

다근 조류 계산의 해법에 대하여

유 석 구 , 김 찬 용*
한 양 대 학 교 , 한 양 대 학 교*

A study on multiple load flow solution

You Seok Koo , Kim Chan Yong
Hanyang Univ. , Hanyang Univ.

ABSTRACT

Recently, the phenomena of voltage instability have become major concern in power system. these phenomena are closely related to what are called multiple load flow solutions and calculation methods on these solutions have developed. The multiple solutions concerned with phenomena are pair solutions in heavy loaded contion. But conventional methods require much run time to find this pair solutions and unusual generation patten in the condition of multiple solution-s.

In this paper, by using concept of existence condition of multiple solutions, calculation method on the multiple load flow solutions is presented which find the pair solutions in light loaded condintion.

1. 서 론

최근, 전력수요의 급증에 대처하기 위하여 원자력을 중심으로 한 대전원이 개발되고, 계통연계의 강화로 전력계통은 더욱 대규모화, 복잡화되고 있다. 또한 전압입지의 원격화도 전력공급이 대용량화, 장거리화됨에따라 계통운영에서의 안정도문제는 종래의 안정도뿐만아니라 부하급증시 무효전력의 부족으로 야기되는 전압불안정문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 전압불안정문제는 근접조류다근과 관련됨이 지적되고 있다.

일찍기 Klos & Kener 가 전력계통에 복수개의 조류해가 존재한다는 것을 증명하였고, 그 이후에 조류다근을 구하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지의 다근 조류계산에 대하여 살펴보면 경부하시에 2^{n-1} 개의 해를 모드별로 모두 구하는 방법을 제시되었고, 2^{n-1} 개의 해 중에서 m 개 (m : 순수 부하모선 수)의 해만이 근접다근의 후보가 될 수 있다는 사실을 밝히고 전압 안정도 문제를 위해서는 m 개의 해 만을 구하면 된다는 간략법이 제시되어있다.¹⁾ 또한 근접다근을 구하기 위하여 해의 개수가 2개가 되는 임의의 중부하상태 까지 부하를 증가시켜서 근접다근을 구하여 다시 그 해를 초기치로 하여 경부하상태에서 다근조류 계산을 행하는 방법이 제시되어있다.²⁾

앞의 문헌에서 제안된 알고리즘의 문제점은 다근해에서의 과중한 선로손실을 SLACK 모선이 모두 담당한다는 조류계산의 가정에서 생기는 발전력 배분의 문제와 m 개 (m : 순수 부하모선 수)의 해 중에서 어떠한 해가 최종 (즉 CRITICAL POINT 일보 전) 까지 남는해, 즉 근접다근인가를 판별하기 위하여 많은 횟수의 조류계산을 필요로 한다는 것이다.

본 논문에서는 다근해를 구할때 수정된 조류계산식을 이용하여 기존의 방법 보다 타당성 있는 발전력 배치 하에서의 해를 유도하였으며, 근접다근을 경부하 상태에서 판별하는 방법을 제시하여 전압안정도문제에 적당한 다근조류계산수법을 제안 하였다.

2. 조류 다근 계산의 초기치

조류계산의 다근은 다음과 같은 성질이 있음이 알려져 있다.⁽⁴⁾

『조류방정식은 경부하 상태에서는 다수의 해가 존재하지만 부하가 증가함에 따라 그 수가 감소하여 중부하 상태에서는 2개가 되고, 이 두개의 해는 부하가 증가함에 따라서 서로 접근하여 임계점에 이르던 단 1개의 중근인 해만이 남게 된다. 이 다수의 해중에서 전압안정도 문제와 관련이 있는 해는 중부하 상태에서의 2 개의 해이고, 이 2 개의 해 중에서 1 개의 해는 일반적인 조류계산에 의하여 얻어지는 해이며 나머지 1개의 해는 근접다근이다.

본 논문에서는 다수의 조류해 중에서 일반적인 조류계산에 의하여 얻어진 해를 운전점, 그 이외의 해를 다근해라 호칭한다. 또 부하모선에 대하여서만 다근해를 구하는 간략 알고리즘을 사용하였다.

