

# ESGA를 이용한 불평형 배전계통의 커패시터 설치에 관한 연구

論 文
52A-6-4

## A Study on Capacitor Placement Using ESGA Hybrid Approach in Unbalanced Distribution Systems

金圭浩\* · 李有楨\*\* · 李相奉\*\* · 劉錫九\*\*\*  
(Kyu-Ho Kim · Yu-Jeong Lee · Sang-Bong Rhee · Seok-Ku You)

**Abstract** - This paper applied Elite-based Simplex-GA hybrid approach combined with Muptipop-GA (ESGA) to determining the location, size and number of capacitors to improve voltage profile and minimize power losses in unbalanced distribution systems. One of the main obstacles in applying GA to complex problems has been the high computational cost due to their slow convergence rate. To alleviate this difficulty, ESGA approach was developed that combines Elite-based Simplex-GA hybrid approach with Muptipop-GA. The objective function formulated consists of two terms: cost for energy losses and cost related to capacitor purchase and capacitor installation. The cost function associated with capacitor placement is considered as a step function due to banks of standard discrete capacities. Its efficiency was proved through the application in IEEE 13 bus and 34 bus test systems and was compared with several methods using GA.

**Key Words** : Capacitor Placement, ESGA Hybrid Approach, Genetic Algorithms, Voltage Profile, 3-Phase Power Flow

### 1. 서 론

배전계통에서 커패시터를 어디에 설치하고 어떻게 동작시키는가에 따라 전압의 프로파일과 계통손실이 크게 영향을 받는다[1-3]. 따라서 커패시터 설치 목적은 설치할 커패시터의 위치와 크기를 결정하고 효율적인 운영 방안을 결정하는 것이다[4-9]. 실제의 배전계통의 부하구성 분포는 상업용 및 산업용 부하에 단상 또는 2상 부하가 산재되어 있고, 각상의 파라메타와 부하가 서로 다를 수 있으며 보통 연가를 하지 않기 때문에 불평형이다. 따라서 송전계통과 달리 3상으로 다루어야 더욱 정확한 해석을 할 수 있다.

커패시터 용량의 이산성 때문에 목적함수의 정식화 및 효과적인 해법 적용에 상당한 어려움이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 알고리즘이 개발되었다. Grainger와 Lee는 커패시터의 설치 위치와 크기를 비선형이고 연속적인 함수로 정식화하여 gradient를 이용하여 결정하였다[1].

Baran과 Wu는 커패시터 설치 문제를 혼합 정수프로그래밍을 이용해 주문제와 부문제로 나누었는데, 주문제는 커패시터의 위치를 결정하는 것이고 부 문제에서는 커패시터의 종류와 크기를 결정하였다[2]. Chen 등은 불평형 영향을 고려하기 위하여 선로도체의 상호결합 효과를 고려하였다[3].

Chiang 등은 커패시터 설치 문제를 이산 조합 최적화 형태로 정식화하고 Simulated Annealing(SA)으로 전역해를 찾는 방법을 사용하였다[4,5]. Huang과 Yang 등은 최적해를 구

하는데 탐색공간을 줄이기 위하여 감도분석법으로 커패시터의 후보 설치 위치를 결정하고 Tabu Search(TS) 알고리즘을 이용하여 커패시터의 크기를 결정하였다. Huang은 커패시터 설치 문제에 목적함수와 제약조건을 항원으로 처리하는 면역 알고리즘(Immune Algorithms : IA)을 적용하였다[7]. 또한, GA를 이용하여 커패시터 설치 위치와 크기를 결정하는 연구가 다수 진행되었다[8-12]. 특히, Sundhararajan 등은 감도 분석법으로 커패시터의 설치 위치를 찾은 후 GA를 사용하여 커패시터의 크기를 결정하였으며[8], Miu 등은 GA와 heuristic 방법을 결합한 two-stage 알고리즘을 제안하였다[9]. 본 논문의 저자들 또한 이전의 연구에서 GA를 이용한 Multipop-GA 방법을 사용하였다. 계산시간을 줄이고 정확한 해를 탐색하기 위하여 각 부하레벨에 대해 각각의 개체군을 할당하여 다중 개체군(Multi-population)을 구성한 후 개체의 유전자를 커패시터의 설치 위치와 크기로 처리하여 문제를 해석하였다[12]. 이러한 구조는 단일 개체군을 이용하여 해를 구하는 일반적인 GA 방법보다 빠르고 정확한 결과를 확인할 수 있었으나 좀더 복잡한 문제의 적용에 있어서는 최적해로의 수렴이 여전히 느려지는 경우가 있다. 이러한 GA의 수렴성 문제를 해결하기 위해 Yen과 Lee는 확률적으로 해를 탐색하는 Simplex 방법과 기존의 GA를 조합하여 Elite-based Simplex-GA hybrid 법을 개발하였다. 이 방법은 전역적 최적해로의 빠른 수렴하는데 있어 GA를 사용하는 대부분의 방법 보다 우수하다[13].

