

전지전력저장설비의 최적운용 및 운전특성에 관한 연구

송길영* 오광해^o 김용하** 노대석***

* : 고려대학교 ** : 인천대학교 *** : 한국전기연구소

The Optimal Scheduling and Operational characteristics on Battery Energy Storage System

Kil-Yeong Song* Kwang-Hae Oh^o Yong-Ha Kim** Dae-Seok Rho***

* : Korea University ** : Incheon University *** : KERI

ABSTRACT

The objective of this study is to solve the operation scheduling problem of plural battery energy storage systems (BESS), and to find useful information from its result. Unlike conventional energy storage system, BESS has some hardware characteristics such as high efficiency, fast-acting response and operational loss. Considering rate constraints of thermal unit power as well as hardware characteristics of BESS, the operation scheduling has an intricate problem. In order to solve this optimization problem, we use successive approximations dynamic programming. In two types of operation, the proposed algorithm is applied to test system, one is daily optimal operation, the other weekly optimal operation.

제 1 장 서론
최근 전력수요의 급증에 더불어 전원의 측면에서는 대형화력발전 등 출력경직성이 높은 기저전원의 개발이 주로 이루어지고 있으며 주간 첨두부하의 증가율이 현격히 커지는 일로에 있으므로 일 부하율이 악화되어 계통전체로서는 급작스런 부하변동에 대하여 부하추종운전이 곤란한 문제가 야기되고있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 대책으로서, 여러가지 신행 에너지저장설비를 계통에 도입하는 방안이 적극적으로 검토되고 있다. 이중 최근 국내의에서 활발히 연구진행중에 있는 전지전력저장설비는 일 출력 즉용성이 우수하여 거의 순간적으로 계통에 투입되어 상한 출력까지 출력을 낼 수 있는 특징이 있으므로 전지전력저장설비의 최적운용계획을 결정할때에는 화력발전기의 출력변화율과 함께 전지전력저장설비의 입출력즉용성도 고려해야 한다. 아울러 전지전력저장설비의 기계적특성인 저장장치의 운용손실(에너지 변환시의 손실, 저장장치의 손실전력)도 충분히 반영되어야 한다. 그러므로 본 논문에서는 화력발전기의 출력변화율제약, 에너지 변환시의 손실 및 저장부의 전력손실을 고려하여 입출력즉용성을 갖는 전지전력저장설비의 최적운용을 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하고, 이를 시험계통의 일간운용 및 실무모계통의 주간운용에 적용하여 전지전력저장설비의 운전특성 및 계통의 운용에 미치는 효과를 분석하였다. 이때 전지전력저장설비는 다기로 취급하도록 하여 전지전력저장설비의 개별특성을 최대한 반영할 수 있도록 하였다.

제 2 장 정식화
전지전력저장설비의 최적운용이란 계통운용상의 각종계약조건을 만족하면서 고려대상기간내의 화력발전기의 연료비와 운전유지비용(VAR O/M) 및 전지전력저장설비의 운전유지비용의 합으로 구성되는 발전비용을 최소화하기 위한 전지전력저장설비의 운용계획을 구하는 것이다. 이외같은 전지전력저장설비의 최적운용문제에 대한 목적함수와 제약식은 다음과 같다.

2-1 목적함수
전지전력저장설비의 최적운용문제에서 목적함수는 총발전비용의 최소화이며 (2.1)로 표현된다.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{nhr} \left[\sum_{i=1}^{ng} [a_i P_i(k)^2 + b_i P_i(k) + C_i + \text{VAIO}/M_i(i) \cdot P_i(k)] + \sum_{j=1}^{nb} \text{VARO}/M_b(j) \cdot PB_j(k) \right] \quad (2.1)$$

단, nhr : 고려대상시간수
ng, nb : 계통의 화력기, 전지전력저장설비의 댓수
a_i, b_i, c_i : 화력기 i의 연료비계수
P_i(k), PB_j(k) : 화력기, 전지전력저장설비의 출력
VARO/M_i, VARO/M_b : 화력기, 전지전력저장설비의 운전유지비용

2-2. 제약조건
① 수급계약조건
계통의 총발전력은 예측된 각시간대의 수요를 만족시켜야 한다.

