

방사상 배전계통의 커패시터 설치를 위한 카오스 탐색알고리즘

이상봉^{*,o} 김규호^{**} 유석구^{*}
한양대학교^{*} 안산공과대학^{**}

Capacitor Placement in Radial Distribution Systems Using Chaotic Search Algorithm

Sang-Bong Rhee^{*,o} Kyu-Ho Kim^{**} Seok-Ku You^{*}
Hanyang University^{*} Ansan College of Technology^{**}

Abstract – The general capacitor placement problem is a combinatorial optimization problem having an objective function composed of power losses and capacitor installation costs subject to bus voltage constraints.

In this paper, the method employing the chaos search algorithm is proposed to solve optimal capacitor placement problem with reducing computational effort and enhancing optimality of the solution. Chaos method in optimization problem searches the global optimal solution on the regularity of chaotic motions and easily escapes from local or near optimal solution than stochastic optimization algorithms. The chaos optimization method is tested on 9 buses and 69 buses system to illustrate the effectiveness of the proposed method.

1. 서 론

방사상 배전계통에서 전력손실을 감소시키고 전압을 허용범위 내에 유지함으로써 계통을 안정적이고 경제적으로 운용하기 위하여 커패시터를 설치할 위치 및 커패시터 투입량을 합리적으로 결정하는 것을 일반적인 커패시터 배치 문제 (general capacitor placement problem) 라고 한다. 커패시터의 단순한 투입은 계통내의 무효전력을 보상함으로써 직접적으로 손실을 감소시킬 수 있는 간단한 문제이나 부하의 변화, 전압크기 제약, 투입위치, 투입량, 커패시터 종류, 그리고 투입비용 등을 고려하는 경우 매우 복잡한 조합적 최적화 문제로 구성된다[1].

이러한 커패시터 배치문제를 해결하기 위해서 GA, 뉴럴네트워크, 시뮬레이터드 어닐링, 그리고 전문가 시스템 등 여러 가지 알고리즘이 제안되고 응용되어졌으나 지역적 최소값으로 수렴하거나, 상당한 계산시간을 필요로 하는 등의 단점을 내포하고 있다[2]-[4].

본 논문에서는 방사상 배전계통에서의 커패시터 최적 배치 문제의 해법으로 카오스 탐색 알고리즘(chaos search algorithm : CSA)을 응용하였다. CSA는 일반적인 최적화 문제에 있어서 최적해 탐색방향을 카오스적으로 결정하여 전역적 최적해를 보장하는 해석기법으로 Li 와 Jiang에 의해서 제안된 방법이다[5].

2. Chaos Search Algorithm(CSA)

카오스현상은 비 선형시스템에 존재하는 현상이며 유한 공간에서 정의되는 deterministic system에 있어서 불안정한 동작특성(unstable motion)을 내재하고 있는 자연현상 중의 하나이다. 이러한 카오스 시스템의

불안정한 동작 특성은 초기에는 일반적인 시스템의 동작 특성과 크게 차이가 없으나 시간이 지날수록 매우 복잡한 특성 즉, 혼돈의 상태를 나타내게 된다. 그러나 카오스 시스템의 구조적인 특성으로 인해 무질서하게 보이는 혼돈의 상태는 어떠한 규칙성을 갖고 있게 된다. 그림 1은 카오스 시스템의 예를 나타냈는데 그림에서 보는 바와 같이 특정 영역에서 라인이 겹치지 않고 그려짐을 알 수 있다. 이것은 하나의 상태가 오직 한번 씩 계산되는 카오스 시스템의 규칙성을 나타낸다[5], [6].

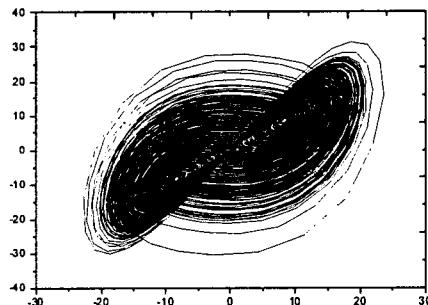


그림 1. The Phase Plot of a Nonlinear vibration problem

카오스 시스템은 설계된 시스템의 초기값 차이에 의해 서 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.