본 논문에서는 불평형 배전계통의 커패시터 최적설치를 위해 Elite-based Simplex-GA hybrid법과 본 저자들이 개발한 Multipop-GA를 결합한 ESGA 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 IEEE 13 모선과 34 모선 테스트 시스템에 적용하였고, 기존의 GA를 사용한 몇 개의 방법과 실행결과를 비교하여 본 논문에서 사용한 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

\* 正 會 員 : 安山工科大学助教授 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 漢陽大學校 電氣工學科 博士課程 修了  
\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大學校 電氣工學科 教授 · 工博  
接受日子 : 2003年 2月 25日  
最終完了 : 2003年 5月 9日

### 2. 3상 조류계산

배전계통의 부하구성 분포는 상업용 및 산업용 부하에 단상유도전동기 부하가 많은 경우 심한 불평형을 나타내고 있다. 그리고 보통 연가를 하지 않기 때문에 불평형이며 송전계통과는 달리 3상으로 다루어야 더욱 정확한 해석을 할 수 있다. 불평형 3상 배전계통을 해석하기 위한 3상 조류계산 방법으로 선로, 병렬커패시터 및 리액터, 변압기, 부하와 같은 제반 설비와 해석 모형을 대칭좌표법을 이용하는 대신 상좌표계로 표현하여 계통조류와 전압 등을 계산한다. 계통 내 요소모델의 수학적 표현과 해법절차는 참고문헌 [14]에 상세히 제시되어 있고 요약하면 다음과 같다.

#### 2.1 선로도체

##### 직렬 임피던스

원래의 3상 선로도체는 실제 선로도체의 각 상과 중성선의 임피던스로 나타낼 수 있으며 중성선을 다중 접지하여 전압강하가 없는 것으로 가정하면 Kron의 축약기법에 의해 3상 선로도체의 임피던스는 어드미턴스 요소로 등가화 하여 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

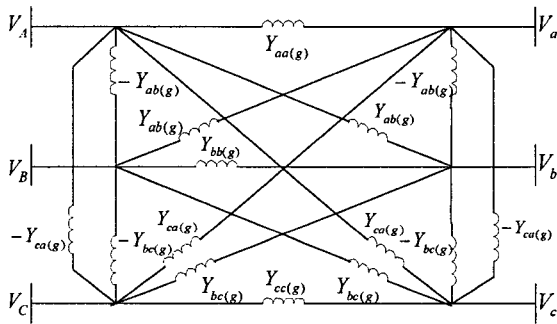


그림 1 3상 선로도체의 직렬어드미턴스 등가회로  
Fig. 1 Equivalent Circuit of Series Admittance of a Three-Phase Conductor

##### 병렬 커패시턴스

3상의 선로도체가 갖는 병렬 커패시턴스 성분은 해석산법의 적용을 용이하게 하기 위하여 그림 2와 같이 등가주입전류인  $I_a, I_b, I_c$ 로 표현할 수 있고, 식 (1)과 같이 나타내었다.

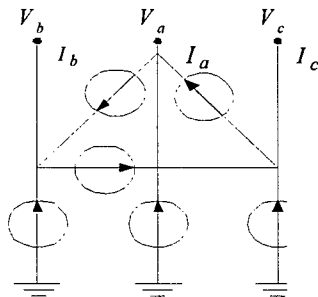


그림 2 병렬 커패시턴스의 등가 주입전류  
Fig. 2 Equivalent Injected Currents of Shunt Capacitances

$$\begin{aligned}
 I_a &= -\frac{1}{2}(y_{ab} + y_{ac} + y_{an})V_a + \frac{y_{ab}}{2}V_b + \frac{y_{ac}}{2}V_c \\
 I_b &= -\frac{1}{2}(y_{ab} + y_{bc} + y_{bn})V_b + \frac{y_{ab}}{2}V_a + \frac{y_{bc}}{2}V_c \\
 I_c &= -\frac{1}{2}(y_{ac} + y_{bc} + y_{cn})V_c + \frac{y_{ac}}{2}V_a + \frac{y_{bc}}{2}V_b
 \end{aligned} \tag{1}$$

#### 2.2 커패시터

배전 선로에 설치되는 커패시터는 그림 3과 같이 3상 선로도체의 병렬 커패시턴스 모델과 유사한 등가주입전류로 표현하며 식 (2)와 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 Q_a &= Q_a^0 \left| \frac{V_a}{V_a^0} \right|^2, \quad Q_b = Q_b^0 \left| \frac{V_b}{V_b^0} \right|^2, \quad Q_c = Q_c^0 \left| \frac{V_c}{V_c^0} \right|^2 \\
 I_a &= \frac{-jQ_a}{V_a^*}, \quad I_b = \frac{-jQ_b}{V_b^*}, \quad I_c = \frac{-jQ_c}{V_c^*}
 \end{aligned} \tag{2}$$

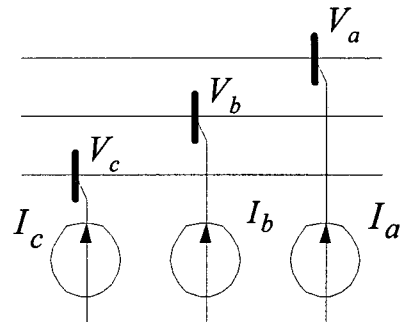


그림 3 병렬 커패시터의 등가주입전류  
Fig. 3 Equivalent Injected Currents of Shunt Capacitors

#### 2.3 변압기

배전계통에는 수많은 변압기가 연결되어 있으며 이들 변압기의 수학적 모형은 해석산법의 수렴성과 해의 정확도에 큰 영향을 주게 된다. 본 논문에서는 3상 변압기의 손실, 결선종류 및 변압기 1차와 2차 사이의 위상변위 등을 고려하였다. 그림 4는 각 상을 주입전류로 표현한 등가모델이며 참고문헌 [15]에 상세히 전개되어 있다.

