

규제 완화된 전력시스템의 전원개발계획 방법론 고찰

조형준, 황성욱, 장승찬*, 김발호, 김정훈

홍익대학교 전기제어공학과

* 에너지관리공단 R&D본부

Analysis of Generation Expansion Planning Methodology
in Deregulated Power Systems

Cho, Hyoung-Joon Hwang, Sung-Wook Chang, Seungchan* Kim, Balho Kim, Jung-Hoon

Dept. of Electrical Engineering, Hong-Ik University Seoul, Korea

* R&D Management Center for Energy and Resources, KEMCO, Korea

Abstract - Deregulation and restructuring of electric industry change the fundamental nature of electric business which will be coordinated by the evolved market structures such as spot market with pool and bilateral transaction structure, forward market and future market. Introduction of competition can significantly change the system operation in near-terms as well as long-run generation expansion planning. Previous centralized planning by monopoly utilities which was guided for the public service purpose will be replaced by decentralized investments plan by individual generation companies in response to commercial incentives. This paper reviews WASP model as a centralized planning tool and presents a methodological analysis of generation expansion planning in deregulated power systems. It stresses how affects the process of planning new generation investments by the introduction of competition and how maintains proper fuel mix and continuously sustains system reliability under deregulated environments.

1. 서 론

전력산업은 대규모 투자산업으로서 전통적으로 독점 공기업 체제가 유지되어 왔으나, 최근 소용량 발전기(combined cycle gas turbine)의 기술발전으로 전력생산의 경제성을 확보한, 민간의 전력사업 참여여건이 조성되어 세계 각국은 전력산업에 경쟁을 도입하는 구조개편을 본격화하고 있다. 구조개편은 일반적으로 기존 전력공급의 효율성을 제고하며 장기적으로 값싸고 안정적인 전력공급의 지속적 보장, 그리고 전력사용에 있어서 소비자 선택권의 확대를 통한 편익증진을 목적으로 이루어지고 있다.

국내에서도 발전, 송전, 배전 부문을 분리하고 발전과 배전부문을 경쟁체제로 하는 전력산업 구조개편을 추진 중에 있으며 우선은 발전부문을 수 개의 발전회사로 분할, 경쟁을 도입하며 분할된 발전회사의 단계적인 민영화로 효율성 증진을 통한 발전원가 절감을 도모하고, 장기적으로는 배전부문도 수개의 배전회사로 나누어 전력도·소매 부문에 본격적인 경쟁을 도입, 송전망을 개방하여 민간업체도 전국적인 송전망을 자유로이 이용토록 보장하여 공정한 경쟁여건을 조성하도록 구조개편의 기본방향이 이루어질 전망이다. 이와 같은 구조개편이 이루어질 경우 현재까지 정부주도로 이루어졌던 에너지 수급 및 배분정책에 변화가 예상되며 장기 전력수급

계획, 전기요금정책 그리고 전력부문 공익사업 방향변화 등이 해결되어야 할 과제로 주어지게 된다.

기존의 독점체제의 전력산업에 경쟁이 도입되면 전력회사가 미래의 부하변동에 대응하여 계획했던 단기 운영계획 및 장기 전원개발계획에 많은 영향을 끼치게 된다. 이는 근본적으로 전력시장이 변화함으로써 전력사업의 목적이 국가적 관점의 공공복리증진에서 개별 발전사업자의 영리추구로 변화됨에 주로 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 기존의 독점체제하에서는 전원개발계획을 수립할 때 전 계통을 고려하여 전체 에너지비용의 최소화를 목적으로 투자계획이 이루어졌으며, 전력회사를 선택할 권한이 없는 소비자(captive customers)에게 발전, 송전, 배전에 필요한 비용을 부과하는 한편, 전력회사는 판매의 특권을 가짐과 동시에 일정 공급신뢰도(LOLP)를 유지할 의무를 가지게 되었다. 그러나, 경쟁체제에서의 전원개발계획은 기존과는 달리 각 발전회사별로 분산되므로 발전회사들은 더 이상 판매의 특권이나 공급의 의무를 가지지 않으며 단지 회사의 이익과 연관되어 새로운 전원 개발에 대한 투자동기를 가진다 할 것이다. 이 경우, 투자에 대한 기준을 정하기 위해 발전회사는 기대수익을 예측하고 예측된 수익을 각 발전회사의 경영기준과 비교하여 계획을 추진할 것인지 연기할 것인지를 결정한다. 전원 개발에 대한 투자시기는 예측된 기대수익에 의존할 뿐, 기존의 체제처럼 예비력 또는 적정 공급신뢰도에 의존하지 않게 된다.

