

불평형 배전계통에 있어서 유전알고리즘을 이용한 커패시터의 적정 배치 및 제어

論 文
48A-7-4

Optimal Capacitor Placement and Control using Genetic Algorithms in Unbalanced Distribution Systems

金 圭 浩* · 劉 錫 九**
(Kyu-Ho Kim · Seok-Ku You)

Abstract - This paper presents an efficient algorithm for determining the location, size and number of capacitors in unbalanced radial distribution system. The objective function formulated consists of two terms: cost for energy loss and cost related to capacitor purchase and capacitor installation. The cost function associated with capacitor placement is considered as step function due to banks of standard discrete capacities. Genetic algorithms(GA) are used to obtain the solution of the proposed problem. In GA application, multi-population formulation that each load level is assigned to each population is derived. The strings in each population consist of the bus number index and size of capacitors to be installed. In order to determine the number of capacitor placement, the length mutation operator is used. Its efficiency is proved through the application in unbalanced radial distribution systems made of 10 buses with 9 distribution lines and 25 buses with 24 distribution lines.

Key Words : Capacitor Placement, Three Phase Load Flow, Genetic Algorithms, Multi-Population

1. 서 론

방사상 배전계통에서 전력손실을 감소시키고 전압을 허용 범위 내에 유지시키기 위하여 커패시터를 설치할 위치 및 크기를 합리적으로 결정하는 것을 일반적인 커패시터 배치 문제(general capacitor placement problem)라고 한다[1-3].

과거 배전계통에 있어서 기존의 설비를 효과적으로 사용하면서 전력손실을 감소시키기 위하여 커패시터 위치 선정에 관한 연구가 진행되어 왔지만 대부분의 연구가 방사상 회로 구조를 갖는 평형 배전계통에 대한 커패시터 배치 연구에 한정되었으며, 불평형이면서 방사상 또는 환상형의 네트워크 구조를 갖는 배전계통에 대한 커패시터 배치에 관한 연구는 극소수에 불과하다. 따라서, 방사상 또는 환상형의 네트워크를 갖는 대규모 3상 불평형 계통에서의 변화하는 부하레벨에 대하여 부하제약, 네트워크제약 및 운전제약 등을 만족시키면서 커패시터의 위치, 종류 및 크기를 결정할 필요가 있다.

Grainger 등은 커패시터 크기와 설치위치를 연속적인 변수로 다루어 비선형계획법 문제로 정식화하였다[1]. Baran과 Wu는 혼합정수계획법을 이용하여 주문제와 부문제로 나누어 주문제에서는 커패시터의 설치위치를 결정하고, 부문제에서는

투입량을 이산변수로 고려하였고, 특히 조류방정식을 문제에 포함시켰다[2]. Chiang 등은 Baran의 방법과 유사하나 부하제약을 문제에 포함시켰고, 전역적 탐색기법의 일종인 모의담금질(simulated annealing : SA)법을 사용하였으며[3], 방사상 또는 환상형의 불평형 배전계통에서 커패시터의 최적배치, 교체 및 제어에 관한 문제를 제시하였다[4]. 최근 Sundhararajan 등은 GA를 이용하여 커패시터 설치위치 및 크기에 관하여 최적계획 하였다[5]. 특히, 감도분석으로부터 커패시터가 설치될 위치를 선정하고, GA를 이용하여 투입량을 결정하는 2단계 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 방사상 불평형 배전계통에 있어서 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 적정배치 및 제어 방안을 제시하였다.

3상 불평형 배전계통에서 커패시터의 위치, 종류 및 크기를 결정하기 위하여 다음과 같은 안전도 및 경제적 요소를 고려할 필요가 있다.

첫째, 각기 다른 부하레벨에서 부하제약, 네트워크 제약 및 운전제약(전압범위) 만족

둘째, 각기 다른 부하레벨에서 손실 감소

셋째, 커패시터 배치비용

넷째, 커패시터의 이산성

다섯째, 현존하는 커패시터와 새로 추가되는 커패시터와의 상호협조

커패시터 배치와 관련된 비용함수를 실제 벡크단위로 이산성을 고려하기 위하여 계단함수로 정식화하였다. 불연속이면서 미분 불가능한 함수인 커패시터 배치와 관련된 비용함수

* 正 會 員 : 安山工科大学 電氣工學科 專任講師 · 工博

** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 12월 17일

最終完了 : 1999년 6월 2일

의 해를 효율적으로 구하기 위하여 전역적탐색기법인 GA를 이용하였다. 특히, GA의 스트링을 커패시터가 배치될 모선의 인덱스와 투입량인 뱅크단위로 동시에 구성하여 기존의 방법보다 효율적으로 해를 탐색하였다. GA 응용에 있어서, 부하 레벨을 각각의 개체군에 할당시킬 수 있는 다중 개체군을 사용함으로써 수렴특성을 향상시킬 수 있었다. 또한, 스트링의 길이를 변화시킬 수 있는 길이 돌연변이(length mutation) 연산자를 사용함으로써 효과적으로 커패시터 설치위치의 수를 결정할 수 있었다.

