

碩士學位論文

유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘을 이용한
배전계통 재구성에 관한 연구



濟州大學校 大學院

제주대학교 중앙도서관
電氣工學科

安 鎭 梧

1999年 12月

유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성에 관한 연구

指導教授 金世鎬

安鎮梧

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999年 12月



安鎮梧의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 吳性寶 
委員 李開明 
委員 金世鎬 

濟州大學校 大學院

1999年 12月

A Study on Distribution System Reconfiguration using Genetic and Kruskal Algorithm

Jin-Oh An

(Supervised by professor Se-Ho Kim)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1999. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘	3
1. 유전 알고리즘의 기본개념	3
1) 선택(selection)	4
2) 교차(crossover)	6
3) 돌연변이(mutation)	8
2. 유전 알고리즘의 동작원리	10
3. Kruskal 알고리즘	12
III. 재구성 알고리즘	14
IV. 사례 연구	18
V. 결 론	33
참 고 문 헌	34

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Example of one-point crossover	7
Fig. 2	Example of multipoint crossover	7
Fig. 3	Example of uniform crossover	8
Fig. 4	Example of GA	11
Fig. 5	Flow chart of proposed algorithm	16
Fig. 6	Initial configuration of 32 bus	18
Fig. 7	Optimal configuration of 32 bus	19
Fig. 8	Initial configuration of 69 bus	24
Fig. 9	Optimal configuration of 69 bus	25



LIST OF TABLES

Table 1	Load flow result of initial 32 bus	21
Table 2	Load flow result of optimal 32 bus	22
Table 3	Comparison table of objective function J between initial and optimal configuration of 32 bus	23
Table 4	Comparison table with the result of previous studies	24
Table 5	Load flow result of initial 69 bus	26
Table 6	Load flow result of optimal 69 bus	28
Table 7	Comparison table of objective function J between initial and optimal configuration of 69 bus	30



SUMMARY

This paper presents distribution network reconfiguration method by using genetic algorithm and Kruskal algorithm.

Genetic algorithm has merits which are able to search a globally optimal or multiple solution at the same time and to be used in nonlinear system with multi-parameter. Kruskal algorithm is an algorithm that solves spanning tree with minimum weighting summation.

Network reconfiguration involves the opening and closing of distribution switches to minimize the objective function that is composed of loss and load balancing items satisfying the operating constraints such as line capacity, voltage and radial structure. Genetic algorithm is used to minimize the objective function and Kruskal algorithm to maintain the radial structure of distribution system.

The proposed algorithm is applied to 32 bus and 69 bus model systems. The simulation results show that the proposed algorithm has the ability to search the optimal solution regardless of initial configuration and system size. Also, it is proved the superiority of reconfiguration algorithm in comparison with the previous studies such as branch exchange method and Tabu search.

When the proposed reconfiguration algorithm is applied to real distribution system, it can be effective in minimization of energy loss, decision of the tie point and optimal configuration preparing for fault occurrence.

I. 서론

배전계통은 송전계통과는 달리 방대하고 복잡하며 여러가지 부하들이 혼재하고 있어서 부하들의 변화 속성 때문에 계통 변경이 자주 일어난다. 그래서 경제적인 운용을 최대화하기 위하여 여러가지 배전선로 손실 감소 기법들을 이용한 배전계통 재구성의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 특성상 부하 추종적으로 구성되어 있는 배전계통은 수시로 확대, 축소가 필요하고 연계개폐기로 연결되는 타이, 루프 지점을 이용하여 수행되는 개폐기 조작으로 분기교환이 빈번하게 발생하여 계통상태의 변화가 심하므로 기존의 수치 해석적인 알고리즘으로 다루기에는 비효율적이다.

계통 재구성에 관한 초기 연구는 모든 개폐기를 닫은 상태의 망 배전계통으로 시작해서 연속적으로 개폐기를 열어가며 방사상 구성이 될 때까지 시스템의 손실을 계산하였다(Lee 등 1988). 그리고 1987년 Aoki 등이 각기 다른 변전소를 운용하는 선로의 구분개폐기의 조작을 통해서 배전계통의 전력손실을 최소화하는 기법을 제시하였으며(Aoki 등 1987), Baran 등은 개폐기 조작을 통한 분기교환 방식에 기초를 둔 손실경감과 부하균형을 위한 재구성기법을 제안하였다(Baran과 Wu, 1989). 그 후 Chizang 등이 조합적인 최적화 문제에 좋은 해를 제공해주는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 알고리즘을 이용하여 배전계통 재구성 문제에 적용을 하였으며(Chizang과 Jean-Jumeau, 1990), Nara 등은 전역적인 최적화 기법인 유전 알고리즘을 이용해 배전계통 재구성 문제를 다루었다(Nara 등 1992). 그리고 전역적 탐색은 약하지만 지역 탐색(local search)이 좋은 Tabu search를 이용하여 배전계통을 재구성하는 연구도 진행이 되고 있다(장경일 등 1999).

본 논문에서는 배전계통의 손실을 감소시키고 제약조건을 만족하는 구성을 찾기 위하여 전역적 최적화 기법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 방사상 구성을 찾기 위한 Kruskal 알고리즘을 혼합하여

적용하였다. 유전 알고리즘은 개체군의 크기가 적으면 적합도 계산에 필요한 시간을 절약할 수 있으나, 개체간의 다양성이 빠른 손실로 인해 최적의 해를 구하기 전에 수렴할 위험성을 내포한다. 반면에 개체군의 크기가 크면 최적 해에 도달할 확률은 높으나 많은 기억 용량과 계산 시간을 필요로 한다. 이 둘의 성능 평가 항목을 모두 만족시켜 주는 최적의 개체군 크기를 정하는 방법은 문제의 성격과 다른 제어 파라메타들의 값에 따라 다르기 때문에 본 논문에서는 유전 알고리즘의 성능을 크게 좌우하는 교배율과 돌연변이율에 온-라인(적합도의 평균값) 및 오프-라인(최대 적합도) 성능이 우수한 Dejong의 값을 사용하였다. Kruskal 알고리즘은 최소 비용 신장 나무를 구하는데 우수한 성능을 보여 배전계통 재구성 시 우선 순위 큐에서도 효율이 좋은 힙(Heap)을 이용함으로써 각 간선들을 모두 방문하는 경로 중에서 가장 비용이 적게 드는 경로를 찾아내어 루프를 이루지 않는 방사상 구조를 형성한다. 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 Baran과 Wu(1989)의 32모선 예제 계통과 69모선 예제 계통에 적용을 하여 지금까지 제안된 방법들과 결과를 비교·분석하였다.

II. 유전 알고리즘과 Kruskal 알고리즘

1. 유전 알고리즘의 기본개념

유전 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)은 생물진화(선택도태나 돌연변이)의 원리로부터 착안된 알고리즘으로서, 확률적 탐색이나 학습 및 최적화를 위한 한가지 기법이라고 간주할 수 있다. 역사적으로 보면 GA는 홀랜드(Holland)의 1975년도 저서인 "Adaptation in Natural and Artificial Systems"에 처음으로 소개된 기법이다. 또한 포겔(Fogel)등도 진화방식의 모형화를 시도하여 간단한 유한상태 시스템의 최적화를 수행하기도 하였다.

유전 알고리즘은 기존의 다른 알고리즘보다 많은 최적화 문제에서 전역적(global)이고 견실한 최적화 방법이다. 고전적인 제어기 알고리즘들은 제어기에 대한 충분한 지식과 시스템의 수학적 해석 및 계산에 의해서 설계되었다. 이렇게 설계된 시스템들도 주어진 환경에서는 지역적(local)일 수 있다.

그러나 유전 알고리즘은 전역적인 최적의 해를 발견할 높은 가능성을 가진다는 장점과 목적함수 값(objective function value)에 대한 수학적 제약이 거의 없기 때문에 여러 분야에 적용할 수 있다.

유전 알고리즘은 미지의 함수 $Y=f(X)$ 를 최적화하는 해(parameter) X 를 찾는 탐색 알고리즘으로서 기존의 최적화 알고리즘들과는 다음과 같은 차이점을 가지고 있다.

- 유전 알고리즘은 파라메타 그 자체를 사용하는 것이 아니라 파라메타 집합을 coding해서 사용한다.
- 유전 알고리즘은 탐색 공간에서 단일해(string)를 사용하는 것이

아니라 해집단(schema)을 사용한다.

- 유전 알고리즘은 결정론적인 전이규칙(deterministic transition rule)이 아닌 확률적인 규칙을 사용한다.
- 유전 알고리즘은 미분 가능성, 연속성 등과 같은 최적화 함수의 정보를 필요치 않고 단지 적합도 함수(fitness function)값만을 사용한다.