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

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

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

식(1)을 살펴보면 μ 값에 따라서 (1)의 계산 결과가 크게 변화되는 것을 알 수 있으며 μ 가 2.8, 3.2, 3.5, 3.9일 경우 그림 2에서와 같이 μ 값이 3.5이상이 되는 경우 카오스적인 동작특성을 갖게되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서, 카오스적인 특성을 최적화 문제에 적용하기 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.

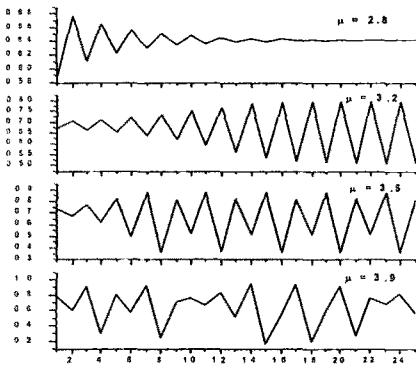


그림 2. The Output of (1) According to Various μ

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

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

$x_i^* = x_i$ 으로 결정하고 초기 목적함수 값 f 를 계산하여 $f' = f$ 로 결정한다. $n = n+1$ 로 하여 (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

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

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

여기서 a 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. Capacitor Placement Problem

커패시터 배치문제는 정해진 전압의 상하한치 안에서 전력손실에 의한 계통운용 비용을 최소화하는 문제이며 다음과 같이 정식화 할 수 있다[4].

$$\text{Min} = \sum_{j=1}^m k_{ej} T_j PLoss_j(x^j, s^j) + \sum_{k=1}^M C_k(S_k) \quad (6)$$

subject to

1) 전압제약 : $V_i^{\min} \leq V_i^j \leq V_i^{\max}$

2) 커패시터 제약

$$S_i^l = S_i^l = \cdots = S_i^{nt} \text{ (fixed type)}$$

$$0 \leq S_i^l \leq S_i^o \text{ (switched type)}$$

k_{ej} : 부하레벨 j 에서의 에너지손실 비용

T_j : 부하레벨 j 의 지속시간, nt : 부하레벨 구간 수

$PLoss_j$: 부하레벨 j 에서의 전력손실

M : 커패시터 설치 가능위치 수

$C_k(S_k)$: k 위치에서의 커패시터 투입비용

4. CSA for Capacitor Placement

커패시터 배치문제에 CSA를 적용하기 위하여 다음과 같이 계산절차를 이용하였다.

step 1: 조류계산 실행

step 2: 커패시터 설치가능위치 수와 같은 카오스 변수를 (4)식을 이용하여 생성하고 커패시터 용량에 맞도록 변화한다.

step 3: 커패시터 설치위치에서의 용량을 결정하고 조류계산을 실행한다.

step 4: 제약을 위반할 경우 step 2 실행, 아닐 경우 전체 비용을 계산한다.

step 5: 전체비용이 감소한 경우 현재까지의 최적해로 저장하고 아닐 경우 step 2로 돌아간다.

step 6: 반복계산을 하여 최적해를 개선하고 일정시간 해의 개선이 없는 경우 종료한다.

조류계산은 매번의 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.

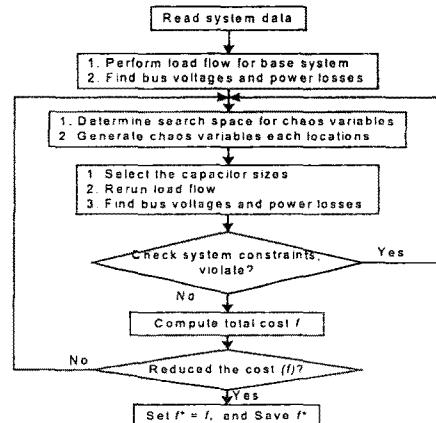


그림 3. CSA Flow Chart for Capacitor Placement

5. 사례 연구

본 논문에서 방사상 배전계통의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 적정배치 문제를 CSA를 이용하여 해석하였으며, 적용한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 9, 69모선을 갖는 배전계통에 적용하였다[8], [9].

모의시험 결과, 전체부하 레벨에 따른 커패시터의 투입량, 위치, 그리고 전압보상을 위한 CSA계산 결과를 얻을 수 있었다. 표 2는 9모선 계통의 부하레벨 3에서의 결과를 나타내는데 커패시터의 적정배치 결과로 최소전압이 0.8799에서 0.9006(p.u)로 향상되는 것을 확인 할 수

있으며 그림 5에서는 69모선 계통의 커패시터 보상전, 보상후의 전압프로파일을 나타내었다.

