

발전기 특성을 고려한 전력시장에서 발전사업자의 기동정지계획

이종배, 정정원
경성대학교

Unit Commitment of a GENCO in the Electricity Market Considering Ramp Rates

Jong-Bae Lee, Jung-Won Jung
KyungSung University

Abstract - 과거 전력산업의 독점체제에서 발전기 기동정지계획은 1-7일 정도의 예측된 부하를 최소비용으로 공급하기 위해서 발전기의 정보만을 고려하여 수요에 부합되도록 결정되었다. 향후 전개될 전력시장의 형태인 완전경쟁시장에서는 각 발전사업자가 자신의 발전기들을 대상으로 이익을 최대화하기 위한 입찰전략으로서의 기동정지계획을 수립하게 된다. 본 논문에서는 이익극대화로서의 발전사업자 기동정지계획을 수립함에 있어 유전알고리즘을 적용하였다. 또한 발전사업자의 입찰전략에 주요한 요소로 작용하는 입찰량 결정에 있어서 발전기 증감발출을 고려하여 최적의 발전량을 결정하도록 하였다.

1. 서 론

중앙에서 예측된 부하를 공급하는 과거의 독점기업형 태의 시장에서의 기동정지계획(Self Commitment)은 단순히 예측된 부하를 발전기의 기동비용, 정지비용, 증감발출, 예비력 등을 고려하여 그 비용을 최소화하는 방향으로 수립이 되었다.

향후 전개될 도매경쟁시장에서는 독점기업이 여러 개의 발전사업자와 계통을 담당하는 한전으로 나뉘어 지면서 더 이상 부하에 공급을 맞추고, 비용을 최소화하는 형태가 아니라, 발전사업자의 이익을 최대화하는 방향으로 개별 기동정지계획이 수립된다.[1] 이 기동정지계획은 각 발전사업자의 발전기특성을 고려하여, 전력거래소(KPX)에서 제공되거나 발전사업자의 예측된 부하와 예상 시장 가격(MCP : market clearing price)을 통해 수립된다.

입찰량 결정에 있어서 앞으로 전개될 도매경쟁시장에서는 외부요인으로 있는 부하와 시장가격뿐만 아니라 내부요인으로 있는 발전기 특성을 고려하여 발전사업자의 이익을 최대화하는 발전량을 결정하게 된다. 발전기 특성으로 인해 발전사업자는 다음 기동시간의 이익을 위해 현재 기동시간 중 최대발전량보다 적은 발전량을 내기도 하고, 정지시간으로 수립된 기동정지계획에 반하여 최소의 출력이라도 내어야 할 때도 있다.

본 논문에서는 부하 예측치와 예상 시장가격을 토대로 유전알고리즘을 이용하여 발전사업자의 각 발전기의 개별 기동정지계획을 수립하였고, 발전기 특성 중 하나인 증감발출을 고려하여 입찰전략에 있어서 주요한 요소를 차지하는 입찰량 결정 문제의 해를 제시해 본다.

2. 본 론

2.1 기동정지계획

발전사업자의 기동정지계획은 거래일 동안 이익이 최대가 되도록 수립되어야 한다. 예상 시장가격을 두고 이익 최대화 문제로서 기동정지계획 문제를 아래와 같이 정식화될 수 있다. 목적함수는 이익이 되므로 식(1)과 같다.

$$E \left[\sum_{t=1}^T (R_t - C_t) \right] = \sum_{t=1}^T \int (R_t - C_t) p_t dp_t \tag{1}$$

여기서,

$$R_t = \sum_{j=1}^N \sum P_j P_{j,t} U_{j,t} \tag{2}$$

$$C_t = \sum_{j=1}^N (F_j(P_{j,t})) + S_j(1 - U_{j,t-1})U_{j,t} \tag{3}$$

여기서,

P_t : 예상 시장가격

R_t : t시간의 수익

C_t : t시간의 발전비용

N : 발전사업자의 발전기 대수

T : 기동정지 대상의 총 시간

$E \left[\sum_{t=1}^T (R_t - C_t) \right]$: (수익-비용)의 기대치.
즉, 이익의 기대치

$P_{j,t}$: j발전기의 t시간대 발전 출력

$F_j(P_{j,t}) = a_j + b_j P_j + c_j P_j^2$: j발전기의 연료비용

S_j : 발전기 j의 기동비용

$U_{j,t}$: 발전기 j의 t시간대 운전상태 (1:운전, 0:정지)

