

간략조류계산법과 전압안정도 평가에 관한 연구

송 길영[◎] 김 세영[◎]
* 고려대학교 전기공학과

A Study on Finding of Simplified Multiple Load Flow Solutions and Evaluating of Voltage Stability

Kil-Young Song* Sae-Young Kim[◎]
* Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.

ABSTRACT

This paper presents a new simplified method for finding the multiple load flow solutions and through their solutions the voltage stability can be evaluated. Line flow (P_{ij} , Q_{ij}) may be formulated with the second-order equations for V_i^2 in polar coordinates or two circle equations for e_i and f_i in rectangular coordinates. Based on this feature, multiple load flow solutions are calculated with simple works. results of multiple load flow solutions are used for sensitivity analysis of voltage stability. Also, in the case that reactive power sources is considered, method of evaluating the voltage stability is introduced. The proposed method was validated to 2-bus and IEEE 6-bus system.

1. 서론

최근에, 전력수요의 급증에 대처하기 위해 전력계통은 원격화, 대규모화, 그리고 더욱 복잡화 되고 있는 설정이다. 이에 따라 계통운용에서의 안정도 문제는 종래의 발전기에 대한 안정도 문제 뿐만 아니라 부하 급증시 무효전력의 부족으로 인해 되는 전압불안정 문제를 주요하게 대두되고 있다. 이러한 전압불안정 문제는 조류다른과 밀접한 관련이 있는데 한쌍의 조류다른이 만나는 점을 정적인 전압안정도의 한계점이라고 보고 있다. 즉, 높은해(조류계산 결과)와 낮은해(조류다른 계산을 통해 구해진 낮은해(불안정 평형점))는 상호 균형도 등을 통해 전압안정도를 평가할 수 있는 중요한 자료가 되고 있고 이와 관련해서 전압안정도를 평가하는 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

문헌⁽¹⁾의 조류다른법은 높은해 전압을 계통특성에 따라 단위량 만큼 감소시켜 이에 대한 위상상 변화를 계산하고 이것을 다중계산 조류계산의 초기치로 사용하고 있다. 문헌⁽²⁾는 모선 i의 P_i 와 Q_i 를 e_i 와 f_i ($V = e + jf$)에 대한 두개의 원의 방정식으로 정리하고 그 교차점을 2nd 개 조합시켜 조류다른 계산의 초기치로 하고 있다. 그리고, 문헌⁽³⁾의 방법은 조류계산식을 배수(multiplier)의 3차 방정식으로 정식화하여 운전상태가 한계점에 접근하면 이중 하나의 배수가 다중계산용 조류계산의 초기치에 사용할 수 있다는 사실을 이용하고 있다.

본 논문에서는 현재 운전점의 조류계산 결과인 전압(높은해)과 선로조류값을 사용하여 빠르고 간단히 수치계산할 수 있는 조류다른 계산법을 제시한다. i 모선과 j 모선으로 흐르는 선로조류 P_{ij} 와 Q_{ij} 는 상대변수($V_i, \delta_i, V_j, \delta_j$)와 선로정수($r_{ij}, x_{ij}, \text{Tap 값}$)로 구성되고 광범위한 형태의 방정식 특성상 이 두식은 변수 δ_i 와 δ_j 가 빠진 V_i 와 V_j 만으로 구성되는 (V_i^2)에 대한 하나의 2 차 방정식으로 된다. 특히, j 모선이 slack 모선 또는 발전기모선이라고 생각하면 V_i 는 상수이므로 방정식은 1 개 변수 V_i 에 대한 1 개 방정식이 되므로 두개의 각 단위 계산되는데 그중 하나는 높은해가 되고 다른 하나는 낮은해가 된다. 이밖에, 다중계산식을 사용하여 변압기 템파 조상설비(Q_C)등이 고려되었을 때 전압안정도에 미치는 효과를 평가할 수 있는 방법들을 제시한다.

제안한 알고리즘을 시험계통에 적용하여 유용성을 검증하였다.

