論 文
49A - 11 - 3

최적화기법을 이용한 새로운 조류계산 알고리즘

The New Load Flow Algorithm using Optimal Programming

田 東 勳* · 金 建 中** · 崔 章 欽*** · 嚴 載 鄒*** · 許 炯*** · 李 炳 日***
(Dong-Hoon Jeon · Kern-Joong Kim · Jang-Hum Choi · Jae-Sun Eom · Hyung Huh · Byoung-Ill Rhee)

Abstract - In this paper, we proposed a new load flow analysis algorithm. In order to develop it, we converted typical power flow problem into optimal problem. This problem has the objective function that minimize the difference between calculated values and specified values of bus powers and subject to bus power equations of P and Q. Using it, we solved the divergence by singularity of Jacobian matrix, the divergence by initial value in the typical power flow study. In the study of a sample system, we verified the superiority of proposed algorithm.

Key Words : Load Flow, Optimal Programming, Gauss-Seidel Method, Newton-Raphson Method, Decoupled Method

1. 서 론

전력계통은 전력에너지의 생산, 수송, 배분을 담당하는 각각의 구성요소들이 유기적으로 결합되어 있는 대규모 시스템으로 이러한 계통을 안정적으로 신뢰성있게 운용하기 위해서는 항상 모선전압, 선로조류, 송전손실 등 계통내의 전력분포를 파악하는 일이 우선되어야 한다.

조류계산(Load Flow)은 전력계통해석의 기본으로 주어진 운전조건에 맞는 계통의 상태, 즉 모선전압의 크기와 위상각을 계산하고, 이를 통해서 모선전력, 선로조류 등 계통내의 전력분포를 파악하는 것이다. 대표적인 조류계산법으로는 비선형인 모선전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 Gauss-Seidel법(G-S법), Newton-Raphson법(N-R법), 분할법(Decoupled Method) 등이 있으며, 계통운용상에서는 사용목적과 실계통 규모에 따라 수렴특성, 계산시간, 기억용량 등이 종합적으로 고려되어 가장 적합한 방법이 선택되어진다.

G-S법은 계산방법이 단순하여 반복과정에서 계산기의 기억용량이 적게 소요되는 반면, 다른 방법들에 비하여 수렴까지의 반복횟수가 많고, 수렴특성도 나쁘다는 단점이 있다[1]. 탁월한 수렴특성으로 가장 널리 사용되고 있는 N-R법은 수렴까지의 반복횟수와 수렴특성은 매우 우수하지만, 반복과정에서의 자코비안 행렬과 자코비안 역행렬 계산으로 계산시간이 비교적 많이 걸리고, 초기값에 따라 수렴특성이 좌우되며, 특히 발전기 모선이 발전출력 상한값에 걸려 부하모선으로 특성이 변하는 경우나 계통이 전압붕괴점 부근에서 운전될 경우에는 자코비안 행렬이 특이성(singularity)을 가지게 되어 해를 구할 수 없다는 단점이 있다[2]. N-R법을 근사화한 분할법은 계통이 적정한 전압크기와 작은 위상각을 가지고 정상적인 부하에서 운전될 경우에는 수렴특성과 계산시간이 N-R법보다 우수하지만, 계통부하가 중부하인 경우나 계통에 높은 R/X비를 가지는 선로가 포함될 경우에는 수렴특성이 떨어지는 단점이 있다[3].

