

## 최적 부하절체 알고리즘을 적용한 연속조류계산의 향상

송화창 · 이병준 · 권세혁  
고려대학교 전기전자전파공학부

### Improvement of Continuation Power Flow System Applying the Optimal Load Shedding Algorithm

Hwachang Song · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon  
School of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - Continuation power flow is a tool that can trace the path of the solution from the base stable solution. However, the base stable solution cannot be calculated when the initial system load is too large to operate at a stable operating point. This case is called as unsolvable case. This paper presents implementation of the optimal load shedding algorithm on continuation power flow. It performs steady-state analysis of power systems at unsolvable case that can occur in contingency analysis. Numerical simulation on 20-bus test system demonstrates that the continuation power flow applying the optimal load shedding algorithm is robust at solvable and unsolvable cases.

#### 1. 서 론

전력조류계산은 계통해석을 수행하는데 필수적으로 수반되는 작업이다. 일반적으로 조류계산에 이용되는 뉴턴-랩슨법(N-R)은 전력조류방정식의 자코비안이 ill-condition인 경우, 초기 근사값이 해의 수렴영역 밖에 존재하는 경우, 해가 존재하지 않는 경우에 발산하게 된다. 이중 ill-condition 문제는 정적인 전압불안정점 근처에서 발생하게 되는 데 이러한 문제는 연속 알고리즘을 적용한 연속조류계산을 사용함으로써 성공적으로 해결되었다[1].

해가 존재하지 않는 경우는 계통이 안정적으로 운전될 수 있는 범위밖에 부하가 존재하여 실수의 조류해를 갖지 않게 된다. 특히, 이 경우는 계통의 상정사고 해석시 자주 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 Overbye[2]는 운전조건을 해가 존재하는 영역으로 이동시키기 위하여 최적 절체하는 알고리즘을 소개하였다.

연속조류계산은 기본 조류해로부터 다음해의 근사값을 구하는 예측과정과 이 근사값으로부터 조류해를 구하는 수정과정으로 이루어져 있다. 즉, 연속조류계산은 기본 조류해를 계산할 수 있다는 가정 하에 있다. 그러나 부하가 해를 갖지 않는 영역에 존재하면 연속조류계산은 더 이상 계통해석을 수행할 수 없다.

본 논문에서는 해가 존재하는 경우와 해가 존재하지 않는 경우에서 모두 안정적인 전압안정도 해석을 위해 연속조류계산 시스템에 최적 부하절체 알고리즘을 적용하고자 한다. 먼저 연속조류계산 시스템에 최적 부하절체 알고리즘을 적용하기 위해 필요한 극좌표계를 사용하는 Damped N-R법[3]을 약간 변형시킨 알고리즘을 소개하고 Overbye에 의해 소개된 최적 부하절체 알고리즘을

간단히 설명한다. 본 논문에서는 20-모선 시험계통에 대하여 상정사고 해석시 발생하는 해가 존재하지 않는 경우에 최적 부하절체 알고리즘이 포함된 연속조류계산 시스템을 적용하여 정적인 전압불안정점을 구하여 본다.

#### 2. 변형된 Damped N-R법

비선형 방정식의 해를 구하기 위하여 일반적으로 N-R법이 이용된다. 주어진 비선형 방정식을 다음식으로 간단히 표현하여 보자.

$$F(x) = 0 \quad (1)$$

N-R법은 초기 추정값으로부터 오차허용한계 안에서 식 (1)을 만족하는 해를 구하기 위하여 자코비안을 계산하고 추정값을 갱신하여 나가는 과정을 반복한다. 식 (2)와 (3)은 k번째 반복과정을 나타낸다.

$$x_{k+1} = x_k - \Delta x_k \quad (2)$$

$$\Delta x_k = J^{-1}F(x_k) \quad (3)$$

여기서  $J$ 는  $x_k$ 에서의  $F(x)$ 의 자코비안 행렬이다. 그러나 해가 존재하지 않는 경우에서 N-R법은 수렴하지 않는다. 이 경우 Damped N-R법을 이용하여 근사해를 구할 수 있다.