2. 모선

2-1. 조류다른 계산법의 정식화

2-1-1. 2-모선 계통

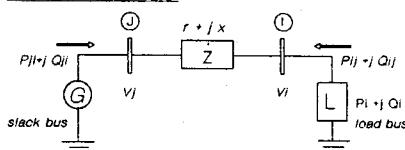


그림 1. 2 - 모선 계통

2-1-1(a). 그림 표제

그림 1 과 같은 2-모선 계통에서 선로조류 P_{ij} , Q_{ij} 는

$$\begin{aligned} S_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij} \\ &= \frac{V_i^2 - V_i V_j \angle \delta_{ij}}{r - jx} \quad (\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j) \end{aligned} \quad (1)$$

그러므로, (1)식은 아래와 같이 되고

$$(P_{ij} + jQ_{ij})(r - jx) = V_i^2 - V_i V_j \angle \delta_{ij}$$

위식의 양변을 실수부와 허수부에 대해 전개하면

$$\begin{aligned} (rP_{ij} - xQ_{ij} - V_i^2) + j(rQ_{ij} - xP_{ij}) \\ = -V_i V_j \cos \delta_{ij} - j V_i V_j \sin \delta_{ij} \end{aligned}$$

양변의 실수부와 허수부를 각각 같다고 놓으면

$$rP_{ij} + xQ_{ij} - V_i^2 = -V_i V_j \cos \delta_{ij} \quad (2)$$

$$rQ_{ij} - xP_{ij} = -V_i V_j \sin \delta_{ij} \quad (3)$$

그리고, (2), (3)식의 양변을 제곱하여 더해주면 변수 δ_i , δ_j 가 빠진 V_i 와 V_j 만의 식으로 된다.

$$(rP_{ij} + xQ_{ij} - V_i^2)^2 + (rQ_{ij} - xP_{ij})^2 = (V_i V_j)^2 \quad (4)$$

결국, (4)식은 다음과 같이 (V_i^2)의 2차 방정식으로 정의된다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(rP_{ij} + xQ_{ij}) - V_i^2 \\ c_i = (rP_{ij} + xQ_{ij})^2 + (rQ_{ij} - xP_{ij})^2 \end{cases}$$

(5)식에서 V_i 에 대한 해가 4 개가 되지만 음의 부호를 갖는 것을 제외하면 2 개가 구해진다. 이 식에서 P_{ij} 와 Q_{ij} 는 조류계산 결과치, r 과 x 는 선로정수이고, V_i 는 조류계산 결과 즉, 높은해 전압값이지만 j 모선은 slack 모선이기 때문에 상수로 고정된다.(발전기모선의 경우도 상수로 고정되므로 동일하다.) 그러므로, 구해진 두개의 해 중 하나는 높은해 전압(조류계산 결과)이고 나머지는 낮은해 전압이되고 구해진 두개의 전압(V_{ih} , V_{jh})을 (2) 또는 (3)식에 대입하면 전압위상각에 대한 다중이 계산된다. 여기서, j 모선이 slack 모선이므로 δ_j 는 0 이 된다.

2-1-1(b). 그림 표제

그림 1 과 같은 2-모선 계통에서 직각 좌표계($V_i = e_i + jf_i$)의 선로 조류 P_{ij} , Q_{ij} 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij} \\ &= V_i (V_i - V_j)^*(Y_{ij})^* \\ &= V_i (V_i - V_j)^*(-Y_{ij})^* \\ &= (e_i + jf_i)(e_i + jf_i - e_j - jf_j)^*(-G_{ij} - jB_{ij})^* \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식을 P_{ij} 와 Q_{ij} 에 대해 정리하면

$$\begin{aligned} P_{ij} &= (-G_{ij}) e_i^2 + (e_i G_{ij} - f_i B_{ij}) e_i \\ &+ (-G_{ij}) f_i^2 + (f_i G_{ij} + e_i B_{ij}) f_i \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= (B_{ij}) e_i^2 + (-e_i G_{ij} - f_i B_{ij}) e_i \\ &+ (B_{ij}) f_i^2 + (-f_i G_{ij} + e_i B_{ij}) f_i \end{aligned} \quad (8)$$

(7), (8)식 즉, P_{1j} , Q_{1j} 방정식은 e_i 와 f_i 에 대한 두개의 원의 방정식으로 다음과 같이 정의한다. (9), (10)식으로 표현되는 두개의 원의 방정식의 교점이 두개의 해, 높은해와 낮은해가 된다.