본 논문에서는 기존의 조류계산 알고리즘보다 수렴특성이 우수한 새로운 형태의 조류계산 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 비선형인 모선전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 기존의 조류계산 알고리즘과는 달리 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 이용하여 계통상태를 결정하는데, 기존의 조류계산 알고리즘이 가지고 있는 초기값에 따른 발산문제, 자코비안 행렬의 특이성에 의한 발산문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

제안된 알고리즘의 우수성을 입증하기 위해 Wood-Wollenberg 6모선 계통[4]과 IEEE 14모선 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

2. 최적화기법을 이용한 조류계산

2.1 문제의 정식화

조류계산은 주어진 운전조건에 맞는 계통의 상태, 즉 모선전압의 크기와 위상각을 계산하고, 이를 통해서 모선전력, 선로조류 등 계통내의 전력분포를 파악하는 것이다. 이때 조류계산을 통해서 결정된 모선전력, 선로조류 등의 전력분포는 모선에서의 수급조건을 만족해야 하며, 모선전압의 크

* 正 會 員 : 韓電電力硏究院 先任硏究員
** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程
接收日字 : 2000年 3月 22日
最終完了 : 2000年 11月 6日

기와 위상각 등의 계통상태는 계통을 구성하고 있는 설비의 전기적 특성과 운용상태, 각 설비간의 연결상태로부터 정식화되는 모선전력방정식을 만족해야 한다.

따라서, 조류계산 문제는 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로 생각할 수 있다. 식(1)은 조류계산을 최적화 문제로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} &Min \quad f(y_P, y_Q) \\ &s.t \quad P(V,\theta) - y_P = 0 \\ &\qquad Q(V,\theta) - y_Q = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} f(y_P, y_Q) = {} & 1/2(y_P - y^s{}_P)^T (y_P - y^s{}_P) \\ & + 1/2(y_Q - y^s{}_Q)^T (y_Q - y^s{}_Q) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} y_P &= [P_G \;\; P_D]^T \\ y_Q &= Q_D \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} y^s{}_P &= [P_G^{spec} \;\; P_D^{spec}]^T \\ y^s{}_Q &= Q_D^{spec} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서,

y_P : 발전기모선, 부하모선의 유효전력
y_Q : 부하모선의 무효전력
V : 모선전압의 크기
θ : 모선전압의 위상각
P_G : 발전기모선의 유효전력(계산값)
P_D : 부하모선의 유효전력(계산값)
Q_D : 부하모선의 무효전력(계산값)
P_G^{spec} : 발전기모선의 유효전력(지정값)
P_D^{spec} : 부하모선의 유효전력(지정값)
Q_D^{spec} : 부하모선의 무효전력(지정값)
$P(V,\theta), Q(V,\theta)$: 모선전력방정식

식(2)의 목적함수는 각 모선에서 공급할 수 있는 전력량 (y_P, y_Q)과 각 모선에서 요구되는 전력량 $(y^s{}_P, y^s{}_Q)$의 차의 총합으로 계통이 요구되는 전력량을 공급할 수 있으면 목적함수의 값은 0이 되고, 계통이 요구되는 전력량을 공급할 수 없으면 목적함수의 값은 0아닌 값이 되는 특성을 가지고 있는데, 이러한 특성을 이용해서 해의 존재유무를 확인할 수 있다.

2.2 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 유도

식(1)의 최적화문제는 라그란지안 쌍대함수를 이용하여

$$Min \quad L(y_P, y_Q, V, \theta, \lambda_p, \lambda_Q) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} L \equiv {} & f(y_P, y_Q) + \lambda_P\{P(V,\theta) - y_P\} \\ & + \lambda_Q\{Q(V,\theta) - y_Q\} \end{aligned} \tag{6}$$

와 같이 제약조건을 포함한 확장된 형태로 나타낼 수 있고, 식(6)으로부터 변수 $y_P, y_Q, V, \theta, \lambda_P, \lambda_Q$에 대한 최적조건식을

$$\frac{\partial L}{\partial y_P} = y_P - y^s{}_P + \lambda_P = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_Q} = y_Q - y^s{}_Q + \lambda_Q = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial L}{\partial V} = \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^T \lambda_Q = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta}\right)^T \lambda_Q = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_P} = P(V,\theta) - y_P^s = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} = Q(V,\theta) - y_Q^s = 0 \tag{12}$$

와 같이 유도할 수 있다.

