

전력거래를 위한 계통운전 상태에서의 모선가격산정 및 분해알고리즘의 개발에 관한 연구

김용하*, 이범**, 최상규***, 이재걸*, 연준희*, 황봉수*
 인천대학교*, 여수대학교**, 안양과학기술대학***

A Study on the Development of Decomposition Algorithm and calculation of Nodal Price on Power System Operation

Kim, Y.H.* · Lee, Buhm** · Choi, S.K.*** · Lee, J.G.* · Yeon, J.H.* · Hwang B.S*
 University of Incheon*, Yosu National Univ**, Anyang Technical College***

Abstract - This Paper provides the Effect of Nodal Price and decomposed Element in Power System Operation. This Effect can be applied in the Estimation of Electric rates because the Electric market will be Competitive Market. The proposed concept is applied to 6bus test system and proved importance.

식(1)~(5)의 constrained optimization 문제는 식(6)와 같은 라그랑지안 함수로 표현하여 unconstrained optimization 문제로 변환할 수 있다.

1. 서 론

현재의 전력시장이 시행 예고되고 있는 규제가 완화된 양방향 입찰방식(Two-Way Bidding Pool: TWBP)으로 변화하게 되면 현재 사용되고 있는 총괄비용법을 이용한 전력가격산정방법대신에 시장의 투명성과 공정성의 요구에 따라서 현물가격산정법인 모선가격산정의 사용이 불가피해질 것으로 전망되어진다. [1] 또한 자유경쟁입찰방식의 시장원리에 의해서 최적상태의 계통운전이 불가능하게 될 것으로 예상된다. 이러한 요구에 따라서 모선가격 산정과 다양한 제약에 대한 모선가격분해의 연구가 활발히 이루어지고 있으며 본 연구에서는 이미 발표된바 있는 현재 계통상태의 잠재가격(Shadow price)을 이용한 모선가격산정과 음함수 이론(Implicit theory)을 이용한 모선가격분해 알고리즘[2]을 적용하여 최적상태가 아닌 다양한 계통의 운전상태에 대한 모선가격정보를 도출하였다. 그리고 계통상태에 따라서 제약조건이 시스템 비용에 미치는 영향도 평가하기 위하여 다양한 계통상태에 대한 분석을 통해 본 연구의 유용성을 증명하였다. 본 연구를 위해서 6모선계통에 적용하였다.

$$L = \sum_{i \in \Omega_D} f_i(P_{Gi}) + \sum_{i \in \Omega_B} [\lambda_{Pi}(P_{Di} + \sum_{l=1}^n P_{l_{-}} - P_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\lambda_{Qi}(Q_{Di} + \sum_{l=1}^n Q_{l_{-}} - Q_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Pi,i}(P_{Gi}^{min} - P_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Qi,i}(Q_{Gi}^{min} - Q_{Gi})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Vi,i}(Q_{Gi} - Q_{Gi}^{max})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Vi,i}(V_i^{min} - V_i)] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Vi,i}(V_i - V_i^{max})] + \sum_{i \in \Omega_D} [\rho_{Ti,i}(T_i - T_i^{max})] \quad (6)$$

단, $\lambda_{Pi}, \lambda_{Qi}$: i모선 수급조건과 관련된 잠재가격
 $\rho_{Pi,i}, \rho_{Pi,l}, \rho_{Qi,i}, \rho_{Qi,l}$: 발전기모선 유·무효출력 상·하한치와 관련된 잠재가격
 $\rho_{Vi,i}, \rho_{Vi,l}$: i모선 전압 상·하한치와 관련된 잠재가격
 $\rho_{Ti,i}$: i선로 피상조류 상한치와 관련된 잠재가격

라그랑지안 함수의 최적조건을 풀어서 잠재가격을 산정할 수 있는데 이때 계통의 상태변수 이외의 변수를 고려하게 되면 아래의 최적조건1의 변수의 수가 방정식의 수보다 많아져 연립방정식을 풀 수 없게 된다. 이를 위해서 발전기 출력과 부하전력을 계통의 상태변수로 표현할 수 있는 주입전력으로 표현하였다. [2] 이때 최적조건은 다음의 식(7)~(10)과 같이 구성된다.

