

# 전력저장장치를 고려한 일간 최적 기동정지계획 수립연구

논 문
60-4-6

## Daily Unit Commitment Scheduling of Power System with Energy Storage System

송 하나\* · 장 세 환\*\* · 김 형 중\*\*\* · 노 재 형§ · 박 종 배†  
(Ha-Na Song · Se-Hwan Jang · Hyeong-Jung Kim · Jae Hyung Roh · Jong-Bae Park)

**Abstract** - In the power system with an electric storage system that can increase utilization rate of the source of such new renewable energy, this paper introduces the approach on the daily unit commitment scheduling that determines simultaneously optimum operational condition and output of thermal generators and electric storage device. The unit commitment is one of the most important issues in economic operation and security of short-term operational plan of the power system. It is to determine on/off status of generator to minimize operational cost during the given period. The committed generator should satisfy various operational limitation such as estimated demand by system, spinning reserve condition within minimum operational cost. In order to determine on/off or charge/discharge/idle condition and output level of units and electric storage system, the MILP(Mixed Integer Linear Programming) is suggested. The proposed approach is the mixed method between LP(Linear Programming) and IP(integer programming) which seeks the value of real number and integer that maximize or minimize function objective within given condition. The daily unit commitment problem with the electric storage system is applied to MILP algorithm through linearization and formulation process. The proposed approach is applied to the test system.

**Key Words** : Energy storage system, Unit commitment, MILP(Mixed Integer Linear Programming)

### 1. 서 론

한정된 자원과 기후변화의 영향으로 인해 세계적으로 에너지 안보와 환경의 중요성에 대한 인식이 크게 증가함에 따라 화석에너지 소비 및 온실가스 배출에 큰 영향을 미치는 전력산업의 중요성과 그 역할이 더욱 커지고 있다. 최근 전력산업분야에서도 환경 및 자원문제에 대한 중요성과 영향력을 인식하고, 하나의 대안적 선택이 될 수 있는 스마트 그리드와 신재생에너지원에 대한 관심이 높아져 관련분야에 대한 다양하고 폭넓은 연구들이 이루어지고 있다. 하지만, 신재생에너지원 설비의 증가와 전력저장장치 기술의 진보에 따른 새로운 설비들과 기존설비를 포함한 시스템에 대한 최적운영방안 연구는 아직 미흡한 실정이다.

전력계통의 단기운영계획에 있어서, 발전기 기동정지(Unit Commitment) 문제는 전력계통의 경제적 운영과 안전에 큰 영향을 미치는 가장 중요한 사안들 중 하나이다[1]. 발전기 기동정지 문제는 주어진 기간 동안 시스템제약 등의

다양한 운영제약을 만족시키면서 운영비용을 최소화시키는 발전기의 On/Off 상태를 계획하는 최적화문제이다. 현재까지 최적의 결과를 위한 접근법을 찾기 위해, 우선순위 기법(Priority list methods)[2], 동적프로그래밍(Dynamic programming)[3], Lagrangian relaxation methods[4], Mixed-integer programming[5] 등과 같은 수치적인 최적화 기법(Numerical optimization techniques)들과 유전알고리즘(Genetic algorithms)[6], simulated annealing(SA)[7], Particle swarm optimization(PSO)[8] 등과 같은 발견적 탐색 기법(Stochastic search methods)들에 대한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다. 최근 신재생에너지원 및 전력저장장치에 대한 세계적인 관심에 따른 전력저장시스템을 적용[9]하거나 태양광, 풍력과 같은 신재생 에너지를 적용[10]하는 연구도 진행되고 있다.

본 논문에서는 신재생에너지 전원의 이용률을 높일 수 있는 전력저장기술의 도입을 고려하여 화력발전기와 전력저장장치의 최적 운영상태 및 출력을 동시에 결정하는 일간 최적 기동정지계획문제의 접근법을 제안하고 있다. 최적의 발전기의 On/Off 상태와 출력 및 전력저장장치의 On/Off/Idle 상태와 출력수준을 결정하기 위해 활용된 혼합정수선형계획법(Mixed Integer Linear Programming)은 선형계획법과 정수계획법을 혼합한 방법으로 주어진 제약조건 내에서 목적함수를 최대 또는 최소로 하는 실수 및 정수 조건의 해를 구하는 방법이다. MILP 알고리즘을 일간 기동정지계획문제에 적용하기 위해 일간 기동정지계획 문제를 일반적인 형태

† 교신저자, 정회원 : 건국대학교 전기공학과 교수 · 공학박사  
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

\* 준 회원 : 건국대학교 전기공학과 석사

\*\* 정 회원 : 건국대학교 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회원 : 에너지관리공단

§ 정 회원 : 건국대학교 전기공학과 조교수 · 공학박사

접수일자 : 2011년 1월 4일

최종완료 : 2011년 3월 25일

로 선형화 및 공식화한다. 제안된 접근법과 모델링 기법의 우수성을 입증하기 위해 10대의 화력발전기, 저장장치 및 신재생에너지를 포함한 테스트 계통에 대한 사례연구를 수행하고 기존의 연구들과 비교분석을 수행한다.

## 2. 신재생에너지와 전력저장장치

### 2.1 신재생에너지

신재생에너지는 수소에너지, 연료전지, 석탄액화·가스화의 신에너지와 태양열, 태양광 발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양 에너지, 폐기물 에너지 등의 재생에너지로 나눌 수 있다. 신재생에너지에 대한 관심의 증가로 전력계통에서의 신재생 발전설비 비율이 점차 증가하고 있는 추세다. 대표적으로 널리 보급되고 있는 신재생에너지원으로 태양광, 풍력을 들 수 있다. 태양광과 풍력은 한번 설치하면 유지, 관리하는데 드는 것을 제외하면 추가로 에너지를 얻기 위해 투입되는 비용이나 노력이 없다는 장점이 있는 반면 근본적으로 에너지의 생산을 자연에 의존하기 때문에 에너지 수급의 적시성에서 약점이 있으며, 경제성을 확보하기 위한 입지 조건(적정 풍속, 풍량, 일사량 등)을 만족해야 한다는 제한이 따른다[11].

