

과도 안정도를 고려한 수송능력 산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

김용하*** · 이범** · 최상규* · 조성림*** · 이재걸*** · 오석현*** · 김동근***
 인천대학교 전기공학과*** · 여수대학교 전기공학과** · 안양과학대학 전자통신정보학부*

A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation Algorithm Considering Transient Stability.

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

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.

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

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (1) \\ & \text{S.t.} \quad \text{조류방정식} \\ & \quad \text{운전제약조건} \\ & \quad \text{제어변수의 상·하한} \end{aligned}$$

1. 서 론

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 발생후 약 1~2초 이내 결정된다. 이것은 실제 기기에서 제1차 동요가 안정될 때까지 주기가 대체로 1초 정도로 되기 때문이다. 전력계통에서 외란에 의하여 과도기간 동안 동기기가 동기를 잃을 경우 감당해야 하는 경제적인 비용은 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 과도안정도문제를 수송능력에 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]을 이용하여 미분방정식으로 표현되는 제약조건식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환한 다음 수송능력계산문제의 과도안정도 운전제약조건으로 포함시켰다. 그리고 이와같이 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.

2. 수송능력계산문제

단, P_{ij} : 선로 i-j사이를 흐르는 유효전력
 K : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(1)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적인 계산을 위하여 이와 관련된 수송능력계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다. 즉, 계통의 상태변수를 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 $P_{Mi} + Q_{Mi}$ 라하고, 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 계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Max.} \mu \sum_i (| \Delta P_{Mi} | + | \Delta Q_{Mi} |) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} & (2) \\ & \text{S.t.} \quad \text{전력평형식} \\ & \quad \text{운전제약조건} \\ & \quad \text{제어변수의 상하한} \end{aligned}$$

단, μ : 가상발전기 출력의 가중치
 $\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$: 가상발전기 출력 변화량

3. 과도안정도제약조건을 고려한 수송능력계산문제의 정식화

(1) 과도안정도 제약

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, 고전적인 모델에 따르면 동요방정식은 다음 식(4)로 정식화된다(6).

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_i}{dt} &= \frac{\pi f_0}{2H_i} [P_{gi} - \frac{1}{X_{di}} (E_i V_{xi} \sin \delta_i - E_i V_{yi} \cos \delta_i)] \\ &= K_i(P_{gi}, E_i, V_{xi}, V_{yi}, \delta_i, w_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{vmatrix} G & -B \\ B & G \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_x \\ V_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_x \\ I_y \end{vmatrix} \quad (5)$$

단, G, B: 모선 어드미턴스 행렬의 실수, 허수 부분
 V_{xi}, V_{yi} : 모선전압의 유효, 무효부분을 포함하는 벡터
 E_{xi}, E_{yi} : i번째 발전기의 과도리액턴스 배후전압의 실수와 허수 부분
 f_0 : 계통 공칭주파수
 H_i : i번째 발전기의 관성
 w_i, δ_i : i번째 발전기의 회전자 각속도 및 각도
 X_{di} : i번째 발전기의 과도리액턴스

위의 식(5)에서 i번째 모선에 유입전류의 실수부분과 허수부분은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_{xi} &= \frac{E_i \sin \delta_i}{X_{di}}, I_{yi} = \frac{E_i \cos \delta_i}{X_{di}} \quad (\text{generator buses}) \\ I_{xi} &= 0, I_{yi} = 0 \quad (\text{nongenerator buses}) \end{aligned}$$

또한, 과도안정도를 만족시키기 위한 운전제약조건은 다음 식(6)로 표현된다.

$$\widehat{\delta}_i = \delta_i - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\text{lim}} \quad (6)$$

단, ng: 발전기의 수
 $\widehat{\delta}_i$: center-of-inertia(COI) reference frame에 관한 회전자 각도
 $\widehat{\delta}_i^{\text{lim}}$: $\widehat{\delta}_i$ 에 대한 상한치

결국 본 연구에서 과도안정도를 만족시키기 위한 운전 제약조건은 식(3)~(5)의 동호제약조건과 식(6)의 부동호제약조건으로 구성된다. 지금, 식(3)~(5)로 표현되는 동호제약조건은 미분방정식이므로 곧바로 최적조류계산의 동호제약조건으로 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 이 미분방정식을 다음과 같이 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환하였다.

$$\delta_i^{m+1} - \delta_i^m - \frac{\Delta t}{2} (w_i^{m+1} + w_i^m) = 0 \quad (7)$$

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

(m = 1, 2, ..., NT i = 1, 2, ..., ng)

단, Δt : 적분스텝 길이
 NT: 적분스텝의 수

그리고 식(5), (6)을 각각의 적분스텝에 대하여 구성하면 다음 식(9) ~ (11)과 같이 표현된다.

$$GV_x^{m+1} - BV_y^{m+1} - I_x^{m+1} = 0 \quad (9)$$

$$BV_x^{m+1} + GV_y^{m+1} - I_y^{m+1} = 0 \quad (10)$$

$$\delta_i^m - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j^m}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\text{lim}} \quad (11)$$

한편, 과도 리액턴스 배후에서의 복소출력은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \overline{E_i I_i}^* &= E_i e^{j\theta} [(E_i - \overline{V_i}) / jX_{di}]^* \\ &= \frac{E_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{X_{di}} + j \left[\frac{E_i^2}{X_{di}} - \frac{E_i V_i \cos(\delta_i - \theta_i)}{X_{di}} \right] \\ &= P_{gi} + jQ_{gi} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 식(12)로부터 회전자 각도의 초기값과 동요방정식의 파라미터를 계산하기 위해 필요한 방정식은 다음과 같다.

$$w_i^1 = 0 \quad (13)$$

$$E_i V_i \sin(\delta_i^1 - \theta_i) - P_{gi} X_{di} = 0 \quad (14)$$

$$E_i^2 - E_i V_i \cos(\delta_i^1 - \theta_i) - Q_{gi} X_{di} = 0 \quad (15)$$

$$G_{Load, i} = \frac{P_{Li}}{V_i^2} \quad (16)$$

$$B_{Load, i} = \frac{Q_{Li}}{V_i^2} \quad (17)$$

(i = 1, 2, ..., NB)

단, w_i^1 : i번째 발전기의 회전자 각속도 초기값
 $G_{Load, i}, B_{Load, i}$: 부하임피던스의 실수, 허수 부분
 NB: 모선 수

(2) 수송능력문제에 대한 과도안정도 제약식의 고려

앞의 식(2)로 구성되는 수송능력계산문제에 과도안정도 제약식을 고려하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화된다.

목적함수

$$\text{Max. } \mu \sum_i (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (18)$$

제약조건식

$$\sum_i P_{Gi} - P_L - q = 0 \quad \text{: 전력평형식} \quad (19)$$

$$V_{Di}^{\min} \leq V_{Di} \leq V_{Di}^{\max} \quad \text{: 부하모선 전압크기} \quad (20)$$

$$Q_{Gi}^{\max} \leq Q_{Gi}(X, U) \leq Q_{Gi}^{\min} \quad \text{: 발전기모선의 무효전력} \quad (21)$$

$$F_i(X, U) \leq F_i^{\max} \quad \text{: 선로피상주류} \quad (22)$$

식(7)~식(11), 식(13)~식(17)
: 과도안정도관련 제약조건

단, P_L : 총계통부하

q : 총계통손실

X : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

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

제어변수관련 제약식

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad \text{: 변압기 탭} \quad (23)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} \quad \text{: 발전기 모선전압} \quad (24)$$

$$b_{ci}^{\min} \leq b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} \quad \text{: 모든 Shunt Capacitor가 있는 모선 } i \text{ 에 대해} \quad (25)$$

$$b_{ri}^{\min} \leq b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} \quad \text{: 모든 Shunt Reactor가 있는 모선 } i \text{ 에 대해} \quad (26)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad \text{: 발전기의 유효전력출력} \quad (27)$$

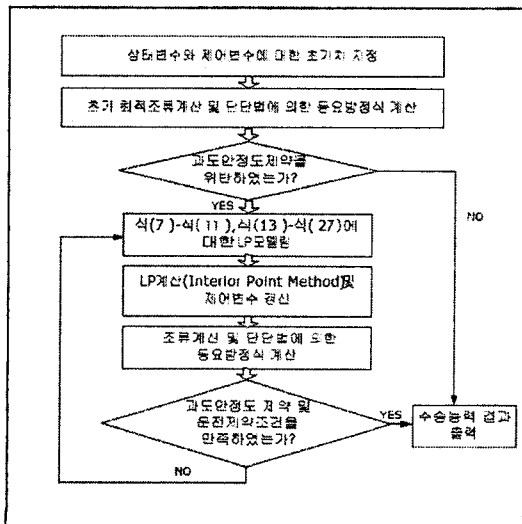


그림 1. 과도안정도를 고려한 수송능력산정을 위한 흐름도

본 연구에서는 식(7)~식(11), 식(13)~식(27)으로 구성되는 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 수송능력계산 문제에 대한 계산 흐름도는 그림1과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 과도 안정도 제약을 고려하여 수송능력을 산정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 즉 과도안정도 제약조건식을 정식화 하였으며 또한 과도안정도 제약조건식은 미분방정식을 포함하고 있으므로 trapezoidal rule(4)을 이용하여 미분방정식으로 표현되는 제약조건식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환한 다음 수송능력계산문제의 과도안정도 운전제약조건으로 포함시켰다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산 문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산을 선형화한 다음 interior point 방법을 이용한 LP문제로 수송능력계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 추후 본 알고리즘을 계통에 적용하여 검증해 보고 각종 유용한 정보를 도출하는 작업을 수행하고자 한다.

감사의 글

"본 연구는 한국과학기술원 지경 동북아전자공학부 연구센터의 지원으로 수행되었음"

[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. Scrapellini, "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 trapezoidal 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.