GA는 전역적 탐색알고리즘인 반면에 계산시간이 과도한 단점이 있다. 그러나, 최적해를 탐색하는데 소요되는 탐색시간을 요구하는 경우 보다 정확한 해를 요구하는 전력계통의 설계 및 계획 문제에 GA의 응용이 적합하다.

이에 대한 효용성을 입증하기 위하여 10모선, 9선로 계통과 25모선, 24선로로 구성된 불평형 방사상 배전계통에 적용하였다.

2. 불평형 3상 조류계산

불평형 3상 배전계통을 해석하기 위한 불평형 조류계산 방법으로 고전적인 대칭좌표법이 널리 쓰이고 있으나 이 방법은 대칭성분이 분리되지 않은 경우에 적용이 곤란하며, 다중고장해석 등에 매우 복잡하여 컴퓨터를 이용한 해석 방법에는 적합하지 못하다.

본 연구에서는 배전계통의 선로, 병렬커패시터 및 리액터, 변압기, 부하와 같은 제반 설비와 해석 모형을 상좌표계로 표현하였다. 3상 불평형 조류계산의 특징은 다음과 같다[6].

첫째, 선로는 π 등가회 모형으로, 선로의 병렬요소인 커패시터 및 리액터는 전류 주입형 모형으로 표현하였다.

둘째, 다양한 결선의 변압기 모형을 사용하고, 수치해법시 계산효율을 높이기 위한 프로그래밍 모형으로 변형하였다.

셋째, 조류계산과 같은 정상해석의 경우 부하모형이 해에 미치는 영향은 크지 않으므로, 본 연구에서는 부하를 일정하게 한 경우에 대해서 고려하였으며, 해석산법의 해석과정에서 주입전류로 고려하였다.

넷째, 스피스 프로그래밍 기법의 도입으로 실계통을 해석할 수 있으며, 조류계산의 경우 자동화 시스템의 온-라인 적용도 가능하다.

3. 커패시터 적정배치 및 제어를 위한 정식화

부하, 배전망 및 운영상의 제약 조건을 고려하여 불평형 배전계통 내에서의 기존의 커패시터를 고려한 새로운 커패시터 설치 및 제어를 위한 방안을 정식화하였다. 비용함수는 유효전력 손실에 대한 비용과 커패시터의 설치에 관련된 비용을 포함하였다.

계통의 전력손실을 최소화하기 위하여 주어진 시간 동안의 부하변동을 고려할 필요가 있다. 부하변동을 이산적으로 근사화시키고 부하는 일정하게 변화된다고 가정하여 부하지속곡선(load duration curve)을 그림 1과 같이 구간별선형함수(piecewise linear function)로 근사화한다.

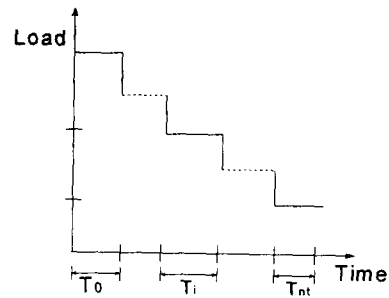


그림 1 근사화한 부하지속곡선
Fig. 1 Approximated load duration curve

또한, 임의의 모선에서 커패시터의 비용은 그림 2와 같이 뱅크단위의 설치비용 함수인 불연속의 미분 불가능한 계단함수(step-like function)로 나타낼 수 있다. 3상 불평형 배전계통에서 커패시터의 설치 및 제어 방안이란 다른 부하레벨에서 부하 제약조건, 네트워크 제약조건, 운전제약조건 등을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 것으로서 식 (1)과 같이 나타내었다.

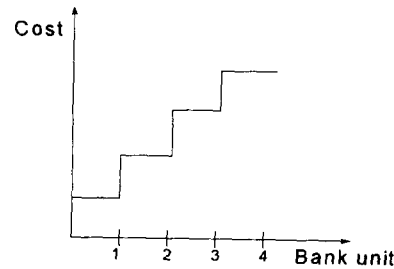


그림 2 미분불가능한 계단함수로 구성한 비용함수
Fig. 2 Cost function with non-differentiable step-like function

목적함수

$$\min_{u_k^{Ai}, u_k^{Bi}, u_k^{Ci}} C(x, u) = C_F(u) + C_{Loss}(x, u) \quad (1)$$

여기서,

$$C_F(u) = \sum_{k \in N_c, u_k^i \neq 0} (Kd_{fk} + K_{fk} C_{fk}(u_k^{Ai}, u_k^{Bi}, u_k^{Ci}))$$

$$C_{Loss}(x, u) = K_E \sum_{i \in N_T} T_i P_{Loss, l}^i(x^i, u_k^{Ai}, u_k^{Bi}, u_k^{Ci})$$

Kd_{fk} : 커패시터에 대한 고정비 즉, 설치비용

$C_{fk}(u_k^{Ai}, u_k^{Bi}, u_k^{Ci})$: 커패시터 뱅크비용 함수

K_{fk} : 커패시터의 비용상수

u_k : 모선 k 에서 새롭게 설치된 커패시터

N_c, N_T : 각각 새로운 커패시터 설치 모선과 부하레벨의 집합

$P_{Loss, l}^i$: 부하레벨 i 에서 l 상의 총 유효전력손실

T_i : 부하레벨 i 동안의 지속시간
 K_e : $\$/KWh$ 단위의 에너지 비용계수

결국 $C(x, u)$ 는 비선형이며 미분 불가능한 불연속한 제어변수 u_k 를 갖는 함수이다. 그러므로 목적함수는 미분 불가능하고 불연속적인 최적화 문제로 정식화되었다.

