

송전계통을 고려한 발전기 예방정비계획 방법론에 관한 연구

한석만*, 신영균**, 김발호*
 홍익대학교*, 한국전력공사**

Method of Generator Maintenance Scheduling Considering Transmission System

Seok-Man Han*, Young-Kyun Shin**, Baiho H. Kim*
 Hongik University*, KEPCO**

Abstract - In competitive electricity markets, the System Operator (SO) coordinates the overall maintenance schedules whenever the collective maintenance schedule reported to SO by Gencos in the pool does not satisfy the specified operating criteria, such as system reliability or supply adequacy. In this paper, we divide maintenance schedule problem into master-problem and sub-problem. Master-problem is schedule coordination and sub-problem is DC-optimal power flow. If sub-problem is infeasible, we use the algorithm of modifying operating criteria of master-problem.

1. 서 론

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

전력산업 구조개편으로 인하여 단일전력회사는 시장참여자인 발전/송전/배전사업자와 안정적 전력수급의 책임이 있는 계통운영자로 분리되었다. 경쟁적 전력시장에서 발전사업자는 수직통합체에서의 단일전력회사와는 달리 안정적인 전력수급의 책임을 더 이상 갖지 않는다. 다만 발전사업자는 자신들의 이익 극대화에 관심이 있으며 그에 따라 입찰전략, 예방정비계획, 전원개발계획 등을 수립한다. 전력계통의 신뢰도와 안전도에 관한 책임은 계통을 운용하는 계통운영자의 몫이다. 하지만 계통운영자는 계통 신뢰도와 안전도를 유지하기 위해 시장원리를 저해하지 않는 범위 내에서 어느 정도의 강제력을 가져야 할 것으로 판단된다.

기존의 발전기 예방정비계획은 송전계통을 고려하지 않고 전체 계통의 신뢰도 기준만을 만족시키도록 계획을 수립하였다. 하지만 전력계통은 발전설비와 송전설비가 유기적으로 연결된 시스템으로 전체 계통의 신뢰도 기준을 만족시키는 해라도 실제 운영될 수 없는 경우가 발생한다. 즉, 발전기 예방정비계획에도 송전계통을 고려해야만 실제 급전운영될 수 있는 해를 얻을 수 있다.

경쟁시장에서 계통운영자가 이용할 수 있는 정보는 대단히 제한적이다. 발전사업자의 비용함수, 입찰가격 등과 같은 정보는 이익극대화를 위한 전략에 쓰이는 매우 중요한 정보이므로 계통운영자는 공개된 정보만을 이용해야한다.

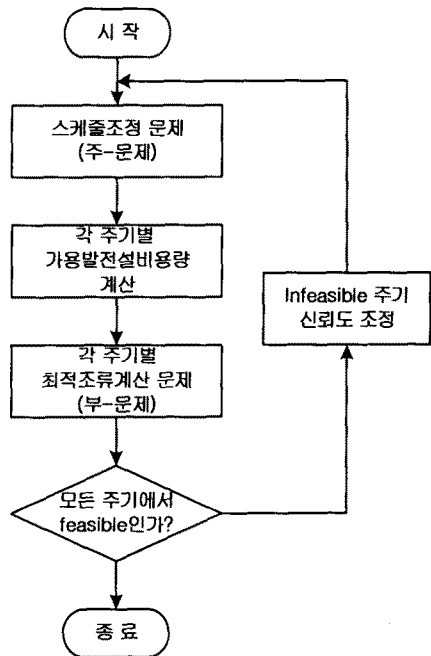
본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 계통운영자가 발전사업자들이 수립한 예방정비계획과 공개된 정보만을 이용하여 전체 계통신뢰도를 만족시킬 뿐만 아니라 송전계통

도 고려하는 발전기 예방정비계획 수립 방법에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 발전기 예방정비계획 알고리즘

본 논문에서는 계통운영자의 발전기 예방정비계획 문제를 주-문제(master problem)와 부-문제(sub problem)로 분리하는 알고리즘을 제안하였다. 주-문제는 발전사업자의 예방정비계획을 신뢰도 기준에 맞도록 조정하는 스케줄조정 문제이며, 부-문제는 송전계통을 고려하기 위한 최적조류계산 문제이다. 본 알고리즘은 주-문제와 부-문제를 반복적으로 계산하여 모든 제약조건을 만족시키는 알고리즘이다.



