

적응 유전알고리즘을 이용한 배전계통 계획의 급전선 최적경로 선정

論 文

50A-2-2

An Adaptive Genetic Algorithm Based Optimal Feeder Routing for Distribution System Planning

金炳燮* · 金敏洙** · 愼重麟***

(Byung-Seop Kim · Min-Soo Kim · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper presents an application of a newly designed Adaptive Genetic Algorithm (AGA) to solve the Optimal Feeder Routing (OFR) problem for distribution system planning. The main objective of the OFR problem usually is to minimize the total cost that is the sum of investment costs and system operation costs. We propose a properly designed AGA, in this paper, which can handle the horizon-year expansion planning problem of power distribution network in which the location of substation candidates, the location and amount of forecasted demands are given. In the proposed AGA, we applied adaptive operators using specially designed adaptive probabilities. we also applied a Simplified Load Flow (SLF) technique for radial networks to improve a searching efficiency of AGA. The proposed algorithm has been evaluated with the practical 32, 69 bus test system to show favorable performance. It is also shown that the proposed method for the OFR can also be used for the network reconfiguration problem in distribution system.

Key Words : Distribution System Planning, Opimal Feeder Routing, Adaptive Genetic Algorithm

1. 서 론

오늘날의 전력계통은 지속적인 전력수요의 증가에 따라 점차 대규모화 되고있다. 발전과 송전, 배전을 포함하는 전력 계통에서 배전 계통은 수요자와 가장 근접한 분야로서 계통운영의 안정성과 경제적 중요성이 매우 높아지고 있다. 최적 배전계통 계획(Optimal Distribution System Planning)은 배전 계통의 경제성 확보의 중요한 관건이며, 이를 위해서는 전압 강하 및 전력 손실 등을 고려한 급전선의 최적경로선정(Optimal Feeder Routing: OFR)문제가 우선적으로 고려되어야 한다.

OFR문제는 전체 투자비용(investment cost)과 계통운영 비용(operational cost)을 최소화하기 위한 목적함수와 이에 따르는 제약조건으로 정식화할 수 있다. OFR의 목적함수는 변전소의 최적 위치 및 크기(변압기 용량)와 급전선의 최적 위치 및 크기(배전 용량)를 포함하고 이를 위한 제약 조건으로는 키르히호프의 전류 및 전압 법칙, 배전 계통의 방사상 구성, 급전선과 변전소의 전력 용량과 공급 한계 등이 있다. 이러한 OFR문제는 혼합 정수 모델로서 투자비용과 관련된 이진 변수와 계통운영비용과 관련된 연속 변수로 구성된다. 기존의 OFR문제를 해결하기 위한 최적화 방법으로는

분기한정법(Branch & Bound: B&B)이나 동적 계획법(Dynamic Programming: D.P.)등이 적용되었다. B&B은 OFR문제와 같은 전형적인 MIP(mixed integer programming)최적화 문제에 적용할 수 있으나, 복잡한 비선형 함수의 선형화 과정과 미분가능을 위한 연속성 등을 전제로 하므로 대규모 시스템의 경우 응용에 어려움이 따른다. D.P.는 마르코프 과정(Markov process)을 통하여 전체 최적화를 진행하는 상태변이 알고리즘이기 때문에 가변비용 요소를 고려해야 하는 OFR의 적용에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 이러한 문제의 해결수단으로 최근에 확률탐색 기반의 인공지능 기법의 적용방안이 연구되고 있다.

Satish Jonnavithula, Roy Billinton,[2]는 최소비용의 급전선 경로선정 문제에 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)기법을 적용하였으며, Miguez와 Diax-Dorado[3] 등은 배전계통 계획문제에 진화전략(evolution strategy)기법을 적용하였다. 또한 Ramirez-Rosado와 Bernal-Agustin[4]은 배전 계통의 최적 설계를 위해서 유전알고리즘(Genetic Algorithm: GA)을 적용하였다. 그들은 혼합정수 계획문제를 해결하기 위해서 효과적인 유전 알고리즘을 제시하였다. 또한 Vladimiro Miranda[5] 등은 단단계 배전계통 계획문제에서 GA를 적용하였다.

본 논문에서는 OFR문제의 전역해 탐색성능을 개선하기 위하여 새로운 AGA(adaptive GA)알고리즘의 적용을 시도하였다. 제안된 AGA에서는 수렴성능의 개선과 지역 최적점의 조기수렴 문제를 해결하기 위하여, 적응연산자 확률 계수를 기반으로 하는, 적응 교배·돌연변이·역치 연산자 등을

* 正 會 員 : 建 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 準 會 員 : 建 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

*** 正 會 員 : 建 國 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2000年 7月 25日

最 終 完 了 : 2001年 2月 9日

적용하였다. 또한 전통적인 OFR문제의 투자비용과 계통운용비용을 함께 고려하기 위하여 AGA에 적합한 새로운 목적함수를 제안하였으며, 전체비용의 효과적인 최적화 진행을 위하여 투자비용 및 운용비용의 개별 최적화 알고리즘을 수행하고, 그 기준 값에 대한 상대적 가중평균을 최소화하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 대규모 계통에서 GA의 탐색 효율을 증진하기 위한 방법으로 근사 조류계산(Simplified Load Flow: SLF)기법[6]을 적용하였다. 제안한 알고리즘은 비교적 대규모 계통인 32모선과 69모선 예제모델 계통에 적용하여, 다각도로 최적결과를 도출하였으며, 제안된 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

2. 조류계산과 손실방정식

OFR문제의 조류계산 알고리즘은 대상문제의 빈번한 계통구성의 변경에도 효과적으로 적용할 수 있어야 하며, 반복 계산에 의하여 최적해를 도출하기 때문에 알고리즘의 전체 계산 효율을 좌우하게 된다. 본 논문에서는 이러한 특성을 고려하여, 계산시간이 단축되며, 비교적 우수한 계산결과를 얻을 수 있는 Distflow 조류계산과 SLF[6, 7] 알고리즘을 이용하였다. SLF는 유전연산자의 탐색과정에서 발생하는 빈번한 계통 변경과정의 전체 계산시간을 단축하며, 간략화 되어진 계통의 전력조류 흐름을 파악하기 위하여 사용하였다. 본 논문에서는 Distflow 조류계산에 관하여 간략하게 설명한다.

