

전압안정도 및 과도 안정도를 고려한 모선가격 산정

김용하*, 이범**, 최상규***, 조성린****, 정현성****, 오석현****, 김동근*
 인천대학교*, 전남대학교**, 안양과학기술대학***, 한국전력공사****

Nodal price of the power system considering voltage and transient stability

Yong-ha Kim*, Bum Lee**, Sang-gyu Chang***, Sung-lin Jo****, Hyeon-sung Jung****, Suk-hyeon Oh****, Dong-geun Kim*
 Incheon Univ.*, Chonnam Univ.**, Anyang Technical college***, KEPCO****

Abstract - This paper presents a optimal power flow calculation algorithm considering voltage and transient stability. In this method, voltage stability margin and transient stability constraints is incorporated into a optimal power flow calculation formulation to guarantee adequate voltage and transient security levels in power system. In addition, 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 method is applied to IEEE-24 Reliability Test System and the results shows the effectiveness of the method.

1. 서 론

전력산업 구조개편안이 추진됨에 따라 전력회사간의 과다한 경쟁, 이윤추구, 답합에 의해 타 지역과의 수급계약 충족되지 못하는 경우와 선로의 송전전력이 증 조류화(Heavily loaded)의 경향을 띄게 될 가능성이 높게 되고 전력계통은 과부하상태에서 운전될 가능성이 더욱 높아지게 되어 전압붕괴와 같은 전압안정도 및 과도안정도 문제를 야기 시킬 수 있다. 또한 전력계통은 그 구조상 사고가 필연적일 수 밖에 없고 이런 이유 때문에 전압안정도 및 과도안정도는 계통 운영상에 고려해야만 하는 필수적 요건이다. 이에 본 논문에서는 전력계통의 안전한 운전과 계획을 위하여 현재 우리나라에서 경제적인 운용과 최적투자계획 및 확충계획 수립을 위하여 필수적인 도구인 최적조류계산기법을 전압안정도 및 과도안정도 조건까지 포함하여 개발하고 이를 이용하여 모선가격을 산정하고 분해하였다.

2. 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산

2.1 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산문제의 정식화

일반적인 최적조류계산문제에 전압안정도 제약조건식과 과도안정도 제약조건을 반영하면 다음과 같은 전압 및 과도안정도 제약조건을 고려한 최적조류계산문제로 정식화 할 수 있다.[1]

• 목적함수 : $\text{Min. } -\mu \sum_{i=1}^N (|\Delta P_{Li}| + |\Delta Q_{Li}|) + \sum_{i=1}^N f_i(P_{Gi})$ (1)

• 일반적인 제약조건
 $\sum P_{Gi} - P_L - q = 0$: 전력평형식 (2)

$V_{Di}^{\min} \leq V_{Di} \leq V_{Di}^{\max}$: 부하모선 전압크기 (3)

$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}(X,U) \leq Q_{Gi}^{\max}$: 발전기모선의 무효전력 (4)

$F_i(X,U) \leq F_i^{\max}$: 선로피상조류 (5)

단, P_L : 총 계통 부하, q : 총 계통 손실
 X : 상태변수 (부하모선 전압크기, 위상각)
 U : 제어변수 (변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효 전력출력)

• 전압안정도 제약조건
 $P_i^L(X^L, U) \geq CP_i$: 전압안정도 여유제약조건의 유효부분 (6)
 $Q_i^L(X^L, U) \geq CQ_i$: 전압안정도 여유제약조건의 무효부분 (7)

$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}^L(X^L, U) \leq P_{Gi}^{\max}$: 전압안정한계점에서 발전기모선의 유효전력
 여기서, X^L : 전압안정한계점에서의 상태변수 (부하모선 전압크기, 위상각)

• 과도안정도 제약조건:
 $\delta_i^{m+1} - \delta_i^m - \frac{\Delta t}{2} (\omega_i^{m+1} + \omega_i^m) = 0$ (9)
 $\omega_i^{m+1} - \omega_i^m - \frac{\Delta t}{2} (K_i^{m+1} + K_i^m) = 0$ (10)
 (m= 1,2, ..., NT i=1,2, ..., ng)

단, Δt : 적분스텝 길이, NT: 적분스텝의 수
 적분스텝에 대하여 구성하면 다음 식(11)~(13)과 같이 표현된다.

