

과도 안정도를 고려한 수송능력 산정 알고리즘의 개발에 관한 연구(II)

김용하*** · 이범** · 최상규** · 오석현**** · 조성린**** · 김미예***
인천대학교 전기공학과*** · 여수대학교 전기공학과** · 안양과학대학 전자통신정보학부* · 한국전력공사****

A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation Algorithm Considering Transient Stability (II)

Kim, Y.H.*** · Lee, Buhm** · Choi, S.K.** · Oh, S.H.**** · Jo, S.L.**** · Kim, M.Y.***
University of Incheon *** · Yosu National University** · Anyang Technical College* · KEPCO****

Abstract - The cost losing synchronous through a transient instability is extremely high in modern power systems. This paper presents a power transfer capability calculation algorithm considering transient stability. The theoretical development is straightforward: dynamic equations are converted to numerically equivalent algebraic equation and then integrated into the standard formulation for power transfer capability calculation. The proposed method is applied to IEEE-24 Reliability Test System and the results shows the effectiveness of the method.

1. 서 론

전력계통은 그 구조상 사고가 필연적일 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. 과도 안정도는 외란의 정도와 운전조건에 따라 달라지며 계통이 안정한가 불안정한가의 판별은 보통 외란 발생 후 약 1~2초 이내 결정된다. 이것은 실제 기기에서 제1차 동요가 안정될 때까지 주기가 대체로 1초 정도로 되기 때문이다.

동기발전기들이 동기속도에서 운전하면서 규정된 전기적 출력을 내는 정상적인 전력계통에서 낙뢰, 산불 등에 의한 지락 또는 단락 고장 등으로 인하여 동기 탈조하는 문제를 야기할 수 있으며 전력계통에서 이와 같은 과도 불안정을 통해서 동기를 잃는 경우 손실비용은 매우 크다. 따라서, 이러한 문제를 피하기 위하여 지금까지 많은 학자 및 기술자들에 의해 과도안정도분야에 대한 연구가 활발하게 진행되어져 왔다.[1,2,3] 본 연구에서는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 전력계통의 안전한 운전을 위하여 전력계통의 수송능력계산 문제에 과도안정도 제약조건을 고려할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위하여 본 연구에서는 과도안정도 문제를 수송능력을 고려할 수 있도록 먼저, 과도안정도 제약조건식을 정식화하였으며, 또한 과도안정도 제약조건식은 미분방정식을 포함하고 있으므로 이 제약조건을 곧바로 최적조류계산문제의 운전제약으로 사용하여 수송능력을 계산할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 trapezoidal rule[4]를 이용하여 미분방정식로 표현되는 제약조건식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환한 다음 수송능력계산문제의 과도안정도 운전제약조건으로 포함시켰다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 interior point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용시켜 본 연구의 타당성을 검증하고 각종 유용한 정보를 도출하였다.

2. 과도안정도

2.1 단단법

단단법(step by step method)이란 전력계통의 외란 발생시에 있어서 연속적으로 변동하는 입력력, 각속도 등의 계량이 아주 짧은 시간에서는 계단적으로 변화하는 것으로 생각하고, 각 계단마다 미소변화를 축차 계산해서 이것을 차례차례로 접속해 나가는 계산 방법이다. 즉, 임의의 동기기가 계통에 외란이 발생해서 입력력의 평형이 깨어지게 되면 각속도, 위상각이 이에 따라서 변동하게 되는데 이때의 변동 상황은 다음 식(1)의 동요방정식을 풀면 구할 수 있다.

$$\frac{d^2\delta_i}{dt^2} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad (1)$$

단. δ_i : 발전기 i 의 회전자의 위상각

f : 계통의 공칭 주파수, H_i : 발전기 i 의 관성정수

P_{mi} : 발전기 i 의 기계적 입력력

P_{ei} : 발전기 i 의 전기적 출력력

위의 식(1)에서 δ_i 는 단단법에서 다음 식(2),(3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta\delta_i^{(m+1)} = \Delta\delta_i^{(m)} + \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei})(\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$\delta_i^{(m+1)} = \delta_i^{(m)} + \Delta\delta_i^{(m+1)} \quad (3)$$

단. $P_{ei} = \frac{1}{X_{di}} (E_i V_i \cos \theta_i, \sin \delta_i - E_i V_i \sin \theta_i, \cos \delta_i)$

V_i : 발전기 i 가 포함된 모선의 전압의 크기

θ_i : 발전기 i 가 포함된 모선의 위상각

E_i : i 번째 발전기의 과도리액턴스 배후전압의 크기

X_{di} : i 번째 발전기의 과도리액턴스

Δt : 계산시간 interval

이를 통해서 계통의 외란 발생 후 1~2초 사이의 각 시점별로 각 발전기의 위상각의 변화를 구함으로써 그 계통이 외란 발생 후에도 안정한가 불안정한가를 판정할 수 있다.