조류계산의 형태를 설명하기 위하여 다음과 같은 지선(lateral)을 포함한 배전계통을 나타낼 수 있다.

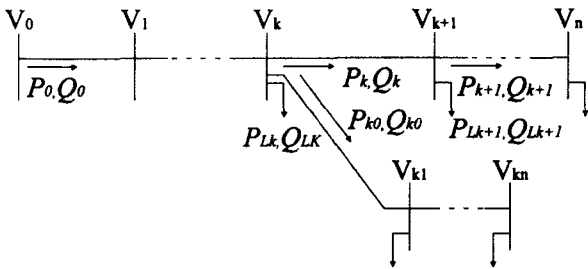


그림 1 지선이 있는 배전계통

Fig. 1 Diagram of a radial network with laterals

그림에서 분기점을 분기노드 k , 분기되어 나오는 지선을 지선 k 라고 한다면, 새로운 지선 k 를 하나의 간선으로 취급하여, 종단노드에서의 조건식을 이용하여 조류계산 방정식은 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_k &= \widehat{P}_k(X_{k-1}) - P_{k0} \\ Q_k &= \widehat{Q}_k(X_{k-1}) - Q_{k0} \\ V_k &= \widehat{V}_k(X_{k-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\widehat{P}_k(X_{k-1})$, $\widehat{Q}_k(X_{k-1})$, $\widehat{V}_k(X_{k-1})$ 은 각각 k 노드로 유입되는 유·무효 전력조류량과 전압의 추정값을 의

미한다. P_{k0} , Q_{k0} 는 지선 k 로 흘러 나가는 전력조류를 나타내며, $X_i = [P_i, Q_i, V_i^2]^T$ 이고, V_i 는 i 노드의 전압 크기를 나타낸다. 본 논문에서 고려된 계통손실은 저항에 의해 발생하는 유효전력손실을 고려하였으며 계통의 상태값이 결정되면 다음과 같은 손실방정식으로 전체선로의 유효전력손실을 계산할 수 있다.

$$P_{loss} = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \{ (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \} \quad (2)$$

3. OFR 문제의 정식화

본 논문에서는 배전계획을 위한 급전선의 최적경로선정 문제를 고려함에 있어서 단일단계 모델(single-period model)의 시스템 급전선 모델(system feeders model)[8]에 국한하여 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 시스템 급전선 모델의 목적함수는 부하의 수요예측지점과 공급변전소 계통이 구성된 상태에서 최소의 비용으로 부하수요량을 충족시키기 위하여 변전소와 부하예측지점을 연계하는 최적의 급전선 경로를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 급전선의 최적경로 선정문제를 취급하기 위하여, 급전선 신설비용인 투자비용(Investment Cost: IVC)과 전력손실에 의한 계통운전비용(System Operation Cost: SOC)을 종합적으로 고려하였으며, OFR문제의 목적함수는 SOC와 IVC를 고려한 전체 비용 최소화 형태로 정식화하였다.

3.1 OFR 문제의 목적함수

$$\min f_{cost}(Y, U) = \alpha \cdot SOC(Y) + \beta \cdot IVC(U) \quad (3)$$

여기서,

$Y = [P, Q, V]^T$: 계통운전비용에 관한 변수벡터

P, Q : 계통의 유효전력 및 무효전력 벡터

V : 계통의 모선전압 벡터

U : 급전선 신설 투자비용에 관한 변수벡터

$SOC(\cdot)$: 계통운전비용에 따른 유효전력 손실비용

$IVC(\cdot)$: 급전선 신설에 따른 투자비용

α, β : $SOC(\cdot)$, $IVC(\cdot)$ 에 대한 활성화 계수

3.2 OFR 문제의 등호 제약조건

OFR 문제를 위한 등호제약조건은 먼저 전력수급에 관한 기본조건으로서 조류계산의 전력평형방정식을 고려하였다. 아울러 배전계통의 방사상(radiality)구성의 운전제약조건과 모든 수요부하에 전력공급을 만족하여야 하는 제약조건등을 설정하였다. 이를 위하여 다음 세 가지 형태의 제약조건을 고려하였다; i) 방사상 제약조건(h_{RAD}): 배전계통의 방사상 구성을 보장하는 제약조건, ii) 고립노드 제약조건(h_{SN}): 계통의 모든 부하노드가 전력공급의 경로를 보장받는 제약조건, iii) 환상망 구성 제약조건(h_{LCN}): 전체계통과 분리되어

지역적으로 루프(loop)를 구성하는 경우의 제약조건 등을 나타낸다.

- 전력 수급 및 K.C.L 제약조건을 위한 전력평형방정식

$$\begin{aligned} P_k &= \widehat{P}_k(X_{k-1}) - P_{k0} \\ Q_k &= \widehat{Q}_k(X_{k-1}) - Q_{k0} \\ V_k &= \widehat{V}_k(X_{k-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

- 방사상(radiality) 계통구성에 관한 제약조건

$$h_{RAD} = NOD - 1/2 \sum_{i=1}^{TN} CN_i \quad (5)$$

- 단일 고립노드(Single Isolated Node) 제약조건

$$h_{SIN} = \sum_{i=1}^{TN} \{1 - (CN_i)^k\} \quad (6)$$

- 환상망 구성(Loop Constructed Node)의 제약조건

$$h_{LCN} = \sum_i^{TN} \sum_{\substack{j \neq i \\ p = path(i,j)}}^{TN} V_{ij} V_{ip} \quad (7)$$

여기서,

$CN_i = \sum_{j=1}^{TN} V_{ij}$: 노드 i 에 연결된 선로의 개수

V_{ij} : 급전선 (i, j) 의 결정변수(건설: 1, 비건설: 0)

TN : (변전소 노드 + 부하노드)의 전체 노드 개수

NOD : 부하노드의 개수

$(CN_i)^k$: $k=0$ 이고, 이진 값(0 또는 1)을 표현

그리고, $path(i, j)$ 는 노드 i 와 노드 j 가 직접 연결되어 있는 경우, i 노드와 j 노드에 모두 연결상태를 갖는 임의의 노드를 나타내는 함수를 의미한다.