제약조건

(1) 전력조류와 선로조류용량 제약 조건

$$F^i(x^i, u^{Ai}, u^{Bi}, u^{Ci}) = 0, i \in N_T \quad (2)$$

$$G^i(x^i, u^{Ai}, u^{Bi}, u^{Ci}) \leq 0, i \in N_T$$

(2) 모선 전압의 운전제약 조건

$$V_{min}^i \leq V_{jk}^i \leq V_{max}^i, i \in N_T, \quad (3)$$

$$k=1, 2, \dots, n_i, j=1, 2, \dots, l$$

(3) 커패시터 용량의 불연속 성질에 대한 제약

$$u_k^l = m \times u_s \quad (4)$$

m 은 정수이고 $0 \leq m \leq m_c, l = A, B, C$

(4) 커패시터의 제약 조건

$$0 \leq u_k^A \leq m_c u_s, \text{ for all } k \in N_c, i \in N_T$$

$$0 \leq u_k^B \leq m_c u_s, \text{ for all } k \in N_c, i \in N_T \quad (5)$$

$$0 \leq u_k^C \leq m_c u_s, \text{ for all } k \in N_c, i \in N_T$$

4. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GA)은 자연선택과 자연 유전학의 원리에 근거한 최적점탐색 알고리즘이다. GA는 최적화문제의 목적함수로부터 적합도를 구해 적합도에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것이다[7,8]. 본 연구에서는 배전계통에 있어서 계통손실 및 전압보상을 위하여 커패시터의 이산성을 고려한 커패시터 최적배치 방안을 제안하였다. 커패시터를 설치할 위치와 투입량을 동시에 결정하기 위하여 유전알고리즘의 스트링을 정수로 표현하여 설치위치와 커패시터의뱅크단위로 구성하여 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 3에서 첫 번째 열은 커패시터가 설치될 후보인덱스를 의미하고, 두 번째 열에는 후보모선을 나타내었다. 또한, GA의 스트링을 그림 4와 같이 구성하였다. 효율적인 유전작용자를 사용하기 위하여 첫 번째 열에는 후보위치의 위치인덱스를, 두 번째 열에는 투입량에 대한 커패시터뱅크단위로 구성하였다. 또한 커패시터 설치모선의 수를 효과적으로 결정하기 위하여 각 개체의 스트링의 길이를 X^t 와 Y^t 같이 서로 다르게 표현하였다.

(위치인덱스)	1	2	3	4	5	6	7	8
(후보모선)	2	3	4	5	6	7	8	9

그림 3 위치인덱스와 후보모선
 Fig. 3 Location index and candidate bus

X^t	(위치인덱스)	1	3	2	4	5		
	(투입뱅크)	2	1	3	2	1		
Y^t	(위치인덱스)	2	4	1	7	3	6	8
	(투입뱅크)	3	1	4	3	1	2	3

그림 4 스트링길이가 다른 두 개체의 위치인덱스와 투입뱅크
 Fig. 4 Location index and bank number of different length individuals

4.1 유전작용자

GA를 이용하여 최적해를 탐색하기 위하여 다음과 같은 유전작용자가 사용된다[7,8].

복제(Reproduction)

복제란 비선형이고 불연속인 값을 갖는 함수로 적합도 함수를 정의한 후, 적합도에 비례하여 개체를 생존시키는 작용자이다. 정규화된 적합도는 다음 세대에 생존할 확률로서, 적합도가 더 큰 개체는 다음 세대에서 더 많은 자손을 발생시킬 확률이 크다.

교차(Crossover)

새롭게 복제된 개체들 중에서 교차확률에 따라 교차할 개체를 선정한다. 예를 들어 그림 4와 같이 X^t 와 Y^t 라는 개체가 선정되었다고 하면 식 (6)과 같이 두벡터의 선형조합(linear combination)으로 정의한다. 이것을 whole arithmetical crossover라 한다. a 는 0과 1 사이의 난수, t 는 현재세대, $t+1$ 은 다음세대, X^t 와 Y^t 는 어버이이고, X^{t+1} 과 Y^{t+1} 은 자손이다.

$$X^{t+1} = \text{int}[a \cdot Y^t + (1-a) \cdot X^t] \quad (6)$$

$$Y^{t+1} = \text{int}[a \cdot X^t + (1-a) \cdot Y^t]$$

식 (6)의 $\text{int}[*]$ 는 정수값을 반환시킨다.