2.2 과도안정도 제약조건

본 연구에서는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 전력계통의 안전한 운전을 위하여 전력계통의 수송능력계산 문제에 다음에 설명하는 과도안정도제약조건을 고려할 수 있는 방법을 제안한다. 먼저, classical model에 따르면 동요방정식은 다음식(5)로 정식화된다[6].

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i \quad (4)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - \frac{1}{X_{di}} (E_i V_i \cos \theta_i, \sin \delta_i - E_i V_i \sin \theta_i, \cos \delta_i)) \\ = K_i (P_{mi}, E_i, V_i \cos \theta_i, V_i \sin \theta_i, \delta_i, w_i) \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} G - B \\ B & G \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V \cos \theta \\ V \sin \theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_x \\ I_y \end{vmatrix} \quad (6)$$

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

위의 식(6)에서 i 번째 모선에 유입전류의 실수부분과 헤수부분은 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(7)로 표현된다.

$$\widehat{\delta}_i = \delta_i - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\lim} \quad (7)$$

단, ng : 발전기의 수, $\widehat{\delta}_i^{\lim}$: $\widehat{\delta}_i$ 에 대한 상한치

$\widehat{\delta}_i$: center-of-inertia(COI) reference frame에 관한 회전자 각도

결국 본 연구에서 과도안정도를 만족시키기 위한 운전제약조건은 식(4)~(6)의 등호제약조건과 식(7)의 부등호제약조건으로 구성된다. 지금, 식(4)~(6)로 표현되는 등호제약조건은 미분방정식이므로 곧바로 최적조류계산의 등호제약조건으로 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 이 미분방정식을 다음과 같이 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환하였다.

$$\delta_i^{m+1} - \delta_i^m - \frac{\Delta t}{2}(\omega_i^{m+1} + \omega_i^m) = 0 \quad (8)$$

$$\omega_i^{m+1} - \omega_i^m - \frac{\Delta t}{2}(K_i^{m+1} + K_i^m) = 0 \quad (9)$$

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

단, Δt : 적분스텝 길이, NT : 적분스텝의 수
그리고 식(6), (7)을 각각의 적분스텝에 대하여 구현하면 다음 식(10)~(12)과 같이 표현된다.

$$\sum_{k=1}^n (G_{ik} V_k^{m+1} \cos \theta_k^{m+1} - B_{ik} V_k^{m+1} \sin \theta_k^{m+1}) - I_{xi}^{m+1} = 0 \quad (10)$$

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

$$\delta_i^m - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j^m}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\lim} \quad (12)$$

3. 수송능력 계산문제

일반적으로 수송능력 계산문제는 주어진 부하 및 계통조건 하에서 연구지역에서 참여지역으로 또는 참여지역에서 연구지역으로 보낼 수 있는 최대전력수송능력을 계산하는 문제이며 다음과 같이 정식화된다.

$$\text{Max} \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (13)$$

S.t. 조류방정식

운전제약조건

제어변수의 상·하한

단, P_{ij} : 선로 $i-j$ 사이를 흐르는 유효전력

K : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(13)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적인 계산을 위하여 이와 관련된 수송능력계산문제를 다음과 같이 정식화하였다. 즉, 계통의 상태변수

를 x , 제어변수를 u 라 할 때, 주어진 운전상태 x^0, u^0 가 조류방정식의 해가 아닐 경우 조류방정식의 계산치 전력과 지정치 전력간에 편차가 발생한다. 이때, 모든 모선에 가상발전기를 배치시킨 다음, i 모선에서의 편차를 $P_{Mi} + Q_{Mi}$ 라고 하고, 이 편차를 i 모선의 가상발전기가 담당하도록 한다면, 이때, x^0 와 u^0 는 가상발전기 출력을 포함한 현재 계통의 운전조건을 나타낸다. 이 경우 조류방정식의 해는 가상발전기의 출력 P_{Mi} 와 Q_{Mi} 이 0으로 되도록 제어변수 u 를 제어함으로써 구해지게 된다. 즉, P_{Mi} 와 Q_{Mi} 를 줄여 나감에 따라 조류계산의 해가 구해질 수 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 수송능력 계산문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$\text{Max. } \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (14)$$