3.3 OFR 문제의 부등호 제약조건

$$\begin{aligned} 0 \leq X_{ij} &\leq U_F^{\max} \\ 0 \leq SUB_i &\leq U_S^{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

X_{ij} : 노드 (i, j) 에 흐르는 전력 조류

SUB_i : i 노드에 공급되는 변전소의 전력 조류

U_F^{\max} : 급전선의 전력 용량 한계

U_S^{\max} : 변전소의 공급 용량 한계

4. 유전 알고리즘

유전 알고리즘(GA)은 자연선택과 자연유전학의 원리에

근거한 최적해 탐색알고리즘으로 기계설계, 시스템의 상태추정, 퍼지 제어기 설계, 패턴인식 등의 다양한 분야에서 성공적으로 사용되고 있다. GA는 최적화문제의 목적함수로부터 적합도(fitness)를 계산하고, 적합도 값에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하며, 종래의 임의 탐색알고리즘에 비하여 해 공간을 효율적으로 탐색한다. 또한 목적함수만을 탐색정보로 이용하며, 기타 도함수 정보를 필요로 하지 않기 때문에, 자연계의 복잡한 비선형함수나 다변수 최적화문제에 적용하기가 용이하다.

4.1 OFR문제를 위한 변수의 코딩 전략

본 논문에서는 배전계통의 신설 급전선의 정보를 용이하게 표현하기 위하여 염색체의 구성에 이진 표현 방법을 사용하였다. 즉, $V=(1100101001)$ 과 같은 염색체의 표현은 급전선의 신설 가능한 경로(right of way) 10개중에서 1번, 2번, 5번, 7번, 10번 경로에 급전선이 건설되는 배전계통을 표현하도록 하였다.

4.2 전통적인 유전 알고리즘

전통적인 유전알고리즘(Conventional GA: CGA)의 개체 집단은 길이 l 의 2진 스트링 b_i 의 n 개의 요소로 구성되어 있고, 여기서 각 스트링(염색체)의 비트는 개별 염색체의 유전인자로 고려되며, n 개의 개별 염색체 전체를 개체집단이라고 정의한다. 다변수 최적화 문제에서, 개별 변수의 코딩은 보통 스트링의 형태로 전환되며, 개별 스트링은 대상문제의 변수들을 표현하게 된다. 일반적으로 GA 연산자(operator)는 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등의 주요 연산자로 구성되며, 특히, CGA에서는 교배 및 돌연변이의 수행확률을 결정하기 위하여 교배 확률(p_c)과 돌연변이 확률(p_m)을 세대 초반에 지정하여 알고리즘을 수행한다. 대부분의 GA 문헌에서는 p_c , p_m 의 설정값을 알고리즘의 탐색성능을 좌우하는 중요인자로 간주하며, 수렴속도와 전역탐색능력에 지대한 영향을 주게된다[9]. 그림 2는 기본적인 염색체 진화과정을 간략히 나타낸 것이다.

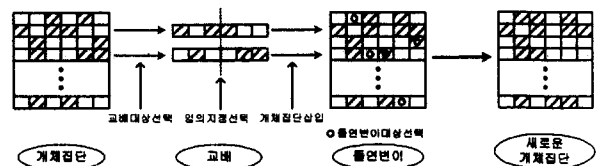


그림 2 전통적인 유전 연산자의 수행과정
Fig. 2 Process of a CGA's operators

4.3 적응 유전 알고리즘

본 논문에서는 GA의 전역탐색 능력을 유지하면서 수렴성을 향상시키기 위해서 적용하는 교배, 돌연변이 및 역치

확률을 적용한 적응 유전알고리즘(Adaptive GA : AGA)기법을 사용하였다. 기존 GA에서 과중한 교배율은 전역탐색의 수렴속도를 지연시키며 염색체의 과도한 붕괴를 유발하는 반면, 교배율이 증가함에 따라서 해집단의 다양성을 보장할 수 있었다. 돌연변이는 유전자 정보를 복구, 변환하는 연산자로서 GA에 수행에 중요한 역할을 담당한다. 과중한 돌연변이율은 GA를 순수한 임의 탐색 알고리즘으로 변환할 수 있는 반면, 최적해에 대한 GA의 조기 수렴을 방지하기 위해서는 약간의 돌연변이를 필요로 한다. 이처럼 GA연산자를 위한 교배율과 돌연변이율의 최적 제어는 기존 GA의 수렴 특성을 좌우하는 가장 중요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 교배율과 돌연변이율의 최적 제어를 위하여, GA의 수렴상태를 기반으로 하는 적응 전략을 도입하였으며, OFR문제의 특성상 허용 가능한 급전선의 신설 개수를 만족시키는 연산자로서 역치 연산자를 사용하여, 보다 효과적인 탐색을 가능하도록 하였다.

AGA를 위해 제안된 연산자들의 핵심적인 생각은 각 해들의 우수한 정도를 나타내는 적합도를 기반으로 교배와 돌연변이, 역치 확률을 적용시키고자 하는 것이다. 이것은 기존의 CGA에서 모든 스트링에 동일한 돌연변이 확률과 교배 확률을 적용하는 방법에 비하여 GA의 수렴상태에 따라 적용성을 부여함을 의미한다.

GA의 수렴상태를 측정하는 척도로서 개체 집단의 최대 적합도와 평균 적합도 사이의 적합도 차이(Fitness Mismatch: FM)를 사용한다. 일반적으로 FM는 GA의 수렴에 따라서 점점 더 작아지는 경향이 있다는 것이 관찰된다. 따라서, 각 연산자들의 수행 확률에 FM의 정보를 기반으로 하는 적용성을 부여할 수 있으며, 특히 적응 역치 연산자와 적합도 거리연산자 등을 포함하여 적합도에 따른 진화수준을 다양하게 변화시키도록 하였다. 제안된 적응 전략은 GA 수렴과정에서 조기수렴 문제와 수렴속도 문제를 향상시킬 수 있다.