#### 2.1.1 풍력발전시스템

풍력발전시스템의 종류에 따라 다양한 모델링 기법들이 제안되고 있으며, 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존 연구와의 비교분석을 위해 종래의 연구에 제안된 풍력발전시스템에 대한 모델링 기법을 기반으로 한다[12]. 다음은 풍력발전시스템에 대한 모델링 식을 나타내고 있다.

$$P_{out} = \begin{cases} 0 & V_w < V_{ci} \\ aV_w^4 + bV_w^3 + cV_w^2 + dV_w + e & V_{ci} \leq V_w \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V_w \leq V_{co} \\ 0 & V_w > V_{co} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $P_r$ 은 정격 전력,  $V_{ci}$ 는 시동 풍속,  $V_{co}$ 는 정지 풍속,  $V_r$ 은 정격 전력에서의 속도,  $V_w$ 는 각 시간별 풍속이다. 풍력발전의 특성식은 시간별 풍속에 따라 나뉘며, 풍력발전기의 출력은 제조업체에 의해 주어진 데이터 값을 통하여 추정할 수 있다.

#### 2.1.2 태양광발전시스템

태양광발전시스템은 송전망과 비교하여 볼 때, 아직 전압 표준화가 되어있지 않다. 시뮬레이션은 전체의 동작 전압 범위 이상의 전류와 전압을 예측할 수 있는 모델을 요구한다. 본 논문에서 태양광전원을 고려하기 위한 모델링 방법으로 기존의 연구의 모델링 방법을 기반으로 하고 있다[2]. 이러한 태양광발전시스템의 운영 능력은 최대 출력에 의해

결정된다. 각 시간의 일사량  $G_a$ 와 온도  $T_a$ 에서 최대출력  $P_{Max}^M$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{Max}^M = \frac{G_a}{G_{a,0}} [P_{Max,0}^M + \mu_{P_{Max}} (T_a + G_a \frac{NOTC-20}{800} - T_{M,0})] \quad (2)$$

여기서,  $G_{a,0}$ 는 표준 상태에서의 일사량,  $P_{Max,0}^M$ 은 표준 상태에서의 최대 전력,  $T_{M,0}$ 는 표준 상태에서의 모듈 온도,  $NOTC$ 는 PV의 평균 운영 전지 온도이다.

#### 2.1.3 신재생에너지원에 대한 고려방법

신재생에너지원(즉, 태양광 및 풍력)은 출력 및 상태의 예측이 어려운 에너지원이기 때문에 사전에 출력을 결정하여 Must-Run으로 부하에 반영시키는 방법으로 부하측 자원으로 고려한다. 다음 그림은 부하측 자원으로 고려되는 신재생에너지에 대한 고려방법을 보여주고 있다.

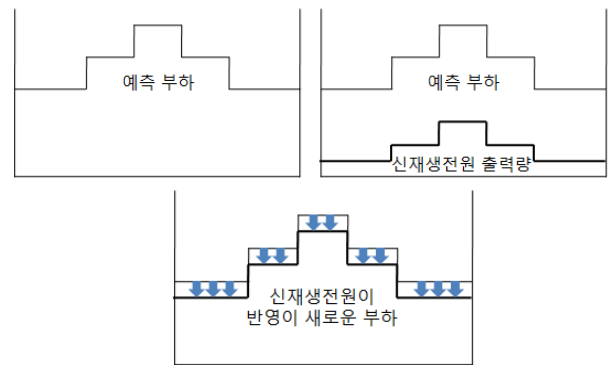


그림 1 신재생에너지원 고려방법  
Fig. 1 Demand reduction method

### 2.2 전력저장장치

전력저장기술은 전력수요가 적은 시간대에 전력을 저장해 두었다가 전력수요가 많은 비싼 시간대에 방전하여 전력 활용률을 높이기 위한 기술로서 전력산업의 특수성인 '전력수요와 공급의 동시성' 제약을 해소할 수 있는 기술이다. 기술적 장점에도 불구하고 대용량 전력저장기술의 가장 큰 난관은 기존 화력설비에 비교하여 낮은 경제성이다. 전지저장시스템의 경제성이 현격히 낮은 이유는 현재 기술수준으로는 초기 투자비인 건설비가 높은 데 반해 상대적으로 수명이 낮은 데 그 원인이 크다고 할 수 있다. 따라서 대용량 전력저장기술의 상용화를 위해서는 투자비 저감, 수명연장 기술 등 핵심기술에 대한 집중적인 연구개발이 필요하다고 할 수 있다[13]. 다음 그림은 기존의 전력계통에서 신재생에너지원과 전력저장장치를 고려한 시스템의 구성도를 나타내고 있다.