2.1 초기치 전압값의 선정

송전 SYSTEM 은 HYBRID [H] 행렬을 이용하면 다음과 같이 표현 된다.

$$\begin{bmatrix} V^L \\ V_G \end{bmatrix} = [H] \cdot \begin{bmatrix} I^L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z], [F] \\ [K], [Y] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^L \\ I_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

V^L, I^L ; 부하모선의 전압, 전류벡터
 V_G, I_G ; 발전기모선의 전압, 전류벡터
 $[Z], [F], [K], [Y]$; 각각 [H] 행렬의 소행렬

부하모선 j 의 전압 V_j 는

$$V_j = \sum_{i \in a_L} Z_{ji} \cdot I_i + \sum_{i \in a_G} F_{ji} \cdot Y_i \quad (2)$$

$$V_j^2 + Y_{oj} \cdot V_j^* = \frac{S_j^{**}}{Y_{jj}^*} \quad (3)$$

$$Y_{oj} = - \sum_{i \in a_G} F_{ji} \cdot Y_i$$

$$Y_{jj}^* = \frac{1}{Z_{jj}}$$

$$S_j^* = S_j + S_j^{corr}$$

$$S_j^{corr} = \left(\sum_{i \in a_L} \frac{Z_{ji}^*}{Z_{jj}^*} \frac{S_i}{Y_i} \right) \cdot Y_j^*$$

a_G, a_L 는 각각 발전기, 부하모선의 집합

(3) 식을 V_j 에 대하여 풀면

$$V_j = \sqrt{\frac{S_j^+}{Y_{jj}^+} (R \pm \sqrt{R^2 - 1})} \quad (4)$$

$$R = \frac{V_0^2 - Y_{jj}^+}{2 \cdot S_j^+} + \cos(\theta_{S_j^+} + \theta_{Y_{jj}^+})$$

이 V_j 의 두 근 중에서 + 의 해는 일반적인 조류계산에 의하여 얻어지는 해이고, - 의 해는 2모선인 경우에는 근접 다근이며, 다모선계통의 경우에는 다근해를 구하기 위한 초기치로 사용된다. 각각의 모선전압에 대하여 -인 해를 -모드, +인 해를 +모드라 정의 한다. 이 모드의 지정에 따라 조류 계산의 해는 최고 2^{n-1} 개 까지 존재 할 수 있으며, 운전점은 모든 모선에 대하여 모선 전압이 + 모드가 되는 해이다.

2.2 모선 전압 위상각의 수정

다근해를 구하기 위한 전압초기치 산정에 따른 모선 전압 위상각의 수정을 다음과 같이 행한다.

모선 l 에 주입되는 유효전력 P_l 는 다음과 같다.

$$P_l = \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{lj}} V_l \cdot V_j \cdot \sin(\delta_l - \delta_j) \quad (5)$$

X_{lj} 은 모선 i, j 사이의 선로의 리액턴스
 $X_{lj} \gg R_{lj}$

운전점의 전압, 위상각이 V_l, δ_l , 다근해의 전압 및 위상각이 V_l', δ_l' 이라 하면

$$V_l' = V_l + \Delta V_l$$

$$\delta_l' = \delta_l + \Delta \delta_l$$

다근해에서의 모선전력은

$$P_l = \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{lj}} (V_l + \Delta V_l) \cdot (V_j + \Delta V_j) \cdot \sin(\delta_l + \Delta \delta_l - \delta_j - \Delta \delta_j) \quad (6)$$

(6)식의 SIN항을 TAYLOR 급수 전개하여 2차항을 무시하면

$$\sin(\delta_l + \Delta \delta_l - \delta_j - \Delta \delta_j) \approx \sin(\delta_l - \delta_j) + \cos(\delta_l - \delta_j) (\Delta \delta_l - \Delta \delta_j) \quad (7)$$

(7)식을 (6)식에 대입하고 모선 주입전력이 같다는 조건에서 (5)식과 같게 놓으면 모선전압 변화에 대한 모선 전압 위상각의 변화는 다음의 식으로 결정 된다.

$$[\Delta \delta] = [A^{-1}] \cdot [B] \quad (8)$$

단, [A] 의 요소는

$$a_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{ij}} (V_i + \Delta V_i) (V_j + \Delta V_j) \cos(\delta_i - \delta_j)$$

$$a_{ij} = - \frac{1}{X_{ij}} (V_i + \Delta V_i) (V_j + \Delta V_j) \cos(\delta_i - \delta_j)$$

[B] 의 요소는

$$b_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{ij}} (V_i \Delta V_j + V_j \Delta V_i + \Delta V_i \Delta V_j) \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)$$

주 일반적인 조류해에서 부하모선의 모선전압을 (4)식을 이용하여 전압크기를 수정하고 (8)식을 이용하여 전압위상각을 수정하여 다근해를 구하기 위한 초기치로 사용한다.

3. 조류계산식

조류계산의 방법은 다근해를 구할때 과도한 SLACK 모선의 부담을 해소하기 위하여 계통의 총손실을 정식화하여 각각의

발전기들이 이 총 손실을 분담하여 발전하는 방법의 조류계산을 사용하였다.