4.3.1 적응 교배 연산자(ACO)

GA가 국부해에 수렴할 때 각 연산자들의 교배 및 돌연변이 확률을 증가시켜 새로운 탐색공간으로의 탐색을 진행시켜야 한다. 이를 위해서 FM의 크기에 역 비례하여 스트링의 적용확률을 변화시키도록 하였다. 또한 현재 세대의 우수한 해는 보존할 필요가 있기 때문에 우수한 해에 대해서는 각 연산자의 교배 확률을 낮게 하여 분열될 확률을 낮추고 반대의 경우에는 각 연산자의 확률을 높여서 분열될 확률을 높이도록 하였다.

적응 교배 연산자(Adaptive Crossover Operator: ACO)는 우선 모든 개체들이 교배될 가능성이 있다는 생각에서 시작하였기 때문에, 적응 교배를 수행하기 전에 모든 개체들에 대한 선택(selection)이 먼저 수행되며 선택은 임의의 두 개의 개체에 대해서 동시에 발생한다. 그리고, 선택된 개체 쌍에 부여하는 임시 적합도(f_s)는 다음과 같이 정의하였다.

$$f_s = \begin{cases} f^i & \text{if, } f^i \geq f^j \\ f^j & \text{if, } f^i < f^j \end{cases} \quad (9)$$

여기서, f^i 과 f^j 는 각각 염색체 i 와 j 의 적합도를 나타낸다.

따라서, 평균 이하의 적합도를 갖는 해들을 분열시키며, 우수한 해를 보존하기 위하여 각 개체에 부여하는 적응 교배율은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있으며, 새로운 교배 대상을 위하여 각 교배쌍에 동일하게 부여되는 새로운 교배 확률(p_c^i)는 다음처럼 계산된다. 다음 식에서, f_{max} 와 f_{ave} 는 각각 현재 세대의 최대 적합도와 평균 적합도를 나타내며, 교배상수 k_1 , k_2 는 교배율을 [0,1]의 범위로 제약하기 위하여 사용된 비율계수를 나타낸다.

$$p_c^i = \begin{cases} k_1(f_{max} - f_s^i) / f_{DIST} & \text{if, } f_s^i \geq f_{ave} \\ k_2 & \text{if, } f_s^i < f_{ave} \end{cases} \quad (10)$$

여기서, f_{DIST} 는 $f_{max} - f_{ave}$ 를 나타낸다.

4.3.2 적응 돌연변이 연산자(AMO)

GA가 수렴함에 따라서 개체집단의 염색체들 사이의 적합도 거리(Fitness Distance: FD)는 점점 더 작아질 것이다. 이를 표현하기 위하여 임의의 i 번째 염색체와 다른 염색체들 사이의 적합도 거리를 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$FD(f^i) = \sum_{j=1}^n |f^i - f^j|, \quad (\text{단, } i \neq j) \quad (11)$$

따라서, 정규화된 임의의 i 염색체의 표준 적합도 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{FD}(f^i) = \frac{FD(f^i)}{(n-1) \max |f^i - f^j|} \quad (12)$$

여기서,

$$\max |f^i - f^j| : i\text{-번째 염색체와의 최대의 적합도 거리}$$

표준 적합도 거리는 정규화 과정을 통하여 [0,1]범위로 제한되며, 이 값이 클 때, 해당 염색체는 개체집단으로부터 크게 벗어난 것을 의미하며, 높은 돌연변이 확률을 부여하도록 하였다. 따라서 적응 돌연변이 연산자(Adaptive Mutation Operator: AMO)는 각 개체의 FD와 적합도 값에 따라서 적응 돌연변이 확률(p_m^i)을 다음과 같이 계산한다. 다음 식에서, 돌연변이 상수 k_3^{old} , k_4^{old} 는 돌연변이 확률을 [0,1]의 범위로 제약하기 위하여 사용된 비율계수를 나타낸다. k_3^{new} 는 적용성을 갖는 계수이며, 반복수렴의 해가 일정한 값으로 고착되는 세대의 회수를 기반으로, 선택된 돌연변이 대상의 유전인자의 돌연변이 확률을 증가시키며, 지역적 미세 탐색능력을 향상시키도록 설정하였다. 특히 강한(hard)제약조건으로 동일한 개수의 최상해가 다수 발생하는 경우를 제약하기 위하여 $f^i = f_{max}$ 인 염색체에 대해서는 발생된 최상해의

개수에 따라 적응적으로 확률을 부여하도록 하였으며, GA의 조기수렴을 방지하는 역할을 수행한다.

$$p_m^i = \begin{cases} k_3^{new}(f_{max} - f^i) \overline{FD}(f^i) / f_{DIST} & \text{if, } (f^i \neq f_{max}) \geq f_{ave} \\ k_3^{new} N_{max} / pop_size & \text{if, } f^i = f_{max} \\ k_4^{new} & \text{if, } f^i < f_{ave} \end{cases} \quad (13)$$

여기서,

$$k_i^{new} = k_i^{old} [1 + (N_{sgn} / CON)], \quad (\text{단, } i=3,4)$$

N_{sgn} : 최적값이 고착되는 세대의 회수

CON : 알고리즘 종료를 위해 설정된 수렴제한 회수

N_{max} : f_{max} 값을 갖는 염색체의 개수

pop_size : 개체집단의 크기

4.3.3 적응 역치 연산자(AIO)

교배와 돌연변이가 주된 탐색을 수행하는 연산자이며, 추가적으로 적응 역치 연산자(Adaptive Inversion Operator: AIO)를 도입하였다. AIO는 단일 염색체내에서 유전인자의 변환을 통하여 새로운 염색체를 생성하는 단항(unary)연산자이다. AIO는 ACO 및 AMO와 병행하여 개체집단의 다양성에 기여할 수 있다. 본 논문에서는 역치 연산에 적응성을 부여하기 위하여 적응 역치 확률(p_{inv}^i : 역치되는 유전인자의 개수)을 해당 개체의 적합도 비율에 의해 선정하도록 하였다. 다음처럼 계산되는 역치 비율에 의해 적합도가 낮은 개체는 부분적인 정보교환을 하고, 적합도가 높은 개체는 광범위한 정보교환을 하게 되므로 GA의 전역탐색능력을 향상시킬 수 있다. 특히, 최상의 해의 생성개수에 따라 적응적으로 적용되는 특성을 부여하여, 다양한 해집단의 생성을 유도함으로써, OFR문제의 특성에 가장 부합되는 효과적인 연산을 수행하도록 하였다. 다음 식에서 역치 계수 k_5 , k_6 은 [0,1]사이 에 있는 임의의 배율계수를 나타낸다.