GA는 기본적으로 Generate-and-Test형의 알고리즘으로서, 일반적으로 세 가지 종류의 유전자 조작(genetic operations)을 사용한다.

- 선택(selection)
- 교차(crossover)
- 돌연변이(mutation)

1) 선택(selection)



선택도태의 압력을 가하는 경우에 중요한 것은 어떤 개체들을 쌍으로 교차시킬 것인가의 문제이다.

(1) 적응도 비례전략

적응도 비례전략은 룰렛 모델 또는 몬테카를로 모델이라고도 불리는데, 각 개체의 적응도에 비례하는 확률로 자손을 남길 가능성이 있는 모델이다. 어떤 개체 i 가 각각의 선택 정도에 따라 선택될 확률 p_{select} 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$p_{select_i} = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (1)$$

(2) 기대치 전략

확률적인 선택에서의 문제점은 개체의 수가 충분히 많지 않은 경우에는 난수의 발생형태에 의해서 적응도를 정확히 반영하지 않는 선택이 이루어질 가능성이 있다고 하는 것이다. 기대치 전략은 이 문제를 해결하려고 하는 기법이다. 기대치 전략에서는 각 개체가 남기는 자손의 기대치를 계산한다. 그리고 그 개체가 선택된 경우에는 그 기대치로부터 0.5를 빼는 것인데, 이와 같이 함으로써 최악의 경우에도 기대치보다 0.5의 편차로 자손을 남기는 것이 가능하게 된다.

(3) 순위전략

순위전략은 적응도에 따라서 각 개체에 순위를 매기고, 사전에 각 순위에 대해서 결정된 확률로 자손을 남기도록 하는 것이다. 각 개체는 그 적응도마다 순위가 매겨져 있어, 선택확률은 적응도에 의존하지 않고 순위에 의존한다. 순위전략의 문제점은 적응도와 순위에 의해서 부여되는 선택확률에 차이가 있다는 점이다.

(4) 엘리트 보존전략

엘리트 보존전략은 집단 중에서 가장 적응도가 높은 개체를 그대로 다음 세대로 남기는 방법이다. DeJong은 이 전략을 다음과 같이 정의하고 있다.

$a^*(t)$ 를 시간 t 까지 출현한 가장 좋은 개체라고 하자. 만일 $A(t+1)$ 을 보통의 방법으로 생성시킨 경우에 이 $A(t+1)$ 중에 $a^*(t)$ 가 존재하지 않는다면 $a^*(t)$ 를 $A(t+1)$ 의 $N+1$ 번째 개체로 첨가한다.

이 방법을 사용하면 그 시점에서 가장 좋은 해가 교차나 돌연변이에 의해서 파괴되지 않는다는 이점이 있다. 단지, 엘리트 개체의 유전자가

집단 안에 급속히 확산될 가능성이 높기 때문에 국소 해(local minima)에 빠질 위험도 있다. 일반적으로 이 전략은 다른 선택 전략과 혼합하여 사용될 수 있다.

(5) 토너먼트 선택전략

토너먼트 선택전략(Tournament Selection)은 집단으로부터 결정된 수의 개체를 무작위로 선택하여, 그 중에서 가장 적응도가 높은 개체를 다음 세대로 남기는 절차를, 다음 세대에 남기고 싶은 수만큼의 개체가 선택될 때까지 반복한다. 토너먼트의 크기는 2인 경우가 많지만, 보다 큰 토너먼트 크기를 설정하는 경우도 있다.

(6) GENITOR 알고리즘

GENITOR 알고리즘은 먼저 순위전략을 사용하여 하나의 자손을 생성해서 가장 나쁜 개체와 교체하여 넣는다. 이것은 개체수가 N 인 집단에서 세대차이를 $1/N$ 로 한 경우에 가깝게 작동한다.

2) 교차(crossover)

교차(crossover)는 두 부모의 염색체를 조합하여 바꾸어 자식의 염색체를 만드는 조작이다.

(1) 단순교차

가장 단순한 방법은 교차하는 위치를 하나 결정하고 그 앞과 뒤에서 어느 쪽 부모의 유전자형을 받을 것인가를 변경시키는 방법이다. 이것을 단순 교차(simple crossover), 또는 1점교차(one-point crossover)라

고 부른다. Fig. 1에는 네 번째와 다섯 번째 유전자 사이에 교차위치를 설정하고, 개체A의 염색체에서 선두부터 네 번째까지와 개체B의 다섯 번째에서 마지막까지의 유전자가 새로운 개체의 유전자가 된다. 또한, 그 반대가 다른 새로운 개체의 유전자가 된다.

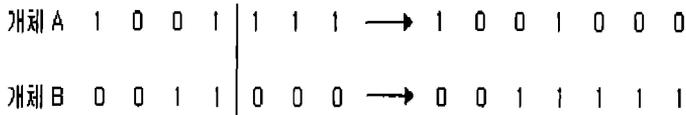


Fig. 1 Example of one-point crossover

(2) 복수점 교차

복수점 교차(multipoint crossover)는 교차위치가 복수인 방법이다. Fig. 2에서처럼 교차 위치가 2와 5라면 새로운 개체의 하나는 개체A의 선두로부터 두 번째까지, 개체B의 세 번째로부터 다섯 번째까지, 개체A의 여섯 번째로부터 마지막까지로 유전자가 만들어진다. 동시에 그 반대의 조합에 의해서 또 다른 하나의 새로운 개체의 유전자가 만들어진다.

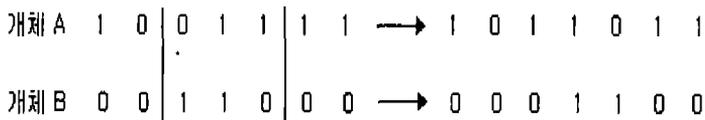


Fig. 2 Example of multipoint crossover

(3) 일정교차

일정교차(uniform crossover)는 교차 시 마스크를 사용하여 그것에 의해 어느 쪽 부모의 유전자를 받아들일 것인지 결정하는 방법이다.

Fig. 3에서 보여지는 것처럼 두 개의 부모가 되는 개체 및 마스크를 결정한다. 마스크의 비트가 0인 경우에는 자손 1에 부모 1의 유전자를 복사하고, 1의 경우에는 부모 2의 유전자를 복사한다. 자손 2에 관해서는 이것의 반대로 수행한다. 일정교차는 복수교차의 한 종류라고 생각할 수 있다. 어떠한 교차가 좋을 것인지에 대해서는 시스웰다(Syswerda)나 스피어스(Spears)등의 연구가 있다.

부모 1	0	0	1	1	1	1
부모 2	1	1	1	1	0	0
마스크	0	1	0	1	0	1
자녀 1	0	1	1	1	1	0
자녀 2	1	0	1	1	0	1

Fig. 3 Example of uniform crossover

(4) 그 이외의 교차

부분일치교차(Partially Matched Crossover:PMX), 순위교차(Ordered Crossover:OX), 주기교차(Cycle Crossover:CX), 교차(高次)의 교차조작 등 각각의 문제 영역마다 여러 가지 교차기법이 제안되어 있다.

3) 돌연변이(mutation)

돌연변이는 유전자를 일정한 확률로 변화시키는 조작이다. 아주 낮은 돌연변이율로 스트링의 한 비트를 0에서 1로 혹은 1에서 0으로 우연히 바꿈으로써 구현된다. 이 과정은 과거에 잃어버렸던 중요한 정보를 되찾을 수도 있으며 탐색의 방향이 지역적 극값으로 향할 경우 여기서 벗어나도록 도움을 준다. 돌연변이를 너무 큰 변이확률로 설정하면 스키마타(schemata)가 전부 파괴되기 때문에 임의 탐색(random search)으로

변해버리게 된다. 돌연변이가 없는 경우에는 초기 유전자의 조합 이외의 공간을 탐색할 수 없으며, 결국 찾고자 하는 해의 질에도 한계가 드러난다. 일반적으로 돌연변이는 고정된 확률로 각 유전자가 변화하도록 설정하지만, 변이율을 동적으로 변화시키는 기법도 있다. 이러한 기법의 한가지로 적응변이(adaptive mutation)가 있다. 적응 변이에는 교차의 결과, 만들어진 두 개 개체의 근사도를 해밍거리(hamming distance)로 측정하고, 거리가 가까울수록 높은 변이율로 하는 기법이 있다. 이것은 집단 중에서 유전자형의 다양성을 확보하고, 가능한 한 넓은 해 공간을 탐색하고자 하는 의도이다. 자연계에서와 마찬가지로 돌연변이는 유전 알고리즘에서 아주 드물게 일어나는 부가적인 역할을 하며 재생산 및 교배 과정과 함께 사용될 때 전역적 탐색 성능을 더욱 향상시켜주는 역할을 한다.



