

기회비용을 반영한 최적급전과 예비력 가격설정

김종덕 · 배인수 · 김진오*

한양대학교 전기공학과

(2006년 9월 1일 접수, 2006년 10월 26일 채택)

Optimal Dispatch and Reserve Pricing Reflecting Opportunity Cost

Jong-Deoc Kim, In-Su Bae and Jin-O Kim[†]

Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

(Received 1 September 2006, Accepted 26 October 2006)

요 약

전기에너지는 저장성이 없기 때문에 부하의 불규칙적인 변화에 대한 실시간 대처가 어렵다. 그 중 전력 계통의 대규모 공급시장에 대비하여 안정적인 공급을 위해서 예비력을 운영하고 있다. 그러나 예비력을 운영함으로써 전력계통 전체에 경제적 손실이 발생하는데 이를 최소화하기 위해서는 적정예비력 확보와 적절한 가격보상이 필요하다. 본 논문에서는 예비력시장을 운영함으로써 발생하는 기회비용을 반영하여 에너지와 예비력 가격 설정방법을 제시하였다.

주요어 : 최적급전, 예비력 가격, 기회비용, 예비력 시장

Abstract — Electric energy is too difficult to manage realtime for irregular change of load because of non-storage. In specially, operation of reserve is ancillary service to supply stably to defend large troubles in electric power system. But whole of electric power system brings to economical loss because of reserve operation. Therefore optimal reserve quantity and optimal reserve price are necessary in order to minimize loss. In this paper, we have presents optimal dispatch and reserve price consideration of opportunity cost.

Key words : Optimal dispatch, Reserve pricing, Opportunity cost, Reserve market

1. 서 론

전력계통의 안정적 운영을 위해서는 예비력의 확보는 반드시 필요하지만 그로 인해서 경제적 손실이 발생하게 된다. 그러므로 예비력을 확보함으로써 발생하는 경제적 손실을 최소화하기 위해서는 적정 예비력 보유수준을 결정하고 적절한 예비력 보상가격을 설정하여야 한다.

지금의 전력시장은 발전경쟁시장 체제이다. 공급전력은 물론 예비력 또한 입찰 경쟁을 통해 확보하여야 경제적이다. 공급전력의 경우는 입찰 경쟁을 통해 명료하게 급전 양과 가격을 결정할 수 있지만 예비력에 대한

보상가격결정은 간단하게 결정하기 어렵다. 경제적으로 효율적인 전력계통의 운영을 위해서 합리적인 방법을 통해 보상해야 한다. 예비력을 생산함으로써 발생하는 생산비용은 공급전력과 마찬가지로 시장을 통해 판매이익을 얻을 수 있으므로 계통운영자가 그에 대한 보상을 할 필요는 없다. 하지만 예비력을 생산함으로써 인해 공급전력을 포기함으로써 기회비용이 발생하는 경우가 있다. 그러한 기회비용은 계통운영자가 요금을 산정하여 보상해 주어야 한다.

우리나라의 전력계통에서는 10분 대기예비력에 대한 정산금을 예비력 제공을 위한 기동대기 비용을 보상하고 있으며 예비력 기동 시 예비력제공에 대한 기동비용을 보상하고 있다. 그리고 발전사업자가 예비력을 제공하기 위하여 취소된 발전량에 대하여 기회비용을 보상하고 있다. 이 경우에 제약정산금을 정하기 위하여 예

[†]To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University
Tel: 02-2220-0347
E-mail: jokim@hanyang.ac.kr

비력 제약을 무시한 가상급전 계획을 계산한다. 예비력 제공에 따른 기회비용은 송전제약을 무시한 비제약 급전계획과 가상급전 계획의 차이를 기준으로 산정하고 있다. 하지만 예비력이 포함되지 않은 급전계획을 기준으로 보면 현재의 경우 예비력이 포함된 시장에서 예비력을 생산하도록 계획된 발전사업자들 중 기회비용을 보상받지 못하는 경우도 있다.

