

전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산 알고리즘 개발에 관한 연구

김용하*, 이범**, 최상규***, 조성린****, 정현성****, 오석현****
 인천대학교*, 여수대학교**, 안양과학대학***, 한국전력공사****

A Study on Development of Optimal Power Flow Calculation Algorithm
 Considering Voltage and Transient Stability

Yong-ha Kim*, Buhm Lee**, Sang-kyu Choi***, Sung-rin Cho****, Hyun-sung Jung****, Seok-hyun Oh****
 Incheon Univ.*, Yeosoo Univ.**, Anyang Univ.***, 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. The proposed method is applied to IEEE-24 Reliability Test System and the results shows the effectiveness of the method.

T_j^L : 전압안정한계점에서 j모선의 피상부하
 T_j^N : 현재 운전점에서 j모선의 피상부하
 J_L : 부하모선의 집합

식(1)에서 안정한 초기 운전조건에 대하여 VSM은 0과 1사이의 값을 갖으며 전압안정한계점에서는 VSM은 0이다. 그리고 VSM의 음(negative)의 값은 회로망이 지정된 초기의 MVA수요를 공급할 수 없다는 것을 의미한다. 한편, 전력계통의 안전한 운전을 위해서는 현재의 운전점이 전압붕괴점으로부터 안전한 전압안정도여유를 유지하여야 한다. 이때, 전압안정도 여유를 확보하기 위한 전압안정도 여유제약은 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N}{\sum_{j \in J_L} T_j^L} \geq VSM^{spec} \quad (2)$$

여기서, VSM^{spec} : 최소전압안정도여유 지정치($0 < VSM^{spec} < 1$)

그리고 전압안정도 한계점에서의 i모선의 피상부하 T_i^L 은 다음 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_i^L = \beta_i (\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N) + T_i^N \quad (3)$$

여기서, β_i : 계통 전체부하증가에 대한 부하모선의 부하증가에 위의 식(2)식과 (3)식으로부터 다음 식(4)가 유도된다.

$$T_i^L \geq T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N \quad (4)$$

지금, i모선에서의 역률 pf_i 이 일정하다고 가정하면 위의 식(4)으로 표현되는 전압안정도 여유제약식은 다음 식(5)과 (6)과 같이 유효 및 무효성분으로 나누어진다.

$$P_i^L \geq pf_i [T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N] = CP_i \quad (5)$$

$$Q_i^L \geq (1 - pf_i^2)^{\frac{1}{2}} [T_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \beta_i \sum_{j \in J_L} T_j^N] = CQ_i \quad (6)$$

1. 서 론

최근, 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인하여 전력계통은 고부하상태에서 운전될 가능성이 더욱 높아지게 되었다. 전력계통의 부하가 증가하면 전압안정도 여유가 감소하므로 전력계통은 전압붕괴와 같은 전압안정도 문제를 야기시킬 수 있다. 전압안정도여유는 전압붕괴점과 현재 운전점사이의 거리를 의미한다. 또한, 전력계통은 그 구조상 사고가 필연적인 수밖에 없고 이런 이유 때문에 과도안정도는 계통 운영상에 고려해야만 하는 필수적 요건 중에 하나이다. 과도안정도는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 회전자 위상각 안정도의 유지여부에 관한 계통능력을 말한다. 이와 같은 전압 및 과도안정도문제가 비교적 최근에 발생하는 현상일지라도 전력계통의 안전한 운전과 계획을 위하여 이와 관련된 연구가 지금까지 활발하게 진행되어 왔다[1,2,3,4,5]. 본 연구에서는 현재 우리나라에서 진행되고 있는 전력산업 구조개편과정 및 구조개편이 이루어진 경우에 전력계통의 안정적이며 경제적인 운용과 최적투자계획 및 확충계획 수립을 위하여 필수적인 도구인 최적조류계산기법을 전압안정도 및 과도안정도 제약조건까지 포함하여 개발하는데 연구의 목적을 두고 있다.