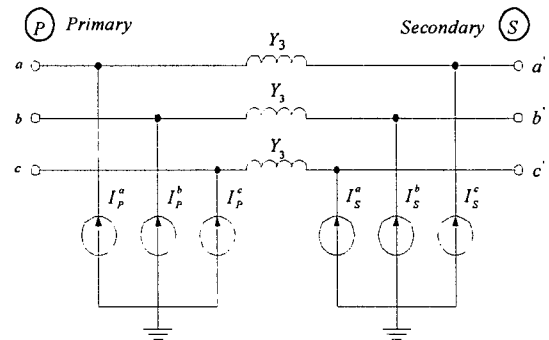


그림 4 3상변압기 프로그래밍 모델  
Fig. 4 Programming model for a Three-phase Transformer

2.4 부하

3상 부하 역시 조류계산을 용이하게 하기 위하여 다른 계통요소와 마찬가지로 개별적인 등가주입전류로 나타낼 수 있으며 그림 5와 같이 표현할 수 있다.

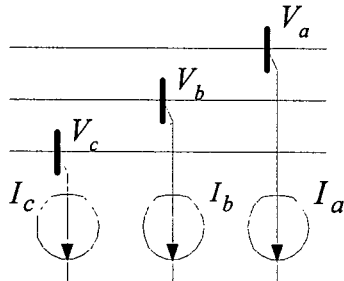


그림 5 3상부하의 등가주입전류  
Fig. 5 Equivalent Injected Currents of Three-Phase Load

2.5 3상 조류계산 순서도

본 논문에서는 3상 조류계산을 위하여  $Z_{BUS}$  를 이용한 가우스 해법을 사용하였다.  $Z_{BUS}$  가우스 방법은 전력방정식의 반복적 해를 구하기 위하여 계통내 구성요소의 축약  $Y_{BUS}$  행렬과 이와 관계된 등가 주입전류를 이용하는 방법이다.

$Z_{BUS}$  를 이용한 방법은 해를 결정하는데 빠른 수렴율과 적은 메모리를 필요로 하는 특징을 갖고 있으며, 특히 수렴성은 계통내의 전압 지정 모선의 수에 크게 영향을 받는다. 따라서 일반적으로 전압 지정 모선을 하나만 정해서 구성된 배전계통에서는  $Z_{BUS}$  가우스 방법이 최선의 해법으로 사용되어진다. 그림 6은 이러한  $Z_{BUS}$  가우스 방법의 3상 조류계산 알고리즘 순서도이다.

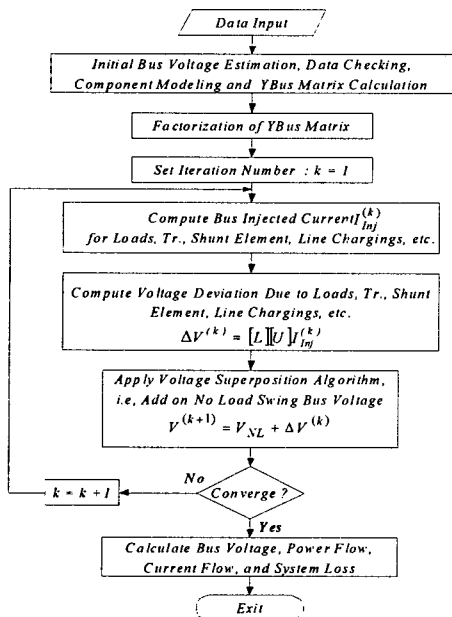


그림 6 3상 조류계산 알고리즘 흐름도  
Fig. 6 Flowchart for Three-Phase Power Flow Algorithm

3. 문제의 정식화

커패시터 설치에 의한 배전계통의 전력손실을 최소화하기 위해서는 계통운영 시간 동안의 부하변동을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 부하변동은 이산적으로 근사화 시키고 부하는 일정하게 변화한다고 가정하여 부하지속곡선을 구간별 선형함수로 근사화 한다. 커패시터 비용함수는뱅크단위의 설치비용 함수인 불연속의 미분불가능한 계단함수로 나타낼 수 있다[1,2].

3.1 목적 함수

커패시터 설치 문제에서 목적함수는 커패시터 설치비용과 에너지 손실비용으로 구성되며 식 (3)과 같다. 설치비용은 커패시터 고정 설치비용과 구매비용으로 나타낼 수 있고, 에너지 손실비용은 각 부하레벨의 지속시간과 전력손실을 곱으로 나타낼 수 있다[2-7].

$$\begin{aligned} \text{Min. objective func.} = & \sum_{k=1}^{nc} (Kd_k + K_c C_k (u_k^{A,B,C})) \\ & + K_e \sum_{i=0}^{nt} T^i P_{loss}^i (x^i, u^{A_i, B_i, C_i}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $Kd_k$ 는 모선  $k$ 에서의 커패시터 설치를 위한 고정 비용이고  $K_c$ 와  $K_e$ 는 각각 커패시터 비용과 에너지 비용에 대한 상수이다.  $nc$ 와  $nt$ 는 각각 커패시터와 부하레벨의 수이고  $C_k$ 는 커패시터의 비용함수이다.  $u_k^{A,B,C}$ 는 모선  $k$ 에서 각 상의 커패시터 크기 벡터이고  $u^{A_i, B_i, C_i}$ 는 부하레벨  $i$ 에서 각 상의 제어장치에 대한 벡터이다.  $x^i$ 는 부하레벨  $i$ 에 대한 전압 크기와 같은 상태변수 벡터이고  $P_{loss}^i$ 는 부하레벨  $i$ 에서의 전력손실이며  $T^i$ 는 부하레벨  $i$ 의 지속시간이다.