2. 모선 증분비용 산정 및 분해

현재 계통상태에서 모선증분비용은 발전비용 최소화를 목적으로 하는 최적화문제에 현재계통의 상태를 적용함으로써 구해될 수 있다. 최적화문제의 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Min } \sum_{i \in \Omega_G} f_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

s.t.

$$P_{Di} + \sum_{l=1}^n P_{l_{-}} - P_{Gi} = 0, Q_{Di} + \sum_{l=1}^n Q_{l_{-}} - Q_{Gi} = 0 \quad (2)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (3)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (4)$$

$$T_i \leq T_i^{max} \quad (5)$$

단, P_{Gi}, Q_{Gi} : i모선의 발전기 유·무효출력 [MW]

P_{Di}, Q_{Di} : i모선의 부하 유·무효전력 [MW]

$P_{l_{-}}, Q_{l_{-}}$: i모선과 연결된 선로유·무효조류 [MW]

V_i : i모선의 전압 [v]

T_i : i선로의 피상조류

조건 1

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = -\frac{\partial f(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial X_i} + \lambda_{Pi} \frac{\partial P_{Di}}{\partial X_i} + \lambda_{Qi} \frac{\partial Q_{Di}}{\partial X_i} - \rho_{Pi,i} \frac{\partial P_{Gi}}{\partial X_i} + \rho_{Pi,l} \frac{\partial P_{l_{-}}}{\partial X_i} - \rho_{Qi,i} \frac{\partial Q_{Gi}}{\partial X_i} + \rho_{Qi,l} \frac{\partial Q_{l_{-}}}{\partial X_i} - \rho_{Vi,i} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{Vi,l} \frac{\partial V_l}{\partial X_i} + \rho_{Ti,i} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \quad (7)$$

조건 2

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{Pi}} = P_i + \sum_{l=1}^n P_{l_{-}} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda_{Qi}} = Q_i + \sum_{l=1}^n Q_{l_{-}} = 0 \quad (8)$$

조건 3

$$\begin{aligned} P_{Gi}^{min} - P_{Gi} &\leq 0 & P_i - P_{Gi}^{max} &\leq 0 \\ Q_{Gi}^{min} - Q_{Gi} &\leq 0 & Q_i - Q_{Gi}^{max} &\leq 0 \\ V_i^{min} - V_i &\leq 0 & V_i - V_i^{max} &\leq 0 \\ T_i - T_i^{max} &\leq 0 & & \end{aligned} \quad (9)$$

조건 4

$$\begin{aligned} \rho_{Pi,i}(P_{Gi}^{min} - P_{Gi}) &= 0 & \rho_{Pi,i} &\geq 0 & \rho_{Pi,l}(P_i - P_{Gi}^{max}) &= 0 & \rho_{Pi,l} &\geq 0 \\ \rho_{Qi,i}(Q_{Gi}^{min} - Q_{Gi}) &= 0 & \rho_{Qi,i} &\geq 0 & \rho_{Qi,l}(Q_i - Q_{Gi}^{max}) &= 0 & \rho_{Qi,l} &\geq 0 \\ \rho_{Vi,i}(V_i^{min} - V_i) &= 0 & \rho_{Vi,i} &\geq 0 & \rho_{Vi,l}(V_i - V_i^{max}) &= 0 & \rho_{Vi,l} &\geq 0 \\ \rho_{Ti,i}(T_i - T_i^{max}) &= 0 & \rho_{Ti,i} &\geq 0 & & & & \end{aligned} \quad (10)$$

단, P_i, Q_i : 각 모선의 주입전력 $P_i = P_{Gi} - P_{Di}, Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$

위의 최적조건에서 발전기모선이나 부하모선을 비롯해 부등호 제약조건 모두 상태변수로 구성되었으므로 부등호 제약조건이 Binding되었는지를 판별하여 Binding되어있는 경우만 식(7)에 적용하고 Nonbinding 경우에 대해서는 "0"으로 처리하여 식(11)

과 같이 연립방정식의 형태로 구성하였다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial X_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial X_1} & \frac{\partial P_1}{\partial X_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial X_2} & \frac{\partial V_1}{\partial X_1} & \frac{\partial T_1}{\partial X_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial X_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_i} & \frac{\partial P_i}{\partial X_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial X_j} & \frac{\partial V_i}{\partial X_i} & \frac{\partial T_i}{\partial X_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial X_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial X_n} & \frac{\partial P_n}{\partial X_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial X_n} & \frac{\partial V_n}{\partial X_n} & \frac{\partial T_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{P_{Dk}} \\ \lambda_{Q_{Dk}} \\ \vdots \\ \rho_{P_{k,i}} \\ \rho_{Q_{k,i}} \\ \vdots \\ \rho_{T,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\frac{\partial f(P,Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

단, $\bar{\rho}_i$ 하한치에 Binding된 경우, $\bar{\rho}_n$ 상한치에 Binding된 경우

위의 연립방정식에서 잠재가격을 제외한 항은 계통의 상태를 이용하여 계산할 수 있는 상수이므로 연립방정식을 풀으로써 잠재가격을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 잠재가격 정보를 이용하여 발전기모선과 부하모선에 대한 모선증분비용을 산정하면 식(12)와 식(13)이 된다.