2. 전압 및 과도안정도 제약

2.1 전압안정도여유 제약조건

본 연구에서는 전력계통의 최적조류계산시에 전압안정도문제를 고려하기 위하여 전압안정도 여유제약을 최적조류계산 문제에 반영하였다. 먼저, 전압안정도 여유 VSM은 다음 식(1)과 같이 정의된다.[1]

$$VSM = \frac{\sum_{j \in J_L} T_j^L - \sum_{j \in J_L} T_j^N}{\sum_{j \in J_L} T_j^L} \quad (1)$$

여기서, N : 현재 운전점
 L : 전압안정한계점

2.2 과도안정도 제약조건

본 연구에서는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 전력계통의 안전한 운전을 위하여 전력계통의 최적조류계산 문제에 다음에 설명하는 과도안정도제약조건을 고려할 수 있는 방법을 제안한다. 먼저, classical model에 따르면 동요방정식은 다음과 같이 정식화된다.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i \quad (7)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - \frac{1}{X_{di}} (E_i V_i \cos \theta_i \sin \delta_i - E_i V_i \sin \theta_i \cos \delta_i))$$

$$= K_i (P_{mi}, E_i, V_i \cos \theta_i, V_i \sin \theta_i, \delta_i) \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

단, G, B : 모선 어드미턴스 행렬의 실수, 허수 부분
 $V_i \cos \theta_i$: 발전기 i 가 포함된 모선의 전압의 실수부
 $V_i \sin \theta_i$: 발전기 i 가 포함된 모선의 전압의 허수부
 w_i, δ_i : i 번째 발전기의 회전자 각속도 및 각도

위의 식(9)에서 i 번째 모선에 유입전류의 실수부분과 허수부분은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{xi} = \frac{E_i \sin \delta_i}{X_{di}}, I_{yi} = -\frac{E_i \cos \delta_i}{X_{di}} \quad (\text{generator buses})$$

$$I_{xi} = 0, I_{yi} = 0 \quad (\text{nongenerator buses})$$

또한, 과도안정도를 만족시키기 위한 운전제약조건은 다음 식(10)로 표현된다.

$$\delta_i = \delta_i - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \delta_i^{\text{lim}} \quad (10)$$

단, ng : 발전기의 수,

δ_i^{lim} : δ_i 에 대한 상한치

δ_i^{lim} : center-of-inertia(COI) reference frame에 대한 회전자 각도

결국 본 연구에서 과도안정도를 만족시키기 위한 운전 제약조건은 식(7)-(9)의 동호제약조건과 식(10)의 부동호 제약조건으로 구성된다. 지금, 식(7)-(9)로 표현되는 동호 제약조건은 미분방정식이므로 곧바로 최적조류계산의 동호 제약조건으로 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 이 미분방정식으로 표현되는 과도안정도 제약조건을 다음과 같이 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환하였다.

$$\delta_i^{m+1} - \delta_i^m - \frac{\Delta t}{2} (\omega_i^{m+1} + \omega_i^m) = 0 \quad (11)$$

$$\omega_i^{m+1} - \omega_i^m - \frac{\Delta t}{2} (K_i^{m+1} + K_i^m) = 0 \quad (12)$$

($m=1, 2, \dots, NT$ $i=1, 2, \dots, ng$)

단, Δt : 적분스텝 길이, NT : 적분스텝의 수
 그리고 식(9),(10)을 각각의 적분스텝에 대하여 구성하면 다음 식(13)-(15)와 같이 표현된다.

$$\sum_{k=1}^{ng} (G_{ik} V_k^{m+1} \cos \theta_k^{m+1} - B_{ik} V_k^{m+1} \sin \theta_k^{m+1}) - I_{xi}^{m+1} = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{ng} (B_{ik} V_k^{m+1} \cos \theta_k^{m+1} + G_{ik} V_k^{m+1} \sin \theta_k^{m+1}) - I_{yi}^{m+1} = 0 \quad (14)$$

$$\delta_i^m - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j^m}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \delta_i^{\text{lim}} \quad (15)$$

3. 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산

3.1 최적조류계산문제

본 연구에서 제안하는 최적조류계산기법의 주요내용은 다음과 같다. 즉, 계통의 상태변수를 x , 제어변수를 u 라 할 때, 주어진 운전조건 x^0, u^0 가 조류방정식의 해가 아니라면 조류방정식의 계산치전력과 지정치전력간에 편차가 발생한다. 지금, 그림1에서와 같이 i 모선에 가상발전기를 배치시킨 다음, i 모선에서의 편차를 $P_{Mi} + Q_{Mi}$ 라 하고, 이 편차를 i 모선의 가상발전기가 담당하도록 한다. 이때, x^0 와 u^0 는 가상발전기 출력을 포함한 현재 계통의 운전조건을 나타낸다