$$p_{inv}^i = \begin{cases} k_5(f_{max} - f^i) / f_{DIST} & \text{if, } (f^i \neq f_{max}) \geq f_{ave} \\ k_5 N_{max} / pop_size & \text{if, } f^i = f_{max} \\ k_6 & \text{if, } f^i < f_{ave} \end{cases} \quad (14)$$

4.3.4 GA의 수렴속도 증진 전략

본 논문에서 사용된 염색체의 이진 코딩 방법은 급전선의 신설 여부에 따른 정보를 표현하도록 설정하였다. 이러한 특성으로 연산결과로 생성되는 자손이 배전시스템의 방사상 계통의 구성 특성을 만족하는 유용해(feasible solution)가 되기 위해서는 일정한 급전선의 개수를 만족해야 한다. 즉, 건설되는 급전선은 모든 부하지점에 전력을 공급해야 하기 때문에 부하노드의 수와 급전선의 수는 일정해야 한다. 이러한 OFR 문제의 특성을 감안하여 GA의 연산 과정에서 불용해(unfeasible solution)의 생성을 최소화하는 방법을 사용

함으로써 불용해에 대한 적합도 평가에 소모되는 전체 알고리즘 수행시간을 감소시키고자 하였다. 이를 위하여 ACO에서는 연산결과에 따라서 자손의 생성과 비생성을 결정하도록 하였다. 또한 기존의 단일지점 돌연변이는 불용해의 생성을 초래하므로, 이를 보완하기 위해서 다음 그림과 같은 형태의 배타적 2점 돌연변이를 사용하였다. 그림에서 빗금 부분이 신규 급전선 건설을 의미하는 정보에 해당하며, 배타적 돌연변이는 연산 전후의 건설된 급전선의 개수가 항상 일정하게 유지되도록 돌연변이 연산을 수행하게 된다. 그림에서 기호 "○, ●"는 각각 상대적인 정보 선택의 예제를 표현한 것이다.



그림 3 배타적 2점 돌연변이

Fig. 3 The exclusive double point mutation

4.4 적응 유전 알고리즘 적용을 위한 목적함수의 확장

일반적으로 OFR 문제의 목적함수는 투자비용과 손실비용을 최소화 하는 비선형 조합최적화 문제(nonlinear combinatorial optimization)로 정식화되기 때문에, 기존의 선형 또는 비선형 계획법의 적용에는 수치해의 안정성 등에서 어려움이 수반된다. 본 논문에서는 이러한 난점을 고려하여 GA의 적용을 시도하였으며, 제안된 AGA를 이용하여 식 (3)의 목적함수와 제약조건을 비제약 최적화(unconstrained optimization) 문제의 형태로 다음과 같이 확장하였다.

$$\begin{aligned} \min f_G(Y, U) = & f_{cost}(Y, U) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i \{h_i(Y, U)\}^2 \\ & + \sum_{i=1}^m \lambda_i \{g_i(Y, U) - g_i^{lim}\}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\left(\text{단, } g_i^{lim} = \begin{cases} g_i^{max} & \text{if, } g_i(Y, U) > g_i^{max} \\ g_i^{min} & \text{if, } g_i(Y, U) < g_i^{min} \end{cases} \right)$$

여기서,

$f_{cost}(Y, U)$: 식 (3)의 전체비용 최소화 목적함수

$h_i(Y, U)$: OFR문제의 i 번째 등호 제약조건

$g_i(Y, U)$: OFR문제의 i 번째 부등호 제약조건

λ_i : i 번째 제약조건에 대한 벌점계수

g_i^{lim} : 부등호 제약조건 i 의 상·하한 한계값

4.5 적합도 함수

본 논문에서 AGA의 적합도 함수(fitness function)는 급전선 신설비용과 계통운전 비용 등의 전체비용 최소화문제를 적합도 최대화문제로 취급하기 위하여 다음처럼 설정하

였다. 다음 식에서 FP 는 적합도를 조절하기 위한 상수이다.

$$FIT(Y, U) = \frac{FP}{1 + f_G(Y, U)} \quad (16)$$

4.6 제안한 알고리즘의 수행 절차

본 논문에서는 전체비용 최소화 알고리즘을 수행하기 위하여 다음과 같은 순차적인 진행방법을 사용하였다. 우선 투자비용 단일 목적함수를 최소화하기 위하여, 계통운용비용을 고려하지 않은 상태($\alpha=0$)에서 IVC의 최적해를 탐색하고, 두 번째로 투자비용을 고려하지 않은 상태($\beta=0$)에서 전력손실에 의한 SOC의 최적해를 탐색하도록 하였다. 개별 알고리즘의 전역 탐색능력은 기존 연구결과와 비교하여 동일한 계통구성을 탐색하였음을 사례연구에서 확인하였다. 제안된 알고리즘의 최종단계는 전체 비용을 최소화하기 위하여 앞서 구한 단일 최적해를 기본값으로 취하고, 개별 비용요소를 고려한 상태($\alpha=\beta=1$)에서 급전선 신설에 따른 전체비용 최소화 알고리즘을 수행하도록 하였다.

