

Chaotic Search Algorithm for Network Reconfiguration in Distribution Systems

李相奉* · 劉錫九**
(Sang-Bong Rhee · Seok-Ku You)

Abstract - The loss minimization is one of the most important problems to save the operational cost in distribution systems. This paper presents an efficient method for optimal feeder reconfiguration of distribution systems. Chaos search algorithm (CSA) is used to reconfigure distribution systems so that active power losses are globally minimized with turning on/off sectionalizing switches. In optimization problem, the CSA searches the global optimal solution on the basis of regularity in chaotic motions and easily escapes from local or near optimal solution. The CSA is tested on 15 buses and 32 buses distribution systems, and the results indicate that it is able to determine appropriate switching options for global optimum reconfiguration.

Key Words : Chaos, Network Reconfiguration, Optimization, Global Optimum, Distribution System, Load Flow

1. 서 론

배전계통은 효과적인 계통의 보호와 운용을 위하여 대부분 방사상(radial)으로 구성되어 있으며 구간개폐기(sectionalizing switch)와 연계스위치(tie-switch)를 사용하여 계통을 구성하고 부하에 전력을 공급한다. 따라서 구간개폐기 및 연계스위치의 on-off 상태변화는 부하에 전력을 공급하는 급전선(feeder)의 방사상 구성을 변화시키며 결국, 전체적인 배전계통의 운전상태 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 배전계통의 전력공급 시에 발생하는 전력손실은 계통을 구성하는 배전선의 저항성분에 의해 대부분 그 값이 결정되기 때문에 중부하(heavy load)에 전력을 공급하는 특정 배전선에서 손실은 더욱 증가하게 된다. 따라서 구간개폐기 및 연계스위치의 조작에 의해서 특정 선로에 집중된 부하를 적은양의 부하만을 담당하고 있는 다른 급전선으로 배전 경로를 변경 할 경우 배전계통의 구성변화로 계통운용 시에 발생하는 전체 전력손실을 감소시킬 수 있다. 이와 같이 배전계통 재구성 문제는 특정 급전선으로 편중된 첨두부하(peak demand)를 계통내의 타 급전선으로 전력 공급 경로를 변경하여 전체 배전계통의 전압 프로파일을 향상시키고 계통의 신뢰도를 개선할 수 있다 [1-3].

배전계통의 재구성 문제(reconfiguration problem)는 계통의 손실최소화를 목적함수로 하고 각각의 개폐기 상태와 모선에서의 전압의 크기 등 여러 가지 제약을 갖는 비선형적이

고 조합적인 최적화문제(nonlinear combinatorial optimization problem)로 표현된다. 재구성 문제를 보다 효율적이고 정확하게 해석하기 위하여 현재까지 진화연산, 신경망등과 같은 인공지능 기법 그리고 기존의 최적화 기법을 사용한 여러 가지 방법들이 제안되고 응용되었다. 그러나 재구성 문제의 복잡성으로 인해 수렴속도 및 최적해의 정확성 보장에는 여러 가지 단점들을 나타내고 있다[4].

본 논문에서는 배전계통 재구성 문제를 효과적으로 해석하기 위하여 최적화 알고리즘과 빠른 조류계산을 결합하여 배전 계통에 적용하였다. 최적화 알고리즘으로는 카오스 탐색 알고리즘(chaos search algorithm ; CSA)을 이용하였는데 CSA는 일반적인 선형 그리고 비선형 특성을 갖는 최적화 문제에 있어서 최적해의 탐색방향 및 구간을 카오스적인 기법으로 결정하여 계산함으로써 결국 전역적 최적해(global optima)를 보장하는 해석기법으로 Li 와 Jiang에 의해서 제안된 방법이다[5]. 또한 빠른 조류계산을 위하여 각 버스로 유입되는 전류 합을 이용하여 전압의 크기를 계산하는 방법을 사용하였으며, 일반적으로 배전계통은 방사상구조로 되어 있기 때문에 loop 가 존재하는 송전계통보다는 조류계산을 쉽게 처리할 수 있다. 그러나 빠르고 정확한 조류계산을 위해서는 계통의 구성과악이 가장 중요한 문제로 대두 되는데 본 논문에서는 프로그램의 코딩 및 계통구성 과악에 우수한 장점을 갖고 있는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였다 [7].

2. 카오스 탐색알고리즘 (CSA)

카오스현상은 비 선형시스템에 존재하는 현상이며 유한한 공간에서 정의되는 결정론적 시스템(deterministic system)에 있어서는 불안정한 동작특성(unstable motion)을 내재하고 있

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程 修了

** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 3月 18日

最終完了 : 2003年 5月 2日

는 자연현상 중의 하나이다. 이러한 카오스의 불안정한 동작 특성은 초기에는 일반적인 동적시스템의 동작특성과 크게 차이가 없으나 시간이 지날수록 매우 복잡한 특성을 나타내며, 또한 설계된 시스템의 초기값 차이에 의해서 완전히 새롭고 독립적인 동작특성을 갖는 시스템으로 변화되는 특성을 나타낸다. 즉, 카오스 시스템에 있어서는 초기값의 매우 작은 차이가 시간이 지남에 따라 시스템을 완전히 다른 시스템으로 변화시키는 큰 차이를 갖도록 하는 것이다[5]. 또한 카오스 시스템은 복잡한 혼돈 속에서도 정교한 패턴이 내재된 동작 특성을 갖는데 다음의 그림 1과 같다[6].