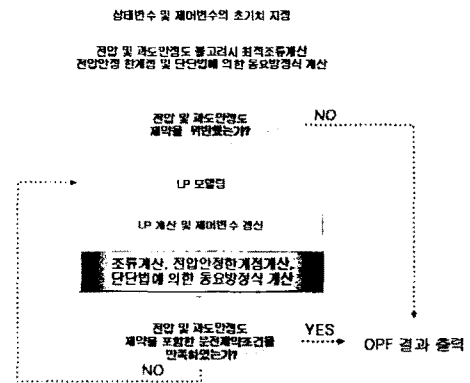
$\sum_{k=1}^n (G_{ik} V_k^{m+1} \cos \theta_k^{m+1} - B_{ik} V_k^{m+1} \sin \theta_k^{m+1}) - I_i^{m+1} = 0$ (11)

$\sum_{k=1}^n (B_{ik} V_k^{m+1} \cos \theta_k^{m+1} + G_{ik} V_k^{m+1} \sin \theta_k^{m+1}) - I_{i\mu}^{m+1} = 0$ (12)

$\delta_i^m - \frac{\sum_{j=1}^n H_{ij} \delta_j^m}{\sum_{j=1}^n H_{ij}} \leq \delta_i^{\max}$ (13)

- 제어변수관련 제약식
- $t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max}$: 변압기 탭 (14)
- $V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}$: 발전기 모선전압 (15)
- $b_{Ci}^{\min} \leq b_{Ci} \leq b_{Ci}^{\max}$: Shunt Capacitor (16)
- $b_{Ri}^{\min} \leq b_{Ri} \leq b_{Ri}^{\max}$: Shunt Reactor (17)
- $P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}$: 발전기의 유효전력출력 (18)

본 연구에서는 앞에서와 같이 정식화된 전압 및 과도안정도를 고려한 비선형 최적조류계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 최적조류 계산을 선형화한 다음 LP문제로 최적 조류계산 문제를 해결하였으며 계산 흐름도는 그림1과 같다.



〈그림 1〉 최적조류계산 흐름도

3. 모선가격 산정 및 분해

3.1 모선가격 산정

모선가격이란 각모선의 부하변화에 따른 전체 계통의 비용의 변화로 정의 할 수 있다. 전체계통의 비용이라는 것은 라그랑지 함수로 표현이 가능하고 계통의 비용을 나타내는 라그랑지 함수는 발전비용최소화의 목적함수, 계통에서 발전기 출력 상·하한 제약, 모선전압제약, 선로조류제약과 등호제약인 부하모선의 수급조건으로 구성하였다. 라그랑지 함수는 식(19)와 같다.

$L = \sum_{i=1}^{Ng} f_i(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{Nbus} \left[\lambda_{pj} (P_{Dj}) + \sum_{m=1}^{Nbus} p_{j,m} (P_{Gj} - P_{Gj}) \right] + \left[\lambda_{qj} (Q_{Dj}) + \sum_{m=1}^{Nbus} q_{j,m} (Q_{Gj} - Q_{Gj}) \right]$
 $+ \sum_{i=1}^{Ng} \left[\rho_{pi}^{\min} (P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}) \right] + \sum_{i=1}^{Ng} \left[\rho_{pi}^{\max} (P_{Gi} - P_{Gi}^{\max}) \right] + \sum_{i=1}^{Ng} \left[\rho_{qi}^{\min} (Q_{Gi}^{\min} - Q_{Gi}) \right]$
 $+ \sum_{i=1}^{Ng} \left[\rho_{qi}^{\max} (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\max}) \right] + \sum_{j=1}^{Nbus} \left[\rho_{vj}^{\min} (V_j^{\min} - V_j) \right] + \sum_{j=1}^{Nbus} \left[\rho_{vj}^{\max} (V_j - V_j^{\max}) \right]$
 $+ \sum_{i=1}^{Nline} \left[\rho_{li}^{\max} (T_i - T_i^{\max}) \right]$ (19)

단, $\lambda_{Pj}, \lambda_{Qj}$: i모선 수급조건과 관련된 잠재가격
 $\rho_{Pj}^{\min}, \rho_{Pj}^{\max}, \rho_{Qj}^{\min}, \rho_{Qj}^{\max}$: j발전기모선 유·무효출력 상·하한치와 관련된 잠재가격
 $\rho_{vi}^{\min}, \rho_{vi}^{\max}$: i모선 전압 상·하한치와 관련된 잠재가격
 ρ_{li}^{\max} : i선로 피상조류 상한치와 관련된 잠재가격
 현재상태를 반영하기 위해서 각모선의 유·무효전력을 각모선의 상태변수로 표현가능한 모선의 주입전력으로 하여 모선가격을 정의에 따라 정식화 하면 식(20)과 같다.

$$\pi_i = \frac{\partial L}{\partial P_i} \quad (20)$$

모선가격을 나타내는 식(20)을 모선에 따라 분류하면 식(21),식(22)으로 정리할 수 있다.[2]

$$\pi_{P_i} = \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{\partial f(P_C)}{\partial P_i} - \overline{\rho_{R,j}} - \overline{\rho_{R,i}} \pi_{P_C} = \frac{\partial L}{\partial Q_j} = -\overline{\rho_{Q,j}} + \overline{\rho_{Q,i}} \quad (21)$$

$$\pi_{P_C} = \lambda_{PDK} \pi_{PDK} + \lambda_{QDK} \pi_{QDK} \quad (22)$$

단, $\overline{\rho}$: Binding된 부등호 제약조건인 잠재가격
 식(21)~식(22)을 구성하고 있는 잠재가격을 상태변수로 구하기 위해 최적조건과 모선의 주입전력 식을 이용하여 식(19)를 정리하면 식(23)과 같다.[2]