3.2 제약조건

커패시터 설치문제에 있어서 제약조건은 계통내의 부하를 만족하도록 하는 전력조류방정식, 모선전압의 운전 제약 그리고 커패시터 용량에 관한 제약 등이 있으며 다음과 같다.

조류방정식

$$F(x^i, u^{A_i, B_i, C_i}) = 0 \quad (4)$$

여기서  $F$ 는 부하레벨  $i$ 에 대한 각상의 조류방정식이다.

모선전압의 운전제약

$$V_{k, min}^{A_i, B_i, C_i} \leq V_k^{A_i, B_i, C_i} \leq V_{k, max}^{A_i, B_i, C_i} \quad (5)$$

여기서  $V$ 는 부하레벨  $i$ 에 대한 모선  $k$ 에서의 각상의 전압 크기이고,  $max$ 와  $min$ 은 각 전압크기의 상한치와 하한치이다.

**커패시터 용량의 제약**

$$\begin{aligned} u_k^1 = u_k^2 = \dots = u_k^{n_i} &\leq u_{k,max} \text{ (fixed type)} \\ 0 &\leq u_k^i \leq u_{k,max} \text{ (switched type)} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $u_k^i$ 는 부하레벨  $i$ 에 대한 모선  $k$ 에서 커패시터의 크기이다.

**4. 해석 알고리즘**

본 절에서는 커패시터 설치에 관한 해법으로서 확률적 Simplex 연산자를 설명하고 Multipop-GA와 Elite-based Simplex-GA hybrid approach를 조합한 ESGA에 대하여 설명하였다[12,13].

**4.1 확률적 Simplex 연산자**

변수  $N$ 개로 구성된 최적화 문제에서 Simplex 방법은  $X_1, X_2, \dots, X_{N+1}$ 로 정의된 Simplex를 형성하는  $N+1$ 개의 점들의 해집합을 평가하여 최적해를 탐색한다.  $N+1$ 개의 점들의 해집합을 목적함수에 대입하여 평가한 후, 가장 나쁜 점  $X_w$ 를 제외한 나머지 점들로 식 (7)을 이용하여 중심  $\bar{X}$ 를 구하고 이로부터  $X_w$ 를 투영하여 새로운 점  $X_p$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} X_p &= \bar{X} + \alpha(\bar{X} - X_w) \\ \bar{X} &= \frac{1}{N} (X_1 + X_2 + \dots + X_{w-1} + X_{w+1} + \dots + X_{N+1}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 확률 분포에 근거한 변수이며 [0,2] 사이의 값을 갖는 무작위 변수이다. 따라서 새로운 Simplex 해는  $X_1, X_2, \dots, X_{w-1}, X_{w+1}, \dots, X_{N+1}, X_p$ 로 정의되며 최적해를 구하게 된다. 반복계산 여부의 결정은 스텝 사이즈  $|X_p - X_w|$ 가 미리 정한 값 또는 최적해 주위의 Simplex 원보다 작게 될 때까지 반복한다. 반복계산 중  $X_w$ 를 투영하여 새로 구한점이 가장 나쁜 점보다 최적해로의 특성이 좋지 않은 경우에는 식 (8)을 적용하여 새로운 해를 구성하게 된다.

$$X_p = \bar{X} - \beta(\bar{X} - X_w) \quad (8)$$

여기서  $\beta$ 는 0.5에서 최고점을 갖는 삼각모양의 확률밀도 함수이며 구간 [0,1] 사이의 값을 갖는 무작위 변수이다.

**4.2 ESGA**

유전알고리즘(Genetic Algorithms: GA)은 자연도태와 자연 유전학적인 구조에 근거한 매우 강력한 전역적 최적해 탐색기법으로 전통적인 탐색 알고리즘과는 다른 구조를 갖고 있다[16]. 최적화 문제에 있어서 개체군(population)으로 구성된 해집합을 이용하여 최적점을 동시에 탐색하며, 미분정보나

기타 보조적인 지식을 필요로 하지 않는다. 또한 변수들의 값을 나타낼 때 이진코드 대신에 정수코드를 사용하여 알고리즘의 코딩시간을 절약할 수 있다. 본 논문에서는 해석 알고리즘으로 기존의 GA와 확률적 Simplex 방법을 조합한 Elite-based Simplex-GA hybrid[13]를 본 저자들이 개발한 Multipop-GA를 결합한 ESGA를 제안하였다. 그 절차와 내용은 다음과 같다.

**Step 1 : 초기화**

GA를 적용함에 있어서 다중 개체군(Multi-population)은 수렴을 향상시키기 위하여 그림 7과 같이 각 부하레벨에 해당하는 sub-population으로 구성한 것이다[12]. 각 부하레벨에 할당된 sub-population  $N$  개를 초기화 하고,  $N$  개의 sub-population에서 각각의 유전자는 각 변수의 최대값과 최소값 사이에서 임의로 발생시킨다. 각각의 개체(individual)는 커패시터를 설치할 위치와뱅크수로 구성하였다.