발전사업자는 공급한 예비력발전량에 대한 보상과 더불어, 예비력이 포함되지 않은 급전계획에서 시장가격 보다 한계생산비용이 싼 경우에는 예비력 생산에 의해 감소된 출력만큼의 기회비용도 산정하여 보상받아야 한다. 시장가격보다 한계생산비용이 싼 경우에는 에너지 급전 계획에 포함되는데 예비력을 공급함으로써 에너지 발전에 대한 이득을 포기해야 하기 때문이다.

본 논문에서는 예비력을 생산하도록 계획되어 기회비용이 발생하는 모든 발전사업자에게 계통운영자가 보상해야 하는 기회비용을 산정하기위해 예비력 제약이 제외된 급전계획과 예비력제약이 포함된 급전계획을 비교하여 그 차이를 기준으로 한다. 본 논문에서는 예비력이 포함되지 않는 시장을 에너지 발전시장이라 표현 하겠다.

본 논문에서는 기회비용을 수학적으로 표현하고 해석적인 방법을 통해 예비력이 포함된 시장에서의 최적 경제급전량을 계산한다. 기회비용을 보상하는 경우 발생하는 기회비용을 계산하고 계통전체의 생산비용이 최소가 되는 각 발전사업자의 경제급전량을 계산하여 계통운영자가 예비력 급전계획을 수립할 때 어느 발전사업자에게 예비력을 할당해야 하는지를 사례연구를 통해 알아본다.

본 논문에서는 내용을 명확히 하기위해 몇 가지 가정을 하겠다. 먼저 전력계통의 운영은 풀(pool)모형에 기초한다. 풀 모형에서 에너지와 예비력은 발전사업자의 공급입찰서(bid)에 의하여 계통운영자(ISO)가 처리하여 최적할당 된다.

그리고 예비력은 10분내 응답 순동예비력이라고 가정한다. 또한 에너지와 예비력의 급전계획은 실시간 급전 계획이라고 가정한다. 발전사업자는 공급 입찰서를 제출할 때 한계생산비용만을 고려한다.

발전사업자는 공급한 예비력 에너지에 대한 보상과 더불어, 시장가격 보다 한계생산비용이 싼 경우에는 감소된 출력만큼의 기회비용도 산정하여 보상받아야 한다. 시장가격보다 한계생산비용이 싼 경우에는 에너지 급전을 할당받을 수 있는데 예비력을 공급함으로써 에너지 발전에 대한 이득을 포기해야 하기 때문이다.

본문에서는 기호를 먼저 정의하고, 그 기호들을 이용하여 기회비용을 함수로 표현하고 계통전체의 생산비용을 최소화 하도록 하는 최적화 기법을 이용하여 각 발

전사업자의 경제급전량을 찾고 예비력 보상가격을 결정한다. 그리고 사례연구를 통해 에너지 발전시장과 예비력급전계획이 포함된 시장에서의 경제급전점을 계산하여 비교한다.

2. 기호 정의

- D_p : 모선별 에너지 수요, 벡터량
- D_R : 시스템 전체의 예비력 수요(또는 요구량), 스칼라량
- p/P : 에너지 입찰 가격/에너지 발전량
- r/R : 예비력 입찰 가격/예비력 할당량
- f : 기회비용 함수, l : 기회비용 가격
- e : 단위 벡터, 모든 요소는 1
- i : 각 발전기, γ : 에너지 시장 가격 벡터
- γ : 예비력 보상 가격
- \underline{P} : 최소 발전량 제약, \bar{P} : 최대 발전량 제약
- A^T : A의 전치 행렬 \hat{A} : A는 상수

3. 기회비용 함수

여기서 발생하는 기회비용은 예비력 비포함 급전계획과 예비력제약이 포함된 급전계획을 비교하여 발전사업자의 이득의 차이이다. 먼저 에너지만을 급전하는 경우의 최적화 함수를 표현하고 최적급전량과 에너지시장가격을 결정한다. 풀 시장에서 각 발전사업자가 하나의 공급입찰서를 제공한다고 하면 한 번의 급전주기에서 최적 에너지 급전(예비력 제외)은 총생산비용을 최소화하는 목적함수를 가지고 있는 아래의 식 (1)로 표현한다.