2. 유전 알고리즘의 동작원리

해의 후보는 유전자형(genotype)으로서 염색체(chromosome)에 일차원적으로 표현된다. 각 세대는 개체(individual)의 집합이다. 각 세대에 있어서 개체의 수는 집단의 크기(population size)라고 부른다.

GA의 처리순서는 다음과 같다.

- 초기집단의 생성
- 종료조건이 만족될 때까지 다음을 반복
 - 적응도의 평가
 - 선택
 - 교차
 - 돌연변이

먼저 초기집단을 생성한다. 일반적으로 결정된 개체수의 염색체를 임의로 생성한다. 예를 들어서, Fig. 4에서는 가장 왼쪽이 초기 집단이다. 이 경우에 염색체의 길이는 3이고, 개체의 수는 4인 집단이 생성되어 있는 것이다. 이러한 도중에 개체의 수를 결정하는 것이나 염색체의 길이, 코딩 방법 등은 GA연구의 중심적인 과제이기는 하지만, 현실적으로는 직관적인 감으로 결정되고 있는 실정이다.

이렇게 해서 초기집단이 생성되고 나면, 각각의 개체에 대한 적응도의 평가를 수행한다. 이것은 해결하고자 하는 문제에 따라서 그 방법이 달라지게 된다. 예를 들어서 Fig. 4에서 원형이 많은 쪽이 적응도가 높은 평가를 받는다고 하자. 이 경우에 왼쪽의 위에서부터 두 번째의 개체가 가장 높은 적응도를 얻게 되고, 그 이외에는 모두 원형이 한 개이기 때문에 낮은 적응도를 얻게 된다. 기본 아이디어는 보다 좋은 개체가 높은 적응도의 평가를 받도록 하는 것이다.

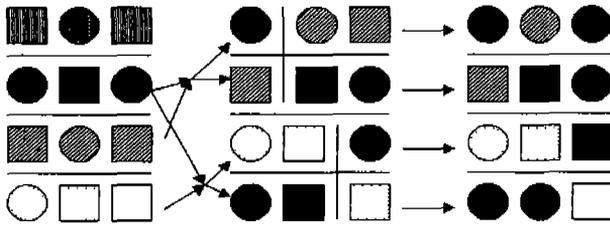


Fig. 4 Example of GA

각각의 개체에 대해서 적응도가 결정되면, 그것을 기반으로 선택하여 교차시키는 조작을 수행한다. 기본적으로 적응도가 높은 개체가 보다 많은 자손을 남기도록 한다. 이와 같이 함으로써, 보다 좋은 개체를 형성하는 유전자가 집단 중에 확산되게 된다. 이 예에서는 위에서부터 두 번째의 개체와 세 번째의 개체가 교차되고, 두 번째의 개체와 네 번째의 개체가 교차되고 있다. 어떤 방법을 채택할 것인지, 또한 적응도와 남길 자손수의 기대치에 대한 관계를 어떻게 설정할 것인지에 따라서 도태압력이 변하게 된다.

제주대학교 중앙도서관

선택교차를 수행할 개체의 쌍이 결정되었다면 염색체의 교차를 수행한다. 교차의 방법도 여러 가지가 제안되어 있지만, 기본적으로는 쌍방의 염색체로부터 일부분씩을 취하여 자손의 염색체를 만든다. 여기에서 보통 유전자좌는 동일한 유전자좌로부터 어느 쪽이든 부모의 유전자를 복제한다. Fig. 4의 중앙부분이 교차를 종료한 상태이다. 종선으로 교차 위치를 나타내고 있다.

다음으로 돌연변이를 추가로 수행한다. 이것은 어떤 확률로 염색체의 일부 값을 변경시키는 조작이다. Fig. 4의 오른쪽에 돌연변이를 거친 개체집단의 상태를 보여주고 있다. ●와 ■가 돌연변이 된 부분이다.

이러한 조작이 종료되면 새로운 세대의 개체집단이 생성되게 된다. 그리고 이러한 새로운 집단에 대해서 또다시 적응도 평가, 선택, 교차, 돌연변이를 수행함으로써 다음의 새로운 세대를 만들어 간다.

3. Kruskal 알고리즘

최소 가중치 신장 나무란 최소 경로 문제(Minimum Pass Problem)와 유사한 것인데, 어떤 그래프의 신장 나무들(Spanning Tree)중에서 가지들의 가중치 합이 가장 적은 신장 나무를 말한다. 즉, 최소 가중치 신장 나무는 그래프의 모든 정점들을 방문하는 경로 중에서 가장 가중치의 합이 적게 되는 경로를 의미한다. 그리고 최소 가중치 신장 나무는 반드시 유일한 것은 아니다. 즉 같은 가중치의 합계로 다른 경로가 있을 수 있음을 의미한다.

최소 가중치의 합을 갖는 신장 나무를 구하는 알고리즘은 우선 순위 탐색법(Priority First Search), Kruskal 알고리즘, Sollin 알고리즘, Prim 알고리즘 등이 있다.

Kruskal 알고리즘은 매우 유연하고 활용성이 좋은 알고리즘으로 최소 경로를 찾는 데 있어서 아주 효율적이다. Kruskal 알고리즘은 우선 순위 탐색법과는 달리 최소 가중치의 가지들을 여기저기서 찾아낸다. 간략히 말하면 루프를 이루지 않는 가장 적은 가중치의 가지들을 하나씩 찾아내는 과정의 연속이다.

본 논문에서 Kruskal 알고리즘의 수행은 GA에서 돌연변이 과정까지 마친 후 생성된 다음 세대중에서 우선 가장 적은 가중치를 갖는 선로들을 찾아내어 선택을 하고, 그 다음으로 적은 가중치의 선로를 계속 선택하여 방사상 구성을 이루어 나가는데, 그 과정들 중에서 루프를 이루는 선로들에 대해서는 가중치가 한·두 단계가 높더라도 그 근방의 선로를 선택하여 연결을 해 나간다. 이렇게 하여 최소 목적함수 값을 갖는 방사상 배전계통 구성이 이루어지게 된다.

Kruskal 알고리즘을 수행하기 위하여 몇가지 고려해야할 사항은 다음과 같다.

◎ 남아있는 모선 중 가장 가중치가 적은 선로를 찾아내는 방법이 있

어야 한다.

- 우선 순위 큐(Priority Queue)를 이용하면 간단하다. 우선 순위 큐는 자료의 임시 저장고 역할을 한다. 입력된 선로를 꺼내는데 있어서 가중치가 가장 적은 선로를 우선적으로 꺼내어 사용한다. 우선 순위 큐를 구현하는 방법은 배열을 사용할 경우에 자료의 삽입과 삭제에 시간이 얼마 걸리지 않고 효율이 좋은 힙(Heap)을 사용한다. 힙은 부가적인 메모리가 전혀 필요 없으면서도 매우 빠른 정렬법이고, 입력 자료에도 거의 무관하게 고른 성능을 보여주는 뛰어난 성능을 가지고 있다. 즉 모든 선로의 가중치를 하나의 자료실에 입력시켜 두었다가 가중치가 적은 순서대로 하나씩 꺼내어 사용하는 방법이라고 말할 수 있다.

◎ 선택된 선로가 루프를 이루는지 아닌지를 판별하는 방법이 있어야 한다.

- 검색함수와 결합함수를 이용하여 해결한다. 선택된 선로들을 결합함수를 이용하여 연결해 나가면서 검색함수로 회로를 이루는지 검색하여 회로를 이룰 때에는 가중치가 한·두 단계가 높더라도 그 근방의 선로를 선택하여 연결을 해 나가게 된다.

◎ 방사상 구성의 만족여부를 판별하는 방법이 있어야 한다.

- 선로 정점의 개수가 V 개라고 하면 그 그래프의 최소 가중치 신장 나무 선로는 정확히 $V-1$ 개가 되어야 한다. 그러므로 찾은 선로의 수를 계속 유지하고 있다가 $V-1$ 개의 선로를 찾으면 방사상 구성이 완전히 이루어졌음을 알 수 있다.

Ⅲ. 재구성 알고리즘

배전계통 재구성 문제는 방사상 구성, 변압기 용량, 선로 용량, 전압 강하 등의 여러 가지 제약조건들을 만족하면서 손실이 최소가 되고 부하가 균형을 이루도록 개폐기의 On/Off위치를 결정하는 것이다. 이때 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

◎ 목적함수

$$J = \text{Min} \left[\alpha \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} + 10\beta \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i}{S_i^{\max}} \right|^2 \right] \quad (2)$$

여기서, $S_i = P_i + jQ_i$

α, β : 가중치



목적함수 식(2)의 첫째 항은 손실(Loss)항, 둘째 항은 부하균형(Load balancing)을 고려하는 항이며, 손실과 부하균형의 대략적인 크기를 맞추기 위해 상수 10을 부하균형 항목에 추가하였다.