$$(e_i + a_1)^2 + (f_i + a_2)^2 = r_1^2 \quad (9)$$

$$(e_i + b_1)^2 + (f_i + b_2)^2 = r_2^2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{e_i G_{ij} - f_i B_{ij}}{-2G_{ij}} \\ a_2 = \frac{f_i G_{ij} + e_i B_{ij}}{-2G_{ij}} \\ = \frac{P_{ij}}{G_{ij}} + a_1^2 + a_2^2 \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = \frac{-e_i B_{ij} - f_i G_{ij}}{2B_{ij}} \\ b_2 = \frac{-f_i B_{ij} + e_i G_{ij}}{2B_{ij}} \\ = \frac{Q_{ij}}{B_{ij}} + b_1^2 + b_2^2 \end{cases}$$

2-1-2. n-모선 계통(일반적인 예)

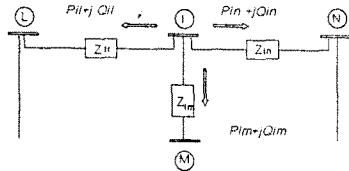


그림 2. n-모선 계통

그림 2 와 같은 일반적인 n-모선 계통에서 부하모선 i는 조류계산 결과(높은해)인 $V_i < \delta_1$, $V_i < \delta_n$, $V_n < \delta_n$ 와 선로조류 $P_{1i} + j Q_{1i}$, $P_{ni} + j Q_{ni}$, $P_{in} + j Q_{in}$ 을 사용하여 조류다른을 계산한다. 즉, i 모선에서는 i-1, i-n, i-n 선로당 2개씩 총 6개의 해가 나오지만 2개씩 중의 하나는 높은해 전압이 되기 때문에 최대 3개의 낮은해 전압이 나올 수 있다. 다음에, 구해진 다른은 인접모선 1, m, n에서 조류다른을 위한 계산치로 차례차례로 사용된다. 이와같이 구한 다른중 낮은해(낮은해 전압은 높은해에 비해 크기가 작다.)라고 판정할 수 있는 것 만을 저장한다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0$$

$$\begin{cases} a_i = 1 \\ b_i = -2(r_i P_{ij} + x_i Q_{ij}) - V_j^2 \\ c_i = (r_i P_{ij} + x_i Q_{ij})^2 + (r_i Q_{ij} - x_i P_{ij})^2 \end{cases}$$

$$(j = 1, m, n) \quad (11)$$

2-1-3. 변압기 텁(Tap)의 고려

n-모선 계통의 모선사이에 그림 3과 같이 변압기 텁(Tap)이 설치되어 있는 경우에 조류다른 계산법은 다음과 같다. 먼저, 선로조류 P_{1j} , Q_{1j} 와 P_{nj} , Q_{nj} 는 식(12)와 식(13)으로 표현된다.

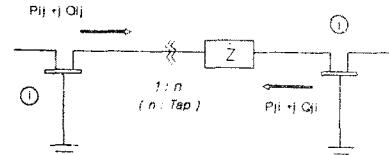


그림 3. 변압기 텁(Tap)이 설치된 계통

$$S_{1j} = P_{1j} + j Q_{1j} = V_i I_{1j} \cdot$$

$$S_{nj} = P_{nj} + j Q_{nj} = V_j I_{nj} \cdot \quad (12)$$

$$= V_j \left(\frac{1}{n} V_i - V_j \right) \cdot (-Y_{nj}) \cdot \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{nj} : 변압기 tap 을 고려한 Y_{bus} \\ n : 변압기 TCUl 의 tap 값 \end{array} \right.$$

모선사이에 변압기 텁(tap)이 설치되어 있는 그림 3과 같은 계통에서 국과표계의 선로조류 P_{1j} 와 Q_{1j} 식은 (14)식과 같이 변형되고 V_i^2 에 대한 2차 방정식으로 다시 정리할 수 있다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0$$

$$\begin{cases} a_i = n^4 \\ b_i = -2n^2(r_i P_{ij} + x_i Q_{ij}) - n^2 V_j^2 \\ c_i = (r_i P_{ij} + x_i Q_{ij})^2 + (r_i Q_{ij} - x_i P_{ij})^2 \end{cases} \quad (14)$$

2-2. 변압기 텁 변파시 전압안정도 평가

두 모선 사이에 변압기(TCUL)가 설치되어 있고 텁(TAP)의 운전상, 하한치(TAP_{min} , TAP_{max})가 주어졌을 때 이 범위에서 단위조작량(STEP) 만큼씩 변화시킨 텁값을 (15)식에 대입하여 높은해(V_h)와 낮은해(V_l)와의 차 $|V_h - V_l|$ 를 계산하여 이중에서 크기가 최대가 되는 텁을 결정하면 전압안정도 증가효과가 가장