3.1 계통손실

계통의 손실은 다음과 같이 정식화 할 수 있다.
 모선 l, j 사이의 선로에서 발생하는 손실은

$$P_{Lij} = -(V_i^2 + V_j^2) G_{ij} + 2 \cdot G_{ij} V_i V_j \cos(\delta_{ij}) \quad (9)$$

이 손실을 모선 l, j 에서 각각 1/2 씩 발생한것으로 보면, 모선 i 에서 발생하는 손실은

$$P_L^i = - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) G_{ij} + \sum_{j=1}^n G_{ij} V_i V_j \cos \delta_{ij} \quad (10)$$

계통전체에서 발생한 총손실은

$$P_L = - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) G_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} V_i V_j \cos \delta_{ij} \quad (11)$$

이 된다.

3.2 조류계산식의 수정

총손실을 각 발전기가 임의의 비율로 분담하는 것으로 하여 조류계산식을 수정하면, 발전기 모선 l 에 주입되는 유효전력은 다음과 같다.

$$P_l = P_{lSPEC} + \mu_l P_L = \sum_{j=1}^n V_l V_j (G_{lj} \cos \delta_{lj} + B_{lj} \sin \delta_{lj}) \quad (12)$$

$$P_{lSPEC} = \sum_{j=1}^n V_l V_j (G_{lj} \cos \delta_{lj} + B_{lj} \sin \delta_{lj}) - \mu_l P_L$$

$$= \sum_{j=1}^n V_l V_j (G_{lj} \cos \delta_{lj} + B_{lj} \sin \delta_{lj}) - \mu_l \left\{ - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) G_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} V_i V_j \cos \delta_{ij} \right\} \quad (13)$$

$$\mu_i = 0, \quad (i \in a_L)$$

$$0 \leq \mu_i \leq 1 \quad (i \in a_0)$$

$$\sum_{i \in a_0} \mu_i = 1$$

μ_i 는 i 번 모선의 발전기의 손실 분담률

이때 JACOBIAN 행렬의 요소는 다음과 같이 된다.

$\frac{\partial P_l}{\partial \delta_j}$ 는

$\frac{\partial \delta_j}{\partial P_l}$ $i \in a_L$ 일때, $i = j$ 에서

$$= V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (14)$$

$\frac{\partial \delta_j}{\partial P_l}$ $i \neq j$ 에서

$$= -Q_i - B_{ij} \cdot V_i^2 \quad (15)$$

$\frac{\partial \delta_j}{\partial P_l}$ $i \in a_0$ 일때, $i = j$ 에서

$$\frac{\partial P_l}{\partial \delta_j} = V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + \mu_i \sum_{k=1}^n 2G_{jk} V_j V_k \sin \delta_{jk}$$

$\frac{\partial P_l}{\partial \delta_j}$ $i \neq j$ 에서

$$= -Q_i - B_{ij} V_i^2 + \mu_i \sum_{k=1}^n 2G_{jk} V_j V_k \sin \delta_{jk} \quad (16)$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial \delta_j} = -Q_i - B_{ij} V_i^2 + \mu_i \sum_{k=1}^n 2G_{jk} V_j V_k \sin \delta_{jk} \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} \text{ 은 } i \in \alpha_L \text{ 일때, } i = j \text{ 에서}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (18)$$

$$i \neq j \text{ 에서}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = P_i + G_{ij} V_i^2 \quad (19)$$

$$i \in \alpha_G \text{ 일때, } i = j \text{ 에서}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + \mu_i \sum_{k=1}^n 2G_{jk} V_j (V_j - V_k \cos \delta_{jk}) \quad (20)$$

$$i \neq j \text{ 에서}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = P_i + G_{ij} V_i^2 + \mu_i \sum_{k=1}^n 2G_{jk} V_j (V_j - V_k \cos \delta_{jk}) \quad (21)$$

4. 근접다근의 판별

조류계산의 다근해의 존재조건⁵⁾을 근거로 하여 근접다근을 판별하기 위하여 다음과 같이 편차, 감도 벡터와 편차각을 정의하여 비교 하였다.

4.1 편차 벡터

일반적인 조류계산에 의하여 얻어진 해를 V_0 라 하고 다근조류계산에 의하여 얻어진 다근해들을 각각 $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_m$ 이라 하면 편차벡터를 다음과 같이 정의 한다.

$$[V_{Bi}] = [V_i] - [V_0] \quad (22)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$
 m : 순수 부하모선의 수

4.2 감도 벡터

총 수요전력 증가에 대한 전압감도벡터는 조류계산의 수렴이 끝난상태의 자코비안 역행렬에서 다음과 같이 구해진다.

