

송전손실 상태식별법에 의한 정태 전압안정성 해석

°전 동훈, 김 정훈, 심 건보, 이 봉용
홍익대학교 공과대학 전기·제어공학과

Static Voltage Stability Analysis
based on T/L Loss System Identification

°Jeon Dong Hun, Kim Jung Hun, Shim Keon Bo, Lee Bong Yong
Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control

Abstract

The best index should show the margins to the operating limit at the present operating point without much efforts. Such voltage collapse proximity index has been proposed in this study. Differently from the normal procedure in which every bus load is increased at the same proportion, bus load increase toward the direction of T/L loss increase has been applied in this study.

Sample studies show the usefulness and the practical applicability in voltage stability analysis.

1. 서론

전압 붕괴현상 및 비정상적인 전압의 출현은 최근 냉방부하의 증가에 따른 부하 밀집지역에서의 비정상적인 전압저하와 그러한 계통전압 저하가 진전됨으로 인하여 중국에는 전계통 정전에까지 이르게 되는 매우 심각한 문제이다. 이러한 전압문제는 송전선로의 전력조류의 증가, 부하의 편중, 무효전력 공급원의 부족등과 깊은 관련을 갖는 것으로서 1970년대를 전후로 전압안정성(Voltage Stability)이라는 개념으로 불리워져왔다.

최근 심각하게 인식되고 있는 각계각층의 경제적, 사회적 욕구 증대 및 과소비 풍조에 기인하는 전력부하의 대도시 편중과 하계 피크시의 냉방부하의 급증으로 인하여 우리나라에서도 전압안정성 문제는 심각한 시점에 와있다. 선진각국이 경험한 대정전 사고를 피하기 위해서는 시스템의 전압붕괴점을 예측하고 현 운전상태의 전압안정성 판정에 관한 연구가 시급히 요청된다.

지금까지 국내외적으로 전압안정성에 대한 많은 연구 결과 [1]~[8]가 발표되었지만, 대규모의 전력시스템에 대한 일반적인 해석이 불가능하였고, 적절한 형태의 전압안정성 지표가 없어서 운전상태에 대한 안정성 여부의 판정이 미흡하였다.

본 연구에서는 송전손실 상태식별법을 이용하여 임의의 송전손실에 상응하는 전력시스템의 상태인 전압의 크기와 위상각을 식별하고, 송전손실의 증가에 따른 모션전력의 증감을 산출하여 시스템의 전압붕괴점을 예측하는 새로운 방법을 제안하였다. 이때 전압붕괴점에서 0의 값을 가지는 새로운 전압안정성 지표를 채택하여 현 운전상태의 안정성 여부를 판정하고, 이를 통하여 문제되는 시스템의 부분을 쉽게 식별하여 안정성 대책수립을 용이하게 하였다. 사례연구를 통하여 이 전압안정성 지표의 효용성을 입증하였다.

2. 송전손실 상태식별법

전력조류계산을 통하여 시스템의 상태를 결정하고 송전손실을 산출하는 것이 상례이지만, 역으로 시스템의 상태 정보를 내포하고 있는 송전손실을 사용하여 시스템의 상태인 전압의 크기와 위상각을 결정할 수 있다.

송전손실 상태식별법은 임의의 송전손실 P_L^s 에 대하여

$$P_L^s - P_L(V, \delta) = 0 \quad (1)$$

여기서,

P_L^s : 임의의 지정된 송전손실

$P_L(V, \delta)$: 시스템의 전체 송전손실

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \{-V_i^2 G_{ij} + V_i V_j G_{ij} \cos \delta_{ij}\} \quad (n: \text{모션수})$$

을 만족하는 V, δ 을 결정하는 방법으로서 문제의 해결을 위하여 위의 식 (1)은

$$\min L = (P_L^s - P_L(V, \delta))^2 \quad (2)$$

와 같이 지정값과 계산값과의 차를 최소화하는 최적화 문제로 바꿔 표현될 수 있으며 식 (2)의 해는 다차 다변수 방정식의 해법인 뉴우튼법을 사용하여 반복적으로 계산될 수 있다. 이때 초기값으로 고려대상 계통의 전력조류계산에 의한 결과치를 사용하는데 뉴우튼법에 의해 미소변경된 해가 초기값부근의 값이고 이 초기값에 대한 Gradient 와 Hessian 이 유일(Ultimate)하므로 송전손실 상태식별법에 의한 시스템의 상태 V, δ 또한 유일하다고 말할 수 있으며, 이는 시뮬레이션 결과로서도 입증되었다.