2.1.1 발전기의 증감발출을 고려하지 않은 발전량

우선 발전기특성을 고려하지 않은 발전량에 대해 알아 본다. 이 문제의 제약조건은 다음 식으로 표시된다. (4) 식은 발전기 출력의 상하한을, (5) 및 (6)식은 각각 최소 기동시간제약 및 최소정지시간 제약을 나타낸다.

$$P_{\min,j} \leq P_{j,t} \leq P_{\max,j} \tag{4}$$

$$U_{j,t} = 1, \text{ for } \sum_{t=t_s}^{t-1} U_{j,t} < MUT_j, t = t_s + 1, \dots, T \tag{5}$$

$$U_{j,t} = 0, \text{ for } \sum_{t=t_d}^{t-1} (1 - U_{j,t}) < MDT_j, t = t_d + 1, \dots, T \tag{6}$$

여기서,

$P_{\min,j}, P_{\max,j}$: 발전기 j의 최소/최대 출력

t_s : 발전기를 기동한 시간

t_d : 발전기를 정지시킨 시간

MUT_j : 발전기 j의 최소 기동시간

MDT_j : 발전기 j의 최소 정지시간

기존의 기동정지계획에서는 부하를 충족시켜야하는 제약이 있었으나, 개별발전사업자의 기동정지계획에서는 입찰의 결과로 부하가 충족되므로 부하는 시장가격에만 영향을 미칠 뿐, 기동정지계획에는 직접적으로 영향을 미치지 않는다.

발전기 j의 t시간대 출력(최적입찰량 $\hat{P}_{j,t}$)은 다음으로 결정된다.

$$\hat{P}_{j,t} = P_{\max,j} \quad P_{j,t}^* > P_{\max} \quad (7-1)$$

$$\hat{P}_{j,t} = P_{\min,j} \quad P_{j,t}^* < P_{\min} \quad (7-2)$$

$$\hat{P}_{j,t} = P_{j,t}^* \quad (7-3)$$

$$P_{j,t}^* = \frac{P_t - b_j}{2c_j} \text{ 이외의 경우}$$

2.1.2 발전기의 증감발출을 고려한 발전량

발전기의 증감발출을 고려하게 되면 위의 식 (7)은 변형되어야 한다. 왜냐하면 발전기의 증감발출을 고려할 경우 각 시간대의 발전량은 독립적으로 결정될 수 없기 때문이다. 본 논문에서는 발전기의 증감발출을 고려한 발전량을 얻기 위해 각 개별스트링으로 표현되는 기동정지계획을 토대로 유전알고리즘을 적용하였다. 제약조건은 발전기 증감발출이고, 개체표현방법은 실수형을 사용하였다.

2.2 유전알고리즘

자연의 우생학 원리에서 나온 유전알고리즘은 많은 연구자로부터 각자의 문제에 맞게 많은 방법론이 나왔다. 개체의 표현방법에서 실수형, 이진형, 이진배열형 등이 있고, 교배방법 및 돌연변이처리방법 또한 다양하다.

기동정지계획에서는 Yang[6]이 제안한 이후 많이 사용된 방법으로 개체표현방법(encoding)을 사용해서 가능해 영역만 탐색하도록 한 방법이 있다.[2,4,5,6]

본 논문에서는 유전알고리즘에서 제약조건을 처리하는 가장 일반적인 방법으로 페널티항을 도입한다. 통상 최소화문제에서 사용되는 페널티항은 다음과 같다.[7,8,9,11]

$$\min f(x)$$

$$s.t. \quad g_i(x) \leq 0, \quad i=1,2,\dots,m$$

$$p(x,n) = K_n \sum_{i=1}^m d_i(x) \quad (8)$$

여기서,

$p(x,n)$: 목적함수에 더해지는 페널티항

K_n : n세대에서의 페널티 계수

$d_i(x,n)$: n세대에서의 제약조건을 위반한 정도

페널티 계수는 세대에 따른 함수로 두어서 장벽법 개념을 도입한 것이다.

최대화문제에서는 목적함수에 1이하의 양수의 페널티항을 곱했고, 그 형태는 다음과 같다.[10,11]

$$p(x) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\Delta b_i(x)}{B_i} \right)^a \quad (9)$$

여기서,

$$B_i = b_i \text{ or } \Delta b_{\max,i} = \max \{ \Delta b_i \}$$

$$\Delta b_i = \max \{ 0, g_i(x) \} \quad (10)$$

본 논문에서는 기동정지계획을 발전사업자의 수익의 최대화 문제로 정식화했고, 페널티항은 최대화문제에 적합하도록 목적함수에 곱하도록 설정하였다.

다음 식은 n번째 세대에서의 최소기동시간 및 정지시간 제약을 표현한 페널티항을 포함한 적합도이다.

$$Fit(x_j) = (\prod(x_j) + \varepsilon) \cdot \frac{1}{1 + K_n d(x_j)} \quad (11)$$

x_j : 개체 j의 벡터표현

$Fit(\cdot)$: 적합도

$\prod(x_j)$: 개체 x_j 에 의한 이익(=수익-비용)

K_n : 세대 n의 페널티 계수

$d(x_j)$: 개체 x_j 의 최소정지 및 운전 조건의 위반정도

ε : 적합도를 0이상으로 보정하는 항

적합도 보정항 ε , 페널티 계수 K_n 및 위반량 $d(x_j)$ 은 다음과 같다.

$$\varepsilon = 0 \quad \text{for } \prod_{\min} \geq 0$$

$$-\prod_{\min} \quad \text{for } \prod_{\min} < 0 \quad (12)$$

$$K_n = 0 \quad n \leq N_{fix}$$

$$K \left(\frac{n - N_{fix}}{N_{generation} - N_{fix}} \right)^2 \quad n > N_{fix} \quad (13)$$

$$d(x_j) = N_{viol}(x_j) \quad (14)$$

여기서,

\prod_{\min} : 전체 세대(population)에서의 이익최소치

$N_{viol}(x_j)$: 개체 x_j 가 표현하는 기동정지계획에서의 최소기동시간 및 정지시간제약을 위반한 횟수

K : 상수

N_{fix} : 미리 정해진 고정값 (이 세대 이전에는 페널티를 부과하지 않음)

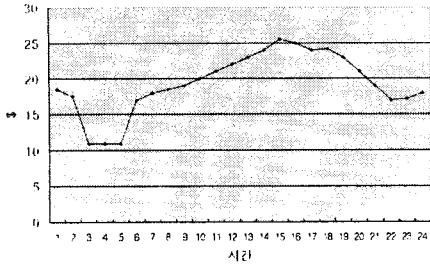
$N_{generation}$: 전체 세대수

본 논문에서 기동정지계획 수립에 사용한 개체는 이진형이고, 입찰량 결정에 사용한 개체는 실수형이다. 교배 방법에는 일점 교배법(one-point crossover)을 적용하였다. 돌연변이는 일반적으로 사용되는 방법으로 각 비트에 대해 돌연변이 확률을 적용하여 0과 1 상태를 변경하는 것으로 하였다.

2.3 사례연구

본 논문의 주된 연구는 발전기 특성을 고려하여 이익을 최대로 하는 입찰량을 결정하는 것이다. 그러므로 부하와 그에 따른 시장가격과 예비력시장 등은 다루지 않는다. 예상 시장가격과 발전기 최소기동시간 및 정지시간을 고려하여 기동정지계획을 수립하고, 수립된 기동정지계획에서 발전기의 기동시간 동안 각 시간대에서 다음 시간대로 넘어갈 때 발전기 특성 중 하나인 증감발출을 고려하여 이익을 최대화하는 입찰량을 결정하도록 한다. 예상시장가격은 다음 그림 1과 같다.

그림 1. 예상 시장가격(\$/MWh)



발전기 특성은 다음 표 1와 같다.[3,4]
표 1 발전기 자료

(용량:MW, 시간:hour, 비용:\$ 기준)

P_{max}	P_{min}	a	b	c	최소 기동 시간	최소 정지 시간	Hot start cost (HSC)	Cold start cost (CST)	cold start CSH	초기 상태	ramp up	ramp down
130	20	700	16.6	0.002	3	3	550	1100	4	5	65	65

초기상태에서 양의 정수는 기동되어 온 시간이고, 음의 정수는 정지되어 온 시간을 의미한다.

기동비용은 다음과 같이 주어진다.

$$S_j = CST_j \quad \text{if } T_{off} > MDT_j + CSH_j$$

$$HST_j \quad \text{if } MDT_j \leq T_{off} \leq MDT_j + CSH_j \quad (15)$$

주어진 데이터를 이용하여 나오는 이익 최대화의 기동 정지계획 및 입찰량은 다음 표 2,2과 그림 2,3과 같다.

표 2. 증감발출을 고려하지 않은 기동정지계획

기동정지계획 (on:1, off:0)																							
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

표 3. 증감발출을 고려한 기동정지계획

기동정지계획 (on:1, off:0)																							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

그림 2. 증감발출 고려하지 않은 입찰량

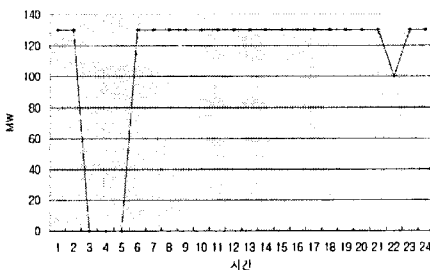
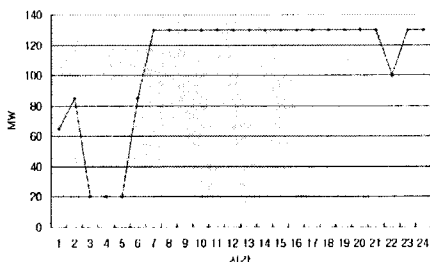


그림 3. 증감발출 고려한 입찰량



사례결과에서 보면, 발전기 증감발출을 고려한 발전기의 경우 3,4,5시간대에서 발전기를 정지시키지 않고 최소의 출력으로 기동하고 있음을 알 수 있다. 시장가격변동에 의해 기동비용보다 다음시간대에 더 많은 발전을 하는 것이 이익을 크게 하기 때문에 발전기를 기동하고 있는

것이다.

3. 결 론

발전사업자의 이익은 시장가격에 최대의 발전량을 출력한 수익에 최소의 비용을 빼는 것이 된다. 과거 독점 시장에서 발전사업자는 수요에 맞춰 자신의 발전기 비용을 최소화하는 방법으로 최대의 이익을 바라볼 수 있었다. 향후 전개될 도매경쟁시장에서는 여러 발전사업자와의 경쟁에서 유리한 지점을 차지하기 위해 자신의 발전기에 맞는 입찰전략이 필요하다.

본 논문에서는 발전사업자의 발전비용과 예상 시장가격을 가지고 기동정지계획 수립방안을 이익 최대화의 문제로 두고 유전 알고리즘을 적용하여 그 해를 구했으며, 제약조건 중 하나인 최소기동, 최소정지 시간을 패널티 함수를 곱함으로써 협소한 가능해 영역을 효과적으로 탐색할 수 있도록 하였다. 그리고 각 기동정지계획에 대해 발전기의 증감발출을 고려한 최적 발전량을 결정함으로써 최적 기동정지계획 수립과 동시에 최적 입찰량을 제공하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.W. Richter and G.B. Sheble, "A profit-based unit commitment GA for the competitive environment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000
- [2] A. Rudolf, R. Bayrleithner, "A genetic algorithm for solving the unit commitment problem of a hydro thermal power system", IEEE Trans. on Power System, Vol. 14, No. 4, 1999
- [3] K.S. Swarup, S. Yamashiro, "Unit commitment solution methodology using genetic algorithm", IEEE Trans. on Power System, Vol. 17, No. 1, 2002
- [4] W. Xing, F. Wu, "Genetic algorithm based unit commitment with energy contracts", Electrical Power and Energy Systems 24, 2002
- [5] H.T. Yang, P.C. Yang, C.L. Huang, "A parallel genetic algorithm approach to solving the unit commitment problem: implementation on the transputer networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, 1997
- [6] H.T. Yang, P.C. Yang, C.L. Huang, "Applications of the genetic algorithm to the unit commitment problem in power generation industry", International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium, Proceedings of 1995 IEEE International Conference on, Volume: 1, 20-24 Mar 1995
- [7] A.C. Homaifar, C. Qi, and S. Lai, "Constrained optimization via genetic algorithms", Simulation, Vol. 62, No. 4, 1994
- [8] J. Joines, C. Houck, "On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GAs", Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computations, 1994
- [9] Z. Michalewicz, "A survey of constraint handling techniques in evolutionary computation method", Evolutionary programming 1, 1995
- [10] T. Yokota, M. Gen, K. Ida, T. Taguchi, "Optimal design of system reliability by an approved genetic algorithm", Trans. of institute of electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J78A, No. 6, 1995
- [11] M. Gen, R. Cheng, "Genetic algorithms and engineering design, John Wiley & Sons, Inc., 1997