

저장용 초전도 에너지 저장장치의 최적규모 산정을 위한 투자모형 수립에 관한 연구

金正勳, 金周落, 張勝燦, 林裁尹

A Study on Optimal Size Evaluation Model for Large Scale SMES System

Jung-Hoon Kim, Joo-Rak Kim, Seungchan Chang, Jae-Yoon Lim

요 약

전기에너지의 저장은 발전효율면이나 전력의 품질향상 등 전력시스템에서 뚜렷한 장점을 가지고 있다. 초전도 에너지 저장장치는 전기에너지를 저장할 수 있는 설비의 하나로 높은 효율과 속응성, 긴 수명 등의 특성으로 전력시스템 적용이 곧 이루어지리라 예상된다. 본 논문에서는 SMES의 국내도입시 필요한 투자정보를 제공하기 위한 최적규모 산정의 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 SMES의 경제적 운전 양상을 결정하는 확률적 운전모형과 최대원리를 이용한 투자계획모형으로 구성되어 있다.

ABSTRACT

Integrating energy storage into electric power system has long been recognized as a way to maximize a utility's generation and transmission capacity. Electric power can be stored during off-peak periods and then recovered during peak conditions to offset the need for larger generation and transmission capacity. Currently large-scale SMES for the purpose of energystorage which can be also served by battery storage or flywheel system has been developed, and near future it will be integrated into power grids. This paper presents an investment analysis on large-scale SMES which can determine its optimal size in power systems. In operation model, least generation cost for energy storage in SMES and its marginal capacity cost can be calculated using the discreteness of probability distribution for power availability. Investment decisions are made by the maximum principle and the case study shows the optimal operation and realistic information on the proper size of large-scale SMES in power systems.

Key Words: SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), Optimal Size, Operation Model, Marginal Cost, Investment Decision

1. 서 론

전력은 생산과 동시에 소비가 이루어지므로 전력시스템 운용상의 관점에서 볼 때 시시각각 변동하는 부하에 맞추어 전력을 생산하여 공급해야 하는 어려움이 발생한다. 이러한 어려움은 전력을 저장하는 설비가 있다면 부하의 평균화를 도모하게 되어 해소될 것이고 외란에 의해 급변하는 부하에 대응할 수 있어 전력시스템의 안정도를 향상시킬 수 있다. 전

기에너지를 저장하는 방법에는 양수발전, 이차전지, supercapacitor를 이용하는 방법과 플라이휠 에너지저장 방법 그리고 초전도 에너지저장 방법 등이 있으나, 현재 설치되어 사용중인 양수발전을 통한 저장방식에 비해 효율이 높고 환경친화적이며 에너지이용의 고밀도화 및 고성능화에 크게 기여할 수 있는 에너지저장시스템^[1]이 요구되고 있는 실정이다. 이 중 초전도 에너지 저장(SMES) 시스템은 크게 초전도코일과 PCS(Power Conditioning System)로 구성되어

있으며, 초전도 코일은 기존의 철심코어보다 2배 이상의 자계 세기와 1/1,000의 상대투자율을 통해 약 3,000배의 에너지 저장밀도를 가진다. 이러한 우수한 저장특성과 더불어 뛰어난 속응성으로 인해 SMES는 차세대 에너지 저장시스템으로 관심이 고조되고 있다.