3. 전압안정성 해석

3.1 수학적 정식화

송전손실 상태식별법을 이용하여 시스템의 전압안정성을 판별하기 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$\min L = (P_L^s - P_L(V, \delta))^2 \quad (3)$$

Subject to

$$\begin{aligned} P_i^s - P_i^c &= 0 \\ Q_i^s - Q_i^c &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \\ Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

위의 문제는 전압붕괴점을 찾기 위하여 송전손실을 임의로 지정해가며 그에 해당하는 V, δ을 결정하는 최적화 문제로 동호제약조건은 부하모선의 역률을 고려하기 위하여, 부동호 제약조건은 발전기의 P, Q출력의 상하한을 고려하기 위하여 도입되었는데 이를 라그란지 미정계수법을 사용하여 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min L = & (P_L^s - P(v, \delta))^2 \\ & + \sum_{i \in S} \lambda_{Q_i} (Q_i^s - Q_i^c) \\ & + \sum \lambda_{P_i} (P_i^{\max} - P_i^c) \\ & + \sum \lambda_{Q_i} (Q_i^{\max} - Q_i^c) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$\lambda_{P_i}, \lambda_{Q_i}$: 라그란지 미정계수
S : 부하역률을 고려한 모선집합

3.2 초기값의 선정

식 (6)의 해를 구하기 위하여 먼저 제약조건이 고려되지 않은 상태의 목적함수에 대해 고려대상 계통의 전력조류 계산의 결과치를 초기치로 사용하여 식 (3)에 대한 V, δ의 초기값을 결정한다. 즉, 식 (2)로부터 뉴우븐법에 의하여

$$\nabla L(V, \delta) = -2(P_L^s - P_L(v, \delta)) \frac{\partial P_L}{\partial (v, \delta)} = 0 \quad (7)$$

위의 식은 다시

$$\Delta(V, \delta) = - \frac{\nabla L(V^0, \delta^0)}{\nabla L^2(V, \delta)} \quad (8)$$

가 된다. 이와같은 관계를 일반적인 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L^2}{\partial \delta_i \partial V_j} & \frac{\partial L^2}{\partial \delta_i \partial \delta_j} \\ \frac{\partial L^2}{\partial V_i \partial V_j} & \frac{\partial L^2}{\partial V_i \partial \delta_j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \delta} \\ \frac{\partial L}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta(V, \delta) = -H^{-1} \cdot G \quad (10)$$

여기서,

H : Hessian 행렬 G : Gradient 벡터

식 (10)으로부터 ΔV, Δδ을 구하여 V, δ을 수정, 반복계산함으로써 식 (2)를 만족하는 초기값을 결정한다.

3.3 부동호 동호제약조건에 고려

초기값의 선정과정에서 식별된 V, δ에 의해 각 모선별로 P_i^c, Q_i^c 를 계산하는데, 이때 발전기 모선에 대하여는 부동호 제약 조건을 고려하여 제약조건 위반시 모선출력을 상한값에 고정시키고 ($P_i^{\max} - P_i^c$)와 ($Q_i^{\max} - Q_i^c$)를 0으로 하는 V, δ을 결정한다. 부하모선에 대하여는 부하역률을 고려하여 Q_i^s 값을 다시 계산한 다음 ($Q_i^s - Q_i^c$)를 0으로 하는 V, δ을 결정하게 된다. 이때 라그란지 미정계수법을 도입할 경우에는 수렴속도가 떨어지기 때문에, 분할전력조류계산법으로서 V, δ을 결정한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p & 0 \\ 0 & J_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)로부터 ΔV, Δδ을 구하여 V와 δ을 수정하고 목적함수가 최소화되도록 반복계산을 수행한다. 그러나, 위의 방법은 전압붕괴점 근방에서 자코비안 행렬의 역행렬을 구할 수 없다는 단점이 있다.