따라서, 식(1)의 최적화 문제가 해를 가지기 위한 필요충분조건은 식(7)에서 식(12)까지의 최적조건식을 동시에 만족하는 해가 존재하는 것이며, 이때 최적조건식을 동시에 만족하는 해는 비선형 연립방정식인 최적조건식에 N-R법을 적용하여 구할 수 있다. 식(13)은 이를 행렬 형태로 나타낸 것이다.

$$\Delta G(z) = [H] \cdot \Delta z \tag{13}$$

$$[H] = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & H_{VV} & H_{V\theta} & J_{PV}{}^T & J_{QV}{}^T \\ 0 & 0 & H_{\theta V} & H_{\theta\theta} & J_{P\theta}{}^T & J_{Q\theta}{}^T \\ -I & 0 & J_{PV} & J_{QV} & 0 & 0 \\ 0 & -I & J_{P\theta} & J_{Q\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\Delta z = [\Delta y_P \;\; \Delta y_Q \;\; \Delta V \;\; \Delta\theta \;\; \Delta\lambda_P \;\; \Delta\lambda_Q]^T \tag{15}$$

$$\Delta G(z) = \left[\frac{\partial L}{\partial y_P} \;\; \frac{\partial L}{y_Q} \;\; \frac{\partial L}{\partial V} \;\; \frac{\partial L}{\partial \theta} \;\; \frac{\partial L}{\partial \lambda_P} \;\; \frac{\partial L}{\partial \lambda_Q}\right]^T \tag{16}$$

즉, 식(1)에서 최적화문제로 표현된 조류계산의 해는 식(13)을 이용한 그림 1의 알고리즘을 통해서 구할 수 있는데,

제시한 알고리즘은 비선형인 모선전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 기존의 조류계산 알고리즘과는 달리 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 이용하여 계통상태를 결정하기 때문에 기존의 조류계산 알고리즘이 가지고 있는 초기값에 따른 발산문제, 자코비안 행렬의 특이성에 의한 발산문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 그림 1은 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 순서도를 나타낸 것이다.

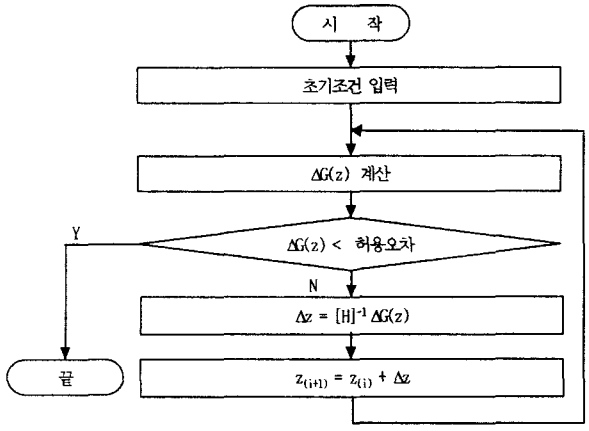


그림 1 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘
Fig 1 New L.F algorithm using optimal programming

3. 사례연구

최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 확인하기 위해 Wood-Wollenberg 6모선 계통[4]과 IEEE 14모선 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

3.1 Wood-Wollenberg 6모선 계통

기준 경우(Base Case)로서 표 1의 모선데이터와 표 2의 선로데이터를 이용하여 기존의 조류계산 알고리즘과 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교하였다. 표 3은 허용오차를 10^{-3}으로 하였을 경우의 알고리즘별 반복횟수를 비교한 것으로서 표 1과 같이 모선전압에 대한 적당한 초기값과 정상적인 수급조건을 가진 경우, 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘과 기존의 조류계산 알고리즘이 비슷한 수렴특성을 가지고 있음을 보이고 있다.