전력시스템에 SMES를 도입할 경우 저장에너지의 규모는 적용목적에 따라 저장용, 안정화용, 전력품질개선용으로 구분할 수 있는데, 1980년대 중반에 EPRI에서 실시한 비용분석^[2]에 의하면 저장용 SMES의 경우 규모가 1,000MWh 이상 이 되어야 투자된 비용을 회수할 수 있다고 예측하였고, SMES의 개발 및 설치비용은 1985년 기준으로 5,000MWh 급 규모의 경우 10억 내지 15억 달러로 평가된 바 있으며, 고가의 개발 투자비로 인해 아직 에너지저장용 SMES의 전력 시스템 적용은 본격적으로 이루어지지 않고 있지만, 현재 100kWh급 SMES를 미국 앵커리지에 순동예비력 확보용으로 설치 협상중에 있고 2000년대 초반에 저장용 SMES가 전력시스템에 채택될 것으로 전망되고 있다. 전력시스템의 순시전력보상 등에 이용되는 안정화용 SMES는 급변하는 부하에 대한 빠른 응답, 약 90% 이상의 고효율 운전 등의 장점으로 양질의 전력공급을 위해서 다수의 전력회사 및 대규모 수용가에서 선호되고 있다. 전력시스템의 안정화용으로서 SMES를 이용하는 경우 0.5MWh~1MWh규모가 적절한 것으로 알려져 있으며, 주요 선진국은 안정화용 SMES의 개발 과정을 거쳐 현재 전력시스템에 적용, 운전중에 있다.^[3-4] 이외에도 비선형 부하계통에서 발생하는 고조파 및 무효전력을 보상하기 위한 능동필터의 기능을 수행하는 SMES의 경우는 MJ급의 규모가 적절한 것으로 알려져 있다.

이와 같이 개발비용이 엄청난 SMES에 대한 우리의 입장은 연구개발을 통한 시범적용이 활발한 선진 외국과는 달리 원천기술 확보를 통한 기술자립 측면에서 연구를 진행하고 있는 실정이므로 저장용 SMES를 개발하여 전력시스템에 투입할 때는 SMES의 최적규모와 설치위치 선정이 주요 문제로 대두되며, 최적투자 규모를 결정하는 것은 저장용 SMES 개발목표 설정과 투자개발비의 최적화를 위해서 필수적으로 선행되어야 할 연구임이 자명하다. 이러한 취지아래 본 논문에서는 저장용 SMES의 전력시스템 투입시 최적운전 상태를 결정하는 확률적 운전모형을 수립하고 설비한계비용 계산법을 제안하였다. 운전모형에서는 설치된 SMES에 저장되는 에너지비용의 최소화를 위해 SMES에서의 충전, 방전 제약과 다기 발전군에서의 출력 및 다수의 SMES시스템에서의 방전에 대한 확률분포가 고려되었으며, 최적화된 운전상태에서 도출되는 SMES에 대한 설비한계비용을 토대로 SMES의 설비투자 산정을 위한 최적 투자모형을 수립하였다.^[5-6] 또한 실질적인 투자정보 제공을 위해 분지한정법을 이용하여 정수 규모의 투자결과를 도출하였다.

2. 저장용 SMES의 운전모형 및 설비한계비용

2.1 확률적 운전모형

저장용 SMES의 경우에는 기저부하시 연료단가가 낮은 원자력 또는 석탄화력 발전의 에너지로써 저장하였다가 그림 1과 같이 전력 생산 단가가 높은 첨두부하시 저장된 에너지를 이용하므로, SMES의 최적 운전은 SMES에 에너지를 저장할 때 소요되는 발전비용의 최소화과 첨두부하시 저장된 에너지를 이용함에 따른 비용절감을 최대화하는 것이다. 그런데 발전기와 SMES는 돌발사고에 의한 출력의 불확실성이 존재하며 사고로 인한 정지상태와 정상적인 운전을 하는 경우가 각각 존재하여 발전소 및 SMES의 출력은 이항분포를 이루게 된다. 여러 개의 발전소 및 SMES를 특성이 비슷한 것끼리 묶어 몇 개의 군으로 생각하면 개별 발전소 및 SMES의 이항분포는 정규분포특성을 갖게 된다. 정규분포를 수식적으로 다루는 것은 몇 개의 대표적인 확률변수(이산점)로서 발전소 및 SMES군의 가능용량을 결정할 수 있다. 그림 2는 발전군 및 SMES군의 7점 이산화의 경우에 각 이산점과 그때의 확률을 나타낸 것이다.

