

손실 및 혼잡비용의 지역별 산정을 위한 모션한계가격의 분해에 관한 연구

이승렬* 김상암* 정민화* 이병준* 차준민**
 *고려대학교 **대전대학교

A Study on the Decomposition of Nodal Price
 for the Zonal Evaluation of System Loss & Congestion Cost

S.R. Lee*, S.A. Kim*, M.H. Jeong*, B. Lee* J.M. Cha**
 *Korea University **Daejin University

Abstract - This paper presents the detailed derivation of optimal nodal price for active power to regionally evaluate system loss and congestion cost. The method is to decompose them into different components corresponding to system loss, transmission congestion, voltage constraint, and so on. The decomposed information for nodal price can be used to provide economic signals for generation or transmission investment as well as to improve the efficient usage of power grid and congestion management. The result of case study on IEEE 30 bus system is reported to illustrate the proposed method.

이다[3][4].

본 연구에서는 모션가격을 계통손실, 송전혼잡, 전압 제약과 같은 여러 가지의 계통제약에 관계된 부분으로 분해함으로써 계통손실과 혼잡의 정도 등에 관련된 정보를 가격신호로 보이는 것에 가장 큰 목적을 둔다. 모션가격의 분해요소들은 전력송전을 효과적으로 하고 혼잡 처리 방안을 향상시키는데 사용될 수 있을 뿐만 아니라 발전 및 송전 부문의 투자에 경제적 신호를 제공하는데 사용될 수 있으므로 매우 중요하다. 목적함수로서 발전 비용함수의 최소화를 이용하였으며, 이를 풀기 위한 최적조류계산 Tool로 PSS/E 2.6의 OPF를 사용하였다. 여기에서 나온 결과를 이용하여 모션가격을 분해하는 프로그램을 개발하였으며 그 결과를 IEEE 30모션 계통에 적용하여 본 연구의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

2. 모션한계가격 분해 이론

최근, 우리 나라는 독점적인 전력산업에 경쟁을 도입하여 구조개편을 추진 중에 있으며 이에 따라 여러 가지 문제들이 대두되고 있는데, 그 중에 하나가 전력가격산정문제이다.

전력가격 산정이론은 크게 총괄비용배분법과 한계비용법으로 분류된다[1]. 총괄비용배분법은 기존의 독점적인 전력산업경제에서 많이 사용하는 방법으로 소요된 총비용을 생산된 총전력량에 따라서 배분하는 방법이며 이 방법에서는 모든 소비자에게 전력요금을 균등하게 부과하므로 투자비용의 회수가 보장되는 장점이 있지만, 경제적 신호를 적절하게 반영할 수 없다는 단점도 있다. 반면에 한계비용법은 전력계통의 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)[2]을 기반으로 한 방법으로 선로조류제약, 전압상하한제약, 발전량제약 등의 계통제약과 함께 경제성을 고려해서 각각의 모션에서 전력가격을 산정할 수 있기 때문에 규제완화 이후의 전력시장에 적합한 방법으로 거론되고 있다. 그 중에서도 특히 단기한계비용을 잘 반영하는 모션한계가격 산정법이 중요한 현물가격 산정법으로 생각되고 있다.

모션한계가격은 보통 최적조류계산(OPF)의 결과라 할 수 있는 라그랑지승수(Lagrangian multiplier)로서 표현된다. 라그랑지 승수가 선로조류제약(송전혼잡), 전압제약과 같은 제약의 잠재가격으로서 계통의 정보를 반영하기는 하지만, 여러 가지 계통제약이 모션한계가격에 얼마나 영향을 주는지에 대해서는 명확하지 않다. 이를 해결하기 위해서 최근 모션가격이 선로조류제약, 발전량제약, 보조서비스 등과 같은 계통제약요소들에 의해서 어느 정도의 영향을 받는지에 대한 연구가 이루어지고

