

최단전압붕괴점 전압안정도여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

김용하*** · 이범** · 최상규* · 정현성*** · 이성준*** · 조성린***
 인천대학교 전기공학과*** · 여수대학교 전기공학과** · 인양과학기술대학교 전자통신정보학부*

**A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation
 Algorithm Considering A Closest Saddle Node Bifurcation For Voltage Stability**

Kim, Y.H.*** · LEE, Buhm** · Choi, S.K.* · Jung, H.S.*** · Lee, S.J.*** · Jo, S.R.***
 University of Incheon *** · Yosu National University** · Anyang Technical College*

Abstract - This paper presents a power transfer capability calculation algorithm Considering A Closest Saddle Node Bifurcation For Voltage Stability Margin. In this method, voltage stability margin constraints considering a closest saddle node bifurcation are incorporated into a power transfer capability formulation to guarantee adequate voltage security levels in an interconnected Power System. The proposed method is applied to IEEE-24 Reliability Test System and the results shows the effectiveness of the method.

1. 서 론

최근, 송전망의 자유로운 접근(Open Access)과 같은 전력정책의 변화로 인하여 전력계통은 더욱 높은 부하상태에서 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. 전압안정도문제가 비교적 최근에 발생하는 현상일지라도 전력계통의 안전한 운전과 계획을 위하여 전압안정도 문제와 관련된 연구가 지금까지 활발하게 진행되어 왔다[1,2,3]. 한편, 전압붕괴점은 부하증가 방향에 따라서 달라질 수 있으며, 이 부하증가 방향에 따라서 최소의 사고로도 전압붕괴를 일으킬 수 있다.[4] 이와같은 문제를 해결하기 위해서는 전압안정도 여유를 고려한 계통계획 및 운전 시에 전압안정도여유에 대한 최단전압붕괴점을 반영하는 것이 필요하고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전력계통의 수송능력 산정문제에 대해 최단붕괴 전압안정도여유 제약을 고려할 수 있는 수송능력산정 알고리즘개발에 연구의 목적을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 최단전압안정도여유를 수송능력 계산문제에 고려할 수 있도록 전압안정도여유제약식을 정식화하였으며 또한 이와 같이 정식화된 전압안정도 여유제약식을 수송능력산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 interior point 방법을 이용한 LP문제에 수송능력계산을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용시켜 본 연구의 타당성을 검증하고 각종 유용한 정보를 도출하였다.

2. 최단전압붕괴점 전압안정도여유를 고려한 수송능력 계산문제의 정식화

(1) 최단전압붕괴점계산(4)

최단전압붕괴점계산은 현재 운전점에서 전압붕괴가 발생할 수 있는 최단거리에서 전압붕괴점을 계산하는 방법으로서 직접법과 반복법이 있다. 그림 1은 간단한 2모선 계통의 부하파라미터 공간을 도시한 그림이다. 그림 1에서 Σ 는 계통의 전압붕괴점의 집합인 특이곡면을 나타내고 있다. 지금, 현재 운전점 λ_0 에서 가장 가까운 전압붕괴점을 구하기 위해서는 전압붕괴점의 법선벡터(N_1)를 구한 뒤 이 법선벡터의 성분을 이용하여 최단전압붕괴점을 구한다. 기술한 법선벡터는 $\|N_1\|=1$ 을 만족하며 이때, 법선벡터의 성분들 중 부하모선의 유효부하와 관련된 성분은 N_1 라 한다면 이 성분은 다음에 설명하는 전압안정도여유제약에 반영된다. 다음은 본 연구에서 적용한 반복법(Iterative Method)으로 최단 전압붕괴점을 계산하는 계산과정을 나타낸다.

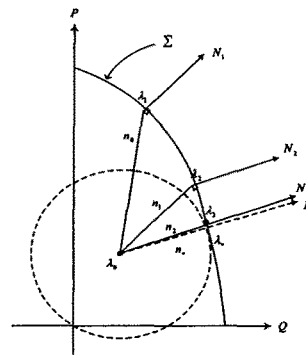


그림 1. 부하파라미터 공간
 Fig 1. Load Parameter Space

- (1) n_0 방향에 대해서 임의의 초기값 n_0 를 설정.
- (2) λ_i 가 특이곡면 상에 존재하도록 하기위해 전 단계의 단위 vector n_{i-1} 를 이용하여 λ_i 를 구한다. 이때 $\lambda_i = \lambda_0 + n_{i-1} l_i \in \Sigma$. (단, $l_i = |\lambda_i - \lambda_0|$)
- (3) $f(x_1, \lambda_1)$ 에서의 Jacobian 고유치 0에 대응되는 좌고유벡터 w_1 의 계산.
- (4) 법선벡터 $N(\lambda_i) = w_i f_{\lambda}$ 를 구하고 scaling factor α 를 이용하여 법선벡터에 대한 단위벡터 $n_i = \alpha w_i f_{\lambda}$ 를 결정.
- (5) 최단 붕괴점에서의 n_i 에 n_i 가 수렴할 때까지 (1)~(4)의 과정 반복.