식 (1)의 해를 구하는 것은 다음 식과 같이 목적함수의 최소화 문제로 변환된다.

$$\min_x G(x) = [F(x)]^T F(x) \quad (4)$$

이러한 벡터 최적화 문제는 최적 승수를 도입으로써 간단한 스칼라 최적화 문제로 바뀐다[4]. 기본적인 개념은 다음과 같다. 먼저  $x$ 를 다음식으로 표현하여 보자.

$$x(\mu) = x_k - \mu \Delta x_k \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)로 표현되는 벡터 최적화 문제에 대입하면 다음과 같다.

$$\min_{\mu} G(\mu) = [F(x_k - \mu \Delta x_k)]^T F(x_k - \mu \Delta x_k) \quad (6)$$

위 식으로 벡터 최적화 문제는 최적 승수  $\mu^*$ 를 구하는 스칼라 최적화 문제가 된다.

직각좌표계의 전력조류 방정식은 2차식으로 표현되고 식 (6)으로 표현되는  $\mu$  최소화 문제는 3차식으로 표현되어 최적 승수기법을 이용하면 각 스텝에서 목적함수 값은 감소를 나타낸다[4].

현재 개발중에 있는 연속조류계산 시스템은 극좌표계를 사용하고 있어, 직각좌표계를 이용하는 최적 승수기법을 연속조류계산 시스템에 적용하기 위해서는 최적 승수기법을 극좌표계로 변환하는 작업이 필요하다. 그러나 극좌표계 전력조류 방정식은 다항식으로 표현되지 않

으므로 최적승수를 구하기 위해서 보간법을 이용하여 목적함수를 근사화가 필요하다. 따라서 근사화에 따른 문제, 즉 근사화된 목적함수의 최적 승수는 구할 수 있으나, 이 최적 승수를 이용할 때 원래의 목적함수인 전력 조류계산의 mismatch가 각 반복스텝에서 감소한다는 보장이 없는 문제가 발생하게 된다.

참고문헌 [3]에서 소개하고 있는 간단한 Damped N-R 법은 극좌표계를 이용하고 있어 쉽게 연속조류계산 시스템에 적용가능하다. 이 Damped N-R법의 원리는 다음과 같다.

k번째 반복스텝에서 식 (3)을 이용하여 수정벡터  $\Delta x_k$ 를 구하였다고 가정하여 보자. 현 반복스텝에서 전력조류계산의 mismatch를 감소시키는 승수  $\mu_{min}$ 을 구하기 위하여 다음 과정이 이용된다.

**과정 1**  $\mu_{min}$ 의 초기 추정값( $\Delta \mu$ )을 선택한다.

**과정 2** 세점  $x_k - \Delta \mu \Delta x$ ,  $x_k - 0 \cdot \Delta x$ ,  $x_k + \Delta \mu \Delta x$ 에서의 목적함수값(mismatch)을 계산한다.

$$\begin{aligned}\psi_1 &= G(x_k - \Delta \mu \Delta x) \\ \psi_2 &= G(x_k - 0 \cdot \Delta x) \\ \psi_3 &= G(x_k + \Delta \mu \Delta x)\end{aligned}$$

**과정 3** 이 세점에 대하여 보간법을 사용하면  $G(x)$ 는 다음과 같이 2차식으로 근사화된다.

$$\psi(\mu) = \psi_2 - \frac{\psi_1 - \psi_3}{2\Delta\mu} \mu + \frac{\psi_1 - 2\psi_2 + \psi_3}{2(\Delta\mu)^2} \mu^2 \quad (7)$$

**과정 4** 근사화된 목적함수를 최소화하는  $\mu_{min}$ 을 다음식으로 계산한다.

$$\mu_{min} = \frac{\Delta\mu(\psi_1 - \psi_3)}{2\psi_1 - 4\psi_2 + 2\psi_3} \quad (8)$$

**과정 5**  $\Delta \mu$ 를 다음식으로 갱신하고  $G(\mu_{min})$ 의 변화가 수렴허용오차 범위내에 존재할 때까지 과정 2부터 반복한다.

$$\Delta\mu = \alpha \mu_{min}^k \frac{|\Delta x^{k-1}|}{|\Delta x^k|}$$

[2]에서 위 식의  $\alpha$ 는 0.25로 선택된다.