$$\begin{aligned} \text{Min } p^T P \\ \text{S.T. } e^T(P - D_p) = 0, \underline{P} \leq P \leq \bar{P} \end{aligned} \tag{1}$$

이모형에서 최적급전량을 \hat{P} 라고 하면, 식 (1)에서는 예비력을 고려하지 않았으므로 예비력이 운영되는 계통에서는 에너지급전계획에 포함됐던 몇몇의 발전기들은 예비력을 제공하기 위해 에너지 발전을 취소해야 한다. 그 발전기들의 기회비용은 식 (2)와 같다.

$$f(P, \gamma) = \begin{cases} \max\{0, (\gamma - p)(\hat{P} - P)\} & \gamma > p \\ 0 & \gamma \leq p \end{cases} \tag{2}$$

에너지 입찰가격이 시장가격보다 낮은 경우에는 에너지 급전계획에 포함되었으므로 예비력 생산량만큼의 에너지 발전을 취소하여 그에 대한 기회비용이 발생한다. 에너지 입찰가격과 최적급전량은 변하지 않으므로 상수라 하면 에너지발전량과 에너지 시장가격이 변수가 된다.

에너지 입찰가격이 에너지 시장가격보다 높은 경우 에너지 급전계획에서 처음부터 제외되므로 예비력을 생산

하더라도 기회비용은 발생하지 않는다.

에너지 입찰가격과 에너지 시장가격이 같은 경우도 에너지 급전계획에 포함된 발전을 포기하여 예비력을 생산하지 않으므로 기회비용은 발생하지 않는다.

식 (2)에서 각 경우마다 기회비용은 모두 다르므로 특정한 함수 f 의 형태를 취하지 않았다. 예비력 생산을 위해 취소된 에너지 발전량 $(\hat{P}-P)$ 과 시장가격과 에너지 공급입찰가격의 차 $(\gamma-p)$ 의 곱의 최대값을 기회비용 가격으로 한다.

간단하게 요약하면 에너지 가격이 입찰 가격보다 큰 발전기는 에너지 급전 계획에 포함되는데 그 중 예비력을 할당 받는 발전기는 기회비용을 보상 받을 수 있다. 하지만 에너지 가격이 발전기의 입찰 가격보다 작거나 같다면 에너지 급전 계획에서 제외되므로 기회비용은 생기지 않는다.

4. 시장가격이 상수일 때의 기회비용 함수

문제를 간단히 하기 위해 에너지 시장가격(γ)을 식 (1)에서 최적 에너지급전으로부터 도출된 상수벡터($\hat{\gamma}$)라고 가정하면 식 (2)는 아래의 식 (3)과 같다.

$$f(P, \gamma) = \begin{cases} \max\{0, (\hat{\gamma}-p)(\hat{P}-P)\} & \hat{\gamma} > p \\ 0 & \hat{\gamma} \leq p \end{cases} \quad (3)$$

에너지 시장가격(γ)이 상수가 되면 에너지 급전계획의 한계발전량과 에너지-예비력 급전계획의 한계생산 발전기가 같다. 5대의 발전기가 존재하는 전력계통이 있다고 하자. Fig. 1은 에너지만을 고려한 경제급전량과 가격이고 Fig. 2의 발전기A의 어두운 부분이 예비력 생산이다. 발전기B의 입찰가격이 에너지 시장가격이 되고 예비력을 운영하여도 에너지 시장가격은 같은 값을 갖는다.

예비력이 운영되는 시장에서도 에너지 시장가격이 변하지 않는다고 가정하였으므로 기회비용함수에서 에너지 발전량(P)만이 변수가 된다.

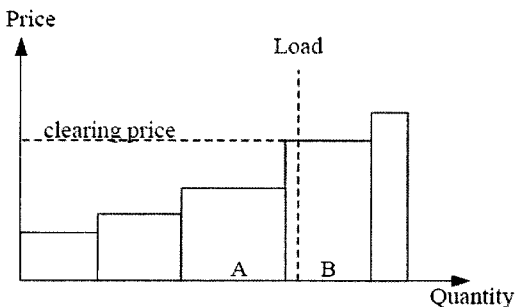


Fig. 1. 예비력 비포함 전력시장의 에너지가격.