조류계산의 수정 방정식은

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (23)$$

단, $[J]$ 는 JACOBIAN 행렬

각 부하모선은 정역률 운전을 하며, 수요전력이 임의의 비율로 증가한다고 하면 총수요전력증가분 ΔP_T 에 대한 모선 i 의 투입전력의 변화량 ΔP_i 는 다음과 같다.

$$\Delta P_i = \beta_i \cdot \Delta P_T$$

$$\Delta Q_i = \beta_i \cdot \tan(\theta_i) \cdot \Delta P_T$$

- $0 < \beta_i < 1, i \in \alpha_G$
- $-1 < \beta_i < 0, i \in \alpha_L$
- β_i : 총수요전력증가 ΔP_T 에 대한 모선 i 의 투입전력의 증가비율
- θ_i : 모선 i 의 부하의 역률각

총 수요전력 증가분 ΔP_T 에 대한 전압감도벡터는

$$[V_s] = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta P_T \\ \Delta V \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = [J^{-1}] \cdot [\beta] \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \delta_2}{\Delta P_T}, \frac{\Delta \delta_3}{\Delta P_T}, \dots, \frac{\Delta \delta_{n-1}}{\Delta P_T}, \frac{\Delta \delta_n}{\Delta P_T} \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_{m1}}{\Delta P_T}, \frac{\Delta V_{m2}}{\Delta P_T}, \dots, \frac{\Delta V_{m(m-1)}}{\Delta P_T}, \frac{\Delta V_{mm}}{\Delta P_T} \end{bmatrix}^T$$

$$[\beta] = [\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{n-1}, \beta_n, \beta_{m1}, \dots, \beta_{mm} \cdot \tan(\theta_{mm})]^T$$

n 은 계통의 모선 수
 $\{m_1, m_2, \dots, m_{m-1}, m_m\} = \alpha_L$
 1번 모선은 SLACK 모선

4.3 해의 판별

전압 감도벡터와 편차벡터를 정의한 후에 감도벡터와 편차벡터의 근접도를 평가한다.

편차벡터 $[V_{Bi}]$ 와 감도벡터 $[V_s]$ 의 편차각을 ϕ_i 라 하면 편차각 ϕ_i 는

$$\phi_i = \cos^{-1} \left(\frac{|V_{Bi}| |V_s|^T}{|V_{Bi}| \cdot |V_s|} \right) \quad (25)$$

$i=1, 2, 3, \dots, m-1, m$
 m : 순수 부하모선 수

가 된다.

5. 적용 예

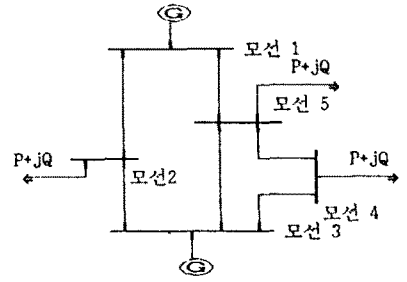


그림 1 5모선 SAMPLE 계통의 계통도
 FIG 1 DIAGRAM OF 5 BUS SAMPLE SYSTEM

그림 1 는 5 모선 SAMPLE 계통의 계통도 이며, 그림에서 모선 1, 모선 3 은 발전기모선이고, 모선 2, 모선 3, 모선 5 는 부하모선이다.

표 1 은 총수요전력이 0.51 인 때와 총수요전력이 2.55 인 때의 모드별 편차벡터 $[V_{Bi}]$ 와 전압감도벡터 $[V_s]$ 사이의 편차각이고, 그림 2 는 모선 4 의 전압-전력 곡선이다.

표 1, 표 2 에서 전압감도 벡터 $[V_s]$ 와 편차벡터 $[V_{Bi}]$ 의 편차각은 (+, -, +) 모드(V_2)에서 가장 작음을 알 수 있는데, 이것은 그림 2 의 전압 전력 곡선의 결과와 잘 일치 하고 있으며, 이 편차각을 비교함으로써 근접다근을 판단할 수 있음을 보이고 있다.

