

# 효율적인 조류 다근 계산법

송길영\* 김세영<sup>Ⓞ</sup> 최상규\*\*  
 \* : 고려대학교 \*\* : 안양전문대학

## EFFECTIVE CALCULATION METHOD ON THE MULTIPLE LOAD FLOW SOLUTIONS.

K. Y. SONG \* S. Y. KIM \* S. G. CHOI \*\*  
 \* : KOREA UNIVERSITY \*\* : ANYANG JUNIOR COLLEGE

### 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. But conventional methods require much run time. In this paper, by using sign of |J| and weighting factor considering system configuration, fast calculation method on the multiple load flow solutions is presented.

### 1. 서론

최근, 전력수요의 급증에 대처하기 위하여 원자력을 중심으로 한 대전원이 개발되고, 계통연계의 강화로 전력계통은 더욱 대규모화, 복잡화되고 있다. 또한 전원입지의 원격화로 전력공급이 대용량화, 장거리화됨에 따라 계통운영에서의 안정도문제는 종래의 안정도뿐만 아니라 부하급증시 무효전력의 부족으로 야기되는 전압불안정문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 전압불안정문제는 근접조류다근과 관련되어 지적되고 있다.<sup>(1)</sup>

종래의 조류다근에 관한 연구를 살펴보면, 일찌기 Klos & Kerner 가 전력계통에 복수개의 조류해가 존재한다는 것을 증명하였고<sup>(2)</sup>, 그 이후에 조류다근을 구하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(3,4,5)</sup>

문헌(3)에서는  $2^{n-1}$  (n: 부하모선수) 조합수만큼의 모선전압을 조류다근계산법의 초기치로 사용하는 exhaust 법을 사용하고 있다. 하지만 이 방법은 계산시간이 많이 소요된다는 문제점이 있다.

문헌(4)에서는 문헌(3)과 유사하지만 각 모선의 국소적 해석을 실시하여 다른 해(조류다근)에 수렴되도록 조류계산의 초기치를 조합하고, 이것으로부터 조류계산을 실시해서 조류다근을 구하는 알고리즘을 제안하였다. 한편 대규모 계통에서는 초기치의 종수를 대폭 감소시키는 간략알고리즘을 사용하였는데 이 방법 역시 많은 회수의 조류계산을 필요로 하고 있다.

문헌(5)에서는, 기지의 높은해인 부하모선전압을 단계적으로  $\Delta V$ 만큼 저하시키고 모선주입전력이 일정하다는 조건하에서 전압변화분에 대한 위상각변화분을 계산하여 낮은해가 얻어질 때까지 조류계산을 시행하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법으로는 낮은해로 수렴하지 않는 조류계산을 반복시행해야한다는 결점이 있다.

본 논문에서는 상술한 문헌(5)의 방법을 개선해서 계산소요시간을 대폭 단축할 수 있는 조류다근계산법을 제시한다. 제안된 방법은 자코비안의 행렬식 |J|의 부호(|J| > 0 인 영역은 높은해 영역이고, |J| < 0 인 영역은 낮은해 영역이다.)를 판정하여 초기치 |J|의 부호가 음인 경우에만 조류계산을 시행하였고 각 부하모선의 전압저하량결정에

어, 계통특성을 고려한 가중치의 사용을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 5-모선계통과 IEEE 14-모선계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

### 2. 조류다근 계산법

#### 2-1. 기본 개념식

일반적으로 높은해( $X_H$ )의 전압값은 낮은해( $X_L$ )의 전압값보다 크고 위상각은 낮은해의 값이 더 크다. 이것을 그림 1에 보이는데 두 해는 모선주입전력 조건이 같아야한다.