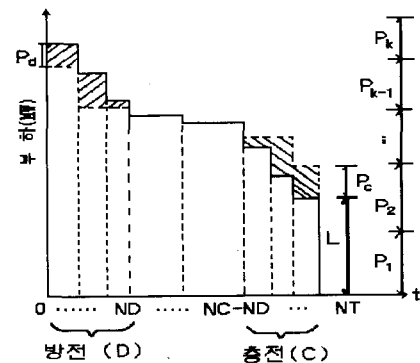


그림 1 SMES 충·방전에 따른 부하평준화의 개념도
Fig. 1 A load leveling diagram of SMES operation

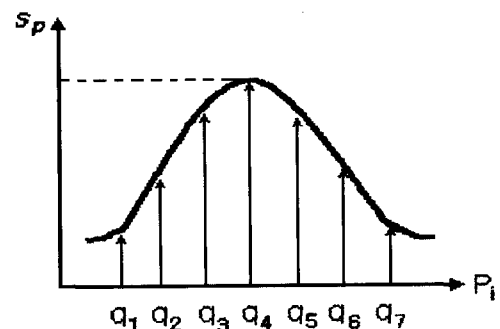


그림 2 7점 이산화(N=7)
Fig. 2 Discreteness with seven points

개별 이산점에서 임의의 발전군 또는 SMES의 출력 P_i 를 구하면 다음과 같다.

$$P_i = \mu_i + q_x \sigma_i \quad (1)$$

$$\text{단, } i=1, \dots, n = \begin{cases} \text{발전군 set } I = \{i | i=1, \dots, k\} \\ \text{SMES 군 set } J = \{j | j=k+1, \dots, n\} \end{cases}$$

$$x = 1, \dots, NP$$

여기서, P_i : i 군의 가능 용량 μ_i : i 군의 평균용량
 σ_i : i 군의 표준편차 q_x : 이산점
 n : 군의 수 NP : 이산점의 수

본 논문에서는 SMES의 충·방전에 소요되는 비용은 없고 전력시스템의 송배전 손실은 없다는 가정하에 수리모형을 수립하였다. SMES의 운전특성을 고려한 목적함수는 대상기간 내의 구간별 운전비의 총합(OC)을 최소화하는 식으로 표현되며, 식(1)에서 이산화된 경우는 서로 독립이므로 전체의 최소화는 임의의 경우 하나에 대한 최소화를 의미한다. 이를 표현하면 식 (2)와 같이 된다.

$$C = \sum_{q_x=1}^{NP} s_p \left[\text{Min} \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^k C'(P'_i, P'_c, P'_d) \cdot \Delta T^t \right] \quad (2)$$

여기서, $t = 1, \dots, NT$

$$= \begin{cases} \text{방전시간대 } D = \{t | t=1, \dots, ND\} \\ \text{저장시간대 } C = \{t | t=NT-NC, \dots, NT\} \end{cases}$$

제약조건은 다음과 같은 조건들로 인해 결정된다.

i) SMES가 충전 또는 방전을 하지 않는 시간에서 수급조건

$$\sum_{i=1}^k P'_i = L' \{t | t \notin C \quad t \notin D\} \quad (3)$$

ii) 충전시간대에서 SMES를 포함한 수급조건

$$P'_c = \sum_{i=1}^k P'_i - L' \{t | t \in C\} \quad (4)$$

iii) 충전시간대에서의 충전 전력과 충전에너지의 제약조건

$$\sum_{i \in C} P'_i \cdot \Delta T^t = E = \sum_{j \in J} E_{SMES_j} \quad (5)$$

iv) 충전시간대 한 구간에서의 SMES에 충전되는 전력

$$P'_c = \sum_{j=k+1}^n P'_{SMES_j} \{t | t \in C\} \quad (6)$$

v) 충전시간대에서 j 군의 SMES에 충전된 총 에너지

$$E_{SMES_j} = \sum_{t \in C} P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t \quad (7)$$

vi) 방전시간대에서의 SMES를 포함한 수급조건

$$P'_d = L' - \sum_{i=1}^k P'_i \{t | t \in D\} \quad (8)$$

vii) 방전시간대에서 SMES의 효율을 고려한 방전에너지

$$\sum_{t \in D} P'_d \cdot \Delta T^t = \eta E = \eta \sum_{j \in J} E_{SMES_j} \quad (9)$$

viii) 방전시간대에서의 j 군 SMES의 방전출력 및 에너지의 관계식

$$\eta E_{SMES_j} = \sum_{t \in D} P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t \quad (10)$$

