

경쟁시장에서 발/송전설비 예방정비계획에 관한 연구

한석만, 김경민, 박중성, 김발호
홍익대학교

Generation & transmission maintenance scheduling in competitive power markets

Seok-Man Han, Kyung-Min Kim, Jung-Sung Park, Balho H. Kim
Hongik University

Abstract - In competitive electricity markets, the System Operator (SO) coordinates the overall maintenance schedules whenever the collective maintenance schedule reported to SO by Gencos & Transco in the pool does not satisfy the specified operating criteria, such as system reliability or supply adequacy. We propose a two-layer mathematical algorithm amenable to maintenance scheduling problem into master problem and sub-problem. The master problem coordinates the scheduling, and sub-problem, DC optimal power flow, checks the adequacy. The proposed algorithm was demonstrated with a case study.

1. 서론

구조개편으로 단일전력회사는 각 기능별(발전/송전/배전사업자, 계통운용자)로 분리되었으며, 각 사업자별로 예방정비를 실시한다. 하지만 전력시스템은 발전/송전/배전설비가 유기적으로 결합된 종합 시스템이기 때문에, 총괄적으로 운영하고 계통 신뢰도를 유지하는 계통운용자의 역할이 더욱 중요하다.

발전사업자는 발전설비의 예방정비계획을 자체적으로 수립한다. 하지만 더 이상 전력수급의 책임이 없기 때문에 자신들의 수익극대화를 달성하도록 예방정비계획을 수립한다. 따라서 계통운용자는 계통신뢰도를 확보하기 위한 발전설비 예방정비계획 조정이 불가피하고 또한 계획조정에 대한 타당한 근거를 발전사업자에게 제공해야한다. 송전사업자 역시 송전설비의 예방정비를 계획한다. 우리나라의 경우 특성상 송전사업자는 공기업 형태로 운영되기 때문에 송전설비의 예방정비계획 조정은 발전설비 보다 유연하다고 판단된다.

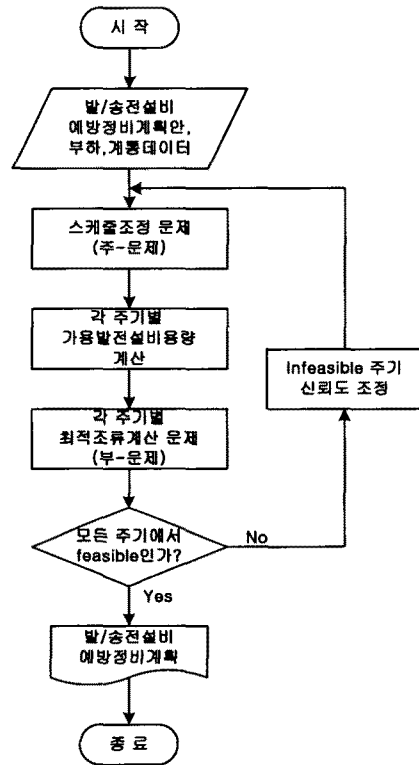
과거의 예방정비계획은 송전설비 예방정비계획을 먼저 수립하고 계통운영이 가능하도록 발전설비 예방정비계획을 확정하였다. 하지만 각 사업자의 이해관계가 첨예하게 대립되는 경쟁시장에서는 과거의 수립체계가 각 사업자에게 타당한 근거를 제시하지 못한다. 또한, 경쟁시장에서 계통운용자가 이용할 수 있는 정보는 대단히 제한적이다. 발전사업자의 비용함수, 입찰 가격 등과 같은 정보는 이익극대화를 위한 전략에 쓰이는 매우 중요한 정보이므로 계통운용자는 공개된 정보만을 이용하여야한다.

본 논문에서는 한정된 정보로 안정적 전력수급의 책임이 있는 계통운용자가 계통신뢰도를 확보하고 계통운영이 가능하도록 발/송전설비의 예방정비계획을 수립하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 본론

2.1 발/송전설비 예방정비계획 알고리즘

본 논문에서는 계통운용자의 발/송전설비 예방정비계획 문제를 주-문제(master problem)와 부-문제(sub problem)로 분리하는 알고리즘을 제안하였다. 주-문제는 발전사업자의 예방정비계획을 신뢰도 기준에 맞도록 조정하고 송전사업자의 계획을 확정하는 스케줄조정 문제이며, 부-문제는 송전계통을 고려하기 위한 최적조류계산 문제이다. 본 알고리즘은 주-문제와 부-문제를 반복적으로 계산하여 모든 제약조건을 만족시키는 알고리즘이다.