좋다. 일반적으로 전압안정도 제어설비(QC, TCUL 등) 등을 투입하여 전압안정도 여유(전압안정도 한계점 - 현재운전점 [MV])를 크게하는 것은 높은해 전압과 낮은해 전압과의 차이를 크게하는 것과 동일하다. 변압기 텁의 변화시 방정식의 계수 a_1, b_1, c_1 중 a_1 와 b_1 에만 영향을 미침을 알 수가 있는데 이에 대한 다른 변화특성으로 전압안정도에 미치는 효과를 알 수가 있다.

$$a_i(V_i^2)^2 + b_i(V_i^2) + c_i = 0$$

$$\begin{cases} a_i = n^4 \\ b_i = -2n^2(r_i P_{ij} + x_i Q_{ij}) - n^2 V_j^2 \\ c_i = (r_i P_{ij} + x_i Q_{ij})^2 + (r_i Q_{ij} - x_i P_{ij})^2 \end{cases} \quad (15)$$

2-3. 조상설비 투입시 전압안정도 평가

부하모선에 조상설비(QC)의 투입시 가장 전압안정도를 향상시킬 수 있는 모션을 결정할 때, 식(15)로 구한 다른의 전압차 $|V_h - V_l|$ 와 조상설비(QC) 투입시 다른의 전압차 $|V_h - V_l|$ 간의 폭이 가장 큰 모션을 선택하면 전압안정도 여유[MV]가 최대로된다. 일반적으로 전압안정도 여유[MV] [전압안정도 한계점 - 현재운전점]를 증가시키면 전압여유[pu] (높은해전압 - 낮은해전압) 가 증가하므로 둘중의 하나의 양을 최대로 되는 모션에 조상설비를 투입하면 전압안정도 증강효과가 가장 크다.

2-4. 계산 알고리즘

STEP 1: 현재운전상태(BASE CASE)의 조류계산을 시행하여 각 모선의 전압과 선로조류 P_{1j} , Q_{1j} 를 계산한다.

STEP 2: slack 모선과 연결된 모선 i에서 다음과 같이 두개의 해 V_{ih} (높은해)와 V_{il} (낮은해)를 구한다.

STEP 3: 모선 i와 연결된 K=S_i 모선에서 V_{ih} , V_{il} 를 사용하여 다른을 구하고 낮은해로 판정되는 것 만을 저장한다.

STEP 4: 계산된 다른으로 인접모선의 다른을 연속적으로 구한다.

STEP 5: slack 모선을 제외한 모든 모선의 다른을 계산하였으면 STEP 6 으로 가고 그렇지 않으면 STEP 4 로 간다.

STEP 6: 변압기 텁과 조상설비의 설치범위에서 다른을 계산하여 이것으로 전압안정도를 평가하고 종결한다.

3. 적용례

3-1. 적용 예

그림 4 와 그림 5 는 각각 2-모선과 IEEE 6-모선 계통도이다.

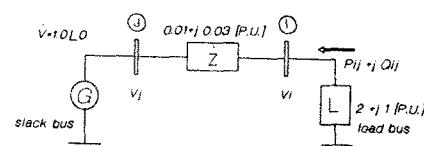


그림 4. 2-모선 계통도

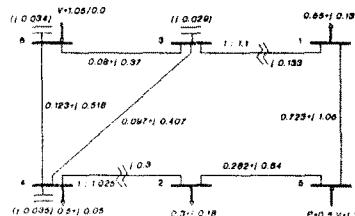


그림 5. IEEE 6-모선 계통도

3-2. 2-모선 계통의 적용 예

그림 6 은 2-모선 계통에서 제안한 다른 계산법으로 구한 P-V 곡선인데 측선상, 하반부의 높은해와 낮은해간의 균접도를 통해 현재운전점에 대한 전압안정도를 평가할 수 있다. 그림 7 은 현재운전상태(BASE CASE)에서 한계점까지 부하가 증가했을 때 e_i 와 f_i 에 대한 원의 방정식의 적적변화를 나타낸는데 이 두원의 교차점 중 하나는 높은해이고 나머지는 낮은해이다. 두교차점이 부하가 증가함에 따라 더욱 접근하게 되고 한계점에서는 하나의 점에서 교차점으로 하나의 교차점에서 만나는 상태를 통해 한계점을 구할 수 있는 가능성을 시사하고 있지만 n-모선 계통에서는 한계점에서 교차점이 하나가 되지는 않는다.