표 1. Load Duration Data for Test Cases

Load Level	1	2	3
Load [p.u]	0.3	0.6	1.1
Duration[hours]	1000	6760	1000

표 2. Results of 9-Bus Test System

Bus	Installed Capacitor	Voltage[p.u] in Load Level 3	
		Uncompensated	Compensated
S/S		1.0500	1.0500
1		1.0426	1.0444
2	1850	1.0368	1.0413
3		1.0117	1.0177
4		0.9956	1.0023
5		0.9633	0.9722
6	550	0.9528	0.9627
7		0.9338	0.9438
8		0.9021	0.9126
9		0.8799	0.9006

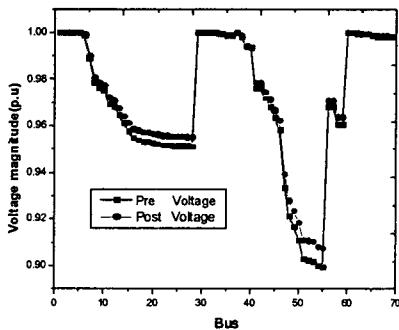


그림 4. Voltage Profile of 69-Bus System

표 3. Test System Results Summary

	9-Bus System	69-Bus System
Probable Capacitor Locations	1, 2, 5, 6	16, 20, 50, 53, 61
Selected Location	2, 6	16, 50
Installed Capacitor [kVAR]	1850, 550	150, 450
Energy Loss (pre-installed) [kWh/year]	2428841.63	807135.56
Energy Loss (post-installed) [kWh/year]	2307457.36	601328.81
Total Cost (pre-installed) [\$/year]	145730.50	48428.14
Total Cost (post-installed) [\$/year]	140585.44	38109.73
Min. Voltage (pre-installed) [p.u]	0.8799	0.8992
Min. Voltage (post-installed) [p.u]	0.9006	0.9076
Savings [\$/year]	5145	10318

전체적인 CSA의 적용결과는 표 3에서 확인할 수 있다. 표 3에서 커패시터 투입에 의한 69모선 계통의 전체비용은 \$38109.73이며 모선 16과 50에 각각 150kVAR, 450kVAR의 커패시터 뱅크가 설치되었다. 69모선 계통에 있어서 커패시터 설치로 인해 커패시터 보상전과 비교하여 연간 \$10318의 비용절감을 확인 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 배전계통의 커패시터 배치문제를 위하여 카오스 탐색법을 이용한 해석 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법인 CSA는 조합적 최적화 문제인 배전계통의 손실 및 전압보상을 위한 커패시터 배치 문제의 적용에 있어서 전역적인 최적해 탐색능력과 우수한 수렴특성을 나타내었으며 사례연구를 통하여 이를 확인하였다.

이러한 본 연구의 결과로 향후 실제적인 배전계통에서 여러 가지 다양한 제약을 갖는 커패시터 배치문제 및 전력계통의 기타 최적화 문제에, 카오스 탐색법은 보다 효율적인 적용과 정확한 해석결과를 제공할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. J. Huang, "An Immune-Based Optimization method to Capacitor Placement in a Radial Distribution System," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 15, no. 2, pp. 744-749, Apr. 2000.
- [2] M. A. El-sharkawi and S. J. Huang, "Ancillary Technique for Neural Network Applications," *IEEE International Conference on Neural Networks*, Orlando, Florida, USA, June 1994.
- [3] N. I. Santoso and O. T. Tan, "Neural-Net Based Real-Time control of Capacitors Installed on Distribution Systems," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 5, no. 1, pp. 266-272, Jan. 1990.
- [4] H. D. Chiang, J. C. Wang, and O. Cockings, "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 1: A new Formulation and the Overall Problem," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 5, no. 2, pp. 634-640, Apr. 1990.
- [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] Y. Baghzouz, S. Ertem, "Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeders with Distorted Substation Voltages," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 5, no. 2, pp. 650-657, Apr. 1990.
- [9] H. D. Chiang, R. J. Jumeau "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results," *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 5, no. 3, pp. 1568-1574, July, 2000.