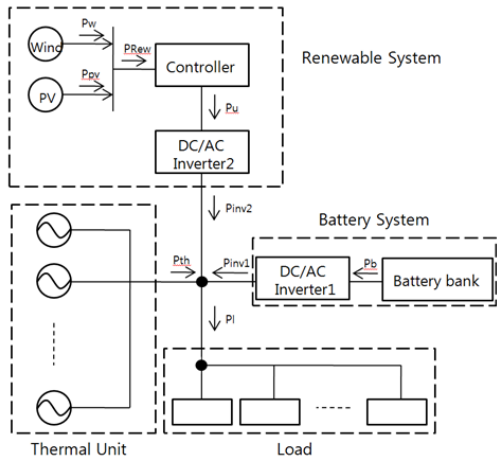


그림 2 신재생에너지원과 전력저장장치를 고려한 전력시스템  
 Fig. 2 The Power System with Renewable Energy and Battery System

### 3. 전력저장장치를 고려한 발전기 기동정지문제의 공식화

#### 3.1 목적함수

발전기 기동정지 문제의 목적은 다양한 시스템 및 발전기 제약들은 만족하면서 스케줄링 기간 동안의 발전기들의 전체 운영비용을 최소화하는 것이다. 전체 목적함수는 일반적으로 다음과 같이 운전/정지 비용과 연료비용을 합한 전체 비용을 최소화하는 식으로 주어진다.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i(t))u_i(t) + SU_i(t)(1-u_i(t-1))u_i(t)] \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 계획기간,  $N$ 은 발전기 수,  $u_i(t)$ 는 발전기  $j$ 의  $t$ 시간의 on/off 상태이다.  $u_i(t)$ 는 발전기  $j$ 가 off 상태일 때, '0'으로 한다.

#### 3.1.1 연료비용함수

기동된 모든 발전기에서, 전체 연료비용은 발전기를 경제적으로 급전함으로서 최소화한다. 발전기  $i$ 의 연료비용 함수는 아래와 같이 표현된다.

$$F_i(P_i(t)) = a_i P_i^2(t) + b_i P_i(t) + c_i \quad (4)$$

여기서,  $P_i(t)$ 는  $t$ 시간에서 발전기  $i$ 의 출력량,  $a_i, b_i, c_i$ 는 발전기  $i$ 의 비용계수이다.

#### 3.1.2 기동비용과 정지비용

정지된 발전기를 재기동하기 위한 기동비용(보일러의 온도와의 연관)은 목적함수에서 고려되어진다. 즉, 기동비용은 발전기가 정지되어 있는 시간에 의존한다. 정지시간이 최소 정지시간을 초과하여 냉간기동시간( $T_{cold,i}$ )을 초과 할 때, 기

동비용은 높은 냉간비용( $SU_{C,i}$ )이 되고, 정지시간이 최소 정지시간을 초과하여 냉간기동시간을 초과하지 않을 때는 낮은 열간비용( $SU_{H,i}$ )이 된다. 기동비용은 다음과 같다.

$$SU_i(t) = \begin{cases} SU_{H,i} & \text{if } MDT_i \leq TOFF_i(t) \leq MDT_i + T_{cold,i} \\ SU_{C,i} & \text{if } TOFF_i(t) > MDT_i + T_{cold,i} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $TOFF_i(t)$ 은 시간  $t$ 에 발전기  $i$ 가 연속적으로 정지된 기간이고,  $MDT_i$ 는 발전기  $i$ 의 최소 정지시간이다.

정지 비용은 보통 일정한 수치로 모델링 된다. 이 논문에서 정지비용은 모든 발전기에 대해서 '0'의 값을 동일하게 고려하여 목적함수에서 제외시켰다.

### 3.2 시스템 제약과 발전기 제약

#### 3.2.1 수급균형 제약

각 시간에서 발전기 출력의 합과 인버터 출력(전력저장장치)의 합은 다음처럼 상응하는 전체 시스템 수요를 만족해야만 한다.

$$P_{th}(t) + P_{inv}(t) = D(t) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i(t)u_i(t) = P_{th}(t) \quad (7)$$

여기서,  $P_{th}(t)$ 는  $t$ 시간에서 on 상태에서의 발전기 전력의 합,  $P_{inv}(t)$ 는 인버터의 출력,  $D(t)$ 는  $t$ 시간에서 전체 시스템 부하이다.

#### 3.2.2 계통 순동예비력 제약

순동예비력은 부하정전 확률을 최소화하기 위해 전력시스템의 운영동안에 이용 가능해야만 한다. 순동예비력은 사전에 지정된 양 또는 예측된 수요의 일정 부분을 고려한다. 순동예비력은 아래 식과 같이 일정 MW용량 이상으로 표현될 수 있다.

$$D'(t) = D(t) + P_{inv}(t) \quad \text{for charge} \quad (8)$$

$$D'(t) = D(t) - P_{inv}(t) \quad \text{for discharge}$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,max} u_i(t) \geq D'(t) + SR(t) \quad (9)$$

여기서,  $P_{i,max}$ 는 발전기  $i$ 의 최대 출력이고,  $D'(t)$ 는 인버터의 충/방전 상태에 따른  $t$ 시간에서의 전체 시스템 부하,  $SR(t)$ 는  $t$ 시간에 필요한 순동예비력이다.

#### 3.2.3 발전기 출력 제약

각 발전기에서 생산된 전력은 아래와 같은 일정한 제한 내에 있어야 한다.

$$P_{i,min} \leq P_i(t) \leq P_{i,max} \quad (10)$$

여기서,  $P_{i,min}$ 과  $P_{i,max}$ 는 발전기  $i$ 의 최소/최대 출력이다.

### 3.2.4 최소 운전/정지 시간 제약

발전기는 한번 운전되거나, 정지되었을 때 즉시 재기동 또는 정지 할 수 없다. 최소 기동/정지 시간 제약은 발전기가 정지 또는 기동되기 전에 어떤 시간동안 운전/정지 되어야만 하는 시간을 나타낸다. 이 제약은 다음과 같다.

$$u_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } 1 \leq TON_i(t-1) \leq MUT_i \\ 0 & \text{if } 1 \leq TOFF_i(t-1) \leq MDT_i \\ 0 \text{ or } 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서,  $TON_i(t)$ ,  $TOFF_i(t)$ 는 발전기  $i$ 가  $t$ 시간에 연속적으로 운전/정지하고 있는 기간,  $MUT_i$ ,  $MDT_i$ 는 발전기  $i$ 의 최소 운전/정지시간이다.