$$P_L(k) = \sum_{i=1}^{ng} P_i(k) + \sum_{j=1}^{nb} PB_j(k) \quad (2.2)$$

단, P_L(k) : k 시간대에서의 계통부하

② 화력발전기 출력상한한 제약조건
각 화력발전기가 낼수있는 출력에는 상한값 (P_i)과 하한값 (P_i)의 제약이 있다.

$$P_i \leq P_i(k) \leq \bar{P}_i \quad (2.3)$$

③ 화력발전기의 출력변화를 제약조건
화력발전기는 단위시간당 일정한 출력 이상을 증감발할수 없다.

$$\delta P_i \leq P_i(k) - P_i(k-1) \leq \bar{\delta} P_i \quad (2.4)$$

단, δP_i, δP_i : 화력기 i의 상한한 출력변화율

④ 전지전력저장설비의 충방전출력 상한한 제약조건
각 전지전력저장설비도 충방전출력의 상한값 (PB_j)과 하한값 (PB_j)이 지정되어 한정된 범위내에서 운전된다.

$$PB_{j1} \leq P_j(k) \leq PB_{j2} \quad (2.5)$$

⑤ 전지전력저장설비의 저장에너지 상한한 제약 및 시종단에너지 지정
전지전력저장설비는 그 기계적특성상 저장에너지 (WB_j(k))가 상한값 (WB_j)과 하한값 (WB_j)내에서 운전되어야만 하며 전지전력저장설비의 일간운용 혹은 주간운용시에 일정한 충방전 싸이클이 반복되므로 초기 및 최종저장에너지가 주어져야 한다.

$$WB_{j1} \leq WB_j(k) \leq WB_{j2} \quad (2.6)$$

$$WB_j(0) = WB_{j1}, WB_j(nhr) = WB_{j2} \quad (2.7)$$

단, WB_{j1}, WB_{j2} : 전지전력저장설비j의 시종단저장에너지 지정치

2-3. 전지전력저장설비의 운용손실의 고려
전지전력저장설비의 에너지변환시의 손실은 충전에너지량이 많아 지면 충전효율은 나빠지고 방전효율은 좋아지게 되는 저장에너지량의 1차함수인 충방전가변효율로 고려하였으며, 저장부의 손실 전력은 계산상의 효율을 기하기위해 전지전력저장설비의 저장부 전력손실을 각 시간대에서 적분하여 저장에너지의 저장량으로써 전지전력저장설비의 최적운용결정문제에 고려하였다. 이와 같은 전지전력저장설비의 운용손실을 식(2.1)-식(2.7)로 정식화한 최적운용문제에 고려하기위하여 전지전력저장설비의 충방전 전력을 식(2.8)로 고려하였다.

$$PB^j(k) = \frac{WB^j(k-1) - WB^j(k) - E_L^j(k)}{\eta_{inp}^j(k)} \quad (\text{충전상태: } -) \quad (2.8)$$

$$PB^j(k) = \frac{WB^j(k-1) - WB^j(k) - E_L^j(k)}{\frac{1}{\eta_{outp}^j(k)}} \quad (\text{방전상태: } +)$$

단, E_L^j(k) = $\frac{a^j}{2} [WB^j(k-1) + WB^j(k)] + b^j$ (저장부손실)

$$\eta_{inp}^j(k) = a_{inp}^j \frac{WB^j(k-1) + WB^j(k)}{2} + b_{inp}^j \quad (\text{충전효율})$$

$$\eta_{outp}^j(k) = a_{outp}^j \frac{WB^j(k-1) + WB^j(k)}{2} + b_{outp}^j \quad (\text{방전효율})$$

a^j, b^j : 저장부손실계수
a_{inp}^j, b_{inp}^j, a_{outp}^j, b_{outp}^j : 효율계수

제 3 장 순차근사동적계획법에 의한 전지전력저장설비의 최적 운용

식(2.2) - 식(2.7)의 여러가지 제약조건을 만족시키면서 식(2.1)의 목적함수를 최소화하도록 정식화된 전지전력저장설비의 최적 운용결정문제에서 각 화력기출력 $P_i(k)$ 와 각 전지전력저장설비의 저장에너지 $WB_i(k)$ ($k=1, \dots, nhr$)를 결정변수로 하였다. 이들 결정변수를 구하는데 있어 시간대 k 에서 전지전력저장설비의 저장에너지는 앞 시간대 $k-1$ 에서의 저장에너지에 의존하게 되며, 시간대 k 에서의 화력기출력도 출력변화율제약을 고려하게 되면 전 시간대 $k-1$ 에서의 출력이 의존된다. 그러므로 이와같은 특성을 반영하기 위하여 전지전력저장설비의 최적운용을 결정하기 위한 해법으로 각종제약과 지정치를 처리하기가 용이한 순차근사동적계획법을 사용하였다.

