

전력 저장용 SMES 의 경제적 운용에 관한 연구

오 노 희 호 한 송 업 이 승 원
서울대학교

A STUDY ON THE ECONOMIC OPERATION OF SMES FOR ENERGY STORAGE

Hee Ho Roh Song Yop Hahn Sung Won Rhee
Seoul National University

Abstract

As the atomic power plant is increased, load leveling energy storage system becomes more important. Pumped hydroelectric storage, used in the present, has low storage efficiency and difficulty in selecting site. But SMES(Superconducting Magnet Energy Storage) has high storage efficiency (90%), fast time response characteristics and ease of location. The general object of SMES with electric power system is the minimization overall production cost. This paper presents a method for the economic operation of SMES by Dynamic Programming.

1. 서 론

오늘날 우리나라에서는 원자력 발전이 전원 다양화의 중심이 되어 그 개발이 급속도로 이루어 지고있다. 현재 원자력 발전은 베이스 전원으로 이용되고 있는데 운전 특성상 이 추세는 앞으로 계속될 전망이다. 그러나 원자력 발전의 설비 구성율이 증대하게 되면 베이스 전력이 과잉으로 되어 심야에 잉여전력이 발생하게 되므로 급전 운용상 많은 지장을 초래하게 된다. 이리하여 전력 저장 장치의 중요성이 강조되게 되었다. 전력 저장 시스템을 전력계통에 도입하면 경제성, 안정도, 공급신뢰도 등에 효과가 있다고 알려져 있다. 기존의 양수발전에 비해 가까운 장래에 실용화 될

것으로 예상되는 초전도 자석 에너지 저장 장치(SMES)는 전력을 직접 저장 하는 방식으로 효율, 속용성, 입지조건 등에서 양수 발전에 비해 유리할 뿐만 아니라 전력계통의 안정도 향상에도 최적인 전력 저장 방식으로 평가되고 있다.

본 논문에서는 총 발전비용을 최소로 하는 SMES의 경제적 운용 방법을 동적계획법(DP)을 사용하여 정식화 하고 모델 계통에서의 일간수급 계획 문제에 이를 적용함으로써 SMES의 경제적 운용 방법을 제시하고자 한다.

2. 전력 저장 장치 (SMES) 모델 및 문제의 정식화

(1) 저장 장치 모델

초전도자석 에너지 저장 장치(SMES)는 에너지를 저장하는 에너지 저장부와 전력계통과 에너지 저장부 사이의 상호 에너지 변환을 행하는 에너지 변환부를 기본 구성 요소로 하고 있다. 간단한 모델을 그림 1에 나타 내었다.

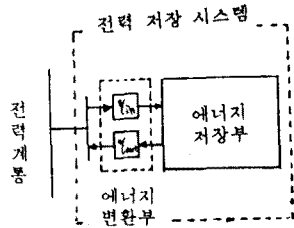


그림1. 전력 저장 장치의 모델

(2) 문제의 정식화

위의 저장 장치 모델을 기초로 그 운용 최적화 문제를 정식화 한다. D.P를 적용하기 위해 최적화 기간을 K개의 시간대로 분할하고 각 시간대 내에서는 부하나 각 발전기 출력은 일정하다고 가정한다.

저장설비의 상태변수로는 각 시간대 마지막 단계에서의 에너지 양으로 한다.

• 최적화 목적함수

$$\phi = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M F_i(P_{ti}(k)) \cdot T$$

• 제약조건

$$\sum_{i=1}^N P_{ti}(k) + \sum_{j=1}^M P_{sj}(k) - P_d(k) = 0$$

$$0 \leq E_j(k) \leq \bar{E}_j \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

$$P_{sj} \leq P_{sj}(k) \leq \bar{P}_{sj} \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

$$P_{ti} \leq P_{ti}(k) \leq \bar{P}_{ti} \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

$$E_j(0) = E_{j0}, E_j(k) = E_{jk} \quad (j=1, 2, \dots, M)$$

단

• $P_{sj}(k) \geq 0$ (출력시 혹은 입력력이 0 일때)

$$E_j(k-1) - E_j(k) = P_{sj}(k) \cdot T / \eta_{out}$$

• $P_{sj}(k) < 0$ (입력시)

$$E_j(k-1) - E_j(k) = P_{sj}(k) \cdot T \cdot \eta_{in}$$

- K: 시간대 번호 T: 시간대의 길이 (h)
- E(k): 시간대 K 에서 종단의 에너지 저장량 (MWh)
- $P_s(k)$: 시간대 k 에서 저장설비 입력력 (MW)
- $P_t(k)$: 시간대 k 에서 발전기 출력 (MW)
- $P_d(k)$: 시간대 k 에서의 부하 (MW)
- $F(P_t(k))$: 발전기의 연료비 특성함수 (원/h)