### 3.2.5 발전기 출력 증/감발 제약

각 시간에서 발전기의 증/감발률에 따른 제약은 다음과 같다.

$$P_{i,\min}(t) \leq P_i(t) \leq P_{i,\max}(t) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_{i,\min}(t) &= \max(P_i(t-1) - DR_i, P_{i,\min}) \\ P_{i,\max}(t) &= \min(P_i(t-1) + UR_i, P_{i,\max}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $DR_i$ ,  $UR_i$ 는 발전기  $i$ 번째 발전기의 증/감발률이다.

## 3.3 신재생 에너지 제약과 전력저장장치 제약

### 3.3.1 태양광 에너지의 전력 제약

태양광 에너지의 출력은 일사량과 온도의 함수로 표현된다. 이 함수는 각 PV cell의 종류에 따라 달라지고, 변수 사이의 관계는 비선형이지만, 실용적인 목적을 위해서 선형으로 간주된다.

$$P_{pv}(t) = f(G_a(t), T_a(t)) \quad (14)$$

여기서,  $P_{pv}(t)$ 는  $t$ 시간에서 전체 태양광의 출력,  $T_a(t)$ 는  $t$ 시간에서 태양광의 주변 온도,  $G_a(t)$ 는  $t$ 시간에서 태양광의 전체 일사량이다. 태양광 에너지의 전력은 각 시간  $t$ 에 대하여 이러한 온도와 일사량에 영향을 받는 함수로 나타낸다.

### 3.3.2 풍력의 출력 제약

풍력은 풍속의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$P_w(t) = f(V_w(t)) \quad (15)$$

여기서,  $P_w(t)$ 는  $t$ 시간에서의 전체 풍력,  $V_w(t)$ 는 풍력발전소에서의 풍속이다. 풍력은 각 시간  $t$ 의 풍속에 대한 함수로 나타낸다.

### 3.3.3 신재생 에너지의 총 전력

전체 신재생 에너지의 전력은 태양광에너지 전력과 풍력의 합으로 표현된다.

$$P_{Rew}(t) = P_{pv}(t) + P_w(t) \quad (16)$$

여기서,  $P_{Rew}(t)$ 는  $t$ 시간에서 신재생 에너지 전체의 출력이다.

### 3.3.4 전력저장장치의 충전량 제약

시간  $t$ 에서 전력저장장치의 충전량은  $(t-1)$ 시간에서의 충전량에  $t$ 시간에서 발생한 충전량을 더한 것과 같다.  $t$ 시간에서 발생한 충전량은 전력저장장치가 충전상태일 때, 인버터의 출력에 따라 정해진다.

$$C(t) = C(t-1) + [P_{inv1}(t) \times B_{stats}(t)] \quad (17)$$

여기서,  $C(t)$ 는  $t$ 시간에서 전력저장장치의 충전량이다.  $B(t)_{stats}$ 는 전력저장장치의 충전/방전/idle 상태를 나타낸다.

### 3.3.5 전력저장장치의 출력 제약

다음은 전력저장장치의 최대 충/방전 제약을 나타낸다. 이 제약은 전력저장장치 정격에 의해 결정된다.

$$|P_b(t)| < P_{b,\max} \quad (18)$$

여기서,  $P_b(t)$ 는 전력저장장치의 출력이고,  $P_{b,\max}$ 는 전력저장장치의 최대 출력이다.

### 3.3.6 신재생 에너지의 총 전력

최소 상태를 찾는 계획 문제는 각 시간의 전력저장장치의 충전 상태를 포함한다. 전력저장장치의 충/방전은 초기/종료 충전량(SOC)에 따라 고정된다. 각 초기/종료 SOC는 다음과 같이 표현된다.

$$SOC(t)|_{t=0} = C_s \quad (19)$$

$$SOC(t)|_{t=N_i} = C_f \quad (20)$$

여기서,  $C_s$ 는 전력저장장치의 충전 상태에 대한 초기 충전량이고,  $C_f$ 는 종료 상태에서의 충전량이다.

### 3.3.7 전력저장장치의 충전 용량 제약

전력저장장치의 충전 용량에 대한 제약은 다음과 같이 표현된다.

$$SOC_{\min} < SOC(t) < SOC_{\max} \quad (21)$$

여기서,  $SOC_{\max}$ ,  $SOC_{\min}$ 은 전력저장장치의 최대/최소 충전 용량이다.

## 4. 혼합정수선형계획법

### 4.1 혼합정수선형계획법

모든 제어변수가 이산변수로서 정수 제약조건을 만족해야 하고 어떤 목적함수를 최적화하는 문제는 정수계획법

(Integer Programming)의 문제에 해당한다. 정수계획법이나 혼합 정수계획법 문제는 모든 또는 일부 결정변수가 정수로 제한되어 있는 선형계획법의 특별한 경우이다. 일부 결정변수가 정수제약조건을 만족해야 하는 경우는 혼합정수계획법의 문제에 속한다. 선형계획법에서 “가분성” 가정은 기각되어야 하고, 일부 변수는 이산적인 값이어야 한다. 이산적인 변수는 ‘0’과 ‘1’로 제한된다. 즉, “yes”나 “no”결정변수이거나, 이산 결정변수이다. 많은 예를 보면, 혼합정수계획법은 좀 더 다루기 쉬운 이산 결정변수로 새로 표현할 수 있다. 이진 변수의 발생은 다음 중에서 가장 일반적인 다양한 결정 요구사항 때문일 수 있다. 이러한 정수계획법의 기교에는 두가지의 범주로 나누어지게 되는데 하나는 탐색법(Search Method)이고 다른 하나는 차단법(Cutting Method)이다. 탐색법은 분기 한정법(Branch and Bound Method) 개념과 나열기법(Enumeration Technique)을 주로 이용하는데, 이는 정수해 공간이 한정된 수의 점으로 구성되어 있다는 사실에 입각하고 있다. 차단법은 주로 선형정수계획법에 이용되며, 일반적인 선형계획법 문제에서의 해가 제약조건에 의해 구성된 다각형의 꼭지점(extreme point)에 존재한다는 사실에 입각하고 있다[14].