본 논문에서는 최적 부하절체 정보를 얻기 위하여 극좌표계에 쉽게 적용할 수 있는 Damped N-R법을 연속조류계산 시스템에 적용하고자 한다. 먼저 근사화된 목적함수를 최소화하는  $\mu_{min}$ 이 본래의 목적함수를 감소시키는 보장이 없는 문제를 해결하기 위하여 변형된 Damped N-R법을 제시한다.

변형된 Damped N-R법의 개념은 앞 절에서 설명한 Damped N-R법에서 계산되는 세점에서의 목적함수 값  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ 와 근사화된 목적함수  $\psi(\mu)$ 를 최소화하는  $\mu_{min}$ 의 본래 목적함수 값  $G(\mu_{min})$ 을 비교하여 이중 가장 작은 목적함수 값을 갖는  $\mu$ 를 각 반복스텝에서 선택하는 것이다. 변형된 Damped N-R법의 알고리즘은 다음과 같다.

**과정 1** 초기  $\Delta \mu$ 은 0.25로 설정한다.

**과정 2**  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ 를 계산한다.

**과정 3** 식 (8)로  $\mu_{min}$ 을 계산한다.

**과정 4**  $\psi_4 = G(x_k + \mu_{min} \Delta x_k)$ 를 구한다.

**과정 5** i)  $\psi_1$ 이 가장 작을 경우( $\mu = -\Delta \mu$ ),

이전 반복스텝에서도  $\psi_1$ 이 선택되었으면

$$\Delta \mu \leftarrow 2\Delta \mu,$$

그 밖의 경우는  $\Delta \mu \leftarrow 1.5\Delta \mu$

ii)  $\psi_2$ 가 가장 작을 경우( $\mu = 0$ ),

$$\Delta \mu \leftarrow \Delta \mu / 2$$

iii)  $\psi_3$ 이 가장 작을 경우( $\mu = \Delta \mu$ ),

이전 반복스텝에서도  $\psi_3$ 이 선택되었으면

$$\Delta \mu \leftarrow 2\Delta \mu,$$

그 밖의 경우는  $\Delta \mu \leftarrow 1.5\Delta \mu$

iv)  $\psi_4$ 가 가장 작을 경우( $\mu = \mu_{min}$ )

$$\Delta \mu \leftarrow (\Delta \mu + \mu_{min}) / 2$$

**과정 6**  $\Delta \mu > 1$ 이면,  $\Delta \mu = 1$

$\Delta \mu < -1$ 이면,  $\Delta \mu = -1$

**과정 7**  $x_{k+1} = x_k + \mu \Delta x_k$ ,  $\Delta x_{k+1} = -J^{-1} F(x_{k+1})$  계산

**과정 8** 수렴판정, 수렴되지 않았으면,

$k \leftarrow k+1$ , 과정 2부터 반복

연속조류계산은 기본 조류해로부터 다음해의 초기 근사값을 구하는 예측과정과 이 근사값으로부터 정확한 조류해를 구하는 수정과정으로 이루어져 있다. 본 논문에서는 변형된 Damped N-R법을 연속조류계산 시스템의 기본 조류해 계산부분과 조류계산 역할을 담당하는 수정 과정에 적용하였다.

### 3. 최적 부하절체 알고리즘

본 절에서는 연속조류계산 시스템에 Overbye가 소개한 최적 부하절체 알고리즘의 적용에 대하여 간단히 설명한다. 최적 부하절체는 해가 존재하지 않는 영역에 존재하는 부하를 최소로 감소시켜 해가 존재하는 영역으로 이동시키는 것이다. 그림 1에서와 같이 최적 부하절체는 해가 존재하는 영역과 해가 존재하지 않는 영역의 경계에 직각을 이루도록 이루어 진다.