3. 경제부하 배분 및 운용 알고리즘

요구되는 전력수요를 충족시키면서 각 발전 설비에서 발전하는 비용을 합한 총 발전 비용을 최소로 하기 위해 라그랑주 미정계수법을 사용하여 경제부하 배분을 행한다.

$$F^* = \sum_{i=1}^n F_i - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{i,i} - \sum_{i=1}^n P_{d,i} - P_i \right)$$

양변을 출력유효전력 $P_{i,i}$ 에 대해서 미분하면

$$\frac{\partial F^*}{\partial P_{i,i}} = \frac{\partial F_i}{\partial P_{i,i}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_{i,i}}{\partial P_{i,i}} \right) = (IC)_i - \lambda (1 - (ITL)_i) = 0$$

단, IC : 증분연료비 혹은 발전단가

ITL : 증분 선로손실

$$(IC)_i = \lambda (1 - (ITL)_i)$$

SMES의 최적운용 패턴을 구하는 방법은 다음과 같다. 동적프로그래밍에 의해 가능한 모든 SMES의 충전, 방전 각각에 대하여(동적프로그래밍에서의 각 격자점) 조류계산을 행한다. 임의의 SMES충전, 방전에 대해서 조류계산을 행한 결과로 얻어지는 전력계통의 상대치로부터 증분선로손실을 구하고 이것을 이용해서 경제부하 배분을 행한다. 이와같은 과정을 동적프로그래밍의 모든 격자점에 대해 반복 총 발전비용이 최소가 되는 SMES의 충전, 방전 패턴을 찾으면 그것이 바로 SMES의 최적운용 패턴이다. 전체적인 흐름도는 아래 그림2 와 같다.

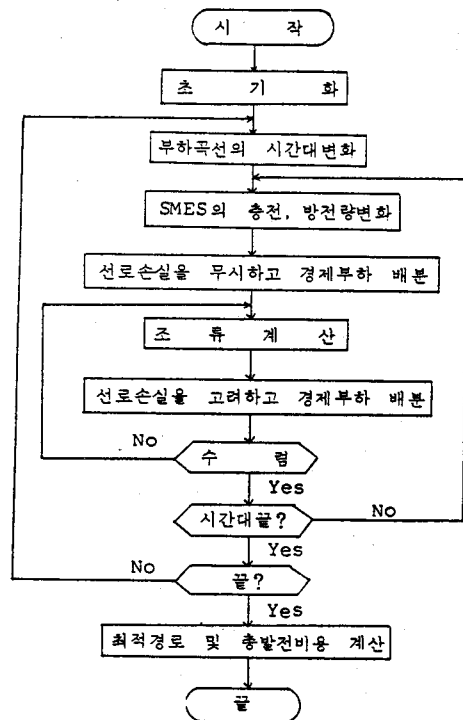


그림2. 최적 운용 결정 흐름도

4. 수치 계산 예

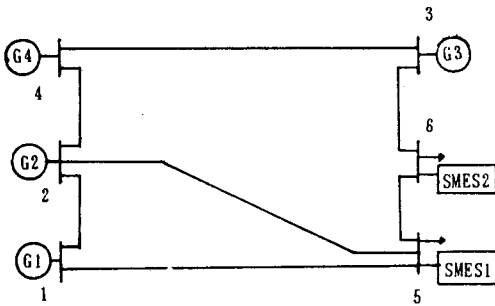


그림3. 모델 계통

4	50	20	40	20
5	70	30	50	20
6	90	40	70	30
7	80	40	60	30
8	90	40	70	30
9	70	30	60	30
10	60	30	50	20
11	60	30	40	20
12	50	20	40	20

표1. 발전기 정수

발전기	$F(P) = a P^2/P_0 + bP + cP_0$ (천원/h)						
	a	b	c	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	Q_{min} (Mvar)	Q_{max} (Mvar)
G1	0	3.0	6.2	5.5	55	-40	40
G2	1.8	5.2	4.8	4.0	40	-40	40
G3	1.0	12	3.7	4.0	40	-40	40
G4	1.1	15	3.0	5.0	50	-40	40