본 논문에서는 전력시스템의 규제완화 전후에 있어서의 전원개발계획 방법론[4, 5]에 대해 각각 분석하고 그 영향에 대해서 검토하였으며, 규제완화 이전의 적정신뢰도 확보용량과 경쟁체제에서 각 발전회사의 설비투자 용량을 상호비교하고, 그에 따른 문제점과 대처방안에 대해 살펴보고자 하였다. 독점체제하의 전원계획은 전원구성 제약과 공급지장비가 고려된 WASP 모형을 중심으로 검토하였으며 경쟁체제에서의 전원계획은 각 발전회사의 기대수익에 따른 투자용량을 모델링 하였고 적정 투자용량 확보를 위한 방법론을 제시하였다.

2. 독점체제하에서의 전원개발 모형

독점 공기업 체제하에서의 전력회사는 미래의 수요 성장에 대해 부하를 예측하고 예측된 부하를 충족하기 위해 기존의 설비용량에 얼마나 더 많은 설비가 필요한지를 알아야 한다. 현재 운전중인 발전기는 수명이 다되어 더 이상 운전할 수 없을 때가 도래하게 되며, 시간이 지남에 따라 설비가 단계적으로 사용할 수 없게 된다. 따라서, 전력회사는 부하성장과 기존의 설비가 수명이 다된 시기를 예측하여 매년 적정 예비력을 확보하여야

한다. 적정 공급신뢰도(LOLP)를 계산할 때는 주로 확률적 운전모형(probabilistic production simulation)을 이용하게 되는데 이때의 고려요소로는 예측부하, 기준설비, 후보전원, 보수계획(MOR), 고장정지율(FOR), 투입순서(merit order) 등이 있으며, 이들 주어진 입력자료를 토대로 상승적분(convolution)하여 계산되어진다. 공급신뢰도 기준을 만족하는 최적설비를 구하기 위한 첫 단계로서 에너지소비량의 예측이 필요하며 이는 최대수요예측을 통해 식(1)과 같은 표현이 가능하다.

$$E(t) = P_t \sum_{\tau=1}^{8760} d(\tau) \quad (1)$$

단, $E(t)$: t년도의 에너지소비량(MWh)

P_t : t년도의 최대수요(MW)

$d(\tau)$: 최대수요와 관련된 시간별 상대계수

$$(0 < d(\tau) < 1)$$

이와 같이 전원개발계획은 예측된 수요를 일정한 신뢰도 기준 이내로 만족시키면서, 계획기간 동안의 매년도 투자비 및 운전비의 현재가치의 합을 최소로 하는 투입용량을 결정하는 최적화문제로 요약된다. 이 문제의 목적함수 또는 최적 대안을 결정하는 판단기준은 계획기간 동안의 연도별 투자비 및 운전비의 현재가치 합이고, 제약조건은 연도별 건설 가능한 설비 범위 및 신뢰도기준이며, 결정해야 할 것은 발전원별 투입용량 및 그 시기가 될 것이다.

2.1 목적함수

독점체제하에서의 비용최소화 전원계획문제 j에 대한 목적함수는 식(2)와 같이 주어진다.