<그림 1> 발전기 예방정비계획 알고리즘

주-문제는 이진정수계획법으로 정식화되는 최적화모형으로 발전사업자의 수입감소 최소화를 목적함수로 사용한 다. 제약조건으로는 각 주기별 신뢰도 기준과 발전기 보수연속기간을 가지고 있다. 각 주기별 신뢰도 기준은 부-문제가 비가능해(infeasible solution)이면 업데이트된다. 주-문제의 스케줄조정 결과로부터 발전기의 가용발전설비용량을 계산하여 부-문제로 넘겨준다.

부-문제는 선형계획법으로 정식화되는 최적조류계산 문제이다. 부-문제는 조정된 발전기 예방정비계획으로 급전 운영될 수 있는 지를 판단한다. 부-문제의 목적함수는 비용최소화를 사용한다. 각 발전기의 비용함수는 공개되는 정보가 아니므로 본 논문에서는 발전원별 단가를 이용하였다.

2.2 수학적 정식화

2.2.1 주-문제 : 스케줄조정 문제

$$\text{MINIMIZE}_{x_{i,t}} \sum_{i=1}^{N_G} Cap_i \cdot \left(\sum_{t=1}^{N_P} P_t \cdot x_{i,t} - \sum_{t=1}^{N_G} P_t \cdot Sch_{i,t} \right) \quad (\text{식1})$$

subject to

$$\sum_{i=1}^{N_G} Cap_i - \sum_{i=1}^{N_G} (Cap_i \cdot x_{i,t}) - \sum_{j=1}^{N_L} Dem_{j,t} \geq Res_t, \forall t \quad (\text{식2})$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} x_{i,t} = M_i, \forall i \quad (\text{식3})$$

$$\sum_{k=1}^{N_P - M_i + 1} (\prod_{l=k}^{M_i + k - 1} x_{i,l}) = 1, \forall i, k \text{는 정수} \quad (\text{식4})$$

$$x_{i,t} = \text{binary variable (0 or 1)} \quad (\text{식5})$$

여기서,

- i : 발전기 index ($i=1, 2, \dots, N_G$)
- j : 부하 index ($j=1, 2, \dots, N_L$)
- t : 보수 시기(주) index ($t=1, 2, \dots, N_P$)
- N_G : 총 발전기 대수
- N_P : 총 보수 주(1년=52주)
- N_L : 총 부하의 수

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

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

P_t : t번째 보수 주의 예측된 시장가격

Cap_i : i번째 발전기의 용량

$Dem_{j,t}$: t번째 보수 주의 부하 j의 예측된 수요

Res_t : t번째 보수 주의 필요 예비력(신뢰도 기준)

M_i : i번째 발전기의 보수 기간 ($M_i = \sum_{t=1}^{N_P} Sch_{i,t}$)

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

(식1)의 목적함수는 계통운용자의 예방정비계획 조정에 의한 발전사업자의 예상 수입감소분을 최소화한다는 의미이다. 발전사업자의 수입은 (판매전력량)×(시장가격)×(운전시간)이고, 예방정비를 실시함으로써 (판매전력량)×(시장가격)×(예방정비기간) 만큼의 수입이 감소되기 때문에 위의 수식이 성립한다.

