

Reactive Tabu Search 알고리즘을 이용한 배전계통의 손실 최소화

(Loss Minimization In Distribution Systems Using Reactive Tabu Search)

최상열* · 장경일 · 신명철

(Sany - Yule Choi · Kyung - Il Jang · Myong - Chul Shin)

요 약

본 논문은 경험적인 탐색방법인 Reactive Tabu Search를 배전계통의 최적 재구성에 적용하였다. 일반적으로 Tabu search는 기울기가 감소하는 방향으로 탐색을 하기 때문에 적은 계산 시간으로 좋은 해를 얻을 수 있지만 초기의 계통 구성에 따라 수렴의 특성이 좌우되어 전역적인 최소해를 찾기가 어려운 단점이 있다. 반면 RTS(Reactive Tabu search)는 reaction과 escape 메커니즘을 제공함으로써 파라미터 선정을 자동적으로 적용시키는 것이 가능하여 계통의 초기 구성에 관계 없이 전역적인 해를 적은 계산량으로도 찾을 수 있다. 본 연구에서는 RTS의 reaction과 escape 메커니즘 구현을 위하여 해싱 함수를 이용하였고 또한 제시된 방식을 32모선에 적용, 기존의 참고문헌과 비교함으로써 그 유용성을 입증하였다.

Abstract

Network reconfiguration in distribution systems is realized by changing the status of sectionalizing switches, and is usually done for loss minimization or load balancing in the system. This paper presents an approach for loss minimization in distribution systems using reactive tabu search. Tabu search attempts to determine a better solution in the manner of a greatest-descent algorithm, but it can not give any guarantee for the convergence property. Reactive tabu search can give convergence property by using reaction and escape mechanism. Therefore, it can find global optimal solution regardless of initial system configuration. To demonstrate the validity of the proposed algorithm, numerical calculations are carried out the 32 bus system models.

Key Words : Loss Minimization, Distribution Systems, Reactive Tabu Search

1. 서 론

생활양식의 변화로 고소비형 전력부하가 증가되

* 주저자 : 안양대학교 디지털미디어학부 전임강사
Tel : 031-467-0942, Fax : 031-467-0942
E-mail : ppk99@aycc.anyang.ac.kr
접수일자 : 2003년 6월 9일
1차심사 : 2003년 6월 16일, 2차심사 : 2003년 7월 8일
심사완료 : 2003년 7월 30일

고 있는 반면 이에 따른 전력설비의 증설은 점점 어려워지고 있다. 따라서 설비를 증설시키지 않고도 기존 설비의 이용률 향상을 통해 증가되는 전력수요에 부응하기 위한 배전선로 손실최소화에 대한 필요성이 점점 증대되고 있다.

배전계통의 손실을 최소화하기 위한 알고리즘으로, Baran 등[2]과 Cinvanlar 등[3]은 개폐기 조작을

통해 손실변화량을 계산하는 근사적인 조류계산 방식을 제시하였고, Goswami 등[4]이 KVL 과 KCL (Kirchhoff의 전압, 전류 법칙)을 이용하여 손실감소를 위한 배전계통 재구성의 알고리즘을 제안하였다. 그리고 McDermott 등[7]은 전역적인 최적해를 얻기 위하여 개선된 분기 한정법(Branch and Bound)을 이용하였다. 또한 인공지능 기법인 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)[8]과 유전알고리즘(Genetic Algorithm)[9] 그리고 Tabu Search와의 혼합 알고리즘[1]등이 배전계통의 최적구성에 적용되었다. 그러나 이와같이 제시된 수치해석적인 방법은 많은 계산량이 요구되어 대규모의 계통에 적용이 어렵고, 인공지능을 기반으로 하는 휴리스틱 탐색방식에서는 파라미터 선정에 따라 결과가 좌우되는 단점 때문에 계통 전체가 아닌 일부의 선로 구간에서만 최적이되는 지역 최적해에 빠지기 쉬운 단점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해, Reaction과 Escape 메커니즘이 포함되어 파라미터 선정을 자동적으로 적용시켜서 전역적인 해를 적은 계산량으로도 찾을 수 있는 RTS(Reactive Tabu Search) 알고리즘을 배전계통의 손실최소화에 적용하였다. 그리고 제시된 방식의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌[2]에서 제시된 모델 계통에 적용하였다.

2. RTS 알고리즘을 이용한 배전계통의 재구성

2.1 목적함수 및 제약조건

배전계통에서의 손실최소화 문제는 배전계통에서 부하 불평형 또는 중부하가 발생하는 피더를 확인한 후 구분 개폐기와 연계 개폐기를 조작하여 유효전력 손실을 나타내는 목적 함수값을 최소화시킬 수 있도록 선로 재구성을 수행하는 것이다. 이때 방사상 선로구성, 전류등의 제약조건은 만족되어야 한다.