ix) 방전시간대 한 구간에서 SMES의 방전 전력

$$P'_d = \sum_{j=k+1}^n P'_{SMES_j} \{t | t \in D\} \quad (11)$$

x) 발전기의 출력에 대한 제약조건

$$P'_i^{\min} \leq P'_i \leq P'_i^{\max} \quad (12)$$

단, $i = 1, \dots, k, I, t = 1, \dots, NT$

xi) SMES의 충전 또는 방전전력에 대한 제약조건

$$P'_{SMES_j}{}^{\min} \leq P'_{SMES_j} \leq P'_{SMES_j}{}^{\max} \quad (13)$$

단, $j = k+1, \dots, n$

xii) SMES의 에너지 충전 및 방전의 범위 한정에 따른 제약

$$E_{SMES_j}{}^{\min} \leq E_{SMES_j} \leq E_{SMES_j}{}^{\max} \quad (14)$$

단, $j = k+1, \dots, n$

xiii) t 시간에서 SMES가 충전할 수 있는 최대 에너지

$$P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t \leq \min \left\{ E_{SMES_j}{}^{\max} - \sum_{t=0}^{t-1} P'_{SMES_j}, P'_{SMES_j}{}^{\max} \cdot \Delta T^t \right\} \quad (15)$$

단, $\{t | t \in C\}$

$$P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t = E_{SMES_j} - \sum_{t=0}^{t-1} P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t$$

xiv) 식(14)에서 t 시간 충전되는 최소에너지

$$P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t \geq \max \left\{ E_{SMES_j}{}^{\min}, P'_{SMES_j}{}^{\min} \cdot \Delta T^t \right\} \quad (16)$$

단, $\{t | t \in C\}$

xv) t 시간에서 방전되는 최대 에너지

$$P'_{SMES_j} \cdot \Delta T^t \leq \min \left\{ \eta E_{SMES_j} - \sum_{t=0}^{t-1} P'_{SMES_j}, P'_{SMES_j}{}^{\max} \cdot \Delta T^t \right\} \quad (17)$$

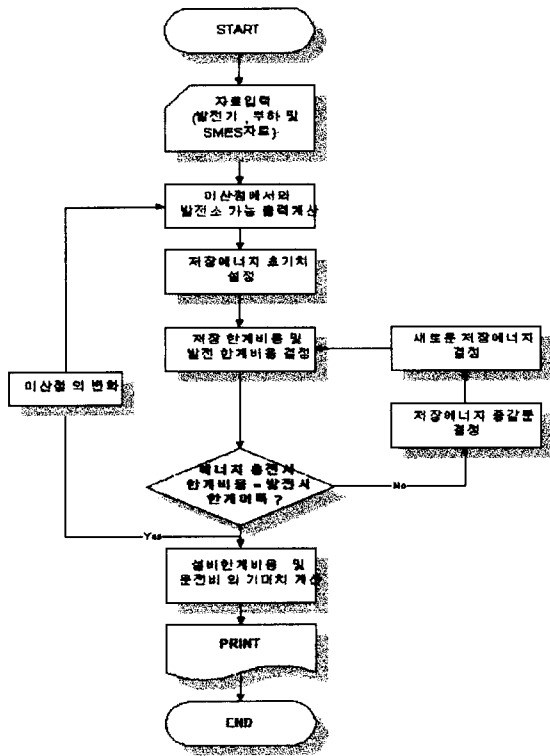


그림 3 운전모형 흐름도
Fig. 3 Computational flows of operation model

단, $\{t | t \in D\}$

단, 식 (16)의 의미는 초기 에너지 충전시간대에서 최소에너지 $\{E_{SMES}^{min}\}$ 가 저장된 후에는 최소 $P_{SMES} \cdot \Delta T^t$ 가 저장되어야 한다는 뜻이며, 식 (17)은 기존의 저장되어 있던 에너지와 최대 방전전력중 작은 값이 최대 방전양이라는 의미이다. 계산 흐름도는 그림 3과 같이 표현된다.