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} = \frac{\partial f(P_C)}{\partial P_j} \frac{\partial P_j}{\partial X_i} - \rho_{R,j}^{\min} \frac{\partial P_j}{\partial X_i} + \rho_{R,i}^{\max} \frac{\partial P_j}{\partial X_i} - \rho_{Q,i}^{\min} \frac{\partial Q_j}{\partial X_i} + \rho_{Q,i}^{\max} \frac{\partial Q_j}{\partial X_i} + \lambda_{PDK} \frac{\partial P_k}{\partial X_i} + \lambda_{QDK} \frac{\partial Q_k}{\partial X_i} - \rho_{V,i}^{\min} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{V,i}^{\max} \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \rho_{T,i}^{\max} \frac{\partial T_i}{\partial X_i} = 0 \quad (23)$$

3.2 모선가격 분해

위의 식(21)~(22)에서 산정한 모선가격을 계통에서 관심을 가지는 제약에 대해서 분해하기 위해서 음함수 이론을 적용하였고 수급조건과 같이 시장안에서 거래될 수 없는 제약인 nontradable constraints와 시장가격을 가지는 제약인 tradable constraints로 분류하였다. 이와 같이 두 종류의 제약으로 분류한 최적조건식은 식(24)~식(25)이 된다.[2]

$$\frac{\partial L(X, \lambda, \rho, P, Q)}{\partial X_i} = \frac{\partial f(P_C)}{\partial P_j} \frac{\partial P_j}{\partial X_i} + U(X, \alpha, P, Q) = 0 \quad (24)$$

$$M(X, P, Q) = 0 \quad (25)$$

단, M : nontradable constraints, N : tradable constraints
 α : nontradable constraints와 관련된 라그랑지안 승수
 이에 따라서 라그랑지안 함수를 재구성하고 모선중분비용을 구하면 식(26)과 같다.[3]

$$\frac{\partial L(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} = \left(\frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left(\frac{\partial \alpha(P, Q)}{\partial P_i} M(X(P, Q), P, Q) + \alpha(P, Q) \left(\frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial M(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \right) + \beta \left(\frac{\partial N(X, P, Q)}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial P_i} + \frac{\partial N(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} \right) \quad (26)$$

위의 식(26)에서 직접 계산되지 않는 $\frac{\partial X}{\partial P_i}$ 를 음함수 이론과 Hessian

Matrix를 사용하여 식(26)을 정리 하면 식(27)과 같다.

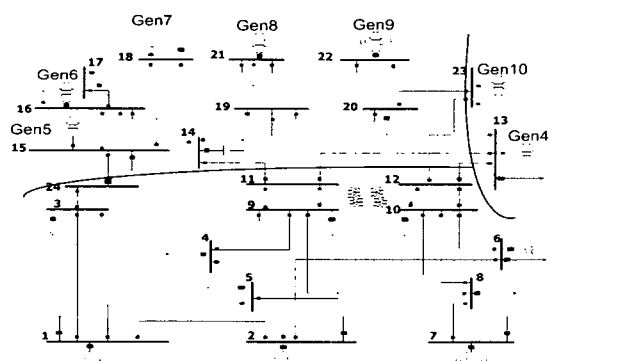
$$\frac{\partial L(X(P, Q), \alpha(P, Q), P, Q)}{\partial P_i} = \left(\frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial f(X, P, Q)}{\partial P_i} \right) + \beta \left(\frac{\partial N(X, P, Q)}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P_i} + \frac{\partial N(X, P, Q)}{\partial P_i} \right) \quad (27)$$

모선가격은 계통에서 관심을 가지는 제약 중 거래가 불가능한 제약(f_j 의 발전기 비용에 대한 분해요소)과 거래가 가능한 제약에 대한 분해요소들의 합으로 구성된다. 식(27)를 계통의 모든 발전기와 제약 조건을 고려하면 식(28)로 구성할 수 있다. 식(28)의 우변 첫째항은 nontradable constraints이고 두 번째 항은 tradable constraints로써 각 요소에 대한 관심량으로 구성된다.

$$\pi_{P_i} = \sum_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial X} \left(\frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left(\frac{\partial f_j}{\partial P_i} \right) \right) + \sum_n \beta_n \left(\frac{\partial N_n}{\partial X} \left(\frac{\partial X}{\partial P_i} \right) + \left(\frac{\partial N_n}{\partial P_i} \right) \right) \quad (28)$$

4. 사례연구

본 연구는 IEEE RTS-24모선모델계통을 적용하여 전압안정도 및 과도안정도를 고려한 모선가격을 산정하도록 하였다.



