2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2006. 7. 12 - 14

발전경쟁시장에서 기회비용을 고려한 예비력 가격설정

김종덕(한양대학교), 김진오(한양대학교)

Reserve pricing with opportunity cost in competitive generation market

Jong-Deok Kim(Hanyang Univ.), Jin-O Kim(Hanyang Univ.)

Abstract - 전기에너지는 저장성이 없기 때문에 부하의 불규칙적인 변화에 대한 실시간 대처가 어렵다. 그 중 전력계통의 대규모 공급지장에 대비하여 안정적인 공급을 위해서 예비력은 중요한 요소이다. 예비력이 필요 없다면 경쟁적 입찰을 통해 최적의 가격설정을 할 수 있겠지만 예비력은 계통의 안정적 운영을 위해 반드시 필요하다. 예비력을 운영함으로써 경제적 손실이 발생하는데 이를 최소화하기 위한 일환으로 예비력 운영에 대한 적절한 가격결정이 필요하다. 본 논문에서는 예비력시장을 운영함으로써 발생하는 기회비용을 고려하여 에너지와 예비력 가격 설정방법을 제시하였다.

1. 서 론

먼저 본 논문에서는 전력계통의 운영에서 풀(pool)모형에 기초하였다. 풀 모형에서 에너지와 예비력은 발전사업자의 입찰(bid)에 의하여 계통운영자(ISO)가 처리하여 최적할당 된다. 여기서 예비력은 10분내 응답 순동예비력이라고 가정한다. 또한 에너지와 예비력의 급전계획은 실시간 급전계획이라고 가정한다.

발전기는 공급한 용량에 대한 보상과 더불어, 시장가격 보다 한계생산비용이 싼 경우에는 감소된 출력만큼의 기회비용도 산정하여 보상받아야 한다. 공급한 비용의 보상은 발전기가 시장에 제공한 예비력 용량에 대한 보상이고, 기회비용은 예비력 할당에 의해 에너지를 발전하여 얻을 수 있는 이득에 대한 상실비용이다.

본론에서는 기호를 먼저 정의하고, 그 기호들을 이용하여 기회비용을 함수로 표현하고 최적화 기법을 이용하여 가격설정 해석을 한다.

2. 본 론

2.1 기호 정의

D_P : 모선별 에너지 수요, 벡터량

D_R : 시스템 전체의 예비력 수요(또는 요구량), 스칼라량

e : 단위 벡터, 모든 요소는 1, f : 기회비용 함수

$\overline{F}$: 송전 부하변동 한계 벡터, i : 발전기 번호

l : 기회비용 가격,

p/P : 에너지 입찰 가격/에너지 발전량

r/R : 예비력 입찰 가격/예비력 할당량

T : 발전 변동률 행렬, γ : 에너지 가격 벡터

ϕ : 예비력 설정 가격

2.2 기회비용 함수

여기서 기회비용은 예비력을 생산함으로서 에너지발전을 포기하여 상실된 이득의 비용이므로, 먼저 에너지만을 급전하는 경우의 비용과 예비력이 포함된 급전계획의 비용의 차이를 계산하여 기회비용 함수를 설정한다. 풀 시장에서 각 발전기가 하나의 입찰 블록을 제공한다고 하면 한 번의 급전주기에서 에너지 급전(예비력 제외)은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{array}{ll} Min & p^T P \\ S.T. & e^T(P-D_P)=0,\ \ T(P-D_P)\le \overline{F},\ \ \underline{P}\le P\le \overline{P}. \end{array} \qquad (1)$$

이 모형에서 경제 급전량을 $\hat{P}$ 라고 하면, 식 (1)에서는 예비력을 고려하지 않았으므로 몇몇의 발전기들은 예비력을 제공하기 위해 에너지 발전을 취소해야 한다. 그 발전기들의 기회비용은 아래의 함수로 표현할 수 있다.

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

각 경우마다 기회비용은 모두 다르므로 특정한 함수 f의 형태를 취하는 것은 어렵다. 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.

2.3 기회비용 산출에서 상수 가격을 이용할 때의 모형화

문제를 간단히 하기위해 에너지 가격 γ는 식 (1)에서 최적 에너지급전으로부터 도출된 상수벡터 $\hat{\gamma}$ 라고 가정한다면 식 (2)를 아래의 식으로 다시 쓸 수 있다.

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

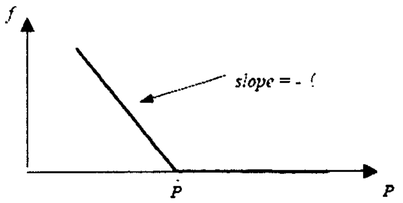
2.3.1 최적화 함수

상수벡터 l 을 정의하면 식 (4)와 같고, 기회비용 함수를 식 (4)를 이용하여 다시 정리하면 식 (5)와 같다.