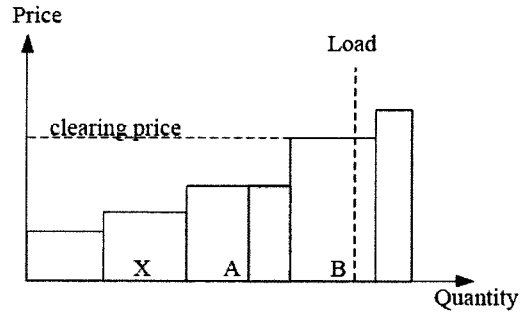


Fig. 2. 예비력 포함 전력시장의 에너지가격.

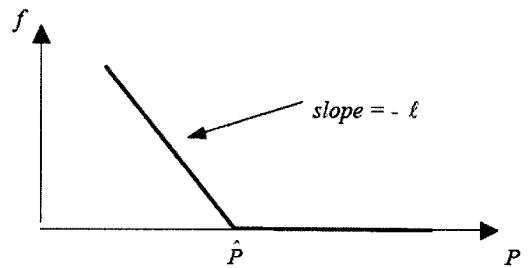


Fig. 3. 기회비용 함수 그래프.

기회비용 가격벡터(l)를 정의하면 식 (4)와 같고 에너지 시장가격과 공급입찰가격이 상수이므로 또한 상수가 된다. 기회비용 함수를 식 (4)를 이용하여 다시 정리하면 식 (5)와 같다.

$$l = \begin{cases} \hat{\gamma}-p, & \hat{\gamma} > p \\ 0 & \hat{\gamma} \leq p \end{cases} \quad (4)$$

$$f = \{\max(0, l(\hat{P}-P))\} \quad (5)$$

기회비용 함수를 그래프로 표현하면 에너지 발전량(P)에 대한 함수이므로 Fig. 3과 같으며, 연속이지만 미분 불가능하다.

5. 최적화 함수

기회비용이 고려된 에너지와 예비력 급전의 문제(Co-Optimization)는 아래의 목적함수와 제약조건을 가진 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & p^T P + r^T R + \sum f_i \\ \text{S.T. } & e^T (P - D_p) = 0 \\ & e^T R = D_R, \\ & P \leq P + R \leq \bar{P}, \\ & f_i = \max\{0, l_i(\hat{P}_i - P_i)\}, \quad i=1, \\ & P \geq 0, R \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은 에너지 가격과 예비력 가격과 기회비용의 합을 최소화시키는 목적함수를 가지고 있다. 제약조건은 용량에 대한 제약과 기회비용함수의 제약을 포함한다. 그러나 Fig. 3에서 살펴본 바에 의하면 기회비용 함수가 연속이지만 미분 불가능하므로 식 (6)의 최적화 함수에 적용하기가 어렵다. 그러므로 기회비용함수를 이산함수로 변형하면 아래의 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_i &= u_i l_i (\hat{P}_i - P_i), \\
 u_i (\hat{P}_i - P_i) &\geq 0, \\
 (1 - u_i)(P_i - \hat{P}_i) &\geq 0, \\
 u_i &\in \{0, 1\}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 최적화 함수 식 (6)을 정수 프로그래밍함수(Integer Programming Problem)로 다시 쓰면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & p^T P + r^T R + \sum u_i l_i (\hat{P}_i - P_i) \\
 \text{S.T.} \quad & e^T (P - D_p) = 0, \\
 & e^T R = D_r, \\
 & P \leq P + R \leq \bar{P}, \\
 & u_i (\hat{P}_i - P_i) \geq 0, \quad i \in I, \\
 & (1 - u_i)(P_i - \hat{P}_i) \geq 0, \quad i \in I, \\
 & P \geq 0, \quad R \geq 0, \\
 & u_i \in \{0, 1\}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

6. 에너지 한계 생산비용

식 (8)에서 정수변수 u_i 는 발전기 i 가 예비력을 제공할 수 있는 발전기인지를 표현하는 변수이다. 에너지와 예비력의 한계비용을 라그랑주 함수(Lagrangian function)로 표현하고 두 가지의 경우로 나누어 표준 쿤터커(Kuhn-Tucker) 최적화 조건을 이용하여 한계생산비용을 조건을 얻는다.