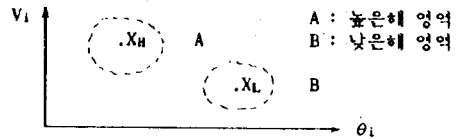


그림 1. 높은해와 낮은해의 존재영역에

모선 k 에 주입하는 유효전력  $P_k$  는 다음과 같다.

$$P_k = \sum_i \frac{V_k V_i}{X_{ki}} \sin(\theta_k - \theta_i), \quad r \ll x \dots \dots (1)$$

단, i 는 모선 k 에 접속하는 모든 선로의 집합  
 한편, 낮은해의 경우  $V_i$  는  $(V_i + \Delta V_i)$ ,  $\theta_i$  는  $(\theta_i + \Delta \theta_i)$ 로 변화된다.

$$P_k = \sum_i \frac{(V_k + \Delta V_k)(V_i + \Delta V_i)}{X_{ki}} \sin(\theta_k + \Delta \theta_k - \theta_i - \Delta \theta_i) \dots (2)$$

여기서, 두 근이 근접하는 경우  $\Delta V$  와  $\Delta \theta$  는 작은 값을 갖는다. 그러므로 (2)식의 sin 항을 Taylor 전개하여 2차항을 근사화하면

$$\sin(\theta_k + \Delta \theta_k - \theta_i - \Delta \theta_i) \approx \sin(\theta_k - \theta_i) + \cos(\theta_k - \theta_i)(\Delta \theta_k - \Delta \theta_i) \dots (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입한 식과 (1)식을 같게 놓으면 미지수  $\Delta \theta_i$ 에 대해 다음식이 성립한다.

$$x = A^{-1} b \dots (4)$$

$$\text{단, } x = (X_1, X_2, \dots, X_{nb-1}) = (\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \dots, \Delta \theta_{nb-1}) \dots (5)$$

NB = 모선수

$$a_{ii} = \sum_j \frac{1}{X_{ij}} (V_i + \Delta V_i)(V_j + \Delta V_j) \cos(\theta_i - \theta_j) \dots (6)$$

$$a_{ij} = - \frac{1}{X_{ij}} (V_i + \Delta V_i)(V_j + \Delta V_j) \cos(\theta_i - \theta_j) \dots (7)$$

$$b_i = \sum_j \frac{1}{X_{ij}} (V_i \Delta V_j + V_j \Delta V_i + \Delta V_i \Delta V_j) \sin(\theta_i - \theta_j) \dots (8)$$

즉, 높은해의 전압 크기를  $\Delta V_i$  ( $i$ : 부하모선) 만큼 감소시키고, 이 변화분에 대한 위상각  $\Delta \theta_i$  ( $i$ : slack모선을 제외한 모든모선) 을 식 (4)에 의해 계산한다. 이와같이 초기치를 낮은해( $X_L$ )근방으로 이동시켜 낮은해가 얻어질 때까지 조류계산을 반복한다.

2-2. |J| 부호의 성질

먼저, n모선계통의 모선 주입전력을 직각좌표계로 나타내면

$$P_k = \sum_i (G_{kik}e_i + B_{kik}e_i - B_{kif}f_i + G_{kif}f_i) \dots (9)$$

$$Q_k = \sum_i (B_{kik}e_i - G_{kik}e_i + G_{kif}f_i + B_{kif}f_i) \dots (10)$$

$$V_k^2 = e_k^2 + f_k^2 \dots (11)$$

(9),(10)식은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_k = G_{kk}(e_k^2 + f_k^2) + C_k e_k + D_k f_k \dots (12)$$

$$Q_k = B_{kk}(e_k^2 + f_k^2) - D_k e_k + C_k f_k \dots (13)$$

단,  $C_k = \sum_{i=k}^{nb} (e_i G_{ki} + f_i B_{ki}) \dots (14)$

$$D_k = \sum_{i=k}^{nb} (f_i G_{ki} - e_i B_{ki}) \dots (15)$$

다시 (12),(13)식은 원의 표준형으로 만들 수 있다.

$$\left( \sqrt{P_k/G_{kk} + (G_k^2 + D_k^2)/4G_{kk}^2} \right)^2 = (e_k + C_k/2G_{kk})^2 + (f_k + D_k/2G_{kk})^2 \dots (16)$$

$$\left( \sqrt{Q_k/B_{kk} + (C_k^2 + B_k^2)/4B_{kk}^2} \right)^2 = (e_k - D_k/2B_{kk})^2 + (f_k + C_k/2B_{kk})^2 \dots (17)$$

(16)식과 (17)식을 사용해 임의의 한 부하모선에 대한 P와 Q의 원의 방정식을 그려보면 다음과 같다.