2.2 설비한계비용

설비한계비용은 설비를 한 단위 증설하였을 때 발생하는 운전비와 공급장비의 증분비용을 말하는 것으로 투자결정에 있어 중요한 지표가 된다. 본 논문에서는 설비한계비용을 부하 및 발전출력의 불확실성을 고려하여 그 확률에 대한 기대치로 나타낸다. 이산화 방법을 도입하여 각 이산점에서의 발전출력과 부하가 결정되면 운전시물레이션에 의해 설비한계비용을 계산한 후 각 이산점에서의 확률을 곱한 기대치를 구한다. 또한 앞에서 설명한 운전모형에서 SMES의 최대충전용량과 최적 저장수준에 따른 모든 경우의 수를 고려하여, 이중 실제로 발생하는 경우에 대해서 설비한계비용을 계산할 수 있는 접근법을 제안한다.

2.2.1 SMES의 최대용량만큼 에너지를 충전하는 경우

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

i) 부하 시간대에서 SMES의 규모가 최적 저장 수준보다 적은 경우 : 이 때에는 SMES의 용량이 한 단위 증가하면 에너지 한 단위를 더 충전하여 SMES효율(η) 만큼 방전을 하므로 단위에너지의 충전비용과 방전으로 인한 이득의 차이만큼 설비한계비용이 발생한다.

ii) 부하 시간대에서 SMES의 저장 규모가 최적 저장 수준과 같거나 큰 경우 : SMES의 용량이 한 단위 증가하여도 최적 저장 수준을 넘어서 에너지를 충전할 수 없기 때문에 설비한계비용은 발생하지 않는다.

2.2.2 SMES 최대 용량만큼 충전하지 않는 경우

각 부하 시간대에서 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.

2.2.3 설비한계비용 계산에

이상에서 살펴본 설비한계비용을 예제 시스템을 통하여 계산과정을 알아보기 위해 그림 4와 같이 부하가 $L_1 \sim L_7$ 로 주어졌던 시스템에 $G_1 \sim G_5$ 의 발전기가 발전단가가 저렴한 순서대로 투입되어 있는(각 발전기의 발전단가는 $C_1 \sim C_5$)계통에서 살펴보면, 에너지를 충전하는 시간대는 5, 6, 7 이고 방전은 시간대 1, 2, 3, 4에서 이루어지고 있다. 이러한 최적 운전 상태에서 SMES 설비의 투자용량을 한 단위 증가시켰을 때 에너지 충전구간에서 살펴보면 시간대 7에서는 SMES 용량의 증가에 따라 단위 에너지를 더 충전할 수 있다. 그러나 시간대 5, 6에서는 최적 저장 수준까지 모두 충전이 되었으므로

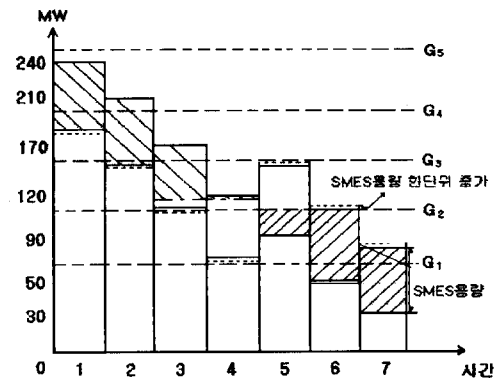


그림 4 설비한계비용의 산출 개념도
Fig. 4 A conceptual diagram for marginal capacity cost

로, SMES 용량 한 단위 증가에 따른 추가 충전은 발생하지 않는다. 한편 에너지 방전구간에서는 시간대 1과 2에서는 SMES 용량을 모두 이용하여 방전을 하고 있으므로 용량이 한 단위 증가한다면 추가로 방전을 하면 이득이 발생한다. 그러나 시간대 3, 4에서는 SMES 용량이 한 단위 증가하여도 기존의 설비를 모두 이용하지 않고 있었으므로 용량 증가에 따른 이득은 발생하지 않는다. 따라서 설비한계비용은 다음과 같다.

$$MC = C_2 - \eta \cdot C_4 \quad (18)$$

3. 최적 투자규모 산정

최적 투자규모 산정을 위한 경제모형은 고려 대상기간 동안만 SMES가 운전한다고 보아 검토대상기간 말기에 잔존가치를 회수하는 한계기간모형을 채택하였다. 목적함수인 총비용은 투자비, 운전비, 공급지장비 및 잔존가치로 구성되며 식 (19)와 같다.

$$\text{Min} \sum_{l=0}^T \left[\sum_j I'_j(U'_j) + OC^l(X'_j, U'_j) \right] \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad X'_j = X'_j + U'_j$$

$$U'_j > 0$$

단, $l = 1, \dots, T$

식 (19)를 최소화하기 위해 최적화 기법인 최대원리를 도입하여 최적조건을 산출한다. 조건식으로 나타나는 투자 수익은 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. 이러한 계산과정을 나타내는 최적투자량 산정 흐름도는 그림 5와 같다.