1980년대 이후로 많은 현물가격산정방법이 제안되어 왔으며, 이 중에서 OPF를 기반으로 한 모션가격 산정법이 중요하게 생각되고 있다. 그 이유는 OPF가 전력계통의 경제성과 안전도를 동시에 고려할 수 있을 뿐만 아니라 유·무효전력의 잠재비용을 OPF의 조류방정식에 따른 라그랑지 승수에서 바로 구할 수 있기 때문이다. 이에 대한 연구는 MIT공대의 Schweppe 등에 의해 실시된 바 있으며, 오늘날 대부분의 한계비용 관련 요금제도는 이들의 연구결과에 그 바탕을 두고 있다. 본 연구에서는 한계비용법인 모션가격산정법에 기초하여 결정된 모션가격을 선로손실·전압제약·선로조류제약에 관련된 부분으로 분해한다.

$$\begin{aligned} & \text{모션가격} (\lambda_{pi}) \\ & = \text{기준모션의 모션한계가격} (\text{Cost}_{\text{slack}} = \lambda_{ps}) \\ & + \text{유효전력손실 관련 가격} (\text{Cost}_{\text{ploss}} = - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \lambda_{ps}) \\ & + \text{무효전력손실 관련 가격} (\text{Cost}_{\text{qloss}} = - \frac{\partial Q_L}{\partial P_i} \lambda_{qs}) \\ & + \text{혼잡비용} (\text{Cost}_{\text{congestion}} = - \sum_{j \neq i} (\pi_{lj} + \pi_{uj}) \frac{\partial P_{lj}}{\partial P_i}) \\ & + \text{전압제약 관련 가격} (\text{Cost}_{\text{voltage}} = - \sum_{j \neq s} (\pi_{lj} + \pi_{uj}) \frac{\partial V_L}{\partial P_i}) \end{aligned}$$

$\text{Cost}_{\text{slack}}$ 은 기준(slack)모션의 모션한계가격으로서 OPF의 결과에서 얻을 수 있는 라그랑지 승수이다. 이것은 슬랙모션에서의 증분 연료비에 해당한다. 이 때 슬

랙모션에서는 발전기의 상하한 제약에 걸리지 않는다고 가정한다. $Cost_{ploss}$ 는 유효전력손실과 관련된 가격으로 기준모선과의 손실가격 차이를 나타낸다. 이 값이 양수(+)이면 그 모선은 기준모선에 비해 주입전력의 변화에 따른 총손실을 더욱 증가시키는 것을 뜻하며, 음수(-)이면 기준모선과 비교했을 때 총손실을 감소시키는 모선임을 나타낸다. $Cost_{gloss}$ 는 무효전력손실과 관련된 가격으로서 $Cost_{ploss}$ 와 유사한 의미를 지닌다. $Cost_{congestion}$ 은 선로조류제약에 관련된 가격으로서 각 모션에서의 혼잡비용을 나타내고, 이 값이 양수(+)이면 선로혼잡을 증가시키는 모션이며, 음수(-)이면 선로혼잡을 해소시키는 모션을 나타낸다. 또한 그 절대값이 크면 클수록 혼잡에 미치는 영향이 크다. $Cost_{voltage}$ 는 전압에 관련된 가격으로서 전압이 모션가격에 미치는 영향을 내포한다.

3. 모션한계가격 분해의 정식화

3.1 최적조류계산(Optimal Power Flow)

일반적으로 최적조류계산(OPF) 문제는 다음과 같이 발전기 연료비의 최소화를 목적으로 하는 목적함수 식(1)과 전력조류방정식의 등식제약 및 각종 운전조건의 부등식제약으로 구성되는 식(3)~식(7)로 표현하여 정식화할 수 있다.

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^m (aP_{gi}^2 + bP_{gi} + c) \quad (1)$$

$$\text{st. } g_{p_i} = P_{gi} - P_{di} - P_i = 0 \quad (2)$$

$$g_{q_i} = Q_{gi} - Q_{di} - Q_i = 0 \quad (3)$$

$$P_{gi_{min}} \leq P_{gi} \leq P_{gi_{max}} \quad (4)$$

$$Q_{gi_{min}} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi_{max}} \quad (5)$$