초기값 변화에 따른 기존의 조류계산 알고리즘과 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교하기 위해 표 1에서 부하모선 4,5,6의 전압크기 초기값을 1.0(p.u.)에서 4.0(p.u.)까지 변화시켜가며 조류계산을 수행하였다. 표 4는 초기값 변화에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교한 것으로서 N-R법의 경우에는 이미 알려진 바대로[5] 동일한 수급조건하에서도 초기값에 따라 진동후 거짓값에 수렴하거나 발산하는 수렴특성을 보였으며, 분할법의 경우에도 적절치 않은 초기값에서는 발산하는 수렴특성을 보였다. 이와는 달리 본 논문에서 제시한 방법은 동일한 수급조건하에서 어떠한 초기값을 가지더라도 안정적으로 참값에 수렴하는 우수한 수렴특성을 보였다.

표 1 6모선 계통의 모선데이터
Table 1 Bus data of 6-bus system

모선번호	TYPE	초 기 값			
		전압 (P.U.)		전력 (P.U.)	
		크 기	위상각	P	Q
1	기 준	1.05	0.000	0.000	0.000
2	발전기	1.05	0.000	0.500	0.000
3	발전기	1.07	0.000	0.600	0.000
4	부 하	1.00	0.000	-0.700	-0.700
5	부 하	1.00	0.000	-0.700	-0.700
6	부 하	1.00	0.000	-0.700	-0.700

표 2 6모선 계통의 선로데이터
Table 2 Branch data 0f 6-bus system

선 로		R	X	C
from	to			
1	2	0.1000	0.2000	0.0200
1	4	0.0500	0.2000	0.0200
1	5	0.0800	0.3000	0.0300
2	3	0.0500	0.2500	0.0300
2	4	0.0500	0.1000	0.0100
2	5	0.1000	0.3000	0.0200
2	6	0.0700	0.2000	0.0250
3	5	0.1200	0.2600	0.0250
3	6	0.0200	0.1000	0.0100
4	5	0.2000	0.4000	0.0400
5	6	0.1000	0.3000	0.0300

표 3 기준경우에서 조류계산알고리즘의 수렴특성 비교
Table 3 Comparison of convergence characteristic of LF algorithm in base case

모의방법	N-R Method	Decoupled Method	제시한 방법
반복횟수	3	5	3

자코비안 행렬의 특이성에 대한 기존의 조류계산 알고리즘과 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교하기 위해 표 1에서 부하모선 4,5,6의 유효전력과 무효전력을 각각 0.7(p.u.)에서 2.04(p.u.)까지 증가시켜가며 조류계산을 수행하였다. 이때 발전출력은 계통을 보다 빨리 불안정한 상태로 진행시키기 위해서 표1의 출력으로 고정하였다(발전출력 제약조건 상한값에 걸렸다고 가정). 표 5는 부하증가에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교한 것으로서 널리 알려진 바대로 N-R법의 경우에는 모선부하가

표 4 초기값 변화에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성 비교

Table 4 Comparison of convergence characteristic of LF algorithm in Variation of initial value

모의방법 / 전압증가	N-R Method (반복횟수)	Decoupled Method (반복횟수)	제시한 방법 (반복횟수)
1.0	참값에 수렴 (3)	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (3)
2.0	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (6)	참값에 수렴 (5)
2.1	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (6)	참값에 수렴 (5)
2.2	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (7)	참값에 수렴 (5)
2.3	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (8)	참값에 수렴 (5)
2.4	참값에 수렴 (5)	발산	참값에 수렴 (5)
2.5	참값에 수렴 (5)		참값에 수렴 (5)
3.0	참값에 수렴 (6)		참값에 수렴 (6)
3.1	참값에 수렴 (6)		참값에 수렴 (6)
3.2	참값에 수렴 (7)		참값에 수렴 (6)
3.3	참값에 수렴 (9)		참값에 수렴 (6)
3.4	거짓값에 수렴 (144)		참값에 수렴 (6)
3.5	참값에 수렴 (16)		참값에 수렴 (6)
3.6	발산		참값에 수렴 (6)
3.7	발산		참값에 수렴 (6)
3.8	거짓값에 수렴 (95)		참값에 수렴 (6)
3.9	발산		참값에 수렴 (6)
4.0	거짓값에 수렴 (452)		참값에 수렴 (6)