돌연변이

교차를 행한 후 개체의 스트링에서 각각의 유전자는 돌연변이 확률만큼 랜덤한 변화를 한다. 돌연변이 대상 개체가 선정되면 길이 돌연변이(length mutation)를 사용하여 스트링의 길이를 새로 결정한다[9]. 그리고, 대상 개체의 임의의 유전자에 대하여 후보위치 및 투입량은 새롭게 선정한다.

4.2 최적화를 위한 유전알고리즘 응용

정식화한 목적함수 및 제약조건을 페널티함수를 이용하여 비제약 최적화문제로 변형한 후, GA를 응용하기 위하여 역을 취하여 적합도 최대화문제로 변형하여 방사상 배전시스템의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 배치 및 운용의 최적해를 탐색한다[7,8]. 유전알고리즘을 이용한 최적화 문제의 절차를 요약하면 다음과 같다.

절차 1 초기화

각각의 부하레벨에 할당된 N개의 개체군을 초기화시킨다. 즉, 그림 4와 같이 각 개체의 유전자는 식 (4)와 (5)를 이용하여 투입뱅크 및 커패시터가 설치될 위치인덱스를 랜덤하게 발생시킨다.

절차 2 적합도 평가

N개의 개체군에 대하여 각각의 개체의 유전자 즉 커패시터가 설치될 위치인덱스와 투입뱅크를 이용하여 3상 불평형 조류계산을 행한 후, 식 (2)와 (3)의 제약조건에 대하여 페널티함수를 적용하고, 식 (1)의 목적함수를 계산한다. 그리고 식 (7)과 같이 적합도를 평가한다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{\text{objective func.} + \text{penalty func.}} \quad (7)$$

절차 3 수렴판정

- 가. 최대세대이면, 종료
- 나. 아니면, **절차 4**로 간다.

절차 4 개체의 스트링 조작

유전알고리즘의 복제, 교차 및 돌연변이 같은 유전작용자를 이용하여 각 개체를 향상시킨 후, **절차 2**로 간다.

5. 사례연구

3상 불평형 배전시스템의 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 적정배치 및 제어 방안의 효용성을 입증하기 위하여 10 모선, 9선로 계통과 25모선, 24선로로 구성된 불평형 방사상 배전계통에 적용하였다.

적용사례 1과 2에서 사용된 각각의 비용상수는 다음과 같다. 에너지 비용상수 $K_e = \$0.06/\text{kWh}$, 커패시터 설치를 위한 고정비용 $K_{d_k} = \$1000$, 커패시터 구입비용 $K_c = \$3.0/\text{kvar}$ 이다[5]. 커패시터는 300kvar/bank로 하였으며, 최대 10bank로 하였다.

적용사례 1

10모선 9선로 및 3개의 변압기로 구성된 계통이 구성도는 그림 5에 나타내었다. 전압의 허용범위는 0.95-1.05p.u., 각 부하레벨에 대하여 개체군의 개체의 수는 50개씩, 최대세대 수는 100세대로 하였다. 교차 및 돌연변이 확률은 각각 0.6과 0.07로 하였다.

표 1에 10모선의 모선 데이터와 선로의 상(phase) 조건을 나타내었고, 표 1에서 8은 기준모선(변전소), 7은 3상(ABC)이고, 1은 A상, 2는 B상, 3은 C상을 의미한다. 표 2에는 선로 데이터를 나타내었다. 표 2에서 from과 to는 선로 양단의 모선번호(시작모선과 끝모선)이다. 선로의 경우 그 순서는 의미

가 없지만, 변압기인 경우는 from은 1차측, to는 2차측을 의미한다. phase는 선로의 상타입으로서 표 1의 설명과 같다. code는 선로의 코드로서 1-15의 경우 선로의 임피던스가 선로 데이터베이스로부터 입력되고, 영상, 정상 및 역상 임피던스의 값을 입력한다. 90은 이 선로는 변압기임을 나타낸다. 99는 선로의 임피던스를 본 레코드 다음에 입력함을 의미한다. 입력은 영상, 정상 및 역상 임피던스의 값을 입력한다. xkmeter는 선로의 경우 선로의 공장[km]을 나타내고, 변압기의 경우 변압기 정격용량[kVA]를 나타낸다. kvln은 선로의 경우 정격 상전압[kV]을 나타내고, 변압기인 경우는 변압기 1대의 직렬 임피던스이다. rxfmr은 선로의 경우는 쓰이지 않으므로 0이고, 변압기의 경우는 변압기 1대의 직렬저항이다.

또한, 표 3에는 3개의 부하레벨과 부하지속시간을 나타내었다. 부하레벨 100%는 침투부하를 의미한다.

