

## Optimal Capacitor Placement in a Distribution System Considering Lifetimes of Devices

朴鍾泳\* · 朴鍾根\*\*

(Jong-young Park · Jong-keun Park)

**Abstract** - This paper proposes the planning method for placement of capacitors in a distribution system. The main objectives in the planning for capacitor allocation are the reduction of installation costs and electric power loss. In the proposed method, the life time of each device is considered in calculating installation costs, and the optimal operation status of devices is found by genetic algorithm. Then, the optimal numbers and locations are determined based on the optimal operation status. Simulation results in the 69-bus distribution system show that the proposed method performs better than conventional methods.

**Key Words** : Distribution, Shunt capacitor, Under-load tap changer, 설치계획, Genetic algorithm

### 1. 서 론

배전계통은 수요자에게 공급되는 전기의 품질에 직접적인 영향을 주기 때문에 전력 품질에서 핵심적인 역할을 하며, 배전계통에서 전압 제어기기의 적절한 제어를 통하여 전압의 변동량을 작게 하고 전력 손실 또한 감소시킬 수 있다. 따라서 전압기기의 설치 및 운용에서 가장 중요한 과제는 전압의 변동량 및 전력 손실을 작게 하는 것이다. 일반적으로 배전계통에서 전압제어기기의 설치에 있어서 주요 목표는 작은 비용의 기기를 통하여 전압변동의 크기를 일정한 범위 내로 유지하면서 동시에 유효전력 손실의 감소시키는 것이다.

배전계통에서의 커패시터의 최적 설치는 1960년대부터 연구되어 왔는데, 대개 기기의 설치비용을 최소화 하면서 전력 손실의 감소를 크게 하는 것을 목적으로 하고 있다. 초기의 연구에서는 커패시터의 배치에 해석적 방법이 적용되었고 [1,2], 그 뒤 혼합 정수 비선형 계획법(mixed-integer nonlinear programming) 등이 이용되었으며 [3], 커패시터 설치의 최적위치를 구하기 위해 민감도 분석과 모선의 부하 특성을 이용하였다[4]. 그 후 유전알고리즘(genetic algorithm)을 많이 적용하였는데[5-13] 그 중 일부는 퍼지함수를 이용해 목적함수를 구성하였으며[7,8,12], 논문[12]에서는 미소유전알고리즘(microgenetic algorithm)을 사용하였고, 논문[13]에서는 유전알고리즘과 선형계획법이 함께 사용되었고, 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)이나 [14] 진화프로그래밍(evolutionary programming) [15], 타부서치(Tabu search)

가 사용되었다[16]. 그 밖에 동적계획법(dynamic programming)이 사용되었고[17-19], 인공신경회로망(artificial neural network)을 이용하여 해를 구하였다 [20]. 이와 같이 기존의 연구들은 앞서 말한 목적함수에 대한 해를 효율적으로 구하기 위한 다양한 방법들에 대하여 주로 이루어져 왔다.

이상 살펴본 것을 정리하면, 배전계통에서의 커패시터 설치계획에 대한 문제에서는 작은 비용의 기기를 통한 전력손실의 감소를 목표로 하고 있는데, 해석적인 방법을 통하여 해를 구하는 것이 어렵기 때문에 다양한 인공지능기법 등이 적용되어왔다.

본 논문에서는 이러한 계획문제의 목적함수에서 중요한 요소인 기기의 설치비용을 고려함에 있어서, 일반적으로 배전계통에 설치되어 있는 탭절환기(under-load tap changer, ULTC)와 분로커패시터(shunt capacitor)에 대하여, 그 기기들의 동작 횟수와 그로 인한 수명의 변화를 고려하였다. 수명에 변화가 생길 경우 연간계산된 설치비용(annualized installation cost)에 차이가 생기게 되는데, 목적함수를 구성함에 있어 이를 고려한 설치비용과 전력손실에 의한 비용을 함께 고려하였다. 특히 기존의 설치계획에서는 커패시터의 설치가 탭절환기의 동작이나 수명에 미치는 영향을 고려하지 않았으나, 제안하는 방법에서는 그 영향을 고려하였다. 이렇게 구성된 목적함수의 해를 유전알고리즘을 통하여 구하였다. 이를 통하여 실질적인 설치 및 운용비용이 최소가 되는 커패시터의 설치기법을 제시하고 있다.

### 2. 문제의 정식화

일반적으로 배전계통에서 커패시터를 설치하는 문제에서는 기기의 설치비용을 최소화하고 전력손실의 감소에 따르는 이익을 최대화 하도록 문제를 구성한다. 기존의 커패시

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 · 工博

† 교신저자, 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 教授 · 工博

E-mail : parkjk@snu.ac.kr

接受日字 : 2007年 11月 27日

最終完了 : 2007年 12月 27日

터 설치계획에 대한 연구들에서는 위의 문제를 최적화 문제로 구성할 때, 그 목적함수를 설치비용과 전력가격 합 의 최소화로 구성하였다. 하지만 실제로는 기기의 동작횟수에 따라 각 기기의 수명이 달라지고, 이를 고려하면 연간계산된 설치비용(annualized installation cost)도 그 값이 달라진다. 기존 논문에서는 기기의 동작횟수를 단순히 제약조건으로만 다루었으나, 본 논문에서는 설치비용을 고려할 때 이에 따른 비용까지 고려하여 더 실질적인 비용감소를 할 수 있도록 설치계획문제의 목적함수를 구성하였다.