[그림 1] 발/송전설비 예방정비계획 알고리즘

주-문제는 이진정수계획법으로 정식화되는 최적화모형으로 발전사업자의 수입감소 최소화와 송전설비 예방정비확정 부분을 목적함수로 사용한다. 제약조건으로는 각 주기별 신뢰도 기준, 발전기 보수연속기간, 송전설비 예방정비 시기를 가지고 있다. 각 주기별 신뢰도 기준은 부-문제가 비가능해(infeasible solution)이면 업데이트된다. 주-문제의 스케줄조정 결과로부터 발전기의 가용발전설비용량을 계산한 값과 송전설비 예방정비계획을 부-문제로 넘겨준다.

부-문제는 선형계획법으로 정식화되는 최적조류계산 문제이다. 부-문제는 조정된 발전/송전설비 예방정비계획으로 급전운 영될 수 있는 지를 판단한다. 부-문제의 목적함수는 비용최소화를 사용한다. 각 발전기의 비용함수는 공개되는 정보가 아니므로 본 논문에서는 발전원별 단가를 이용하였다. 또한 송전설비 예방정비계획은 계통의 선로정수를 변화시키기 때문에 이를 반영하였다.

2.2 수학적 정식화

2.2.1 주-문제 : 스케줄조정 문제

$$\begin{aligned} \text{MINIMIZE } & \sum_{i=1}^{N_G} \text{Cap}_i \cdot \left(\sum_{t=1}^{N_P} P_t \cdot x_{i,t}^G - \sum_{r=1}^{N_P} P_r \cdot \text{Sch}_{i,t} \right) \quad (\text{식1}) \\ & + K \cdot \sum_{l=1}^{N_L} x_{l,t^m}^T \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_G} \text{Cap}_i \cdot x_{i,t^m}^G + \sum_{j=1}^{N_L} \text{Dem}_{j,t^m} \right) \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{i=1}^{N_G} \text{Cap}_i - \sum_{i=1}^{N_G} (\text{Cap}_i \cdot x_{i,t}^G) - \sum_{j=1}^{N_L} \text{Dem}_{j,t} \geq \text{Res}_t, \forall t \quad (\text{식2})$$

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

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

$$\sum_{l=1}^{N_L} x_{l,t^m}^T = 1, \forall l \quad (\text{식5})$$

$$x_{i,t}^G, x_{l,t^m}^T = \text{binary variable} (0 \text{ or } 1) \quad (\text{식6})$$

여기서,

i : 발전기 index ($i=1,2,\dots,N_G$)

j : 부하 index ($j=1,2,\dots,N_L$)

l : 예방정비 대상 선로 index

t : 보수 시기(주) index ($t=1,2,\dots,N_P$)

t^m : 선로 예방정비 시기

N_G : 총 발전기 대수

N_P : 총 보수 주(1년=52주)

N_L : 총 부하의 수

$x_{i,t}^G$: ISO가 수립한 예방정비계획

i 번째 발전기가 t 번째 보수 주에

예방정비 실시($x_{i,t}^G=1$), 가동($x_{i,t}^G=0$)

$\text{Sch}_{i,t}$: 발전사업자가 제출한 예방정비계획

i 번째 발전기가 t 번째 보수 주에

예방정비 실시($\text{Sch}_{i,t}=1$), 가동($\text{Sch}_{i,t}=0$)

x_{l,t^m}^T : 송전선로 예방정비계획

l 번째 선로에 t^m 번째

예방정비 실시($x_{l,t^m}^T=1$)

P_t : t 번째 보수 주의 예측된 시장가격

Cap_i : i 번째 발전기의 용량

$\text{Dem}_{j,t}$: t 번째 보수 주의 부하 j 의 예측된 수요

Res_t : t 번째 보수 주의 필요 예비력(신뢰도 기준)

M_i : i 번째 발전기의 보수 기간 ($M_i = \sum_{t=1}^{N_P} \text{Sch}_{i,t}$)

