論 文
57-5-3

배전계통 커패시터 설치를 위한 전역적 최적화 기법

A Global Optimization Technique for the Capacitor Placement in Distribution Systems

李 相 奉* · 金 圭 浩† · 李 尙 根**
(Sang-Bong Rhee · Kyu-Ho Kim · Sang-Keun Lee)

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, a global optimization technique, which employing the chaos search algorithm, is applied to solve optimal capacitor placement problem with reducing computational effort and enhancing global 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.

Key Words : Capacitor placement, Chaos search, Golbal optimization, Distribution system

1. 서 론

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(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 최적화 문제로 구성된다[1].

이러한 커패시터 배치문제를 해결하기 위해서 GA (Genetic Algorithms), 뉴럴 네트워크, 시뮬레이티드 어닐링, 그리고 전문가 시스템 등 여러 가지 알고리즘이 제안되고 응용되었다. 그러나 커패시터 설치문제의 복잡성으로 인해 지역적 최소값으로 수렴하거나, 상당한 계산시간을 필요로 하는 등의 단점을 내포하고 있다[2-6]. 따라서 커패시터 설치문제를 효과적으로 해결하기 위한 새로운 알고리즘의 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 방사상 배전계통에서의 커패시터 최적배치 문제를 위하여 카오스 특성을 이용한 최적화 기법과 빠른 조류계산을 결합하여 배전계통에 적용하였다. 최적화 기법으로 사용된 카오스 탐색 알고리즘 (Chaos Search Algorithm ; CSA)은 전역적 최적화 해법으로 일반적인 선형, 비선형 특성을 갖는 최적화 문제에 있어서 최적해의 탐색방향 및 구간을 카오스적으로 결정하여 전역적 최적해를 보장하는 해석기법으로 Li 와 Jiang에 의해서 제안된 방법이다. 또한 매우 간단한 알고리즘으로 구성되어 있어 기존의 알고리즘과는 달리 목적함수를 쉽게 정식화 할 수 있다[7]. 다음으로 빠른 조류계산을 위하여 프로그램 코딩 및 계통구성 파악에 우수한 장점을 갖는 Ghosh와 Das가 제안한 조류계산 방법을 사용하였다[8]. 제안한 방법의 효율성을 입증하고자 9모선 그리고 69모선을 갖는 배전계통에 적용하고 그 결과를 확인하였다.

2. 배전 조류계산

본 논문에서 사용된 조류계산은 최적화 알고리즘에 의해 결정된 커패시터의 설치위치 및 용량을 정보로 하여 새로운 계통을 구성하고 매번의 반복계산 시 계통손실을 계산한다.

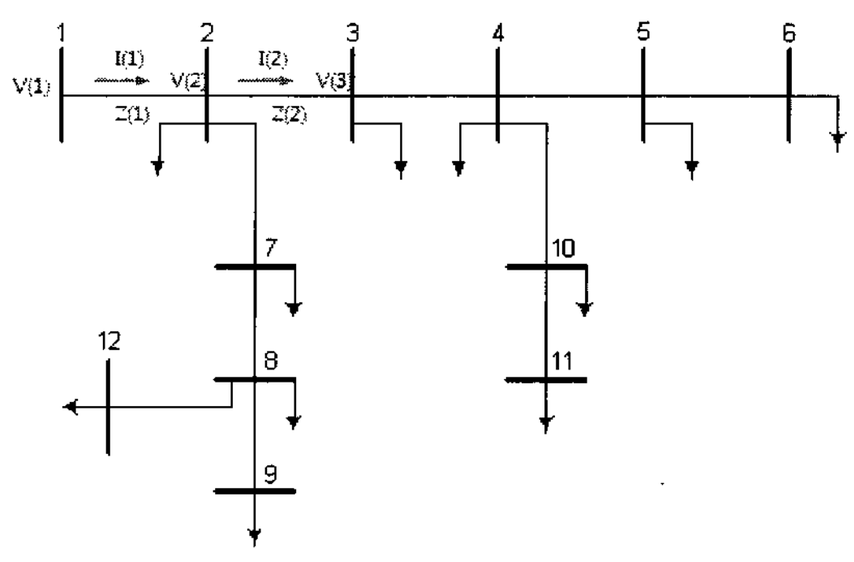

그림 1 방사상 계통 간략도

Fig. 1 Single-Line Diagram of Radial Distribution Network

† 교신저자, 正會員 : 安山工科大學 電氣科 副敎授 · 工博
E-mail : kyuho@act.ac.kr
* 正 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 硏究敎授 · 工博
** 正 會 員 : 江陵大 電氣情報通信工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 2008年 2月 12日
最終完了 : 2008年 4月 8日

즉, 매번의 최적해 탐색 후 손실감소 여부를 판단하기 위하여 조류계산이 실행되므로 빠르고 정확한 조류계산을 필요로 하게 된다.

