

경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구

한 석 만*, 신 영 균*, 김 발 호*, 박 종 배**, 차 준 민***
 홍익대학교*, 건국대학교**, 대진대학교***

A study on generator maintenance scheduling of system operator
 in competitive electricity markets

Seok-Man Han*, Young-Kyun Shin*, Balho H. Kim*, Jong-Bae Park**, Jun-Min Cha***
 Hongik University*, Konkuk University**, Daejin University***

Abstract - In competitive electricity markets, maintenance schedule is submitted by Genco's and Transco's, and coordinated by ISO with the adequacy criterion. This paper presents an alternative coordination procedure by ISO on the maintenance schedule.

Key Words: Generator Maintenance Scheduling, Reliability, Optimization Model, System Operator, Schedule Coordinator

1. 서 론

전력산업 구조개편으로 인하여 전력계통을 구성하고 있는 물리적 설비들은 과거의 수직통합체제 때와 동일하지만 그 운용과 소유 부분에 있어서는 많은 변화를 거치고 있다. 우선 전력이라는 상품을 사고 파는 거래소가 생겼으며, 소유한 설비의 기능에 따라 발전사업자, 송전망 사업자, 배전사업자가 나타나게 되었다. 또한 일반 상품과는 다른 전력 상품의 기본적인 특징들로 인하여 계통(시장)을 운영하는 계통운영자(시장운영자)가 등장하게 되었다[1].

과거 수직통합체제에서의 단일전력회사는 모든 설비를 소유하고 운영하였기 때문에 계통의 모든 정보(발전기 비용함수, 계통운영상황 등)를 이용할 수 있었다. 단일 전력회사는 안정적인 전력수급의 책임을 가지고 있었고 공기업 형태로 운영되었기 때문에 계통 정보를 바탕으로 비용최소화, 신뢰도 최대화, 신뢰도 평활화 등의 목적함수를 사용할 수 있었다.

경쟁적 전력시장에서 시장참여자는 수직통합체제의 단일전력회사와는 달리 안정적인 전력수급의 책임을 더 이상 갖지 않는다. 다만 시장참여자는 자신들의 이익 극대화에 관심이 있으며 그에 따라 입찰전략, 예방정비계획, 전원개발계획 등을 수립한다. 전력계통의 신뢰도와 안전도에 관한 책임은 계통을 운용하는 계통운영자의 몫이다 [2]. 하지만 계통운영자는 계통 신뢰도와 안전도를 유지하기 위해 시장원리를 저해하지 않는 범위 내에서 어느 정도의 강제력을 가져야 할 것으로 판단된다.

기존의 예방정비계획에 관한 연구는 비용 최소화 개념과 수학적 모델에 기초한 최적 예방정비계획 수립 알고리즘 연구가 대부분이었다[3]. 최근에는 기존의 연구에서 고려하지 못했던 송전계약이나 연료계약, 환경제약 등을 고려한 통합적인 예방정비계획 기법이 제안되고 있다[1]. 그러나, 경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 역할과 예방정비계획 메커니즘에 관한 연구는 미비한 실정이다.

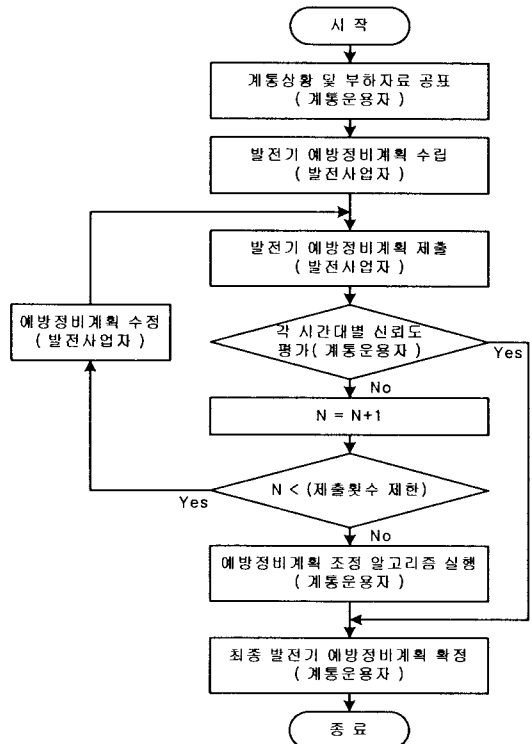
본 논문에서는 경쟁적 전력시장에 부합하는 계통운영자의 예방정비계획 수립 절차를 제시하고, 제한된 절차 중 발전사업자의 계획을 최대한 반영하면서 신뢰도를 만족시키는 계통운영자의 계획안 조정 알고리즘에 대해 논하고자 한다. 입찰정보를 포함한 경제적인 요소는 발전사

업자가 입찰전략 등을 수립하는데 중요한 정보이기 때문에 이를 공개하지 않거나 진정한 정보를 고의적으로 틀리게 제공할 가능성도 있다. 따라서 계통운영자는 경제적인 요소를 배제하고 물리적인 요소만을 사용한다. 본 논문에서는 계획안 조정을 위해 필요한 최소한의 물리적인 정보인 발전기의 용량, 사고정지확률, 제출된 계획안만을 이용한다.