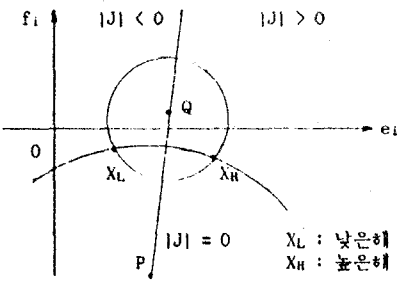


그림 2. |J| 부호의 본포.

그림 2를 설명하면 다음과 같다.  
 1) 2개의 원의 중심을 연결하는 직선상에는 N-R법에서의 자코비안행렬 J의 행렬식이 0이 되어 그 직선의 좌측(|J| < 0, 우측에서는 |J| > 0)이 되고, P와 Q가 증가하여 안정한계점까지 증가한다면 두원의 반경은 작게되어 |J|=0인 선에서 두해는 일치한다.  
 2) |J|=0인 직선의 우측, 즉 |J| > 0의 영역에서 초기치를 선택하면 해는 조류계산에 따라서 X\_H에 수렴하고, 직선의 좌측 |J| < 0인 영역에서 초기치를 고르면 해는 X\_L에 수렴한다.

앞절에서 낮은해를 구하기 위해서는 다수의 조류계산 반복이 필요하여 많은 계산시간이 걸리는데 |J| 부호의 성질(|J| > 0인 영역은 높은해 영역이고 |J| < 0인 영역은 낮은해 영역이다.)을 이용하여 초기치 J의 부호가 음인 경우에만 조류계산을 시행하면 계산소요 시간이 상당히 단축된다.

2-3. 전압 저하량의 결정

낮은해 구해법의 초기치를 구하기 위해 각 부하모선전압(V<sub>H</sub>)을 다음과 같이 저하시킨다. 즉, 계통특성을 고려하여 각 모선전압 저하량에 대한 가중치를 결정한다.

방법1 - 각 부하모선에 대해 동일한 V를 감소시킨다. 즉, 모든 부하모선에 동일한 가중치를 적용한다

$$W_{2i} = 1.0 \dots (18)$$

$$V_i = V_{Hi} + W_{2i} \Delta V \dots (19)$$

단, i: 부하모선, V<sub>Hi</sub>: i번째 높은해 모선전압

방법2 -  $\Delta V_{Hi}/\Delta P_T$ 의 값을 정규화시켜, 그가중치만큼 V<sub>Hi</sub>를 감소시킨다.

$$W_{2i} = (\Delta V_{Hi}/\Delta P_T) / \max(\Delta V_{Hi}/\Delta P_T) \dots (20)$$

$$V_i = V_{Hi} + W_{2i} \Delta V \dots (21)$$

여기서, 최초(기준상태)의 낮은해는 두방법중 하나로 구할 수 있는데, 방법1은 낮은해로 수렴하지않는경우가 있다. 그러나 방법2는 낮은해로 수렴하기위해 계통특성(즉, 전력계통에서 각모선전압크기는 계통구성,발전기와 부하의 배치, 전압조정 설비등의 영향을 받고, 특히 높은해와 낮은해사이의 폭은  $\Delta V_{Hi}/\Delta P_T$ 에 비례한다.)을 반영한다. 그리고, 다음과 같은 가정(정적인 상태)하에서 운전점이 변한다면, 최초상태의 높은해와 낮은해사이의 폭을 정규화시켜 각 부하모선 전압크기 저하량의 가중치로 사용할 수 있다. 한편,  $\Delta V$ 는 대개 -0.1로 지정된다.