2.1. 부하데이터 및 제어변수

전압제어기기의 효율적인 설치 및 운용은 부하의 패턴과 밀접한 관계가 있다. 이를 위해서 부하예측(load forecast)의 기법을 통하여 예측한 부하의 패턴을 이용하는데, 계획 단계에서 일일 부하변화의 패턴을 모두 고려하는 것은 불가능하므로 근사화가 필요하다.

대개 계절별의 부하 소비패턴은 일정한 양상을 보이게 되며, 크게 여름, 겨울, 봄/가을 이렇게 세 기간의 부하패턴이 비슷하다 가정하고, 그림 1과 같은 계절별 데이터를 이용하였다. 그리고 이와 같은 부하의 패턴이 주어졌을 때 그에 해당하는 부하지속곡선(load duration curve, LDC)을 통하여 그 특성을 나타냈다(그림 2). 제안하는 방법에서는 그림 2에서와 같이 각 부하지속곡선을 세 개의 구간으로 나누어 계산에 이용하기로 하며, 각 기간에 대하여 세 단계의 부하수준(load level)을  $load_{low}$ ,  $load_{mid}$ ,  $load_{high}$  로 정의한다.

정리하면 우선 1년의 부하패턴을 계절에 따라 세 가지로 구분하고 각 계절의 부하지속곡선을 세 단계의 부하수준으로 구분하여 총 9개의 기간이 정의되었고, 각각의 기간에 대하여 그 길이와 부하수준이 정의되었다. 여기에서 각 기간의 길이와 부하수준을 다음과 같이 정의하여, 다루게 될 계통의 부하패턴 특성을 이 데이터를 통하여 나타낼 수 있다.

$$d_i : i \text{ 번째 기간의 길이} \tag{1}$$

$$load_i : i \text{ 번째 기간의 부하 수준} \tag{2}$$

본 논문에서 배전계통에서의 계획은 커패시터를 어떻게 설치하는가를 다루는데, 이때 문제가 되는 것은 기기들을 어떻게 설치할 것인가 이므로 일반적으로 생각할 수 있는 변수로는 기기의 설치위치 및 설치량이 될 것이다. 하지만 비용을 계산할 때, 기기 동작횟수의 증감에 의한 기기의 수명을 고려하기 위해서 식(3), (4)와 같이 각 기기의 동작 상태에 대한 제어 변수를 설정한다. 여기에서 커패시터는 단위용량의 커패시터들이 필요에 따라 여러 개 설치되는 것으로 가정하였다.

$$nc = \begin{bmatrix} nc_{11} & nc_{12} & \dots & nc_{1D} \\ nc_{21} & \ddots & & \\ \vdots & & nc_{ij} & \vdots \\ nc_{C1} & nc_{C2} & \dots & nc_{CD} \end{bmatrix} = [nc_1, nc_2, \dots, nc_D] \tag{3}$$

$$nt = [nt_1, nt_2, \dots, nt_i, \dots, nt_D] \tag{4}$$

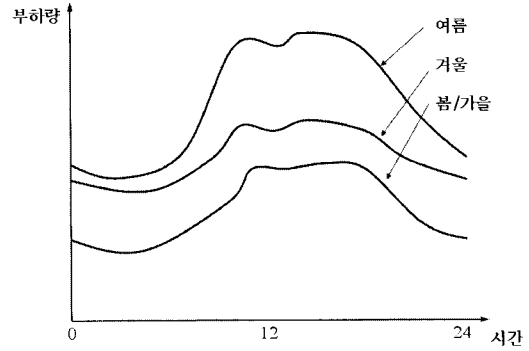


그림 1 계절별 부하 패턴의 예  
Fig. 1 Examples of daily load patterns

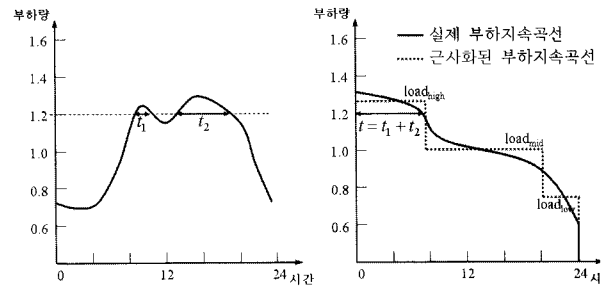


그림 2 부하패턴과 부하지속곡선  
Fig. 2 Daily load pattern and load duration curve

여기에서

$nc_{ij}$  : j 번째 기간 동안 i 모선에 투입되는 단위커패시터의 개수

$nt_i$  : i 번째 기간 동안 변압기 탭의 위치

$C$  : 커패시터가 설치될 수 있는 모선의 총 개수

$D$  : 기간의 총 개수

이때 계산의 효율성을 위하여 커패시터가 설치될 수 있는 모선을 민감도(sensitivity) 분석을 통하여 결정한다[5]. 설치 모선의 기준은 커패시터를 설치하였을 때 전력손실이 많이 감소하는 모선을 우선으로 하며, 다음과 같은 과정을 통하여 결정하게 된다.