2. 본 론

2.1 발전기 예방정비계획 메커니즘

경쟁시장에서 발전기 예방정비를 실질적으로 계획하고 실행하는 주체는 발전사업자들이다. 각 발전사업자들은 자신들의 이익 극대화를 목표로 예방정비계획을 수립한다. 예를 들면, 전력가격이 비싼 시간대보다는 저렴한 시간대에 예방정비를 시행하려 할 것이다. 이렇게 수립된 개별 예방정비계획안들은 공급 신뢰도를 만족하는지 여부를 승인 받기 위해 계통운영자에게 제출된다.



<그림 1> 발전기 예방정비계획 메커니즘

계획안을 제출 받은 계통운영자는 개별 계획안들이 계통 신뢰도를 만족하는지 여부를 판단하고 만약 신뢰도를 만족시키지 못하는 계획안들이 있다면 이를 수정할 수 있도록 발전사업자들에게 반려한다. 발전사업자는 반려된 계획안을 수정하여 계통운영자에게 제출한다.

하지만, 예방정비계획을 수립하는 것 자체가 발전사업자들의 전략이므로 기존의 계획안을 그대로 고수하려는 발전사업자들이 있을 수 있다. 이 때, 계통운영자는 전력을 안정적으로 공급할 책임이 있으므로, 이러한 발전사업자들에 대해서는 강제력을 행사하지 않을 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 계통운영자가 강제력을 행사하기 위한 조건으로 제출횟수의 제한을 제안한다.

이와 같은 발전기 예방정비계획 메커니즘을 <그림1>에 나타내었다. 본 논문에서는 제안한 메커니즘 중에서 계통운영자가 신뢰도를 유지시키기 위해 실시하는 계획안 조정 알고리즘에 대해서만 다루기로 한다.

2.2 계통운영자의 계획안 조정 알고리즘

2.2.1 수학적 정식화

$$\text{MINIMIZE } \sum_{i,j,t} Diff_j \quad (식1)$$

subject to

$$LOLP_t \leq LOLP_{ref}, \quad \forall t \quad (식2)$$

$$Diff_j = Diff_{j+1}, \quad j=1, \dots, N_C-1 \quad (식3)$$

$$\sum_{t=1}^{N_p} x_{i,j,t} = M_{i,j}, \quad \forall i, j \quad (식4)$$

$$\sum_{k=1}^{N_p-M_{i,j}+1} (\prod_{t=k}^{M_{i,j}+k-1} x_{i,j,t}) = 1, \quad \forall i, k \text{는 정수} \quad (식5)$$

$$x_{i,j,t} = \text{binary variable} (0 \text{ or } 1) \quad (식6)$$

여기서,

- i : 발전기 index ($i=1, 2, \dots, N_j$)
- j : 발전사업자 index ($j=1, \dots, N_C$)
- t : 보수 시기(주) index ($t=1, 2, \dots, N_p$)
- N_j : j번째 발전사업자의 발전기 대수
- N_p : 총 보수 주(1년=52주)
- N_C : 총 발전사업자 수

$x_{i,j,t}$: 계통운영자가 수립한 예방정비계획 j번째 발전사업자의 i번째 발전기가 t번째 보수 주에 예방정비 실시($x_{i,j,t}=1$), 가동($x_{i,j,t}=0$)

$Diff_j$: j번째 발전사업자의 총 계획안 조정 정도

$Sch_{i,j,t}$: 발전사업자가 제출한 예방정비계획 j번째 발전사업자의 i번째 발전기가 t번째 보수 주에 예방정비 실시($Sch_{i,j,t}=1$), 가동($Sch_{i,j,t}=0$)

$LOLP_{ref}$: 신뢰도 기준

$LOLP_t$: t번째 보수 주의 공급지장확률

$M_{i,j}$: j번째 발전사업자의 i번째 발전기 보수 기간

$$(M_{i,j} = \sum_{t=1}^{N_p} Sch_{i,j,t})$$

$$\prod_{k=a}^b x_k = x_a \cdot x_{a+1} \cdot x_{a+2} \cdot \dots \cdot x_{b-1} \cdot x_b$$