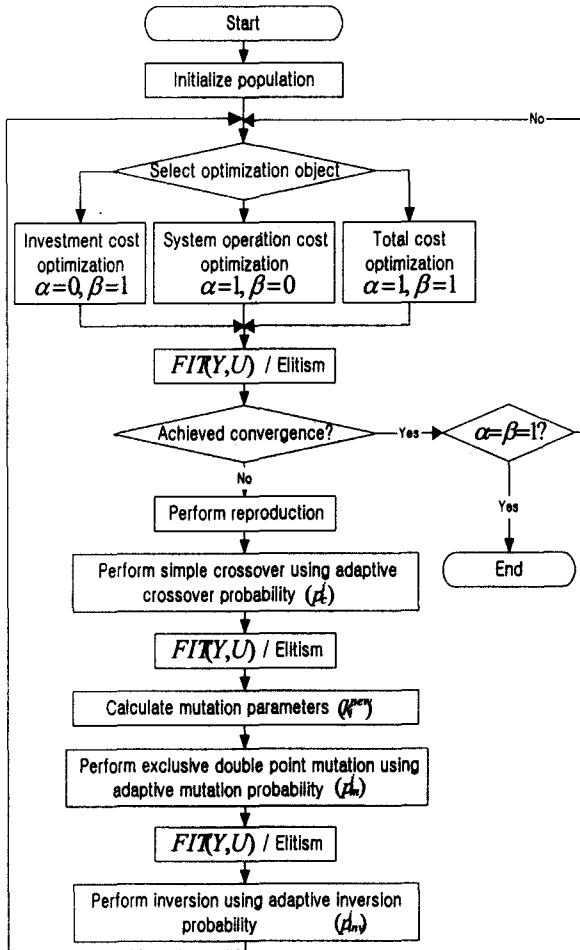


그림 4 제안한 알고리즘의 순서도
Fig. 4 Flowchart for proposed algorithm

5. 사례연구

제안한 알고리즘의 효용성을 검증하기 위하여 비교적 대규모 모선계통인 32모선과 69모선의 배전계통 예제모델[6, 7]을 사용하였다. 선정된 모의계통을 OFR문제에 적용하기 위하여, 본 논문에서는 모든 선로가 설치 가능 경로인 것으로 새롭게 구성하였다. 모의계통의 기준 전압은 12.66[kV]이며, 각 노드의 부하량(LP, LQ)과 선로정수(R, X) 및 급전선 신설비용(COST)등에 관한 수치 데이터는 생략하였으며, 표 1과 2에는 급전선 신설비용 계수를 나타내었다. 여기서 급전선 신설비용은 임피던스의 크기에 비례하는 것으로 가정하고, 임피던스의 크기를 투자비용으로 설정하였다.

표 1 32모선 계통 데이터

Table 1 32-bus system data

LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST
1	0.1035	11	0.3943	21	1.1752	31	0.4768
2	0.5533	12	1.8679	22	0.5465	32	0.6304
3	0.4107	13	0.8953	23	1.1442	33	2.8284
4	0.4277	14	0.7912	24	1.1377	34	2.8284
5	1.0819	15	0.9241	25	0.2278	35	2.8284
6	0.6465	16	2.1502	26	0.3189	36	0.7071
7	0.7492	17	0.9302	27	1.4118	37	0.7071
8	1.2683	18	0.2267	28	1.0666		
9	1.2797	19	2.0248	29	0.5695		
10	0.2071	20	0.6297	30	1.3700		

표 2 69모선 계통 데이터

Table 2 69-bus system data

LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST	LINE	COST
1	0.0013	20	0.2218	39	0.0467	58	0.8267
2	0.0013	21	0.3598	40	0.0028	59	0.3204
3	0.0000	22	0.0147	41	1.1200	60	0.4035
4	0.0039	23	0.1676	42	0.4768	61	0.5695
5	0.0387	24	0.3647	43	0.0630	62	0.1093
6	0.4107	25	0.7886	44	0.0148	63	0.1627
7	0.4277	26	0.3253	45	0.1752	64	0.7974
8	0.1035	27	0.1824	46	0.0015	65	1.1682
9	0.0553	28	0.0117	47	0.0091	66	0.2103
10	0.8626	29	0.1691	48	0.2250	67	0.0049
11	0.1972	30	0.4190	49	0.7660	68	0.7787
12	0.7492	31	0.0739	50	0.2173	69	0.0050
13	1.0847	32	0.3697	51	0.1042	70	0.7071
14	1.0995	33	0.8850	52	0.3501	71	0.7071
15	1.1143	34	1.7980	53	0.1953	72	1.4142
16	0.2071	35	1.5525	54	0.2278	73	2.8284
17	0.3943	36	0.0117	55	0.3189	74	1.4142
18	0.0050	37	0.1691	56	0.3157		
19	0.3450	38	0.1619	57	1.6772		

5.1 연산자 확률 계수 선정

제안된 AGA에 사용된 파라미터는 다음 표 3에 나타내었다. 선정된 파라미터는 AGA의 우수한 수렴특성을 유지하기 위하여, 충분한 실험을 통하여 수렴성이 우수하도록 설정한 값이다. GA의 수렴과정에서 평균이하의 적합도를 갖는 해의 분열을 유도하며, 다양한 해집단의 구성에 기여하도록 설정하였다.

표 3 AGA에 사용된 파라미터
Table 3 Parameters used in AGA

pop_size	FP	CON	k_1	k_2	k_3^{old}	k_4^{old}	k_5	k_6
40	100	200	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0

5.2 모의 계통의 OFR 결과

32모선의 초기 계통 구성상태는 그림 5와 같다. 그림에서 숫자는 부하노드의 번호를 나타내며, 점선은 신설 가능한 급전선 경로를 나타낸다. 초기 계통구성에서는 신설 가능한 급전선 경로를 점선으로 나타내었으며, 전체 예상부하는 3715[kW], 2300[kVAR]이다. 표 4는 각 단계의 OFR 결과를 나타내었다

표 4는 SOC와 IVC의 개별 최적화 결과와 전체비용 최적화 결과를 나타낸 것이며, 각각의 최적화 결과에 의하여 개방된 선로의 번호를 표현하였다. 표에서 전체비용 최적화 결과가 개별최적화 결과에 비하여 각각 다소 상승된 비용을 탐색하였음을 알 수 있으며 이것은 SOC와 IVC를 동일수준의 비용요소로 가정하고 알고리즘을 수행한 결과에 따른 것이다. 이러한 결과는 제안한 알고리즘이 계통운용비용과 투자비용의 개별최적화는 물론이고, OFR 전체비용 최적화에 적합하다는 것을 나타내며, SOC의 개별탐색결과는 기존의 최소손실에 의한 계통재구성(network reconfiguration)의 경우와 동일한 최적결과를 탐색하였음을 확인하였다. 본 논문의 최적결과에 대한 비교는 전체비용 최적화 결과 문헌이 부재인 관계로 계통손실비용에 국한하여 후반부에 언급하였다.