**Step 2 : 적합도 평가와 페널티함수**

$N$  개의 sub-population에서 개체의 유전자로부터 결정된 커패시터 설치 위치와 크기를 이용하여 조류계산을 실행한다. 식 (9)를 이용하여 커패시터 설치에 관한 적합도를 평가한다. 제약조건은 페널티함수로 전환하여 처리한다.

$$Fitness \ func. = \frac{1}{Obj. \ func. + Penalty \ func.} \quad (9)$$

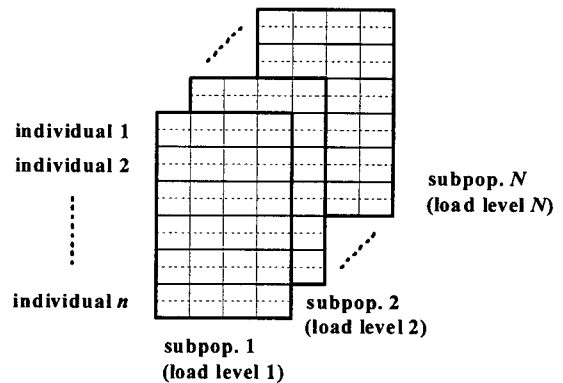


그림 7 다중 개체군  
Fig. 7 Multi-population

**Step 3 : 수렴판정**

만약 최대세대가 되면 멈추고 그렇지 않으면 Step 4로 가서 유전자를 조작한다.

**Step 4 : 유전자 조작.**

그림 8과 같이 각 개체의 유전자를 조작하여 다음 세대로 넘어갈 새로운 개체를 발생시킨다.

- $N1$  개의 개체는 다음 세대로 넘어간다.
- $N1 + N2$  개의 개체에 확률적 Simplex 방법인 식 (7)과 (8)을 적용하여  $N2$  개를 생성한다.
- $N1 + N2 + N3$  개의 개체에 Reproduction, Crossover 및 Mutation과 같은 일반적인 GA 연산자를 사용하여  $N3$  개를 생성한다[12].
- 유전자 조작후 Step 2로 가서 적합도 평가와 페널티 함수를 계산한다.

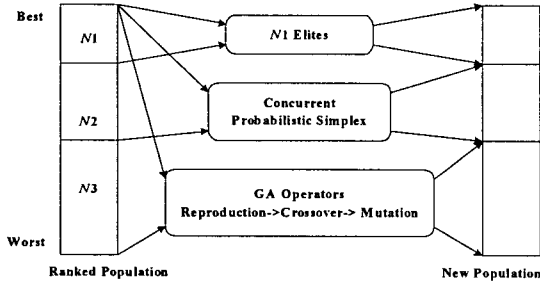


그림 8 ESGA의 개략적인 절차  
Fig. 8 Procedure of ESGA

5. 사례연구

본 논문에서 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 IEEE 13 모선 및 34 모선 배전계통에 적용하였다. GA를 이용한 알고리즘인 Sensitivity-GA[8], Multipop-GA[12], Simplex-GA[16]와 계산 결과를 비교하였다. 제안된 방법과 비교한 알고리즘은 Pentium-III 컴퓨터에서 Visual C++언어를 이용하여 코딩하였다. 문제해석을 위한 비용 상수와 여러 가지 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 평가기간 : 5년
- 에너지 비용  $K_e$  : \$0.06/kWh
- 커패시터의 고정비용  $K_d$  : \$1000
- 커패시터의 구입비용  $K_c$  : \$3.0/kVAR
- 교차확률 : 0.1, 0.15, ..., 0.95(18개)
- 돌연변이 확률 : 0.01, 0.015, ..., 0.095(18개)
- 총 실행 수 : 324(18×18)

5.1 적용사례 1 : IEEE 13 모선 테스트 시스템

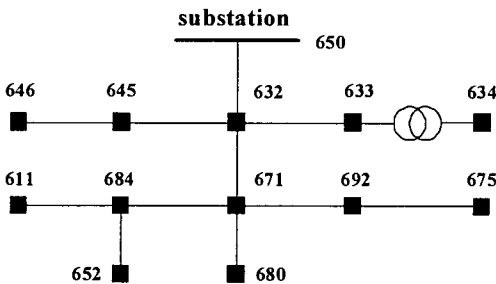


그림 9 IEEE 13 모선 테스트 시스템  
Fig. 9 IEEE 13 bus test systems

그림 9에 나타낸 IEEE 13 모선 12 선로 계통에 적용하였으며 2상 및 단상 선로가 다수 포함된 불평형 계통이다.

부하 데이터는 표 1에 나타내었으며 선로구성 코드는 참고 문헌 [17]에 상세히 나타내었다.

표 1 시스템의 부하데이터  
Table 1 End Bus Load Data

Send Bus	End Bus	Ph-1 kW	Ph-1 kVAR	Ph-2 kW	Ph-2 kVAR	Ph-3 kW	Ph-3 kVAR	Length (ft)	Conf Code
632	645	0	0	170	125	0	0	500	603
632	633	0	0	0	0	0	0	500	602
633	634	160	116	120	87	120	87	0	XFM
645	646	0	0	230	132	0	0	300	603
650	632	0	0	0	0	0	0	2000	601
684	652	128	86	0	0	0	0	800	607
671	684	0	0	0	0	0	0	300	604
671	680	0	0	0	0	0	0	1000	601
632	671	385	220	385	220	385	220	2000	601
671	692	0	0	0	0	170	151	0	switch
684	611	0	0	0	0	170	80	300	605
692	675	485	190	68	60	290	212	500	606
Total Load		1,158	612	973	624	1,135	750		

표 2는 부하레벨과 부하지속시간을 나타내며 부하레벨 100%는 피크부하를 의미한다. 시뮬레이션을 위한 sub-population의 개체의 수는 30이고 최대 세대수는 100으로 하였다. 전압크기의 한계는 0.95~1.05[p.u.]을 사용하였으며, 100% 부하레벨에서 총 유효 및 무효전력 부하는 각각 3,266[kW]와 1,686[kVAR]이다. 계통에 설치될 커패시터의 1뱅크는 100[kVAR/bank]이고 최대 뱅크는 15로 하였다. 변전소 전압은 1.0[p.u.]이며 전압조정기는 고려하지 않았다.