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

(식1)의 목적함수 중 첫 번째 항은 계통운영자의 예방정비 계획 조정으로 인한 발전사업자의 예상 수입감소분을 최소화한다는 의미이다. 발전사업자의 수입은 (판매전력량)×(시장가격)×(운전시간)이고, 예방정비를 실시함으로써 (판매전력량)×(시장가격)×(예방정비기간) 만큼의 수입이 감소되기 때문에 위의 수식이 성립한다. 두 번째 항은 송전선로의 예방정비계획을 확정하는 부분이다. 발전설비 예방정비용량과 부하가 가장 작은 시기에 송전선로 예방정비를 실시한다는 의미이다. 즉, 예비력이 가장 많은 시간대에 선로의 예방정비를 실시해야 급전 가능해를 얻을 수 있기 때문이다. 계수 K 는 첫 번째 항과 단위를 일치시키는 역할을 하며, 첫 번째 항과 두 번째 항의 중요도에 따라 조절할 수 있다. 본 논문에서는 0.01로 설정하였다.

(식2)의 제약조건은 계통 신뢰도를 나타낸다. 본 논문에서는 여러 가지 계통 신뢰도 중 예비력만을 고려하였다. 첫 번째 항은 총설비용량을, 두 번째 항은 예방정비계획 물량을 나타내며, 세 번째 항은 수요를 나타낸다. 우변상수인 신뢰도 기준은 부-문제의 수립여부에 따라 결정된다. 부-문제가 비가능하면 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.

(식5)의 제약조건으로 예방정비 대상 선로는 송전사업자가 제출한 가능시기 중 하나를 선정한다.

2.2.2 부-문제 : 최적조류계산 문제

$$\text{MINIMIZE } \sum_{i=1}^{N_G} C_i \cdot g_i \quad (\text{식7})$$

subject to

$$\sum_{n \in I} \frac{\theta_m - \theta_n}{X_{m,n} \cdot (1 + x_{l,t^m}^T)} + L_m - g_m = 0, \forall m \quad (\text{식8})$$

$$\frac{\theta_m - \theta_n}{X_{m,n} \cdot (1 + x_{l,t^m}^T)} \leq \frac{LC_{mn}}{1 + x_{l,t^m}^T}, \forall m, \forall n \in I \quad (\text{식9})$$

$$0 \leq g_i \leq \text{Cap}_i \cdot (1 - x_{i,t}^G), \forall i \quad (\text{식10})$$

여기서,

n, m : 모선 index

θ : 모선의 위상각

L_m : m 번째 모선의 부하

I : m 번째 모선에 연결된 모선의 집합

$X_{m,n}$: 모선 m 과 모선 n 사이의 선로 리액턴스

C_i : i 번째 발전기의 발전단가

g_i : i 번째 발전기의 발전량

LC_{mn} : m 모선과 n 모선 사이의 선로 용량

(식7)의 목적함수는 비용최소화 목적함수이다. 본 논문에서는 발전단가를 사용하여 목적함수를 구성하였다.

(식8)의 제약조건은 각 모선에서의 전력수급방정식을 의미한다. DC 최적조류계산을 사용하였기 때문에 전력조류는 위상차에 비례하고 선로 리액턴스에 반비례한다. 또한, 예방정비 대상 선로는 2회선 선로로 1회선씩 선로 예방정비를 실시하기 때문에 예방정비를 실시하는 선로의 리액턴스는 2배가 된다.

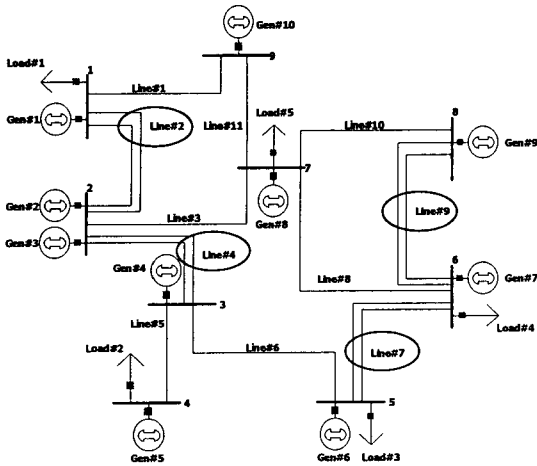
(식9)의 제약조건은 선로용량제약으로 (식8)과 유사하게 예방정비를 실시하는 선로의 용량은 1/2배가 된다. (식10)의 제약조건의 우변상수는 주-문제에서 결정된 가용발전설비용량이다.