전력계통에서의 전력손실은 다음의 식으로 구해지고,

$$P_L + jQ_L = VI^* = VY^*V^* \tag{5}$$

따라서

$$P_L = \sum_i \sum_j V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \tag{6}$$

이다. 모선의 무효전력에 대한 전력 손실의 민감도를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q} = \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} \tag{7}$$

여기에서 손실  $P_L$ 을  $V_i$ 와  $\theta_i$  각각에 대하여 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} = 2 \sum_j V_j Y_{ij} \cos \delta_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} = -2 V_i \sum_j V_j Y_{ij} \cos \delta_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (9)$$

그리고 손실의 변화율과 계통의 자코비안 행렬  $J$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \Theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix} = [J^T] \cdot \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial P \\ \partial P_L / \partial Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

즉,  $\begin{bmatrix} \partial P_L / \partial P \\ \partial P_L / \partial Q \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \Theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix}$  이고, 따라서 무효전력에 대한 전력손실의 민감도는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \partial P_L / \partial Q \end{bmatrix} = [J_{L3} \ J_{L4}] \cdot \begin{bmatrix} \partial P_L / \partial \theta \\ \partial P_L / \partial V \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기에서  $J_{L3} = \partial \theta / \partial Q$ ,  $J_{L4} = \partial V / \partial Q$ 이며, 각각  $[J^T]^{-1}$ 의 부분행렬이다. 위의 계산결과에 의하여 모선들을 정렬한 다음 각 지선(lateral branch)에 대하여 상위 2, 3개의 모선을 선택하게 된다.

그리고 식(3)에 의해 커패시터의 동작상태  $nc$ 가 결정되면 그에 해당하는 설치될 커패시터의 개수 또한 결정되며, 이는 설치비용을 구할 때 이용된다. 전력계통에서 사용되는 전압 제어용 커패시터는 크게 고정형(fixed)과 스위칭형(switched)으로 구분할 수 있고 각각 비용에 차이가 난다. 따라서 필요한 커패시터의 개수뿐만 아니라 어떤 종류인지도 구별해야 한다. 식(3)의  $nc$ 에 의해 동작이 결정될 경우  $i$  모선에 설치되는 고정형 커패시터 개수  $cf_i$ 와 스위칭형 커패시터의 개수  $cs_i$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$cf_i = \min\{nc_{i1}, nc_{i2}, \dots, nc_{iD}\} \quad (12)$$

$$cs_i = \max\{nc_{i1}, nc_{i2}, \dots, nc_{iD}\} - cf_i \quad (13)$$

그리고 기기의 동작횟수와 수명과의 관계를 유도하기 위해서, 우선 식(3), (4)의  $nc$ ,  $nt$  데이터로부터 각 기기의 동작횟수를 다음과 같이 추정한다. 일반적으로 하루 동안의 부하량 변화는 개략적으로 그림 3의  $load_{low}$ 에서 출발하여  $load_{mid}$ 를 거쳐  $load_{high}$ 에 이르렀다가 다시  $load_{low}$ 로 떨어지고, 이때 각 부하량에 대하여 그림 3에 표시된  $nc$ 에 따라 커패시터가 동작한다고 할 수 있다. 이러한 부하량 변동의 주기성과 그에 따른 커패시터 동작의 주기성을 이용하여 식(14)와 같이 기기의 일일 동작횟수를 추정할 수 있다.

$$no_{ij} = 2 \times \{|nc_{i,high} - nc_{i,mid}| + |nc_{i,mid} - nc_{i,low}|\} \quad (14)$$

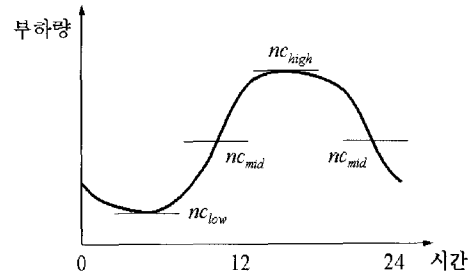


그림 3 일일 동작횟수의 추정  
Fig. 3 Estimation of daily operation number

여기에서  
 $no_{ij}$  :  $j$ 번째 기간 동안  $i$ 모선에 설치된 기기들의 일일 동작횟수

이때 각 기기들의 연간 동작횟수는 다음과 같다.

$$no_i = \sum_j d_j \cdot no_{ij} \quad (15)$$

여기에서  
 $no_i$  :  $i$ 모선에 설치된 기기의 연간 동작횟수

위에서 구한 연간 동작횟수는 앞서 말한 가정에 의해 추정된 값이며 실제와는 차이가 날 수 있는 값이지만, 계통의 계획 단계에서 사용할 수 있는 정확도를 가진다. 그리고 한 모선에 다수의 기기가 설치된 경우 각 기기의 동작횟수는 그 모선에서의 동작횟수를 기기의 개수로 나눈 만큼 동작한다고 가정한다. 지금까지 구한 이러한 변수들이 실제 운용시의 비용을 추정할 때 이용된다.

## 2.2. 목적함수 및 제약 조건

배전계통 계획에서 고려되는 사항은 설치비용과 운용 시 들어가는 비용이다. 전압제어기기의 운용 시 들어가는 비용에는 기기에 의한 손실 감소 또는 증가에 의한 비용과 잦은 동작을 할 경우 감소되는 기기의 수명에 의한 비용을 생각할 수 있다. 이 절에서는 각각의 비용을 수식적으로 어떻게 나타낼 수 있는지 정리하고, 그 총 비용을 최적화문제의 목적함수(objective function)로 나타낸다.

### 2.2.1. 설치비용 ( $C_{inst}$ )

설치비용과 손실비용을 함께 고려하기 위하여 설치비용을 연간비용으로 환산한다. 연간비용은 결국 기기의 수명에 따라 달라지고, 수명은 기기의 동작횟수에 따라 변하게 된다. 이러한 점을 고려하여 다음과 같은 방법으로 기기의 수명을 추정하였다.