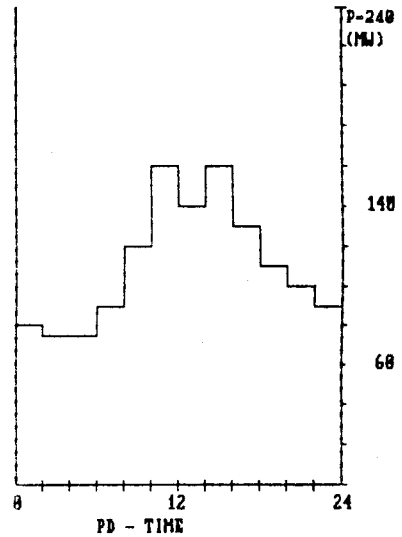


그림4. 모델 부하(12시간대)

표2. 선로 정수 (100MVA 기준 p.u 값)

선로	임피던스	선로충전용량
1-2	$0.02 + j0.06$	$j0.03$
1-5	$0.08 + j0.24$	$j0.025$
2-4	$0.01 + j0.03$	$j0.01$
2-5	$0.06 + j0.18$	$j0.015$
4-3	$0.08 + j0.24$	$j0.025$
3-6	$0.03 + j0.10$	$j0.02$
6-5	$0.02 + j0.06$	$j0.02$

표3. 각 시간대에서의 모선부하

시간대	BUS 5		BUS 6	
	PL(MW)	QL(Mvar)	PL(MW)	QL(Mvar)
1	50	20	30	10
2	40	10	35	10
3	35	10	40	10

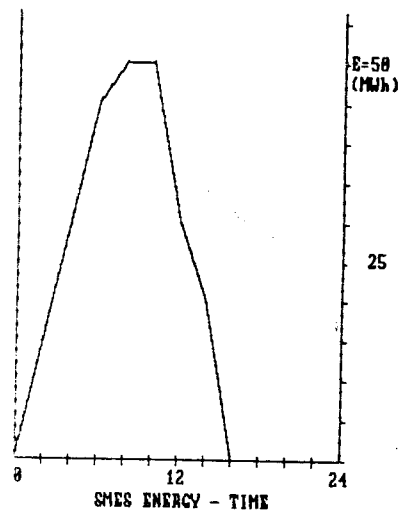


그림5. SMES1의 운용패턴

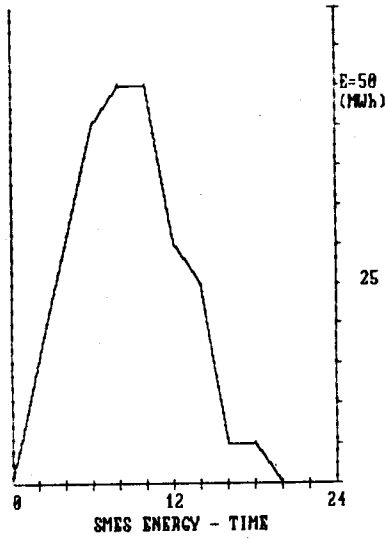


그림6. SMES2의 운용패턴

5. 결 론

본 논문에서는 가까운 장래에 실용화가 될 것으로 기대되는 SMES의 최적 운용화 수법을 제안하고 모델계통에 이를 적용함으로써 SMES의 최적운용 패턴을 제시했다. 이와같이 전력 저장 장치의 합리적인 운용을 통하여 연료비 증가액을 감소시켜 연료비를 절감시킬 수 있다는 운용 지침을 얻을 수 있었다. 앞으로의 연구과제는 무효전력과 유효전력을 동시에 고려하여 운용을 최적화 하는 기법의 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) L.K. Kirchmayer, "Economic Operation of Power System," John Wiley, 1958.
- 2) 송길영, "전력계통 공학," 동명사, 1980.
- 3) R.Bellman, "Dynamic Programming," Princeton University Press, 1957.
- 4) Olle I. Elgerd, "Electric Energy System," MacGraw-Hill, 1971
- 5) 초전도 에너지 저장 시스템에 관한 조사연구 [II], 미래공학연구소, 1984.
- 6) 정계길, 박영문, "전력계통의 합리적 운용 제어에 관한 연구," 대한전기학회지, Vol33, No10, 1984, p. 30-42