표 5 부하증가에 따른 조류계산의 수렴특성 비교

Table 5 Comparison of convergence characteristic of LF algorithm in load increase

모의방법 / 부하증가	N-R Method (반복횟수)	Decoupled Method (반복횟수)	제시한 방법 (반복횟수)
0.70	수렴 (3)	수렴 (5)	수렴 (3)
1.40	수렴 (11)	수렴 (5)	수렴 (4)
2.00	수렴 (56)	발산	수렴 (7)
2.01	수렴 (76)		수렴 (7)
2.02	발산		수렴 (8)
2.03			수렴 (9)
2.04			목적함수가 0아닌 값에 수렴 (9)

증가함에 따라 전압붕괴점 부근에서 자코비안 행렬의 특이성으로 인해 발산하는 수렴특성을 보였으며, 분할법의 경우에도 어느 수준이상으로 계통부하가 증가할 경우에는 발산하는 수렴특성을 보였다. 이와는 달리 본 논문에서 제시한 방법은 계통부하가 2.03(p.u.)까지 증가했을 경우에도 해에 수렴하였으며, 특히 계통부하를 증가시킴에 따라 N-R법의 반복횟수가 크게 증가하는 것과는 달리 3~9회의 반복으로 정확히 해에 수렴하는 안정적인 수렴특성을 보였다.

한편 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘은 계통부하가 2.03(p.u.)이하인 경우에서 목적함수의 값이 0에 수렴하는 것과는 달리 계통부하가 2.04(p.u.)이상일 경우에는 목적함수의 값이 0아닌 값에 수렴하고, 제약조건인 모선전력방정식도 만족시키지 못하는데, 따라서 이러한 경우에는 모선전력방정식의 해가 존재하지 않는 불안정한 영역인 것으로 판별할 수 있다. 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 이러한 특성은 전압안정도 해석분야에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 IEEE 14모선 계통

표 6의 모선데이터와 표 7의 선로데이터를 가진 IEEE 14 모선 계통을 대상으로 한 사례연구에서도 3.1절의 모의결과와 동일한 수렴특성을 보였다. 먼저 초기값 변화에 따른 N-R법에 의한 조류계산 알고리즘과 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교하기 위해 부하모선의 전압크기 초기값을 1.0(p.u.)에서 2.0(p.u.)까지 변화시켜가며

표 6 IEEE 14모선 계통의 모선데이터
Table 6 Bus data of IEEE 14 bus system

모선번호	TYPE	초 기 값			
		전압 (P.U.)		전력 (P.U.)	
		크 기	위상각	P	Q
1	기 준	1.060	0.000	2.3240	-.1690
2	발전기	1.045	0.000	.1830	.2970
3	발전기	1.010	0.000	-.9420	.0440
4	부 하	1.000	0.000	-.4780	-.0390
5	부 하	1.000	0.000	-.0760	-.0160
6	발전기	1.070	0.000	-.1120	.0470
7	부 하	1.000	0.000	.0000	.0000
8	발전기	1.090	0.000	.0000	.1740
9	부 하	1.000	0.000	-.2950	-.1660
10	부 하	1.000	0.000	-.0900	-.0580
11	부 하	1.000	0.000	-.0350	-.0180
12	부 하	1.000	0.000	-.0610	-.0160
13	부 하	1.000	0.000	-.1350	-.0580
14	부 하	1.000	0.000	-.1490	-.0500

표 7 IEEE 14모선 계통의 선로데이터
Table 7 Branch data of IEEE 14 bus system

선로		R	X	C
from	to			
1	2	.01938	.05917	0.02640
2	3	.04699	.19797	0.02190
2	4	.05811	.17632	0.01870
1	5	.05403	.22304	0.02460
2	5	.05695	.17388	0.01700
3	4	.06701	.17103	0.01730
4	5	.01335	.04211	0.00640
5	6	.00000	.25202	0.00000
4	7	.00000	.20912	0.00000
7	8	.00000	.17615	0.00000
4	9	.00000	.55618	0.00000
7	9	.00000	.11001	0.00000
9	10	.03181	.08450	0.00000
6	11	.09498	.19890	0.00000
6	12	.12291	.25581	0.00000
6	13	.06615	.13027	0.00000
9	14	.12711	.27038	0.00000
10	11	.08205	.19207	0.00000
12	13	.22092	.19988	0.00000
13	14	.17093	.34802	0.00000

