

불평형 배전계통의 선로 재구성문제를 위한 카오스 탐색법 응용

이 상 봉\* 김 구 호\*\* 이 유 정\* 유 석 구\*  
 한양대학교\* 안산공과대학\*\*

ChaosSearchMethodforReconfigurationProblem  
 inUnbalancedDistributionSystems

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

**Abstract** - In this paper, we applied a chaos search method for feeder reconfiguration problem in unbalanced distribution system. 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 search method applied to the IEEE 13 unbalanced test feeder systems, and the test results indicate that it is able to determine appropriate switching options for global optimum configuration.

카오스(chaos search algorithm ; CSA)를 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[4]. 또한 빠른 조류계산을 위하여 각 버스로 유입되는 전류 합을 이용하여 전압의 크기를 계산하는 방법인 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였는데 불평형 해석을 위하여 삼상 조류계산으로 확장하였다.

2. 카오스 탐색 알고리즘(CSA)

카오스현상은 비 선형시스템에 존재하는 현상이며 유한한 공간에서 정의되는 결정론적 시스템(deterministic system)에 있어서는 불안정한 동작특성(unstable motion)을 내재하고 있는 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[4]. 또한 카오스 시스템은 복잡한 혼돈 속에서도 정교한 패턴이 내재된 동작특성을 갖는데 이는 카오스의 전역적 탐색을 보장한다. 또한, 카오스 시스템은 초기값의 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.

3. 배전계통 재구성문제

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

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

여기서 LN은 전체 배전라인 갯수이며 다음과 같은 제약을 만족해야한다.

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

3.1. 삼상 조류계산

조류계산은 선로 재구성문제뿐만 아니라 계통을 해석하는데 가장 중요한 해석도구 이다. 특히 배전계통의 조류계산은 송전계통과는 달리 방사상조건, 불평형 부하,

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 중 부하(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 변경할 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 비선형이고 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 이러한 알고리즘 및 해석 기법은 평형(balanced) 배전계통에 한정되어 있으며 배전계통 본연의 특징인 불평형(unbalanced)을 고려한 경우는 현재까지 그 연구가 미비한 것이 사실이다. 본 논문에서는 불평형 배전계통의 재구성 문제를 효과적으로 해석하기 위하여 카오스 특징을 이용한 최적화 알고리즘과 빠른 조류계산을 결합하여 불평형 배전 계통에 적용하였다. 최적화 알고리즘으로는 카오스 탐색 알고리

그리고 선로 저항 및 리액턴스 등 여러 조건으로 인해 가우스법이나 뉴턴랩슨 방법은 해석상 단점을 갖게 된다. 본 논문에서는 Ghosh와 Das가 제안한 배전조류계산을 불평형 삼상 조류계산으로 확장하였다[5, 7]. 그림 1은 중성선을 포함한 삼상선로와 각상의 임피던스를 나타낸다. 배전선로는 Kron의 축약기법을 적용하는 경우 식 (2)와 같이 3x3 등가 임피던스 행렬로 변환할 수 있다.

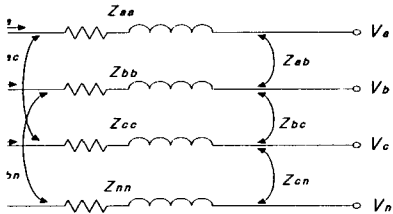


그림 1 Three Phase Line

$$[Z_{abc}] = \begin{pmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{ca-n} & Z_{cc-n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 이용할 경우 수전단 전압은 다음의 식 (3)과 같다.

$$[V_{abc}] = [V_{ABC}] - [Z_{abc}] \cdot [I_{ABC}]$$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{ca-n} & Z_{cc-n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{Aa} \\ I_{Bb} \\ I_{Cc} \end{pmatrix} \quad (3)$$

배전계통의 나머지 요소인 변압기, 유효, 무효 부하, 커패시터등의 해석모델은 참고문헌 [6]에 자세히 기술되어 있으며 본 논문에서는 생략하였다.