· 발전기 모선인 경우

$$\pi_{k,i} = \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial f(P,Q)}{\partial P_i} - \bar{\rho}_{P_{k,i}} + \bar{\rho}_{P_{k,i}} \quad (12)$$

$$\pi_{k,i} = \frac{\partial L}{\partial Q_i} = -\bar{\rho}_{Q_{k,i}} + \bar{\rho}_{Q_{k,i}}$$

· 부하 모선인 경우

$$\pi_{k,i} = \lambda_{P_{k,i}} \quad (13)$$

$$\pi_{k,i} = \lambda_{Q_{k,i}}$$

단, $\bar{\rho}$: Binding된 부등호제약조건의 잠재가격

위의 식(12),(13)에서 산정한 모선가격을 계통에서 관심을 가지는 제약에 대해서 분해하기 위해서 음함수 이론을 적용하였고 수급조건과 같이 시장에서 거래될 수 없는 제약인 nontradable constraints과 시장가격을 가지는 제약인 tradable constraints로 분류하였다. 이와 같이 두 종류의 제약으로 분류하여 최적조건 식(7)~(10)을 표현하면 식(14)~(15)이 된다.

$$\frac{\partial L(X,\alpha,P,Q)}{\partial X_i} = \frac{\partial f(P,Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial X_i} + U(X,\alpha,P,Q) = 0 \quad (14)$$

$$M(X,P,Q) = 0 \quad (15)$$

단, M : nontradable constraints
 N : tradable constraints
 α : nontradable constraints와 관련된 라그랑지안 승수

이에 따라서 라그랑지안 함수는 다음과 같이 재구성된다.
 $L(X(P,Q),\alpha(P,Q),P,Q) = \mathcal{L}(X(P,Q),P,Q) + \alpha(P,Q)M(P,Q,P,Q) + \beta N(X(P,Q),P,Q) \quad (16)$

재구성된 라그랑지안 함수를 이용하여 모선증분비용을 구하면 식(17)이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(X(P,Q),\alpha(P,Q),P,Q)}{\partial P_i} &= \left(\frac{\partial f(X,P,Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial \mathcal{L}(X,P,Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \\ &+ \left(\frac{\partial \alpha(P,Q)}{\partial P_i} M(X(P,Q),P,Q) + \alpha(P,Q) \left(\frac{\partial M(X,P,Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} \right) \right) \\ &+ \left(\frac{\partial M(X,P,Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \beta \left(\frac{\partial N(X,P,Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial N(X,P,Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

위의 식(17)에서 직접계산되지 않는 $\frac{\partial X}{\partial P_i}$ 를 식(18)과 같이 음함수 이론에 의해서 가정 할 수 있으며 선택함수를 통해서 식(19)와 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} + \frac{\partial U}{\partial X} & \frac{\partial U}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial M}{\partial X} & 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} f_{xx} + U_x & U_\alpha \\ M_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial P_i} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial P_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{xP_i} - U_{P_i} \\ -M_{P_i} \end{bmatrix} \quad (19)$$

식(18),(19)를 이용하여 식(17)을 정리하면 다음의 식

(20)과 같다.

$$\frac{\partial L(X(P,Q),\alpha(P,Q),P,Q)}{\partial P_i} = \left(\frac{\partial f(X,P,Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial \mathcal{L}(X,P,Q)}{\partial P_i} \right) + \beta \left(\frac{\partial M(X,P,Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial N(X,P,Q)}{\partial P_i} \right) \quad (20)$$

계통에서 관심을 가지는 제약 중 거래가 불가능한 제약(f_j 의 발전기 비용에 대한 분해요소)과 거래가 가능한 제약에 대한 분해요소들의 합으로 모선가격은 구성된다. 식(21)의 우변의 첫째 항은 nontradable constraints이고 두 번째 항은 tradable constraints으로 각 요소에 대한 관심량을 구할 수 있다.