4. 사례연구

4.1 사례연구 방법

제안된 운전모형 및 투자계획모형을 위한 사례연구 계통으로는 표 1의 부하와 표 2의 발전소군이 투입되어 있는 계통을 선정하여 수행하였다. 저장용 SMES는 대부분 일주일 일을 주기로 충·방전을 하므로, 주간의 부하지속곡선을 사용하였다. 부하지속곡선의 각 구간의 길이는 동일하다는 가정하에 24시간으로 결정하였다. 또한 발전소군과 SMES간의 송전손실은 없고 SMES의 형식은 1가지 형태, 즉 1대만 설치되어있다고 가정하고 사례연구를 수행하였다. 본 사례연구에서는 2장의 운전모형에서 SMES만 변수로 취급하여 최적인 상태를 결정하였다.

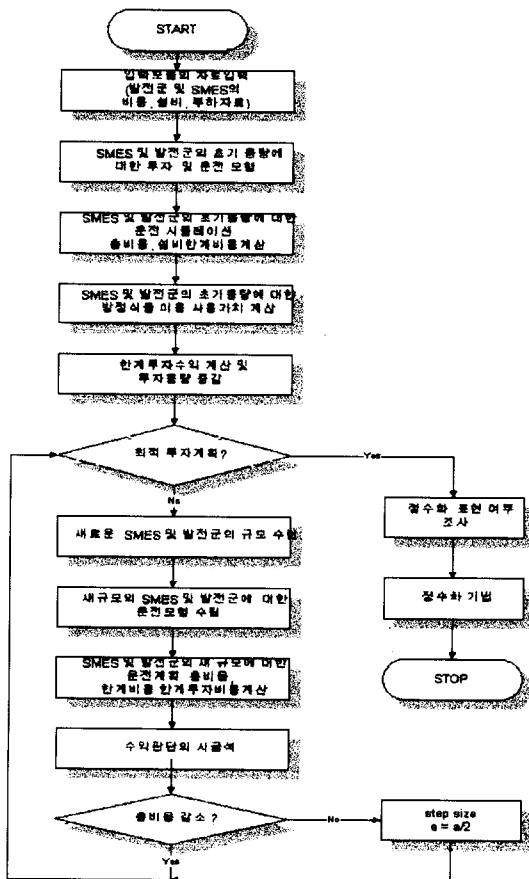


그림 5 최적 투자규모 산정 흐름도
Fig. 5 Computational Flows of optimal investment size

표 1 부하입력자료

Table 1 Input data of Load

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

표 2 발전소군 자료

Table 2 Input data generator group

G	발전 단가[₩/kWh]	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

4.2 결과분석 및 검토

4.2.1 운전모형 결과

SMES의 운전모형의 결과로는 운전비와 설비한계비용이 도출되며, SMES 용량은 20MW부터 5MW씩 늘려가며 수행하였다. 그 이유는 저장용 SMES의 규모가 최소 20MW이상은 되어야 그 기능을 발휘할 수 있기 때문에 20MW부터 운전비 및 설비한계비용을 구해보았다. 그림 6은 SMES용량이 20MW~85MW일 때의 SMES의 운전비, 즉 에너지 저장비용으로서 각 이산점에서의 확률을 고려한 기대치이다. SMES 용량이 증가함에 따라 운전비도 같이 증가함을 알 수 있다. 그러나 SMES 용량이 80MW 이상이 되면 SMES 용량이 증가하여도 경제성이 있는 최적 저장수준으로 인하여 추가로 저장되는 에너지가 없다. 따라서 운전비도 더 이상 증가하지 않는다. 그림 7은 SMES 용량별 설비한계이득이다. 그림에서와 같이 설비한계이득이 SMES 용량이 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