◎ 제약조건

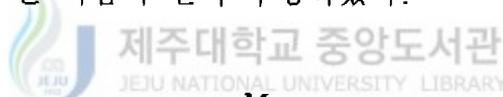
- 선로 용량 : $I_v \leq I_v^{\max}$
- 전압 강하 : $V,^{\min} \leq V, \leq V,^{\max}$ (3)
- 방사상 구성

GA는 일종의 최적치 계산기법으로, 전역 최적해 탐색기법 및 여러 해의 동시 탐색이 가능하고 다중 해를 갖는 비선형성이 강한 시스템에도

적용이 가능하다는 이점을 가지고 있다. GA는 최적화 문제의 목적함수로부터 적합도를 구하여 적합도의 값에 따라 다음 세대의 생존과 소멸을 결정하는 것으로써, 최적화 문제 변수들의 집합을 유한길이의 2진 스트링으로 코딩한다. 스트링의 길이가 너무 길게되면 많은 계산시간을 필요로 하고 수렴성도 저하되며 국소 해에 빠질 위험이 있다.

본 논문에서는 일반적인 GA와는 달리 초기 해 집단을 초기 구성에 대한 조류계산을 수행하여 각 선로마다의 손실과 부하 균형치의 합에 대하여 가중치를 부여하고 이진 스트링으로 부호화한 후 구성하였고, 모선연결 상태는 ASCII code로 프로그램 상에서 입력받도록 하였다. 그리고 적합도는 최소 값을 구하는 문제이므로 역수의 형태를 취하여 낮은 목적함수 값을 갖는 문자열이 높은 적합도를 갖게 한 후, 적합도 평가함수에 적당한 적합도 조절 파라메타와 가중치 조절 파라메타를 적용하여 우수한 다음 세대가 될 수 있으면 많이 생성될 수 있도록 평가하였다.

적합도 평가함수는 다음과 같이 구성하였다.



$$F(X) = \frac{M}{1 + \delta J} \quad (4)$$

여기서, M : 적합도 조절 파라메타

δ : 가중치 조절 파라메타

교배율과 돌연변이율은 온-라인(적합도의 평균값) 및 오프-라인(최대 적합도) 성능이 우수하다고 입증된 Dejong의 값을 이용하였고, 지역적 국소 해에 빠지는 것을 방지하고자 돌연변이시 변이를 일으키는 자리의 bit를 random하게 선택되게 하였으며, 목적함수 값이 바로 전 단계보다 적다고 해서 알고리즘 수행을 종료하는 것이 아니라, 모든 세대를 수행한 후 전 세대를 비교하여 가장 적은 목적함수 값을 갖는 세대를 모두 보여줄 수 있도록 하였다. 그 절차를 Fig. 5에 보였으며, 그 수행절차는 다음과 같은 단계를 거친다.

단계 1 - 부호화 및 초기화(Coding and initialization)

초기구성에 대한 조류계산을 수행하여 각 선로마다의 손실에 대하여 가중치를 부여하고 유한길이의 이진 염색체로 부호화한 후 초기 해 집단을 구성한다.

단계 2 - 평가(Evaluation)

각 문자열을 디코딩하여 목적함수에 대한 적합도를 계산한다. 적합도는 최소값을 구하는 문제이므로 식(4)에서처럼 역수의 형태를 취하여 낮은 가중치(손실값)를 갖는 문자열이 높은 적합도를 갖게 하여 다음 세대에 될 수 있으면 많이 생성될 수 있도록 평가한다.

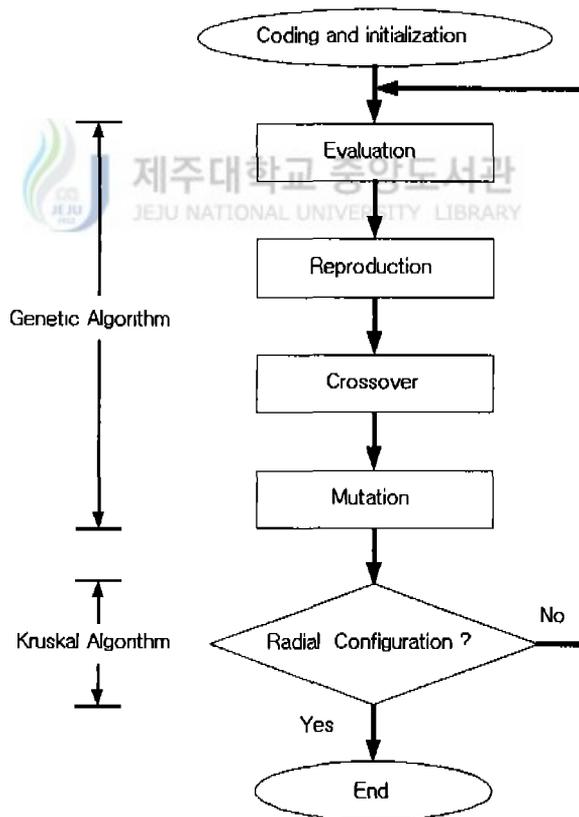


Fig. 5 Flow chart of proposed algorithm

단계 3 - 재생산(Reproduction)

적자 생존의 원리를 이용하여 높은 적합도를 가진 문자열에 대하여 다음 세대로 복제될 확률을 높게 한다.

단계 4 - 교배(Crossover)

문자열을 쌍으로 구성하여 문자열 안에 있는 유전자 정보를 서로 교환한 후 새로운 정보를 갖는 문자열을 만든다.

단계 5 - 돌연변이(Mutation)

문자열 안에 있는 유전자를 돌연한 형태로 random하게 새로운 유전정보를 갖는 문자열을 만든다.

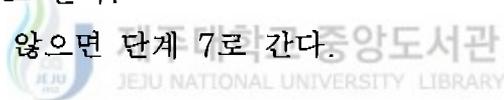
단계 6 - 방사상 구성(Radial configuration)

Kruskal 알고리즘 이용하여 생성된 자식세대에 대한 방사상 구성을 형성한다. 만일 하나의 목적함수 값 근방의 연결 선로들이 모두 가중치가 크면 방사상 구성에 실패하므로 그때는 단계 2로 간다.

그렇지 않으면 단계 7로 간다.

단계 7 - 종료

모든 세대를 수행한 후 가장 적은 가중치의 합을 갖는 세대를 찾는다.



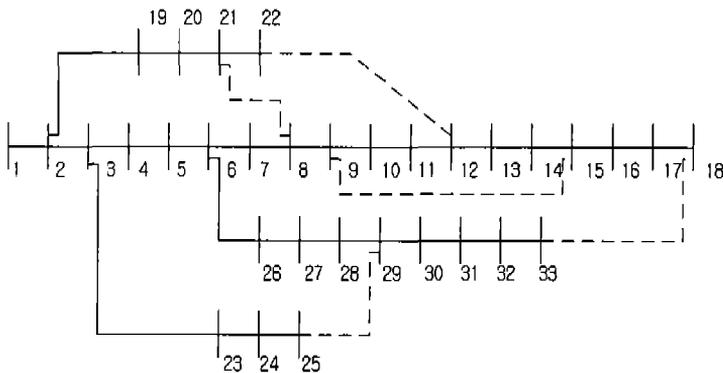
IV. 사례 연구

제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 Baran과 Wu(1989)의 32, 69모선 예제 계통에 적용을 하였다. 제안한 알고리즘은 C⁺⁺로 구현하였으며, 알고리즘 구성은 적응도 비례전략(룰렛 모델), one-point crossover방법을 사용하였고, 교배율과 돌연변이율은 온-라인(적합도의 평균값) 및 오프-라인(최대 적합도) 성능이 우수하다고 입증된 Dejong의 값[교배율(0.6), 돌연변이율(0.0333)]을 사용하였다.

그리고 식(2)의 목적함수 상에서 S_i^{\max} 는 Baran과 Wu(1989)의 값(5686.7[kVA], 4660.2[kVA])을 사용하였으며, 손실감소와 부하균형의 비중을 균일하게 두어 α 와 β 값을 0.5로 주었다.

식(4)의 적합도 평가 함수에서 적합도 조절 파라메타와 가중치 조절 파라메타는 $M=5$, $\delta=0.01$ 로 하였다.