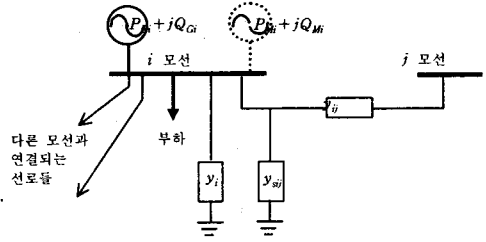


그림 1 전력계통의 일반적인 i 모선

한편, 계통의 실제적인 운전조건은 가상발전기의 출력을 점차적으로 0으로 줄이면서 가상발전기 출력이 0으로 될 때의 x 와 u 가 된다. 따라서, 최적조류계산문제는 다음 식(16)과 같이 가상발전기 출력을 0이 되도록 하며 계통의 발전비용을 최소화하는 최적화문제로 정식화할 수 있다.

$$\text{Min.} -\mu \sum_{i=1}^{ng} (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{j=1}^{Ng} f_j(P_{Gj}) \quad (16)$$

S.t. 전력평형식
 운전제약조건
 제어변수의 상하한

단, μ : 가중치

$\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: i 모선에서의 증분편차변수

$f_j(P_{Gj})$: j 발전기의 연료비 함수

3.2 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산문제의 정식화

식(16)으로 표현되는 일반적인 최적조류계산문제에 앞에서 유도한 전압안정도 제약조건식(5),(6)과 과도안정도 제약조건식(11)-(15)를 반영하면 다음과 같은 전압 및 과도안정도 제약조건을 고려한 최적조류계산문제로 정식화할 수 있다.

목적함수

$$\text{Min.} -\mu \sum_{i=1}^{ng} (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{j=1}^{Ng} f_j(P_{Gj}) \quad (17)$$

일반적인 제약조건

$$\sum_j P_{Gj} - P_L - q = 0 \quad \text{: 전력평형식} \quad (18)$$

$$V_{Di}^{\text{min}} \leq V_{Di} \leq V_{Di}^{\text{max}} \quad \text{: 부하모선 전압크기} \quad (19)$$

$$Q_{Gi}^{\text{min}} \leq Q_{Gi}(X, U) \leq Q_{Gi}^{\text{max}} \quad \text{: 발전기모선의 무효전력} \quad (20)$$

$$F_i(X, U) \leq F_i^{\text{max}} \quad \text{: 선로피상조류} \quad (21)$$

단, P_L : 총계통부하

q : 총계통손실

X : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

U : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효 전력출력)

전압안정도 제약조건

$$P_i^L(X^L, U) \geq CP_i \quad \text{: 전압안정도 여유제약조건} \text{의 유효부분} \quad (22)$$

$$Q_i^L(X^L, U) \geq CQ_i \quad \text{: 전압안정도 여유제약조건} \text{의 무효부분} \quad (23)$$

$$P_{Gi}^{\text{min}} \leq P_{Gi}^L(X^L, U) \leq P_{Gi}^{\text{max}} \quad \text{: 전압안정하한계점에서 발전기 모선의 유효전력} \quad (24)$$

여기서, X^L : 전압안정하한계점에서의 상태변수
 (부하모선 전압크기, 위상각)

과도안정도 제약조건: 식(11)-(15)

제어변수관련 제약식

$$t_i^{\text{min}} \leq t_i \leq t_i^{\text{max}} \quad \text{: 변압기 탭} \quad (25)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} : \text{발전기 모션전압} \quad (26)$$

$$b_{ci}^{\min} \leq b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} : \text{Shunt Capacitor} \quad (27)$$

$$b_{ri}^{\min} \leq b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} : \text{Shunt Reactor} \quad (28)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} : \text{발전기의 유효전력출력} \quad (29)$$

본 연구에서는 앞에서와 같이 정식화된 전압 및 과도 안정도를 고려한 비선형 최적조류계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 최적조류 계산을 선형화한 다음 LP문제로 최적조류계산문제를 해결하였으며 계산 흐름도는 그림2와 같다.