3.4 계산과정

이상의 계산과정을 그림 1에 나타내었다.

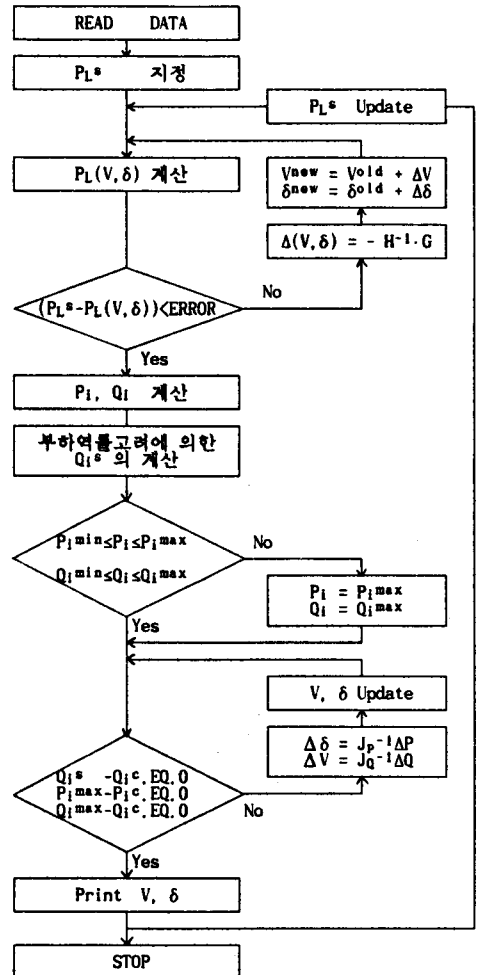


그림 1. 계산의 흐름도

4. 전압안정성 지표의 개발

전압안정성의 해석을 위하여 송전손실을 증가시켜 가며 각각의 경우에 대한 V, δ을 결정하는데, 이때 각 부하모선별로 $(|\Delta P_i / \Delta V_i|)^{1/2}$ 와 $(|\Delta Q_i / \Delta V_i|)^{1/2}$ 를 새로운 전압안정성 지표로 정한다. 전압안정성 지표에 대한 기준값(100%)은 $(|\Delta P_i / \Delta V_i|)^{1/2}$, $(|\Delta Q_i / \Delta V_i|)^{1/2}$ 와 송전손실의 기울기를 이용하여 근사적으로 구하며, 이 값을 기준으로 하여 각 운전상태별 모선의 전압안정성 여유를 판정한다.

5. 사례연구

5.1 6모선 시스템

그림 2와 같이 3대의 발전기(모선 1, 2 및 3, 단 모선 1은 Slack)와 3개의 부하모선(모선 4, 5, 6)으로 구성된 6모선 시스템을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

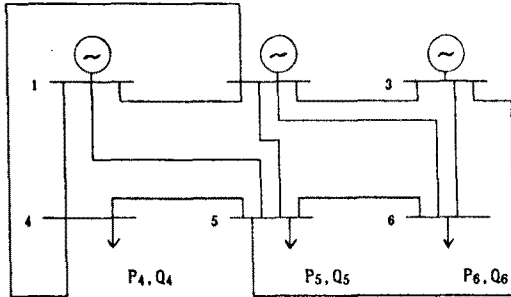


그림 2. 6모선 시스템

5.1.1 제약조건을 고려하지 않은 경우

송전손실을 증가시키면서 송전손실 상태식별법에 의해 각 송전손실별 전압의 크기 V_i 와 위상각 δ_i 를 식별하였고, 이를 통해 유효전력 P_i 와 무효전력 Q_i 를 계산하였다. 이 값들에 의한 모선별 P-V & Q-V곡선은 다음과 같다.