- 1) 각모선의 역률은 부하수요 또는 부하의 유효전력과 무관하게 상수로 유지시킨다.
- 2) 각모선의 부하수요는 같은(x) 비율로 증가한다.
- 3) 각발전기의 유효전력출력은 또한슬랙발전기모선을 제외하고 같은(x)비율로 증가한다. 송전(선로)손실의 증분은 슬랙발전기에 의해 흡수한다.
- 4) 발전기 모선전압의 크기는 상수로 유지한다.

2-4. 조류다근 계산법의 알고리즘

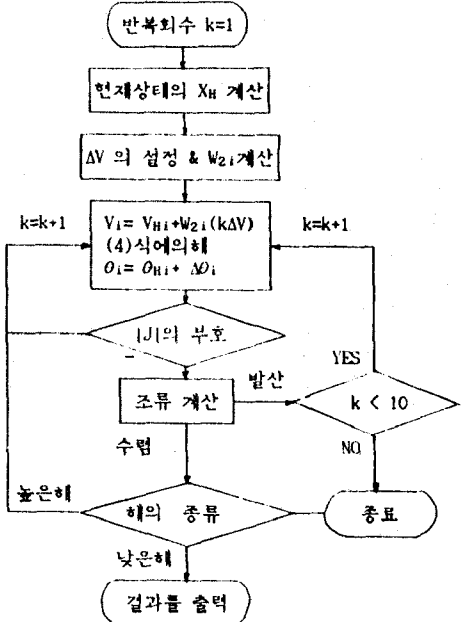


그림 3. 조류다근 계산법의 순서도.

- STEP1 - 주어진 운전조건하에서 조류계산을 시행하여 높은 해( $X_H$ )를 구한다.
- STEP2 -  $\Delta V$ (전압수정량)를 설정하고, 가중계수  $W_2$ 를 구한다. 대개,  $\Delta V$ 는 1%로 지정된다.
- STEP3 - 낮은해에 대한 전압초기치를 구한다

$$V_i = V_{Hi} + W_2 \Delta V \quad \dots\dots (22)$$

- STEP4 - (4)식을 풀어서, 낮은해에 대한 전압위상각의 초기치를 구한다.

$$\theta_i = \theta_{Hi} + \Delta \theta_i \quad \dots\dots (23)$$

- STEP5 - 이 새로운  $V_i, \theta_i$ 에서의  $|J|$  부호를 판별해서
  - i)  $|J| > 0$  이면,  $\Delta V$ 를 증가시켜 STEP3으로 간다.
  - ii)  $|J| < 0$  이면, STEP6으로 간다.
- STEP6 - 수정된 새로운 모션전압값을 사용하여 조류계산을 시행한다.
- STEP7 - 낮은해를 판별한다.
  - i) 낮은해이면, 계산을 종료한다.
  - ii) 그렇지 않으면  $\Delta V$ 를 증가시켜 STEP3으로 간다.

3. 적용 예

그림4와 그림5는 각각 5-모션과 IEEE 14-모션 계통도이다.

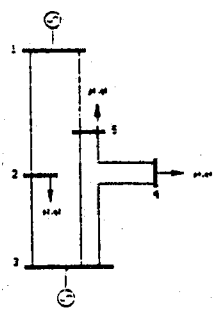


그림 4. 5-모션 계통도

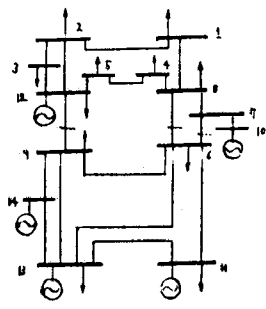


그림 5. IEEE 14-모션 계통도

표 1.  $W_2$ 의 유용성

$\Delta V$	방법1	방법2
0.1	H	H
0.2	H	H
0.3	H	H
0.4	D	D
0.5	D	.
0.6	D	.
0.7	D	.
0.8	D	.
0.9	D	.
1.0	D	.

표 2.  $W_2$ 의 유용성

$\Delta V$	방법1	방법2
0.1	H	H
0.2	H	H
0.3	H	H
0.4	D	H
0.5	D	H
0.6	D	D
0.7	D	L
0.8	D	.
0.9	D	.
1.0	D	.