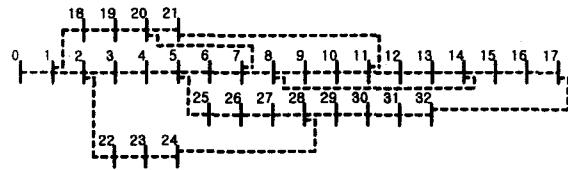


그림 5 32모선 계통의 초기 구성
Fig. 5 Initial configuration of 32 bus system

표 4 32모선 OFR 결과
Table 4 OFR results of 32 bus system

	투자비용 최적화	계통운용비용 최적화	최종목적함수 최적화
개방된선로	16,27,33,34,35	7,9,14,32,37	9,28,32,33,34
투자비용	25.4899	33.3795	28.9036
전력손실[kW]	178.7687	139.5489	144.7628
최소전압[pu]	0.9244607	0.9378198	0.9402003

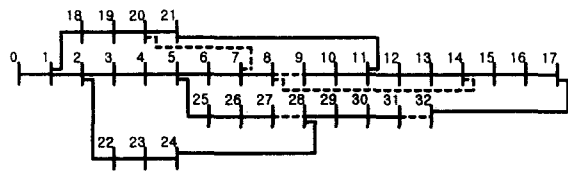


그림 6 32모선 계통의 최적 구성
Fig. 6 Optimal configuration of 32 bus system

다음 그림은 최적화 결과에 따른 부하모선의 전압을 나타낸 것이며, 기존의 손실최소화 계통 재구성 문제와의 비교를 위하여 도시한 것이다. 여기서, 초기구성은 기존 손실최소화 문제의 초기 계통구성 상태의 전압분포를 나타낸 것이며, 본문에서 수행한 계통운용비용 최적결과와 비교하였다. 그림 7을 통하여 초기 상태에 비하여 전압안정도 여유가 대폭 상승하였음을 확인할 수 있다.

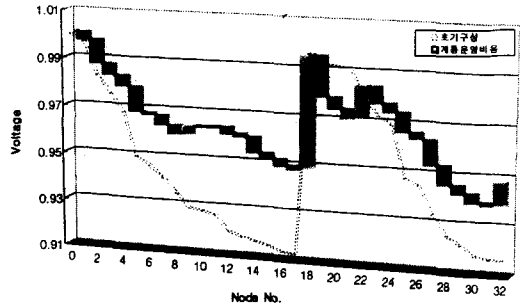


그림 7 32모선 모델에 대한 전압 분포
Fig. 7 Voltage distribution for 32 bus model

다음은 69모선계통에 대한 사례연구 결과이며, 제안한 알고리즘의 안정된 적용가능성을 확인할 수 있다. 결과에 대한 언급순서는 32모선 결과와 동일하게 나타내었으며 예상부하는 3802.19[kW], 2694.6[kVAR]이다.

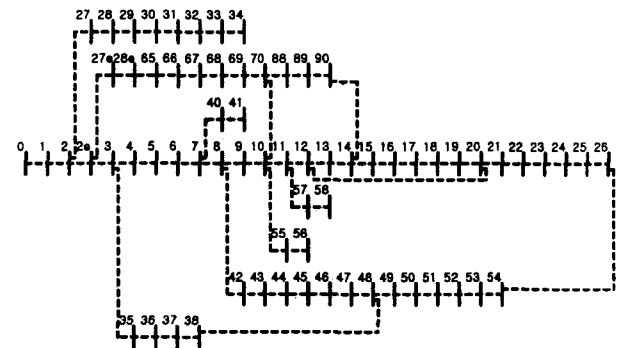


그림 8 69모선 계통의 초기 구성
Fig. 8 Initial configuration of 69 bus system

표 5 69모선 OFR 결과
Table 5 OFR results of 69 bus system

	투자비용 최적화	계통운용비용 최적화	최종목적함수 최적화
개방된선로	15,41,57,72,73	15,57,62,70,71	13,14,57,64,70
투자비용	25.7296	29.5687	28.5178
전력손실[kW]	464.4801	99.6137	100.9687
최소전압[pu]	0.8256616	0.9427543	0.9414048

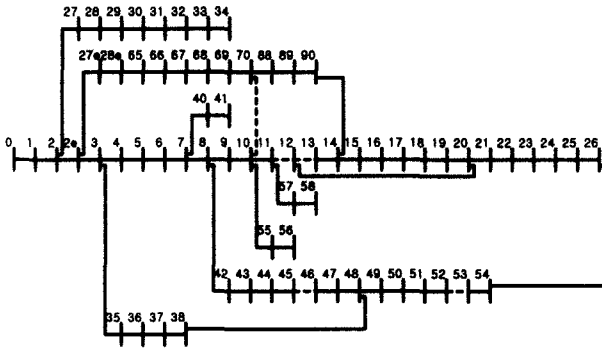


그림 9 69모선 계통의 최적 구성
Fig. 9 Optimal configuration of 69 bus system

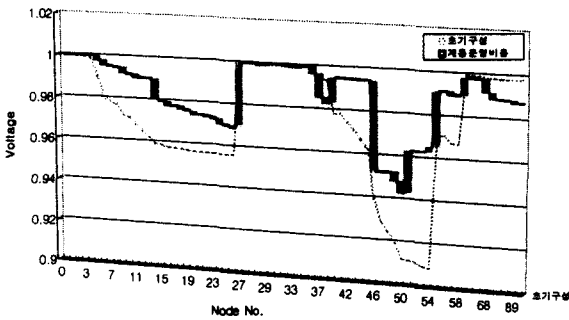


그림 10 69모선 모델에 대한 전압 분포
Fig. 10 Voltage distribution for 69 bus model

다음 그림은 제안한 AGA의 수렴특성을 CGA와 비교한 것이다. 기존의 CGA에 비하여 전역탐색 능력의 향상과 적용성이 부여된 적용전략에 의하여 최적해 탐색속도가 향상되었음을 확인할 수 있다.

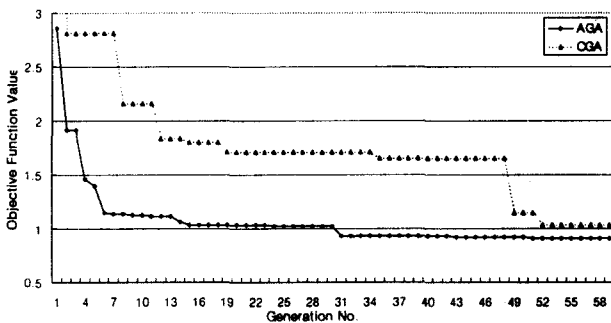


그림 11 AGA와 CGA의 수렴추이곡선
Fig. 11 Convergent transitional curve of AGA and CGA

다음 그림 12는 AGA의 평균 목적함수 값의 변화곡선을 나타낸 것이다.