3-1. 순차근사동적계획법

일반적으로 동적계획법에서 변수의 갯수가 많아지면 계산기의 기억용량과 계산소요시간이 급격히 증가하는 단점을 극복하기 위해 개발된 순차근사동적계획법은 초기실행가능해로부터 결정변수를 1개로 하여 나머지 모든 변수를 고정시킨 부분문제를 구성하고 동적계획법으로 변수 1개의 각 단계에서의 최적경로를 구하여 목적함수의 값이 더이상 개선되지 않을 때까지 다른 변수 1개를 다 시도 선택하여 최적경로를 순차적으로 찾아가는 방법이다. 이때 동적계획법이 존재하는 문제에서는 변수를 1개만 선택하게 되면 해를 구하는 과정에서 선택된 변수의 변화율이 다른변수에 반영되지 않아 동적계획법을 만족하지 못하므로 최소한 2개이상의 변수로 부분문제를 구성해야 한다. 본 연구의 최적화문제에서는 계산효율성을 위하여 전지전력저장설비의 상태변수인 저장에너지를 변화폭을 일정한 간격(격자간격: Mesh Size)으로 하고, 상태변수 3개(화력 발전기 2대의 출력, 전지전력 저장설비의 저장에너지)를 조합하여 하나의 부분문제를 구성하도록 하였다. 따라서 식(2.1) - (2.7)로 구성되는 최적화 문제로 부터, 화력기 i, j 의 발전력과 전지전력저장설비 k 의 저장에너지를 변수로 한 부분문제는 발전기개발특성을 포함한 제약식(2.3)-(2.7)을, 화력기 i, j , 전지전력저장설비 k 에 대해서 동일하게 구성하였고 계통전체에 관계된 목적함수와 부하수급조건은 식(2.9), 식(2.10)으로 변형하여 구성하도록 하였다.

$$\text{Min} \sum_{h=1}^{nhr} [[a_i P_i(h)^2 + b_i P_i(h) + c_i + \text{VARO}/M_{Ti} \cdot P_i(h)] + [a_j P_j(h)^2 + b_j P_j(h) + c_j + \text{VARO}/M_{Tj} \cdot P_j(h)] + \text{VARO}/M_{Bk} \cdot PB_k(h)] \quad (2.9)$$

$$\Delta P_i(h) + \Delta P_j(h) + \Delta PB_k(h) = 0 \quad (2.10)$$

3-2. 순차근사동적계획법에 의한 최적화

전지전력저장설비의 최적운용문제를 순차근사동적계획법으로 푸는데 있어서는 최적해로의 빠른 수렴을 위하여 먼저 초기실행가능해를 구해야 하며, 초기실행가능해로부터 순차근사동적계획법으로 발전비용이 더이상 개선되지 않을 때까지 해를 점차적으로 수정하여 최적해를 구하여야 한다.

① 초기실행가능해의 결정

초기실행가능해는 화력기의 출력변화율제약 뿐만 아니라 부하수급조건도 만족시켜야 하므로 잠정적으로 가상발전기를 도입하여 부하수급조건을 위해 불평형분을 담당하도록하여 일단 문제의 제약식을 만족시키도록 하였고 이를위해서 가상발전기는 $+\infty$ 에서부터 $-\infty$ 의 출력을 낼 수 있고 그 출력변화율도 매우 크게 하여야 한다. 그 다음에 모든 시간대에서 화력기와 가상발전기의 발전력의 합이 변화되지 않는 범위내에서 각 화력기와 가상발전기의 발전력을 가감시키는 과정을 반복한다. 이때 가상발전기의 출력이 모든 시간대에서 0이 되도록 가상발전기의 연료비는 매우 높게 하였다. 가상발전기의 출력이 모든 시간대에서 0이 되면 각 화력기의 출력을 초기실행가능해로 결정한다. 이렇게 초기실행가능해를 구하는 문제도 화력기의 출력변화율제약 때문에 어느 한시간대의 해로서 독립적으로 구할 수 없는 어디까지나 전 시간대에 걸쳐서 종합적인 해를 구해야 하는 이른바 상태변수가 복수개인 동적인 부분문제가 되므로, 이를 순차근사동적계획법으로 풀기 위해서는 가상발전기의 발전력외에 2개의 화력기출력을 상태변수로 하는 부분문제를 만들고 이를 순차적으로 풀도록 하였다.