$$\pi_{k,i} = \sum_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial X} \right) \left(\frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \sum_j \beta_j \left(\frac{\partial N_j}{\partial X} \right) \left(\frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left(\frac{\partial N_j}{\partial P_i} \right) \quad (21)$$

3. 사례 연구

본 사례연구는 계통이 최적상태가 아닌 다양한 상태로 운전되는 경우에 대한 모선가격을 산정하고 분해하여 계통이 운전되면서 상태에 따라서 각 제약이 시스템 비용에 미치는 영향을 평가하고 그 추이를 분석함으로써 실제 전력가격산정에 있어서 유용한 정보를 제공할 수 있는 정보를 도출하였다. 본 사례연구를 위해서 총 부하가 285[MW]인 그림 1과 같은 6모선계통[5]을 사용했다.

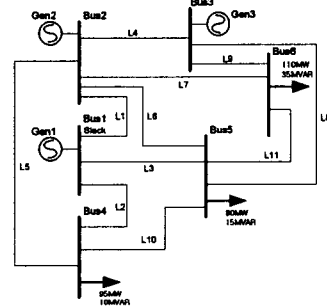


그림 1. 6모선계통

그리고 계통에서 고려하고자 하는 제약조건은 다음의 표 1~3과 같다.

표 1. 계통의 발전기 출력제약조건

	gen1	gen2	gen3
유효출력 [MW]	200.0	130.0	180.0
상한/하한	50.00	37.50	45.00

표 2. 계통의 부하모선 전압제약조건

	bus4	bus5	bus6
부하모선전압 [pu]	1.045/0.955	1.045/0.955	1.045/0.955
상한/하한			

표 3. 계통의 선로피상조류제약조건

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
선로피상조류 상한 [MVA]	130	150	140	120	140	120	130	120	160	120	120

위에서 주어진 시스템에 대해서 최적조류계산을 시행하여 계통의 최적운전상태를 계산한 결과는 다음과 같다. 여기에서 총 발전비용은 5066.18[₩]이다.

표 4. 계통의 최적조류계산 결과

	gen1	gen2	gen3
발전기출력	92.479	130.000	70.395
	bus4	bus5	bus6
부하모선전압	.9690	.9550	.9550

위 최적조류계산의 결과인 계통의 상태를 이용하여 산정

된 모선 가격과 제약에 대한 분해 결과는 다음과 같다.

표 5. 계통의 최적상태에 대한 모선가격과 분해 결과

모선번호	모선가격	발전기 출력과 관련된 비용			Binding된 제약과 관련된 비용		
		gen1	gen2	gen3	bus5 voltage	bus6 voltage	gen2 realpower
1	11.674	11.52910	.09703	.03493	.00027	.00092	.01656
2	10.349	.18236	10.15539	.08784	-.01730	-.01820	1.73283
3	10.844	.05235	.07005	10.68287	.01319	.01300	.01195
4	11.268	5.71277	8.87363	-2.90739	-.33681	-.35817	1.51413
5	11.434	3.94025	5.01100	2.37288	-.24981	-.16293	.85504
6	11.256	.87521	-1.34601	10.43197	.34901	.31600	-.22967

위의 표 5는 계통이 최적 상태로 운전될 때의 모선가격과 제약에 대한 비용에 대해서 표시하였다. 본 연구에서는 계통의 다양한 상태에 따라서 모선 가격의 변화를 살펴보기 위해서 slack모선을 제외한 2번 모선과 3번 모선의 발전기 유효전력을 표 6과 같이 변화시켜 가면서 모선가격의 변화를 살펴보았다.

표 6. 발전기 유효전력의 변화 단위: [MW]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
G2	122	123	124	125	126	127	128	129	130	130	130	130	130	130
G3	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65

위의 표 6과 같은 발전기별 출력과 관련된 비용의 변화는 다음의 그림 2~그림 4와 같다.