그림 6은 세대가 변화함에 따라 전체비용, 손실비용 및 커패시터 설치비용의 변화를 나타낸 것이다. 표 4는 각 부하레벨에 대하여 커패시터가 설치될 위치와 크기를 나타낸 것이다. 제한한 알고리즘은 커패시터 설치위치와 크기를 동시에 탐색할 수 있음을 알 수 있다. 각 부하레벨의 커패시터가 설치될 모선의 수는 길이 돌연변이(length mutation)로부터 얻어진 결과이다. 표의 결과로부터 모선 3, 4 와 5에 3개의 switched 커패시터가 필요함을 알 수 있다. 모선 3에는 900kvar 크기의 switched 커패시터가 설치되어 변화되는 부하레벨에 대하여 가변적으로 동작하여야 한다. 즉, 100% 부하시 900kvar이 전부 투입되어야 하고, 60% 부하의 경우는 300kvar, 40% 부하에서는 투입되지 않아야 한다. 모선 4의 경우, 100% 부하에서만 900kvar이 전부 투입되어야 함을 알 수 있다. 그러나 모선 5에서는 1200kvar 크기의 switched 커패시터와 300kvar 크기의 fixed 커패시터가 함께 설치되어야 한다. 즉, 40% 부하에서는 300kvar 크기의 fixed 커패시터만 작동하고, 60% 부하에서는 300kvar 크기의 fixed 커패시터가 동작되면서 1200kvar 크기의 switched 커패시터에서 300kvar만 작동되어야 한다. 그리고 100% 부하에서는 300kvar 크기의 fixed 커패시터와 1200kvar 크기의 switched 커패시터가 모두 동작되어야 됨을 알 수 있다.

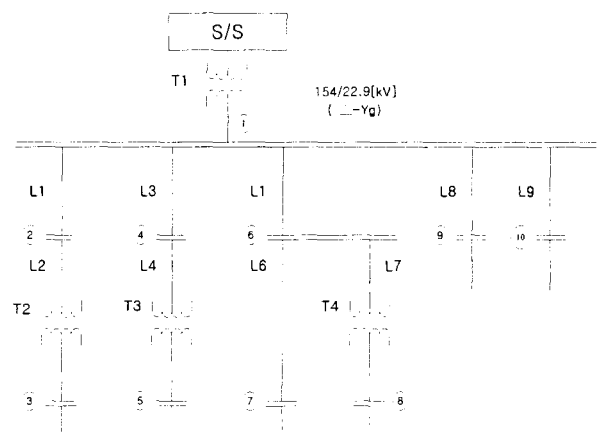


그림 5 10모선 계통도
Fig. 5 One-line diagram for 10 buses

표 1 10모선 데이터
Table 1 Data of 10 buses

모선	상타입	Pload	Qload	커패시터
1	8	0.0	0.0	0.0
2	7	0.0	0.0	0.0
3	1	832.1	415.7	0.0
4	7	832.1	415.7	0.0
5	3	1019.8	568.9	0.0
6	7	0.0	0.0	0.0
7	7	256.7	145.5	0.0
8	7	395.5	227.0	0.0
9	7	3486.0	1975.6	0.0
10	7	2307.2	0.0	0.0

표 2 9선로 데이터
Table 2 Data of 9 lines

Line	phase	code	xkmeter	kvin	rxfmr	
1(from)	2(to)	7	11	0.20	2.40	0.0
2	3	1	90	1500.0	0.080	0.0125
1	4	7	11	0.20	2.40	0.0
4	5	3	90	1500.0	0.080	0.0125
1	6	7	99	1.80	2.40	0.0
6	7	7	14	0.25	2.40	0.0
6	8	7	90	750.0	0.075	0.0122
1	9	7	99	0.25	2.40	0.0
1	10	7	10	0.25	2.40	0.0

표 3 부하레벨 및 부하지속시간
Table 3 Load level and load duration time

Load level(%)	100	60	40
Time interval(hours)	5000	33800	5000

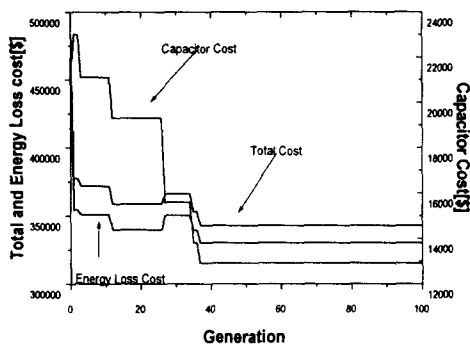


그림 6 전체비용, 손실비용 및 커패시터 비용
Fig. 6 Variation of Total cost, Loss cost and Capacitor cost

표 4 커패시터 설치위치와 크기
Table 4 Capacitor placement location and size

capacitor placement location and size			
load level(100%)			
bus no.	3	4	5
kvar	900	900	1500
load level(60%)			
bus no.	3	4	5
kvar	300	0	600
load level(40%)			
bus no.	3	4	5
kvar	0	0	300

표 5 커패시터 설치 전후의 비교
Table 5 Comparison between pre and post capacitor installation

comparison between pre and post installation						
	pre installation			post installation		
total cost	\$405,674.20			\$342,826.35		
total loss cost	\$405,674.20			\$329,926.35		
total cap. cost	\$0.0			\$12,900		
total load [kw/year]	18,258.8					
total loss [kw/year]	607.32(3.33%)			514.78(2.82%)		
phase	A	B	C	A	B	C
V of bus(p.u.)	load level - 100%					
2	0.899	1.031	0.999	0.965	1.029	0.975
3	0.865			0.981		
4	1.023	0.982	0.832	1.032	0.950	0.964
5			0.780			1.002
6	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
sys. loss[kw]	423.94(4.64%)			366.85(4.02%)		
phase loss[kw]	125.77	39.91	258.26	106.46	42.81	217.58
V of bus(p.u.)	load level - 60%					
2	0.944	1.018	0.999	0.965	1.017	0.991
3	0.925			0.962		
4	1.011	0.987	0.912	1.009	0.972	0.955
5			0.885			0.960
6	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
sys. loss[kw]	129.33(2.36%)			101.56(1.85%)		
phase loss[kw]	40.22	14.11	74.99	33.44	15.97	52.15
V of bus(p.u.)	load level - 40%					
2	0.964	1.012	0.999	0.964	1.012	0.999
3	0.952			0.952		
4	1.007	0.991	0.944	1.006	0.983	0.965
5			0.927			0.964
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
sys. loss[kw]	54.05(1.48%)			46.37(1.27%)		
phase loss[kw]	17.04	6.21	30.79	17.04	6.81	22.52
5 year total margin	\$62,847.85					

또한, 표 5에서는 커패시터 설치에 의한 보상전과 보상후의 전체비용, 손실 그리고 전압크기를 비교하여 나타내었다. 보상전에 전압크기는 각 부하레벨에서 전압크기의 상하한치를 위반한 것이 있었으나, 보상후 전압크기의 상하한치를 모두 만족하였다. 그리고, 각 부하레벨에서 손실도 감소되었음을 알 수 있다. 전체비용의 경우에도 보상 전에는 \$405,674.20이었으나, 보상 후에는 \$342,826.35가 되었고 결국 5년간 \$62,847.85가 절약됨을 알 수 있다.

적용사례 2

25모선 24선로 및 8개의 변압기로 구성된 불평형 배전계통에 적용하였다. 전압의 허용범위는 적용사례 1과 같고, 각 부하레벨에 대하여 개체군의 개체의 수는 100개씩, 최대세대의 수는 200세대로 하였다. 교차 및 돌연변이 확률은 각각 0.9와 0.08로 하였다. 또한, 부하레벨과 부하지속시간은 적용사례 1의 표 3과 같이 사용하였다. 그림 7은 세대가 변화함에 따라 전체비용, 손실비용 및 커패시터 설치비용의 변화를 나타낸 것이다.

표 6은 각 부하레벨에 대하여 커패시터가 설치될 위치와 크기를 나타낸 것이다. 제안한 알고리즘은 커패시터 설치위치와 크기를 동시에 탐색할 수 있음을 알 수 있다. 각 부하레벨의 커패시터가 설치될 모선의 수는 길이 돌연변이(length mutation)로부터 얻어진 결과이다. 표의 결과로부터 12개의 switched 커패시터가 필요함을 알 수 있다. fixed 커패시터는 모선 3, 5 그리고 14에 300kvar 크기를 각각 설치하여야 한다. switched 커패시터는 적용사례 1과 유사하게 각 부하레벨에 따라 동작되어야 함을 알 수 있다.

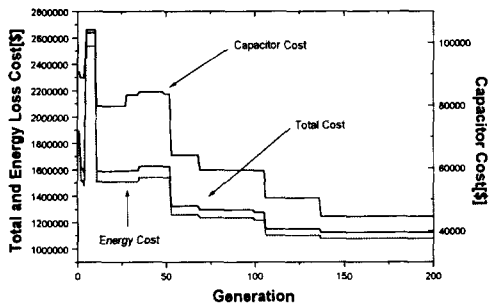


그림 7 전체비용, 손실비용 및 커패시터 비용
Fig. 7 Variation of Total cost, Loss cost and Capacitor cost

또한, 표 7에서는 커패시터 설치에 의한 보상전과 보상후의 전체비용, 손실을 비교하여 나타내었다. 커패시터를 설치하는데 있어 \$44,400를 투자하여 전체비용의 경우에도 보상 전에는 \$1,284,197.17이었으나, 보상 후에는 \$1,122,180.67이 되었고 결국 5년간 \$162,016.50이 절약됨을 알 수 있다. 표 8, 9 및 10에는 각 부하레벨에 대하여 보상전후의 전압크기, 계통손실 그리고 각 상에 대한 전력손실을 나타내었다. 보상전 각 부하레벨에서 전압크기의 상하한치를 위반한 것이 있었으나, 보상후 전압크기의 상하한치를 모두 만족하였다. 그리고, 각 부하레벨에서 전력손실도 감소되었음을 알 수 있다.

표 6 새로운 커패시터 설치위치와 크기
Table 6 New capacitor placement location and size

capacitor placement location and size												
bus no.	2	3	4	5	10	11	13	14	17	19	20	24
load level(100%)												
kvar	300	900	1200	1500	1200	600	2100	1500	600	300	300	300
load level(60%)												
kvar	300	300	300	600	0	300	900	600	300	0	0	0
load level(40%)												
kvar	0	300	0	300	0	0	0	300	0	0	0	0

표 7 커패시터 설치 전후의 전체 손실 및 비용 비교
Table 7 Comparison of total loss and cost between pre and post capacitor installation

comparison between pre and post installation		
	pre installation	post installation
total cost	\$1,284,197.17	\$1,122,180.67
total loss cost	\$1,284,197.17	\$1,077,780.67
total cap. cost	\$0.0	\$44,400
total load[kw]	56,883.8	
total loss[kw]	1,840.01(3.23%)	1,626.10(2.8)6%
total margin	\$162,016.5	

기존연구와 비교 및 검토

커패시터의 설치 및 계획을 위한 기존연구의 경우 커패시터가 설치될 모선을 감도 등의 방법을 이용하여 선정하고, 투입될 커패시터 뱅크의 양을 혼합정수계획법 및 비선형계획법 등을 이용하여 결정하였다[1]. 또한, GA를 사용하는 경우 커패시터 설치 대상의 모선 수만큼 배열을 이용하여 커패시터가 설치될 모선과 투입될 커패시터의 양을 최적화 하였다[5].

그러나 본 연구에서는 GA를 이용하여 커패시터가 설치될 위치인덱스(커패시터 설치될 모선)와 투입될 커패시터의 양을 결정하도록 유전자를 구성하였다. 또한, 스트링의 길이를 변화시킬 수 있는 길이돌연변이 연산자를 사용함으로써, 커패시터가 설치될 모선의 수가 변화되어 최적으로 결정되고, 그 수에 맞추어 투입될 커패시터의 양이 결정되었다. 즉, 설치될 최적의 커패시터의 수와 모선이 결정되고 투입될 커패시터의 양이 최적이지 않으면, 다음세대에서 투입될 커패시터의 양이 최적화 될 수 있다.

또한, GA를 이용한 기존의 연구는 각 부하레벨에서 최적화 될 변수들을 하나의 개체군에 연속적으로 할당시켜 최적해를 탐색하였다[5]. 이 경우 하나의 부하레벨의 변수들이 부적당한 값이고 다른 부하레벨의 변수들은 좋은 값을 포함하면, 부하레벨 사이에 영향을 받아 적합도가 낮아지게 되어 탐색시간이 길어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 부하레벨의 변수들을 작은 개체군에 각각 할당시킴으로써 각 부하

레벨의 변수들이 최적으로 되는데 상호영향을 받지 않게 함으로써 탐색시간을 향상시킬 수 있다.

표 8 커패시터 설치전후의 전압크기 비교(부하레벨100%)
Table 8 Comparison of voltage magnitude between pre and post capacitor installation(load level 100%)

comparison between pre and post installation						
	pre installation			post installation		
phase	A	B	C	A	B	C
V of bus[p.u.]	load level - 100%					
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.901	1.034	0.994	0.950	1.037	0.981
3	0.873			0.957		
4	1.021	0.975	0.854	1.037	0.953	0.967
5			0.818			1.006
10	0.935	0.935	0.935	0.953	0.953	0.953
11	1.002	0.932	1.019	1.002	0.960	1.026
12		0.905			0.950	
13	1.017	0.976	0.820	1.044	0.967	0.952
14			0.766			0.977
15	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999
16	0.962	0.962	0.962	0.973	0.973	0.973
17	0.906	0.906	0.906	0.979	0.979	0.979
18	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
19	0.948	0.948	0.948	0.952	0.952	0.952
20	0.905	1.003	0.979	0.952	1.005	0.967
21	0.879			0.958		
22	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998
23	0.954	0.954	0.954	0.960	0.960	0.960
24	0.923	0.923	0.923	0.958	0.958	0.958
25	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
sys. loss[kw]	1238.45(4.35%)			1131.37(3.98%)		
phase loss[kw]	370.21	237.04	631.20	324.21	215.10	592.06

표 9 커패시터 설치전후의 전압크기 비교(부하레벨60%)
Table 9 Comparison of voltage magnitude between pre and post capacitor installation(load level 60%)

comparison between pre and post installation						
	pre installation			post installation		
phase	A	B	C	A	B	C
V of bus[p.u.]	load level - 60%					
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.934	1.020	0.999	0.959	1.023	0.996
3	0.910			0.951		
4	1.011	0.987	0.912	1.013	0.976	0.959
5			0.885			0.964
11	1.001	0.961	1.011	0.997	0.986	1.015
12		0.945			0.987	
13	1.008	0.987	0.897	1.018	0.984	0.952
14			0.862			0.951
15	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
16	0.978	0.978	0.978	0.983	0.983	0.983
17	0.946	0.946	0.946	0.982	0.982	0.982
21	0.932			0.969		
sys. loss[kw]	423.72(2.48%)			341.76(2.00%)		
phase loss[kw]	129.92	80.31	213.49	108.28	75.02	158.46