Minimize

$$PI_j = \sum_{i=1}^T (\hat{I}_{jt} + \hat{F}_{jt} + \hat{M}_{jt} - \hat{S}_{jt} + \hat{O}_{jt}) \quad (2)$$

단, \hat{I}_{jt} : 투자비, \hat{F}_{jt} : 연료비, \hat{M}_{jt} : 운전유지비

\hat{S}_{jt} : 잔존가치, \hat{O}_{jt} : 공급지장비

주어진 비용을 현재가치로 환산할 때 다음과 같은 가정을 한다. 투자비는 당해 초에 발생하고, 잔존가치는 계획기간의 최종 연말을 기준으로 선형 감가상각되어 회수되며, 연료비, 운전유지비 그리고 공급지장비는 당해 연도 중간에 발생한다고 가정한다. 비용항목별로 할인율을 적용하여 수식을 전개하면 다음과 같다.

투자비(Investment Cost)

$$\hat{I}_{jt} = (1+i)^{-t} \sum_g cc_g \cdot C_g^U \quad (3)$$

단, cc_g : 발전기 g의 건설단가(₩/MW)

C_g^U : 투입될 발전기 g의 용량(MW)

잔존가치(Salvage Cost)

$$\hat{S}_{jt} = (1+i)^{-T} \sum_g \delta_{gt} \cdot cc_g \cdot C_g^X \quad (4)$$

단, δ_{gt} : 발전기 g의 감가상각률

C_g^X : 기존 설치된 발전기 g의 용량(MW)

연료비(Fuel Cost)

$$\hat{F}_{jt} = (1+i)^{-t-0.5} PPC_{jt} \quad (5)$$

단, $PPC_{jt} = \sum_g cf_g \cdot E_g$

$E_g = f(FOR_g, C_g^X, L(\tau))$

cf_g : 발전기 g의 연료단가(₩/kWh)

E_g : 발전기 g의 연간 기대출력(kWh)

운전유지비(Operation & Maintenance Cost)

$$\hat{M}_{jt} = (1+i)^{-t-0.5} \sum_g (fc_g \cdot C_g^X + vc_g \cdot E_g) \quad (6)$$

단, fc_g : 발전기 g의 고정 운전유지비(₩/MW)

vc_g : 발전기 g의 변동 운전유지비(₩/kWh)

공급지장비(Outage Cost)

$$\hat{O}_{jt} = (1+i)^{-t-0.5} oc \cdot UE_{jt} \quad (7)$$

단, oc : 공급지장 단가(₩/kWh)

UE_{jt} : 연간 공급지장 에너지(kWh)

2.2 제약조건

$$X_{jt} = X_{j,t-1} + U_{jt} \quad (8)$$

단, $X_{jt} = \sum_g C_g^X$, $U_{jt} = \sum_g C_g^U$

$$U_{jt}^0 \leq U_{jt} \leq U_{jt}^0 + \Delta U_{jt} \quad (9)$$

단, U_{jt}^0 : t년도의 시스템 최소 허용 용량(MW)

ΔU_{jt} : t년도의 신규투입 허용 한계용량(MW)

$$P_t(1+l_t) \leq X_{jt} \leq P_t(1+u_t) \quad (10)$$

단, l_t : 예비력 하한율, u_t : 예비력 상한율

$$LOLP_{jt} \leq \epsilon \quad (11)$$

단, $LOLP_{jt} = f(X_{jt}, FOR_g, MOR_g, L(\tau))$

$$\forall k, f_k^{\min} \leq f_k \leq f_k^{\max} \quad (12)$$

단, $f_k = \frac{X_{jt,k}}{X_{jt}}$, $\sum_k f_k = 1.0$

$X_{jt,k}$: 발전기 type k의 총 용량

제약조건은 에너지 수급과 신뢰도 기준 그리고 전원구성 등이 만족되도록 구성되며, (8),(9)는 연간 발전소 증설에 대한 제약조건이며 (10), (11)는 예비력과 신뢰도 기준에 대한 제약조건을 의미한다. (12)는 전원구성 제약으로서 에너지 안보측면에서 발전원의 다양화 모색이 필요하게 되는데 최적 capacity mix 또는 전원구성 확보 또한 계획상에서 중요하게 다루어야 할 문제이기도 하다.