## 4.2 MILP 알고리즘

### 4.2.1 분기 한정법

분기 한정법은 1960년에 선형계획법(Linear Programming)을 위해 A. H. Land와 A. G. Doig가 ‘An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems’에 처음 소개하였다. 분기 한정법은 최적해의 후보가 되는 모든 영역 또는 경로를 효율적으로 검색하는 방법이며 주로 최적화나 조합 최적화 문제를 풀 때 사용되었다. 분기 한정법은 모든 후보해를 체계적으로 나열하는 분기과정(branching)을 수행하면서 최적화 할 수치의 상한값(upper bound)와 하한값(lower bound)을 추정 후 유망함이 없다고 판정된 해를 검색하여 제거해(pruning) 나간다. 제거하는 해에서 파생되는 해는 살펴보지 않기 때문에 불필요한 시간 소모를 줄이게 된다[15]. 다음 그림은 분기 한정법을 도식화한 것이다.

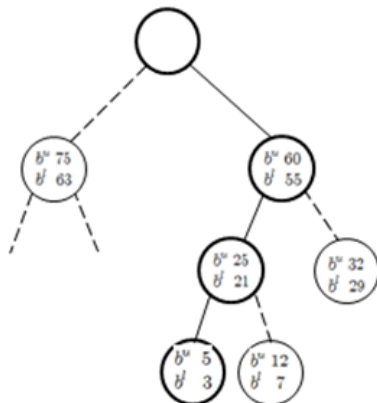


그림 3 분기 한정법  
Fig. 3 Branch and Bound Method

## 4.3 Mixed Integer Linear Programming

본 논문에서는 제안된 계통의 발전기 기동정지문제를 선형계획법과 정수계획법을 혼합한 방법인 혼합정수선형계획 문제(Mixed Integer Linear Problem)로 공식화하였다. 발전기의 On/Off 상태 및 저장장치의 Charge/Discharge/Idle 상태를 정수형 변수로 처리하고, 발전기의 출력 및 저장장치의 충·방전량을 실수형 변수로 처리하였다. 그리고 혼합정수선형계획법의 알고리즘 중 가장 효율적인 방법으로 널리 사용되고 있는 분기 한정법(Branch and Bound Method)으로 해석하였다. 이것은 선형문제이기 때문에 다음의 그림과 같이 2차의 연료비용함수는 1차로 근사화하였다.

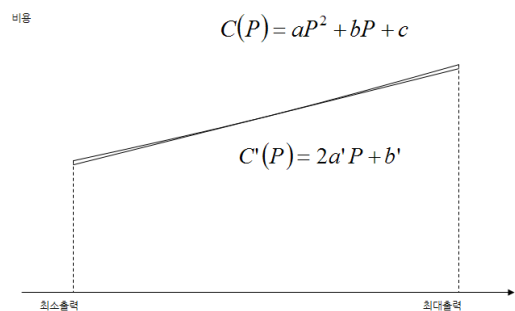


그림 4 2차연료비용함수의 1차로의 근사화  
Fig. 4 Linear Approximation of Secondary Fuel Cost Function

## 5. 사례연구

본 사례연구에서는 전력저장장치 및 신재생에너지를 고려한 일간 기동정지계획 문제를 해석하기 위해, 대상 문제를 모델링 및 선형화하고 Mixed Integer Linear Programming (MILP) 기법을 적용하여 최적의 기동정지계획 수립 연구를 수행하였다. 테스트 계통으로 10대의 발전기 시스템에서 24 시간 동안의 수요에 대한 발전기 및 전력저장장치의 운영 계획문제를 해석하고, 결과를 비교분석하였다. 상용프로그램 Matlab 2009를 기반으로 사례연구가 이루어졌다.

### 5.1 CASE 1

CASE 1에서는 10대의 화력발전기와 전력저장장치를 고려한 모의 전력시스템에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 시스템의 시간별 수요 데이터와 Battery 데이터 및 10대의 화력발전기의 데이터는 아래의 표와 같다[16].

표 1 Battery 데이터  
Table 1 Battery Bank Data

MWh,min	MWh,max	Pb,max	SOC,initial	SOC,final
200	500	500	200	200

표 2 시간별 수요 데이터

Table 2 Load Demand for 24-Hour

Hour	Demand (MW)	Hour	Demand (MW)	Hour	Demand (MW)
1	700	9	1,300	17	1,000
2	750	10	1,400	18	1,100
3	850	11	1,450	19	1,200
4	950	12	1,500	20	1,400
5	1,000	13	1,400	21	1,300
6	1,100	14	1,300	22	1,100
7	1,150	15	1,200	23	900
8	1,200	16	1,050	24	800

표 3 10대의 화력발전기 데이터

Table 3 Data of Thermal Units

Unit	Unit1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Unit 7	Unit 8	Unit 9	Unit 10
Max (MW)	455	455	130	130	162	80	85	55	55	55
Min (MW)	150	150	20	20	25	20	25	10	10	10
a	0.00048	0.00031	0.002	0.00211	0.00398	0.00712	0.00079	0.00413	0.00222	0.00173
b	16.19	17.26	16.6	16.5	19.7	22.26	27.74	25.92	27.27	27.79
c	1000	970	700	680	450	370	480	660	665	670
MUT (Hr)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
MDT (Hr)	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
Hot start cost(\$)	4500	5000	550	560	900	170	260	30	30	30
Cold start cost(\$)	9000	10000	1100	1120	1800	340	520	60	60	60
(Hr)	5	5	4	4	4	2	2	0	0	0
Initial status (Hr)	8	8	-5	-5	-6	-3	-3	-1	-1	-1