### 3.2 재구성 문제를 위한 CSA응용

본 논문에서는 재구성 문제를 해결하기 위한 계통내 스위치 상태를 결정하고자 CSA를 이용하였다. CSA해법의 순서는 다음과 같다[7].

#### 메쉬네트워크 구성

계통내 연계스위치를 닫을 경우 배전계통은 루프모양을 갖는 메쉬네트워크로 구성 된다. 새롭게 생성되는 메쉬네트워크의 수는 그 계통이 갖고 있는 연계스위치의 수와 같다.

#### CSA의 탐색공간 설정

각 메쉬네트워크에 속해있는 구간개폐기들을 이용하여 카오스 변수의 상, 하한치를 설정 한다.

#### 카오스변수 생성

메쉬네트워크의 수와 같은 수의 카오스 변수를 생성한다.

#### 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 논문

에서는 개폐기 번호를 할당할 수 있도록 프로그램 내에서 정수로 변환하였다. 만약 새롭게 선택된 개폐기가 동일하거나 방사상 제약을 만족하지 못하는 경우 카오스 변수를 다시 생성한다.

#### 계통 재구성

조류계산을 위하여 계통을 재구성한다.

#### 삼상 조류계산

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

Li와 Jiang이 제안한 카오스 탐색법은 실수영역의 전역적인 최적해 보장을 위하여 두 번째 탐색과정에서는 제약함수를 축소시켜 새로운 탐색영역을 구성하지만 본 논문에서 해석하는 재구성 문제에서는 구간개폐기 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 순서대로 나타내면 그림 2와 같다.

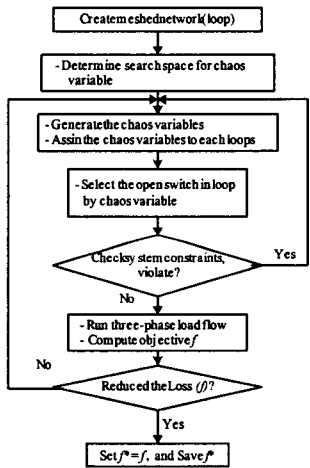


그림 2 CSA Algorithm for Reconfiguration

## 4. 사례 연구

본 연구에서 제안한 CSA의 효율성을 입증하고자 그림 @와 같은 13모선 불평형 계통을 이용하여 모의 실험 하였다[8].

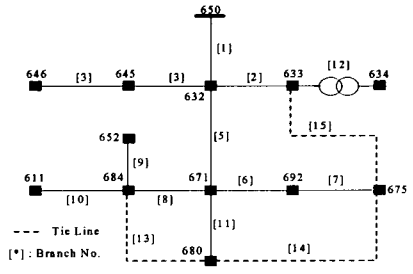


그림 3 IEEE 13 Node Test Feeder

그림 3에서 연계선로는 점선으로 표시 되어 있으며 선로 데이터는 표 1에 나타내었다. 계통의 나머지 데이터 및 선로 구성에 관한 내용은 참고문헌 [8]에 자세히 수록되어 있다. 참고문헌의 데이터중 전압 레귤레이터는 무시하였으며 모든 부하는 1.3을 곱한 constant PQ 부하로 간주하였다.

Table 1 Tie-Line Segment Data

Br. No	Node A	Node B	Phase	Length(ft)	Config
[13]	684	680	ABCN	1000	606
[14]	680	675	ABCN	1000	606
[15]	675	633	ABCN	1000	606

재구성 전의 A, B, C 상에서의 전압, 손실은 표 2와 같다.