표 2 부하레벨과 부하지속시간  
Table 2 Load Level and Load Duration Time

Load level(%)	100	60	40
Time interval(hours)	5,000	33,800	5,000

임의로 발생된 초기 개체군에 대하여 각각의 알고리즘 별로 324번의 실행결과를 비교 분석하였다. 표 3은 각 알고리즘 별로 최적해를 찾은 실행수와 세대수를 나타내었다. 최적해를 찾은 실행수에 있어서 ESGA가 확률적 Simplex 연산자를 사용하기 때문에 Sensitivity-GA의 결과와 유사하나 나머지 방법 보다 매우 우수함을 확인하였다. 또한 최적해 탐색 시간에 있어서는 ESGA 방법이 Sensitivity-GA 보다 약 2배, 그 외 Multipop-GA 보다 약 4배 그리고 Simple-GA 보다 약 6배 빨리 수렴함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 ESGA 알고리즘은 확률적 Simplex 연산자와 Multipop-GA의 특성을 사용하고, 감도계산을 위한 미분계산 절차가 필요 없어 매

우 효율적인 방법임을 확인 할 수 있었다. 그림 10은 본 연구에서 비교된 각 방법의 수렴과정을 나타내었다.

표 3 각 방법에서 최적해를 찾은 실행수와 세대수  
Table 3 Number of Runs and Best Generation found Optimum in Each Approach

	ESGA	Sensitivity-GA[8]	Multipop-GA[12]	Simple-GA[16]
Number found the optimum / Total run number	173/324 (53%)	165/324 (51%)	124/324 (38%)	61/324 (19%)
Best gen. found the optimum	6	11	26	35
Energy loss cost	\$107,574.075			
Capacitor cost	\$9,300			

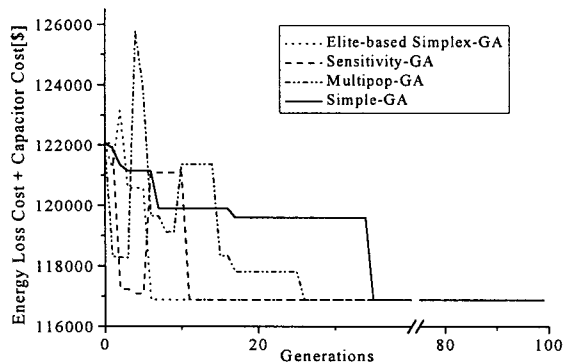


그림 10 에너지 손실과 커패시터 비용의 변화  
Fig. 10 Variation of energy loss and capacitor costs

표 4에서는 커패시터의 최적 설치 위치와 크기를 나타내었다. 부하율 100%에 있어서 671번 모선에 12개의 뱅크 (1200 [kVAR], switched-type), 684번 모선에 6개의 뱅크 (600 [kVAR], switched-type) 그리고 692번 모선에 3개의 뱅크 (300[kVAR], switched-type)가 각각 설치되어야 함을 알 수 있다.

표 4 커패시터 최적 설치 위치와 크기  
Table 4 Optimal Capacitor Placement Location and Size

Optimal Location	Control Setting [kVAR]			Optimal Size [kVAR]
	100%	60%	40%	
671	1200	600	300	1200
684	600	0	0	600
692	300	0	0	300

표 5는 커패시터를 설치하기 전과 후의 총 비용, 손실비용 및 전압크기를 비교한 것으로 커패시터를 설치하기 전의 시스템의 총 비용은 \$137,601.186 이었고 커패시터를 설치한 후의 총 비용은 \$116,874.075 이었다. 이 결과로부터 5년 동안의 비용마진은 \$20,727.111 임을 알 수 있었다. 커패시터 설

치 전과 후의 계통 최소전압  $V_{min}$ 은 부하레벨 100%에서 7.1%, 부하레벨 60%에서 1.6% 그리고 부하레벨 40%에서 1.1% 상승하였고 전체 시스템의 손실은 감소되었다.

표 5 커패시터 설치전과 설치후 결과 비교  
Table 5 Comparison of the Results Between Without and With Capacitor Placement

		Without capacitor	With capacitor
Total cost		\$137,601.186	\$116,874.075
Total losses cost		\$137,601.186	\$107,574.075
Total cap. cost		\$0.0	\$9,300
Total margin		\$20,727.111	
Load level- 100%	$V_{min}$	0.8884	0.9516
	$V_{ave}$	0.9388	0.9809
	$V_{max}$	0.9650	0.9977
	Losses [kW]	135.0 (4.15%)	94.96 (2.9%)
Load level- 60%	$V_{min}$	0.9370	0.9524
	$V_{ave}$	0.9650	0.9761
	$V_{max}$	0.9791	0.9933
	Losses [kW]	45.01 (2.29%)	36.56 (1.86%)
Load level - 40%	$V_{min}$	0.9561	0.9668
	$V_{ave}$	0.9772	0.9827
	$V_{max}$	0.9861	0.9926
	Losses [kW]	19.35 (1.48%)	16.45 (1.25%)