표 4 전력저장장치 미고려

Table 4 Simulation Result(System without Battery)

Hr	Generation Output										Total Power	Fuel Cost	Startup Cost
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10			
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700	13,683	0
2	455	165	0	130	0	0	0	0	0	0	750	15,153	1,120
3	455	265	0	130	0	0	0	0	0	0	850	16,892	0
4	455	235	130	130	0	0	0	0	0	0	950	19,262	1,100
5	455	285	130	130	0	0	0	0	0	0	1,000	20,133	0
6	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0	1,100	22,387	1,800
7	455	410	130	130	25	0	0	0	0	0	1,150	23,262	0
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	24,150	0
9	455	455	130	130	100	20	0	10	0	0	1,300	27,303	400
10	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1,400	30,058	520
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0	1,450	31,916	60
12	455	455	130	130	162	80	25	43	10	10	1,500	33,890	60
13	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1,400	30,058	0
14	455	455	130	130	100	20	0	10	0	0	1,300	27,303	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	24,150	0
16	455	310	130	130	25	0	0	0	0	0	1,050	21,514	0
17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	0	1,000	20,642	0
18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0	1,100	22,387	0
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	24,150	0
20	455	455	130	130	162	38	0	10	10	10	1,400	30,883	520
21	455	455	130	130	100	20	0	10	0	0	1,300	27,303	0
22	455	365	130	130	0	20	0	0	0	0	1,100	22,348	0
23	455	185	130	130	0	0	0	0	0	0	900	18,392	0
24	455	215	0	130	0	0	0	0	0	0	800	16,022	0
Total Cost												568,821	

상기 모의 전력시스템에 대한 일간 기동정지계획은 제안된 모델링기법과 MILP알고리즘을 적용한 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다. 표 4는 전력저장장치를 고려하지 않은 10대의 화력발전기만의 결과이고, 표 5는 10대의 화력발전기와 전력저장장치의 출력을 나타낸 시뮬레이션의 결과이다.

표 5 전력저장장치 고려

Table 5 Simulation Result(System with Battery)

Hr	Generation Output										Battery			Fuel Cost	Startup Cost
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	Total Power	Out	State		
1	455	165	0	130	0	0	0	0	0	0	750	50	-1	15,153	0
2	455	165	0	130	0	0	0	0	0	0	750	0	0	15,153	0
3	455	185	130	130	0	0	0	0	0	0	900	50	-1	18,392	1,100
4	455	235	130	130	0	0	0	0	0	0	950	0	0	19,262	0
5	455	285	130	130	0	0	0	0	0	0	1,000	0	0	20,133	0
6	455	435	130	130	0	0	0	0	0	0	1,150	50	-1	22,755	0
7	455	410	130	130	25	0	0	0	0	0	1,150	0	0	23,262	1,800
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	0	0	24,150	0
9	455	455	130	130	160	20	0	0	0	0	1,350	50	-1	27,628	340
10	455	455	130	130	160	20	0	0	0	0	1,350	50	1	27,628	0
11	455	455	130	130	162	64	0	0	0	0	1,396	54	1	28,675	0
12	455	455	130	130	162	80	0	0	0	0	1,412	88	1	29,048	0
13	455	455	130	130	160	20	0	0	0	0	1,350	50	1	27,628	0
14	455	455	130	130	160	20	0	0	0	0	1,350	50	-1	27,628	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	0	0	24,150	0
16	455	310	130	130	25	0	0	0	0	0	1,050	0	0	21,514	0
17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	0	1,000	0	0	20,642	0
18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0	1,100	0	0	22,387	0
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1,200	0	0	24,150	0
20	455	455	130	130	162	0	0	10	0	0	1,342	58	1	27,771	60
21	455	455	130	130	110	0	0	10	10	10	1,300	0	0	27,628	60
22	455	435	130	130	0	0	0	0	0	0	1,150	50	-1	22,755	0
23	455	185	130	130	0	0	0	0	0	0	900	0	0	18,392	0
24	455	215	0	130	0	0	0	0	0	0	800	0	0	16,022	0
Total Cost												555,266			

\* Battery state : Charge(-1), Discharge(1), Idle(0)

전력저장장치는 일반적인 예상과 같이, 다음 그림에서 수요가 적은 오프-피크(Off-Peak) 시간대(전력가격이 낮음)에 충전하고, 수요가 많은 피크 시간대(전력가격이 높음)에 방전함으로써 피크 시간대에 화력발전기의 발전량 감소를 유도하여 최대수요가 감소하는 효과를 보여주고 있다.

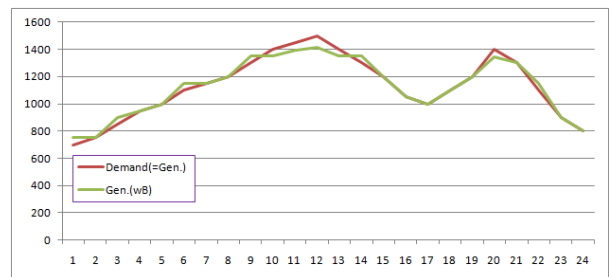


그림 5 전력저장장치에 따른 피크 수요의 감소

Fig. 5 Reduction of Peak by Battery

CASE 1의 결과는 AI기법을 이용한 기존의 연구결과들과 비교하면 상대적으로 높은 결과를 보였지만, AI기법은 휴리스틱 방법으로서 경험에 기반하여 문제를 해결하거나 학습하거나 발견해 내는 방법으로 현실적으로 만족할 만한 수준의 해를 찾지만, 본 논문에서 사용한 MILP는 수치해석적인

방법으로서 문제에 접근하기 때문에 결과에 대한 신뢰성을 가질 수 있다. 또한, 전력저장장치를 고려한 결과에서는 자명한 해를 도출하였다.