먼저, i 번째 발전기가 기회비용을 상실할 경우 $u_i = 1$, $\hat{P}_i - P > 0$ 이 되고 아래의 식 (9)의 조건을 갖는다. 여기서 λ , $\hat{\tau}_i$, $\hat{\tau}_i$ 는 라그랑주 연산자(Lagrangian multiplier)이다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} &= p_i - l_i - \lambda - \hat{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0 \\
 \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} &= r_i - \phi - \hat{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

에너지 가격은 한계비용 $\gamma = \lambda e$ 이 된다. 다음으로, i 번째 발전기가 기회비용을 상실하지 않는다면 $u_i = 0$, $\hat{P}_i - P < 0$ 이 되고 아래의 식 (10)의 조건을 갖는다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} &= p_i - \lambda - \hat{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0 \\
 \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} &= r_i - \phi - \hat{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

에너지 가격은 다시 $\gamma = \lambda e$ 이 된다.

7. 예비력 한계 생산비용

최적급전에서 몇몇의 발전사업자는 예비력을 할당받게 되면 기회비용을 보상받으며, 또한 예비력을 실제 발전할 경우 에너지를 시장가격을 받고 판매하는 것과 같다. 예비력 한계생산 비용 ϕ 는 식 (11)이 된다. 식 (11)은 식 (12)와 같다.

$$\phi = r_i + l_i + \gamma_i - p_i
 \tag{11}$$

$$\phi = r_i + l_i + \gamma_i - p_i = r_i + 2l_i
 \tag{12}$$

예비력을 생산을 할당받은 발전 사업자는 기회비용을 상실하는 경우 그에 해당하는 기회비용(l_i)을 보상받는다. 그리고 계통에 사고가 발생하여 실제로 예비력을 발전하게 되면 에너지를 판매하여 이득($r_i + \gamma_i - p_i = r_i + l_i$)을 얻는다.

8. 사례연구

본 논문에서는 사례연구를 위해, 다른 지역과 연계되지 않고 독립적으로 운영되며 총 5대의 발전기가 존재하는 전력시장을 고려하였다. 이 지역의 에너지 수요는 3500 MW라 하고 예비력은 에너지 수요의 10%인 350 MW라 가정한다. 한계생산비용을 에너지 입찰로 제시한다고 하고, 예비력 입찰은 에너지 입찰보다 작게 설정하였다. 각 발전기의 상수는 Table 1의 조건으로 설정하고, 식 (8)을 이용하여 최적급전 \hat{P} 를 찾는다.

먼저 에너지만을 급전하는 계통에 대한 최적화 함수를 통하여 식 (1)을 이용하여 최적급전량과 가격설정을 한다.

Table 1. 각 발전기의 용량과 입찰가격 설정.

	발전기 1	발전기 2	발전기 3	발전기 4	발전기 5
발전 가능량	1000 MW	1000 MW	1000 MW	1000 MW	1000 MW
에너지 입찰가격	10 \$	15 \$	20 \$	25 \$	30 \$
예비력 입찰가격	3 \$	10 \$	15 \$	20 \$	25 \$

Table 2. 각 발전기의 최적급전량과 에너지가격.