② 해의 개선

앞에서 구한 초기실행가능해로부터 실행가능해를 순차적으로 개선 시키기 위하여 선택된 화력기 2대와 전지전력저장설비 1대를 조합하여 구성된 부분문제를 동적계획법으로 푼다. 부분문제의 각 단계의 상태변수는 전지전력저장설비의 저장에너지, 선택된 화력기 i 의 출력, 선택된 화력기 j 의 출력으로 3차원 동적계획법 문제의 형태이지만 전지전력저장설비의 저장에너지의 증감에 따른 출력의 증감은 선택된 화력기 i 의 출력의 증감분, 선택된 화력기 j 의 출력의 증감분의 총합계는 0이므로 실제로는 2차원 동적계획법의 문제가 된다. 본 연구에서는 각 단계에서 전지전력저장설비의 에너지저장량을 $+ \Delta E, 0, - \Delta E$ 만큼 변화시키고 그에 따른 전지전력저장설비의 출력변화 ΔP 에 대하여 화력기 i 가 $\Delta P_i, 0, - \Delta P_i$ 만큼 변화하도록 하였다. 따라서 화력기 j 는 그 출력변화 $- \Delta P_j, - \Delta P_j, 0$ 만큼 더 부담해야 하므로 화력기 i 의 발전력과 전지전력저장설비의 저장에너지를 상태변수로 하여 최적해를 구하도록 하였다.

3-3. 흐름도

화력발전기의 출력변화율제약과, 에너지변환시의 손실 및 저장부의 전력손실을 고려하여 전지전력저장설비의 최적운용을 순차근사동적계획법으로 결정할 수 있는 전체흐름도는 다음과 같다.

계산시작

등중분연료비법으로 $[P_i(1) \quad i=1, \dots, ng]$ 를 계산하고 그 출력을 모든 시간대에서 고정시킨다. $P_i(h) = P_i(1) \quad i=1, \dots, ng \quad h=2, \dots, nhr$

가상발전기에 수급불평형분을 담당시킨다.

$$P_s(h) = P_L(h) - \sum_{i=1}^{ng} P_i(h) \quad h=1, \dots, nhr$$

화력기 2대와 가상발전기를 선택하여 부분문제를 구성한 후 1차원 DP로 부분문제를 풀어서

$P_i(h), P_j(h), P_s(h) \quad h=1, \dots, nhr$ 를 구하고 이를 저장한다.

모든 시간대에서 $P_s(h) < \epsilon$ 인가? (NO)

(YES) 화력기 2대와 전지전력저장설비 1대를 선택하여 부분문제를 구성한 후 1차원 DP로 부분문제를 풀어서 $P_i(h), P_j(h), WB^k(h) \quad h=1, \dots, nhr$ 를 구하고 이를 저장한다.

화력기와 전지전력저장설비의 조합(i, j, k)을 모두 고려하였는가? (NO)

(YES) 총 발전비용을 계산한다.

$$\sum_{i=1}^{ng} [a_i P_i(k)^2 + b_i P_i(k) + c_i + \text{VARO}/M_{Ti} \cdot P_i(k)] + \sum_{j=1}^{ng} [a_j P_j(k)^2 + b_j P_j(k) + c_j + \text{VARO}/M_{Tj} \cdot P_j(k)] + \sum_{k=1}^{nb} \text{VARO}/M_{Bk} \cdot PB_k(k)$$

발전비용의 개선이 있는가? (YES)

(NO) 최적해를 저장한다

$$P_i(h), WB^k(h) \quad i=1, \dots, ng \quad h=1, \dots, nhr \quad k=1, \dots, nb$$

계산종료

제 4 장. 사례연구

본장에서는 화력기의 출력변화율과 전지전력저장설비의 운용상의 손실을 고려한 최적운용결정 알고리즘을 시험계통에 적용하여 그 결과로부터 전지전력저장설비의 운전특성을 고찰하였다. 우선 전지전력저장설비의 운용상의 손실이 전지전력저장설비의 운용에 미치는 영향을 살펴본후에, 주간부하에 적용하여 종합적인 운용특성을 분석하였다.