표 6 각 사례에 대한 이전의 연구들과의 비교

Table 6 Comparison of Previous Studies

Method	10-unit	MIP (10-unit)	MIP (10-unit with Battery)
LR [4]	565,825	<b>568,821</b>	<b>555,266</b>
GA [6]	565,825		
SA [7]	565,828		
IPSO [8]	563,954		

5.2 CASE 2

CASE 2에 대해서는 10대의 화력발전기에 전력저장장치 및 태양광, 풍력의 신재생 에너지를 고려하여 해석하였다. 여기에서 신재생에너지는 출력 및 상태의 예측이 어려운 에너지원으로, 사전에 출력을 결정하여 Must-Run으로 부하에 반영시킴으로써 부하측 자원으로 고려하였다. CASE 2에서 사용한 모의 전력시스템의 시간별 수요 및 신재생전원 데이터와 Battery 데이터, PV 시스템 데이터, Wind Plant 데이터 그리고 10대의 화력발전기의 데이터는 아래의 표와 같다[12].

표 7 시간별 수요 및 신재생전원 데이터

Table 7 Load and Renewable Data for 24-Hour

Hr	demand	Ga	Ta	Vw
1	1100	0	24.8	5.7
2	1200	0	24.7	6.5
3	1400	0	24.5	7.5
4	1600	0	24.3	6.9
5	1700	93.5	24.4	8.6
6	1900	212.5	24.5	10.5
7	2000	255	25.5	13.6
8	2100	467.5	26.5	10.4
9	2300	637.5	27.5	9.1
10	2500	680	28	9.3
11	2600	816	28.5	7.7
12	2700	850	28.8	7
13	2650	833	29	5.9
14	2600	850	29.7	4.9
15	2500	680	29.8	3.5
16	2300	595	30	3.4
17	2000	255	29.8	2.8
18	1850	212.5	29.5	3.1
19	1700	153	29	2.3
20	1600	68	27.7	2.9
21	1500	42.5	26.5	3.5
22	1400	0	26	3.8
23	1300	0	25.5	3.8
24	1200	0	25	4.7

표 8 Battery 데이터

Table 8 Battery Bank Data

MWh,min	MWh,max	Pb,max	SOC,initial	SOC,final
1250	2500	500	50%	50%

표 9 10대의 화력발전기 데이터

Table 9 Data of Thermal Units

Unit	Unit1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6	Unit 7	Unit 8	Unit 9	Unit 10
Max (MW)	600	600	400	400	300	300	200	200	100	100
Min (MW)	100	100	100	100	50	100	100	50	50	50
a	0.001	0.002	0.0025	0.0025	0.002	0.002	0.0015	0.0015	0.0012	0.0012
b	4	6	8	10	10	12	14	16	15	17
c	5	5	20	20	30	30	40	40	55	55
MUT (Hr)	5	5	3	3	2	2	2	2	1	1
MDT (Hr)	5	5	3	3	2	2	2	2	1	1
Hot start cost (\$)	550	500	450	460	800	750	720	700	560	570
Cold start cost (\$)	1100	1000	900	920	1600	1500	1440	1400	1120	1140
(Hr)	3	3	2	2	1	1	1	0	0	0
Initial status (Hr)	5	5	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-1	-1

표 10 PV 시스템 데이터

Table 10 PV System Data

NOCT	No. of Cells	Prated W	$\mu_{P_{Max}}$
44	1000×10	36	-0.0045

표 11 Wind Plant 데이터

Table 11 Wind Plant Data

Pr	Vci	Vr	Vco	a	b	c	d	e
140	3	15.01	17	-0.015	0.33	-0.9	-2.1	7.1

CASE 2에서는 위의 모의 전력시스템에 대해서 CASE 1과 동일한 방법으로 사례연구를 수행하였다. 그 결과로 다음의 그림 6과 같이 전체 수요에서 신재생에너지의 발전량만큼을 수요가 감소되고, 전력저장장치의 충/방전에 의해, 피크 시간대의 수요의 감소를 확인할 수 있다.

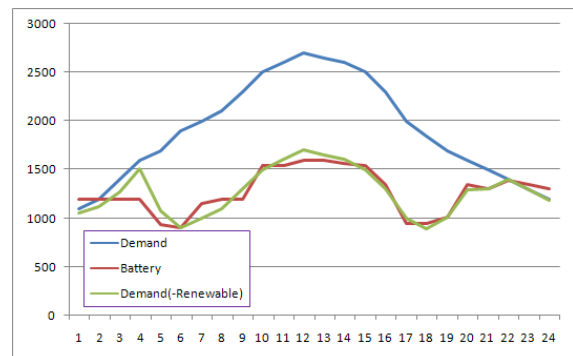


그림 6 전력저장장치 및 신재생에너지에 따른 피크 수요의 감소

Fig. 6 Reduction of Peak by Battery and Renewable Energy



다음 표는 본 논문에서 수행한 사례연구의 결과에 대한 기존의 연구들과의 비교 결과를 나타내고 있다. 모든 사례에서 본 논문에서 사용한 방법이 다른 기존의 AI 기법들보다 더 경제적인 운영비용을 도출한 것을 확인할 수 있다.