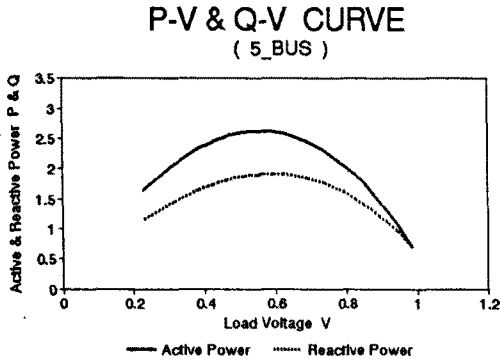


그림 3. P-V & Q-V 곡선

한편 각 단계별로 부하모선별 $\Delta P_i / \Delta V_i$ 와 $\Delta Q_i / \Delta V_i$ 를 계산하였는데, 이 값들과 송전손실과의 관계를 그림 4에 나타내었다.

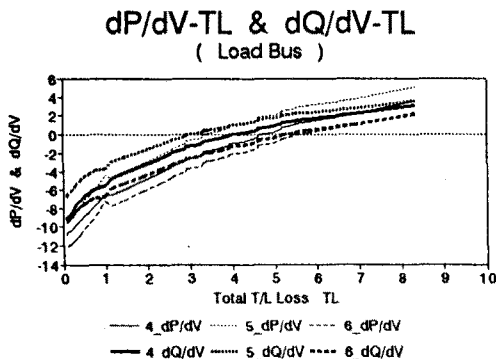


그림 4. $\Delta P_i / \Delta V_i$ 및 $\Delta Q_i / \Delta V_i$ 과 P_L 의 관계

위의 그림으로부터 어떤 모선전력이 먼저 전압붕괴점에 도달하는지 쉽게 판별할 수 있다.

5.1.2 제약조건을 고려한 경우

송전손실 상태식별법에 의한 P-V & Q-V곡선은 다음과 같다.

P-V & Q-V CURVE (6_BUS)

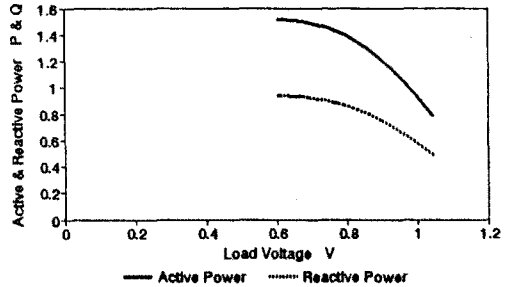


그림 5. P-V & Q-V 곡선

제약조건을 고려하지 않은 경우와 비교해 볼때, 전압붕괴점에 근접이후의 계산수행이 곤란함을 보여준다. 단계별로 $\Delta P_i / \Delta V_i$, $\Delta Q_i / \Delta V_i$ 와 송전손실과의 관계는 그림 6과 같다.

dP/dV-TL & dQ/dV-TL (Load Bus)

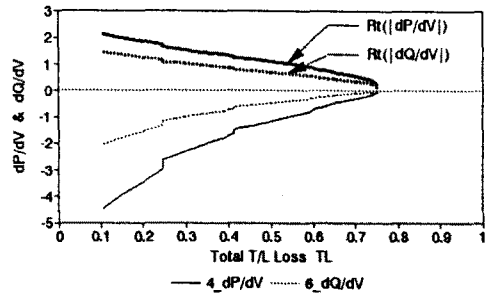


그림 6. $\Delta P_i / \Delta V_i$ 및 $\Delta Q_i / \Delta V_i$ 와 P_L 과의 관계

제약조건을 고려하지 않은 경우에서처럼 전압붕괴점부근에서 0에 근접한 값이 될을 알 수 있고, 부동호 제약조건의 동작을 쉽게 판별할 수 있다.

그림 6으로부터 시스템의 전압안정성 여유를 판정하기 위하여 $(|\Delta P_i / \Delta V_i|)^{1/2}$ 와 $(|\Delta Q_i / \Delta V_i|)^{1/2}$ 의 새로운 전압안정성 지표를 도입하였는데, 송전손실과의 관계를 아래의 그림에 표시하였다.