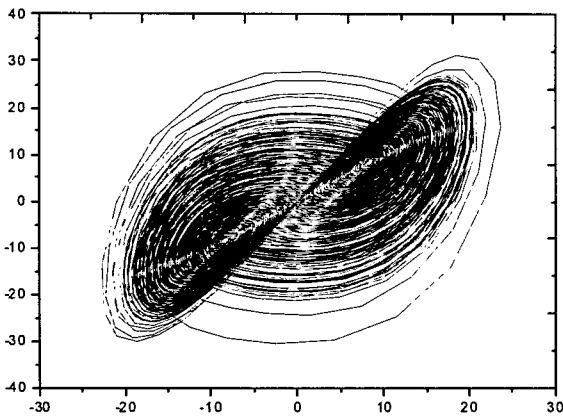


그림 1 비선형문제에 대한 카오스 특성 예
Fig. 1 The Chaos Phase Plot of Non-linear Problem

그림 1에서 카오스 동작을 살펴보면 선으로 나타낸 궤적이 임의의 구간에서 오직 한번만 지나며 전 구간에 걸쳐 겹쳐지지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 카오스의 특성은 최적화 알고리즘의 적용, 즉 최적해 탐색 구간 결정에 가장 큰 장점으로 이용될 수 있는 것이다.

카오스의 동작 특성을 이해하기 위하여 간단한 시스템인 식 (1)을 살펴보면 μ 값에 따라서 식 (1)의 계산 결과가 크게 변화되는 것을 알 수 있다.

$$x_{n+1} = f(\mu, x_n) = \mu x_n(1 - x_n) \quad (1)$$

μ : control variable ($0 \leq \mu \leq 4$)

x : initial value ($0 \leq x_0 \leq 1$)

시스템 제어변수인 μ 가 2.8, 3.2, 3.5, 3.9일 경우 이에 대한 결과를 그림 2에 나타내었는데 그림에서와 같이 μ 값이 3.5보다 작은 경우 시스템의 출력 값이 결국 수렴 또는 발산할 것이라는 예상이 가능하나 μ 값이 3.5보다 크게 되는 경우, 복잡하고 예측 불가능한 카오스적 동작특성을 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 세로축은 식 (1)의 출력 값이며 가로축은 반복계산 수이다.

따라서, 카오스적인 특성을 최적화 알고리즘으로 이용하기 위해서는 식 (1)을 다음과 같이 μ 값을 4로 결정한 식 (2)로 변형하여 사용한다.

$$x_{n+1} = 4x_n(1 - x_n) \quad (2)$$

또한 초기값에 의해서도 카오스의 동작 특성이 크게 영향을 받는다. 표 1은 식 (2)에 의한 결과인데 단지 초기값만을 다르게 하고 초기값 변화에 따른 출력 결과를 반복계산 별로 나타내었다. 표 1에서와 같이 초기값이 0.1인 경우와 0.001, 0.00001인 경우 비록 미세한 차이를 갖지만 반복계산이 20인 경우 식 (2)의 출력이 전혀 다른 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 카오스 시스템은 초기값 x_0 의 차이에 의해서 출력 값이 완전히 다른 카오스적인 시스템의 출력을 얻을 수 있으며 이는 초기의 미세한 동작이 최종적으로 엄청난 결과를 가져온다는 카오스 본연의 특성에 기인 한 것이다.

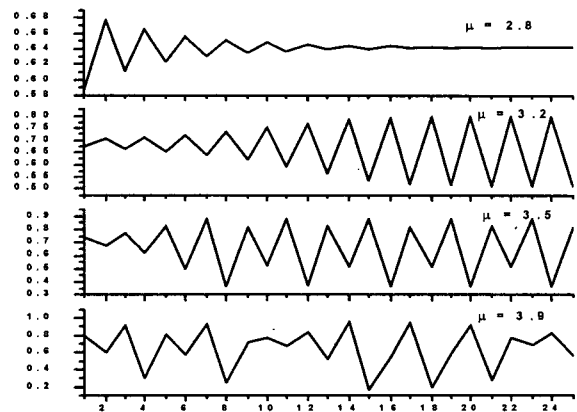


그림 2 여러 μ 값에 대한 식 (1)의 결과
Fig. 2 The Output of (1) According to Various μ

표 1 초기값에 따른 식 (2)의 결과
Table 1 The Result of Eq. (2) by initial Value

N	x_0		
	0.1	0.1001	0.100001
1	0.36	0.36032	0.360003
2	0.9216	0.921958	0.921604
3	0.289014	0.287806	0.289002
4	0.821939	0.819895	0.821919
5	0.585421	0.590669	0.585473
6	0.970813	0.967116	0.970777
7	0.113339	0.12721	0.113475
8	0.401974	0.444109	0.402392
9	0.961563	0.987505	0.961891
10	0.147837	0.0493563	0.146627
11	0.503924	0.187681	0.50051
12	0.999938	0.609828	0.999999
13	0.000246305	0.951752	4.16748e-006
14	0.000984976	0.183682	1.66698e-005
15	0.00393603	0.599772	6.66783e-005
16	0.0156821	0.960183	0.000266695
17	0.0617448	0.152928	0.0010665
18	0.23173	0.518164	0.00426144
19	0.712124	0.99868	0.0169731
20	0.820014	0.00527196	0.0667401