(2) 최단전압붕괴점을 고려한 전압안정도 여유제약

본 연구에서는 최단 전압붕괴점 전압안정도 여유제약을 수송능력계산 문제에 반영하기 위하여 먼저, 전압안정도여유 VSM을 다음 식(1)과 같이 정의하였다.(1)

$$VSM = \frac{\sum_{i \in \Sigma} P_i^* - \sum_{i \in \Sigma} P_i^*}{\sum_{i \in \Sigma} P_i^*} \quad (1)$$

여기서, N : 현재 운전점
 L : 전압안정한계점
 P_j^L : 전압안정한계점에서 j 모선의 유효부하
 P_j^N : 현재 운전점에서 j 모선의 유효부하
 J_L : 부하모선의 집합

식(1)에서 안정한 초기 운전조건에 대하여 VSM은 0과 1사이의 값을 갖으며 전압안정한계점에서는 VSM은 0이다. 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.

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

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

그리고, 전압안정도 한계점에서의 i 모선의 유효부하 P_i 는 다음 식(3)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_i = \beta_i \left(\sum_{j \in J_L} P_j^L - \sum_{j \in J_L} P_j^N \right) + P_i^N \quad (3)$$

여기서, β_i : 계통 전체부하증가에 대한 부하모선 i 의 부하증가를

위의 식(3)에서 부하증가를 β_i 는 최단 전압붕괴점 계산시의 부하증가 방향으로 변화되어야 하므로 부하증가를 β_i 는 수정되어야 한다. 즉, 앞에서 설명한 최단 전압붕괴점을 계산을 위한 법선벡터 성분중 부하모선의 유효부하와 관련된 성분인 N_{β} 을 이용하여 부하증가를 β_i 는 다음과 같이 새로운 부하증가율인 α_i 로 변경된다.

$$\alpha_i = \beta_i * N_{\beta(i)} / \sum_{j \in J_L} \beta_j * N_{\beta(j)} \quad (4)$$

지금, 식(3)의 전압안정도 한계점에서의 i 모선의 유효부하 P_i 는 새로운 부하증가율인 α_i 를 이용하여 다음 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_i = \alpha_i \left(\sum_{j \in J_L} P_j^L - \sum_{j \in J_L} P_j^N \right) + P_i^N \quad (5)$$

위의 식(2)식와 (5)식으로부터 최단 전압붕괴점을 고려한 전압안정도 여유제약을 유도하면 다음식(6)과 같이 표현된다.

$$P_i^L \geq P_i^N + \frac{VSM^{spec}}{1 - VSM^{spec}} \alpha_i \sum_{j \in J_L} P_j^N = CP_i \quad (6)$$

(3) 수송능력문제에 대한 최단붕괴전압안정도 여유제약식의 고려

수송능력계산문제에 전압안정도 여유제약식을 고려하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화된다.[5] 이때, 제약조건식은 현재 운전점과 전압안정한계점에서의 운전 제약으로 구분된다. 또한 현재 운전점에서는 목적함수의 최대화를 만족하기 위한 제어변수로 사용되는 발전기 유효출력은 안정한계점에서는 전압안정도 여유계산 시 증가하는 부하에 대하여 수급조건을 만족시킬 수 있도록 증속적으로 변화하여야 하는 증속변수로서 제약조건으로 처리된다.

목적함수

$$Max. \mu \sum_{i,j} (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (7)$$

제약조건식

① 현재 운전점에서의 운전제약

$$\sum_i P_{Gi} - P_L - q = 0 \quad : \text{전력평형식} \quad (8)$$

$$V_{Di}^{min} \leq V_{Di}^N \leq V_{Di}^{max} \quad : \text{부하모선 전압크기} \quad (9)$$

$$Q_{Gi}^{max} \leq Q_{Gi}^N(X^N, U^N) \leq Q_{Gi}^{min} \quad : \text{발전기모선의 무효전력} \quad (10)$$

$$F_{ij}^N(X^N, U^N) \leq F_{ij}^{min} \quad : \text{선로피상조류} \quad (11)$$

여기서, μ : 가중치

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

P_{ij} : i 모선에서 j 모선으로 흐르는 유효전력조류

P_{Gi} : i 번째 발전기의 유효전력출력

P_L : 총 계통부하

q : 총 계통손실

X^N : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

U^N : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효출력)