(식2)의 제약조건은 계통 신뢰도를 나타낸다. 본 논문에서는 여러 가지 계통 신뢰도 중 예비력 만을 고려하였다. 첫 번째 항은 총설비용량을, 두 번째 항은 예방정비 계획 물량을 나타내며, 세 번째 항은 수요를 나타낸다. 우변상수인 신뢰도 기준은 부-문제의 수립여부에 따라 결정된다. 부-문제가 비가능해이면 제약조건을 더욱 강화시켜 해당주기의 가용발전설비용량을 증가시킨다.

(식3)의 제약조건은 발전기들의 보수 기간을 나타낸다. M_i 는 <표2>에서 해당 발전기의 예방정비를 나타내는 1의 개수이다.

(식4)의 제약조건은 발전기들의 보수 연속 기간을 나타낸다. (식3)으로는 예방정비가 두 주기에 걸쳐 계획되었다는 것을 고려하지 못하므로 발전기들의 예방정비가 연속이 아닌 해도 발생할 수 있다. 따라서, 보수 연속 기간을 고려하기 위해서는 (식4)가 필요하다.

2.2.2 부-문제 : 최적조류계산 문제

$$\text{MINIMIZE}_{g_i} \sum_{i=1}^{N_G} C_i \cdot g_i \quad (\text{식6})$$

subject to

$$\sum_{n \in I} \frac{\theta_m - \theta_n}{X_{m,n}} + L_m - g_m = 0, \forall m \quad (\text{식7})$$

$$\frac{\theta_m - \theta_n}{X_{m,n}} \leq LC_{mn}, \forall m, \forall n \in I \quad (\text{식8})$$

$$0 \leq g_i \leq Cap_i \cdot x_{i,t}, \forall i \quad (\text{식9})$$

여기서,

- n, m : 모선 index
- θ : 모선의 위상각
- L_m : m번째 모선의 부하
- I : m번째 모선에 연결된 모선의 집합
- $X_{m,n}$: 모선 m과 모선 n 사이의 선로 리액턴스
- C_i : i번째 발전기의 발전단가
- g_i : i번째 발전기의 발전량
- LC_{mn} : m모선과 n모선 사이의 선로 용량

(식6)의 목적함수는 비용최소화 목적함수이다. 본 논문에서는 발전단가를 사용하여 목적함수를 구성하였다.

(식7)의 제약조건은 각 모선에서의 전력수급방정식을 의미한다. DC 최적조류계산을 사용하였기 때문에 전력조류는 위상차에 비례하고 선로 리액턴스에 반비례한다.

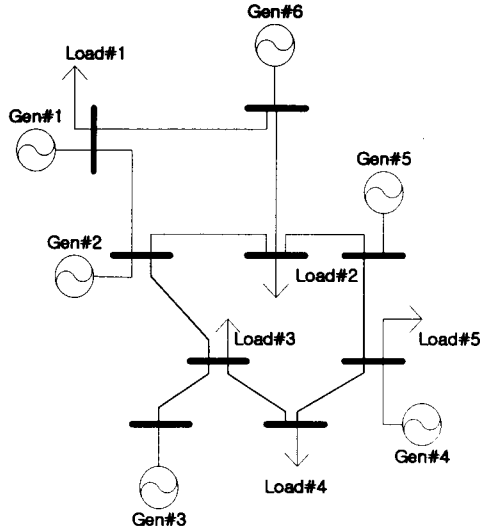
(식8)의 제약조건은 선로용량제약이다. (식9)의 제약조건의 우변상수는 주-문제에서 결정된 가용발전설비용량이다.

2.3 사례연구

본 연구는 GAMS 최적화 프로그램을 사용하여 계통운용자의 발전기 예방정비계획 알고리즘을 구현하였으며, 문제의 간략화를 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 예측된 부하 자료, 시장가격은 발전사업자, 계통운용자 모두 알고 있는 자료이다.
- 총 보수주기는 6주이며 예방정비는 주단위로 실시한다.
- 각 발전사업자는 1대의 발전기를 가지고 있으며 계통의 총 발전기는 6대이다.
- 각 주기에서의 판매전력량은 발전기 최대 용량과 동일하다.
- 각 선로의 리액턴스는 모두 동일하며, 선로용량은 300MW이다.
- 주-문제의 필요 예비력은 부-문제가 infeasible일 경우 해당 주기 총부하의 10%씩 증가한다.