표 1 계통 구조

Table 1 System Structure

B[JJ]	IS[JJ]	IR[JJ]	Buses 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 No. IS[JJ] : Sending-End Bus, IR[JJ] : Receiving-End Bus, N[JJ] : Total No. of Buses Beyond Branch B[JJ]

본 논문에서는 각 부하에서의 전압을 그 bus에 유입되는 전류에 의해 직접 계산하는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였는데 우선 그림 1과 같은 계통에서 계통을 분석하여 정리하면 표 1과 같으며 선로상에 연결된 bus의 전체수와 bus 번호를 표시하였다. 임의의 선로에서 그 선로상에 연결된 bus의 전체수와 bus 번호를 알고 있는 경우 조류계산 절차는 다음과 같다[8].

선로 1(B[1]) 즉, bus 1과 2사이에서 수전단 bus인 bus 2의 전압은 식 (1)과 같이 쓸 수 있으며

$$V[2] = V[1] - I[1]Z[1] \tag{1}$$

또한 선로 2의 수전단인 bus 3에서의 전압은 식 (2)와 같다.

$$V[3] = V[2] - I[2]Z[2] \tag{2}$$

이와 같이 식 (1)과 (2)를 살펴보면, 송전단의 전압, 전류, 임피던스를 이용할 경우 송전단 bus와 연결된 수전단 전압은 간단한 수식에 의해 순차적으로 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있고 다음과 같이 일반식으로 표현된다.

$$V[IR(jj)] = V[IS(jj)] - I[jj]Z[jj] \tag{3}$$

여기서, jj, $IR(jj)$, $IS(jj)$ 는 각각 선로 번호, 수전단 bus 번호, 그리고 송전단 bus 번호이다. bus 1로 흐르는 전류는 선로 1에 연결된 모든 bus에서의 부하전류 합과 충전전류 합으로 식 (4)와 같이 계산되며, 임의 bus i 에서의 부하전류, 충전전류는 식 (5), (6)과 같이 쓸 수 있다. 이때 초기 계산에 필요한 bus 1의 전압은 기준전압으로 가정하고 반복적으로 계산된다.

$$I[1] = \sum_{i=2}^{LN} IL[i] + \sum_{i=2}^{LN} IC[i] \tag{4}$$

$$IL[i] = \frac{PL[i] - jQL[i]}{V^*[i]} \quad i = 2, 3, \ldots, NB \tag{5}$$

$$IC[i] = y_o[i]\, V[i] \quad i = 2, 3, \ldots, NB \tag{6}$$

$IL[i]$, $IC[i]$: bus i 로 흐르는 부하 및 충전전류

y_o : bus i 에서의 charging 어드미턴스

$PL[i]$, $QL[i]$: bus i 에서의 유효, 무효부하

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

$$I[2] = IL[3] + IL[4] + IL[5] + IL[6] + IL[10] + IL[11] + IC[3] + IC[4] + IC[5] + IC[6] + IC[10] + IC[11] \tag{7}$$

다음으로 계통의 모든 선로를 통하여 흐르는 전류를 이용해 식 (8), (9)를 통해 손실을 계산한다.

$$Loss\ P[jj] = |I[jj]|^2 R[jj] \tag{8}$$

$$Loss\ Q[jj] = |I[jj]|^2 X[jj] \tag{9}$$

$R[jj]$, $X[jj]$: 선로 jj 에서의 resistance 및 reactance

본 논문에서 사용한 조류계산은 선로의 수전단 쪽 bus로 유입되는 전류를 이용하여 손실을 순차적으로 계산하는 매우 간단한 방법이며 표 1과 같이 계통이 분석되어 있는 경우 매우 빠른 조류계산 결과를 얻을 수 있다. 프로그램 상에서 계통을 분석하고 각 선로상에 연결된 모선을 파악하고 검출하기 위한 상세한 알고리즘은 참고문헌 [6]에 자세히 기술되어 있다.

3. 최적화 기법

3.1 카오스탐색 알고리즘

카오스현상은 비 선형시스템에 존재하는 현상이며 유한한 공간에서 정의되는 결정론적 시스템(deterministic system)에 있어서는 불안정한 동작특성(unstable motion)을 내재하고 있는 자연현상 중의 하나이다.

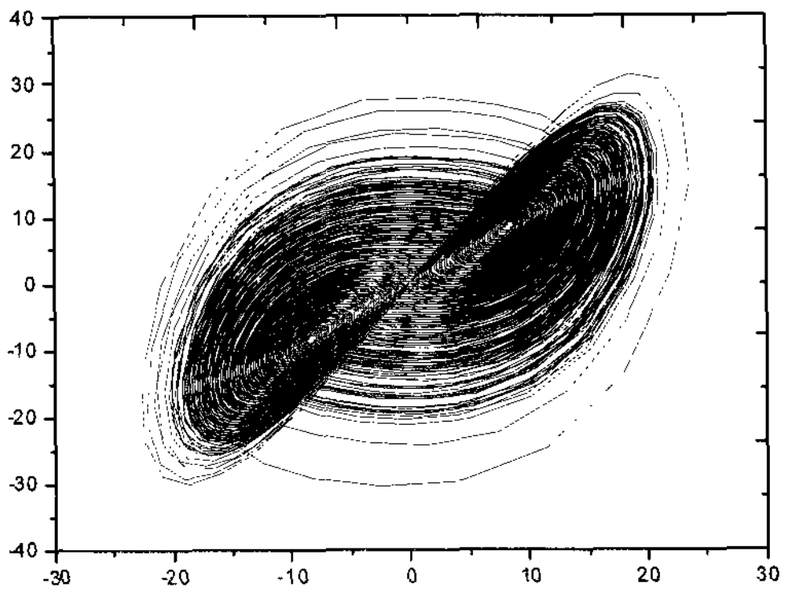

그림 2 비선형문제에 대한 카오스 특성 예

Fig. 2 Chaos Plot of Non-liner Problem

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. 또한 카오스 시스템은 복잡한 혼돈 속에서도 정교한 패턴이 내재된 동작특성을 갖는데 다음의 그림 2와 같다[9]. 그림에서 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 (10)을 살펴보면 μ값에 따라서 식 (10)의 계산 결과가 크게 변화되는 것을 알 수 있다.

$$x_{n+1} = f(\mu, x_n) = \mu x_n (1 - x_n) \tag{10}$$

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

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

시스템 제어변수인 μ가 2.8, 3.2, 3.5, 3.9일 경우 이에 대한 결과를 그림 3에 나타내었는데 그림에서와 같이 μ값이 3.5보다 작은 경우 시스템의 출력 값이 결국 수렴 또는 발산할 것이라는 예상이 가능하나 μ값이 3.5보다 크게 되는 경우, 복잡하고 예측 불가능한 카오스적 동작특성을 갖게 되는 것을 확인 할 수 있다. 여기서, 세로축은 식 (10)의 출력 값이며 가로축은 반복계산 수이다.

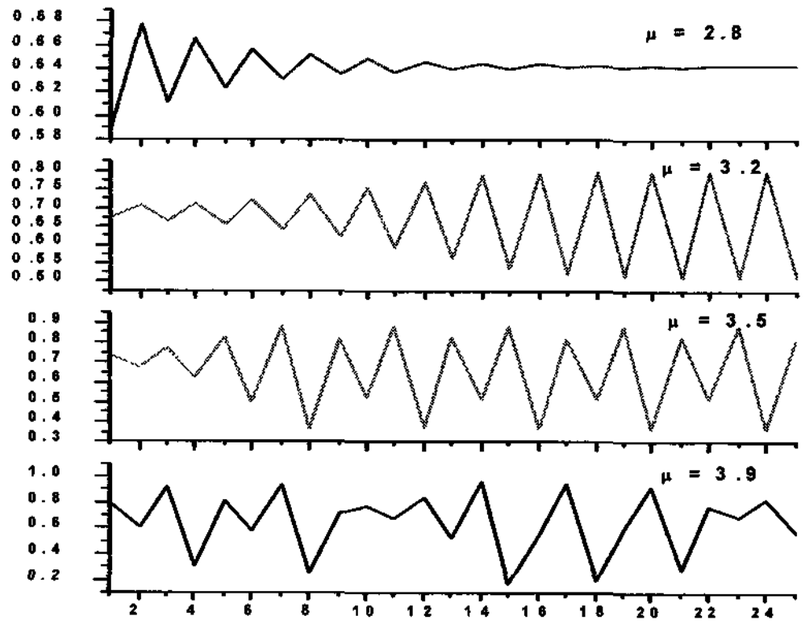

그림 3 여러 μ값에 대한 식 (10)의 결과

Fig. 3 The Output of (10) According to μ

따라서, 카오스적인 특성을 최적화 알고리즘으로 이용하기 위해서는 식 (10)을 다음과 같이 μ값을 4로 결정한 식 (11)로 변형하여 사용한다.

$$x_{n+1} = 4 x_n (1 - x_n) \tag{11}$$

또한 초기값에 의해서도 카오스의 동작 특성이 크게 영향을 받는다.

표 2는 식 (11)에 의한 결과인데 단지 초기값만을 다르게 하고 초기값 변화에 따른 출력 결과를 반복계산 별로 나타내었다. 표 2에서와 같이 초기값이 0.1인 경우와 0.1001, 0.100001인 경우 비록 미세한 차이를 갖지만 반복계산이 15번째인 경우 식 (11)의 출력이 전혀 다른 값을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같이 카오스 시스템은 초기값 x_0의 차이에 의해서 출력 값이 완전히 다른 카오스적인 시스템의 출력을 얻을 수 있으며 이는 초기의 미세한 동작이 최종적으로 전혀 다른 결과를 가져온다는 카오스 본연의 특성에 기인 한 것이다.

표 2 초기값에 따른 식 (11)의 결과

Table 2 The Result of Eq. (11) 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

3.2 최적화 문제의 카오스 알고리즘 응용

일반적인 목적함수 최소화에 관한 최적화 문제는 식 (12)와 같이 표현할 수 있으며 이러한 문제에 카오스 탐색 알고리즘인 CSA를 적용하기 위한 계산 절차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Min. \quad & f(x_i) \qquad i = 1, \cdots, N \\ s.t \quad & a_i \le x_i \le b_i \end{aligned} \tag{12}$$

step 1: Generate chaos variable

변수의 수 i 에 대하여 작은 차이를 갖도록 각 변수별로 초기값을 결정하고 식 (11)을 이용해 카오스 변수 계산한다.

step 2: First carrier wave

계산된 카오스 변수결과를 식 (12)의 제약식을 만족하도록 식 (13)를 이용하여 변형한다.

$$x_i'(n+1) = a_i + (b_i - a_i) \cdot x_i(n+1) \tag{13}$$

step 3: Rough search

$x_i^* = x_{i0}$ 으로 결정하고 초기 목적함수 값 f를 계산하여 $f^* = f$ 로 결정한다. 반복계산을 위하여 $n = n+1$로 하여 식 (11), (13)을 반복 계산하고 목적함수 f 를 계산한다. 만약 $f \le f^*$ 일 경우에는 $f^* = f$, $x_i^* = x_i'$ 로 하고 그렇지 않는 경우에는 n을 증가시킨 후 정해진 반복 계산을 수행한다.

step 4: Second carrier

정해진 반복계산을 수행한 후에는 식 (14)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.

$$x_i''_{(n+1)} = x_i^* + \alpha x_{i\,(n+1)} \tag{14}$$

여기서 α는 새로운 탐색 영역을 결정하는 상수이며 α값의 선정은 카오스 시스템의 수렴성에 크게 영향을 미친다. 실수해를 구하는 경우에는 일반적으로 try&error 방법을 사용한다.

step 5: Fine search

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

step 6: End

4. 커패시터 설치문제를 위한 카오스탐색 알고리즘

4.1 커패시터 설치문제 정식화

커패시터 설치문제는 정해진 전압의 상, 하한치 내에서 전력손실과 커패시터 설치에 의한 계통운용 비용을 최소화하는 문제이며 계통운영 시간동안의 부하변동을 고려할 필요가 있다. 본 논문에서는 부하변동은 이산적으로 근사화 시키고 부하는 일정하게 변화한다고 가정하였으며 커패시터 비용함수는 뱅크단위로 산정하였다. 커패시터 설치 문제의 목적함수는 계통 손실비용과 설치비용으로 구성하며 제약함수는 모선 전압 제약, 커패시터 용량 제약으로 구성되며 다음과 같이 정식화 할 수 있다[4].

목적함수

계통에서 임의의 모선에 커패시터가 투입된 경우 커패시터 투입후의 복소 전력은 식 (15)와 같다[5,6].

$$S = (I - I_c)^H Z (I - I_c) \tag{15}$$

H : Hermitian operation, I : 모선주입 전류 백터,
I_c : 커패시터 전류 백터, Z : 모선 임피던스 행렬

식 (15)를 모선 수 n개를 갖고 있는 전체 계통으로 확장하기 위해 다음의 식을 이용한다.

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}\ ,\ I_i = |I_i|\cos\theta_{Ii} + j|I_i|\sin\theta_{Ii}\ ,\ I_{c\,i} = \frac{Q_i}{|V_{Ri}^2|}|V_i| \angle (90^o + \theta_{Vi}) \tag{16}$$

식 (16)을 식 (15)에 대입하고 허수부분을 생략하면 전체 유효전력 손실은 식 (17)과 같다.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|I_i||I_j|R_{ij}\cos(\theta_{Ii} - \theta_{Ij}) - 2\left[\sum_{j=1}^{n}\frac{|V_j|}{|V_{Rj}|^2}\left[\sum_{i=1}^{n}R_{ij}|I_i|\sin(\theta_{Ii} - \theta_{Vj})\right]Q_j\right] + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left[R_{ij}\frac{|V_i||V_j|}{|V_{Ri}|^2|V_{Rj}|^2}\cos(\theta_{Vi} - \theta_{Vj})\right]Q_iQ_j \tag{17}$$

n : 계통의 모선수, V_i : 모선 i 에서의 전압
V_R : 커패시터의 정격 전압, θ_V : 전압의 위상각
θ_I : 전류의 위상각, I_i : 모선 i 로 주입되는 전류
Q_i : 모선 i 에 연결된 커패시터의 정격 무효전력

이때, 계통의 부하에 의해 모선으로 주입되는 전류의 크기와 위상은 식 (18)과 같다.

$$|I_i| = \frac{|S_i|}{|V_i|}\ ,\quad \theta_{Ii} = \theta_{Si} - \theta_{Vi} \tag{18}$$

식 (17)에서와 같이 목적함수가 되는 유효전력 손실 P_{loss}는 무효전력 Q 에 관한 이차식으로 구성되며 또한, 커패시터의 설치비용 및 부하레벨을 고려하는 경우 최종적인 목적함수는 손실을 비용으로 변환하여 식 (19)와 같이 된다.

$$\text{Minimize} : \sum_{i=1}^{nt}T_i k_{pi} P_{loss,i} + \sum_{j=1}^{M}Q_j C_j \tag{19}$$

nt : 부하레벨 수, T_i : 부하레벨 i의 지속시간
$P_{loss,i}$: 부하레벨 i 에서의 커패시터 보상 후 계통손실
k_{pi}: 부하레벨 i 에서의 비용 변환 계수 [$ per kW]
C_j : j 모선 커패시터 설치비용 [$ perk VAR]
M : 커패시터 설치가능 모선 수

제약함수

제약함수는 일반적으로 계통의 운영 조건에 의해서 정해지는데 각 모선에서의 전압 상, 하한치 만족, 선로에서의 허용전력 조류, 그리고 커패시터 투입량의 최대, 최소값, 설치, 제거 비용 등이 있으며 다음과 같다.

$$|I_i| \le |I_i^{\max}|,\ |V_j^{\min}| \le |V_j|,\ |Q_j^{\min}| \le |Q_j| \le |Q_j^{\max}| \tag{20}$$

4.2 커패시터 설치문제를 위한 카오스 알고리즘 응용

커패시터 설치 문제에 카오스 탐색기법을 적용하기 위하여 다음과 같은 계산절차를 이용하였다.

1) 조류계산 실행

초기 계통의 조류계산 실행 후 초기 손실 계산

2) 카오스 변수설정

커패시터 설치위치 및 용량에 관한 카오스 변수를 식 (11)을 이용하여 생성하고 커패시터 용량에 맞도록 변환

3) 최적해 업데이트

커패시터 설치위치에서의 용량 결정 및 조류계산 실행

4) 제약위반 판별

제약 위반 경우 2) 실행, 아닐 경우 전체 비용 계산

5) 최적해 판별

전체비용이 감소한 경우 현재까지의 최적해로 저장하고 아닐 경우 2) 실행

6) 반복계산 후 종료

최적해를 개선하고 일정시간 해의 개선이 없는 경우 종료

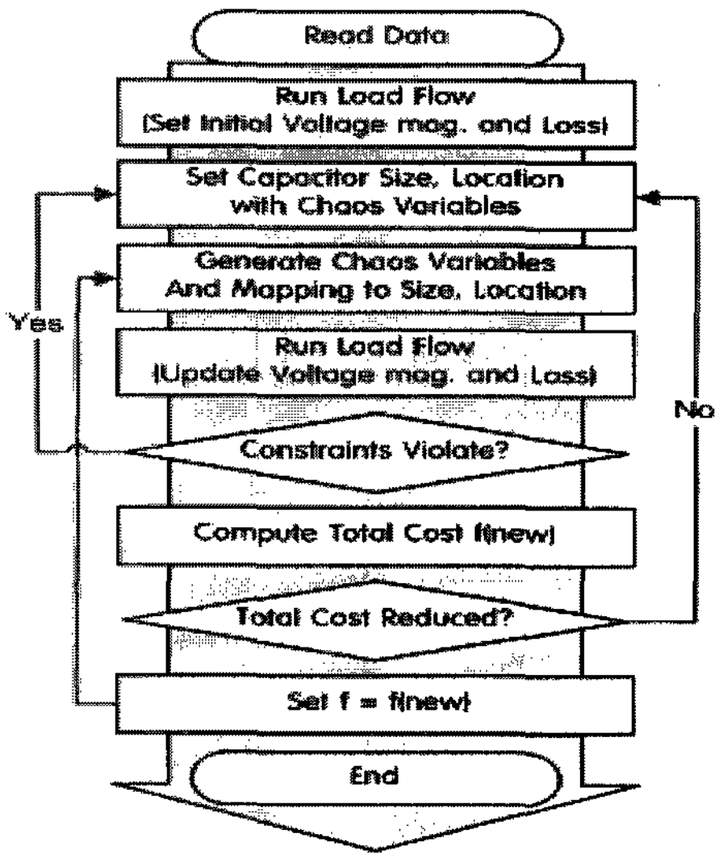

그림 4 커패시터 문제를 위한 계산순서도

Fig. 4 The Flow Chart for Capacitor Placement Problem

조류계산은 매번의 최적해 탐색 후 실행되므로 빠른 조류계산을 필요로 하게 되는데 본 논문에서는 2장에서 설명한 각 부하에서의 전압을 전류에 의해 직접 계산하는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였다. 커패시터 설치 문제를 위한 전반적인 알고리즘은 그림 4와 같다.

5. 사례연구

본 논문에서 방사상 배전계통의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 적정배치 문제의 전역적 최적해를 구하기 위하여 카오스 탐색 알고리즘을 이용하여 해석하였으며, 적용한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 9, 69모선을 갖는 배전계통에 적용하였다.

5.1 모의 시험계통

9모선 계통

9모선 계통은 모선이 순서적으로 연결되어 있으며 계통전압은 23[kV]이며 유효전력 부하는 12,368[kW], 무효전력 부하는 4,186[kVAR]이다. 계통의 구성과 선로 데이터는 그림 5 그리고 표 3과 같다[10].

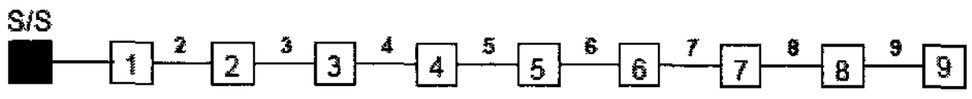

그림 5 9 모선 시험 배전계통

Fig. 5 9 Bus Test System

커패시터 설치에 따른 연간 손실을 계산하기 위하여 표 4의 부하레벨을 적용하였다. 또한 커패시터 투입 및 설치에 관한 조건은 표 5와 같고 커패시터를 모선에 설치하는 초기 비용은 1,000[$], 조절되는 커패시턴스 양은 1회에 50[kVAR]이고 비용은 3[$]이다. 그리고 손실은 1[kW]당 0.06[$]로 정하였다. 조류계산을 위한 변전소 전압의 크기는 1.05[p.u], 위상은 0°로 정하였다.

표 3 9 모선 선로 및 부하

Table 3 9 Bus Line and Load Data

Br.	From-To	P [kW]	Q [kW]	R[Ω]	X[Ω]
1	S/S-1	1840	460	0.1233	0.4127
2	1-2	980	340	0.0140	0.6051
3	2-3	1790	446	0.7463	1.2050
4	3-4	1598	1840	0.6984	0.6084
5	4-5	1610	600	1.9831	1.7276
6	5-6	780	110	0.9053	0.7886
7	6-7	1150	60	2.0552	1.1640
8	7-8	980	130	4.7953	2.7160
9	8-9	1640	200	5.3434	3.0264

S/S : Sub-station

표 4 시험계통의 부하 지속 시간

Table 4 Load Duration for Test Cases

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

표 5 커패시터 운전비용

Table 5 Capacitor Operating Cost

Fixed Cost [$/Unit]	1000
Variable Cost [$/Change]	3
Energy Cost [$/kW]	0.06
Multiple Size [kVAR]	50

69모선 계통

69모선 계통은 그림 6과 같고 계통전압은 12.66[kV], 유효, 무효전력 부하는 각각 3802.19[kW], 2694.60[kVAR]이다.

선로 및 부하 데이터와 선로 구성은 참고문헌 [5]를 사용하였다. 부하레벨 및 커패시터 운전비용 조건은 9모선 시험계통과 동일하게 정하였다. 조류계산을 위한 변전소 전압의 크기는 1.0[p.u], 위상은 0°로 정하였다.

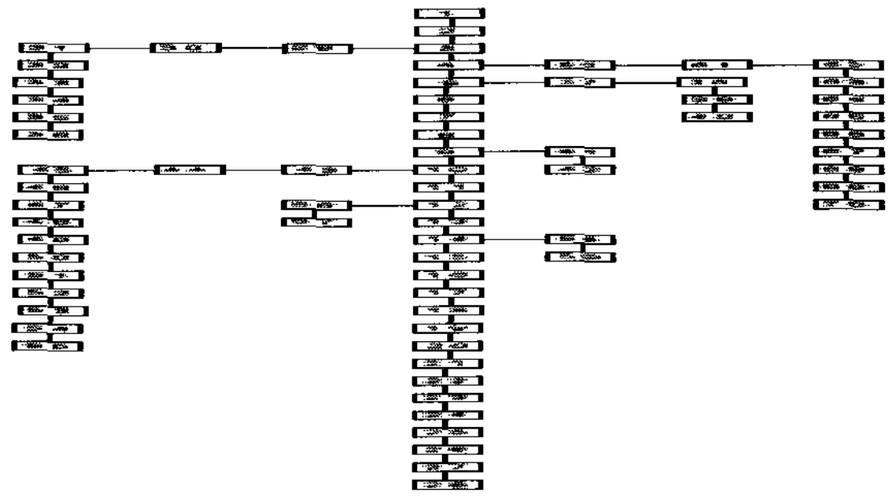

그림 6 69 모선 시험 배전 계통

Fig. 6 69 Bus test system

5.2 모의시험 결과

모의시험 결과, 전체부하 레벨에 따른 커패시터의 투입량, 위치, 그리고 전압보상을 위한 CSA계산 결과를 얻을 수 있었다. 표 6은 9모선 계통의 부하레벨 3에서의 결과를 나타내는데 커패시터의 적정배치 결과로 최소전압이 0.8799에서 0.9006[p.u]로 향상되는 것을 확인 할 수 있으며 그림 6에서는 69모선 계통의 부하레벨 3에서의 커패시터 보상전, 보상후의 전압프로파일을 나타내었는데 커패시터 설치전과 비교하여 전압의 프로파일이 전체적으로 상승하여 손실이 보상됨을 확인 하였다.

표 6 9 모선계통 결과

Table 6 Result of 9 Bus 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

계통 손실의 개선에 있어서는 커패시터 설치를 통해 유효전력손실이 9모선 계통에서는 약 8%, 69모선 계통에서는 29%가 감소되는 결과를 얻었다.

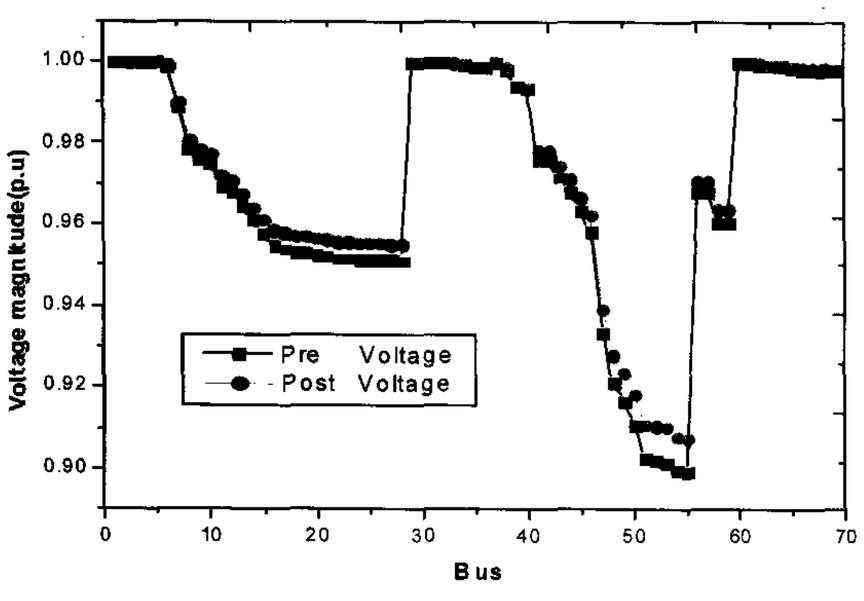

그림 7 전압 프로파일 (69-Bus, 부하레벨 3)

Fig. 7 Voltage Profile (69-Bus, Load Level 3)

전체적인 CSA의 적용결과는 표 7에서 확인할 수 있다. 표 6에서 커패시터 투입에 의한 9 모선 계통의 전체 비용은 $140,585.44이며 모선 2, 6에 각각 1850[kVAR], 550[kVAR]의 커패시터 뱅크가 설치되었다. 69모선 계통의 경우에는 커패시터 설치 후 전체비용은 $38109.73이며 모선 16과 50에 각각 150kVAR, 450kVAR의 커패시터 뱅크가 설치되었다. 9모선의 경우에는 $5145, 69모선 계통에 있어서는 커패시터 설치로 인해 커패시터 보상전과 비교하여 연간 $10,318의 비용절감을 확인 할 수 있다.

표 7 모의시험 결과

Table 7 Result of Test System

	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) [Wh/yr]	2428841.63	807135.56
Energy Loss (post-installed) [Wh/yr]	2307457.36	601328.81
Total Cost (pre-installed) [$/yr]	145730.50	48428.14
Total Cost (post-installed) [$/yr]	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

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. 향후 연구로는 내부적 반복계산수를 줄이기 위한 카오스 알고리즘의 개선 연구와, 또한 커패시터의 실제적인 배전계통 적용 및 온라인 해석을 위해서 여러 가지 특성을 갖는 부하 모델링 및 계통의 불평형성, 부하 balancing, 그리고 커패시터 투입, 제거시 스위칭 동작에 의해 발생하는 고조파 영향 등을 고려한 다양한 계통의 사례연구가 필요할 것으로 판단된다.

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. EI-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, O. Cockings, H. D. Shin, "Optimal Capacitor Placements in Distribution System: Part I, Part II", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp.634-649, January, 1990
[5] M. Baran, F. Wu, "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp.725-734, January, 1989
[6] C. S. Chen, C. T. Hsu, Y. H. Yan, "Optimal Distribution Feeder Capacitor Placement Considering Mutual Coupling Effect of Conductors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp.987-994, April, 1995
[7] *B. Li and W. Jiang, "Optimizing complex Functions by Chaos search,"* An International Journal of Cybernetics and Systems, vol. 29, pp. 409-419, 1998.
[8] 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
[9] 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.
[10] 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.

저 자 소 개

이 상 봉 (李 相 奉)

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수

김 규 호 (金 圭 浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공 대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 안산공과대학 전기과 부교수

이 상 근 (李 尙 根)

1961년 4월 13일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 박사졸업. 현재 강릉대 전기정보통신공학부 교수