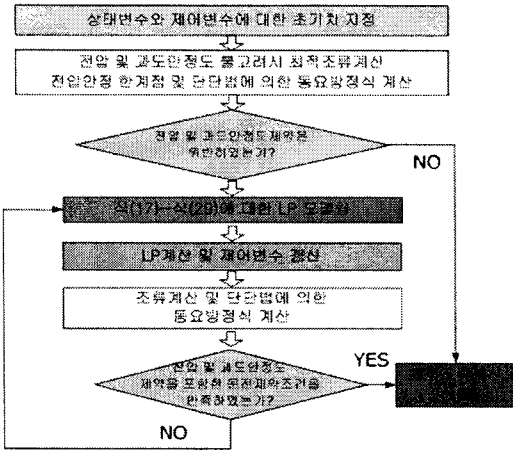


그림 2. 최적조류계산 흐름도

4. 사례연구

그림3은 본 연구에서 사례연구를 위해서 적용한 IEEE RTS-24 모델계통을 보여준다. 그리고 표1은 각 발전기에 대한 과도리액턴스 및 관성정수를 나타낸다.

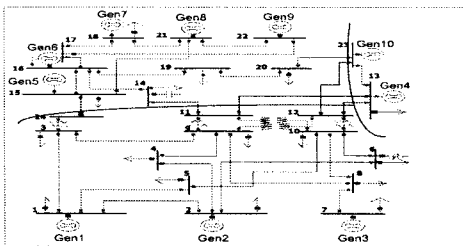


그림 3 IEEE RTS-24 모션 모델계통

표 1 과도리액턴스 및 관성정수

발전기번호	$X'_{d[pu]}$	H[sec]
1	0.2	20.
2	0.15	5.
3	0.25	7.
4	0.2	10.
5	0.1	8.
6	0.12	6.
7	0.2	10.
8	0.16	12.
9	0.17	7.
10	0.3	20.

먼저 그림4, 5는 전압 및 과도안정도를 고려하지 않은 최적조류계산 결과를 이용하여 단단범을 통한 과도안정도를 판별

을 수행한 결과를 보여준다. 즉, 그림 3의 24모션 모델계통의 선로 4-9의 4번 모션 부근에서 3상 단락고장이 발생하였을 경우를 가정하고 고장난 4번-9번 모션간의 선로 양단 차단기를 고장 발생 후 각각 0.1초, 0.2초에 동작하여 고장을 제거한 경우에 대한 결과를 나타낸다.

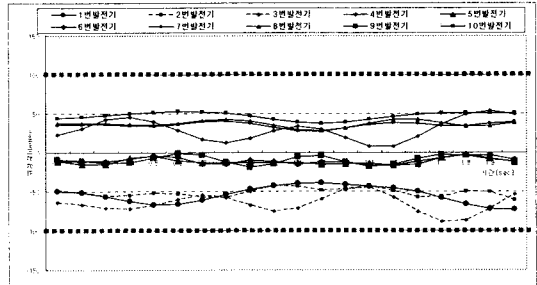


그림 4 사고발생 0.1초후 고장제거시 발전기 위상각 변화

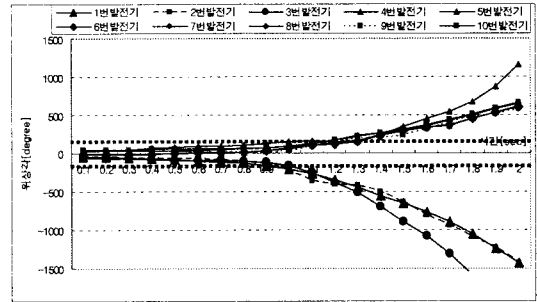


그림 5 사고발생 0.2초 후 고장제거시 발전기 위상각 변화

위의 그림 4, 5의 결과에서 알 수 있듯이 과도안정도를 고려하지 않은 최적조류계산 결과를 이용하여 과도안정도 판별을 할 경우 사고발생 후 0.1초후 고장 제거 시에는 식(15)의 과도안정도 제한치(본 연구에서는 $\pm 100^\circ$)를 위반하지 않지만 사고발생 0.2초후에 고장을 제거할 경우에는 모든 발전기가 과도안정도 제한치를 위반하여 과도안정도가 불안정하게 된다는 것을 알 수 있다. 다음에는 사고발생 0.2초 후 고장제거시의 경우에 대하여 본 연구에서 제시한 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산 결과를 이용하여 과도안정도를 판별을 수행하였다. 이 경우 그림6에서 보듯이 모든 발전기의 위상각이 과도안정도 제한치를 만족하였다. 즉 전압 및 과도안정도를 고려하지 않은 최적조류계산결과는 0.2초후 고장제거시 과도 불안정 상태가 되는 반면에 본 연구에서 제안하는 전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산 결과는 발전기의 위상각 변화가 과도안정도 제한치를 위반하지 않으므로 계통의 과도안정도가 안정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