Rt(dP/dV)-TL & Rt(dQ/dV)-TL (Load Bus)

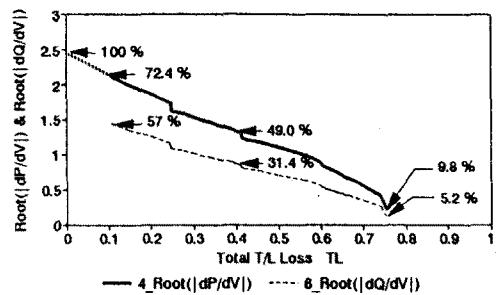


그림 7. 전압안정성 지표 설명도

그림에 나타난 바와 같이 가장 상태가 좋은 모선을 선택하여 근사적인 방법으로 새로운 안정성 지표에 대한 기준값(100%)을 결정하였으며, 운전상태별로 전압안정성 여유를 판정하였다. 운전상태별 전압안정성 지표는 표 1과 같다.

표 1. 전압안정성 지표

$(\Delta P_6/\Delta V_6)^{1/2} = 2.39813 (100\%)$ (단위 : %)

Total T/L Loss	4번 모선		5번 모선		6번 모선	
	P	Q	P	Q	P	Q
.07873	91.0	71.6	81.8	64.4	78.5	61.8
.10712	88.2	69.4	79.2	62.3	76.0	59.9
.20366	77.3	60.8	68.5	53.9	66.0	52.0
.24549	72.2	54.6	63.7	50.1	57.6	45.3
.24578	68.1	53.8	59.7	46.9	59.0	46.4
.27818	65.7	51.7	57.6	45.4	55.4	43.6
.29727	63.6	50.1	55.6	43.7	53.5	42.1
.33996	60.2	47.4	52.3	41.2	50.4	39.6
.36411	58.4	46.0	50.5	39.8	48.6	38.3
.40501	54.6	42.9	46.9	36.9	45.1	35.5
.45864	49.0	38.6	41.7	32.9	39.9	31.4
.56115	41.2	32.5	34.6	27.3	33.1	26.0
.59893	36.7	28.9	30.6	24.1	29.2	23.0
.63847	31.0	24.4	25.6	20.2	24.3	19.2
.70284	22.9	18.0	18.7	14.8	17.8	13.9
.74141	17.3	13.6	14.0	11.1	13.3	10.5
.75193	10.6	8.4	8.8	6.6	8.2	6.3
.75347	9.8	6.9	5.7	5.7	7.4	5.2

참고로 Base Case에 대한 각 부하모선의 상태를 표 2에 나타내었다.

표 2. Base Case의 전압안정성 지표

Total T/L Loss = .07873 (p.u.)

도 선	전 압 (p.u.)	전 력 (p.u.)		전압안정성지표(%)	
		P	Q	P	Q
4	1.01524	.79899	.49517	91.0	71.6
5	1.01704	.79949	.49548	81.8	64.4
6	1.03797	.80136	.49664	78.5	61.8

5.2 25모선 시스템

25모선 시스템의 두가지 운전상태에 대한 전압안정성 여유 판정을 하여 전압안정성 지표를 표 3, 4에 나타내었다.

표 3. Case 1의 전압안정성 지표

$(\Delta P_{24}/\Delta V_{24})^{1/2} = 3.40035 (100\%)$

Total T/L Loss = .17668 (p.u.)

도 선	전 압 (p.u.)	전 력 (p.u.)		전압안정성지표(%)	
		P	Q	P	Q
1	.95970	.25000	.15493	40.5	31.8
2	.98283	.15000	.09296	43.3	34.1
3	.94869	.30000	.18592	54.8	43.1
4	.96628	.14999	.09296	56.8	44.8
5	.95359	.15000	.09296	39.2	30.9
6	.97117	.04999	.03098	25.4	19.9
7	.96474	.10000	.06197	35.0	27.6
8	.97348	.24999	.15493	66.0	52.0
9	.92721	.20000	.12394	39.2	30.8
10	.95150	.15000	.09296	30.0	23.6
11	.96893	.15000	.09296	47.0	37.0
12	.96532	.25000	.15493	73.2	57.6
13	.92770	.30000	.18592	47.8	37.6
18	.96690	.15000	.09296	45.5	35.8
19	.97276	.15000	.09296	46.2	36.4
20	.96461	.19999	.12394	45.6	35.9
21	.95511	.20000	.12394	39.0	30.7
22	.99221	.14999	.09295	85.0	66.8
23	.96370	.24999	.15493	55.4	43.6
24	.97596	.59999	.37184	94.0	74.0