$$V_{i_{min}} \leq V_i \leq V_{i_{max}} \quad (6)$$

$$P_{Fi_{min}} \leq P_{Fi} \leq P_{Fi_{max}} \quad (7)$$

여기서, 식(2),(3)의 P_i , Q_i 는 주입전력, P_{gi} , Q_{gi} 는 발전기의 유효·무효전력 출력, P_{di} , Q_{di} 는 부하의 유효·무효전력 수요량을 나타낸다. 식(4)~식(7)은 부등호 제약으로, 식(4)는 발전기의 유효전력출력의 상하한제약, 식(5)는 무효전력출력의 상하한제약, 식(6)은 전압 상하한제약, 식(7)은 선로조류제약을 나타낸다. 본 연구에서는 PSS/E와 동일한 OPF 알고리즘으로 정식화하기 위해서 내점법(Interior Point Method)을 이용한다. 부등호제약을 등호제약으로 변환하기 위해서 슬랙변수 s 를 도입하고, 로그배리어함수(logarithmic barrier function)를 라그랑지 함수에 포함시켜서 정식화하면 식(8)과 같다. 모든 OPF 알고리즘이 슬랙변수의 도입을 필요로 하는 것은 아니지만 내점법(Interior Point Method)에서는 필수적이다. 제약의 라그랑지 승수는 binding된 각각의 제약에서의 단위변화에 대한 비용변화를 추정하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } L = & \sum_{i=1}^m f_{p_i}(P_{gi}) - \sum_{i=1}^m \lambda_{p_i} g_{p_i} - \sum_{i=1}^m \lambda_{q_i} g_{q_i} \\ & + \sum_{i=1}^m \pi_{lp_i}(P_{gi} - s_{lp_i} - P_{gi_{max}}) + \sum_{i=1}^m \pi_{up_i}(P_{gi} + s_{up_i} - P_{gi_{min}}) \\ & + \sum_{i=1}^m \pi_{lq_i}(Q_{gi} - s_{lq_i} - Q_{gi_{max}}) + \sum_{i=1}^m \pi_{uq_i}(Q_{gi} + s_{uq_i} - Q_{gi_{min}}) \\ & + \sum_{i=1}^m \pi_{li}(P_{Fi} - s_{Fi} - P_{Fi_{max}}) + \sum_{i=1}^m \pi_{ui}(P_{Fi} + s_{Fi} - P_{Fi_{min}}) \\ & + \sum_{i=1}^m \pi_{lv_i}(V_i - s_{lv_i} - V_{i_{max}}) + \sum_{i=1}^m \pi_{uv_i}(V_i + s_{uv_i} - V_{i_{min}}) \\ & - \mu \left(\sum_{i=1}^m \ln s_{ui} + \sum_{i=1}^m \ln s_{li} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

3.2 모션한계가격 산정법(Nodal Pricing)

최적조건에서 식(8)의 라그랑지함수를 주입전력 P_i ,와 Q_i 로 각각 편미분해서 현물가격을 구하면 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_i^p = \left. \frac{\partial L}{\partial P_i} \right|_s = \lambda_{pi} \quad (9)$$

$$\rho_i^q = \left. \frac{\partial L}{\partial Q_i} \right|_s = \lambda_{qi} \quad (10)$$

여기에서 \cdot 는 최적점을 나타낸다.

3.3 손실 및 혼잡비용을 고려한 모션한계가격 분해

각 모션에서의 유효전력에 대한 전력방정식을 다시 전력수급방정식으로 쓰면, 다음 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_L = \sum_{i \neq s} P_i + P_s \quad (11)$$

여기서, s 는 슬랙모션, L 은 손실(loss)을 나타낸다.

한편, 정식화를 위해 상태변수, 라그랑지 승수, 전력방정식 등을 벡터 X , λ , g 로 표현하면 다음 식(12)~(14)과 같이 정의할 수 있다(단, $i=1, \dots, n, i \neq s$ 이다).

$$X = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n) \quad (12)$$

$$\lambda = (\lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}, \dots, \lambda_{p_i}, \dots, \lambda_{p_n}, \lambda_{q_1}, \lambda_{q_2}, \dots, \lambda_{q_i}, \dots, \lambda_{q_n}) \quad (13)$$

$$g = (g_{p_1}, g_{p_2}, \dots, g_{p_i}, \dots, g_{p_n}, g_{q_1}, g_{q_2}, \dots, g_{q_i}, \dots, g_{q_n}) \quad (14)$$

식(11)을 X 에 대해서 미분해서 정리하면 식(15)가 된다.

$$\frac{\partial P_s}{\partial X} = - \sum_{i \neq s} \left(1 - \frac{\partial P_i}{\partial P_i} \right) \frac{\partial P_i}{\partial X} - \left(- \sum_{i \neq s} \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial X} \right) \quad (15)$$