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

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

기회비용 함수를 그래프로 표현하면 그림 1과 같으며, 연속이지만 미분 불가능하다는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 상수 가격일 때의 기회비용 함수

기회비용이 고려된 에너지와 예비력 급전의 문제(Co-Optimization)는 아래의 목적함수와 제약조건들로 표현된다.

$$\begin{array}{ll} Min & p^T P + r^T R + \Sigma f_i \\ S.T. & e^T(P-D_P)=0, \\ & e^T R = D_R, \\ & T(P-D_P)\le \overline{F}, \\ & \underline{P}\le P+R\le \overline{P}, \\ & f_i=\max\{0, l_i(\hat{P}_i-P_i)\},\ \ i\in I, \\ & P\ge 0,\ \ R\ge 0. \end{array} \qquad (6)$$

식 (6)은 에너지 가격과 예비력 가격과 기회비용의 합을 최소화 시키는 목적함수를 가지고 있다. 제약조건은 용량에 대한 제약과

기회비용함수의 제약을 포함한다.

2.3.2 최적화 조건과 한계비용

2.3.1절에서 살펴본 바에 의하면 기회비용 함수가 미분 불가능하므로 이산함수로 변환 하고, 식 (6)을 IPP(Integer Programming Problem)를 이용하여 식 (7)로 변형 시킨다.

$$\begin{aligned} Min \quad & p^T P + r^T R + \sum u_i l_i (\hat{P}_i - P_i) \qquad (7) \\ S.T. \quad & e^T (P - D_P) = 0, \\ & e^T R = D_R, \\ & T(P - D_P) \le \overline{F}, \\ & \underline{P} \le P + R \le \overline{P}, \\ & u_i (\hat{P}_i - P_i) \ge 0, \quad i \in I, \\ & (1 - u_i)(P_i - \hat{P}_i) \ge 0, \quad i \in I, \\ & P \ge 0, \ R \ge 0, \\ & u \in \{0,1\} \end{aligned}$$

이 함수는 SBAB(Standard Branch-And-Bound) 방법을 이용하여 풀 수 있다. 여기서 정수변수 u_i는 발전기 i가 예비력을 제공할 수 있는 발전기인지를 표현하는 변수이다. 에너지와 예비력의 한계비용을 라그랑쥐 함수로 표현하고 두 가지의 경우로 나누어 표준 쿤-터커(Kuhn-Tuker) 최적화 조건을 이용하면 식 (8)과 식 (9)의 한계비용을 얻을 수 있다.

먼저, i번째 발전기가 기회비용을 상실할 경우 u_i=1, $\hat{P}_i - P > 0$ 이 되고 아래의 조건을 갖게 된다. 여기서 $\lambda, \mu, \hat{\tau}, \check{\tau}$는 라그랑쥐 연산자이다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} = p_i - l_i - \lambda - T^T \mu - \check{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0, \qquad (8) \\ & \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} = r_i - \phi - \check{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0. \end{aligned}$$

에너지 가격은 한계비용 $\gamma = \lambda e + T^T \mu$이 되고 예비력 가격은 한계비용 ϕ이다. 다음으로, i번째 발전기가 기회비용을 상실하지 않는다면 u_i=0, $\hat{P}_i - P < 0$ 이 되고 아래의 조건을 갖는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} = p_i - \lambda - T^T \mu - \check{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0, \qquad (9) \\ & \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} = r_i - \phi - \check{\tau}_i + \hat{\tau}_i = 0. \end{aligned}$$

에너지 가격은 다시 $\gamma = \lambda e + T^T \mu$이 되고 예비력 가격도 ϕ로 주어진다.

2.4 가격 설정

최적급전에서 몇몇의 발전사업자는 기회비용을 보상받으므로 예비력 한계생산비용 ϕ는 0보다 크게 되며 아래의 식과 같다.

$$\phi = r_i + l_i + \gamma_i - p_i \qquad (10)$$

제약이 없을 때 $\gamma_i \ge \hat{\gamma}_i$ 이다. 그러므로 발전기 i 가 예비력을 공급하도록 선정되고 기회비용을 상실한다면 ϕ은 아래의 식이다.

$$\phi = r_i + l_i + \gamma_i - p_i \ge r_i + 2l_i \qquad (11)$$

2.5 사례연구

본 논문에서는 사례연구를 위해, 다른 지역과 연계되지 않고 독립적으로 운영되며 총 5대의 발전기가 존재하는 전력시장을 고려하였다. 이 지역의 에너지 수요는 3500MW라 하고 예비력은 에너지 수용의 10%인 350MW라 가정한다. 한계생산비용을 에너지 입찰로 제시한다고 하고, 예비력 입찰도 기회비용을 보상 받으므로 한계생산비용과 같다고 한다. 각 발전기는 표 1의 조건으로 설정하고, 식 (7)을 이용하여 최적 경제급전 $\hat{P}$를 찾는다.