	발전기 1	발전기 2	발전기 3	발전기 4	발전기 5
최적 급전량	1000 MW	1000 MW	1000 MW	500 MW	0 MW
에너지 시장가격	25 \$				

Min $10P_1+15P_2+20P_3+25P_4+30P_5$
 S.T. $P_1+P_2+P_3+P_4+P_5=3500,$
 $0 \leq P_1 \leq 1000, P_1 \geq 0,$
 $0 \leq P_2 \leq 1000, P_2 \geq 0,$
 $0 \leq P_3 \leq 1000, P_3 \geq 0,$
 $0 \leq P_4 \leq 1000, P_4 \geq 0,$
 $0 \leq P_5 \leq 1000, P_5 \geq 0,$

Min $10P_1+15P_2+20P_3+25P_4+30P_5$
 $+3R_1+10R_2+15R_3+20R_4+25R_5$
 $+\sum u_i / (\hat{P}_i - P_i)$
 S.T. $P_1+P_2+P_3+P_4+P_5=3500,$
 $R_1+R_2+R_3+R_4+R_5=3500,$
 $0 \leq P_1+R_1 \leq 1000, P_1 \geq 0, R_1 \geq 0,$
 $0 \leq P_2+R_2 \leq 1000, P_2 \geq 0, R_2 \geq 0,$
 $0 \leq P_3+R_3 \leq 1000, P_3 \geq 0, R_3 \geq 0,$
 $0 \leq P_4+R_4 \leq 1000, P_4 \geq 0, R_4 \geq 0,$
 $0 \leq P_5+R_5 \leq 1000, P_5 \geq 0, R_5 \geq 0,$
 $u_i(\hat{P}_i - P_i) \geq 0, i \in I,$
 $(1-u_i)(P_i - \hat{P}_i) \geq 0, i \in I,$
 $u \in \{0, 1\}$

최적화 함수의 결과로 최적급전은 Table 2와 같다.

다음으로 350 MW의 예비력을 보유하고 기회비용을 보상하지 않는 계통에 대한 최적화함수를 통하여 최적 경제급전량과 총비용을 계산한다.

Min $10P_1+15P_2+20P_3+25P_4+30P_5$
 $+3R_1+10R_2+15R_3+20R_4+25R_5$
 S.T. $P_1+P_2+P_3+P_4+P_5=3500,$
 $R_1+R_2+R_3+R_4+R_5=3500,$
 $0 \leq P_1+R_1 \leq 1000, P_1 \geq 0, R_1 \geq 0,$
 $0 \leq P_2+R_2 \leq 1000, P_2 \geq 0, R_2 \geq 0,$
 $0 \leq P_3+R_3 \leq 1000, P_3 \geq 0, R_3 \geq 0,$
 $0 \leq P_4+R_4 \leq 1000, P_4 \geq 0, R_4 \geq 0,$
 $0 \leq P_5+R_5 \leq 1000, P_5 \geq 0, R_5 \geq 0,$

최적급전의 결과 발전기 1이 예비력을 생산하게 되면 총비용이 가장 적게 되고 총비용은 63800\$가 된다. 마지막으로 식 (6)과 식 (8)의 기회비용을 반영하는 최적화함수를 이용하여 최적 급전량과 총비용을 계산한다.

최적급전의 결과는 Table 4와 같다.

최적 경제급전의 결과로 발전기 4가 한계생산 발전기가 되어 발전기 4의 한계생산 가격이 시장가격으로 형성되었다. 기회비용을 보상하지 않는 시장에서는 발전기 1이 예비력을 생산하도록 계획되지만 기회비용을 보상하는 경우 발전기 1과 발전기 2는 최대출력을 하여 각각 1000 MW를 생산하고, 발전기 3이 예비력을 생산하도록 계획되어 에너지 650 MW와 예비력 350 MW를 생산하게 된다. 발전기 4는 수요에 맞춰서 850 MW의 에너지를 생산한다. 위에서 얻은 각 발전기의 최적 경제급전과 시장가격을 식 $f = \{\max(0, l(\hat{P}_i - P_i)\}$ 에 대입하여 각 발전기가 예비력을 할당 받았을 때 손실하는 기회비

Table 3. 각 발전기의 최적급전량과 총비용.

	발전기 1	발전기 2	발전기 3	발전기 4	발전기 5
에너지 발전량	650 MW	1000 MW	1000 MW	850 MW	0 MW
예비력 발전량	350 MW	0 MW	0 MW	0 MW	0 MW
총 비용	63800 \$				

Table 4. 각 발전기의 최적급전량과 기회비용을 보상할 경우의 총비용.