이와같은 방법으로 슬랙의 무효전력에 대한 감도도 구할 수 있다. 라그랑지 함수에서 쿤터커 조건의 최적성 조건을 이용하면 식(8)은 식(16)과 같이 표현되며, 여기에 식(15)를 대입하여 정리하면, 식(17)과 같은 모션가격을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial X} = \frac{\partial F}{\partial P_s} \frac{\partial P_s}{\partial X} - \frac{\partial g^T}{\partial X} \lambda + \frac{\partial h^T}{\partial X} (\pi_l + \pi_u) = 0 \quad (16)$$

$$\lambda_{pi} = \lambda_{ps} - \lambda_{ps} \frac{\partial P_L}{\partial P_i} - \frac{\partial Q_L}{\partial P_i} \lambda_{qs} - \sum_{j=1}^n (\pi_{ifj} + \pi_{ufj}) \frac{\partial P_{Fj}}{\partial P_i} - \sum_{j=3}^n (\pi_{ifj} + \pi_{ufj}) \frac{\partial V_j}{\partial P_i} \quad (17)$$

모선가격분해를 위해서는 먼저 최적조류계산 (Optimal Power Flow)이 수행되어야 한다. 그 결과로서 라그랑지 승수, 자코비안 감도를 얻을 수 있다. 이렇게 구한 자코비안을 이용해서 선로조류감도와 손실감도 등을 계산한 후, OPF의 결과인 라그랑지 승수를 이용하여 모선가격을 분해한다. 모선가격분해의 절차를 그림 1에 보인다. OPF의 Tool로는 PSS/E OPF 2.6을 사용했으며, 그 외의 감도계산과 모선가격 분해를 위한 프로그램은 Fortran을 이용했다.

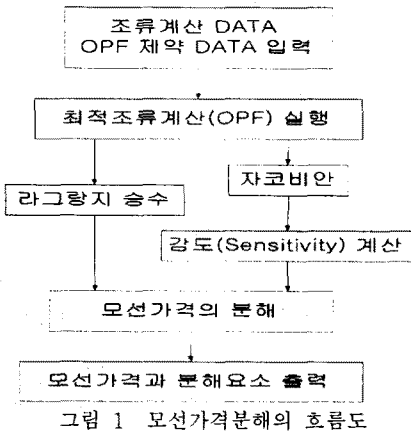


그림 1 모선가격분해의 흐름도

4. 사례연구

4.1 사례계통

본 연구의 결과를 검증하기 위하여 시험계통으로 IEEE 30 모선계통을 이용한다. 이 계통에 대한 발전기 출력 데이터(5)는 다음 표 1과 같이 정리할 수 있다.

IEEE 30모선 계통은 6개의 발전기 모선을 가지고 있고 계통의 총 부하는 $P = 283.4\text{MW}$, $Q = 126.2\text{MVAR}$ 이며 기준은 100MVA이다. 슬랙모선은 1번 모선이다. 본 연구에서는 다음과 같이 2가지 Case에 대해 적용하였다.

- Case 1 : 혼잡이 없는 경우
- Case 2 : 4-12번 선로에 혼잡이 발생한 경우

표 1 IEEE 30 모선 계통의 발전기 데이터

bus	P_G^{\min} (MW)	P_G^{\max} (MW)	연료비 계수		
			a	b	c
1	50	200	0.00375	2.00	0
2	20	80	0.01750	1.75	0
5	15	50	0.06250	1.00	0
8	10	35	0.00834	3.25	0
11	10	30	0.02500	3.00	0
12	12	40	0.02500	3.00	0

주) 발전기 연료비 $F = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i$

표 2 모선가격의 분해결과

CASE	CASE 1		CASE 2	
	분해 결과	PSS/E 결과	분해 결과	PSS/E 결과
슬랙모선의 모선가격	332.06	332.06	327.95	327.95
12번 모선의 모선가격	357.00	356.60	392.89	392.94
30번 모선의 모선가격	382.67	382.42	388.97	389.48

각 CASE의 모선가격의 분해결과는 표 2에 표현하였으며, 여기서 오차가 조금 있는 이유는 계산상의 numerical error이다.