<표 1> 각 발전기의 용량과 한계생산비용

	발전기1	발전기2	발전기3	발전기4	발전기5
발전가능량	1000MW	1000MW	1000MW	1000MW	1000MW
한계생산비용	10$	15$	20$	25$	40$

$$\begin{aligned} Min \quad & 10P_1 + 15P_2 + 20P_3 + 25P_4 + 40P_5 \\ & + 10R_1 + 15R_2 + 20R_3 + 25R_4 + 40R_5 \\ & + \sum u_i l_i (\hat{P}_i - P_i) \\ S.T. \quad & P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 3500, \\ & R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 350, \\ & 0 \le P_1 + R_1 \le 1000, P_1 \ge 0, R_1 \ge 0, \\ & 0 \le P_2 + R_2 \le 1000, P_2 \ge 0, R_2 \ge 0, \\ & 0 \le P_3 + R_3 \le 1000, P_3 \ge 0, R_3 \ge 0, \\ & 0 \le P_4 + R_4 \le 1000, P_4 \ge 0, R_4 \ge 0, \\ & 0 \le P_5 + R_4 \le 1000, P_5 \ge 0, R_5 \ge 0, \\ & T(P - D_P) \le \overline{F}, \\ & u_i (\hat{P}_i - P_i) \ge 0, \quad i \in I, \\ & (1 - u_i)(P_i - \hat{P}_i) \ge 0, \ i \in I, \\ & u \in 0,1 \end{aligned}$$

최적 경제급전의 결과로 발전기 4가 한계생산 발전기가 되어 발전기 4의 한계생산 가격이 시장가격으로 형성되었다. 발전기 1과 발전기 2는 최대출력을 하여 각각 1000MW를 생산하고, 발전기 3이 예비력을 할당 받아서 에너지 650MW와 예비력 350MW를 생산하게 된다. 발전기 4는 수요에 맞춰서 850MW의 에너지를 생산한다. 위에서 얻은 각 발전기의 최적 경제급전과 시장가격을 식 $f = \{\max(0, l(\hat{P} - P)\}$ 에 대입하여 각 발전기가 예비력을 할당 받았을 때 손실하는 기회비용을 계산하였다. 최적 급전량과 기회비용은 아래의 표 2에 기입하였다.

<표 2> 각 발전기의 최적급전과 기회비용

	발전기1	발전기2	발전기3	발전기4	발전기5
에너지발전량	1000MW	1000MW	650MW	850MW	0MW
예비력발전량	0MW	0MW	350MW	0MW	0MW
기회비용	$5250	$3500	$1750	$0	$0

발전기 5는 한계생산 비용이 시장가격보다 높게 형성되어 급전계획에서 제외된다. 발전기 4는 한계생산발전기이므로 한계생산비용이 시장가격이 되므로 예비력을 할당에서 제외 되었다. 발전기 1,2,3중에서 발전기 3이 예비력을 담당했을 때 기회비용이 가장 작으므로 예비력 생산을 할당받는다.

마지막으로 기회비용을 반영한 적절한 예비력의 가격을 식 (11)을 이용하여 구하면 $\phi = r_i + l_i + \gamma_i - p_i \ge r_i + 2l_i = 20 + 10$ 이 되는 것을 볼 수 있다. 결국 예비력 가격이 최소한 30$/MW가 되어야 발전기 3은 예비력을 생산하게 될 것이다.

3. 결 론

풀 모형에 기초하여 에너지와 예비력 시장에서의 기회비용 함수를 표현하고 기회비용을 산출하였다. 그리고 최적화 기법을 이용하여 최적화 조건과 한계비용을 구하고, 예비력 가격 식을 도출해서 예비력 생산에 대한 보상의 정도를 계산 할 수 있도록 하였다. 발전기 5대가 존재하는 시스템을 가정하여 목적함수와 제약조건을 표현하고 이 계통에서 각 발전기의 경제적 급전량과 예비력 보상비용을 계산하였다. 본 논문에서는 문제를 간단히 하기 위해서 가격벡터를 상수라 가정 하였으므로 변수 가격벡터를 가지는 실제 전력시장과는 차이를 보이지만, 예비력 할당에 대한 기회비용을 고려한 보상방법을 간단하게 살펴보았다.

[참 고 문 헌]

[1] Roberto Ferrero, "Optimal Reserve Allocation And Pricing", IEEE Transactions On Power Systems, pp. 2579-2584, 2003.

[2] Deqiang Gan & Eugene, "Energy and Reserve Market Designs With Explicit Consideration to Lost Opportunity Costs", IEEE Transaction on Power Systems, VOL. 18, NO. 1, pp. 53-59, Feb. 2003.