최적화 문제의 카오스 알고리즘 응용

일반적인 최적화 문제는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며 이러한 문제에 카오스 탐색 알고리즘인 CSA를 적용하기 위한 절차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x_i) \quad & i=1, \dots, N \\ \text{s.t. } & a_i \leq x_i \leq b_i \end{aligned} \quad (3)$$

step 1: Generate chaos variable

변수의 수 i 에 대하여 작은 차이를 갖도록 각 변수별로 초기값을 결정하고 식 (2)를 이용해 카오스 변수 출력을 계산한다.

step 2: First carrier wave

계산된 카오스 변수결과를 식 (3)의 제약식을 만족하도록 식 (4)를 이용하여 변형한다.

$$x_i'(n+1) = a_i + (b_i - a_i) \cdot x_i(n+1) \quad (4)$$

step 3: Rough search

$x_i^* = x_{i0}$ 으로 결정하고 초기 목적함수값 f 를 계산하여 $f^* = f$ 로 결정한다. 반복계산을 위하여 $n = n+1$ 로 하여 식 (2), (3)을 반복 계산하고 목적함수 f 를 계산한다. 만약 $f \leq f^*$ 일 경우에는 $f^* = f$, $x_i^* = x_i'$ 로 하고 그렇지 않는 경우에는 n 을 증가시킨다. 정해진 반복 계산을 수행한다.

step 4: Second carrier

정해진 반복계산을 수행한 후에는 식(5)를 이용하여 세밀하고 정확한 최적해 탐색을 실행할 수 있도록 현재까지의 최적해인 x_i^* 를 이용해 새로운 탐색영역을 구성한다. 이 방법에 의해 step 3 까지의 최적해를 초기값으로 하여 초기값의 근방에서 정밀하게 새로운 최적해 탐색이 가능하게 된다.

$$x_i''(n+1) = x_i^* + \alpha x_i(n+1) \quad (5)$$

여기서 α 는 새로운 탐색 영역을 결정하는 상수이며 α 값의 선정은 카오스 시스템의 수렴성에 크게 영향을 미친다. 실수해를 구하는 경우에는 일반적으로 try&error 방법을 사용하나, 본 연구에서는 정수해를 구하므로 step 4, 5를 무시하고 단일 탐색을 실시하였다.

step 5: Fine search

step 3과 같은 방법으로 x_i^* 주변을 세밀하게 탐색하여, 정해진 반복계산 후 해의 개선이 없는 경우 현재의 해를 최적해로 결정한다.

step 6: End

3. 배전조류계산

본 논문에서 사용된 조류계산은 CSA에 의해 결정된 스위치 조합을 정보로 하여 새로운 계통을 재구성한 후 손실을

계산한다. 즉, CSA에 의해 매번의 최적해 탐색 후 손실감소 여부를 판단하기 위하여 조류계산이 실행되므로 빠르고 정확한 조류계산을 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 각 부하에서의 전압을 그 버스에 유입되는 전류에 의해 직접 계산하는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였는데 우선 그림 3과 같은 계통에서 계통을 분석하여 정리하면 표 2와 같으며 branch상에 연결된 노드의 전체수와 노드 번호를 표시하였다. 임의의 branch에서 그 branch상에 연결된 노드의 전체수와 노드 번호를 알고 있는 경우 조류계산 절차는 다음과 같다[7].

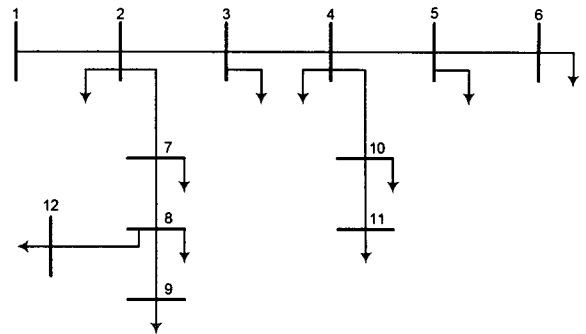


그림 3 방사상 계통 간략도

Fig. 3 Single-Line Diagram of Radial Distribution Network

표 2 네트워크 구조

Table 2 Network Structure

B[JJ]	IS[JJ]	IR[JJ]	Nodes Beyond Branch JJ	N[JJ]
1	1	2	2, 3, 4, 7, 8, 5, 10, 9, 12, 6, 11	11
2	2	3	3, 4, 5, 10, 6, 11	6
3	3	4	4, 5, 10, 6, 11	5
4	4	5	5, 6	2
5	5	6	6	1
6	2	7	7, 8, 9, 12	4
7	7	8	8, 9, 12	3
8	8	9	9	1
9	4	10	10, 11	2
10	10	11	11	1
11	8	12	12	1