조류계산을 수행하였다. 표 8은 초기값 변화에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교한 것으로서 N-R법의 경우에는 동일한 수급조건하에서도 초기값이 1.2(p.u.)이상일 경우에는 진동후 거짓값에 수렴하거나 발산하는 수렴특성을 보였으나, 본 논문에서 제시한 방법은 초기값이 1.2(p.u.)이상인 경우에도 안정적으로 참값에 수렴하는 수렴특성을 보였다.

표 8 초기값 변화에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성 비교
Table 8 Comparison of convergence characteristic of LF algorithm in Variation of initial value

모의방법 / 전압증가	N-R Method (반복횟수)	제시한 방법 (반복횟수)
1.0	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (4)
1.1	참값에 수렴 (5)	참값에 수렴 (4)
1.2	거짓값에 수렴 (52)	참값에 수렴 (5)
1.3 ~ 2.0	발산	참값에 수렴 (5)

쟈코비안 행렬의 특이성에 대한 기존의 조류계산 알고리즘과 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교하기 위해 부하모선의 유효전력을 0.1(p.u.)씩 증가시켜 가며 조류계산을 수행하였다. 표 9은 부하증가에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성을 비교한 것으로서 N-R법의 경우에는 모선부하가 증가함에 따라 전압붕괴점 부근에서 쟈코비안 행렬의 특이성으로 인해 발산하는 수렴특성을 보였으나, 본 논문에서 제시한 방법은 계통부하를 0.7(p.u.)만큼 증가시켰을 경우에도 해에 수렴하였으며, 앞 절의 사례연구에서와 같이 계통부하를 증가시킴에 따라 N-R법의 반복횟수가 크게 증가하는 것과는 달리 4~9회의 반복으로 정확히 해에 수렴하는 안정적인 수렴특성을 보였다.

표 9 부하증가에 따른 조류계산 알고리즘의 수렴특성 비교
Table 9 Comparison of convergence characteristic of LF algorithm in Variation of load increase

모의방법 / 부하증가	N-R Method (반복횟수)	제시한 방법 (반복횟수)
기준	수렴 (5)	수렴 (4)
0.1	수렴 (6)	수렴 (5)
0.2	수렴 (7)	수렴 (5)
0.3	수렴 (9)	수렴 (5)
0.4	수렴 (12)	수렴 (5)
0.5	수렴 (17)	수렴 (6)
0.6	수렴 (33)	수렴 (6)
0.7	발산	수렴 (9)
0.8	발산	목적함수가 0아닌 값에 수렴 (9)

한편 표 9에서와 같이 계통부하를 0.8(p.u.)만큼 증가시켰을 경우 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘은 목적함수의 값이 0아닌 값에 수렴하고, 제약조건인 모선전력방정식

도 만족시키지 못했는데, 앞절의 경우와 마찬가지로 모선전력방정식의 해가 존재하지 않는 불안정한 영역인 것으로 판별할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 조류계산 알고리즘보다 수렴특성이 우수한 새로운 형태의 조류계산 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 비선형인 모선전력방정식의 선형 근사화를 통해 계통상태를 결정하는 기존의 조류계산 알고리즘과는 달리 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는 최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 이용하여 계통의 상태를 결정한다. 제시한 알고리즘은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1) 기존 조류계산 알고리즘의 초기값에 따른 발산문제를 해결할 수 있다. 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘이 기존 조류계산 알고리즘보다 계산시간이나 기억용량에서 뒤떨어지는 점을 감안하여 정상적인 수급조건하에서 기존 조류계산 알고리즘이 적절치 않는 초기값으로 인해 수렴특성이 좋지 않을 경우, 기존 조류계산 알고리즘의 적절한 초기값을 결정하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