커패시터나 탭절환기(tap changer)의 수명과 관련된 데이터는 정격 수명과 정격 최대 동작횟수가 있으며, 실제 계통의 계획이나 운용에 있어서는 고려가 되지 않고 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 기기들의 연간 동작횟수

와 수명과의 관계를 수식적으로 유도하였다. 실제 탭절환기나 커패시터를 동작하는데 사용되는 차단기의 수명은 기기 동작횟수의 영향을 많이 받게 된다. 이러한 기기의 수명을 동작횟수에 반비례한다고 가정하고, 최대 동작횟수에 제한이 있다고 가정하자. 그러면 그림 4에서 보듯 연간동작횟수가  $NO_{max}/L_{max}$  보다 작을 경우 이 기기는 정격수명만큼 사용할 수 있지만, 그 이상이 될 경우 최대동작횟수의 제한에 걸려 수명이 줄어들 것이다. 이를 그림으로 나타내면 그림 4와 같으며, 기기의 수명에 대하여 수식으로 나타내면 식(16)과 같다.

$$l_i(n_{o_i}) = \begin{cases} L_{max} & \left( n_{o_i} \leq \frac{NO_{max}}{L_{max}} \right) \\ \frac{NO_{max}}{n_{o_i}} & \left( n_{o_i} > \frac{NO_{max}}{L_{max}} \right) \end{cases} \quad (16)$$

여기에서

- $l_i(n_{o_i})$  :  $i$ 모선에 설치된 기기의 수명
- $L_{max}$  : 기기의 정격 수명
- $NO_{max}$  : 기기의 정격 최대 동작횟수

이렇게 각 기기에 대한 수명을 추정하면 그 기기의 설치비용을 연간계산된 비용(annualized cost)으로 환산 가능하며, 연간계산된 설치비용을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{inst} = \frac{K_i}{l_i(n_{o_i})} + \sum_i \frac{K_s \cdot cs_i}{l_i(n_{o_i})} + \sum_i \frac{K_f \cdot cf_i}{L_f} \quad (17)$$

여기에서

- $K_i$  : 탭절환기의 설치 비용
- $K_s$  : 스위칭형 커패시터의 설치비용
- $K_f$  : 고정형 커패시터의 설치비용
- $l_i$  : 탭절환기의 수명
- $l_i$  :  $i$ 모선에 설치된 커패시터의 수명
- $L_f$  : 고정형 커패시터의 수명
- $n_{o_i}$  : 탭절환기의 연간 동작횟수
- $n_{o_i}$  :  $i$ 모선에 설치된 커패시터의 연간 동작횟수

식 (17)의 각 항은 탭절환기, 스위칭형 커패시터, 고정형 커패시터의 설치비용을 나타내며, 고정형 커패시터의 경우 수명이 고정되어 있으므로 비용 또한 동작 상태와 상관없이 일정 값을 가지게 된다. 기존 방법에서는 설치비용을 고려할 때 기기들의 수명을 일정하다고 가정하였지만, 제안하는 방법에서는 이처럼 수명을 고려하여 연간계산된 설치비용으로 계산함으로써 뒤에 서술할 손실 비용과 함께 다루는 것이 가능해진다.

### 2.2.2. 손실비용 ( $C_{loss}$ )

손실에 대한 비용은 계통을 운영할 때 생기는 전력손실에 대한 전력가격으로 계산할 수 있다. 연간 전력손실은 식(1)

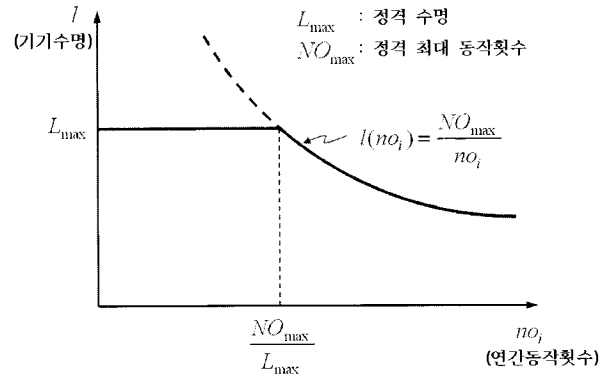


그림 4 기기의 연간동작횟수와 수명  
Fig. 4 Operation number and lifetime of device

의 각 구간에 대하여  $nc, nt$  에 따라 동작할 경우 생기는 전력손실의 합으로 구할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (18)과 같다.

$$C_{loss} = \sum_j K_c \cdot 24d_j \cdot p_j(nc,nt) \text{ [원]} \quad (18)$$

여기에서

- $K_c$  : 단위 전력가격 [원/kWh]
- $p_j(nc,nt)$  :  $nc,nt$ 에 따라 동작할 때  $j$ 번째 기간에서의 전력손실 [kW]

각 기간에서의 전력손실  $p_j(nc,nt)$ 은  $nc,nt$ 에 따른 기기들의 동작을 가정한 상태에서 조류계산(power flow)을 수행함으로써 구한다.

### 2.2.3. 최종 목적함수

지금까지 배전계통에서 커패시터 설치에 대한 계획에 있어서 고려되어야 할 비용들을 살펴보고, 결국 이 논문에서 다루는 커패시터 설치 계획에 대한 문제는 위 사항들을 고려한 목적함수  $f(nc,nt)$ 를 최소화시키는 최적화 문제라 할 수 있다.

$$f(nc,nt) = C_{inst} + C_{loss} = \frac{K_i}{l_i(n_{o_i})} + \sum_i \frac{K_s \cdot cs_i}{l_i(n_{o_i})} + \sum_i \frac{K_f \cdot cf_i}{L_f} + \left\{ \sum_j K_c \cdot 24d_j \cdot p_j(nc,nt) \right\} \quad (19)$$

### 2.2.4. 제약 조건

배전계통의 계획에 대한 위의 목적함수 식(19)에 있어, 다음의 제약조건들을 만족하여야 한다.