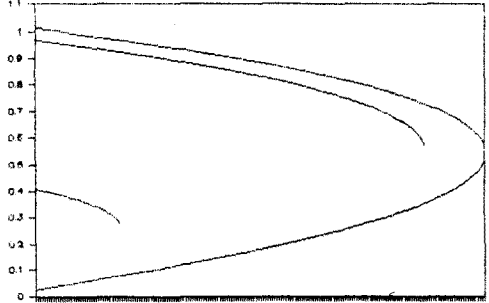


그림 2 모선 4 의 전압 전력 곡선
 FIG 2 POWER VOLTAGE CURVE OF BUS 4

MODE(2,4,5)	+,+,+(V ₀)	-,+,+(V ₁)	+,-,+(V ₂)	+,+,-(V ₃)
V2	1.02/-0.02	0.02/-0.91	1.02/-0.05	1.02/-0.04
V4	1.01/-0.03	1.01/-0.12	0.03/-0.95	0.41/-0.15
V5	1.02/-0.02	1.02/-0.07	0.78/-0.04	0.01/-0.83
ϕ_i	*****	1.0219	0.556	0.669
P _{G1} (PU)	0.2919	2.2095	1.1141	2.3012
P _{G3} (PU)	0.2214	1.6712	0.8452	1.7457
계통손실	0.0033	3.3641	1.4492	3.5363

P_T = 0.51 (PU)

MODE(2,4,5)	+,+,+(V ₀)	-,+,+(V ₁)	+,-,+(V ₂)	+,+,-(V ₃)
V2	0.96/-0.10	0.10/-1.13	0.96/-0.13	*****
V4	0.91/-0.18	0.91/-0.60	0.15/-0.91	*****
V5	0.97/-0.09	0.96/-0.36	0.76/-0.13	*****
ϕ_i	*****	1.0416	0.494	*****
P _{G1} (PU)	1.5009	3.1965	2.1880	*****
P _{G2} (PU)	1.1386	2.4259	1.1599	*****
계통손실	0.0895	3.0761	1.2979	*****

P_T = 2.55 (PU)

표 1 모드별 모선 전압
TABLE 1 BUS VOLTAGE FOR EACH MODE

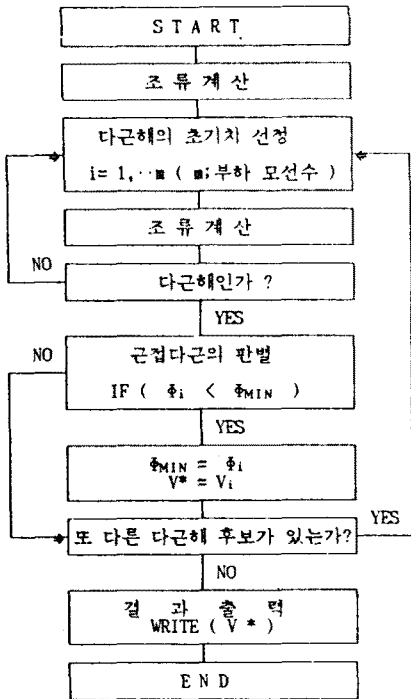


그림 3 다근 조류계산의 FLOW CHART
FIG 3 FLOW CHART OF MULTIPLE LOAD FLOW CALCULATION

6. 결론

본 논문에서는 경부하상태에서 실운전점에 대한 상대의 다근해를 판정하는 방법을 제시하여 전압 안정도 문제에 적합한 다근 조류계산 수법을 제안하였으며, 손실을 발전기 별로 분산시킨 조류계산에 의하여 다근해를 구할때 기존의 방법보다 타당한 발전력 배치 상태의 해를 유도 하였다. 또한 이것을 5-모선 계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

참고 문헌

1. A REACTIVE CONTINGENCE ANALYSIS OF ALGORITHM USING MW AND MVAR DISTRIBUTION FACTOR
- D.G.TAYLOR L.J.MASHS ,
IEEE VOL.6,NO.1 FEBRUARY 1991
2. ESTIMATING THE VOLTAGE STABILITY OF A POWER SYSTEM
- P. KESSEL , H. GLAVITSCH ,
IEEE PWRD-1 NO.3 JULY 1986
3. A STATIC VOLTAGE STABILITY INDEX BASED ON MULTIPLE LOAD SOLUTIONS
- AKIHIKO YOKOYAMA , YASUJI SEKINE ,
ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE ON POWER SYSTEM VOLTAGE INSTABILITY
PROC SEP ,1988 , ST.LOUIS
4. CURRENT ISSUES IN THE ANALYSIS OF VOLTAGE INSTABILITY PHENOMENA
- Y.TAMURA K.SAKAMOTO Y.TAYAMA
5. 전력조류의 다근문제에 대한 해의 구조,특이점, 존재조건에 대하여
- Y.TAMURA , 전학는 55-B39 (소하 55)
6. 실규모 계통에 대한 조류다근 계산법
- Y.TAMURA , 전학는 55-B30 (소하 55)