	발전기 1	발전기 2	발전기 3	발전기 4	발전기 5
각 발전기의 기회비용	5250 \$	3500 \$	1750 \$	0 \$	0 \$
에너지 발전량	1000 MW	1000 MW	650 MW	850 MW	0 MW
예비력 발전량	0 MW	0 MW	350 MW	0 MW	0 MW
총 비용	64500 \$				

용을 계산하였다.

발전기 5는 한계생산 비용이 시장가격보다 높게 형성되어 급전계획에서 제외된다. 발전기 4는 한계생산발전기이므로 주파수변동에 대비하여야 하기 때문에 예비력을 할당에서 제외되었다. 발전기 1, 2, 3 중에서 발전기 3이 예비력을 담당했을 때 기회비용이 가장 작고 총비용이 가장 적으므로 예비력 생산을 담당한다.

발전기 3은 예비력 생산을 담당하도록 계통운영자가 지시 하였을 때 상실한 기회비용 $I_3=350 \text{ MW} * 5\$=1750\$$ 를 보상받는다. 그리고 계통에 사고가 발생하여 실제로 예비력을 생산하여 판매하게 되면 식 (12)의 예비력 한계비용에서 $r_3+\gamma-p_3=r_3+I_3=(15+5) \text{ \$/MW}$ 를 받고 예비력을 판매하여 이득을 얻는다.

기회비용 보상 유무에 따른 사례를 비교하면 급전계획에서 예비력을 생산하는 발전사업자가 다르다. 과거 수직적인 전력체제와는 달리 발전경쟁체제에서는 계통운영자가 예비력 급전계획을 수립할 때 경제적으로 운영하기 위해서는 기회비용을 반영하여 예비력 급전계획을 수립하고 그에 합당한 예비력 가격을 산정하여 보상하도록 해야 한다.

9. 결 론

본 논문에서는 풀 모형에 기초하여 에너지와 예비력 시장에서의 기회비용 함수를 표현하고 기회비용을 산출하였다. 그리고 최적화 기법을 이용하여 경제급전량을 계산하고 한계비용을 수식으로 표현하였다. 그리고 예비력 요금 산정을 기회비용함수를 이용하여 계산하였다. 최적화 함수와 기회비용이 포함된 예비력 한계비용식을 이용하여 발전기 5대가 존재하는 시스템을 가정하고 목적 함수와 제약조건을 표현하고 이 계통에서 각 발전기의

경제 급전량과 예비력 보상비용을 계산하였다. 계통운영자가 전력시장을 효율적으로 운영하기 위해서는 전력시장에 대한 경제적인 접근을 하여야 하며, 본 논문에서는 그 중에서 예비력 급전계획에서의 기회비용을 반영한 경제급전점과 예비력보상가격을 제시하였다. 하지만 본 논문에서는 문제를 간단히 하기 위해서 에너지시장 가격벡터를 상수라 가정 하였으므로 예비력 보유량에 따라 변하는 에너지시장 가격벡터를 가지는 실제 전력시장과는 차이를 보인다.

참고문헌

1. Deqiang Gan & Eugene. "A Lost Opportunity Cost Model for Energy and Reserve Co-optimization", IEEE Transaction on Power Systems, 2002, 3, 1559-1564.
2. Roberto Ferrero. "Optimal Reserve Allocation And Pricing", IEEE Transactions On Power Systems, 2003, 2579-2584.
3. 유성호. "경쟁적인 전력시장에서의 보조서비스 운영방안에 관한 연구", 한양대학교 공과대학원 학위논문, 2000.
4. Rau, N.S. "Optimal dispatch of a system based on offers and bids-A mixed interger LP fomulation", IEEE Transactions On Power Systems, 1999, 14, 274-279.
5. 유성호; 이광환; 김광원; 황갑주. "전력시장에서의 적정 운영예비력 기준에 관한 연구", 대한전기학회, 2003, 52A(5), 287-293.
6. 신재홍; 이광호. "발전 예비력을 포함한 전력시장에서의 공급자 입찰전략 연구", 대한전기학회, 2005, 54A(4), 199-204.