$$PF(V, \theta, nc_j, nt_j) = 0 \quad (20)$$

$$V_{lower} \leq V_{ij} \leq V_{upper} \quad (21)$$

$$0 \leq nc_{ij} \leq nc_{max} \quad (22)$$

$$nt_{lower} \leq nt_j \leq nt_{upper} \quad (23)$$

$$0 \leq no_{ij} \leq no_{j,upper} \quad (24)$$

여기에서

$PF(\mathbf{V}, \boldsymbol{\Theta}, \mathbf{nc}_j, nt_j)$  :  $j$ 번째 기간 동안의 조류계산식

$V_{lower}, V_{upper}$  : 각 모선에서의 허용 전압의 최소, 최대값

$V_{ij}$  :  $j$ 번째 기간 동안  $i$ 모선의 전압

$nc_{max}$  : 한 모선에 설치될 수 있는 커패시터의 최대 개수

$nt_{lower}, nt_{upper}$  : 탭절환기 동작범위의 최소, 최대값

$no_{j,upper}$  :  $i$ 기기 일일동작횟수의 최대값

### 3. 유전알고리즘을 통한 해

지금까지 정식화된 배전계통계획 문제의 해를 구함에 있어 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용한다. 유전알고리즘은 목적함수가 비선형이거나 또는 변수에 연속, 이산 변수가 섞인 경우에도 그에 상관없이 전역해(global solution)를 구할 수 있으므로 이 문제에 적당하다.

#### 3.1. 변수의 부호화

유전알고리즘을 적용하기 위하여 우선 변수를 적당한 형태로 부호화(coding)해서 염색체로 나타내어야 한다. 우리가 다루는 문제의 변수들의 특성을 살펴보면  $nc_{ij}, nt_i$ 는 각각 0에서  $nc_{max}$  사이,  $nt_{lower}$ 에서  $nt_{upper}$  사이의 정수값을 가지게 된다. 이처럼 모든 변수들이 정수인 특성을 가지므로, 본문에서는 다음에서 설명하는 바와 같이 정수유전자를 통하여 표현하는 방법을 이용하여 변수를 부호화 하였다.

유전알고리즘을 통하여 구해야 할 변수는 식(3), (4)의  $nc$ 와  $nt$ 이고, 이에 대응하는 염색체(chromosome)  $\mathbf{v}$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1D} \\ v_{21} & v_{22} & & v_{2D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{C1} & v_{C2} & \dots & v_{CD} \\ t_1 & t_2 & \dots & t_D \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$(0 \leq v_{ij} \leq v_{i,max}, t_{min} \leq t_i \leq t_{max})$$

여기에서

$v_{ij}$  : 식(3)의  $nc_{ij}$ 에 대응하는 정수유전자

$t_i$  : 식(4)의  $nt_i$ 에 대응하는 정수유전자

$C$  : 커패시터가 설치될 수 있는 모선의 총 개수

$D$  : 기간의 총 개수

$v_{i,max}$  :  $i$ 모선에 설치할 수 있는 커패시터 개수의 최대값

$t_{min}, t_{max}$  : 탭절환기 동작범위의 최소, 최대값

이렇게 염색체를 구성하게 되고, 이때 염색체의 길이(염색체에 포함된 유전자의 개수)는  $(C \times D + D)$ 가 된다.

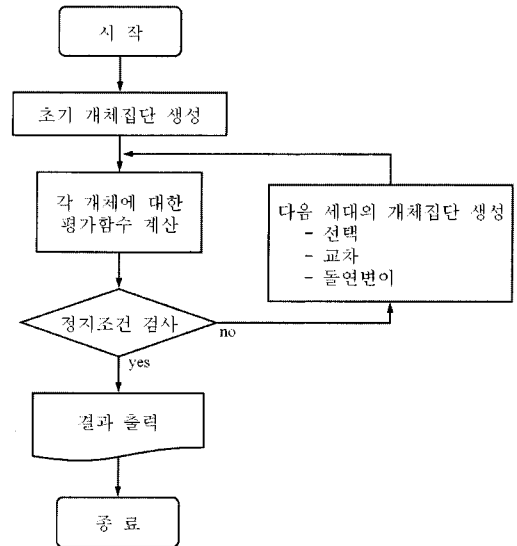


그림 5 유전알고리즘을 통하여 해를 구하는 과정

Fig. 5 Flowchart of finding solution using genetic algorithm

#### 3.2. 평가함수 및 제약조건

유전알고리즘을 적용함에 있어서 평가함수는 식(19)를 사용하며, 평가함수가 비용을 나타내므로 그 값이 작을수록 우수한 값으로 판단하게 된다. 그리고 이 문제에서 제약 조건은 위반한 제약조건 각각에 벌점  $PN$ 을 주는 방식으로 처리하도록 한다. 즉 평가함수  $eval(\mathbf{v})$ 는 식(26)과 같다.

$$eval(\mathbf{v}) = f(\mathbf{nc}, \mathbf{nt}) + PN(\mathbf{nc}, \mathbf{nt}) \quad (26)$$

#### 3.3. 초기화 및 유전 연산의 실행

위와 같이 문제를 정의한 다음 유전알고리즘을 적용한다. 먼저 랜덤하게 생성된  $pop$  개의 염색체로 이루어진 초기 해 집단(population)  $\mathbf{P}_0$ 를 형성한다.

$$\mathbf{P}_0 = [\mathbf{v}_{01}, \mathbf{v}_{02}, \dots, \mathbf{v}_{0pop}] \quad (27)$$