② 최단붕괴전압안정도여유와 관련된 운전제약

$$P_i^L(X^L, U^L) \geq CP_i \quad : \text{전압안정도 여유제약조건} \text{의 유효부분} \quad (12)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^L(X^L, U^L) \leq P_{Gi}^{max} \quad : \text{전압안정한계점에서 발전기 모선의 유효전력} \quad (13)$$

여기서, X^L : 상태변수(부하모선 전압크기, 위상각)

U^L : 제어변수(변압기 탭, 발전기모선전압크기, 조상설비)

③ 제어변수관련 제약식

$$t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max} \quad : \text{변압기 탭} \quad (14)$$

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad : \text{발전기 모선전압} \quad (15)$$

$$b_{ci}^{min} \leq b_{ci} \leq b_{ci}^{max} \quad : \text{모든 Shunt Capacitor가 있는 모선 } i \text{에 대해} \quad (16)$$

$$b_{ri}^{min} \leq b_{ri} \leq b_{ri}^{max} \quad : \text{모든 Shunt Reactor가 있는 모선 } i \text{에 대해} \quad (17)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^N \leq P_{Gi}^{max} \quad : \text{발전기의 유효전력출력} \quad (18)$$

본 연구에서는 식(7)~식(18)으로 구성되는 수송능력 계산을 interior point 방법을 이용한 LP문제로 해결하였고 이 경우 비선형식의 선형화를 위하여 대규모 계통에서 계산속도와 정확도 면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 이용하였다.

3. 사례 연구

본 연구에서는 제안한 알고리즘을 IEEE RTS-24모델 계통에 적용시켜 각종 유용한 정보를 도출해 내었다. 표 1은 전압안정도 여유지정치 10%일 경우에 매 반복 계산시 마다 계산된 각 부하모선의 부하증가율인 α_i 를 보여주고 있다. 이 부하증가율은 최단전압붕괴방향으로 부하가 증가되도록 수송능력 계산 시 전압안정도 여유제약식에 사용된다. 다음에 그림 1은 10% 전압안정도 여유지정치에 대한 매 반복계산시 전압안정도 여유 및 수송능력의 수렴과정을 보여준다. 이 그림 1로부터 본 연구에서 제안한 방법은 7회의 반복계산만에 원하는 전압안정도 여유가 확보되는 수송능력이 계산된다는 것을 알 수 있다. 다음에, 그림 2는 기존의 연속조류계산법을 이용하여 계산된 주어진 전압안정도 여유지정치에 대한

전압안정도 여유와 수송능력의 변화를 보여준다.

표 1. 매 반복계산시의 각 부하모선의 부하증가율 α_i

	1	2	3	4	5	6	7
α_1	0.0670	0.0665	0.0730	0.0450	0.0325	0.0430	0.0361
α_2	0.0609	0.0604	0.0662	0.0409	0.0297	0.0391	0.0329
α_3	0.0718	0.0700	0.0763	0.0520	0.0432	0.0527	0.0474
α_4	0.1362	0.1348	0.1483	0.1083	0.0902	0.1043	0.0957
α_5	0.0468	0.0464	0.0502	0.0354	0.0286	0.0343	0.0306
α_6	0.0991	0.0982	0.1052	0.0834	0.0729	0.0813	0.0763
α_7	0.1535	0.1576	0.1672	0.2303	0.2662	0.2355	0.2561
α_8	0.2058	0.2106	0.2241	0.2978	0.3398	0.3034	0.3280
α_9	0.0798	0.0808	0.0887	0.0769	0.0709	0.0750	0.0726
α_{10}	0.1040	0.1023	0.1099	0.0933	0.0847	0.0918	0.0886
α_{14}	0.0053	0.0048	-0.0056	-0.0009	-0.0009	-0.0007	-0.0014
α_{15}	-0.0099	-0.0108	-0.0356	-0.0211	-0.0193	-0.0201	-0.0210
α_{16}	-0.0030	-0.0032	-0.0102	-0.0062	-0.0058	-0.0060	-0.0063
α_{18}	-0.0098	-0.0106	-0.0347	-0.0209	-0.0193	-0.0200	-0.0210
α_{19}	-0.0046	-0.0049	-0.0149	-0.0091	-0.0085	-0.0088	-0.0092
α_{20}	-0.0027	-0.0029	-0.0082	-0.0051	-0.0048	-0.0049	-0.0052