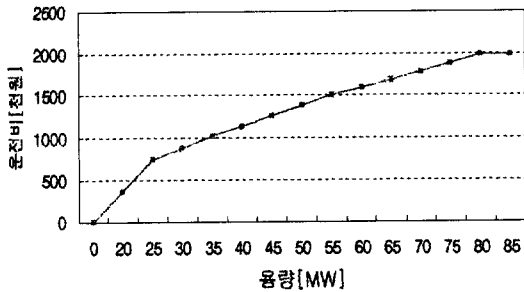


그림 6 SMES 용량별 운전비 곡선
Fig. 6 Operation cost according to SMES capacity

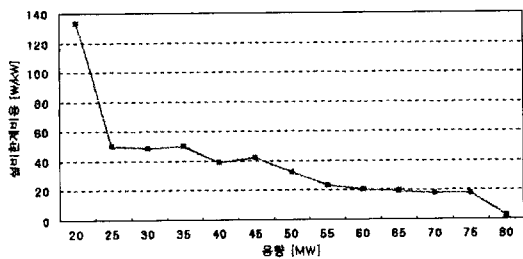


그림 7 SMES 용량별 설비한계이득
Fig. 7 Marginal capacity cost according to SMES capacity

4.2.2 SMES의 적정규모 산정 결과

SMES 운전모형과 투자계획 모형에 의한 최적규모를 산정한 결과는 59,216kW이었으며, 그때의 반복횟수와 수렴오차는 표 3과 같다.

표 3 최적규모 계산시 반복횟수와 수렴오차

Table 3 Computational result of optimal size, iteration number, and error

적정규모 [kW]	반복횟수 [회]	수렴오차
59,216	120	0.040

표 4 SMES 정수규모 산정결과

Table 4 Computational results of integer valued capacity of SMES

SMES규모 [kW]	최적규모 [kW]	SMES대수 (실수)	SMES대수 (정수)	최적정수 규모 [kW]	총비용 [백만원]
50000	59,216	1.184	1	50,000	28,809

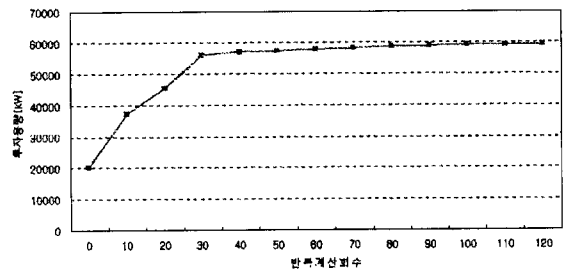


그림 8 적정규모 계산시 투자용량의 변화
Fig. 8 Variation of invested capacity

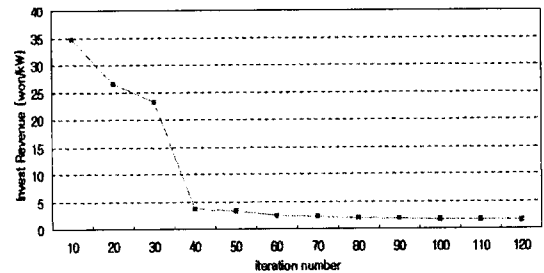


그림 9 적정규모 계산시 투자수익의 변화
Fig. 9 Variation of investment revenue

그림 8과 9는 SMES의 적정규모 계산시 용량과 투자수익의 변화로서 SMES의 최적규모에 근접할수록 점점 변화의 폭이 감소함을 알 수 있다.

또한 SMES에 대한 현실적인 투자 정보를 제공하기 위하여 정수화기법인 분지한정법⁽⁷⁾을 도입한 SMES의 최적정수규모 결과는 표 4와 같다.

5. 결론

본 논문은 저장용 SMES를 전력시스템에 적용할 때,

최적 투자규모를 산정하는 것이다. SMES를 계통에 투입할 때 설치규모에 대한 정보를 제공하기 위해 SMES의 확률적 운전 모형과 투자계획모형에 대한 수리적 모델과 계산 알고리즘을 제안하였다.