불평형 배전계통에 있어서 유전알고리즘을 이용한 커패시터의 적정 배치 및 제어

표 10 커패시터 설치전후의 전압크기 비교(부하레벨40%)
Table 10 Comparison of voltage magnitude between pre and post capacitor installation(load level 40%)

comparison between pre and post installation						
	pre installation			post installation		
V of bus[p.u.]	load level - 40%					
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.958	1.013	0.999	0.979	1.012	0.991
3	0.943			0.980		
4	1.007	0.991	0.944	1.006	0.983	0.965
5			0.927			0.964
11	1.000	0.974	1.007	1.000	0.974	1.007
12		0.964			0.964	
13	1.004	0.991	0.935	1.003	0.983	0.956
14			0.913			0.951
sys. loss[kw]	177.83(1.56%)			150.97(1.33%)		
phase loss[kw]	55.18	34.86	87.79	47.93	36.72	66.32

6. 결 론

본 연구에서는 방사상 불평형 배전계통에 있어서 각각 다른 부하레벨에 대하여 손실감소 및 전압보상을 위한 커패시터 적정배치 및 제어 방안을 제시하였다.

불평형 3상 배전계통을 해석하기 위한 조류계산 방법으로 제반설비와 해석모형을 상좌표계로 표현함으로써 각종 불평형계산을 용이하게 하였다.

또한, 3상 불평형 배전계통에서 커패시터의 위치, 종류 및 크기를 결정하기 위하여 선로용량제약, 모선전압제약 등과 같은 안전도 및 경제적 요소를 고려하였다.

커패시터 배치와 관련된 비용함수를 실제 뱅크단위로 이산성을 고려하기 위하여 계단함수로 정식화하였다. 불연속이면서 미분 불가능한 함수인 커패시터 배치와 관련된 비용함수의 해를 효율적으로 구하기 위하여 전역적탐색기법인 GA를 이용하였다.

특히, GA를 응용함에 있어서 다음과 같은 특징을 고려함으로써, 효율적으로 해를 탐색할 수 있었다.

첫째, GA의 스트링을 커패시터가 배치될 모선의 인덱스와 투입량인 뱅크단위로 동시에 구성하여 기존의 방법보다 효율적으로 해를 탐색하였다.

둘째, 다중 개체군을 사용하여 부하레벨을 각각의 개체군에 할당시킴으로써 수렴특성을 향상시킬 수 있었다.

셋째, 스트링의 길이를 변화시킬 수 있는 길이 돌연변이(length mutation) 연산자를 사용함으로써 효과적으로 커패시터 설치위치의 수를 결정할 수 있었다.

넷째, GA는 전역적 탐색알고리즘인 반면에 계산시간이 과다한 단점이 있다. 그러나, 최적해를 탐색하는데 소요되는 탐색시간을 요구하는 경우 보다 정확한 해를 요구하는 전력계통의 설계 및 계획 문제에 GA를 응용하는 것이 적합함을 알 수 있었다.

향후 연구로는 3상 불평형 배전계통에서 부하모형을 고려하여 과도현상에 대하여 해석할 필요가 있으며, 또한, 온라인 제어를 위하여 병렬처리를 응용함으로써 유전알고리즘의 특성을 향상시킬 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학
공동연구소 주관으로 수행되었음. (과제번호 : 97 - 086)

저 자 소 개

참 고 문 헌

- [1] J. J. Grainger and S. H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp1105-1116, March, 1981
- [2] M. Baran, F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution system", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp725-734, January, 1989
- [3] H. D. Chiang, "Optimal capacitor placements in distribution system: Part I, Part II", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, pp634-649, January, 1990
- [4] H. D. Chiang, J. C. Wang, "Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems: Part I, II", IEEE Trans. on Power System, vol. 10, pp356-369, February, 1995
- [5] S. Sundhararajan, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems using Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 9 No. 3, pp1499-1507, August, 1994
- [6] 황갑주의 2명, "배전계통 해석을 위한 모형개발", 대한전기학회 논문지, 제42권 No. 5, pp42-51, 1995
- [7] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [8] Kyu-Ho Kim, Seok-Ku You, "Optimal VAR Dispatching considering Contingency by Genetic Algorithms", Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering, vol. 2, pp997-1001, August, 1996
- [9] S. Luchian, "Evolutionary Automated Classification", ICEC, Proceeding of The First IEEE Conference on Evolutionary Computation, vol. II, pp585-588, 1994

김 규 호 (金圭浩)

전기학회논문지 48A권 4호 참조

Tel : 0345-490-6058

E-mail : kyuho@intra.ansantc.ac.kr

유 석 구 (劉錫九)

전기학회논문지 48A권 4호 참조

Tel : 0345-400-5161

E-mail : skyou@mail.hanyang.ac.kr