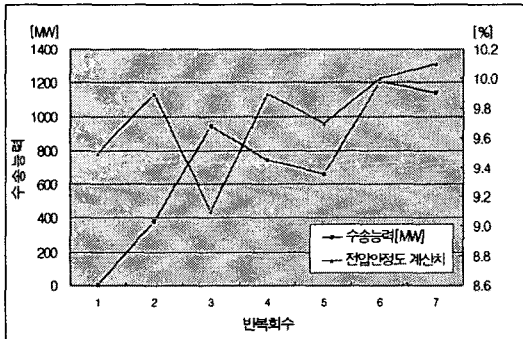


그림 1. 전압안정도 여유 및 수송능력의 수렴과정

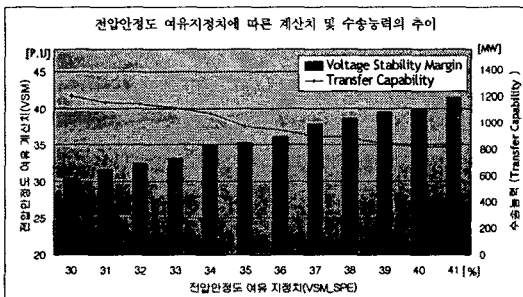


그림 2. 최단전압붕괴 전압안정도여유 불고려시의 전압안정도 여유지정치에 대한 계산치 및 수송능력

그리고, 그림 3은 최단 전압붕괴점 계산법을 이용하여 계산된 주어진 전압안정도 여유 지정치에 대한 전압안정도 여유와 수송능력의 변화를 보여준다. 이 그림 2와 그림 3으로부터 알 수 있듯이 최단 전압붕괴안정도여유를 반영하여 수송을 계산할 경우 최단 전압붕괴안정도여유를 반영하지 않는 경우에 비하여 전압안정도 여유확보면에서 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 최단 전압

붕괴안정도여유 불 고려 시에는 전압안정도 여유를 최대 41%까지 확보가 가능한 반면에 최단 전압붕괴안정도여유 고려 시에는 전압안정도 여유를 최대 10%까지 확보할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 이러한 결과로부터 전압안정도면에서 가장 심각한 방향으로 증가하는 부하까지 고려할 경우 수송능력 계산시에 최단전압붕괴 전압안정도여유를 고려하는 것이 현실적으로 바람직하다고 할 수 있다.

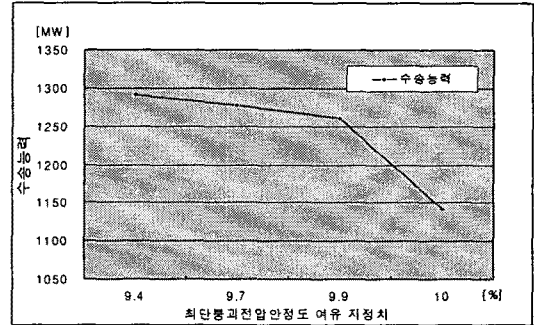


그림 3. 최단전압붕괴 전압안정도여유 고려시의 전압안정도 여유 지정치에 대한 수송능력

5. 결론

본 연구에서는 연계계통에서의 최단전압붕괴 전압안정도여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 본 연구에서는 최단전압안정도여유를 수송능력 계산문제에 고려할 수 있도록 전압안정도 여유제약식을 정식화하였으며 또한 이와 같이 정식화된 전압안정도 여유제약식을 수송능력산정문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 수송능력계산 방법을 통하여 전압안정도면에서 가장 심각한 방향으로 증가하는 부하상태까지 고려한 전압안정도 여유를 확보하면서 연계 계통으로 보낼 수 있는 수송능력을 효율적으로 계산할 수 있었다. 이후 이에 기초하여 실 계통에의 적용을 통해 실질적인 각종 정보를 도출하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

“본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-302-001-3) 지원 및 동북아전자물류 연구센터의 일부지원으로 수행되었음”

(참고 문헌)

- [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] C.A. Canizares, editor, "Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle node bifurcations", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Application, Vol.45, No.3, March 1998, pp.225-237
- [3] 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.
- [4] I. Dobson, and L. Lu, "New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load parameter margin for voltage collapse," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993.
- [5] 홍상은, 김용하, 이병, 최상규, 정현성, 문혁기, 이재걸, "전압안정도 여유를 고려한 수송능력산정 알고리즘의 개발에 관한 연구", KIEE Summer Annual Conference, pp 19-21, 7. 2002