5.2 적용사례 2 : IEEE 34모선 테스트 시스템

적용사례 2에서는 34 모선 33 선로로 구성되고 2상 및 단상 선로가 다수 포함된 불평형 IEEE 테스트 계통에 적용하였다. 시스템의 부하 데이터와 선로구성 데이터는 본 논문에서는 생략하였고 참고문헌 [17]에서 상세히 나타나 있다. 부하레벨과 부하지속시간 데이터는 표 2와 같고 sub-population의 크기는 50이고 최대세대의 수는 100이다. 전압 크기의 한계는 0.9~1.0[p.u.]이고 100% 부하레벨에서 총 유효 및 무효전력 부하는 각각 566.13[kW]와 292.68 [kVAR]이다. 시스템의 전체 부하가 작기 때문에 커패시터의 1뱅크는 20[kVAR/bank], 최대뱅크는 10으로 하였다. 변전소 전압은 1.0[p.u.]으로 하였고 적용사례 1에서와 같이 전압조정기는 무시하였다.

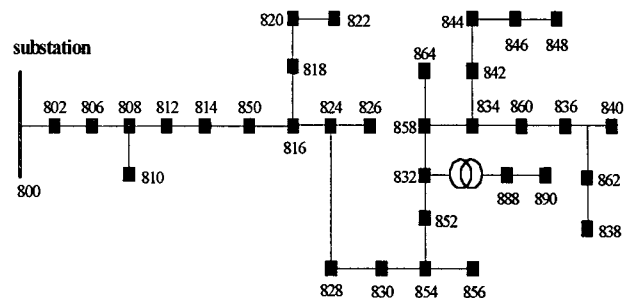


그림 11 IEEE 34 모선 테스트 시스템  
Fig. 11 IEEE 34 bus test systems

표 6 각 방법에서 최적해를 찾은 실행수와 세대수  
Table 6 Number of Runs and Best Generation found Optimum in Each Approach

	ESGA	Sensitivity-GA[8]	Multipop-GA[12]	Simple-GA[16]
Number found the optimum / Total run number	137/324 (42%)	116/324 (35%)	37/324 (16%)	5/324 (2%)
Best Gen. found the optimum	11	27	34	69
Energy loss cost	\$49,029.152			
Capacitor cost	\$3,840			

적용사례 1에서와 같이 각 알고리즘 별로 324번의 실행결과를 비교 분석하였다. 표 6은 각 방법의 실행결과를 요약한 것으로 모든 알고리즘은 최적점에 수렴하고 수렴율에서 차이가 나는 것을 알 수 있다. 최적점을 찾는데 있어서는 ESGA가 Sensitivity-GA와 비교해서 약 2.5배, Multipop-GA 보다는 약 3배 그리고 Simple-GA 보다는 약 6배 정도 빠른 결과를 나타내었다. 그러나 Sensitivity-GA를 제외한 나머지 방법은 커패시터 설치 위치와 크기를 동시에 탐색하는 것이다.

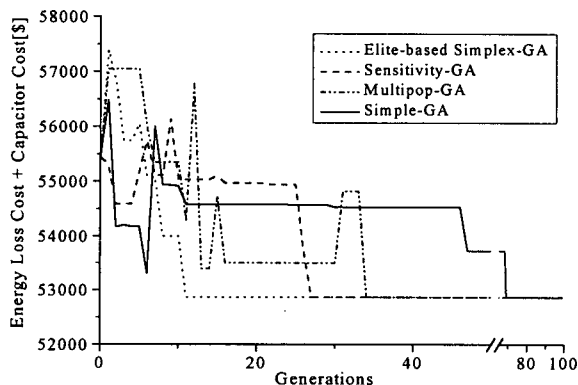


그림 12 에너지 손실과 커패시터 비용의 변화  
Fig. 12 Variation of energy loss and capacitor costs

그림 12에서는 각 알고리즘의 수렴과정을 비교하였고, 표 7에서는 ESGA의 실행 결과로서 커패시터의 최적 설치 위치와 크기를 나타내었다. switched capacitors는 모선 820번에 5개의 뱅크(100[kVAR], switched-type), 모선 822번에 5개의 뱅크(100[kVAR], switched-type) 그리고 모선 838번에 4개의 뱅크(80[kVAR], switched-type)가 각각 설치되어야 함을 알 수 있다.

표 8은 커패시터를 설치하기 전과 후의 총 비용, 손실비용 그리고 전압크기를 비교한 것으로서 커패시터를 설치하기 전의 시스템 총 비용은 \$56,672.877이었고 커패시터를 설치한 후의 총 비용은 \$53,538.152이었다. 이 결과로부터 5년 동안의 비용마진은 \$3,134,725임을 알 수 있었다.