Fig. 6에 보인 초기 32모선 예제 모델은 32개의 구분개폐기와 5개의 연계개폐기를 가지고 있으며, 전체 부하는 3715[kW], 2300[kvar]이고 기준전압은 12.66[kV]이다.



(----- : tie line)

Fig. 6 Initial configuration of 32 bus

제안한 알고리즘으로 수행 후 얻은 최적구성을 Fig. 7에 보였다. 초기 구성은 (8·21), (9·15), (12·22), (18·33), (25·29)사이의 개폐기를 열어서 구성하였는데, 알고리즘 수행 후 최적구성은 (7·8), (9·10), (14·15), (25·29), (32·33)사이의 개폐기를 열어서 구성하였다. Table 1과 Table 2에는 초기구성의 조류계산 수행 결과와 최적구성의 조류계산 수행 결과를 보였다. 그리고 Table 3에서는 초기구성의 목적함수 J값과 최적구성의 목적함수 J값을 비교하여 나타내었다.

초기구성의 손실 합은 140.22[kW]이고 최적구성의 손실 합은 106.49[kW]로 알고리즘 수행 후 손실은 33.73[kW]가 줄어 약 24.1%의 손실감소 효과가 있었고, 전압측면에서는 초기구성 최저전압이 0.9260[p.u]이고 최적구성에서의 최저전압은 0.9352[p.u]로 알고리즘 수행 후 0.0092[p.u]의 전압상승이 있었다. 그리고 목적함수 값 J는 약 29.2%의 감소가 있었다.

목적함수 상에서 손실과 부하균형의 가중치를 각각 다르게(0.7 : 0.3 또는 0.3 : 0.7) 주어도 Fig. 7의 최적구성을 얻을 수 있었다. 이것은 부하가 균형을 이루면 손실이 최소가 되고, 반대로 손실이 최소이면 부하균형이 이루어지기 때문이다.

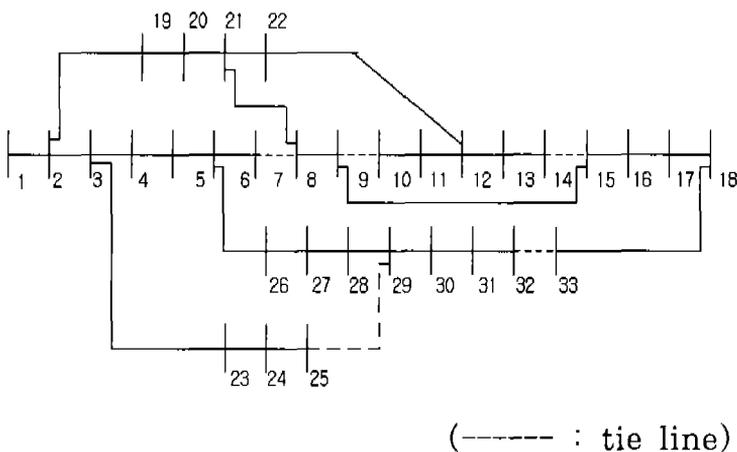


Fig. 7 Optimal configuration of 32 bus

알고리즘의 효용성을 확인하기 위하여 예제모델 초기구성을 임의로 변경하여 제안한 알고리즘을 수행하였다. 하나는 (2·3), (8·9), (9·15), (28·29), (30·31)사이의 개폐기를 열어서 구성하였고, 다른 하나는 (5·6), (10·11), (13·14), (16·17), (26·27)사이의 개폐기를 열어서 구성하였다. 역시 수행 후 얻은 최적구성은 Fig. 7과 같았다.



Table 1 Load flow result of initial 32 bus

Base Voltage = 12.66[kV] Per Unit Base = 10.00 [MVA] Max Line = 32 Max Bus = 33					
Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
1	1.0000	0.0000	0.1000	0.0600	3.5252
2	0.9974	0.0147	0.0900	0.0400	3.4252
3	0.9861	0.0977	0.1200	0.0800	3.3352
4	0.9795	0.1605	0.0600	0.0300	3.2152
5	0.9727	0.2268	0.0600	0.0200	3.1552
6	0.9560	0.1607	0.2000	0.1000	3.0952
7	0.9532	-0.0242	0.2000	0.1000	2.8952
8	0.9495	0.0013	0.0600	0.0200	2.6952
9	0.9438	-0.0611	0.0600	0.0200	2.6352
10	0.9386	-0.1130	0.0450	0.0300	2.5752
11	0.9378	-0.1072	0.0600	0.0350	2.5302
12	0.9365	-0.0984	0.0600	0.0350	2.4702
13	0.9313	-0.1806	0.1200	0.0800	2.4102
14	0.9299	-0.2400	0.0600	0.0100	2.2902
15	0.9288	-0.2662	0.0600	0.0200	2.2302
16	0.9278	-0.2815	0.0600	0.0200	2.1702
17	0.9266	-0.3245	0.0000	0.0000	2.1102
18	0.9260	-0.3338	0.0900	0.0400	2.1102
19	0.9965	-0.0018	0.0900	0.0400	3.3352
20	0.9894	-0.1147	0.0900	0.0400	3.2452
21	0.9877	-0.1564	0.0000	0.0000	3.1552
22	0.9735	-1.5674	0.4200	0.2000	3.1552
23	0.9843	0.0806	0.4200	0.2000	2.9152
24	0.9838	0.0731	0.0000	0.0000	2.4952
25	0.9834	0.0659	0.0600	0.0250	2.4952
26	0.9543	0.2001	0.0600	0.0200	3.0352
27	0.9520	0.2568	0.1200	0.0700	2.9752
28	0.9427	0.3678	0.2000	0.6000	2.8552
29	0.9394	0.3172	0.1500	0.0700	2.6552
30	0.9383	0.3177	0.2100	0.1000	2.5052
31	0.9376	0.3100	0.0600	0.0400	2.2952
32	0.9376	0.3100	0.0000	0.0000	2.2352
33	0.9376	0.3100	0.0000	0.0000	2.2352
Total Real Power Loss : 0.014022 [p.u] [pu]*PerUnitBase = 140.22 [kW]					

Table 2 Load flow result of optimal 32 bus

Base Voltage = 12.66[kV] Per Unit Base = 10.00 [MVA] Max Line = 32 Max Bus = 33					
Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
1	1.0000	0.0000	0.1000	0.0600	3.4915
2	0.9974	0.0158	0.0900	0.0400	3.3915
3	0.9889	0.1027	0.1200	0.0800	3.3015
4	0.9844	0.1680	0.0600	0.0300	3.1815
5	0.9799	0.2368	0.0600	0.0200	3.1215
6	0.9684	0.2561	0.2000	0.1000	3.0615
7	0.9678	0.2161	0.2000	0.1000	2.8615
8	0.9682	-0.5494	0.0600	0.0200	2.9215
9	0.9659	-0.5863	0.0600	0.0200	3.0015
10	0.9375	-3.1967	0.0450	0.0300	3.0615
11	0.9376	-3.1979	0.0600	0.0350	3.0765
12	0.9379	-3.2025	0.0600	0.0350	3.0165
13	0.9355	-3.2334	0.1200	0.0800	2.6515
14	0.9352	-3.2487	0.0600	0.0100	2.5315
15	0.9621	-0.6863	0.0600	0.0200	2.4715
16	0.9612	-0.7006	0.0600	0.0200	3.3315
17	0.9600	-0.7406	0.0000	0.0000	3.2715
18	0.9594	-0.7493	0.0900	0.0400	3.2715
19	0.9954	-0.0185	0.0900	0.0400	3.1815
20	0.9786	-0.2785	0.0900	0.0400	2.4015
21	0.9740	-0.3900	0.0000	0.0000	2.3115
22	0.9451	-3.0774	0.4200	0.2000	2.3115
23	0.9871	0.0856	0.4200	0.2000	2.6415
24	0.9867	0.0783	0.0000	0.0000	2.2215
25	0.9862	0.0710	0.0600	0.0250	2.2215
26	0.9667	0.2946	0.0600	0.0200	2.1615
27	0.9645	0.3498	0.1200	0.0700	2.1015
28	0.9553	0.4579	0.2000	0.6000	1.9815
29	0.9521	0.4086	0.1500	0.0700	1.7815
30	0.9510	0.4091	0.2100	0.1000	3.1215
31	0.9503	0.4017	0.0600	0.0400	2.7115
32	0.9503	0.4017	0.0000	0.0000	3.1215
33	0.9594	-0.7493	0.0000	0.0000	2.4715
Total Real Power Loss = 0.010649 [p.u]					
[pu]*PerUnitBase = 106.49 [kW]					