4-1. 시험계통의 특성자료

일단 운전모드에서는 화력기의 화력기출력변화율제약에 의한 전지전력저장설비의 운전특성을 고찰하기 위하여 최대 1780 Mw, 최소 1010 Mw, 부하율 0.691인 부하에 적용하였으며, 전지전력저장설비의 운용상의 손실이 전지전력저장설비의 운용에 미치는 영향을 살펴보기위해서는 전지전력저장설비의 운용패턴이 잘 나타내도록 침투부하대와 기저부하대가 명확히 구분되는 단순한 형태의 부하를 사용하였다. 한편 주간운전모드에서는 최대 1826 Mw, 최소 849 Mw, 부하율 0.749인 168시간부하를 운전모드하였다. 또한 발전계통은 화력기 15기 전지전력저장설비 2기로 구성되어 총설비용량이 2208 Mw 규모인 것으로 하였다.

4-2. 화력기출력변화율을 고려한 전지전력저장설비의 최적운용 출력변화율을 고려한 화력기만으로 구성된 계통을 운전모드의 한 결과를 그림 4.1에 제시하였다. 그림 4.1의 12시와 14시에서는 전력공급부족이 일어나고 있는데 그 이유는 11시에서 12시 사이의 부하증가량이 전체 화력계통의 최대출력증가량보다 크고, 14시에서 15시 사이에서는 부하의 급한 감소로 인해서 화력계통의 최대출력감발출로써는 부하의 격감을 따라갈 수 없기 때문이다. 즉 발전계통은 부하를 만족시킬 수 있는 설비용량은 보유하고 있으나 출력변화율상한과 하한에 걸려서 부하를 추종하지 못하는 현상이 일어나고 있는 것이다. 이에 대한 대책으로서 화력계통의 15번 화력기 대신에 동일한 MW용량의 전지전력저장설비로 대체하여 운전모드의 한 결과를 그림 4.2에 보았다. 그림 4.2에서는 전지전력저장설비가 주어진 제약내에서 침투부하대(12 - 15시)에서는 발전하고 기저부하대(21 - 24시)에서는 충전을 하며 더우기 중간부하대(10-11시와 15-16시)에서도 충전을 하여 부하의 급변을 완화시키는 역할을 하므로, 화력기출력변화율제약으로 인한 부하수급불평형은 존재하지 않는다. 이상으로부터, 같은 설비용량을 가진 발전계통에 있어서 전지전력저장설비는 부하평활화뿐만 아니라 계통운용을 탄력있게 해 주며 계통전체의 운용안정성을 향상시키는 장점이 있다고 사료된다.

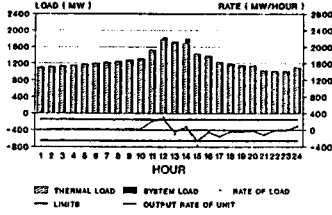


그림 4.1 화력기만으로 구성된 계통의 운전모의 결과

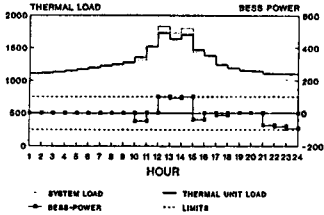


그림 4.2 화력기 및 전지전력저장설비로 구성된 계통의 운전모의 결과

4-3. 운용손실을 고려한 전지전력저장설비의 최적운용

4-3-1. 에너지변환손실의 고려 (변환효율)
 먼저 에너지변환효율이 저장에너지량에 관계없이 일정한 경우와 달리 에너지변환효율이 저장에너지량에 따라 변하는 경우의 최적운용 결과를 비교한다. 그림 4.3에서와 같이 이 계통의 부하중 화력기들이 담당하는 부하는 첨두부하대에서는 1710 Mw로 삭감되었고 기저부하대에서는 1165 Mw로 증가되었다. 즉, 전지전력저장설비가 고정효율 특성을 갖는 경우, 그 운용특성은 모든 충전시간대에서는 계통의 부하를 늘리는 계통의 부하를 일정하게 삭감시키는 전원으로 작용하여 결국 계통의 부하평활화 운영을 한다는 점이다.