S.t. 전력평형식

운전제약조건

제어변수의 상한

단, μ : 가상발전기 출력의 가중치

$\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: 가상발전기 출력 변화량

4. 과도안정도제약조건을 고려한 수송능력계산문제의 정식화

앞의 식(14)로 구성되는 수송능력계산문제에 과도안정도 제약식을 고려하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화된다.

목적함수

$$\text{Max. } \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (15)$$

제약조건식

$$\sum P_{Gi} - P_L - q = 0 \quad \text{: 전력평형식} \quad (16)$$

$$V_{Di}^{\min} \leq V_{Di} \leq V_{Di}^{\max} \quad \text{: 부하모선 전압크기} \quad (17)$$

$$Q_{Gi}^{\max} \leq Q_{Gi}(X, U) \leq Q_{Gi}^{\min} \quad \text{: 발전기모선의 무효전력} \quad (18)$$

$$F_i(X, U) \leq F_i^{\max} \quad \text{: 선로피상조류} \quad (19)$$

과도안정도관련 제약조건: 식(8)~식(12)

단, P_L : 총계통부하

q : 총계통순실

X : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

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

제어변수관련 제약식

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad \text{: 변압기텝} \quad (20)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} \quad \text{: 발전기 모선전압} \quad (21)$$

$$b_{ci}^{\min} \leq b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} \quad \text{: 모든 Shunt Capacitor가 있는 모선 } i \text{ 에 대해} \quad (22)$$

$$b_{ri}^{\min} \leq b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} \quad \text{: 모든 Shunt Reactor가 있는 모선 } i \text{ 에 대해} \quad (23)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad \text{: 발전기의 유효전력출력} \quad (24)$$

본 연구에서는 과도안정도를 고려한 수송능력계산을 LP문제로 해결하였고 이 경우 비선형식의 선형화를 위하여 대규모 계통에서 계산속도와 정확도면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 이용하였다. 그리고 선형계획법을 사용한 최적화 모델에 포함되는 변수의 개수를 줄이기 위해서 가상발전기 출력 및 발전기의 출력을 각각 하나의 변수로 표현하여 계산량을 감소시키도록 하였다.

본 연구에서 제안한 과도안정도를 고려한 수송능력계산문제에 대한 계산 흐름도는 그림1과 같다.

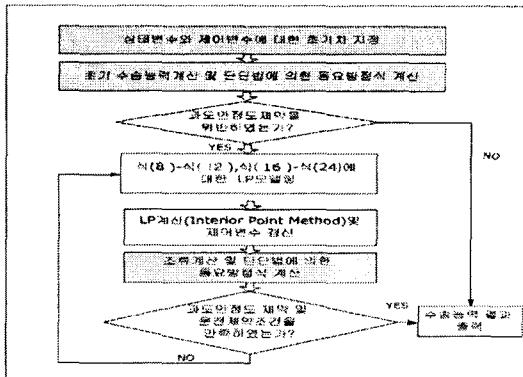


그림 1. 과도안정도를 고려한 수송능력 산정을 위한 흐름도

5. 사례연구

먼저, 그림2는 본 연구에서 사례연구를 위해서 적용한 IEEE RTS-24모델계통을 보여준다.

계통에서의 고장은 4번-9번 모선사이의 선로로 4번 모선에 근접한 곳에서 3상 단락사고가 발생한 것으로 가정하였다.