**표 12** 각 사례에 대한 이전의 연구들과의 비교

**Table 12** Comparison of Previous Studies

	Case	LR [12]	GA [12]	LRGA [12]	MILP
1	Thermal only	378,890	379,380	375,840	363,038
2	Thermal and Renewable	214,140	214,190	214,120	200,270
3	Thermal, Renewable and Battery	202,940	202,870	202,940	199,570

## 6. 결 론

전력저장장치를 고려한 일간 기동정지계획 문제를 해석하기 위해 본 논문에서는 대상 문제를 선형화하여 Mixed Integer Linear Programming(MILP) 기법을 적용하여 최적의 기동정지계획 수립 연구를 수행하였다. 테스트 계통으로 10대의 발전기 시스템에서 24시간 동안의 수요에 대한 발전기 및 전력저장장치의 운영계획문제를 해석 및 결과 비교분석하였다. 사례연구 1에서는 수치해석적 기법인 MILP가 AI(기존 연구결과) 기법들에 비해 상대적으로 높은 결과를 보였지만, 결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었고, 전력저장장치를 고려한 결과에서는 자명한 해를 도출하였다. 또한, 사례연구 2에서는 기존의 연구들과 비교해서 제안한 알고리즘이 다른 기존의 AI 기법들보다 더 경제적인 운영비를 도출한 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 전력저장장치 및 분산전원들에 대한 완벽한 기술적인 모델링과 환경적인 요인들에 대한 고려가 미흡하기 때문에 향후 이러한 점을 보완하여 더욱 현실성 있는 연구를 수행할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 U-City 전문가 프로그램 지원에 의해 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] Wood, A. J. and Wollenberg, B. F.(1984). Power Generation, Operation, and Control. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.  
 [2] Burns, R. M. and Gibson, C. A. (1975). Optimization of priority lists for a unit commitment program. in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Paper A, 75 453-1.  
 [3] Ouyang, Z. and Shahidehpour, S. M. (1991). An intelligent dynamic programming for unit

commitment application. IEEE Trans. on Power Systems. Vol. 6, No. 3, pp1203-1209.  
 [4] Merlin, A. and Sandrin, P. (1983). A new method for unit commitment at Electricite de France. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-102, pp. 1218-1255.  
 [5] Muckstadt, J. A. and Wilson, R. C. (1968) An application of mixed-integer programming duality to scheduling thermal generating systems. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. pp. 1968-1978.  
 [6] Kazarlis, S. A. et al. (1996). A genetic algorithm solution to the unit commitment problem. IEEE Trans. on Power Systems. Vol. 11, No. 1, pp. 83-92.  
 [7] Simopoulos, D. N. et al. (2006). Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm. IEEE Trans. on Power Systems. Vol. 21, No. 1, pp. 68-76.  
 [8] Zhao, B., Guo, C. X., Bai, B. R. and Cao, Y. J. (2006) An improved particle swarm optimization algorithm for unit commitment. Electrical Power & Energy Systems. Vol. 28, Issue 7, pp. 482-490.  
 [9] Senjyu, T., Shimabukuro, K., Uezato, K., Funabashi, T. (2004) A technique for thermal and energy storage system unit commitment. Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, Vol. 1, pp. 601-606.  
 [10] Senjyu, T., Chakraborty, S., Saber, A.Y., Toyama, H., Yona, A., Funabashi, T. (2008) Thermal unit commitment strategy with solar and wind energy systems using genetic algorithm operated particle swarm optimization. Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International, pp. 866-871.  
 [11] 최우진, 송경빈, “신재생 에너지 및 연료전지의 기원과 현황”, 대한전기학회 전기의세계, Vol. 55, No 8, AUG, 2006[1] Wood, A. J. and Wollenberg, B. F.(1984). Power Generation, Operation, and Control. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.  
 [12] Logenthiran, T., Srinivasan, D. (2009) Short term generation scheduling of a Microgrid. TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, pp. 1-6, Jan. 2009.  
 [13] 천영길, “스마트그리드 구축을 위한 전력저장기술 및 제도적 개선방안 연구”, 한양대학교 석사학위논문, FEB, 2010  
 [14] 김상철, 김두현, “혼합정수 선형계획법을 이용한 계통의 전압제어 및 안전도 평가”, 한국산업안전학회 산업안전학회지, Vol. 14, No.2, JUN, 1999  
 [15] 이종학, “분기한정법에 기반한 새로운 전역최적화법”, 충주대학교 석사학위논문, FEB, 2010  
 [16] 장세환, 정윤원, 김욱, 박종배, 신중린, “Bounded QEA 기반의 발전기 기동정지계획 연구”, KIEE, Vol. 58, No 6, JUN, 2009



저 자 소 개



**송 하나 (宋 하나)**

1986년 11월 24일생. 2009년 강원대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).

Tel : 02-458-4778

Fax : 02-444-4179

E-mail : ssongone@konkuk.ac.kr



**장 세 환 (張世煥)**

1980년 10월 27일생. 2006년 부산대 공대 전자전기통신공학부 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778

Fax : 02-444-4179

E-mail : shjang@kunkuk.ac.kr



**김형중 (金亨中)**

1969년 7월 7일생. 1996년 인천대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 에너지관리공단 입사. 현재 에너지관리공단 수요관리실 공급자수요관리팀 팀장.

Tel : 031-260-4424

Fax : 031-260-4409

E-mail : jakekim@kemco.or.kr



**노재형 (盧載瀅)**

1969년 11월 10일생. 1993년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 2003년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 IIT(Illinois Institute of Technology) 전기공학과 졸업(박사). 1992년 한국전력공사 입사. 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3934

Fax : 02-444-1418

E-mail : jhroh@konkuk.ac.kr



**박종배 (朴宗培)**

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3483

Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr