

시장참여자의 이익을 고려한 최적 전력시스템계획

손민균* 심현* 김진오* 정현수**
*한양대학교 전기공학과 **대림대학

Optimal Power System Planning Considering Profit Of Market Participants

Min-Kyun Son* Hun Shim* Jin-O Kim* Hyun-Soo Jung**
*Dept. of EE. Hanyang University **Daelim College

Abstract - In the deregulated power market, suppliers, consumers and transmission companies try to maximize their profits by economical behaviors. In particular, generating companies like to sell more electricity for the revenue. Their situations will lead to various power system planning as optimal solutions for each supplier. In this paper, fundamental approaches of optimal power system planning under market positions of generating company are presented. The profit-maximizing approaches are modeled mathematically. By this analysis, each optimal planning is proved in risk of cost and monetary risk will be the economical signal for participants.

1. 서 론

자유화된 전력공급 환경에서 시장참여자는 그들의 이익을 최대화하려는 행동을 취하는 데, 그 중에 특히 발전사업자는 전력계통의 제약조건들(ex. 송전용량)을 고려하면서 적절한 생산전략으로 이익을 최대화한다. 이 같은 전력시장에서 수요와 송전망 사용량 혹은 조류형태가 불확실해지면서 송전망 확장을 포함하는 전력계통 계획을 어떻게 수행할 것인가가 중요하다. 또한 그에 따른 발전사업자의 전략수립도 필요하므로 본 논문에서는 발전사업자의 이익을 최대화하는 전력시스템 계획의 최적화모델을 제안한다. 이 모델은 송전제약조건을 비용으로 고려하고, 불확실한 미래에 대한 최적대안을 얻고 투자의 위험도를 최소화하기 위해 확률적 방법과 투자론의 한 방법인 Mean-variance Markowitz 이론을 적용하였다. 제안된 모델을 통하여 발전회사의 이익을 최대화시키는 발전량과 그에 따른 송전확장계획을 얻는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 송전비용

송전비용은 두 부분으로 나눌 수 있는데, 첫째는 송전설비의 운영·유지보수 비용(첫 번째 항), 둘째는 송전선로 확장에 관한 비용(두 번째 항)이다 [1].

$$\sum_{y=1}^{year} \sum_{i,j}^{12} C_{i,j} \cdot f_{i,j} + \sum_{i,j} n_{i,j} \cdot TC_{i,j} + \alpha$$

$f_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 power flow

$C_{i,j}$: 단위 전력량(MW)당 노드 i 와 j 사이의 송전선로 운영·유지보수 비용

$TC_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 추가될 수 있는 송전선로 하나당 설치비용

$n_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 송전선 부지에 추가되는 선로의 개수

α : 송전선로에 대한 고정비용

$year$: 송전 계획 기간

$n_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 송전선 부지에 설치될 수 있는 선로의 최대 개수

Ω : 송전선이 새로 건설될 수 있는 양 노드에 대한 집합

본 모델에서는 운영·유지보수 비용은 월별로 발생하고 송전확장비용은 그보다 긴 시간단위에 따라 발생하는 것으로 가정하며 송전선로의 운영·유지보수 비용은 선로의 조류에 비례하는 값으로 취하였다.

2.1.1 송전비용 할당

송전선로를 사용하는 발전사업자들이 지불해야 할 송전비용의 할당방법으로 postage stamp allocation 방법을 사용하였다. postage stamp allocation 방법 하에서 발전회사(발전기)들은 자신들의 발전량에 비례하

여 비용을 지불하게 된다.

$$P_{AC} = \frac{\sum_{y=1}^{year} \sum_{i,j}^{12} C_{i,j} \cdot f_{i,j} + \sum_{i,j} n_{i,j} \cdot TC_{i,j} + \alpha}{\sum_{y=1}^{year} \sum_{i,j}^{12} f_{i,j}}$$

postage stamp allocation 방법을 사용하는 데 있어, 전체 송전비용에 송전계획 기간 동안의 예측되는 전체 조류량의 총합을 나누어 단위 전력량당 송전비용을 산정한다. 각 발전회사에 부과되는 송전비용은 한달에 한번씩 발생하는 것으로 가정하였다.

2.2 발전회사 이익

발전회사는 전력을 팔아서 얻는 수익에 생산비용, 송전비용을 차감한 만큼 이익을 얻는다. 생산량을 증가시킬수록 수익이 커지지만 전력계통의 송전용량이 제한되어 있으므로 그 점을 고려해야 한다.

2.2.1 발전회사 이익의 확률모델

불확실한 상황을 고려하기 위해 확률기법을 적용한 발전회사의 이익 모델은,

$$\max E(\pi_{k,h}) = \sum_k \text{pro}_k (P_k \cdot g_h - C_h(g_h)) - \sum_k \text{pro}_k P_{AC,k} (qin_h)$$

s.t

$$Sf_k + g_k = d_k, \forall k$$

$$f_{k,i,j} - \gamma_{i,j}(n_{i,j}^0 + n_{i,j})(\theta_{k,i} - \theta_{k,j}) = 0, \forall k$$

$$f_{k,i,j} \leq (n_{i,j}^0 + n_{i,j}) \bar{f}_{i,j}, \forall k$$

$$-f_{k,i,j} \leq (n_{i,j}^0 + n_{i,j}) \underline{f}_{i,j}, \forall k$$

$$g \leq g_k \leq \bar{g}, \forall k$$

$$0 \leq n_{i,j} \leq \bar{n}_{i,j}$$

$$\Omega \subset N$$

$$i, j \in \Omega, h \in N, k \in K$$

$\pi_{k,h}$: 미래상황 k 에 h 발전기(발전회사)의 이익

$E(\pi_{k,h})$: h 발전기(발전회사)의 기대이익

pro_k : 부하에 미래상황 k 가 발생할 확률

k : 고려되는 미래상황

P_k : 미래상황 k 에 단위 전력당(MW) 시장청산가격

g_h : bus h 의 발전기의 발전량(MW)

$g_{k,h}$: 미래상황 k 에 bus h 의 발전기의 발전량(MW)

$d_{k,h}$: 미래상황 k 에 bus h 의 부하량

$C_h(g_h)$: bus h 의 발전기의 생산비용(2차 함수)

$$C_h(g_h) = a_h g_h^2 + b_h g_h + c_h$$

$P_{AC,k}$: 미래상황 k 에 송전망에 인가된 단위 MW당 송전비용(postage stamp 방식)

qin_h : bus h 의 발전기에 의해 송전망에 인가된 전력량

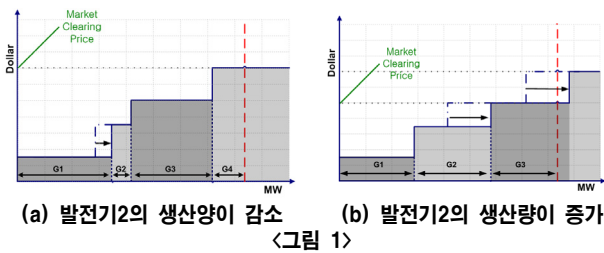
S_k : 미래상황 k 의 node-branch incidence matrix

f_k : 미래상황 k 의 power flow vector

g_k : 미래상황 k 의 generation vector
 d_k : 미래상황 k 의 demand vector
 $f_{k,i,j}$: 미래상황 k 에 노드 i 와 j 사이의 power flow
 $\gamma_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 susceptance
 $n_{i,j}^0$: base case에 노드 i 와 j 사이의 선로의 개수
 $n_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 송전선 부지에 추가되는 선로의 개수
 $\theta_{k,i}, \theta_{k,j}$: 미래상황 k 에 bus i 와 j 의 nodal angle
 $f_{i,j}$: 노드 i 와 j 사이의 선로 하나당 maximum power flow 허용량
 \underline{g}, \bar{g} : minimum, maximum generation level vector
 N : 모든 노드의 집합
 K : 모든 가능한 미래상황에 대한 집합

2.3 Pool 시장

본 논문에서는 전력시장이 pool형태로 운영되고 수요형태가 비탄력적인 것으로 가정한다. 따라서 시장청산가격은 가장 비싼 발전기의 한계비용으로 정해지고, 한 발전기가 발전량을 감소시켰을 경우와 증가시켰을 경우 <그림 1>과 같은 형태로 전력시장 상황이 변하게 된다 [2].



(a) 발전기2의 생산량이 감소 (b) 발전기2의 생산량이 증가
 <그림 1>

2.4 투자의 위험도를 고려한 발전회사 이익 확률모델

2.4.1 Mean-variance Markowitz 모델

Mean-variance Markowitz 이론은 경제적 의사결정을 위한 포트폴리오 모델로서 기대이익을 최대화시키면서 투자의 위험요소인 미래에 발생할 수 있는 이익의 편차를 최소화하는 데 목적이 있다 [3, 4].

$$\max E\{f(x)\} - \theta \sqrt{\text{Var}\{f(x)\}}$$

$f(x)$: x decision을 선택한 데 따른 이익
 $E\{f(x)\}$: x decision을 선택한 데 따른 기대이익
 $\sqrt{\text{Var}\{f(x)\}}$: x decision을 선택한 데 따른 이익의 표준편차
 θ : 이익의 표준편차에 대한 페널티 인자

θ 는 결정자의 위험도에 대한 투자 성향에 따라 가중된다. 위험도를 회피하기 위해서는 θ 에 높은 값을 할당하여 최적화를 수행한다.

2.4.2 variance를 포함한 발전회사 이익 확률모델

발전회사 이익 확률모델에 Mean-variance Markowitz 이론을 적용하면,

$$\sigma^2 = E\{\pi_{k,h}^2\} - E^2\{\pi_{k,h}\}$$

$$\max E\{\pi_{k,h}\} - \theta \sqrt{E\{\pi_{k,h}^2\} - E^2\{\pi_{k,h}\}}$$

2.5 Case Study

24 bus의 IEEE Reliability Test System을 사용하였다 [5]. 수요의 예측된 미래상황을 3가지(low, average, high)로 고려하였고 각 미래상황이 일어날 확률은 각각 0.3, 0.4, 0.3으로 가정하였다.

<표 1>은 제안된 확률적 모델을 이용하여 발전기 16의 기대이익을 최대화하는 생산량과 그에 따른 이익, 그리고 여러 미래상황에 대한 표준편차를 나타내고 있다.

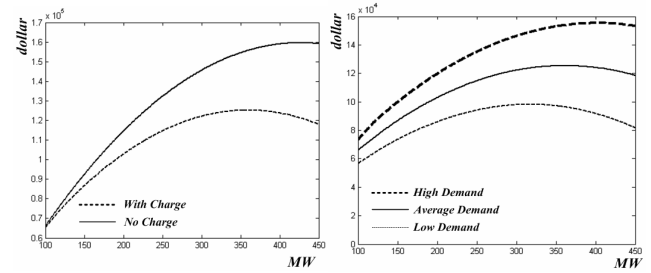
<표 1> 발전기 16의 확률적 모델 적용 결과

발전기	생산량 / 이익	표준편차
16	359 / 125240	22140

<그림 2>의 (a)는 3가지 미래상황을 고려하여 발전기 16의 생산량에 따른 기대이익을 나타낸다. 송전비용이 부과되었을 경우, 발전기의 이익은 송전비용이 부과되지 않은 경우보다 이익이 감소되고 최대이익이 발생하는 생산량도 더 낮다.

<그림 2>의 (b)는 각 미래상황에 대한 발전기 16의 이익곡선을 나타

내었는데, 수요가 High인 경우에는 전력가격이 비싸져서 다른 미래상황에 비해 발전기의 이익이 높고 이익을 최대화하는 최적 발전량도 높다. 각 미래상황에 대해 발전기의 최적 생산량이 다르므로, 다양한 경우를 고려하기위해 본 논문에서 제안한 확률적 모델을 통해 최적 발전량을 결정하는 것이 유용함을 알 수 있다.



(a) 기대이익곡선 (b) 각 미래에 대한 이익곡선
 <그림 2> 발전기 16의 이익곡선

<표 2>는 발전기 16이 최대이익을 얻는 최적 발전량에 도달했을 경우에 따른 송전확장계획이다. 이 송전확장계획은 발전기 16의 계통투입량에 따른 영향뿐만 아니라 다른 발전기의 운영형태에 따라서도 결정된다.

<표 2> 발전기 16의 최적발전량에 따른 송전확장계획

1-5	2-6	3-24	4-9	6-10	7-8	8-9
1	1	2	1	2	2	1
9-11	9-12	10-11	10-12	11-13	11-14	12-23
1	1	1	2	1	1	1
13-23	14-16	15-21	15-24	16-17	16-19	17-18
1	3	3	2	1	1	2
17-22	18-21	19-20	21-22			
1	1	1	1			

<표 3>은 확률적 모델에 variance를 포함한 결과이다. 발전기의 이익과 이익의 편차사이의 trade-off관계에 따라 페널티인자 θ 의 값이 커질수록 기대이익의 감소는 있지만 이익의 표준편차는 감소하는 것을 보였다.

<표 3> 발전기 16의 variance를 고려한 확률적 모델 적용 결과

발전기	$\theta=0.5$	$\theta=1.0$	$\theta=1.5$
16	345/125080 /21296	325/124220 /20120	313/123360 /19443

*. 최적 발전량 / 최대기대이익 / 이익의 표준편차

3. 결 론

본 논문은 발전회사의 이익을 최대화시킬 수 있는 전력시스템 계획의 확률적 모델을 제시하였다. 본 모델에서는 발전기의 이익에 제약이 되는 송전망 용량에 대해 송전비용으로 고려하였으며, 확률적 방법을 통해 불확실한 미래에 대해 이익을 최대화 시키는 최적대안을 얻을 수 있었다. 또한, 투자의 위험도를 최소화시킬 수 있는 Mean-variance Markowitz 이론을 적용하여 좀 더 robust한 대안을 얻을 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문의 연구는 산업자원부 지정 '전력신뢰도/품질 연구 센터'에서의 재정적인 지원을 받아 진행되었습니다. 본 센터에는 경상대, 서울대, 숭실대, 전북대, 한양대의 교수님들과 대학원생들이 연구원으로 참여하고 있습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Rishen Fang and David J.Hill, "A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, No.4, pp.374-380, 2003
 [2] Daniel S. Kirschen and Goran Strbac, Fundamentals Of Power System Economics, John Wiley & Sons, 2004
 [3] Juan Alvarez, Kumaraswamy, Ponnambalam and Victor H. Quintana, "Transmission Expansion under Risk using Stochastic Programming", PMAPS, KTH, Stockholm, Sweden, 2006
 [4] 강병호, "투자론", 박영사, 2004
 [5] "The IEEE Reliability Test System-1996", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, Issue.3, pp.1010-1020, 1999