표 7 커패시터 최적 설치 위치와 크기  
Table 7 Optimal Capacitor Placement Location and Size

Optimal Location	Control Setting [kVAR]			Optimal Size [kVAR]
	100%	60%	40%	
820	100	0	0	100
822	100	20	20	100
838	80	20	20	80

표 8 커패시터의 설치전과 설치후의 결과 비교  
Table 8 Comparison of the Results Between Without and With Capacitor Placement

		Without capacitor	With capacitor
Total cost		\$56,672.877	\$52,869.152
Total losses cost		\$56,672.877	\$49,029.152
Total cap. cost		\$0.0	\$3,84
Total margin		\$3,134.725	
Load level - 100%	$V_{min}$	0.8451	0.9209
	$V_{ave}$	0.9325	0.9466
	$V_{max}$	0.9992	0.9987
	Losses [kW]	57.29 (10.11%)	47.51 (8.39%)
Load level - 60%	$V_{min}$	0.9140	0.9262
	$V_{ave}$	0.9614	0.9635
	$V_{max}$	0.9995	0.9995
	Losses [kW]	18.32 (5.39%)	16.17 (4.76%)
Load level - 40%	$V_{min}$	0.9445	0.9567
	$V_{ave}$	0.9748	0.9769
	$V_{max}$	0.9997	0.9996
	Losses [kW]	7.75 (3.42%)	6.59 (2.91%)

적용사례 1과 2의 결과로부터 배전계통의 커패시터 설치 문제와 같은 복잡한 목적함수의 구성을 갖는 최적화 문제의 해법으로 Multipop-GA와 Elite-based Simplex-GA hybrid approach를 조합한 ESGA 방법이 다른 여러 가지 알고리즘과 비교하여 가장 효율적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 계통의 전압 프로파일을 개선하고 전력손실을 최소화하기 위하여 커패시터의 최적 설치 및 운영 방안을 제시하였다.

실제의 배전계통의 부하구성 분포는 상업용 및 산업용 부하에 단상 또는 2상 부하가 산재되어 있고, 각상의 파라메타와 부하가 서로 다를 수 있으며 보통 연가를 하지 않기 때문에 불평형이다. 따라서 정확한 해석을 위하여 3상으로 다루어 해석하였다.

해석 알고리즘으로는 Multipop-GA와 Elite-based Simplex-GA hybrid approach를 조합한 ESGA 방법을 사용하였다. ESGA의 효용성을 입증하기 위해 GA를 사용하는 여러 가지의 방법의 계산 결과와 비교하였다. 각각의 알고리즘은 최적점에 수렴하고 수렴율은 달랐으며 각 방법 중에서 ESGA가 가장 우수한 결과를 나타내었다. 결국, ESGA는 Simplex 연

산자, Multipop-GA와 Elite-based hybrid 구조의 효과적인 사용으로 인하여 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

커패시터 설치에 관한 문제는 다수의 2상과 단상 선로, 각 상의 요소와 부하가 다른 불평형일지라도 switched-type 커패시터의 최적 설치 위치와 용량을 결정하여 전압 프로파일을 향상시키고 시스템 손실을 감소시킬 수 있었다.

향후 연구로는 제안한 ESGA 방법을 좀더 전문적이고 실제적으로 해석하기 위해서는 커패시터 설치 및 고장 구간에 따른 계통의 재구성, 주기적인 퓨즈 교체 등과 같은 계통의 연간 유지비용 등을 고려할 필요가 있다고 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002학년도 안산공과대학 학술연구비에 의하여 연구된 것임

#### 참 고 문 헌

- [1] J. J. Grainger, 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, pp.1105-1116, March, 1981,
- [2] 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
- [3] 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
- [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] H. D. Chiang, J. C. Wang, G. Darling, "Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems: System Solution Algorithms and Numerical Studies", IEEE Trans. on Power System, Vol. 10, No. 1, pp.363-369, February, 1995
- [6] Y. C. Huang, H. T. Yang, C. L. Huang, "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System using Tabu Search Approach", IEEE Trans. on Power System, Vol. 11, No. 4, pp.1868-1873, November, 1996
- [7] S. J. Huang, "An Immune-Based Optimization Method to Capacitor Placement in a Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp.744-749, April, 2000
- [8] S. Sundhararajan, A. Pahwa, "Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems using Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, No. 3, pp.1499-1507, August, 1994
- [9] K. N. Miu, H. S. Chiang, G. Darling, "Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Distribution Systems by a GA-Based Two-Stage Algorithms", IEEE Trans. on Power System, Vol. 12, No. 3, pp.1160-1166, August, 1997
- [10] A. Kalyuzhny, G. Levitin, D. Elmakis, H. B. Haim, "System Approach to Shunt Capacitor Allocation in Radial Distribution Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 56, pp.51-60, 2000
- [11] C. T. Su, G. R. Lii, C. C. Tsai, "Optimal Capacitor Allocation using Fuzzy Reasoning and Genetic Algorithms for Distribution Systems", Mathematical and Computer Modeling, Vol.33, No. 6, pp.745-757, 2001
- [12] K. H. Kim, S. K. You, "Voltage Profile Improvement by Capacitor Placement and Control in Unbalanced Distribution Systems using GA", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. II, pp.800-805, 1999
- [13] J. Yen, B. Lee, "A Simplex Genetic Algorithm Hybrid", Proceeding of The Fourth IEEE Conference on Evolutionary Computation, Vol. II, pp.175-179, 1997
- [14] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas, E. A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis A Rigid Approach", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp.1146-1152, July, 1991
- [15] Final Report for Consolidated Edison Company Research and Development Project 92087, "Generalized Distribution Analysis System", June, 1989
- [16] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + Data structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [17] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders", IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-985, August, 1991



저 자 소 개



**김규호 (金圭浩)**

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 안산공과대학 전기과 조교수

E-mail : kyoho@ansantc.ac.kr



**이상봉 (李相奉)**

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료

E-mail : rrsd@ihanyang.ac.kr



**이유정 (李有楨)**

1962년 7월 24일생. 1986년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 2000년 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료

E-mail : leeyjeong@ihanyang.ac.kr

**유석구 (劉錫九)**

전기학회 논문지 제 52A 권 4호 참조

E-mail : skyou@hanyang.ac.kr