2.3 사례연구

본 연구는 GAMS 최적화 프로그램을 사용하여 계통운영자의 발/송전설비 예방정비계획 알고리즘을 구현하였으며, 문제의 간략화를 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 예측된 부하 자료, 시장가격은 발전사업자, 계통운영자 모두 알고 있는 자료이다.
- 총 보수주기는 12주이며 발전설비 예방정비는 주단위로 실시한다.
- 각 발전사업자는 1대의 발전기를 가지고 있으며 계통의 총 발전기는 10대이다.
- 송전사업자는 예방정비 대상 선로와 정비 가능기간을 계통 운영자에게 제출한다.
- 송전설비 예방정비는 1회선씩 1/2주 단위로 실시한다.
- 각 주기에서의 판매전력량은 발전기 최대 용량과 동일하다.
- 각 선로의 리액턴스는 모두 동일하며, 선로용량은 270MW이다.
- 주-문제의 필요 예비력은 부-문제가 infeasible일 경우 해당 주기 총부하의 10%씩 증가한다.

[그림2]는 연구에 사용한 9모선 사례계통이다. 선로 line#2,4,7,9는 예방정비 대상 선로이며 모두 2회선이다.



[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	7	8	9	10	11	12
Load#1	400	420	440	460	480	500	540	550	450	430	410	390
Load#2	300	300	320	370	410	450	430	400	380	340	320	300
Load#3	450	460	440	420	360	370	400	350	390	430	450	470
Load#4	300	350	400	410	390	200	350	380	400	410	390	350
Load#5	380	370	390	400	420	430	450	430	370	390	420	400
시장가격 (원/MW)	52	51	50	51	53	55	56	55	54	53	52	51

[표 2] 발전사업자들이 제출한 발전설비 예방정비계획

발전기명	용량 (MW)	단가 (원/ MW)	보수 시기(주)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Gen#1	480	55	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#2	330	45	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#3	320	65	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#4	430	70	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#5	440	35	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#6	570	50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#7	820	65	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#8	150	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#9	840	35	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#10	150	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

[표2]의 발전사업자들이 제출한 계획대로라면 주기2,3에서 예비력 부족 또는 전력 수급의 불균형을 초래한다. 따라서, 주기2,3에서 예방정비 계획된 발전기들의 계획안 변동이 필요한 상황이다. 또한 Gen#3,4,5,7,9는 두 주기에 걸쳐 예방정비를 실시한다.

[표 3] 송전사업자가 제출한 예방정비 대상 선로 및 시기

구분	보수 시기(주)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Line#2	-	-	-									
Line#4												
Line#7												
Line#9												

[표3]은 송전사업자가 제출한 예방정비 대상 선로 및 가능 시기이다.

[표 4] 계통운영자가 조정할 발전설비 예방정비계획

발전기명	용량 (MW)	보수 시기(주)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Gen#1	480	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#2	330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Gen#3	320	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#4	430	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Gen#5	440	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#6	570	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#7	820	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#8	150	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#9	840	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gen#10	150	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

[표 5] 계통운영자가 수립할 송전설비 예방정비계획

구분	보수 시기(주)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Line#2	1	0	0										
Line#4				0	0	1							
Line#7								0	0	1			
Line#9											1	0	0

[표5]와 [표6]은 계통운영자가 수립할 발/송전설비 예방정비계획이다. [표5]의 주기 1에서는 1/2주기동안 Line#2의 1회선을 예방정비하고 나머지 1/2주기에 나머지 회선을 예방정비한다. 또한 모든 주기에서의 DC-최적조류계산은 feasible하여 급전운영이 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발/송전설비 예방정비계획을 주-문제와 부-문제로 분리하는 방법을 제안하였다. 계통운영자의 계획조정으로 인한 발전사업자의 경제적 손실을 최소화시키는 스케줄 조정을 목적으로 하는 문제와 예방정비를 실시하지 않는 발/송전설비로 계통이 운영될 수 있는 지를 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(과제번호: 01-중-05)
주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shahidehpour & M. Marwali, "Maintenance Scheduling in Restructured Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] D. Chattopadhyay, "A practical maintenance scheduling program : mathematical model and case study", Trans. IEEE, Vol 13, pp. 1475-1480, 1998
- [3] E. L. da Silva, M. Th. Schilling & M. C. Rafael "Generation Maintenance Scheduling Considering Transmission Constraints", Trans. IEEE, Vol 15, pp838-843, 2000.
- [4] 한석만, 신영균, 정구형, 김강원, 김발호, "경쟁적 전력시장에서 계통운영자의 발전기 예방정비계획에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol 53A, 8월호, 2004.