정화용 SMES의 이득을 추산한다.

## 4. 사례연구

### 4.1 저장용 SMES의 적정규모선정

#### 4.1.1 입력자료

사례연구를 위한 입력자료는 표 1, 2와 같다.

표 1. 부하입력자료

시간대	1	2	3	4	5	6	7
부하(MW)	240	210	170	120	90	60	30

표 2. 발전소군 입력자료

G	발전 단가 [₩/kW]	최대출력 (MW)	가동확률
1	6.742	40	0.95
2	8.95	40	0.98
3	21.86	50	0.98
4	32.874	50	0.98
5	39.966	60	0.98

사례연구 수행시 SMES는 한가지 형태만 설치되어 있고, 송배전 손실은 없다는 가정하에 수행하였다.

#### 4.1.2 결과분석 및 검토

그림 2는 운전 시뮬레이션의 결과인 SMES의 설비한계비용을 SMES 용량별로 나타낸 것이다.

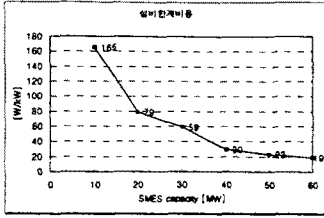


그림 2. SMES용량별 설비한계비용

표 3. 적정규모 산정결과

적정규모 [kW]	반복횟수 [회]	수렴오차
50,354	100	0.037

표 3은 시뮬레이션 결과인 저장용 SMES의 적정 투자용량을 나타낸 것이다. 또한 현실적인 투자를 위한 정수규모는 표 4와 같다.

표 4. 저장용 SMES의 최적 정수 규모

SMES 규모 [kW]	최적규모 [kW]	대수(실수)	대수(정수)	최적 정수규모 [백만원]	총비용
50,000	50,354	1.007	1	50,000	28,853

#### 4.2 안정화용 SMES의 경제성 분석

본 논문에서는 두가지의 계통자료 취득에 따라 각각의 경우에 대한 사례연구를 수행하였다. 먼저 3기 9모선의 모의 계통에서는 SMES의 일부기능에 대한 대체기의 비용을 이득으로 계산하고, 경인지역 계통에서는 SMES가 계통에 미치는 영향을 이득으로 비용화하는 방법을 사용한다.

##### 4.2.1 전압유지 기능에 따른 이득 분석

전압유지를 위한 SMES의 적정규모 산정 사례계통으로 3기 9모선으로 구성하였다. 그림 3과 같은 계통에서 부하가 10% 증가하였을 때 SMES가 무효전력 보상으로 기준 전압을 유지하는 적정규모를 산정하였다.

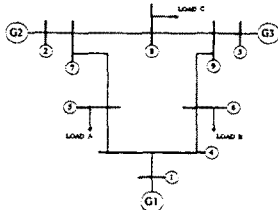


그림 3. 3기 9모선 사례계통

사례연구 결과 SMES가 0.9Mvar/MVA의 비율로 무효전력을 방전하는 경우에 10.13MVA의 규모에서 전압 안정화 효과를 발휘했고, 0.5Mvar/MVA의 비율일 때 적정규모는 13.15MVA 이었다. 이때 SMES와 동일한 효과를 기능을 가진 SVC의 규모와 그 비용은 표 5와 같으며, SVC의 비용이 SMES의 전압유지기능에 따른 이득이 된다.

표 5. SVC의 규모 및 비용

대체기기	규모	비용(백만원)
SVC	10.15 (Mvar)	29

##### 4.2.2 경인지역

사례계통으로 선정된 경인지역은 전원과 부하중심이 떨어져 있는 이유로 전력수급과 전압안정도 및 과도 안정도에 대한 문제가 발생할 것으로 사료되어 안정화용 SMES의 적용시 확실한 효과가 있을 것으로 기대된다.

SMES의 규모는 100MVA, 1MWh로 산정하였으며, 자료의 부족으로 전압유지와 안정도 향상에 대한 이득만을 분석할 수 있었다.

SMES의 비용은 230,400백만원 이고, 이때 SMES의 이득은 표 6과 같다.

표 6. SMES의 이득

	전압유지	안정도 향상
이득(백만원)	282	5,738

전압 유지와 안정도 향상에 따른 SMES의 수명동안의 총 이득은 221,972백만원이었으며 이외의 이득 즉, 송전용량 증대, 기동비용절감 등을 계산할 수 있다면 비용회수는 물론 상당한 이득이 발생할 것이다.

##### 4.2.3 경제성 분석의 절차

이상과 같은 경제성 분석은 실제계에 대한 충분한 자료가 확보된다면 다음과 같은 절차에 따라 수행한다.

- i) SMES를 적용할 계통 선정 및 상태 파악
- ii) 투입 목적에 따른 SMES의 적정규모 산정
- iii) 비용 산정 및 이득 분석
- iv) 경제적 해석

이때 이득은 SMES의 각 기능을 대체할 수 있는 기기의 규모를 산정한 후 그 비용을 이득으로 계산하며, 이것이 불가능할 경우 계통에 미치는 효과를 비용화하여 산정한다. 또한 각 이득에 대한 수명기간동안의 총 이득을 구한후 비용과 비교하여 경제성을 분석한다.

### 3. 결 론

본 논문의 결과를 저장용과 안정화용 SMES 각각에 대해 요약하면 다음과 같다.

저장용 SMES의, 최적투자를 위한 규모산정을 위해 확률적 운전모형 및 투자 모형을 수립하였고 운전모형의 결과로서 투자계획모형에 입력되는 설비한계비용의 계산 방법을 제안하였다. 또한, 안정화용 SMES의 기능적 적정규모 산정 방법과 비용 및 이득을 계산함으로써 경제성을 분석하는 방법을 제시하였다.

앞으로 실제계에 관련된 자료의 확보가 가능하다면 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [참 고 문 헌]

- (1) Thomas L. Mann, John C. Zeigler, Thomas R. Young, "Opportunities for Superconductivity in The Electrical Power Industry", Aug. 1996
- (2) HARC, "South Texas SMES/SPS Site Study Preliminary Report", July 1996
- (3) J.H. Kim, et al., "Long-term Based Optimal of a Cogeneration System", IEEE ESDDSM, pp. 31~38, Nov. 1995
- (4) P.D. Baumann, "Energy Conservation and Environmental Benefits That May be Realized from Superconducting Magnetic Energy Storage", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.7, No. 2, pp.253-259, June 1992

#### 기호 설명

- OC : 총비용
- NF : 발전기 사고정지에 따른 경우의 수
- NT : 운전비용 계산시 계산구간의 총수
- ND : 방전시간대의 총수
- C : 에너지 충전 시간대
- i : 변수들에 대한 시간구간 지점자
- p : 발전기 운전상태
- P<sub>t</sub> : t시간대 충전 전력
- k : 발전군 형식의 총수
- L<sub>t</sub> : t시간에서의 부하
- E : SMES가 충전하는 총에너지
- P<sub>i</sub> : i발전군의 t시간대 충전 또는 방전전력
- P<sub>SMES</sub> : j군 SMES의 t 시간대에서 출력
- E<sub>SMES</sub> : j군 SMES에 충전된 총에너지
- C<sub>t</sub> : 운전비
- NC : 충전시간대의 총수
- D : 에너지 방전 시간대
- s<sub>i</sub> : 각 경우의 운전확률
- P<sub>o</sub> : t시간대 방전 전력
- n : SMES군 형식의 총수
- η : SMES의 효율
- E<sub>SMES</sub> : SMES의 방전에너지