B[JJ] : Branch Number
 IS[JJ] : Sending-End Node
 IR[JJ] : Receiving-End Node
 N[JJ] : Total Number of Nodes Beyond Branch B[JJ]

Branch 1(B[1]) 즉, 노드 1과 2사이에서 수전단 노드인 노드 2의 전압은 다음의 식 (6)과 같이 쓸 수 있으며

$$V[2] = V[1] - I[1]Z[1] \quad (6)$$

또한 branch 2의 수전단인 노드 3에서의 전압은 식 (7)과 같다.

$$V[3] = V[2] - I[2] Z[2] \quad (7)$$

이와 같이 식 (7), (8)을 살펴보면, 송전단의 전압, 전류, 임피던스를 이용할 경우 송전단 노드와 연결된 수전단 전압은 간단한 수식에 의해 순차적으로 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있으며 다음과 같이 일반식으로 표현된다.

$$V[IR(jj)] = V[IS(jj)] - I[jj] Z[jj] \quad (8)$$

여기서, jj , $IR(jj)$, $IS(jj)$ 는 각각 branch 번호, 수전단 노드번호, 그리고 송전단 노드번호이다. 노드 1로 흐르는 전류는 branch 1에 연결된 모든 노드에서의 부하전류 합과 충전전류 합으로 식 (9)와 같이 계산되며, 노드 i 에서의 부하전류, 충전전류는 식 (10), (11)과 같이 쓸 수 있다. 이때 초기 계산에 필요한 노드 1의 전압은 기준전압으로 가정하고 반복적으로 계산된다.

$$I[1] = \sum_{i=2}^{LN} IL[i] + \sum_{i=2}^{LN} IC[i] \quad (9)$$

$$IL[i] = \frac{PL[i] - iQL[i]}{V^*[i]} \quad i = 2, 3, \dots, NB \quad (10)$$

$$IC[i] = y_o[i] V[i] \quad i = 2, 3, \dots, NB \quad (11)$$

- $IL[i]$: 노드 i 로 흐르는 부하전류
- $IC[i]$: 노드 i 로 흐르는 충전전류
- y_o : 노드 i 에서의 charging 어드미턴스
- $PL[i]$: 노드 i 에서의 유효부하
- $QL[i]$: 노드 i 에서의 무효부하

또한, branch 2를 통하여 흐르는 전체전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I[2] = IL[3] + IL[4] + IL[5] + IL[6] + IL[10] + IL[11] + IC[3] + IC[4] + IC[5] + IC[6] + IC[10] + IC[11] \quad (12)$$

다음으로 계통의 모든 branch를 통하여 흐르는 전류를 이용해 식 (13), (14)를 통해 손실을 계산한다.

$$Loss P[jj] = |I[jj]|^2 R[jj] \quad (13)$$

$$Loss Q[jj] = |I[jj]|^2 X[jj] \quad (14)$$

- $R[jj]$: branch jj 에서의 resistance
- $X[jj]$: branch jj 에서의 reactance

본 논문에서 사용한 조류계산은 branch의 수전단 쪽 노드로 유입되는 전류를 이용하여 손실을 순차적으로 계산하는 매우 간단한 방법이며 표 2와 같이 계통이 분석되어 있는 경우 매우 빠른 조류계산 결과를 얻을 수 있다. 프로그램 상에서 계통을 분석하고 각 branch상에 연결된 모선을 파악하고 검출하기 위한 상세한 알고리즘은 참고문헌 [7]에 자세히 기술되어 있다.

4. 재구성 문제의 CSA 적용

4.1 재구성 문제의 정식화

배전계통에 있어서 재구성 문제는 계통내의 주어진 여러 가지 제약을 만족하면서 손실을 최소화하는 문제이며 수학적으로 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$Min f_c = \sum_{i=1}^{LN} Loss_i \quad (15)$$

여기서 LN은 배전계통의 전체 branch수이며 목적함수인 식 (15)는 다음과 같은 제약을 만족해야한다.

- a) 모든 모선에서의 전압 상, 하한치
- b) 선로 전류의 한계
- c) 모든 부하로의 전력공급
- d) 방사상 구성 유지

4.2 재구성 문제를 위한 CSA 해법

본 논문에서는 재구성 문제를 해결하기 위한 계통내 스위치 상태를 결정하고자 CSA를 이용하였다. CSA해법의 순서는 다음과 같다.

메쉬네트워크 구성

계통내 연계스위치를 닫을 경우 배전계통은 루프모양을 갖는 메쉬네트워크로 구성 된다. 그림 4와 같이 15모선을 갖는 계통에서는 2개가 생성됨을 알 수 있다. 즉, 새롭게 생성되는 메쉬네트워크의 수는 그 계통이 갖고 있는 연계스위치의 수와 같다.

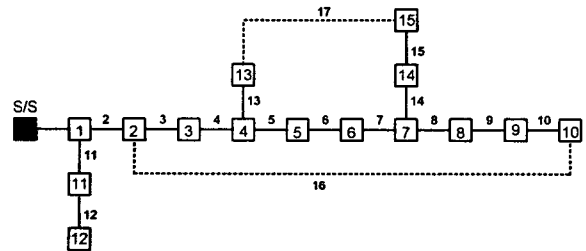


그림 4 15 모선 계통
Fig. 4 15 Bus System

CSA의 탐색구간 설정

각 메쉬네트워크에 속해있는 구간개폐기들을 이용하여 카오스 변수의 상, 하한치를 식 (4)를 이용하여 설정 한다. 그림 4에서 #1 네트워크에 속해 있는 구간개폐기는 5, 6, 7, 13, 14, 15, 17번이며 총 7개 이므로 카오스 변수의 상하한치는 1부터 7까지의 값을 갖고 생성된 카오스 변수값이 1이 될 경우 이 값과 매칭되는 구간개폐기는 5번이 된다. 마찬가지로 #2 네트워크에 대한 카오스 변수는 1부터 8까지의 상하한 값을 갖는다.

카오스변수 생성

메쉬네트워크의 수와 같은 수의 카오스 변수를 식 (2)를

이용하여 생성한다. 그림 4에서는 변수가 2개이며 초기값은 0.1, 0.1001과 같이 미세한 차이를 갖도록 정하였다.

개방스위치 결정

배전계통은 각 메쉬네트워크에서 중복되지 않도록 오직 하나의 구간 개폐기를 개방 할 경우 새로운 방사상 계통을 구성할 수 있다. 이때, 각 네트워크에서 개방되는 하나의 스위치를 결정하기 위하여 위에서 생성된 카오스 변수를 특정 개폐기로 할당한다. 원래의 카오스 변수는 상, 하한치를 만족하는 실수로 생성되므로 본 논문에서는 개폐기 번호를 할당할 수 있도록 프로그램 내에서 정수로 변환하였다. 그림 4와 같은 계통에서 카오스 변수가 각각 1, 1이 출력 될 경우 이 값에 대한 개방 스위치는 #1 네트워크에서 5번, #2 에서는 3번이 된다. 만약 새롭게 선택된 개폐기가 동일하거나 방사상 제약을 만족하지 못하는 경우 카오스 변수를 다시 생성한다.

계통 재구성

조류계산을 위하여 계통을 재구성한다.

조류계산

결정된 번호의 구간개폐기를 개방하여 새로운 계통을 구성한 후 손실 계산을 위한 조류계산을 실행한다. 조류계산후 계통의 전압, 전류에 관계된 제약을 만족하지 못하는 경우 카오스 변수를 다시 생성하고 반복 계산한다.

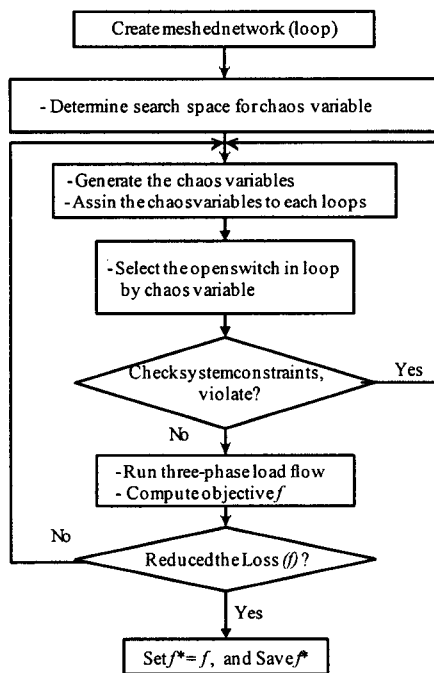


그림 5 재구성 문제를 위한 CSA 알고리즘
Fig. 5 CSA Algorithm for Reconfiguration

Li와 Jiang이 제안한 카오스 탐색법은 2장에서 기술한 바와 같이 실수영역의 전역적인 최적해 보장을 위하여 두 번째 탐색과정에서는 제약함수를 축소시켜 새로운 탐색영역을 구성하지만 본 논문에서 해석하는 재구성 문제에서는 구간개폐

기 번호가 연속성이 없는 이산적 특성의 정수값을 가지므로 단계별 탐색이 아닌 단일 탐색을 실시하였다. 이와 같이 CSA를 통해 새로운 스위치 조합해를 결정한 후, 빠르고 정확한 조류계산을 통해 목적함수 즉, 계통손실을 계산하고 손실을 감소시키는 최적의 계통구성을 얻을 수 있다. CSA해법을 정리하여 순서도로 나타내면 그림 5와 같다.

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법인 CSA의 효율성과 계통해석에 대한 신뢰도를 입증하기 위하여 15, 32모선을 갖는 2가지 시험계통에 적용하였는데, 사용된 시험계통은 국부적 최적해가 존재하는 계통이며 사례연구별 내용과 시험결과는 다음과 같다.

Case1: 15 모선 계통

사례연구 1의 계통은 그림 4와 같이 15모선, 2개의 tie-switch로 구성되어 있으며 계통전압은 13.6[kV]이고 전체 부하는 3636[kW], 1550[kVar]이다. 재구성전의 유효전력 손실은 158.52[kW]이며 계통의 구성과 데이터는 다음과 같다 [8].

표 3 15 모선 선로 및 부하 데이터

Table 3 15 Bus Line and Load Data

Br.	From-To	P [kW]	Q [kW]	R[Ω]	X[Ω]	V [p.u]
1	0-1	56.3	24.0	0.863	1.860	0.9641
2	1-2	115.0	49.0	0.116	0.250	0.9603
3	2-3	138.0	58.8	0.075	1.161	0.9579
4	3-4	0.0	0.0	0.022	0.048	0.9572
5	4-5	390.4	166.3	0.340	0.733	0.9476
6	5-6	214.4	91.4	0.686	0.979	0.9338
7	6-7	137.4	58.6	0.478	0.683	0.9252
8	7-8	560.7	238.9	0.249	0.356	0.9223
9	8-9	229.0	97.6	0.476	0.250	0.9200
10	9-10	454.2	193.5	1.401	1.100	0.9150
11	1-11	274.5	117.0	0.683	0.975	0.9599
12	11-12	401.2	171.0	0.446	0.636	0.9583
13	4-13	151.5	64.6	1.654	0.535	0.9556
14	7-14	190.1	81.0	0.300	0.263	0.9240
15	14-15	323.7	137.9	0.327	0.286	0.9231
16*	2-10	-	-	2.000	1.000	-
17*	13-15	-	-	1.500	1.000	-

* : Branches to be used for network reconfiguration

Case2: 32 모선 계통

사례연구 2에서는 32모선을 갖는 시험계통에 적용하였다. 재구성전의 계통손실은 210[kW]이고, 계통구성에 관한 내용은 표 4와 같다.

표 4 32 모선의 계통구성

Table 4 32 Bus Test System Details

No. of Tie-Switch (loops)	5
No. of Branches	32
System Voltage	12.66 [kV]
System Load (Active)	3715 [kW]
System Load (Reactive)	2300 [kVAR]
System Loss (Initial)	210.0 [kW]

나머지 계통데이터는 참고문헌 [9]에 나타나 있다. 모의시험결과, 표 5에서와 같이 전력손실은 사례연구별로 각각 39.60[kW], 63.12[kW]의 감소와 계통의 최소전압 크기를 사례연구 1에서는 0.915[p.u]에서 0.9441[p.u]로, 사례연구 2에서는 0.913[p.u]에서 0.938[p.u]로 향상시키는 스위치 조작 결과를 얻을 수 있었다.

또한 사례계통들은 지역적, 국부적 최소값, 즉 유효전력 손실 118.988[kW], 140.275[kW]을 얻을 수 있는 스위치 조작이 존재하는데 표 5의 내용과 같이 118.925[kW], 139.548[kW]인 전역적 최적해로 수렴하는 결과를 나타내었다.

표 5 사례연구 1, 2의 CSA알고리즘 결과

Table 5 CSA Results of Case 1, 2

Test Systems	Case 1	Case 2
Loss [kW] (Base System)	158.523	202.667
Loss [kW] (optimal)	118.925	139.548
Solution (optimal) Branch in-out	16-9, 17-14	33-7, 34-14, 35-9 36-32, -37
Loss [kW] Reduction	39.598	63.119
Min. Voltage [p.u]	0.9441	0.9378
Loss [kW] (Near optimal)	118.988	140.275
Solution (Near optimal)	16-9, 17-15	33-7, 34-14, 35-10 36-32, -37

표 6에서는 CSA에 의해 손실이 개선되는 탐색단계별 스위치 조합해 결과를 나타냈으며 사례연구 1에서는 4번, 사례연구 2에서는 7번의 탐색단계가 필요함을 알 수 있다.

표 6 CSA에서의 탐색단계별 최적해

Table 6 The Solution of Search Step by CSA

Step	Power Loss Change [kW]		Solutions [Branch in-out]	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
1	132.40	192.10	16- 8, 17-14	33-20, 34-14, 35-21 36-16, 37-27
2	122.90	181.74	16-10, 17-15	33- 6, 34-13, 35- 9 -36, 37-24
3	118.98	164.14	16- 9, 17-15	33- 7, 34-12, 35- 8 -36, 37-25
4	118.92	154.21	16- 9, 17-14	-33, 34-13, 35- 8 36-32, -37
5		146.83		33- 7, 34-13, 35- 9 36-32, 37-27
6		140.27		33- 7, 34-14, 35-10 36-32, -37
7		139.54		33- 7, 34-14, 35- 9 36-32, -37

표 7에서는 최소 전압크기와 그 값을 갖는 모선 번호를 표시하였다. 또한 탐색 단계별로 조류계산이 실행되는 내부 반복계산수를 나타내었으며 사례연구 1보다 계통이 복잡한 사례연구 2에서 좀더 많은 수의 계산이 필요함을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 계통의 방사상 조건을 만족하기만 하면 조류계산을 수행하도록 하였기 때문이며 향후, 내부적 반복계산 수를 줄이기 위한 알고리즘의 수정 및 개선에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그림 6은 사례연구 1에서의 손실변화를 그리고 그림 7에서는 사례연구 2에서의 손실변화를 이해하기 쉽도록 그림으로 나타내었다.

표 7 CSA의 탐색단계별 최소전압과 반복계산 수

Table 7 The Min. Voltage of Each Search Step by CSA

Step	Min. Voltage[p.u] and (Bus) : No. of Iteration	
	Case 1	Case 2
1	0.9335 (8) : 1	0.9237 (16) : 2
2	0.9361 (9) : 3	0.9213 (32) : 6
3	0.9413 (8) : 1	0.9332 (32) : 3
4	0.9441 (8) : 6	0.9340 (31) : 3
5		0.9398 (31) : 72
6		0.9378 (31) : 35
7		0.9378 (31) : 825

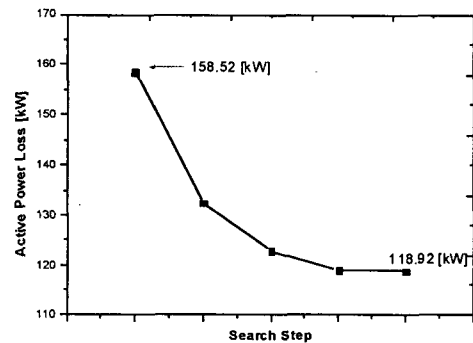


그림 6 사례연구 1에서의 손실변화
Fig. 6 Variation of Loss In Case 1

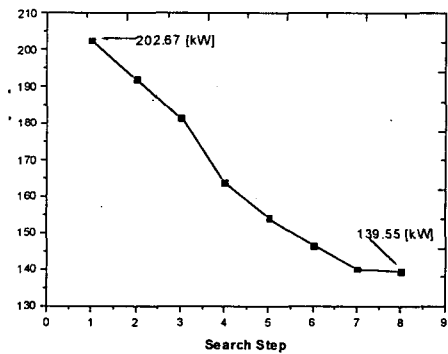


그림 7 사례연구 2에서의 손실변화
Fig. 7 Variation of Loss in Case 2

표 8 재구성 전, 후의 전압결과

Table 8 Pre and Post Configuration Voltage

Bus	15 Bus Voltage Mag.[p.u]		32 Bus Voltage Mag.[p.u]	
	Pre Config.	Post Config.	Pre Config.	Post Config.
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	0.9641	0.9651	0.9970	0.9971
2	0.9603	0.9614	0.9829	0.9870
3	0.9579	0.9596	0.9755	0.9825
4	0.9572	0.9591	0.9681	0.9782
5	0.9476	0.9543	0.9497	0.9673
6	0.9338	0.9485	0.9462	0.9667
7	0.9252	0.9454	0.9413	0.9626
8	0.9223	0.9441	0.9351	0.9593
9	0.9200	0.9495	0.9292	0.9627
10	0.9150	0.9519	0.9284	0.9628
11	0.9599	0.9609	0.9269	0.9631
12	0.9583	0.9593	0.9208	0.9605
13	0.9556	0.9520	0.9185	0.9597
14	0.9240	0.9458	0.9171	0.9532
15	0.9231	0.9463	0.9157	0.9514
16	-	-	0.9137	0.9485
17	-	-	0.9131	0.9475
18	-	-	0.9965	0.9951
19	-	-	0.9929	0.9782
20	-	-	0.9922	0.9736
21	-	-	0.9916	0.9702
22	-	-	0.9794	0.9834
23	-	-	0.9727	0.9768
24	-	-	0.9694	0.9735
25	-	-	0.9477	0.9655
26	-	-	0.9452	0.9632
27	-	-	0.9337	0.9527
28	-	-	0.9255	0.9451
29	-	-	0.9220	0.9419
30	-	-	0.9178	0.9385
31	-	-	0.9169	0.9378
32	-	-	0.9166	0.9472

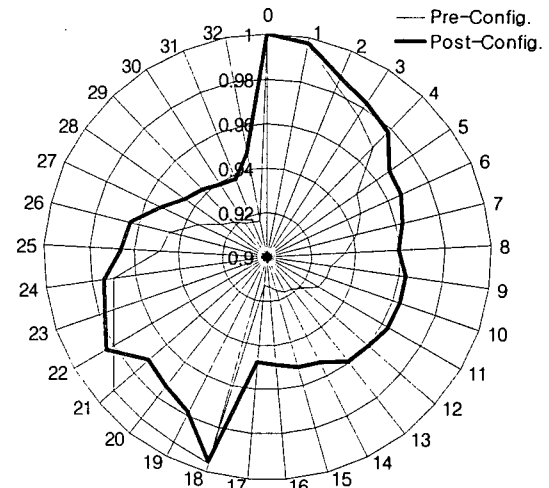


그림 9 32모선계통 전압 프로파일
Fig. 9 The 32 Bus System Voltage Profile

6. 결 론

본 연구에서는 방사상 배전계통의 손실감소를 위한 재구성 문제를 위하여 새로운 해결방법으로 카오스 탐색법과 빠른 조류계산을 결합한 해법을 제안하였다. 카오스 탐색법은 최적해의 탐색방향 및 구간을 카오스적인 이론에 근거하여 계산하는 알고리즘이다. 조합적 최적화 문제인 배전계통 재구성 문제의 적용에 있어서, 구간개폐기 양단의 주입전류를 이용해 예상손실을 매번 계산하는 기존의 여러 알고리즘과는 달리 본 연구에서 제안한 카오스 탐색법은 독립적으로 동작하는 조류계산 결과인 손실만을 정보로 사용하여 스위치조작해를 결정함으로써 전역적 최적해를 얻을 수 있다. 그러나 최적해 탐색별로 여러 번의 내부적 반복계산이 필요하였는데 이러한 단점은 진화연산의 다양한 연산자 도입과 같은 연구가 수행될 경우 해결 될 수 있을 것으로 판단된다.

사례연구에서는 15모선 및 32모선을 갖는 시험계통에 카오스 탐색법을 적용하고 결과를 확인하였다. 사례연구 결과 15모선 계통에 있어서는 약 25%, 32모선 계통에서는 약 32%의 손실을 감소시키는 스위치 조작 결과를 얻을 수 있었으며 이러한 결과로 계통의 평균전압이 재구성전과 비교하여 전체적으로 약 5% 상승하였다. 사례연구를 통하여 본 논문에서 적용한 카오스 탐색법이 최적화 문제의 적용에 있어서 전역적 최적해를 보장할 수 있으며 기존의 알고리즘과는 달리 간단한 문제적용능력과 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

향후 연구로는 내부적 반복계산수를 줄이기 위한 카오스 알고리즘의 개선 연구와 또한, 재구성 문제의 실제적인 배전계통 적용 및 온라인해석을 위해서 여러 가지 특성을 갖는 부하 모델링 및 계통의 불평형성, 그리고 부하 balancing을 고려한 다양한 계통의 사례연구가 필요할 것으로 사료된다.

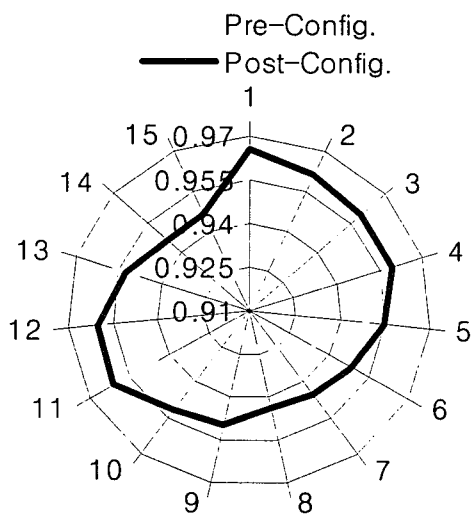


그림 8 15모선계통 전압 프로파일
Fig. 8 The 15 Bus System Voltage Profile

참 고 문 헌

- [1] Civanlar S., Grainger J. J., Yin H., and Lee S. H., Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, IEEE Trans. on PWRD, vol. 3, pp. 1217- 1223, 1988.
- [2] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeder for Loss Minimization" IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1484-1490, 1992.
- [3] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1401-1407, 1989.
- [4] G. B. Jasmon, L. H. Callistus and C. Lee, "A Modified Technique for Minimization of Distribution System Losses," Electrical Power System Research, vol. 20, pp. 81-88, 1991.
- [5] B. Li and W. Jiang, "Optimizing complex Functions by Chaos search," An International Journal of Cybernetics and Systems, vol. 29, pp. 409-419, 1998.
- [6] K. T. Alligood, T. D. Sauer, and J. A. Yorke, CHAOS an Introduction to Dynamical Systems, Springer-Verlag New York, Inc., 1997, p. 18-35.
- [7] S. Ghosh and D. Das, "Method for load-flow solution of radial distribution networks," IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., vol. 146, No. 6, pp. 641-648, Nov. 1999
- [8] E. Gauche, J. Coelho, and R. C. G. Teive, "A Mixed back-propagation/Marquardt-Levenberg algorithm for optimizing the distribution electrical systems operation," in 1999 IEE Transmission and Distribution Conf., vol. 2, pp. 753-758.
- [9] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon and M. I. Buhari, "A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks," in International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, pp. 251-256.
- [10] Sang Bong Rhee, Kyu Ho Kim, Seok Ku You, "Chaotic search algorithm for network reconfiguration in distribution systems," The International Conference on Electrical Engineering(ICEE), vol V, pp2328-2333, 2002

저 자 소 개



이 상 봉 (李 相 奉)

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사수료
E-mail : rrsd@ihanyang.ac.kr

유 석 구 (劉 錫 九)

전기학회 논문지 제 52A 권 4호 참조
E-mail : skyou@hanyang.ac.kr