표 1과 표 2는 최초(기준상태)의 낮은해를 구하기위해 사용되는  $W_2$ 계수의 유용성을 나타낸다. 방법 1에서는 낮은해가 구해지지 않았지만 방법 2에서는 계통 특성을 반영한 가중계수  $W_2$ 를 사용하여 낮은해가 구해짐을 알 수 있다.

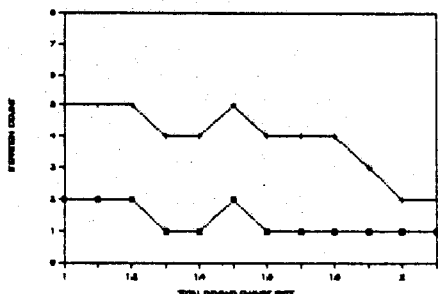


그림 6. 조류계산 반복회수의 비교 (5-모션)

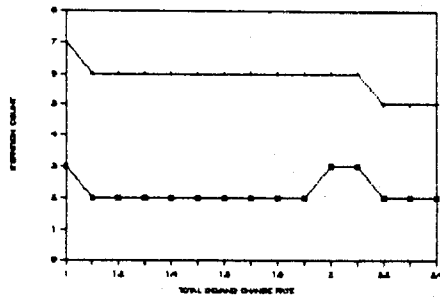


그림 7. 조류계산 반복회수의 비교 (IEEE 14-모션)

그림 6과 7은 기존의 방법(5)과 제안된 방법간의 낮은해( $X_L$ ) 구해시의 조류계산 반복회수의 비교를 나타내는데 이로부터 제안된 조류다근 계산법의 반복회수가 훨씬작아 계산소요시간이 감소되었음을 알 수 있다. 그리고 부하수요가 증가하면(정적인 상태로 증가) 두방법 모두 반복회수가 작아지는데 이것은 높은해가 점점 낮은해와 접근해감을 의미한다.

표 3.  $|J|$  부호 사용의 유용성

계통	5 모션 계통		IEEE 14-모션 계통	
	$ J $	해	$ J $	해
0.1	$26.5695 \times 10^5$	H	$22561.22 \times 10^{12}$	H
0.2	$11.7669 \times 10^5$	H	$6902.24 \times 10^{12}$	H
0.3	$3.7274 \times 10^5$	H	$1699.25 \times 10^{12}$	H
0.4			$230.94 \times 10^{12}$	H
0.5				
0.6	$-1.1828 \times 10^5$	L		
0.7	$-0.6435 \times 10^5$	L		
0.8	$-0.1391 \times 10^5$	L	$-5.98 \times 10^{12}$	L
0.9	$0.0024 \times 10^5$	D	$0.04 \times 10^{12}$	D
1.0	$-0.0421 \times 10^5$	D	$0.01 \times 10^{12}$	D
비고	기준상태 $P_T=255$ MW		기준상태 $P_T=131.9$ MW	

표 3을 보면 제안된 조류다근 계산법에서 부하모션 전압을  $\Delta V$  만큼 저하시켜서 얻은 초기치의  $|J|$  부호가 양일때는 조류계산을 시행하지않고  $|J|$  부호가 음일때에(낮은해 영역일때)만 조류계산을 시행하는 것이 기존의 방법(5)보다 조류계산 회수가 작아짐을 알 수 있다. 제안된 방법은 기존 상태에서 기존의 방법에 비해 5-모션과 IEEE 14-모션 계통에 대해 각각 3회와 4회씩의 조류계산 회수가 절약될 수 있다.

그림 8과 9는 제안된 조류다근 계산법을 통해 얻어진 P-V 곡선의 결과치인데 그중에서 각각 높은해와 낮은해 부하모션 전압사이의 폭이 가장 큰 모션(임계적인 모션)을 선택하여 도시하였다.(5-모션 계통에서는  $V_4$ , IEEE 14-모션 계통에서는  $V_1$ 이다.)