이렇게 생성된 각각의 염색체에 대하여 식(26)를 통하여 다음과 같이 적합도  $ev_0$ 를 구하게 된다.

$$ev_0 = [eval(\mathbf{v}_{01}), eval(\mathbf{v}_{02}), \dots, eval(\mathbf{v}_{0pop})] \quad (28)$$

구해진 적합도를 기준으로 다음 세대의 개체집단을 생성하게 된다. 일반적으로 유전알고리즘에서 다음 세대를 생성하는 방법은 다음 과정을 통하여 이루어진다. 우선 순위기반 선택을 통하여 좋은 적합도를 가진 개체를 선택하여 교차확률  $P_c$ 로 교차를 실행하였다. 그리고 돌연변이확률  $P_m$ 으로 염색체들의 각 비트(bit)에 대하여 돌연변이를 시행하였다. 이러한 과정을 거쳐 다음 세대의 개체집단을 생성하게 되고, 새로 생성된 개체집단의 염색체들 각각에 대하여 적합도를 평가하게 된다. 이 과정을 정지조건이 만족할 때까지 반복하게 되며, 전체 과정을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

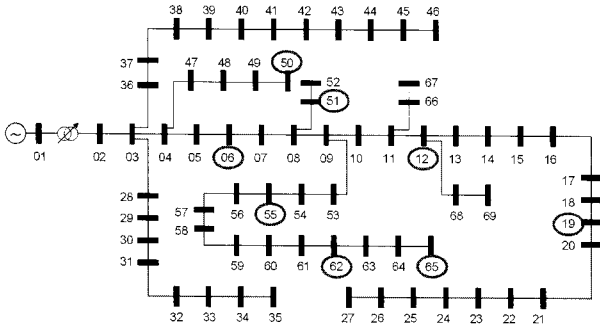


그림 6 69모선 배전계통 및 커패시터 설치 후보 모선  
 Fig. 6 Candidate buses for capacitor installation in 69-bus radial distribution system.

#### 4. 사례 연구

지금까지 기술한 기법을 실제 배전계통에 가까운 모델 계통에 적용함으로써 그 타당성과 유용성을 검토하고자 한다. 대상계통으로는 대상 계통으로는 [6,15]에서 소개된 69모선 배전계통을 사용하였는데, 방사상 형태를 가지고 있다. 송전계통은 무한모선(infinite bus)으로 모델링하였고, 탭절환기가 설치된 변압기로 송전계통과 연결되어 있으며, 계통의 전압제어를 위하여 커패시터를 적용하였다. 주어진 부하예측 데이터가 있을 때, 제한한 계획기법을 적용하여 커패시터를 어느 모선에 얼마만큼 설치할 것인지 결정하였다.

##### 4.1. 대상계통

그림 6은 변전소에 연결된 배전계통을 나타내고 있고, 모선 1과 2는 각각 변전소 강압변압기의 1차측과 2차측의 모선을 나타내며, 변압기에는 탭절환기가 설치되어 부하측 전압을 제어한다고 가정하였다. 무한모선은 송전계통을 나타낸다.

표 1에 나타난 바와 같이 커패시터의 기본 단위용량은 300 kVAr로 하였으며, 가격은 캐나다 Alberta 송전회사에서 작성한 무효전력 서비스에 대한 보고서[21]를 참조하여 결정하였다. 탭절환기의 가격은 구체적인 자료를 구하기가 어려웠지만 커패시터에 비해 비싸다는 점을 고려하여 결정하였다. 기기의 정격수명 및 정격최대동작횟수는 표 2에 정리하였다. 69모선 배전계통에서 사용되는 탭절환기의 규격은 [22]에서 제시되어 있는 일반적인 배전용 변전소에서 사용되는 탭절환기의 규격을 참조하여, -5%에서 +5% 범위에서 21단계 (-10~+10)를 가지고 동작한다고 가정하였다.

##### 4.2. 전압제어기기 설치계획의 수립

앞 절에서 기술된 69모선 모델계통에 대하여 제안한 방법으로 커패시터 설치계획을 수립하였다. 부하예측 데이터는 표 3에서와 같이 주어졌다고 가정하였다. 표에서 주어진 부하량은 계통데이터에서 주어진 침두 부하치의 몇 배인가를 나타낸다.

이와 같은 계통과 부하 데이터를 가지고 우선 커패시터를 설치할 수 있는 후보 모선을 결정하였다. 2.1절에서 설명한

표 1 커패시터와 탭절환기의 가격

Table 1 Prices of capacitors and ULTC

	고정형	스위칭형
단위용량 [kVAr]	300	300
가격 [원]	10,000,000	15,000,000
용량 당 가격 [원/kVAr]	33,333	50,000
탭절환기의 가격 [원]	60,000,000	

표 2 커패시터와 탭절환기의 정역수명 및 정격최대동작횟수

Table 2 Lifetimes and the maximum operation numbers of capacitors and ULTC

	커패시터	탭절환기
정역수명 [년]	20	30
정격최대동작횟수 [회]	10,000	50,000
정격연간최대동작횟수 [회/년]	500	1,667

표 3 모의에 사용된 부하예측 데이터

Table 3 Load forecast data in simulations

	고부하		중부하		저부하	
	부하량	기간	부하량	기간	부하량	기간
여름	1.40	0.0625	1.00	0.1000	0.80	0.0875
겨울	1.15	0.1000	0.95	0.1000	0.70	0.0500
봄/가을	0.90	0.1500	0.75	0.2500	0.40	0.1000

방법에 따라 무효전력의 투입을 통하여 유효전력 손실을 많이 줄일 수 있는 모선을 우선으로 결정하였으며 그 결과는 그림 6에 나타내었다.

이상의 데이터를 정리하면 부하예측 데이터는 총 9개의 구간으로 구분했고, 커패시터 설치 후보 모선은 8개이며, 따라서 식(3), (4)의 변수 벡터  $nc, nt$  각각의 크기는  $(8 \times 9)$ ,  $(1 \times 9)$  이다. 그리고 이에 대응하는 식(25)의 염색체  $v$ 는 81개의 정수로 이루어지게 된다.

모의에서는 기존 방법과 제안한 방법을 비교하였다. 두 가지 방법의 차이는 목적함수 식(19)에서 탭절환기의 수명  $t_i$ 와  $i$ 모선에 설치된 커패시터의 수명  $t_c$ 를 어떻게 보느냐이다. 기존의 방법은 이를 일정한 상수값으로 보는 것이고, 제안하는 방법에서는 각 기기의 동작횟수를 고려한 값으로 계산하게 된다.

각 방법에 따른 목적함수에 대하여 유전알고리즘을 적용하여 구한 해의 결과를 표 4와 5에 정리하였는데, 표 4는 기존의 방법을 적용한 결과이고 표 5는 제안한 방법을 적용했을 때의 결과이다.

설치비용을 계산함에 있어서는 탭절환기와 커패시터의 수명이 식(16)에 의해서 결정된다고 보았고, 이렇게 수명이 결정된 상태에서 설치비용을 수명으로 나눈 연간계산된 설치비용을 고려하였다. 마찬가지로 유효전력손실에 대한 비용도 1년 동안의 전력손실량을 구한 다음 그에 대한 전력비용을 계산하였다. 이렇게 계산된 각 기기의 수명과 연간계산된 설치비용, 그리고 전력손실에 대한 비용의 자세한 데이터를 표 6에 정리하였다.

두 가지 경우에 대한 결과를 살펴보면 가장 큰 차이점으로서 탭절환기의 동작과 그에 따르는 커패시터의 동작이다.

표 4 기존 방법에 의해 결정된 설치 계획

Table 4 Reactive power planning by the conventional method

일정	커패시터	6	4	4	1	4	2	1	4	2	3
		12	1	1	1	1	1	1	0	0	0
		19	1	0	0	0	0	0	0	1	0
		50	1	1	1	1	0	1	1	1	0
		51	2	1	0	1	2	0	0	0	0
		55	1	0	0	1	1	1	1	0	0
		62	4	2	1	2	0	2	0	1	1
		65	3	1	1	1	2	0	2	1	0
	탭절환기	4	4	6	5	5	4	5	4	1	
설치개수	커패시터	고정형					스위칭형				
		6	1	3							
		12	0	1							
		19	0	1							
		50	0	1							
		51	0	2							
		55	0	1							
		62	0	4							
65	0	3									
비용 [천원/년]	설치비용	17,138									
	손실비용	51,932									
	전체비용	69,070									

표 5 제안한 방법에 의해 결정된 설치 계획

Table 5 Reactive power planning by the proposed method

일정	커패시터	6	4	4	0	4	3	2	3	4	3
		12	1	1	0	1	1	1	1	1	0
		19	1	0	1	0	0	0	0	0	0
		50	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		51	2	1	0	1	1	0	0	0	0
		55	1	0	0	1	1	1	1	0	0
		62	4	2	1	2	2	2	0	1	1
		65	3	1	1	1	0	0	2	1	0
	탭절환기	4	4	5	5	5	4	5	5	4	
설치개수	커패시터	고정형					스위칭형				
		6	1	3							
		12	0	1							
		19	0	1							
		50	0	1							
		51	0	2							
		55	0	1							
		62	0	4							
65	0	3									
비용 [천원/년]	설치비용	17,138									
	손실비용	51,932									
	전체비용	69,070									

기존 방법에서는 동작횟수가 많아져도 그것에 의해 발생하는 영향을 고려하지 않으므로 전력손실이 줄어드는 방향으로만 해가 구해진다. 이 모의에서 기존 방법과 제안한 방법에 의해 결정된 커패시터의 설치 개수를 보면 전체적인 설치 개수는 동일하나 두 모선(6번과 50번 모선)에서의 커패시터의 설치 개수가 차이가 남을 알 수 있다. 연간 비용의 차이를 살펴보면 연간 221 만 원가량 차이가 나게 되는데 이는 연간계산된 설치비용의 약 15 %가 절감된 결과이다.

스위칭 커패시터의 평균수명은 기존 방법에서 17.66년, 제안한 방법에서 19.78년으로, 제안한 방법에서 전체적으로 수명이 길어졌으며 그에 따라 비용도 감소되었다. 탭절환기의 경우 제안한 방법을 통하여 수명이 23년에서 30년으로 7년 정도 늘어났으며, 결과적으로 연간계산된 비용을 감소시킬 수 있었다. 이처럼 기존 방법에서는 고려할 수 없는 탭절환

표 6 상세 연간 비용

Table 6 Detailed data of annualized cost

수명 [년]	커패시터	6	14.94	20.00
		12	20.00	18.26
		19	10.96	20.00
		50	13.70	20.00
		51	20.00	20.00
		55	18.26	18.26
		62	20.00	20.00
		65	18.26	20.00
		평균	17.66	19.78
		탭절환기	22.83	30.00
		설치비용 [천원/년]	커패시터	14,510
	탭절환기	2,628	2,000	
	합계	17,138	14,643	
손실비용 [천원/년]				
커패시터가 없을 경우		78,892	51,932	
총비용 [천원/년]		69,070	66,862	

기의 동작에 의한 비용까지 고려하여, 실질적으로 최소의 비용으로 설치 운용할 수 있는 계획의 수립이 가능하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통에서 전압제어를 위하여 설치된 기기인 탭절환기와 커패시터의 설치계획에 대하여 다루었다. 이러한 전압제어기기들은 어떻게 설치, 운용하느냐에 따라 전압제어뿐만 아니라 전력의 손실의 감소를 통한 비용의 절감이 가능하다.