Table 3 Comparison table of objective function J between initial and optimal configuration of 32 bus

s. n	r. n	초기 32모선 J	최적 32모선 J
1	2	7.030222996	7.043557704
2	3	24.91014296	13.36123324
3	4	9.652122366	3.817562388
4	5	9.115699123	3.364984101
5	6	18.63296628	6.535331516
6	7	1.023570405	0.034727194
7	8	2.407651454	0
8	9	2.068937905	0.619662527
9	10	1.78299445	0
10	11	0.298182781	0.00288478
11	12	0.454532268	0.017953084
12	13	1.339475582	0.22979178
13	14	0.375111943	0.03980574
14	15	0.182725824	0
15	16	0.143614282	0.229948317
16	17	0.127585995	0.245059936
17	18	0.027260135	0.07563497
2	19	0.090374714	1.208046913
19	20	0.421250069	8.883995256
20	21	0.052939392	2.156788585
21	22	0.218751828	0.597478831
3	23	1.638189045	1.62662038
23	24	2.618171491	2.598988134
24	25	0.657487273	0.652636618
6	26	1.408928031	1.227579976
26	27	1.744454683	1.510036114
27	28	5.620546047	4.814251021
28	29	3.996055014	3.402833152
29	30	2.046999217	1.72007307
30	31	0.806485414	0.556287638
31	32	0.112603441	0.063150468
32	33	0.006971216	0
8	21	0	2.786887652
9	15	0	1.029582306
12	22	0	1.080197515
18	33	0	0.00946959
25	29	0	0
합 계		101.0130036	71.54304049

위에서 보인 사례연구의 예제 모델에 지금까지 많은 사람들이 자신이 제안한 알고리즘을 적용하였는데, 그들의 제안한 알고리즘으로 수행한 결과중 대표적인 것과 본 논문에서 제안한 알고리즘으로 수행한 결과를 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Comparison table with the result of previous studys

수행 방법	최적 구성시 개방된 개폐기	손실[kW]
분기 교환법	(8 · 21)(9 · 14)(11 · 12) (27 · 28)(30 · 31)	146.82
Tabu 탐색법	(8 · 9)(8 · 21)(13 · 14) (16 · 17)(23 · 24)	116.47
제안한 방법	(7 · 8)(9 · 10)(14 · 15) (25 · 29)(32 · 33)	106.49

Fig. 8에 보인 초기 69모선 예제 모델은 69개의 구분개폐기와 5개의 연계개폐기를 가지고 있으며, 전체 부하는 3802.19[kW], 2694.6[kvar] 이고 기준전압은 12.66[kV]이다.

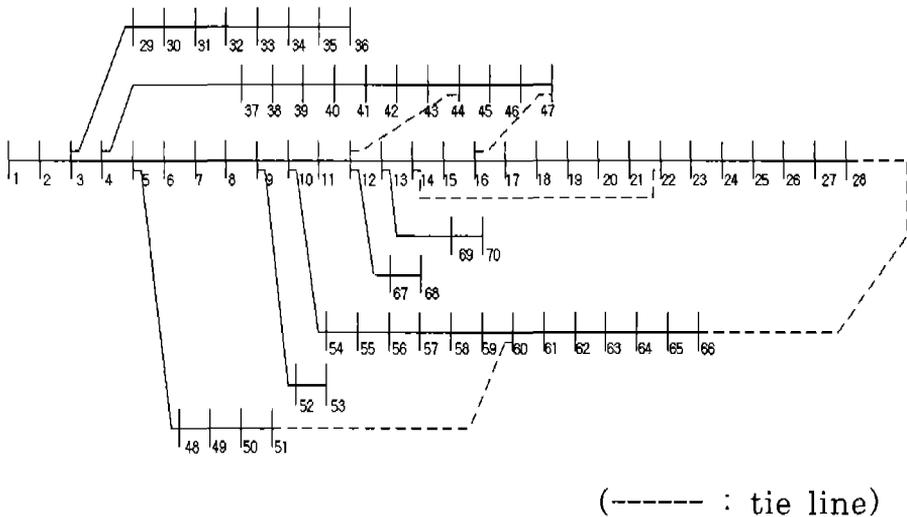


Fig. 8 Initial configuration of 69 bus

제안한 알고리즘으로 수행 후 얻은 최적구성을 Fig. 9에 보였다. 초기 구성은 (12·44), (14·22), (16·47), (28·66), (51·60)사이의 개폐기를 열어서 구성했는데, 알고리즘 수행 후 최적구성은 (12·44), (14·22), (15·16), (59·60), (62·63)사이의 개폐기를 열어서 구성하였다.

Table 5와 Table 6에는 초기구성의 조류계산 수행 결과와 최적구성의 조류계산 수행 결과를 보였다. 그리고 Table 7에서는 초기구성의 목적함수 J값과 최적구성의 목적함수 J값을 비교하여 나타내었다.

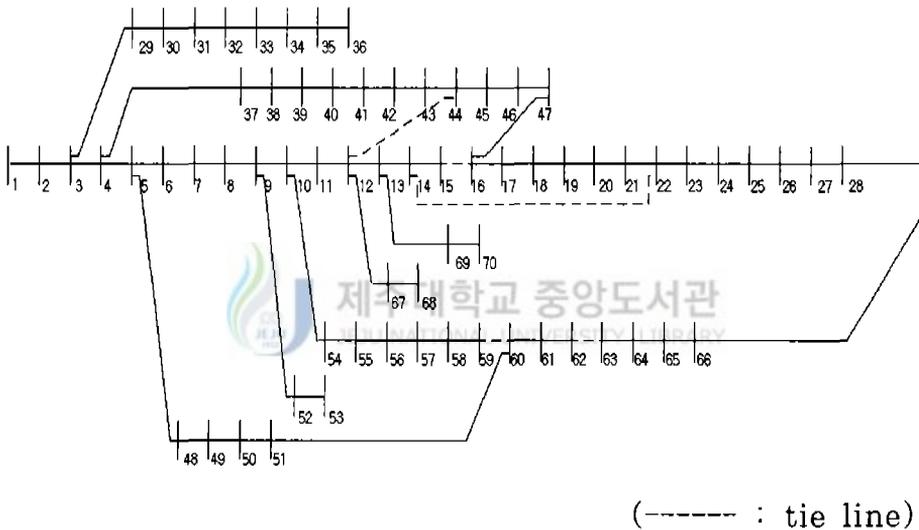


Fig. 9 Optimal configuration of 69 bus

Table 5 Load flow result of initial 69 bus

Base Voltage = 12.66[kV] Per Unit Base = 10.00 [MVA] Max Line = 69 Max Bus = 70					
Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.4534
2	1.0000	-0.0011	0.0000	0.0000	3.4534
3	0.9999	-0.0021	0.0000	0.0000	3.4534
4	0.9999	-0.0031	0.0000	0.0000	3.4534
5	0.9998	-0.0061	0.0000	0.0000	3.4534
6	0.9991	-0.0181	0.0000	0.0000	3.4534
7	0.9906	0.0466	0.0026	0.0022	3.4508
8	0.9817	0.1150	0.0404	0.0300	3.4104
9	0.9796	0.1314	0.0750	0.0540	3.3354
10	0.9785	0.1397	0.0300	0.0220	3.3054
11	0.9739	0.2172	0.0280	0.0190	3.2774
12	0.9729	0.2343	0.1405	0.1040	3.1324
13	0.9700	0.2826	0.1405	0.1040	2.9874
14	0.9672	0.3268	0.0080	0.0055	2.9794
15	0.9644	0.3707	0.0080	0.0055	2.9714
16	0.9617	0.4142	0.0000	0.0000	2.9714
17	0.9612	0.4223	0.0455	0.0300	2.9259
18	0.9603	0.4367	0.0600	0.0350	2.8659
19	0.9603	0.4358	0.0600	0.0350	2.8059
20	0.9599	0.4436	0.0000	0.0000	2.8059
21	0.9596	0.4486	0.0010	0.0006	2.8049
22	0.9593	0.4567	0.1140	0.0810	2.6909
23	0.9592	0.4568	0.0053	0.0035	2.6856
24	0.9591	0.4578	0.0000	0.0000	2.6856
25	0.9590	0.4600	0.0280	0.0200	2.6576
26	0.9589	0.4616	0.0000	0.0000	2.6576
27	0.9589	0.4622	0.0140	0.0100	2.6436
28	0.9589	0.4622	0.0000	0.0000	2.6436
29	0.9999	-0.0023	0.0260	0.0186	3.4274
30	0.9999	-0.0047	0.0260	0.0186	3.4014
31	0.9998	-0.0029	0.0000	0.0000	3.4014
32	0.9997	-0.0025	0.0000	0.0000	3.4014
33	0.9997	-0.0009	0.0000	0.0000	3.4014
34	0.9994	0.0029	0.0140	0.0100	3.3874
35	0.9992	0.0075	0.0195	0.0140	3.3679

(to be continued)

Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
36	0.9992	0.0075	0.0000	0.0000	3.3679
37	0.9999	-0.0035	0.0260	0.0186	3.4274
38	0.9998	-0.0084	0.0260	0.0186	3.4014
39	0.9997	-0.0101	0.0000	0.0000	3.4014
40	0.9996	-0.0105	0.0240	0.0170	3.3774
41	0.9996	-0.0106	0.0240	0.0170	3.3534
42	0.9973	0.0578	0.0012	0.0010	3.3522
43	0.9972	0.0553	0.0000	0.0000	3.3522
44	0.9972	0.0550	0.0060	0.0043	3.3462
45	0.9972	0.0549	0.0000	0.0000	3.3462
46	0.9971	0.0540	0.0392	0.0263	3.3070
47	0.9971	0.0540	0.0000	0.0000	3.3070
48	0.9998	-0.0071	0.0000	0.0000	3.4534
49	0.9991	-0.0316	0.0790	0.0564	3.3744
50	0.9972	-0.1009	0.3847	0.2745	2.9897
51	0.9972	-0.1009	0.0000	0.0000	2.9897
52	0.9796	0.1316	0.0405	0.0283	3.3699
53	0.9796	0.1316	0.0000	0.0000	3.3699
54	0.9759	0.1609	0.0043	0.0035	3.3310
55	0.9727	0.1856	0.0264	0.0190	3.3046
56	0.9684	0.2200	0.0240	0.0172	3.2806
57	0.9642	0.2537	0.0000	0.0000	3.2806
58	0.9427	0.6345	0.0000	0.0000	3.2806
59	0.9320	0.8287	0.0000	0.0000	3.2806
60	0.9279	0.9062	0.1000	0.0720	3.1806
61	0.9231	1.0061	0.0000	0.0000	3.1806
62	0.9160	1.0720	1.2440	0.8880	1.9366
63	0.9158	1.0742	0.0320	0.0230	1.9046
64	0.9155	1.0771	0.0000	0.0000	1.9046
65	0.9140	1.0912	0.2270	0.1620	1.6776
66	0.9140	1.0912	0.0000	0.0000	1.6776
67	0.9729	0.2349	0.0180	0.0130	3.2594
68	0.9729	0.2349	0.0000	0.0000	3.2594
69	0.9698	0.2856	0.0280	0.0200	3.1044
70	0.9698	0.2856	0.0000	0.0000	3.1044

Total Real Power Loss : 0.020368 [p.u]
[pu]*PerUnitBase = 203.68 [kW]

Table 6 Load flow result of optimal 69 bus

Base Voltage = 12.66[kV] Per Unit Base = 10.00 [MVA] Max Line = 69 Max Bus = 70					
Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.3214
2	1.0000	-0.0010	0.0000	0.0000	3.3214
3	0.9999	-0.0020	0.0000	0.0000	3.3214
4	0.9999	-0.0030	0.0000	0.0000	3.3214
5	0.9999	-0.0052	0.0000	0.0000	3.3214
6	0.9997	-0.0078	0.0000	0.0000	3.3214
7	0.9977	0.0092	0.0026	0.0022	3.3188
8	0.9957	0.0269	0.0404	0.0300	3.2784
9	0.9952	0.0308	0.0750	0.0540	3.2034
10	0.9950	0.0325	0.0300	0.0220	3.1734
11	0.9926	0.0756	0.0280	0.0190	3.1454
12	0.9921	0.0848	0.1405	0.1040	3.0004
13	0.9911	0.1036	0.1405	0.1040	2.8554
14	0.9909	0.1057	0.0080	0.0055	2.8474
15	0.9909	0.1068	0.0080	0.0055	3.1750
16	0.9608	0.8792	0.0000	0.0000	3.1750
17	0.9599	0.8949	0.0455	0.0300	3.1295
18	0.9583	0.9227	0.0600	0.0350	3.0695
19	0.9582	0.9230	0.0600	0.0350	3.0095
20	0.9571	0.9436	0.0000	0.0000	3.0095
21	0.9564	0.9568	0.0010	0.0006	3.0085
22	0.9552	0.9783	0.1140	0.0810	2.8945
23	0.9552	0.9789	0.0053	0.0035	2.8892
24	0.9548	0.9861	0.0000	0.0000	2.8892
25	0.9540	1.0019	0.0280	0.0200	2.8612
26	0.9523	1.0328	0.0000	0.0000	2.8612
27	0.9516	1.0456	0.0140	0.0100	2.8472
28	0.9512	1.0524	0.0000	0.0000	2.8472
29	0.9999	-0.0022	0.0260	0.0186	3.2954
30	0.9999	-0.0046	0.0260	0.0186	3.2694
31	0.9998	-0.0028	0.0000	0.0000	3.2694
32	0.9998	-0.0024	0.0000	0.0000	3.2694
33	0.9997	-0.0008	0.0000	0.0000	3.2694
34	0.9994	0.0030	0.0140	0.0100	3.2554
35	0.9992	0.0076	0.0195	0.0140	3.2359

(to be continued)

Bus No.	V	Angle [degree]	PL	QL	Real Power
36	0.9992	0.0076	0.0000	0.0000	3.2359
37	0.9999	-0.0052	0.0260	0.0186	3.2954
38	0.9991	-0.0356	0.0260	0.0186	3.2694
39	0.9982	-0.0494	0.0000	0.0000	3.2694
40	0.9980	-0.0534	0.0240	0.0170	3.2454
41	0.9980	-0.0537	0.0240	0.0170	3.2214
42	0.9652	0.9227	0.0012	0.0010	3.2202
43	0.9629	0.8854	0.0000	0.0000	3.2202
44	0.9629	0.8805	0.0060	0.0043	3.2142
45	0.9629	0.8791	0.0000	0.0000	3.2142
46	0.9617	0.8636	0.0392	0.0263	3.1750
47	0.9617	0.8635	0.0000	0.0000	3.1750
48	0.9997	-0.0091	0.0000	0.0000	3.3214
49	0.9970	-0.1056	0.0790	0.0564	3.2424
50	0.9882	-0.4234	0.3847	0.2745	2.8577
51	0.9863	-0.4945	0.0000	0.0000	2.8577
52	0.9952	0.0311	0.0405	0.0283	3.2379
53	0.9952	0.0311	0.0000	0.0000	3.2379
54	0.9949	0.0333	0.0043	0.0035	3.1991
55	0.9949	0.0340	0.0264	0.0190	3.1727
56	0.9948	0.0345	0.0240	0.0172	3.1487
57	0.9948	0.0345	0.0000	0.0000	3.1487
58	0.9948	0.0345	0.0000	0.0000	3.1487
59	0.9948	0.0345	0.0000	0.0000	3.1487
60	0.9844	-0.5658	0.1000	0.0720	2.8577
61	0.9806	-0.4926	0.0000	0.0000	2.8577
62	0.9751	-0.4443	1.2440	0.8880	1.6137
63	0.9482	1.0834	0.0320	0.0230	2.5882
64	0.9483	1.0830	0.0000	0.0000	2.6202
65	0.9485	1.0811	0.2270	0.1620	2.6202
66	0.9509	1.0592	0.0000	0.0000	2.8472
67	0.9921	0.0854	0.0180	0.0130	3.1274
68	0.9921	0.0854	0.0000	0.0000	3.1274
69	0.9909	0.1065	0.0280	0.0200	2.9724
70	0.9909	0.1065	0.0000	0.0000	2.9724

Total Real Power Loss : 0.007176 [p.u]
[pu]*PerUnitBase = 71.76 [kW]

Table 7 Comparison table of objective function J between initial and optimal configuration of 69 bus

s. n	r. n	초기 69모선 J	최적 69모선 J
1	2	5.034318763	5.034318763
2	3	5.034320934	4.689086657
3	4	4.762236511	4.427739845
4	5	4.388019276	2.713997172
5	6	3.320175505	0.211676889
6	7	14.98798686	0.944921243
7	8	15.7053801	0.972962911
8	9	5.513492561	0.312421608
9	10	3.705868963	0.152197098
10	11	2.542597802	0.774229433
11	12	0.684296715	0.197558245
12	13	1.183298845	0.177341338
13	14	0.67412597	0.001322635
14	15	0.655801026	0.000334899
15	16	0.637181657	0
16	17	0.149925357	0.520208643
17	18	0.188619858	0.752327187
18	19	0.020055609	0.099845894
19	20	0.062677319	0.435581226
20	21	0.044156163	0.306881065
21	22	0.06428693	0.450807904
22	23	0.001569578	0.050638248
23	24	0.003650323	0.137360552
24	25	0.00666412	0.251590354
25	26	0.00328664	0.420281715
26	27	0.001516342	0.193766132
27	28	0.0002425	0.112976889
3	29	0.003079799	0.003079798
29	30	0.002778335	0.002778332
30	31	0.003450481	0.003450474
31	32	0.00105344	0.001053439
32	33	0.003108702	0.003108696
33	34	0.006683482	0.006683468
34	35	0.005425662	0.005425651
35	36	0.000251589	0.000251589
4	37	0.012468044	0.237430611
37	38	0.016204365	0.392070875

(to be continued)

s.n	r.n	초기 69모선 J	최적 69모선 J
38	39	0.014705008	0.476668788
39	40	0.008553733	0.277067864
40	41	0.004158604	0.188199965
41	42	0.247544686	18.48532191
42	43	0.012513806	0.952072566
43	44	0.003726595	0.274538095
44	45	0.002312309	0.191068021
45	46	0.005115135	0.43867137
46	47	0.000519758	0.152187592
5	48	0.261644526	1.591703993
48	49	0.539339852	3.287652482
49	50	1.021960682	7.091835001
50	51	0.109370188	1.981777546
9	52	0.001545316	0.001382457
52	53	2.65028E-05	2.58842E-05
10	54	3.561105271	0.003562789
54	55	3.981141994	0.003352137
55	56	5.04218435	0.000982367
56	57	4.892623334	0
57	58	24.20743888	0
58	59	12.68412697	0
59	60	5.552247582	0
60	61	6.049316268	3.464303666
61	62	7.794598338	4.42790953
62	63	0.090440174	0
63	64	0.09501767	0
64	65	0.3561176	0.211561129
65	66	0.021639034	0.477269197
12	67	0.001762284	0.001713554
67	68	0.000121155	0.000120865
13	69	0.012717878	0.012239644
69	70	0.000291093	0.000290332
12	44	0	0
16	47	0	0.133143834
14	22	0	0
28	66	0	0.028415517
51	60	0	0.537880602
합	계	146.0061827	69.69062618

초기구성의 손실 합은 203.68[kW]이고 최적구성의 손실 합은 71.76[kW]로 알고리즘 수행 후 손실은 131.98[kW]가 줄어 약 64.8%의 손실감소 효과가 있었고, 전압측면에서는 초기구성 최저전압이 0.9140[p.u]이고 최적구성에서의 최저전압은 0.9482[p.u]로 알고리즘 수행 후 0.0342[p.u]의 전압상승이 있었다. 그리고 목적함수 값 J 는 약 52.3%의 감소가 있었다.

초기의 구성을 임의로 변경하여 수행한 결과도 동일하였다.

Baran과 Wu(1989)의 32, 69모선 예제 계통을 통한 사례 연구에서 배전계통의 손실을 감소시키고 제약조건을 만족하는 구성을 찾기 위하여 전역적 최적화 기법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 방사상 구성을 찾기 위한 Kruskal 알고리즘을 혼합하여 적용함으로써 우수한 수렴성을 보였다.



V. 결 론

본 논문에서는 전역 최적해 탐색 및 여러 해의 동시 탐색이 가능하고 다중 해를 갖는 비선형성이 강한 시스템에도 적용 가능하다는 이점을 가지고 있는 유전 알고리즘과 최소 가중치의 합을 갖는 신장나무를 구하는 Kruskal 알고리즘을 이용하여 배전계통 재구성 방안을 제안하였다.

배전계통 재구성은 선로용량이나 전압, 방사상 구성 등의 제약조건을 만족하면서 손실과 부하균형의 향으로 이루어진 목적함수를 최소화 하도록 스위치들의 개, 폐 상태를 결정하는 것으로서 목적함수의 최소화에는 유전 알고리즘을, 방사상 계통의 구성에는 Kruskal 알고리즘을 적용하였다.

제안한 알고리즘을 32모선과 69모선의 모델계통에 적용시킨 결과 목적함수를 최소화하는 최적구성을 얻을 수 있었으며 계통의 초기 구성을 임의로 변경시켜 알고리즘을 수행하여도 동일한 최적구성에 도달함으로써 제안한 알고리즘이 국부적 탐색에 빠지지 않고 전역적인 탐색이 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 제시한 알고리즘과 분기교환법이나 타부 탐색법 등 기존의 연구 결과와의 직접적인 비교를 통하여 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

본 논문의 재구성 알고리즘은 실제 배전계통에의 적용 가능성을 확인한 것으로서 대규모 배전계통에 대한 충분한 사례검토를 통하여 에너지 손실의 최소화나 연계점의 결정, 사고 발생을 대비한 최적계통의 구성 등에 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- Mesut E. Baran and Felix F. Wu, April 1989, Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401 - 1407.
- M. E. Baran and F. F. Wu, January 1989, Optimal capacitor placement on radial distribution system, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1.
- K. Nara, et al, August 1992, Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration, IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, No. 3.
- M. Stanic and D. Avakumovic, 1996, Genetic Algorithms in Optimization of Real Sized Distribution Networks, Proceedings of the Hydroinformatics, Vol. 2.
- Ruey-Shun Chen, Chin Ching Chiu and Y. S. Yeh, 1998, A Genetic Algorithm for the Reliability Optimization of a Distributed System, IEEE Computer Society, pp. 484-489.
- K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kanezashi, October 1987, Outage state optimal load allocation by automatic sectionalizing switches operation in distribution systems, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, pp. 1177-1185.

- S. J. Lee, S. I. Lim and B. S. Ahn, August 1988, Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163.
- D. Shirmohammadi and H. Wayne Hong, April 1989, Reconfiguration of electric distribution networks for resistive losses reduction, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1402-1498.
- H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, July 1990, Optimal Network Reconfigurations in Distribution System: Part 2: A Solution Algorithm and Numerical Results, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 5. No. 3.
- 장경일, 최상열, 신명철, 남기영, 박남옥, July 1999, 손실 최소화를 위한 배전계통 재구성의 Tabu Search 기법 적용, 대한전기학회, pp. 1459-1461.
- Kwang. Y. Lee and Frank F. Yang, February 1998, Optimal Reactive Power Planning Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Study for Evolutionary Programming, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithm, and Linear Programming, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1.
- S. K. Goswami and S. K. Basu, July 1992, A New Algorithm for Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1490.

Vladimiro Miranda, J. V. Ranito and L. M. Proença,
November 1994, Genetic Algorithms in Optimal
Multistage Distribution Network Planning, IEEE
Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4.

Debra A. Ajenblit and Roger L. Wainwright, 1998, Applying
Genetic Algorithms to the U-Shaped Assembly Line
Balancing Problem, IEEE International Conference on
Evolutionary Computation, pp. 96-101.

G.B. Jasmon and L.H.C.C. Lee, November 1991, Stability of
load flow techniques for distribution system voltage
stability analysis, IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. 6,
pp. 479 - 484.



감사의 글

한 걸음 한 걸음 걸음마를 내딛었었던 대학원 생활이 어느덧 그 끝자락에 다다랐습니다.

짧다면 짧고 길다면 길게 느껴지는 지난 2년 여 동안 저의 논문이 결실을 맺기까지 자상한 지도와 조언을 아끼시지 않으시고 물심양면으로 사랑을 주신 김세호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 대학원 생활동안 따뜻한 격려와 가르침을 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님께 감사를 드립니다.

저의 논문을 준비하는 동안 대학원생활과 조교생활을 무리없이 할 수 있도록 도와준 이용호 선생님, 문상호 선생님과 언제나 우정을 같이한 홍문석, 한성훈, 진충민, 김용현, 이승현 군에게 감사를 드리며 연구 진행 과정에 많은 도움을 준 입대관, 장승필 학형과 전력계통 실험실의 한승효, 양형석, 문원실 학우에게도 고마움을 전합니다.

자상한 보살핌과 용기를 주셨던 장모님, 형님과 처형 내외분들, 이모부와 삼촌 내외분들께도 감사의 뜻을 전하며 이러한 결실을 맺기까지 고민을 함께 나누고 인내와 정성을 다해 뒷받침 해 준 사랑하는 나의 반려자에게도 말로는 표현할 수 없는 고마움을 전합니다.

끝으로 저를 믿어주시고 말없이 묵묵히 지켜봐 주시는 장인어른의 영전에 이 작은 결실을 바치며 저의 인생에 등대가 되어 주시고 언제나 저를 보답없는 희생과 사랑으로 보살펴 주신 부모님께 이 모든 공을 돌립니다.

1999년 12월

안진오 올림