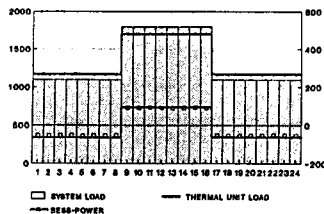


그림 4.3 고정효율을 갖는 전지전력저장설비의 최적운용

전지전력저장설비의 충전효율과 방전효율이 전지전력저장설비의 운전상태에 따라 변화하는 경우의 최적운용 결과를 분석해보면 그림 4.4와 같이 기저부하시간대인 1시-8시까지는 전지전력저장설비의 충전작용으로 기저부하가 일정한 수준까지 증가되었고 첨두부하시간대인 9시-16시까지는 전지전력저장설비의 방전으로 첨두부하가 일정수준으로 삭감되어 기저부하의 방전으로 첨두부하가 일정수준으로 삭감되어 유사하나 마지막 충전모드인 17시-24시까지는 계통부하가 선형적으로 줄어들도록 기저부하를 증가시키고 있다.

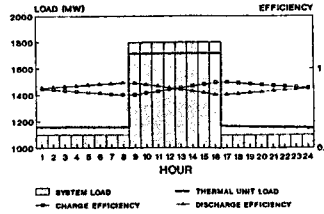


그림 4.4 가변효율을 갖는 전지전력저장설비의 최적운용

4-3-2. 저장부 손실전력의 고려 (저장에너지의 감소)

전지전력저장설비의 저장부 손실전력이 정수인 경우에 대한 운전모의 결과를 저장부 손실전력이 없는 경우와 비교하여 그림 4.5에 보았다. 전지전력저장설비의 저장부 손실전력이 각각 시간대별로 일정하면 그에 따라 저장에너지가 저감되어 전지전력저장설비가 방전작용을 하지 않더라도 저장에너지저감에 따른 손실을 고려대상 시간대에서 충전운용 해야하므로 기저부하대

서 부하를 증가시키고 이로인하여 첨두부하와의 격차가 줄어들기 때문에 전지전력저장설비의 화력기연료비감소를 위한 경제적 운용방향이 적게 된다. 따라서 전지전력저장설비의 첨두부하 감소는 저장부 손실전력을 고려하지 않은 경우보다 상대적으로 타당하다. 결국 전지전력저장설비의 저장부 손실계수 b가 작을수록 최적의 충전수준은 전시간대에 걸친 일정한 충전전력으로 인하여 충전모드인 기저부하에서의 운용을 상대적으로 크게하고 방전모드인 첨두부하에서의 운용은 상대적으로 적게한다는 점이다.

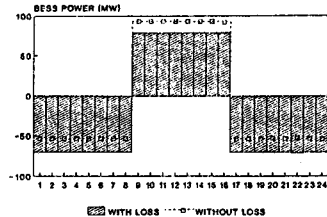


그림 4.5 저장부 손실전력이 정수인 경우의 최적운용

다음엔 저장부 손실이 저장에너지량에 정비례하는 경우에 대하여 운전모의한 후 그 결과를 그림 4.6에 도시하였다. 그림 4.6에서 전지전력저장설비는 저장부 손실을 줄이기위해 되도록 적은 저장에너지량을 보유하고 운영을 하며하므로 다음과 같은 특징을 나타낸다. (1) 시종단에너지계약에 기인하여 최종시간대부근의 충전모드에서의 충전량이 크게 되고 첫 번째 시간대부근의 방전모드에서의 방전량이 크게 운전된다. (2) 하나의 충전모드에서는 그 충전모드의 마지막 시간대로 갈수록 충전량이 커지고 하나의 방전모드에서는 그 방전모드의 처음 시간대로 갈수록 방전량이 커진다. 결국 저장부 손실이 저장에너지량에 의존하는 경우의 전지전력저장설비 손실은 최적운용패턴은 전술한 경우와 비교하면 기저부하대인 충전모드에서는 충전모드의 후반부대로 갈수록 기저부하를 더욱 높여 가시키고, 첨두부하대인 방전모드에서는 방전모드의 앞부분으로 갈수록 첨두부하를 더욱 삭감시켜, 충전방전모드에서의 화력기 부담부하가 직선적으로 변화되는 형태가 된다.