제안한 커패시터 설치계획 기법은 최적화 문제를 구성함에 있어서 각 기기의 수명에 의한 비용 변화를 고려한 것이 특징이다. 배전계통에 설치된 각 커패시터와 탭절환기가 연간 몇 번 동작하게 되는지 추정하고, 이를 통해 각 기기의 수명을 계산한다. 그리고 각 기기의 수명이 고려된 설치비용과 전력손실에 의한 비용의 합이 최소가 되는 설치계획을 구하게 된다.

이렇게 제안한 계획 기법을 69모선 배전계통에 적용하여 기존 기법을 적용했을 때와 비교했을 때의 개선점을 보였는데, 그 결과 종합적인 비용이 줄어들음을 확인하였다.

제안한 기법에서는 동작이 기기의 수명에 미치는 영향을 고려함으로써 좀 더 실제적으로 기기의 설치비용을 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 탭절환기의 수명을 추정함으로써 탭절환기의 설치비용도 함께 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한 동작횟수와 비용의 관계를 정량화하는 방법을 제시하였는데 다양한 경우에 응용 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. V. ScMill, "Optimal size and location of shunt capacitors on distribution feeders," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. 84, pp. 825-832, 1968.
- [2] Y. G. Bae, "Analytical method of capacitor allocation on distribution primary feeders," IEEE Trans. Power Appar. Syst. vol. 97, pp. 1232-1238, 1978.
- [3] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement in distribution systems," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 2, pp. 735-743, 1989.
- [4] J. L. Bala, P. A. Kuntz, and M. J. Pebbles, "Optimal placement, capacitors allocation using distribution analyzer-recorder," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 1, pp. 464-469, 1997.
- [5] S. Sundarajan and A. Pahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 3, pp. 1499-1507, 1994.
- [6] B. Das, "Reactive power compensation for radial distribution networks using genetic algorithm," Electr. Power Energy Syst., vol. 24, pp. 573-581, 2002.
- [7] T Ching, G.R. Lii, and C.C. Tsai, "Optimal capacitor allocation using fuzzy reasoning and genetic algorithms for distribution systems," J. Math. Comput. Modeling, vol. 33, pp. 745-757, 2001.
- [8] H.N. Ng, M.M.A. Salama, and A.Y. Chikhani, "Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 1, pp. 393-398, 2000.
- [9] K. Y. Lee, "Optimal reactive power planning using evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm and linear programming," IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, no. 1, pp. 101-108, 1998.
- [10] L.L. Lai and J.T. Ma, "Application to evolutionary programming to reactive power planning - comparison with non-linear programming approach," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 198-205, 1997.
- [11] L.L. Lai, J.T. Ma, and M. Zhao, "Improved genetic algorithm for optimal power flow under normal and contingent operation states," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 19, no. 5, pp. 287-292, 1997.
- [12] B. A. Souza, H. N. Alves, and H. A. Ferreira, "Microgenetic algorithms and fuzzy logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, May 2004.
- [13] J.R.S. Mantovani, S.A.G. Modesto, and A.V. Garcia, "VAr planning using genetic algorithm and linear programming," IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 148, no. 3, May 2001.
- [14] Y. Hsiao, H. Chiang, C. Liu, and Y. Chen, "A computer package for optimal multi-objective VAr planning in large scale power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 1, pp. 101-108, 1998.
- [15] B. Venkatesh and R. Ranjan, "Fuzzy EP algorithm and dynamic data structure for optimal capacitor allocation in radial distribution systems," IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 153, no. 1, pp. 80-88, Jan. 2006.
- [16] Y. C. Huang, H. T. Yan, and C. L. Huang, "Solving the capacitor placement problem in a radial distribution systems using Tabu search approach," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 4, pp. 1868-1873, 1996.
- [17] H. Duran, "Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution: A dynamic programming approach," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol.87, pp. 1769-1774, Sept. 1968.
- [18] T. H. Fawzi, S. M. El-Sobki, and M. A. Abdel-Halim, "New approach for the application of shunt Capacitors to the primary distribution feeders," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. 102, pp. 10-13, Jan. 1983.
- [19] R. Baldick and F.F. Wu, "Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitors and regulators," IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, pp. 805-812, Aug. 1990.
- [20] B. Das and S.P. Vellupula, "Optimal capacitor switching in a distribution systems using functional link networks," Electr. Power Compon. Syst., vol. 30, pp. 833-847, 2002.
- [21] F. Alvarado, B. Borissov, L. D. Kirsch, and L. R. Christensen, Reactive Power as an Identifiable Ancillary Service, Transmission Administrator of Alberta, Ltd., 2003.
- [22] C. W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.

## 저 자 소 개



## 박종영 (朴鍾泳)

1976년 8월 16일생. 1999년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기 컴퓨터공학부 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전력연구단 재직.

Tel : 055-280-1317

Fax : 055-280-1390

E-mail : jypark@keri.re.kr



## 박종근 (朴鍾根)

1973년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울대학교 전기공학부 교수.

Tel : 02-880-7258

E-mail : parkjk@snu.ac.kr