표 4. Case 2의 전압안정성 지표

$(\Delta P_{24}/\Delta V_{24})^{1/2} = 3.40035 (100\%)$

Total T/L Loss = .28689 (p.u.)

도 선	전 압 (p.u.)	전 력 (p.u.)		전압안정성지표(%)	
		P	Q	P	Q
1	.92634	.31046	.19241	38.1	30.0
2	.96561	.18616	.11537	41.4	32.6
3	.92657	.37449	.23208	52.5	41.3
4	.95646	.18590	.11521	55.5	43.7
5	.93266	.18623	.11541	37.7	29.7
6	.95436	.06210	.03848	24.3	19.1
7	.94716	.12417	.07695	33.5	26.4
8	.96117	.31027	.19229	63.6	50.0
9	.89945	.24727	.15324	37.0	29.1
10	.91539	.18617	.11538	28.3	22.3
11	.95437	.18606	.11531	45.0	35.4
12	.95551	.31005	.19215	71.8	56.5
13	.89972	.37071	.22974	44.9	35.4
18	.95123	.18626	.11543	43.5	34.2
19	.95765	.18623	.11541	44.3	34.9
20	.94390	.24825	.15385	43.6	34.3
21	.92672	.24804	.15372	37.0	29.1
22	.98772	.18576	.11513	78.7	61.9
23	.94614	.31042	.19238	53.0	41.7
24	.96127	.74502	.46172	89.7	70.6

5. 결론

전압안정성 해석을 위한 새로운 접근을 시도한 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 전압안정성 해석을 위한 모선부하 증가를 송전손실에 증가하는 방향에 따라 결정하였다.
- 2) 지정 송전손실에 상응하는 상태식별법에 따라 시스템의 상태가 결정됨을 보였다. 이 방법에 의하면 전압붕괴 근접점까지의 상태결정이 용이함을 확인하였다.
- 3) 새로운 전압안정성 지표를 제시하였으며, 제시된 지표는 단순히 현 운전점이 몇 %의 여유를 갖고 있는가를 알려줌으로써, 정상운전중 유용한 정보를 제공한다.
- 4) 6모선 및 25모선 시스템 사례연구에 의하여
 - 전압안정성 해석 방법
 - 전압안정성 지표의 유용성을 제시하였다.

6. 참고문헌

[1] K.Graf, "Dynamic Simulation of Voltage Collapse Processes in EHV Power System", EPRI Report EL-6183, pp. 6-45~6-54, 1989.

[2] M.Chau, R.Gutman and B.M.Pasternack, "Understanding Voltage Collapse in Bulk Transmission Systems", EPRI Report EL-6183, pp.3-45~3-62, 1989.

[3] V.A.Venikov, V.A.Stroev, V.I.Idelchick & V.I.Tarasov, "Estimation of Electric Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-94, No.3, 1975.

[4] J.Capentier, R.Girard & E.Scano, "Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow", Preceeding of 8th PSCC, 1984.

[5] H.Glavitsch & P.Kessel, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", 1985 PICA Conference 1985.

[6] Tay.H.Jung & Kern.J.Kim, "A Marginal Analysis of the Voltage Stability with Load Variations", Trans. in 10th Power System Computation Conference, No. 33, 1990.

[7] 김준현 & 서의석, "전력계통에 있어 부하의 전압 특성을 고려한 정적전압붕괴 근접도에 관하여", 대한전기학회 논문지 40권 10호, pp.1007-1018, 1991.

[8] 이상중, "손실감도 분석에 근거한 전력계통의 전압붕괴 근접도 산정에 관한 연구", 석사학위 논문, 충남대학교, 1992.