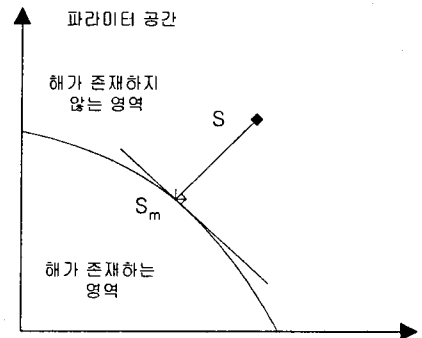


그림 1. 해가 존재하는 영역 및 존재하지 않는 영역

$L$ 을 해가 존재하지 않는 경우에서 부하벡터,  $S$ 를 전력주입 벡터라고 하고  $L_m$ 을 최적 부하절체 후의 부하벡터,  $S_m$ 을 전력주입 벡터라고 하자. 전력주입은 부하에서 발전을 뺀 값이므로 부하절체전과 절체후의 부하벡터의 차 ( $L - L_m$ )는 전력주입 벡터의 차( $S - S_m$ )은 같다. 여기에서 구하고자 하는 것은 해가 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역의 경계에서의 전력주입 벡터  $S_m$ 이다. 앞절에서 설명한 변형된 Damped N-R법을 이용하여 목적함수 (mismatch의 합)  $G(x) = [F(x)]^T F(x) = (S - f(x))^T (S - f(x))$ 가 국부적인 최소값을 갖도록 계산된 근사해를  $x^*$ 라고 하자. 여기에서  $f(x)$ 는 계산된 전력주입을 나타낸다.  $x^*$ 가 국부적인 최소값을 갖도록 하는 근사해이므로 다음식과 같은 조건이 만족된다.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dx} G(x) &= \frac{d}{dx} [F(x)^T \cdot F(x)] \\ &= -2J(x)^T (S - f(x)) = 0\end{aligned} \quad (9)$$

해가 존재하지 않는 영역이므로  $S - f(x^*) \neq 0$ 이다. 그러므로 해가 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역의 경계에서와 같이 국부적인 최소값을 갖도록 하는 근사해에서의 자코비안  $J(x^*)$ 는 특이성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

따라서  $S_m - f(x^*) \neq 0$  이더라도  $f(x^*)$ 의 법선벡터를 최적 부하절체에 이용될 수 있다. Dobson[5]의 결과로부터,  $J(x^*)$ 의 영좌고유벡터(zero left eigenvector)는 경계와 수직이 됨을 알 수 있으므로  $S_m$ 을 계산하는 데 다음식이 이용된다.

$$S_m = S((S - f(x^*))^T w) w \quad (10)$$

여기에서  $w$ 는  $J(x^*)$ 의 영좌고유벡터에 해당한다.

연속조류계산 시스템에 적용된 최적 부하절체 알고리즘의 과정은 다음과 같다.

- 과정 1  $S_0 = S, i=0$ 으로 설정, 오차허용한계  $\epsilon$  선택
- 과정 2  $\min(S_i - f(x)) (S_i - f(x))$ 을 만족하는  $x_i^*$  계산
- 과정 3  $|S_i - f(x_i^*)| \leq \epsilon$  이면, 과정 7로 간다.
- 과정 4  $J(x^*)$ 의 영좌고유벡터  $w$  계산
- 과정 5 (10)식을 이용하여  $S_m$  계산
- 과정 6  $i=i+1$ , 과정 2로 간다
- 과정 7 최적 부하절체( $S-S_i$ )

#### 4. 사례연구

20-모선 시험계통에 최적 부하절체 알고리즘이 포함된 연속조류계산 시스템을 이용하여 해가 없는 경우 최적 부하절체를 통하여 해가 존재하는 영역으로 이동시켜서 기본해를 구하고 이 기본해로부터 정적인 전압불안정점을 계산하여 본다. 표 1에서 20-모선 시험계통의 구성을 나타내고 있다. 이 시험계통의 기본 전체유효부하는 3200MW이다.