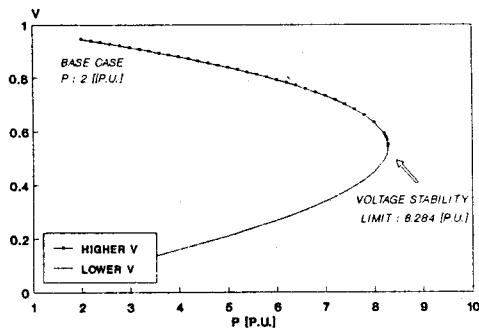


그림 6. P-V 곡선 (2-모션)

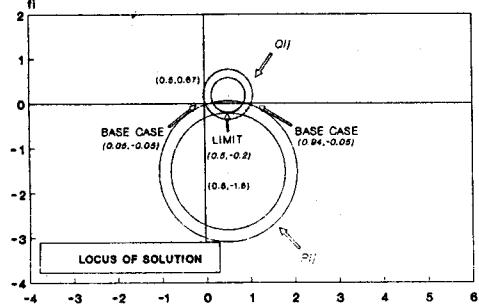


그림 7. 부하 증가시 원의 궤적 변화

그림 8은 변압기 텨 값 $n = 0.95$ 에서 1.05 까지 증가시 P-V 곡선의 변화를 보여주는데 tap 값이 변화시 한계점은 변화한다. 제안한 방법에서는 변압기 tap 고려시 (15)식의 계수 중 a_1 와 b_1 가 변화하여 다근이 변화하는 특성을 이용하여 전압안정도에 미치는 효과를 알 수가 있는데 이것을 표 1에서 보여주고 있다.

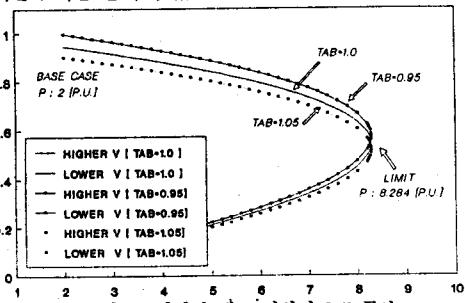


표 1. 제안한 방법의 변압기 tap 고려시 전압안정도 변화

변압기 tap	높은 해 V_h	낮은 해 V_l	$ V_h - V_l $	비고
0.95	0.9955	0.0787	0.9168	
1.00	0.9444	0.0748	0.8696	base case
1.05	0.9007	0.0712	0.8295	

3-3. IEEE 6-모션 계통 적용 예

그림 9는 제안한 다근계산법으로 구한 P-V 곡선을 나타낸다.

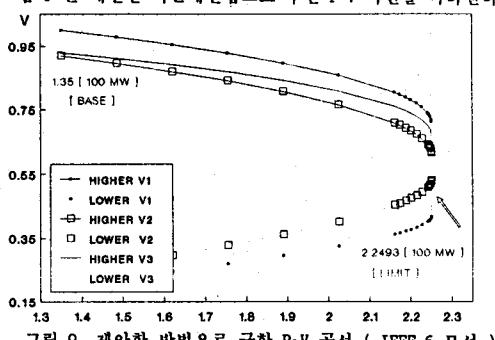


그림 9. 제안한 방법으로 구한 P-V 곡선 (IEEE 6-모션)

계산된 조류다근은 현재운전점의 전압안정도를 평가하는데 사용될 수 있는데 높은 해 전압과 낮은 해 전압에 대한 감도 $\Delta V/\Delta P$ 즉, 두 기울기가 만나는 점이 전압안정도 한계점이 된다. 현재운전점과 한계점 사이의 여유전력은 (16)식에 의해 계산된다.

$$\Delta P (\text{MW}) = \frac{V_h - V_l}{\frac{\Delta V_l}{\Delta P_l} - \frac{\Delta V_h}{\Delta P_h}} \quad (16)$$

그림 10은 부하 증가시 각 상태에 대한 전압안정도 여유를 (16)식으로 구한 값의 오차를 나타내고 있는데 운전상태가 한계점에 가까워질수록 정확하게 됨을 알 수 있다.