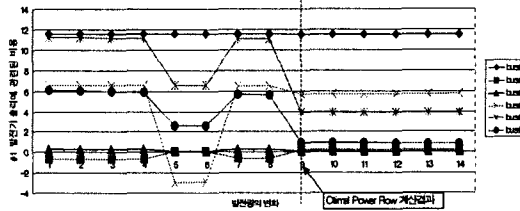


그림 2. 1번 모선의 발전기 출력과 관련된 비용의 변화

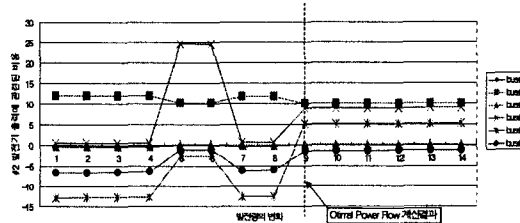


그림 3. 2번 모선의 발전기 출력과 관련된 비용의 변화

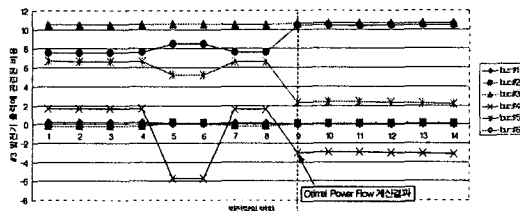


그림 4. 3번 모선의 발전기 출력과 관련된 비용의 변화

발전기 출력의 변화에 따라서 모선전압제약이 Binding되어 있는 부하모선의 전압제약의 비용변화는 다음 그림 5~6과 같이 변화하였다.

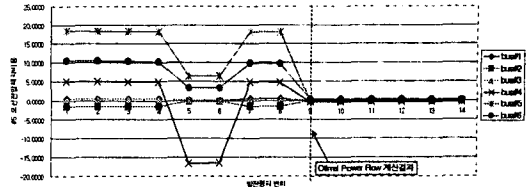


그림 5. 5번 모선의 전압제약과 관련된 비용의 변화

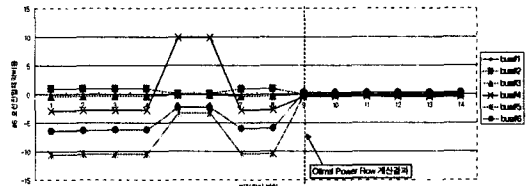


그림 6. 6번 모선의 전압제약과 관련된 비용의 변화

발전기 출력의 변화에 따라서 2번 발전기의 출력이 상한치에 Binding되어 발전기 유효출력 제약의 비용이 그림 6과 같이 발생되었다.

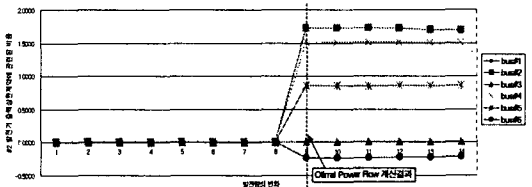


그림 7. 2번 발전기의 출력상한제약과 관련된 비용의 변화

3. 결 론

모선가격은 계통의 상태가 변화함에 따라서 급격하게 변화할 수 있다. 본 사례연구에서 계통이 최적상태근처에서 미소하게 변화하였을 때 2번 모선의 발전기 유효출력 상한치 제약이 해소되면서 다른 제약들에 대한 모선가격이 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 계통의 상태에 따라서 모선가격을 산정하는 것은 계통에 정확한 경제적 신호를 제공하는데 필수적임을 입증하고 있는 것이다. 계통은 항상 최적상태로 운전되어 질 수 없기 때문에 계통의 최적 상태에 대한 모선가격은 실제적인 계통운전을 정확히 반영할 수 없다는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있는 알고리즘을 이용하여 최적이 아닌 다양한 계통의 상태에 대한 모선가격을 산정하고 계통의 상태를 이용한 모선가격 산정 및 분해의 중요성을 입증하였다. 그리고 이후의 연구에서 실제적으로 전력거래에 모선가격의 분해요소를 적용시키는 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

"본 연구는 한국과학재단 지정 동북아전자물류 연구센터의 지원으로 수행되었음"

(참 고 문 헌)

- [1] Luonan Chen, Suzuki, Hideki Wachi, Tsunehisa, Shimura, Yukihiko "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Feb2002, Vol. 17 Issue 1, p41, 9p
- [2] 김용하, 이범, 최상규, 문혁기, 이재걸, "계통운전상태에서의 모선중분비용 산정 및 분해에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술부문의 추계학술대회 논문집, 2002.11.15-16
- [3] Steven Stoft, "Power System Economics", JOHN WILEY & SON, 2002
- [4] 한국전력, "전력시장 경쟁도입을 위한 기초연구", 1999.8
- [5] Allen J. Wood, "Power Generation, Operation and Control", JOHN WILEY & SON, INC., 1996