Table 2 Voltage Profile (Before Configuration)

Node	Phase A	Phase B	Phase C
650	1.0000	1.0000	1.0000
632	0.9783	0.9846	0.9609
671	0.9648	0.9897	0.9179
680	0.9648	0.9897	0.9179
645	-	0.9743	0.9634
633	0.9764	0.9834	0.9592
646	-	0.9708	0.9643
634	0.9670	0.9762	0.9521
684	0.9635	-	0.9162
611	-	-	0.9144
652	0.9588	-	-
692	0.9648	0.9897	0.9179
675	0.9602	0.9912	0.9160
P Loss	66.651[kW]	40.385[kW]	84.863[kW]
Q Loss	183.671[kVar]	111.898[kVar]	251.006[kVar]
Total	P : 191.8987[kW]	Q : 546.5746[kVar]	

표 3은 CSA에 의한 재구성 결과이며 계통의 구성 변화에 따른 손실 변화를 나타내었다.

Table 3 The Solution of Each Search Step by CSA

Step	Power Loss Change[kW]	Solutions	
		Branch [In]	[Out]
1	191.89	[13]-[8],	[-14], [15]-[7]
2	170.34	[13]-[11],	[6] - [14], [-15]
3	162.87	[13]-[8],	[-14], [15]-[5]
4	160.02	[13]-[11],	[-14], [15]-[5]

Table 4 Voltage Profile (After Configuration)

Node	Phase A	Phase B	Phase C
650	1.0000	1.0000	1.0000
632	0.9847	0.9889	0.9733
671	0.9753	0.9934	0.9431
680	0.9753	0.9934	0.9431
645	-	0.9810	0.9752
633	0.9833	0.9881	0.9720
646	-	0.9784	0.9758
634	0.9765	0.9829	0.9670
684	0.9742	-	0.9419
611	-	-	0.9407
652	0.9707	-	-
692	0.9753	0.9934	0.9431
675	0.9719	0.9946	0.9419
P Loss	55.913[kW]	33.979[kW]	70.123[kW]
Q Loss	154.042[kVar]	94.007[kVar]	207.396[kVar]
Total	P : 160.0152[kW]	Q : 455.4437[kVar]	

재구성후 각 모선에서의 상 전압과 손실을 표 4에 나

타내었다.

표 4에서와 같이 재구성 전, 후의 최소 상 전압은 A 상에서 0.9588[p.u]에서 0.9707[p.u], B 상은 0.9707[p.u]에서 0.9734, 그리고 C 상에서는 0.9144[p.u]에서 0.9407[p.u]로 각각 상승하였다. 각 상 전압의 상승으로 인하여 시험 계통의 전체 손실은 재구성 전 191.89[kW]에서 재구성 후 160.01[kW]로 되어 약 16%의 손실 감소를 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 불평형 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 13모선을 갖는 IEEE 불평형 시험 계통에 적용하였으며, 계산결과 시험계통의 손실감소와 전압분포를 향상시키는 전역적 최적해를 얻을 수 있었다. 사례 연구 결과는 기존의 다른 알고리즘 결과와 비교하여 본 논문에서 적용한 카오스 탐색법의 최적화 문제 해결 가능성을 확인 할 수 있었다.

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

## [참 고 문 헌]

- [1] Baran, M. E. & Wu, F. F. "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing" IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1401-1407, 1998
- [2] Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee S. H. "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction" IEEE Trans. on PWRD, vol. 3, pp. 1217-1223, 1988
- [3] Goswami, S. K., & Basu, S. K. "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeder for Loss Minimization" IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1484-1490, 1992
- [4] Li, B. & Jiang W. "Optimizing complex Functions by Chaos search" An International Journal of Cybernetics and Systems, vol. 29, pp. 409-419, 1998
- [5] Ghosh, S. & Das, D. "Method for load-flow solution of radial distribution networks" IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., vol. 146, No. 6, pp. 641-648, 1999
- [6] ECRC "Final Report for Consolidated Edison Company Research and Development Project 92087, "Generalized Distribution Analysis System," June, 1991.
- [7] S. B. Rhee, K. H. Kim, S. K. You, "Chaotic Search Algorithm for Network Reconfiguration in Distribution" International Conference on Electrical Engineering(ICEE), vol V, pp.2328-2333, 2002
- [8] IEEE. "IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders," IEEE Trans, on Power Systems, vol. 6, No. 3, pp. 975-985, 1991.