2) 기존 조류계산 알고리즘의 자코비안 행렬의 특이성에 의한 발산문제를 해결할 수 있다. 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘은 계통이 전압붕괴점 부근에서 운전되거나 발전기 모선이 발전출력 상한값에 걸려 부하모선으로 특성이 변화되어 자코비안 행렬이 특이성(singularity)을 가지게 되는 불안정한 계통에 대해서도 정확히 해에 수렴하는 안정적인 수렴특성을 가지고 있다. 특히 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘은 해가 존재할 경우 0이 되고, 해가 존재하지 않는 경우 0아닌 값을 가지는 목적함수의 특성을 이용하여 조류계산의 해가 없는 경우 실제 모선전력방정식의 해가 없기 때문인지 아니면 자코비안 행렬의 bad condition 때문에 해를 구할 수 없는 것인지를 판별해낼 수 있다.

3) 최적화기법을 이용한 조류계산 알고리즘은 본 알고리즘이 가지고 있는 불안정한 계통에서의 안정한 수렴특성, 계통상태와 동시에 결정되는 람다정보 (λ_P, λ_Q), 불안정한 영역에서는 0아닌 값을 가지는 목적함수의 특성 등을 이용하여 전압안정도 해석분야에서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Stagg & El-Abiad, Computer method in power system, International student edition, 1968.

[2] M.A.Pai, Computer techniques in power system analysis , 1979.

[3] Prabha Kundur, Power System Stability and Control, 1993

[4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation Operation & Control, 1984.

[5] Albert M. Sasson, Carlos Trevino, Florencio Aboytes, "Improved Newton's Load Flow through a Minimization Technique", TP 18-PWR, 1971.

[6] 김건중, 엄재선, 최장흠, 장경철, 정대원, "수정 뉴튼-랍손법을 적용한 조류계산", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1094~1096, 1997.

[7] 전동훈, 권석기, 안광원, 김건중, 최장흠, "최적화기법의 적용에 의한 전력조류계산 알고리즘의 개선", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.155~157, 1998.

[8] 전동훈, 김건중, 엄재선, 임종호, 한현규, "최적화기법을 이용한 전력조류계산의 계산속도 개선", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.80~82, 1999.

[9] 최장흠, "이차 근사화 특성을 이용한 조류계산 수렴도 개선", 충남대학교 석사학위논문, 1999.

저 자 소 개

전 동 훈 (田 東 勳)

1966년 12월 11일생. 1991년 홍익대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 충남대 전기공학과 박사과정. 1994년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5833, Fax : 042-865-5844
E-mail : dhjeon@kepri.re.kr

김 건 중 (金 建 中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977년 해군 제2사관학교 교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5659, Fax : 042-823-7970
E-mail : kjkim@ee.chungnam.ac.kr

최 장 흠 (崔 章 欽)

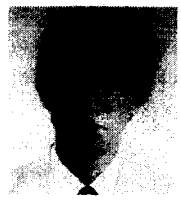
1972년 5월 26일생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7609, Fax : 042-823-7970
E-mail : mu-sic@power.ee.cnu.ac.kr

엄 재 선 (嚴 載 鄯)

1963년 9월 9일생. 1986년 충남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7609
E-mail : jseomm@kornet.net



허 형 (許 炯)

1957년 6월 19일생. 1984년 광운대 전기공학과 졸업. 1995년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1984년~현재 한국원자력연구소 근무

Tel : 042-868-8097, Fax : 042-868-8990
E-mail : hhuh@kaeri.re.kr

이 병 일 (李 炳 日)

1962년 11월 11일생. 1985년 금오공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 시스템제어 전공(석사). 현재 충남대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-821-7609 Fax : 042-823-7970
E-mail : brhee@power.ee.cnu.ac.kr