4.2 사례 1 (혼잡이 없는 경우)

그림 2는 혼잡이 없는 경우의 모선한계가격 분해요소를 그래프를 이용하여 표현한 것이며, 혼잡이 발생하지 않았으므로 혼잡가격은 나타나지 않고, 유효전력은 전압과 상관관계가 적기 때문에 전압에 관련된 가격도 매우 작게 나타난다. 표 3과 그림 3은 손실비용에 따라 지역을 구분한 것이다. 그림 2에서 확인할 수 있듯이 26, 29, 30번 모선에서 특히 손실가격이 크다. 이 모선들은 그림 3의 AREA6과 7에 속하며, 슬랙모선에서 거리가 먼 부하기기 때문에 선로손실가격이 크게 나타나는 것이다. 그림 2에서 5, 7번 모선의 손실 가격이 큰 이유는 5번 모선의 부하량이 다른 모선에 비해(다른 모선의 부하량이 보통 20MW이하인 반면 $P_{45}=96\text{MW}$) 매우 크기 때문이다. 이 결과로부터 기준모선에서 거리가 멀수록, 부하가 클수록 선로손실이 증가한다는 사실을 알 수 있다. 무효전력손실에 관련된 분해요소는 거의 영(0)이 되며, 이는 본 연구의 정식화에서 목적함수에 무효전력의 비용함수를 포함시키지 않아서 슬랙모선에서의 무효전력의 증분연료비(λ_{qs})가 거의 영(0)이기 때문 이를 산정할 수 없는 것이다.

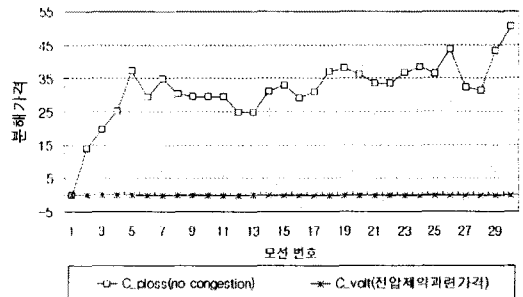


그림 2 모선가격분해요소 (CASE 1)

표 3 손실비용에 따른 지역구분

지역구분	손실비용(C_ploss)
AREA 1	0 ~ 20
AREA 2	20 ~ 25
AREA 3	25 ~ 30
AREA 4	30 ~ 35
AREA 5	35 ~ 40
AREA 6	40 ~ 45
AREA 7	45 이상

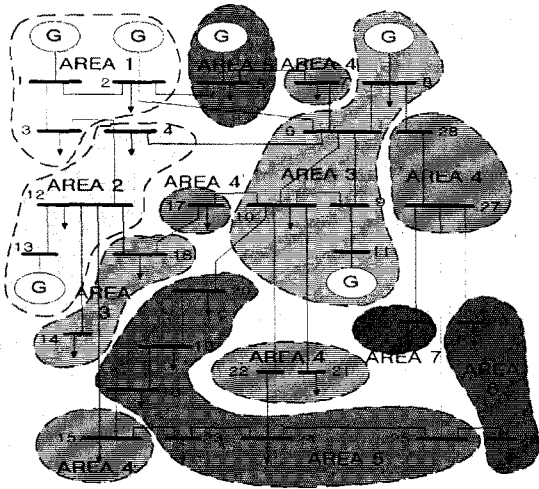


그림 3 30모선 계통(AREA:손실비용에 따른 구분)

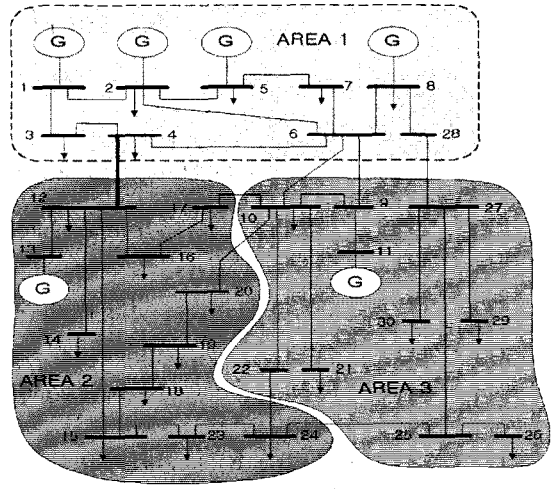


그림 5 30모선 계통(AREA:혼잡정도에 따른 구분)