(식1)의 목적함수는 발전사업자들이 제출한 예방정비

계획안과 계통운영자가 계통 신뢰도를 고려하여 수립한 예방정비계획과의 차이를 최소화시키는 부분이다. 본 논문에서는 이 차이를 조정 정도라고 정의한다. 조정 정도는 다음과 같다.

$$Diff_j = \sum_{i=1}^{N_j} |P_{i,j}^S - P_{i,j}^{Sch}|$$

여기서,

$P_{i,j}^S$: 계통운영자가 수립한 j번째 발전사업자의 i번째 발전기의 예방정비 시작 주

$P_{i,j}^{Sch}$: j번째 발전사업자가 제출한 i번째 발전기의 예방정비 시작 주

(식2)의 제약조건은 공급 신뢰도를 나타낸다. 본 논문에서는 여러 가지 신뢰도 지수 중 공급지장확률만을 고려하였다. 공급지장확률은 발전기의 설비용량, 사고정확률, 부하에 대한 함수이다. 공급지장확률은 매 시간 주기마다 계산하며 모든 주기에 대해 신뢰도 기준보다 작아야 한다.

(식3)은 발전사업자들의 형평성을 고려하는 제약조건이다. 즉, 발전사업자들의 조정 정도를 동일하게 하여 특정 발전사업자의 계획안만이 조정되는 것을 방지하기 위함이다.

(식4)는 발전기들의 보수 기간을 나타내는 제약조건이다. $M_{i,j}$ 는 $Sch_{i,j,t}$ 에서 해당 발전기의 예방정비를 나타내는 1의 개수이다.

(식5)는 발전기들의 보수는 연속적으로 실시한다는 제약조건이다. (식4)만으로는 예방정비가 두 주기 이상 실시될 경우 연속이 아닌 해도 발생할 수 있다. 따라서, 보수 연속 기간을 고려하기 위해서는 (식5)가 필요하다.

2.2.2 사례연구

본 연구에서는 문제의 간략화를 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 발전사업자가 제출한 예방정비계획은 신뢰도를 만족시키지 못하여 제출횟수 제한만큼 계통운영자가 반려시켰으나 여전히 자신들의 계획안을 고수한다.
- 예측된 부하 자료는 발전사업자, 계통운영자 모두 알고 있는 자료이다.
- 발전기의 용량 및 사고정확률은 계통운영자가 알고 있는 자료이다.
- 발전사업자별 총 설비용량은 동일하다.
- 신뢰도 기준은 모든 주기에서 0.1000을 적용한다.
- 총 보수주기는 20주이며 예방정비는 주단위로 실시한다.
- 송전설비에 의한 영향은 무시한다.

논문에서 제안한 계획안 조정 최소화 문제는 대표적인 조합최적화 문제이다. 조합최적화 문제를 해결하기 위해 시뮬레이티드 어닐링 기법을 사용하였다. 또한 공급지장확률은 보수되는 발전기를 제외한 발전기의 사고정확률을 부하지속곡선에 상승적분(convolution)한 등가부하지속곡선(Effective Load Duration Curve)을 이용하여 계산하였다.

<표1>은 각 주기별 부하자료이며, <표2>는 발전사업자들이 제출한 예방정비계획이다. <표3>은 발전사업자들이 제출한 예방정비계획 만으로 신뢰도(공급지장확률)를 계산한 값이다. 5,11,12,13,14주기에서 신뢰도를 만족시키지 못하여 계획 조정이 필요하다.

주기	부하(MW)	주기	부하(MW)
1	1340	11	1950
2	1420	12	1910
3	1400	13	1840
4	1440	14	1850
5	1660	15	1600
6	1540	16	1730
7	1630	17	1730
8	1620	18	1500
9	1620	19	1440
10	1830	20	1320

<표 1> 각 주기별 부하자료

주기	신뢰도	주기	신뢰도
1	0.000183	11	0.056534
2	0.004994	12	0.047272
3	0.006733	13	0.057312
4	0.053491	14	0.057312
5	0.048266	15	0.026127
6	0.018525	16	0.065810
7	0.038021	17	0.030138
8	0.000733	18	0.004050
9	0.002170	19	0.002713
10	0.031850	20	0.000013