3. 경쟁체제에서의 전원개발 모형

경쟁체제에서의 전원계획은 기존 독점체제와는 달리 각 발전회사별로 분산된다. 각 발전회사는 기존처럼 더 이상 공급의 의무나 권리를 갖지 않으므로 이익과 관련된 투자가 이루어질 것이다. 더 많은 기대수익을 얻기 위해 각 발전회사는 기대수익을 예측하고 예측된 수익을 자사의 투자기준과 비교하여 전원계획의 추진여부를 결정하게 된다. 이러한 투자기준으로 인해 경쟁체제에서 대두되는 문제점은 전체시스템 운용관점에서의 예비력 확보 또는 공급신뢰도의 유지에 관한 일정한 기준이 없으며 단지 시장에 맡겨 운용한다는 점이다. 발전회사들은 전체시장에 대한 최적 투자가 아닌 각 발전회사의 이익과 관련된 투자를 최적화 할 것이고 투자에 대한 가장 높은 수익률의 대안을 전원계획을 통해 선택할 것이다.

경쟁체제에서 발전회사 G의 t년도 기대수익

(Expected Revenue) ER_{G_t} 은 식(13)과 같다.

$$ER_{G_t} = p_t \cdot q_{G_t} \quad (13)$$

단, p_t : 전력판매단가, q_{G_t} : 발전회사 G 의 발전량

경쟁체제에서의 시장형태는 크게 pool 또는 bilateral contract로 나타나는 현물시장과 선도시장 및 선물시장으로 구분할 수 있으며 시장운영은 주로 MO(market operator)에 의해 이루어진다. 참고로, pool에서는 단일 구매전력회사(purchasing agent)가 발전회사들간 경쟁입찰을 통해 급전순위를 결정하고 송배전 및 판매를 담당하여 소비자에게 공급하는 형태이고, bilateral contract의 경우 소비자가 공급자를 선택할 수 있는 시장구조로서 소매 또는 도매경쟁을 통해 소비자에게 공급하는 형태이다. 이와 같이 각 발전회사는 다양한 계약을 통해 소비자에게 전력을 공급하게 되는데 이러한 계약형태를 고려해서 기대수익을 표현하면 식(14)와 같다.

$$ER_{G_t} = \sum_m p_{i,m}^c \cdot q_{G,m}^c + p_i^s \cdot [q_{G_t} - \sum_m q_{G,m}^c] \quad (14)$$

단, $p_{i,m}^c$: 계약에 대한 계약가격

$q_{G,m}^c$: 계약 m 에 대한 계약전력량

p_i^s : 현물시장가격

이와 같이 계산된 기대수익은 운전비용과 고정비, 송전비용, 소득세 등을 배제한 식(15)과 같은 순이익 NB_{G_t} 로 표현할 수 있다.

$$NB_{G_t} = ER_{G_t} - PPC_{G_t} - (fc_{G_t} + tc_{G_t} + tax_{G_t}) \quad (15)$$

단, PPC_{G_t} : 발전회사 G 의 운전비용

fc_{G_t} : 고정비, tc_{G_t} : 송전비용, tax_{G_t} : 소득세

계획기간에서의 발전회사 G 의 순이익은 식(16)에서와 같이 자사의 전원계획에 필요한 투자비와 비교하여 내부수익률(irr_G)을 결정할 수 있을 것이다.

$$I_G = \sum_t \frac{NB_{G_t}}{(1 + irr_G)^t} \quad (16)$$

발전회사 G 의 경우 식(16)의 투자비를 이용, n 개 후보 전원 중 경제성을 기초로 투입될 전원유형, 용량, 시기 등을 결정할 것이며 이를 다시 표현하면 식(17)와 같다.

$$I_G = (1 + i)^{-t} \sum_n cc_n \cdot C_{G,n}^U \quad (17)$$

4. 규제완화된 전력시스템의 전원개발 전략

4.1 규제완화 전후의 전원개발계획 비교

독점체제하에서의 전원계획과 경쟁시장이 도입된 후의 발전회사들의 전원계획에 있어 규제완화 이후의 평균 전력요금은 기존의 경우보다 인상되지 않고, 예측되는 최대 수요 및 에너지소비량이 규제완화 전후를 통해 동일하다고 가정하면, 전체시스템의 신뢰도유지 측면에서 문제점이 발생할 수 있다. 경쟁체제에서의 신규전원(U^D)은 식(18)과 같이 표현될 수 있다.