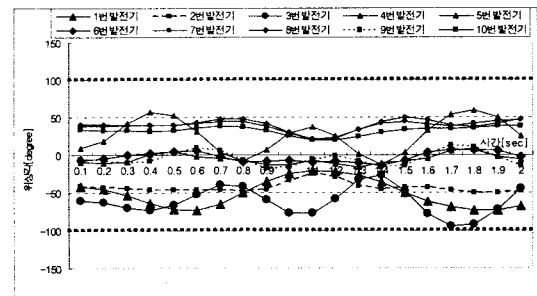


그림 6 사고발생 0.2초후 고장제거시 발전기 위상각 변화 (전압 및 과도안정도 고려한 최적조류계산)

다음에 그림 7은 전압 및 과도안정도 고려시와 불고려시 발전비용 및 전압안정도여유에 대한 수렴 특성을 보여준다. 전압 및 과도안정도 불고려시는 반복회수 7회 만에 발전비용 44773.45[\$/MWh]로 계산된 반면에 전압 및 과도안정도 고려시는 반복회수 4회 만에 발전비용 54083.34[\$/MWh]로 계산되었다. 이 결과로부터 전압 및 과도안정도 제약조건을 고려할 경우 전압 및 과도안정도는 만족되는 반면에 발전비용은 증가한다는 것을 알 수 있다. 한편 전압안정도여유는 그림7에서 보듯이 전압안정도여유를 고려하지 않고 계산하였을 경우에는 28.4[%]였지만 전압안정도여유를 고려하고 계산한 결과에서는 본 연구에서 지정한 35[%]를 만족한다는 것을 알 수 있다.

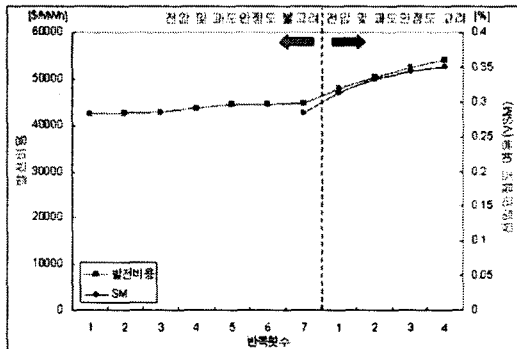


그림 7 전압 및 과도안정도 고려시와 불고려시 발전비용 및 전압안정도 여유수렴 특성

5. 결 론

본 연구에서는 전압 및 과도안정도 제약을 고려한 최적조류계산 알고리즘을 제안하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 전압안정도여유 및 과도안정도 제약식을 정식화한 다음 이를 최적조류계산문제에 반영할 수 있는 방법을 제시하였다.
- (2) 과도안정도제약식은 미분방정식으로 표현되므로 곧바로 최적조류 계산문제의 등호제약조건으로 사용할 수 없다. 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 미분방정식으로 표현되는 과도제약식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환함으로써 과도안정도제약식을 최적조류 계산문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다.
- (3) 비선형 최적조류계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 최적조류 계산문제를 선형화한 다음 LP문제로 최적조류계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였고 본 방법의 유용성을 검증하였다.

감사의 글

“본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업
기반조성사업실의 지원에 의하여 이루어진
연구로서, 관계부처에 감사드립니다.”

[참 고 문 헌]

- [1] O.O.Obadina G.J.Berg, "VAR PLANNING FOR POWER SYSTEM SECURITY" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [2] W.Rosehart, C. Canizares, V.Quintana, "Costs of voltage security in electricity markets", Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, Vol.4, 2000, pp.2115-2120.
- [3] Deb Chattopadhyay, Deqiang Gan, "Dispatch Optimizaion

Incorporating Transient and Voltage Stability Constraints" IEEE 2000.

- [4] M. La Scala, M. Trovato, and C. Antonelli, "On-line Dynamic Preventive Control: An Algorithm for Transient Security Dispatch", IEEE T-PWRS, Vo 1, 13, No. 2, May, 1998, pp. 601-610
- [5] E. De Tuglie, M. La Scala, and P. Scrapellini, "Real-Time Preventive Actions for the Enhancement of Voltage-De graded Trajectories" IEEE T-PWRS, Vol.14, NO.2, May, 1999, pp.561-568