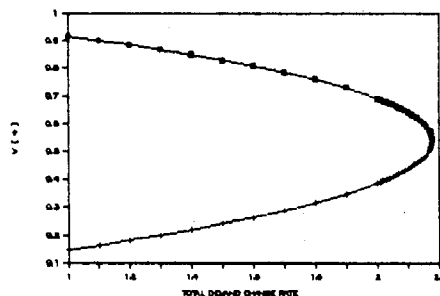


그림 8. P-V 곡선 (5-모션 계통)

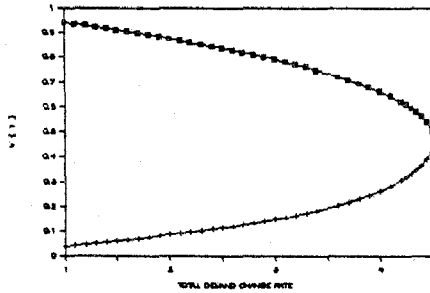


그림 9. P-V 곡선 ( IEEE 14-모선 계통 )

P-V 곡선의 선단( nose point )은 전압 불안정 현상과 가장 밀접한 관계가 있는 전압안정도 한계점( 총부하 수요 한계점, 송전 한계점, 또는 계통 전압 붕괴점 )이다. 이러한 전압안정도 한계점을 구하는 것은 평상시 계통운전에서 전압안정도 여유( margin ) 또는 총부하 수요 여유를 on-line 감시하는데 있어 매우 중요한데 앞으로 조류다근에 의한 전압안정도 한계점을 구하는 연구가 필요하다. 한편 제안된 조류다근 계산법을 대규모 계통에 적용중에 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 IJI 부호의 성질을 이용하여, 즉, 초기치 IJI 의 부호가 음일경우에만 조류계산을 시행하여 종래의 조류다근계산법에 비해 조류계산 소요회수가 훨씬 감소되었고, 계통특성을 반영한 가중계수의 사용을 제시하였다. 또한 이러한 조류다근계산법을 5-모선과 IEEE 14-모선계통에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

1. 기준상태의 낮은해를 구하기위해 계통특성을 반영한 가중치의 사용을 제시하였다.
2. 낮은해를 구하는 경우에 IJI 의 부호를 판정함으로써 낮은해로 수렴하기까지의 조류계산 소요회수를 단축시켰다.
3. 조류다근계산법의 계산소요시간이 감소되었기 때문에 낮은해에 기반을 둔 전압 안정도 감시의 on-line 제어를 가능케 하였다.
4. 다중근과 관련된 총부하수요 한계점의 계산, 계통의 동적특성을 고려했을 때의 영향, 그리고 전압불안정을 보상하기 위한 무효전력원의 투입량 결정에 대한 연구가 앞으로 필요하다.

#### 참고 문헌

1. Tamura, Mori & Iwamoto : "Relationship between Voltage Instability and Multiple Load Flow solution in Electric Power Systems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PSA-102, No.5 (1983)
2. A.Klos & A.Kerner : "Non uniqueness of Load Flow Solutions". Proc. PSCC, 3.1/8, July (1975)
3. A.Klos & S.Mikolajczyk : "Non uniqueness and stability of load flows " Proc. PSCC, VI, 704 (1987)
4. 伊庭健二, 岩本伸一 & 田村康男 : "실규모계통에 대한 조류다근 계산법", 電學論, 55-B30, 소55-5, P257-264.
5. 鈴木守, 佐藤正弘 & 齊柳眞理 : " 전력계통의 근접조류근의 구해법", T.IEE Japan, Vol.109-B, No.10, 1989. P451-458.
6. Akihiko Yokoyama & Yasuji Sekine. : "A Static Voltage Stability Index based on Multiple Load Flow Solutions", Engineering Foundation Conferences on Bulk Power System Voltage Phenomena : Voltage Stability and Security, Potosi, Missouri, 1988.
7. Fernando I. Alvarado & Tay Ho Jung : "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions", Engineering Foundation Conference on Bulk Power System Voltage Phenomena : Voltage Stability and Security, Potosi, Missouri, 1988.