운전모형에서는 SMES의 운전비를 최소화하는 경제적인 최적 운전상태를 결정하였으며, 발전기의 운전확률을 반영하였다. 운전모형의 결과로 도출되는 설비한계비용의 계산방법을 제시하였다. 투자계획모형에서는 운전모형에서 산정된 설비한계비용과 투자 단가 및 잔존가치를 고려하여 최적 투자규모를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 산정된 최적 투자규모에 대한 정수화 규모를 산정함으로써 현실적인 투자 정보를 제공할 수 있게 하였다.

본 연구에서는 SMES의 비용을 외국 문헌¹²⁾을 참고하였지만 향후 우리 실정에 합당하고 정확한 실계통에 관련된 자료의 확보가 가능하다면 SMES의 규모에 대한 더욱 정확한 연구결과를 제시할 수 있을 것으로 기대되는 바, 장차 SMES를 개발 또는 설치시 적정용량의 결정으로 인한 국가적 경제성이 확보될 것으로 전망된다.

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

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] EPRI Report, "Conceptual Design and Cost of a Superconducting Magnetic Energy Storage Plant", April 1984.
- [3] Thomas L. Mann, John C. Zeigler, Thomas R. Young, "Opportunities for Superconductivity in The Electrical Power Industry", Aug. 1996.
- [4] HARC, "South Texas SMES/SPS Site Study Preliminary Report", July 1996.
- [5] 김정훈 임재윤, 홍원표, "초전도 전력기기의 적정규모의 산정 및 계통 적용기술 개발", 기초전력공학공동연구소, 1998, 9.
- [6] J.H. Kim, J.S. Park, S.C. Chang, "Long-term Based Optimal of a Cogeneration System", ESDDSM'95, pp.31~38, Nov. 1995.
- [7] R. F. Geise, Directory of Superconducting Device Projects Bearing upon the Electric Power Sector, IEA Cooperative Program, Nov. 1997.
- [8] 김주락, 이종필, 임재윤, 김정훈, "저장용 및 안정화용 초전도 에너지저장장치의 투자경제성 및 적정규모 산정에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회논문집, pp.298~300, 1998, 11.

기호 일람

- OC : SMES의 운전 총비용
 NP : 발전기 사고 정지에 따른 경우의 수
 NT : 운전비용계산시 계산구간의 총수
 MD : 에너지 방전시간대의 총수
 NC : 에너지 충전시간대의 총수
 t : 변수들에 대한 시간구간 지정자
 q_i : 발전기 운전상태 지정자
 s_p : 각 경우의 운전확률
 C' : 운전비
 C : 에너지 충전 시간대
 D : 에너지 방전시간대
 I : 발전군의 set
 J : SMES군의 set
 P'_c : t 시간에서의 충전 전력
 P'_d : t 시간에서의 방전 전력
 i : 발전군 및 SMES의 형식
 j : SMES의 형식
 L' : t 시간에서의 부하
 E : SMES가 충전하는 총에너지
 η : SMES의 효율
 P'_i : i 군의 t 시간대에서의 충전 또는 방전 전력
 P'_{SMES_j} : j 군 SMES의 t 시간대에서 출력
 E_{SMES_j} : j 군 SMES에 충전된 총에너지
 T : 투자 대상기간
 X'_j : j 군 SMES의 1년도의 설비용량 $\left(X'_j = \sum_{t=1}^{l-1} P_{SMES_j}^{\max, t} \right)$
 U'_j : j 군 SMES의 1년도의 투자용량 $\left(U'_j = P_{SMES_j}^{\max, l} \right)$
 $I_j^{(U'_j)}$: j 군 SMES의 투자비
 $S(U'_j)$: j 군 SMES의 잔존가치
 $OC'(x', U')$: t 년도의 운전비와 공급지장비
 k : 발전군 형식의 총수
 $\Delta T'$: 구간의 지속시간

〈저 자 소 개〉



김정훈(金正勳)

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



김주락(金周落)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 공대 전자
전기제어공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



장승찬(張勝燦)

1969년 6월 30일생. 1992년 홍익대 공대 전기
공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업
(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수
료. 1996년~현재 에너지자원기술개발지원센터
연구원.



임재윤(林載尹)

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