<그림2>는 연구에 사용한 9모선 사례계통이다.



<그림 2> 사례연구 계통

<표1>은 각 주기별 부하자료와 시장가격이며, <표2>는 발전사업자들이 제출한 예방정비계획이다.

<표 1> 각 주기별 부하자료와 시장가격

구분	보수 시기(주)					
	1	2	3	4	5	6
Load#1	500	550	400	500	520	500
Load#2	300	300	500	390	370	550
Load#3	450	450	450	430	420	100
Load#4	300	350	400	410	390	200
Load#5	450	450	500	470	450	300
총부하 (MW)	2,000	2,100	2,250	2,200	2,150	1,650
시장가격 (원/MW)	50	49	60	67	64	62

<표 2> 발전사업자들이 제출한 예방정비계획

발전기명	용량 (MW)	단가 (원/MW)	보수 시기(주)					
			1	2	3	4	5	6
Gen#1	780	55	1	1	0	0	0	0
Gen#2	730	45	1	1	0	0	0	0
Gen#3	620	65	0	1	0	0	0	0
Gen#4	530	70	0	1	0	0	0	0
Gen#5	440	35	0	1	0	0	0	0
Gen#6	570	50	0	1	0	0	0	0

<표1>의 발전사업자들이 제출한 계획대로라면 주기1, 2에서 예비력 부족 또는 전력 수급의 불균형을 초래한다. 따라서, 주기1과 주기2에서 예방정비 계획된 발전기들의 계획안 변동이 필요한 상황이다. 또한 Gen#1, 2는 두 주기에 걸쳐 예방정비를 실시한다.

<표 3> 계통운영자가 조정한 예방정비계획

발전기명	용량 (MW)	보수 시기(주)					
		1	2	3	4	5	6
Gen#1	780	1	1	0	0	0	0
Gen#2	730	0	0	0	1	1	0
Gen#3	620	0	0	0	0	0	1
Gen#4	530	0	0	0	0	0	1
Gen#5	440	1	0	0	0	0	0
Gen#6	570	0	0	0	0	1	0

<표3>은 계통운영자가 조정한 스케줄이다. 목적함수는 47,300원으로 최소화되었으며, 각 주기의 DC-최적조류 계산은 feasible하다.

3. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획을 주-문제로 분리하는 방법을 제안하였다. 계통운영자의 계획조정으로 인한 발전사업자의 경제적 손실을 최소화시키는 스케줄 조정을 목적으로 하는 문제와 예방정비를 실시하지 않는 발전설비로 계통이 운영될 수 있는지를 평가하는 문제로 정식화하였다. 또한 경쟁시장에서는 비용과 같은 재무정보가 충분치 않기 때문에 충분히 공개된 정보만을 이용하여 우리나라 양방향 입찰시장에 적용 가능하리라 판단된다.

본 논문에서는 부-문제가 infeasible일 경우 주-문제의 신뢰도 기준을 더 강화시켜 더 많은 발전설비를 확보하도록 유도하였다. 하지만, 송전계통의 영향을 적절히 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 주-문제의 신뢰도 기준에 송전계통을 반영하는 연구가 필요하다고 판단되며 이를 위해서는 지역별 신뢰도 지수가 개발되어야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여
기초전력연구원(02-전-01) 주관으로 수행된
과제임

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shahidehpour & 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] E. L. da Silva, M. Th. Schilling & M. C. Rafael "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", Trans. IEEE, Vol 15, pp838-843, 2000.
- [5] 한석만, 신영균, 정구형, 김강원, 김발호, "경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol 53A, 8월호, 2004.
- [6] Z. A. Yamayee, "Maintenance Scheduling:Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operations Scheduling", Trans. IEEE, Vol 8, 1982.