4.3 사례 2 (혼잡이 발생한 경우)

그림 4는 4-12번 선로에 혼잡이 발생한 경우의 모선 가격분해요소를 나타낸 것이며, 여기에 CASE 1의 손실비용도 함께 표현하였다. 그림 4에서 CASE1과 CASE 2의 손실가격은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있으며, Case 2의 경우에는 특히 혼잡가격이 손실가격에 비해 큰 것을 알 수 있다. 그림 5와 표 4는 혼잡에 따라서 지역구분을 한 것이다. 그림 4와 5에서 보면 AREA 1과 AREA 2를 연결하는 선로에 혼잡이 발생하였으며 그 결과 AREA 1의 혼잡가격은 AREA 2나 3에 비해 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 특히, 3, 4번 모선에서는 혼잡가격이 음수가 나오고 있으며 이것은 3, 4번 모선이 슬랙모선에 비해 혼잡을 감소시키는 역할을 한다는 것을 의미한다. 또한, 12, 13번 모선 근처의 혼잡비용이 상당히 높은 것을 확인할 수 있으며 이는 이 지역의 모선들이 혼잡을 일으키는 주요 원인이라는 것을 의미하게 된다. 이 결과를 우리나라의 계통과 연관시켜서 해석한다면, AREA 1을 부하가 적은 비경인 지역, AREA 2와 3을 부하가 많은 경인지역과 관련해서 생각할 수 있다. 경인지역의 부하가 급증해서 북상선로에 혼잡이 발생한다면, 경인지역의 모선가격은 혼잡에 의해 비경인 지역보다 모선가격이 훨씬 많이 증가할 것이다.

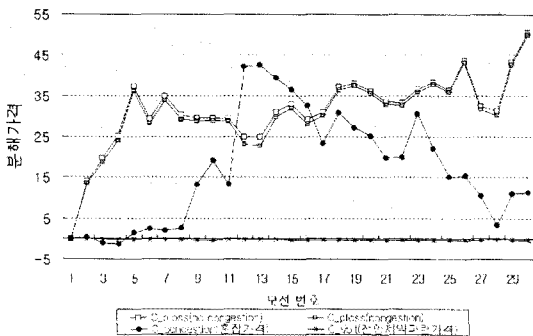


그림 4 모선가격분해요소 (CASE 2)

표 4 혼잡비용에 따른 지역구분

지역구분	AREA 1	AREA 2	AREA 3
혼잡비용 ($C_{congestion}$)	10 이하	20 이상	10 ~ 20

5. 결론

본 연구에서 확인할 수 있듯이 모선가격의 분해요소는 계통상태에 대한 정보를 가격요소로 보여줄 수 있으므로 혼잡처리방안을 향상시킬 수 있으며 계통투자액에 있어서도 투자비와 계통계약의 가격신호를 비교할 수 있는 경제적 신호를 제공할 수 있다. 또한, 앞으로 전압안정도, 순동예비력 등의 제약을 포함시킨다면, 이에 대한 가격요소 분해가 가능하므로 보조서비스, 전압안정도에 관련된 가격과 방향의 정도를 결정할 수 있는 근거를 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 목적함수에 정확한 무효전력의 연료비용함수를 첨가한다면, 무효전력에 대한 모션한계가격도 여러 가지 요소로 분해 가능할 것이다.

(참고 문헌)

- [1] "전력시장 경쟁도입을 위한 기초 연구", 한국전력공사 전력산업구조 조정실, 1999, 8.
- [2] H.W. Dommel and W.F. Tinny, "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, No. 10, 1968
- [3] Xie, Kai, Y.H.Song, Erkeng Yu, Guangyi Liu, "Decomposition model of optimal spot pricing and interior point method implementation", POWER-CON '98, p32-37, 1998
- [4] Luonan Chen, Hideki Suzuki, Tsunehisa Wachi, Yukihiro Shimura, "Decomposition of Nodal Price for Electric Power System", IEEE Summer Meeting, 2000
- [5] O. Alsac and B. Stott, "Optimal Load Flow with Steady State Security", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, 1974