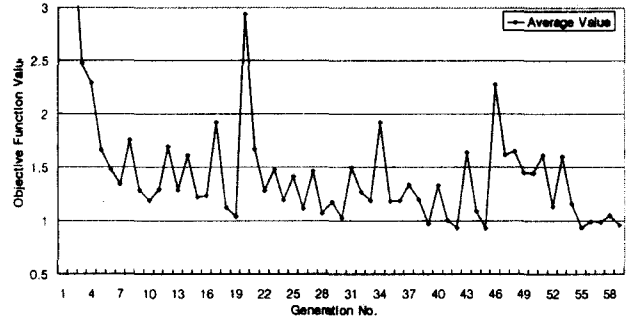


그림 12 AGA의 평균값 변화곡선
Fig. 12 transitional curve for average value of AGA

그림 12에서 목적함수가 지역 최적점(local optimum)에 수렴할수록 평균값이 작아지는 것을 알 수 있으며, 적용연산자의 적용으로 점차 낮아지는 평균값을 상승시켜 지역 최적점에서 벗어남을 확인할 수 있다. 또한 기존의 CGA에 비하여 전반적으로 평균적합도가 과도하게 상승되지 않고, 일정한 수준을 유지하고 있으며, 이로 인하여 전역탐색능력의 향상을 도모할 수 있다.

본 알고리즘의 효용성을 입증하기 위한 방법으로 먼저, 투자비용 단일 최적화 결과는 Dijkstra method[10]를 사용하여 그 최적 경로가 동일함을 확인하였다. 또한 계통운영비용 단일 최적화 결과는 기존의 손실최소화 문제에 적용된 논문[11, 12]와의 비교로부터 최적경로를 확인하였다. 표 6은 그 결과를 비교하여 나타내었으며, 본 논문의 계통운영비용 단일 최적화 알고리즘의 효용성을 입증한다.

표 6 다른 연구와의 비교
Table 6 Comparison with another study

	32모선		69모선	
	전력손실 [kW]	개방된 선로번호	전력손실 [kW]	개방된 선로번호
기존연구1 [11]	139.5489	7,9,14,32,37	-	-
기존연구2 [12]	139.5489	7,9,14,32,37	99.6189	15,59,62,70,71
제안한방법	139.5489	7,9,14,32,37	99.6137	15,57,62,70,71

6. 결 론

본 논문에서는 전역탐색 기법인 유전알고리즘을 이용하여 배전계통 계획의 급전선 최적경로탐색 문제에 효과적으로 적용하였으며, 새로운 적용 유전알고리즘을 적용하여 OFR 문제의 탐색효율의 증진을 도모하는 전체비용 최소화 알고리즘을 제안하였다. 목적함수 최적화에서 수렴성을 향상시키기 위해서 적합도 값을 기준으로 한 적용 유전 알고리즘을 사용하였으며, 수렴속도와 지역 최적점에 고착하는 문제를 해결하기 위하여, 적용하는 유전 연산자 계수와 다양한 적용전략을 도입하였다. 특히 빈번한 계통구성 과정에서 GA의 탐색효율을 증대하는 방법으로 근사 조류계산 기법을 효과적으로 적용하였다. 급전선의 건설비용을 고려한 투자비용 단일최적화와 계통 운영 중 발생하는 전력손실을 고려

한 계통운용비용 단일최적화 각각에 대해서 기존의 수치적인 방법과 이전 연구문헌과의 비교를 통해서 알고리즘의 우수성을 확인하였으며 대규모 계통의 전체비용 최소화 OFR 알고리즘으로의 적용 가능성을 확인하였다.

제안한 알고리즘은 32모선과 69모선의 예제모델 계통에서 우수한 결과를 나타내었으며 실제 배전 계통에 대해서도 효율적으로 적용이 가능할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구(97-중-05)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] James A. M., "Algorithmic Graph Theory", Prentice-Hall, Inc. pp. 55-88, 1990

[2] Satish Jonnavithula, Roy Billinton, "Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Delievery, Vol. 11, No. 4, October, 1996

[3] E. Miguez, E. Diaz-Dorado, and J. Cidras, "An Application of an Evolution Strategy in Power Distribution System Planning", IEEE conf. on Evolutionary Computation, pp. 241-246, 1998

[4] Ignacio J. Ramirez-Rosado, and Jose L. Bernal-Agustin, "Optimization of Power Distribution Network Design by Application of Genetic Algorithms ", International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 104-110. 1995

[5] Vladimiro Miranda, J. V. Ranito, and L. M. Proenca, "Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1927-1933, November 1994

[6] Mesut E. Baran, and Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems for Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989

[7] Mesut E. Baran, and Felix F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on A Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 735-743, January 1989

[8] Suresh K. Khator, Lawrence C. Leung, "Power Distribution Planning : A Review of Models and Issues", IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 3, August, 1997

[9] M. Srinivas, and L. M. Patnaik, "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 4, pp. 656-667, April 1994

[10] S. E. Dijkstra, "An appraisal of Some Shortest Path Algorithms", Operations Res., 17, pp. 395-412, 1969

[11] Whei-Min Lin, and Hong-Chan Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp.870-875, July 1998

[12] Y. J. Jeon, S. K. Choi, J. C. Kim, "Implementation of Simulated Annealing for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", Trans. KIEE. Vol 48A, No. 4, April 1999

저 자 소 개

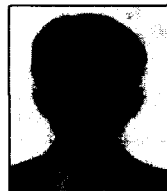


김 병 섭 (金炳燮)

1968년 8월 18일 생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778

E-mail : dkkbbss@konkuk.ac.kr



김 민 수 (金敏洙)

1974년 3월 13일 생. 1999년 건국대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-458-4778

E-mail : minsoo@konkuk.ac.kr



신 중 린 (慎重麟)

1949년 9월 22일 생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3487

E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr