

배전계통 최적구성을 위한 카오스 탐색법 응용

이상봉\* 김규호\*\* 유석구\*  
 한양대학교\* 안산공과대학\*\*

Chaotic Search Algorithm for Network Reconfiguration in Distribution Systems

Sang-Bong Rhee\* Kyu-Ho Kim\*\* Seok-Ku You\*  
 Hanyang University\* Ansan College of Technology\*\*

**Abstract** - In this paper, we proposed a chaos optimization method to reduce computational effort and enhance optimality of the solution in feeder reconfiguration problem. Chaos method in optimization problem searches the global optimal solution on the regularity of chaotic motions and more easily escapes from local or near optimal solution than stochastic optimization algorithms. The chaos optimization method is tested on 15 buses and 32 buses distribution systems, and the test results indicate that it is able to determine appropriate switching options for global optimum configuration with less computation.

2. Chaos Search Algorithm(CSA)

카오스현상은 비 선형시스템에 존재하는 현상이며 유한한 공간에서 정의되는 deterministic system에 있어서 불안정한 동작특성(unstable motion)을 내재하고 있는 자연현상 중의 하나이다. 이러한 카오스의 불안정한 동작 특성은 초기에는 일반적인 시스템의 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],[6].

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 결정되며 또한 중부하(heavy load)에 전력을 공급하는 배전선에서 손실은 더욱 증가하게 된다. 이러한 이유로 구간개폐기 및 연계스위치의 조작에 의해서 중부하를 경부하만을 담당하고 있는 다른 급전선으로 배전 경로를 변경 할 경우 배전계통의 구성 변화로 계통운용시에 발생하는 전체 전력손실을 감소시킬 수 있다. 즉, 특정 급전선으로 편중된 첨두부하(peak demand)를 타 급전선으로 전력 공급 경로를 변경함으로써 전체 배전계통의 전압 분포를 향상시키고 계통의 신뢰도를 개선할 수 있다[1]-[3].

배전계통 재구성(reconfiguration)문제는 손실최소화를 목적함수로 하고 각각의 개폐기 상태와 여러 가지 제약 조건을 갖는 비선형적이고 조합적 최적화문제(nonlinear combinatorial optimization problem)로 표현되어진다. 재구성 문제를 보다 효율적으로 해석하기 위하여 인공지능 응용을 비롯한 기존의 최적화 기법을 사용한 방법들이 제안되고 응용되었으나 문제의 복잡성으로 인해 여러 가지 단점들을 나타내고 있다[4].

본 논문에서는 배전계통 재구성 문제의 해법으로 카오스 탐색 알고리즘(chaos search algorithm : CSA)을 응용하였다. CSA는 일반적인 최적화 문제에 있어서 최적해의 탐색방향을 카오스적인 기법으로 결정하여 전역적 최적해(global optima)를 보장하는 간단한 알고리즘으로 구성된 해석기법으로 Li 와 Jiang에 의해서 제안된 방법이다[5].

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

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

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

식(1)을 살펴보면  $\mu$ 값에 따라서 (1)의 계산 결과가 크게 변화되는 것을 알 수 있으며  $\mu$ 가 2.8, 3.2, 3.5, 3.9일 경우 그림 1에서와 같이  $\mu$ 값이 3.5이상이 되는 경우 카오스적인 동작특성을 갖게되는 것을 확인할 수 있다.

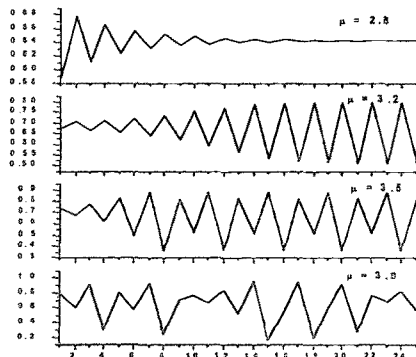


그림 1. The Output of (1) According to Various  $\mu$

따라서, 카오스적인 특성을 이용하기 위하여 (1)식은 다음과 같이 (2)식으로 변형되며 초기값  $x_0$ 의 차이에 의해 완전히 다른 카오스 출력을 갖는 시스템으로 구성할 수 있다.

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

일반적인 최적화 문제는 식(3)과 같이 표현할 수 있으며 이러한 문제에 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 초기값을 결정하고 (2)식을 이용해 카오스 변수를 계산한다.

**step 2: First carrier wave**

계산된 카오스 변수를 (3)식의 제약을 만족하도록 (4)식을 이용하여 변형한다.

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

**step 3: Rough search**

$x_i^* = x_{i0}$ 으로 결정하고 초기 목적함수값  $f$ 를 계산하여  $f^* = f_0$ 로 결정한다.  $n = n + 1$ 로 하여 (2), (3)을 반복 계산하고 목적함수  $f$ 를 계산한다. 만약  $f \leq f^*$ 인 경우에는  $f^* = f$ ,  $x_i^* = x_i'$ 로 하고 그렇지 않는 경우에는  $n$ 을 증가시킨다. 정해진 반복 계산을 수행한다.

**step 4: Second carrier**

식(5)를 이용하여 세밀한 탐색을 수행할 수 있도록 현재까지의 해를 이용해 새로운 탐색영역을 구성한다.

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

여기서  $\alpha$ 는 새로운 탐색 영역을 결정하는 상수이다.

**step 5: Fine search**

step 3과 같은 방법으로  $x_i^*$  주변을 세밀하게 탐색하여 최적해를 결정한다.

**step 6: End**

### 3. Feeder Reconfiguration

배전계통에 있어서 재구성문제는 주어진 계통내 여러 가지 제약을 만족하면서 손실을 최소화하는 문제이며 수학적으로 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\text{Min } f_c = \sum_{i=1}^{LN} \text{Loss}_i \quad (6)$$

여기서 LN은 전체 배전라인 갯수이며 다음과 같은 제약을 만족해야한다.

- a) 부하 전압, 선로 전류의 상하한치
- b) 모든 부에 전력공급
- c) 방사상 구성 유지

### 4. CSA for Feeder Reconfiguration

본 논문에서는 재구성 문제를 해결하기 위한 계통내 스위치 상태를 결정하고자 CSA를 이용하였다. CSA를 적용하기 위하여 우선 tie-switch를 닫고 메쉬로 구성된 네트워크를 구성한다. 메쉬의 수는 tie-switch의 수에 의해 결정되며 각각의 메쉬내에서 하나의 구간개폐기를 off함으로써 새로운 계통을 구성할 수 있게된다. 본 논문에서는 메쉬내의 off되는 스위치를 결정하고자 CSA를 이용하였다. 이렇게 CSA를 통해 새로운 스위치 조합 해를 결정하고 조류계산을 통해 목적함수 값을 계산하여 최적의 계통구성을 얻을 수 있다. 조류계산은 매번

의 최적해 탐색후 실행되므로 빠른 조류계산을 필요로 하게되는데 본 논문에서는 각 부하에서의 전압을 전류에 의해 직접 계산하는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였다[7]. 재구성 문제에 CSA를 적용하기 위한 전반적인 알고리즘은 그림 2와 같다.

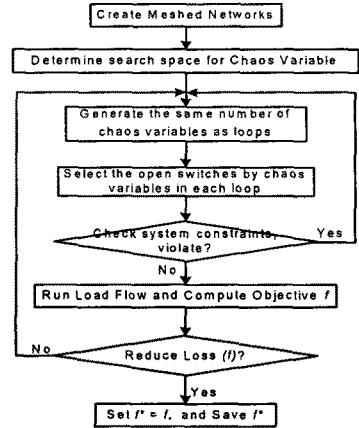


그림 2. CSA Algorithm for Reconfiguration

## 5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법인 CSA의 효용성을 입증하기 위하여 15, 32모선을 갖는 배전계통에 적용하였으며 각 적용사례별 내용은 다음과 같다.

**Case1: 15 모선 계통**

15모선, 2개의 tie-switch로 구성되어 있으며 계통전압은 13.6 kV이고 전체부하는 3636kW, 1550kVAR이다. 초기 계통손실은 158.52kW이며 계통의 구성은 그림 3과 같다[8].

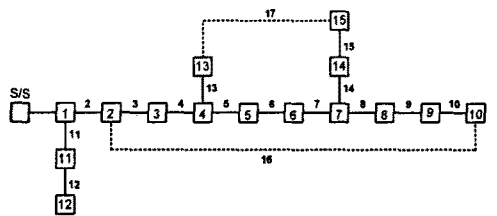


그림 3. Test System for Case 1

**Case2: 32 모선 계통**

사례연구 2에서는 32모선을 갖는 시험계통에 적용하였으며 계통의 초기손실은 210kW이며, 세부 사항은 다음의 표 1과 같다[9].

Parameter	Value
No. of Tie-Switch	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]

Case 별로 모의시험결과, 표 2에서와 같이 전력손실은 각각 39.6, 63.1kW의 감소와 계통의 최소전압 크기를 case 1에서 0.915에서 0.944[p.u]로, case 2에서는 0.913에서 0.938[p.u]로 향상시키는 스위치 조작 결과를 얻을 수 있었다.

표 2. Test Results of CSA

Test Systems	Case 1 (15-bus)	Case 2 (32-bus)
Loss [kW] (Base System)	158.52	202.667
Loss [kW] (optimal)	118.93	139.548
Solution (optimal) Branch in-out	16-9, 17-14	33-7, 34-14, 35-9, 36-32, -37
Loss [kW] Reduction	39.60	63.12
Min. Voltage [p.u]	0.944	0.938
Loss [kW] (Near optimal)	119.0	140.275
Solution (Near optimal)	16-9, 17-15	33-7, 34-14, 35-10, 36-32, -37

표 3에서는 CSA의 search step 별로 스위치 조합을 나타내는데 지역적 최소값으로 수렴하지 않고 결국 전역적 최적해를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

표 4에서는 search step 별로 최소 전압의 변화를 또한 그림 4에서는 손실의 변화를 나타내며 각 search step 별로 목적함수를 감소시키도록 하는 해를 제공하도록 CSA 동작함을 알 수 있다.

표 3. 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	132.4	192.1	16- 8, 17-14	33-20, 34-14, 35-21, 36-16, 37-27
2	122.9	181.8	16-10, 17- 15	33- 6, 34-13, 35- 9, -36, 37-24
3	119.0	164.1	16- 9, 17-15	33- 7, 34-12, 35- 8, -36, 37-25
4	118.9	154.2	16- 9, 17-14	-33, 34-13, 35- 8, 36-32, -37
5	E/S**	146.8	E/S**	33- 7, 34-13, 35- 9, 36-32, 37-27
6		140.3		33- 7, 34-14, 35-10, 36-32, -37
7		139.6		33- 7, 34-14, 35- 9, 36-32, -37
8		E/S**		E/S**

\*\* : End of the Search

표 4. The Minimum Voltage of Each Search Step by CSA

Step	Minimum Voltage[p.u] and (Bus)	
	Case 1	Case 2
1	0.934 (8)	0.924 (16)
2	0.936 (9)	0.921 (32)
3	0.941 (8)	0.933 (32)
4	0.944 (8)	0.934 (31)
5	E/S	0.940 (31)
6		0.938 (31)
7		0.938 (31)
8		E/S

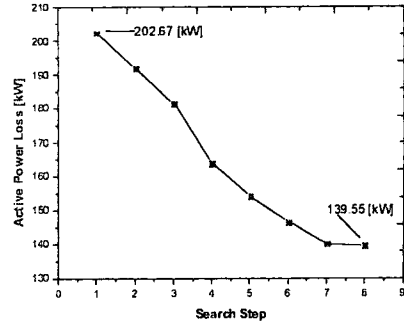


그림 4. Variation of the Loss in Case 2

## 6. 결론

본 연구에서는 방사상 배전계통의 손실감소를 위한 재구성문제를 위하여 새로운 해결방법인 카오스 특성을 이용한 해법을 제안하였다. 제안한 방법은 조합적 최적화 문제인 배전계통 재구성 문제의 적용에 있어서 전역적인 최적해 탐색능력과 우수한 수렴특성을 나타내었다.

사례연구는 15, 32모선을 갖는 모의 계통에 적용하였으며, 계산결과 모의계통의 손실감소와 전압분포를 향상시키는 전역적 최적해를 얻을 수 있었다. 사례연구 결과는 기존의 다른 알고리즘 결과와 비교하여 본 논문에서 적용한 카오스 탐색법의 최적화 문제 해결 가능성을 확인할 수 있었다.

이러한 본 연구의 결과로 향후 실제적인 배전계통에서 여러 가지 다른 제약을 갖는 최적 재구성 문제 및 전력계통의 기타 최적화 문제에, 카오스 탐색법은 보다 효율적인 적용과 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

## (참고 문헌)

- [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. Allgood, 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.