표 1. 20-모선 시험계통의 구성

모선	발전모선	부하모선	중간모선	선로	변압기
20	6	6	8	31	6

3번 모선과 4번모선을 연결하는 선로에 대한 상정사고시의 기본 조류계산 결과 N-R 반복회수가 늘어나면서 mismatch값은 증가하여 해의 발산을 보였다. 또한 Damped N-R법을 이용했을 때 국부적인 최소값으로 수렴하여 해가 존재하지 않는 경우라고 판단되었다. 이 경우에 대하여 최적 부하절체 알고리즘이 포함된 연속조류계산 시스템을 적용하여 보았다.

표 2에서 부하절체전과 최적 부하절체후의 부하의 변화를 나타내고 있다. 최적 부하절체후의 전체유효부하는 3190.1MW로 계산되어 건전상태보다 약 10MW 감소를 보이고 있다.

표 2. 부하절체전과 최적 부하절체후의 각 모선의 부하

모선	부하절체전		부하절체후	
	P <sub>L</sub> [MW]	Q <sub>L</sub> [MVar]	P <sub>L</sub> [MW]	Q <sub>L</sub> [MVar]
5	200	100	198.58	95.80
6	1000	800	997.68	793.74
9	300	150	298.88	144.75
11	1200	700	1197.94	693.81
17	100	50	97.28	46.57
19	200	75	198.46	70.69
20	200	75	198.19	70.07

그림 2에서 건전상태와 상정사고시 최적 부하절체후 조류해의 경로를 추적하여 작성된 11번 모선에 대한

P-V곡선을 나타내고 있다. 건전상태의 정적인 전압불안정점에서의 전체 유효부하는 3463.05MW로 계산되었고 3-4 모선의 상정사고시 최적 부하절체후의 정적인 전압불안정점의 전체 유효부하는 3190.65MW로 계산되었다.

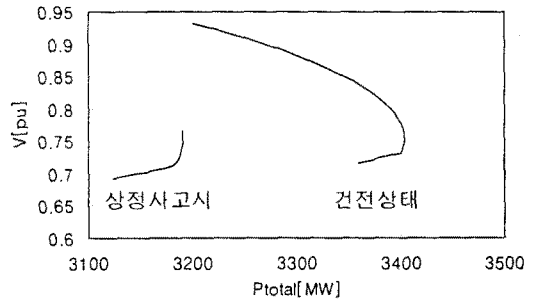


그림 2. 건전상태와 상정사고시의 11번 모선의 P-V곡선

#### 5. 결 론

본 논문에서는 안정적인 연속조류계산 시스템의 개발을 목적으로 상정사고 해석시 자주 발생되는 해가 없는 경우에 대하여 정적인 전압불안정점을 구하기 위하여 최적 부하절체 알고리즘을 연속조류계산 시스템에 적용하였다. 최적 부하절체에 대한 필요한 정보를 얻기 위하여 필요한 연속조류계산 시스템에 적용하기 쉬운 극좌표계의 변형된 Damped N-R법을 소개하였다.

20-모선 시험계통에 최적 부하절체법을 포함시킨 연속조류계산 시스템을 적용하여 정적인 전압불안정점을 구하였다. 해가 없는 경우, 기존의 연속조류계산으로는 기본해의 발산으로 해의 경로를 찾아 갈 수 없는 데 비해 최적 부하절체 알고리즘을 적용한 연속조류계산 시스템을 이용하면 최적 부하절체후 안정적으로 정적인 전압불안정점을 구할 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] V. Ajarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 7, No.1, Feb. 1992.
- [2] T. J. Overbye, "A Power Flow Measure for Unsolvable Cases", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994.
- [3] M. Dehnel, H. W. Dommel, "A Method for Identifying Weak Nodes in Nonconvergent Load Flows", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [4] S. Iwamoto, Y. Tamura, "A Load Flow Calculation Method for Ill-conditioned Power Systems", IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-100, No. 4, April 1981.
- [5] I. Dobson, L. Lu, "New Methods for Computing a Closest Saddle Node Bifurcation and Worst Case Load Power Flow Margin for Voltage Collapse", IEEE Trans. on Power Systems. Vol 8, No. 3, Aug. 1993.