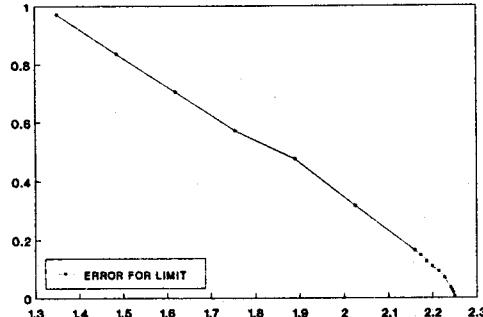


그림 10. 감도해석을 통한 한계점 계산의 오차(IEEE 6-모션)

표 2는 조상설비 (Q_c) 투입시 전압안정도 최적 부하모션 결정을 제안한 다근법을 이용하여 계산한 결과를 보인다. 0.1[P.U]의 조상설비를 각 부하모션에 투입한 경우에 전압안정도 한계점 계산 프로그램⁽⁶⁾을 사용하여 계산한 전압안정도 여유[mw]의 증가순서는 2, 4, 1, 3 번 모션 순이다. 그리고, 제안한 전압안정도 평가법에 의해서 구한 전압여유[pu]의 증가순서도 위와 동일한데 이 것은 제안한 전압안정도 평가법의 유효성을 입증하는 것이다.

표 2. 제안한 조상설비 투입시 전압안정도 평가법의 계산결과

부하모션	다근의 전압 여유증가	전압안정도 여유증가	조상설비 투입순위
NO 1.	0.0610 [pu]	0.063 [100MW]	3
NO 2.	0.1062 [pu]	0.077 [100MW]	1
NO 3.	0.0602 [pu]	0.060 [100MW]	4
NO 4.	0.0801 [pu]	0.076 [100MW]	2
비 고	제안한 전압안정도 평가법 사용	한계점 계산 프로그램 ⁽⁶⁾ 사용	

4. 결론

- 현재운전점의 조류계산 결과와 선로조류(P_{ij}, Q_{ij})를 사용하여 간단히 계산할 수 있는 간략 조류다근 계산법을 제시하였다.
- 변압기 tap 과 조상설비(Q_c) 등을 고려하는 경우의 전압안정도 향상효과 등을 파악할 수 있는 평가법을 제시하였다.
- 계산된 조류다근의 감도해석($\Delta V/\Delta P$)을 통해 한계점과 현재운전점 사이의 전압안정도 여유(MW, MVAR)를 평가하였다.
- 구해진 조류다근은 N 모션 계통의 2^{N-1} 개 다근중 나머지 다근을 계산하기 위한 조류계산의 초기치로써 사용할 수 있다.
- 제안한 다근계산법은 간단하고 전압안정도를 평가하는데 충분한 특성이 있지만 모든 지정치를 만족하는 다근은 아니다.

참고문헌

- [1] 鈴木伸, 佐藤正弘, 青柳眞理, “전력계통의 균형조류근의 구해법”, IEE Japan, Vol. 109-B, No.10, 1989, P451~458.
- [2] 伊庭健二, 若木伸一, 田村康男, “설계모수 계통에 대한 조류다근 계산법”, 伊電論, 55-B30, 昭55-5, P257~264.
- [3] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Masanao Egawa, Isutomo Watanabe, “A Method For Finding a Pair of Multiple Load Flow Solutions in Bulk Power Systems”, IEEE Trans. on Power and Systems, Vol.5, No.2, May 1990.
- [4] A.Klos, A.Kerner, “Non Uniqueness of Load Flow Solutions”, Proc. PSCE, 3/18, July (1975).
- [5] A.Klos, S.Mikolajczyk, “Non Uniqueness and Stability of Load Flows”, Proc. PSCE, VI.104 (1987).
- [6] Akihiko Yokoyama, Yasuji Sekine, “A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solutions”, Engineering Foundation Conference, 1988.
- [7] 송길영, 김세영, 최상규, “효율적인 조류다근 계산법”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 1990/7, PI58-161.
- [8] 송길영, 김세영, 김용하, “검고한 전압안정도 한계점 계산 알고리즘에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집 B, 1994/7, P792~794.