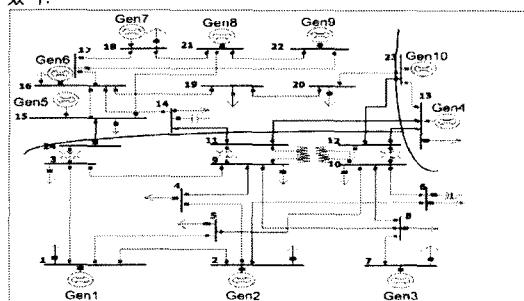


그림 2. RTS 24 모선 계통

그림3은 과도안정도 제약조건을 고려하지 않고 계산 초기 수송능력 계산후의 각 발전기에 대한 위상각의 변화를 보여 준다. 이 경우 3상 단락사고 발생시 0.4초 후에 고장을 제거하는 것으로 하였다. 그림3에서 알 수 있듯이 0.4초 후에 사고를 제거한 경우는 모든 발전기의 위상각이 본 연구에서 지정한 위상각 제한치인 100이하에서 안정화되는 것을 알 수 있다.

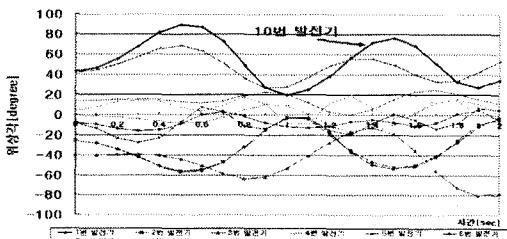


그림 3. 0.4초 고장제거시 발전기 위상각 변화

다음에 그림4,5는 각각 사고 발생 후 0.5초와 0.6초 후에 고장이 제거된 경우 각 발전기들에 대한 위상각의 변화를 보여 준다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 사례연구를 위해서 적용한 IEEE RTS-24모델계통에서는 0.5초 이후에 사고를 제거한 경우 10번 발전기의 위상각 제한치인 100을 위반하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 과도안정도를 고려한 수송능력 계산을 위해

서 5초 후에 사고가 제거되는 것으로 하였다.

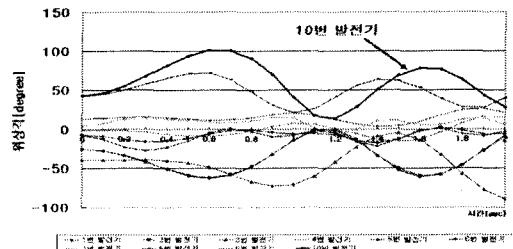


그림 4. 0.5초 고장제거시 발전기 위상각 변화

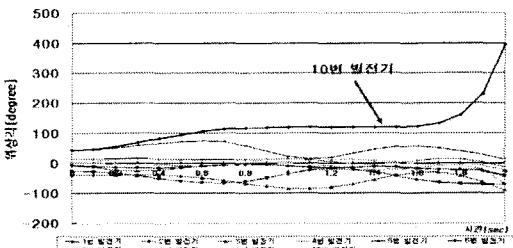


그림 5. 0.6초 고장제거시 발전기 위상각 변화

6. 결 론

본 연구에서는 과도 안정도 제약을 고려하여 수송능력을 산정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 즉 과도안정도 제약조건식을 정식화 하였으며 또한 과도안정도 제약 조건식은 미분방정식을 포함하고 있으므로 trapezoidal rule[4]를 이용하여 미분방정식으로 표현되는 제약조건식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환한 다음 수송능력계산문제의 과도안정도 운전제약조건으로 포함시켰다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 interior point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

감사의 글

“본연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 동북아 전자물류연구센터의 지원 및 산업자원부의 일부 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2004-B-132) 주관으로 수행된 과제임”

[참 고 문 헌]

- [1] M. La Scala, M. Trovato, and C. Antonelli, “On-line Dynamic Preventive Control: An Algorithm for Transient Security Dispatch”, IEEE T-PWRS, Vol. 13, No. 2, May, 1998, pp. 601-610
- [2] E. De Tuglie, M. La Scala, and P. Scapellini, “Real-Time Preventive Actions for the Enhancement of Voltage-Degraded Trajectories” IEEE T-PWRS, Vol.14, NO.2, May, 1999, pp.561-568
- [3] D. Gan, R. J. Thomas and R. Zimmermann, “Stability Constrained Optimal Power Flow” forthcoming in IEEE T-PWRS, 2000.
- [4] F. Alvarado, “Parallel solution of transient problems by trapezeoidal integration,” IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems, vol. 98, no. 3, pp. 1080-1090, May/June 1979
- [5] 조재한, 남광우, 김용하, 이범, 최상규 “Monte Carlo Simulation을 이용한 Power Wheeling 영향평가 알고리즘에 관한 연구”, KIEE Summer Annual Conference, pp 1111-1113, 7. 1999
- [6] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.