<표 5> 최종 계획안으로 계산한 신뢰도

발전사업자	발전기명	용량(MW)	고장정지 확률	신뢰도	
				1~10주	11~20주
GenCo #1	Unit#1	300	0.045	0001110000	0000000000
	Unit#2	250	0.072	0000011110	0000000000
	Unit#3	150	0.072	0000000011	1000000000
GenCo #2	Unit#4	400	0.069	0011100000	0000000000
	Unit#5	300	0.045	0000000000	1111000000
GenCo #3	Unit#6	250	0.030	0111000000	0000000000
	Unit#7	200	0.075	0000000001	1100000000
	Unit#8	150	0.062	0000000000	0000000111
GenCo #4	Unit#9	100	0.062	0001110000	0000000000
	Unit#10	350	0.040	0000000000	0011111000
	Unit#11	250	0.072	0000001110	0000000000
	Unit#12	100	0.054	0000011100	0000000000

<표 2> 발전사업자가 제출한 예방정비계획과 발전기 자료

주기	신뢰도	주기	신뢰도
1	0.000013	11	0.291975
2	0.004103	12	0.123341
3	0.003205	13	0.141540
4	0.096656	14	0.141540
5	0.105715	15	0.003052
6	0.036940	16	0.009545
7	0.024545	17	0.000795
8	0.024545	18	0.000282
9	0.031257	19	0.000167
10	0.027246	20	0.000051

<표 3> 초기 계획안으로 계산한 신뢰도

<표4>는 알고리즘을 수행한 결과이며, <표5>는 결과를 이용하여 신뢰도를 계산한 값이다.

발전사업자	발전기명	1~10주	11~20 주	조정 정도	
				발전기별	사업자별
GenCo #1	Unit#1	0000111000	0000000000	1	4
	Unit#2	0001111000	0000000000	2	
	Unit#3	0000000001	1100000000	1	
GenCo #2	Unit#4	1111000000	0000000000	2	4
	Unit#5	0000000000	0011110000	2	
GenCo #3	Unit#6	0111000000	0000000000	0	4
	Unit#7	0000000000	0111000000	2	
	Unit#8	0000000000	0000011110	1	
GenCo #4	Unit#9	0011100000	0000000000	1	4
	Unit#10	0000000000	0001111110	2	
	Unit#11	0000000011	1000000000	2	
	Unit#12	0000011100	0000000000	0	

<표 4> 계통운영자가 수립한 예방정비계획

3. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 경쟁시장에서 발전사업자와 계통운영자 간의 예방정비계획 메커니즘을 제시하였다. 특히, 발전사업자가 자신의 계획안을 고수할 경우, 계통운영자가 이용할 수 있는 계획안 조정 알고리즘을 제시하였다. 본 알고리즘은 신뢰도뿐만 아니라 형평성을 고려하여 모든 사업자의 계획안을 고르게 반영한다. 또한, 계통운영자는 계획안 조정에 최소한의 물리적 정보만을 필요로 하므로, 계획안 조정의 공정성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 송전계통에 의한 영향을 무시하였지만, 실제 예방정비계획에 있어서는 송전계통을 고려하여 계획을 수립한다. 따라서, 송전계통과의 협조 메커니즘에 대한 연구가 필요하다. 또한, 향후 시행될 양방향 입찰 시장에서 예방정비계획관련 계통운영자의 역할과 책임 기준 설정에 관한 연구도 필요하다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여
기초전력공학공동연구소(01-중-05) 주관으로
수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shahidepour & M. Marwali, "Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] Yaoyu Wang & Edmund Handschin, "Unit Maintenance Scheduling in Open System Using Genetic Algorithm", Transmission and Distribution Conference, IEEE, Vol 1, pp.334-339, 1999.
- [3] D. Chattopadhyay, "A practical maintenance scheduling program : mathematical model and case study", Trans. IEEE, Vol 13, pp. 1475-1480, 1998
- [4] Z. A. Yamaye, "Maintenance Scheduling:Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operations Scheduling", Trans. IEEE, Vol 8, 1982.
- [5] Jung-Won Jung & Jung-Ik Kim, "Maintenance Scheduling using a Genetic Algorithm with New Crossover Operators", Trans. KIEE, Vol 48, pp.545-552, 1999.
- [6] E. L. da Silva, M. Th. Schilling & M. C. Rafael "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", Trans. IEEE, Vol 15, pp838-843, 2000.
- [7] Jun-Min Cha, "Maintenance Scheduling of Generators using Serial Multi-Stage Decision Making in Long-term Generation Expansion Planning", Korea Univ. 博士學位論文 1995. 12.
- [8] 韓國電力公社 電力經濟研究室, "發電系統供給信賴度", 1989. 2.