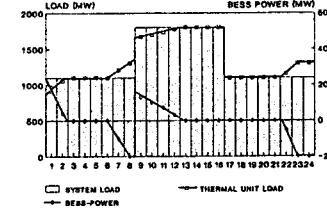
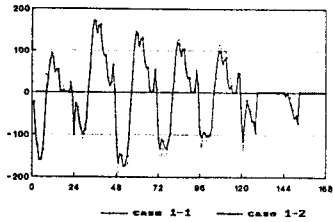


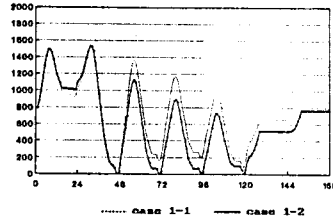
그림 4.6 저장부 손실전력이 가변인 경우의 최적운용

4-3-3. 실규모 계통의 주간운용에의 적용

전지전력저장설비가 가변효율인 경우(CASE1-1)와 고정효율인 경우(CASE1-2)를 주간운용모의하여 그 결과를 그림 4.7에 비교하였다. 이때 전지전력저장설비의 저장부 손실은 0으로 하고 CASE1-2의 전지전력저장설비 효율은 CASE1-1의 가변효율 평균치로 하여 중방전전력과 저장에너지수위를 전지전력저장설비 #1과 #2의 합으로 나타내어 비교한 것이다. 그림 4-7에서 월요일-금요일(1-120시)까지의 전지전력저장설비의 운용은 가변효율인 경우가 고정효율인 경우에 비하여 크게 설정되었다. 이와같은 결과는 고정효율인 경우의 전지전력저장설비는 전체시간대에서 충전효율이 일정하지만, 가변효율인 경우 고려대상 시간대 동안의 총발전비용을 최소화하기 위해 전지전력저장설비의 충전전력을 가능한 한 효율이 높은 상태에서 하려고 하기 때문에 전지전력저장설비 #1 및 #2의 운용량도 고정효율인 경우보다 크게 운용된 것이다. 토요일과 일요일의 충전량을 비교해보면 비록 일요일의 기저부하가 토요일의 것보다 작지만 고정효율인 경우와 가변효율인 경우에서 공히 토요일의 충전량이 더 크게 운용되었음을 관찰할 수 있는데 이는 토요일(120시 부근)에서의 부하가 이 가장 두드러져 화력발전기가 출력변화율의 제약을 받아 이를 완화하기 위해 전지전력저장설비가 그만큼 더 충전운용했기 때문이다. 또한 고정효율인 경우와 가변효율인 경우 대해 토요일과 일요일의 충전량을 비교해 보면 일요일의 상대적 충전량은 가변효율인 경우가 훨씬 적다. 이는 일일이 저장에너지 계약을 만족하기 위해 토요일과 일요일에서는 충전운용하는데 가변효율인 경우 충전효율은 저장에너지가 증가할수록 나빠지므로 저장에너지 수위가 낮은 토요일에 더 많이 충전하는 것이 유리하기 때문이다. 한편 총발전비용은 가변효율인 경우가 2,566,005 \$ 로서 고정효율인 경우의 2,566,005 \$ 보다 216 \$ 더 작으므로 전지전력저장설비 운용을 결정하는데 있어서는 그 효율을 평균적으로 고려할 필요가 있다고 사료된다.

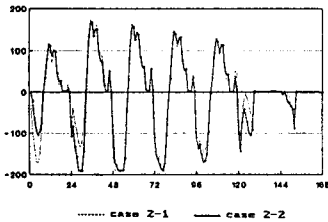


(a) 충방전전력

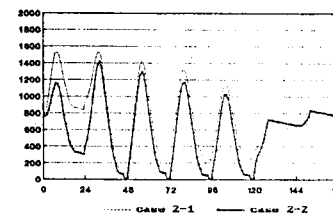


(b) 저장에너지수위
그림 4.7 전지전력저장설비 #1, #2의 주간운용 (고정효율과 가변효율의 비교)

그림 4.8 은 저장부손실특성을 분석하기 위해 저장부손실이 없는 경우(CASE2-1)와 저장부손실이 저장에너지에 의존하는 경우(CASE2-2)에 대하여 전지전력저장설비 #1과 #2의 주간운용을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4.8에서 저장부손실이 있는 경우와 없는 경우와 같은 충전전력특성을 보인다. ① 저장부손실만큼을 더 충전해야 하므로 충전량이 더 많아진다. ② 충전시간대의 후반부에 충전을 하고 방전시간대의 초반부에서 방전하려는 경향이 있다. 이는 전지전력저장설비가 되도록 저장에너지를 보유하지 않으려는 경향과 일치한다.