$$U^D = \sum_G C_G^U \quad (18)$$

그림 1에서의 ㉠은 기존설비 $X_{j,t-1}$, ㉠'는 당해연도의 기존설비, ㉡는 $X_{j,t}$ 그리고 ㉢은 $U_{j,t}^D$ 를 각각 의미한다. 경쟁체제에서의 신규전원(㉢)이 기존 독점체제하에서의 신규투입용량(㉡ - ㉠')보다 크거나 같다면 수급

에 제약이 없겠지만, 불행하게도 이와 반대의 경우가 발생될 소지가 크다할 수 있는데 그 예로서, '규제완화 이후 개별 발전회사가 과연 자발적 계획에 의해 주로 저투자용으로 활용되는 투자규모가 큰 장기사업에 참여할 수 있을 것인가?' 하는 것을 들 수 있다. 따라서, 계속적인 부하성장이 되고있는 우리나라 경우 국가적 관점에서 문제시되는 부족용량(㉡ - (㉠' + ㉢))을 보충할 수 있는 대안이 안정적인 전원공급을 위해서 고려되어야 할 것이다.

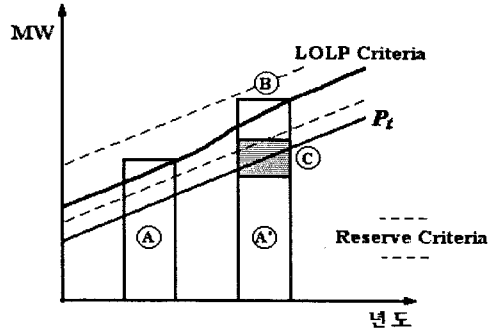


그림 1. 규제완화 전후의 전원계획 용량

4.2 전력시스템의 공급 신뢰도유지 방안

규제 완화된 전력시스템의 공급신뢰도를 유지하기 위해 우선적으로 해결해야 할 과제로서 최적전원구성 확보를 들 수 있는데, 이는 국가적 관점에서 후보전원에 대한 용량을 정한 후 발전회사들의 입찰을 받아서 우선순위를 결정하되, 단기적인 경제성미흡이 우려되는 전원 에 대해서는 자금대출 등을 통해서 적정 전원구성이 이루어지도록 유도하여야 할 것이다. 또한, 부족용량을 보충할 수 있는 대안으로서 경쟁시장에 부합되는 전력수요 관리 메카니즘(DSM Mechanisms) 개발이 적극 고려되어야 할 것이며 이는 발전회사 및 소비자의 입장을 충분히 반영하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문은 규제 완화된 전력시스템의 전원개발계획 방법론에 대해 다룬 것으로, 기존 독점체제하의 방법과 경쟁체제에서의 방법을 상호 비교하였다. 또한, 경쟁체제의 경우 각 발전회사의 기대수익에 따른 투자용량을 모델링 하였으며 적정투자용량 확보를 위한 방법론을 제시하였다. 규제완화된 전력시스템의 공급신뢰도를 유지하기 위해서는 ① 최적전원구성 확보를 위한 방법 ② 부족용량을 대신할 수 있는 최적 전력수요관리 메카니즘 개발 등에 대한 심도있는 후속연구가 필요할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] O.B. Fosso, et. al, "Generation Scheduling in a Deregulated System: The Norwegian Case", IEEE Trans. on PWRs, Vol.14 No.1, Feb. 1999.
- [2] A. Martin, et. al, "Electric Capacity Expansion under Uncertain Demand: Decomposition Approaches", IEEE Trans. on PWRs, Vol.13 No.2, May 1998.
- [3] J. Zhu, et. al, "A Review of Emerging Techniques on Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on PWRs, Vol.12 No.4, Nov. 1997.
- [4] Marija Ilic et. al, Power System Restructuring, Kluwer Academic Publishers, pp.283~333, 1998.
- [5] Wang X. et. al, Modern Power System Planning, McGraw-Hill, pp. 326~374, 1994.