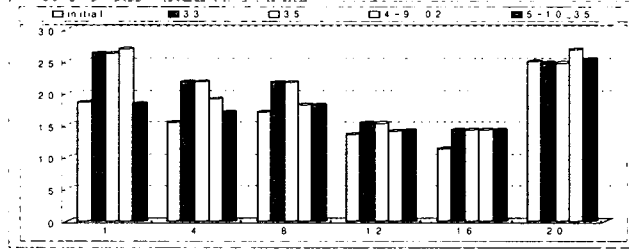
〈그림 2〉 IEEE RTS-24 모선 모델계통

표1은 전압안정도 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산의 결과 중 각 발전기 모선의 발전기 출력값을 나타내고 있다.

〈표 1〉 각 경우에 대한 최적 조류계산 결과 발전기 출력 [MW]

발전기	초기 최적상태	전압안정도 33%고려시	전압안정도 35%고려시	4-9선로고장 02초제거시	5-10선로고장 전압안정도35%
G ₁	20	66	66	48	78
G ₂	54	139	139	125	94
G ₇	10	10	10	36	42
G ₁₃	746	669	669	661	680
G ₁₅	142	85	85	134	178
G ₁₆	44	126	126	228	205
G ₁₈	540	550	555	696	662
G ₂₁	593	507	507	650	711
G ₂₂	10	10	10	36	42
G ₂₃	711	669	669	536	585

그림3은 표1의 각 경우에 대한 발전기 출력값을 바탕으로 초기 최적상태, 전압안정도만 고려한 경우, 과도안정도만 고려한 경우 그리고 전압 및 과도안정도를 동시에 고려한 경우의 모선가격을 대표 모선만 선택해서 비교하고 있다.



〈그림 3〉 대표 모선에 대한 각 경우에 따른 모선가격의 비교

그림3에서 보면 모선가격은 초기 최적상태의 모선가격보다 전반적으로 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 전압안정도 여유 33% 고려와 35% 고려시의 최적조류계산의 결과는 다르게 나오나 모선가격을 산정할 때 필요한 각 발전기의 출력 값이 같게 산정됨으로써 모선가격은 같게 나오게 된다. 만일 계통운영의 목적이 계통전체 비용의 최소에 있다면 전압 및 과도안정도를 제약조건으로 고려하지 않고 계통운영을 하는 것이 적절하지만 전압 및 과도안정도를 고려해야 한다면 전압, 과도안정도를 따로 고려하는 경우 보다 전압 및 과도안정도를 동시에 고려하는 것이 일부모선의 모선가격 측면에서는 오히려 유리함을 알 수 있다.

〈표 2〉 각 경우에 대한 모선가격의 분해 요소

제약조건	분 해 요 소				
	발전기	전압	선로피상	발전기출력	총계
초기 최적상태	10	1	1	6	18
전압안정도 33%고려시	10	-	-	4	14
전압안정도 35%고려시	10	-	-	4	14
4-9선로고장 02초제거시	10	-	-	3	13
5-10선로고장 02초제거시	10	-	-	4	14
과도 4-9 02 전압 35%	10	-	-	4	14
과도 5-10 02 전압 35%	10	1	-	4	15

전압안정도, 과도안정도를 고려했다고 해서 분해요소의 수가 증·감하지는 않는다. 즉 분해요소는 계통의 상태에 따라 다음을 알 수 있다.

5. 결 론

최적 상태뿐만 아니라 계통의 비 최적 상태의 모선가격도 산정할 수 있도록 조류계산을 기본으로 현재 계통의 운전 상태를 반영하는 상태변수로 잠재가격과 모선가격을 산정하였고 이를 통하여 각 모선에 있어서 부하 증가시 계통의 총 비용 변화를 예측할 수 있어 효율적인 전력 시장운영을 할 수 있는 지표를 제안하였다. 따라서 시장 운영자가 시장운영의 목적에 맞게 모선가격의 구성 요소를 결정하며, 그 구성요소에 따라 모선가격을 분해함으로써 각 분해 요소들이 모선가격에 미치는 영향을 분석하여 효과적인 시장을 운영할 수 있게 하였다.

〈참 고 문 헌〉

[1] 김용하, 이범, 최상규, 조성린, 정현성, 오석현, "전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산 알고리즘 개발에 관한 연구", 2005년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 2005. 11.18- 11.19
 [2] 김용하, 이범, 최상규, 문혁기, 이재걸, "계통운전상태에서의 모선중분비용 산정 및 분해에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 2002.11.15-16