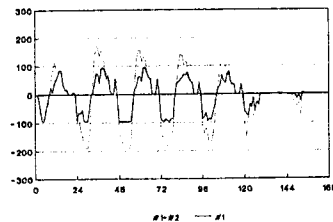


(a) 충방전전력

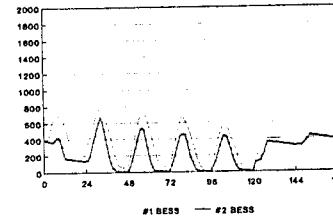


(b) 저장에너지수위
그림 4.8 전지전력저장설비 #1, #2의 주간운용 (저장부손실의 고려)

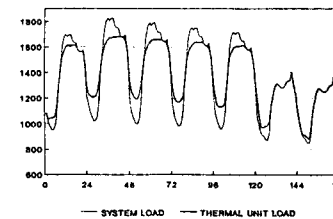
전지전력저장설비의 가변효율특성과 가변손실특성을 모두 고려한 운전모드의 결과를 그림 4.9에 제시하였다. 이 경우의 전지전력저장설비 운전특성은 전술한 두가지 운용손실특성이 결합된 것이라 할 수 있고 다음과 같이 요약된다. ① 전지전력저장설비 #2에 비해 효율특성이 우수한 전지전력저장설비 #1의 운용량이 더 크다. ② 손실계수가 더 큰 전지전력저장설비 #2(a=0.003, b=2.0)는 전지전력저장설비 #1(a=0.001, b=1.0)보다 저장에너지 level이 낮은 곳에서 운용이 된다. ③ 전지전력저장설비 #1, #2 공히, 토요일과 일요일에는 충전만한다. 평일에서는 기저부하나 첨두부하 뿐만 아니라 중간부하대에서도 충방전이 일어난데 이는 화력기 출력변화를 제약으로 인한 효과이며 전지전력저장설비는 가급적 화력기의 부담부하의 변화를 완화하는 경향이 있다고 사료된다.



(a) 충방전전력



(b) 저장에너지수위



(c) 전지전력저장설비의 운용에 의한 화력기의 부담부하
그림 4.9 전지전력저장설비의 주간운용 (가변효율 및 저장부손실의 고려)

제 5 장. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 화력발전기의 출력변화율제약 함께 전지전력저장설비의 기계적특징인 입출력응용성 및 운용손실을 고려한 다기의 전지전력저장설비의 최적운용을 순차근사동적계획법으로 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 이 알고리즘을 시뮬레이션에 적용하여 전지전력저장설비의 기계적특징이 계통운전에 미치는 효과를 검토, 고찰하였다.
 2. 발전계통에 있어서 전지전력저장설비는 단순히 부하평활화 뿐만 아니라 발전계통의 부하추종능력을 증대시켜 계통운전을 유연하게 해주며 계통전체의 운용안정성을 향상시켰다.
 3. 충방전비용은 가변효율일 경우가 고정효율인 경우보다 작게 계산되며 이로써 전지전력저장설비의 최적운용계획을 결정하는데 있어서 그 효율을 평균적 고정효율로 고려하는 것보다 가변효율로 고려하는 것이 타당하다고 사료된다.
 4. 전지전력저장설비의 저장부전력손실이 저장에너지량에 의존하는 경우의 최적운용패턴은 단순히 첨두부하와 기저부하를 수평적으로 평활하는 것이 아니라 충방전모드에서의 화력기 부담부하가 직선적으로 증가시키는 특이한 형태가 되며 이는 손실계수에 민감하므로 전지전력저장설비의 최적운용계획을 결정하는데 있어서 손실계수는 간과해서는 안될 요소임을 고찰하였다.
- 제 5 장. 참고문헌
- [1] 長谷川, 他: 「發電機出力變化率を考慮した電力貯蔵システムの最適運用」, 電氣學會電力-에너지部門全國大會, NO. 22, pp 127 - 132 (平2)
 - [2] 諸住, 他: 「各種運用損失を考慮した電力貯蔵装置の最適運用」, 電氣學會論文誌B分冊, 105卷, 4號, pp41-48 (昭59)
 - [3] William C. Spindler: 「Economic Analysis of Lead-acid Battery Energy Storage Systems - A Review of Methods」, IL2RO Project NO. LE-363, November, 1991
 - [4] D.W. Ross and S. Kim: 「Dynamic Economic Dispatch of Generation」, IEEE Trans. Vol. PAS-99, NO. 6, pp2060 (1980)