2.1.1 목적함수

목적함수는 다음의 (1)식과 같이 모든 선로 손실의 합으로 간단히 표현될 수 있다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (1)$$

P_i, Q_i : 선로 구간 i 에서의 유효 및 무효 전력
 ub_i : 선로 구간 i 에서의 선로 저항
 V_i : i 번째 부하노드의 전압

2.1.2 제약조건

● 선로 전류 제약조건

특정 선로구간으로 유입되는 전류는 해당 선로구간 도체의 허용 전류 용량을 초과해서는 않된다.

$$I_k \leq I_k^{\max} \quad k=0, 1, \dots, n \quad (2)$$

여기서 I_k : k 번째 선로구간의 유입전류

I_k^{\max} : k 선로 구간 도체의 허용 전류 용량

● 방사상 구성 제약조건

배전계통의 구성은 루프(Loop)식으로 구성되어 있지만 운전은 방사상(Radial)으로 한다. 따라서 재구성 후, 최소 손실을 가지는 배전계통의 구성 형태는 최소 걸침 나무(Minimum Spanning Tree)형태에 해당되며 이를 확인하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$S=N-1 \quad (3)$$

여기서 S 는 닫혀있는 개폐기의 개수이고 N 은 모선의 개수이다.

2.2 Tabu Search

1989년 Glover에 의해 현재의 형태로 제시된 Tabu Search 알고리즘은 메모리를 효율적으로 사용하는 경험적인 최적화 기법으로 전역적인 탐색기능은 약하지만 빠른 시간안에 국부적 탐색(local search)이 가능한 알고리즘이다[11].

Tabu Search 알고리즘에서는 Tabu List에 과거에 탐색된 결과로 얻어진 해를 저장하여 탐색 진행 시 Tabu List에 포함된 해로 되돌아가는 것을 금지함으로써 같은 해를 탐색하는 순환을 방지하고 부분 최적해를 벗어날 수 있도록 해준다. Tabu Search 알고리즘의 기본 과정은 초기해 설정 후 이웃해를 탐색하여 이웃해 중 Tabu List에 없거나 Tabu List에

Reactive Tabu Search 알고리즘을 이용한 배전계통의 손실 최소화

있지만 열망조건을 만족하는 이웃해 중 가장 좋은 해를 새로운 현재해로 만들고, 이것을 Tabu List에 일정기간 기록해 둔다. 이 과정을 주어진 반복 횟수 만큼 반복하면서 가장 우수한 해를 출력하는 것이다. 이 때 열망조건이란 선택된 이웃해가 비록 Tabu List에 기록되어 있더라도 이를 일시적으로 수용할 수 있는 기준을 의미한다. 즉, 좋은 해를 얻기 위한 Tabu 제약 조건이 오히려 좋은 해가 있을 수 있는 곳으로 움직이는 것을 방해 할 수 있으므로 이러한 한계를 극복하기 위해 어떤 때에는 Tabu조건을 무시할 수 있는 조건이 필요하며 이러한 조건을 열망 조건이라고 한다[10-11].

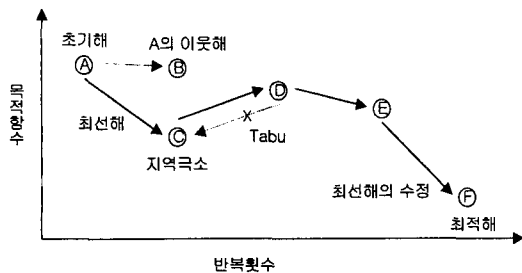


그림 1. Tabu Search의 개념도
Fig. 1. Conception diagram of Tabu Search

그림 1과 같이 Tabu 탐색은 목적함수가 감소하는 방향으로 이동한다.

2.3 Reactive Tabu Search

Tabu List의 중요한 역할은 Tabu 조건과 선택규칙들 안에서 이전에 방문했던 해를 다시 방문하지 않게 하는 것이다. 이때 Tabu List의 길이가 너무 작을 경우, 탐색되었던 해를 재차 탐색을 방지하는 제약이 약해지므로 한 번 탐색했던 곳이라도 자주 재탐색하게 되어 순환을 방지하는 역할이 제대로 수행되지 않는다. 반면에 크기가 너무 클 경우, 순환은 없어지지만 너무 많은 제약과 다양한 공간의 탐색이 존재하여 세부적인 탐색이 어려워진다. 따라서 적절한 Tabu List 크기 선정은 순환의 방지와 세부적인 탐색 차원에서 매우 중요하다. 그러나 일반적인 Tabu Search에서는 각 문제에 대해 Tabu List의 크

기가 고정됨에 따라 그 크기에 의존하여 성능이 결정되는 단점이 있다. 이에 반하여 Reactive Tabu Search는 현재의 진행과정 및 문제의 크기에 맞게 Tabu List 크기를 자동으로 적용시키고 이러한 메커니즘이 충분하지 않을 때 다양화 탐색을 위해 탈출을 하는 방법이 추가되어 기존의 Tabu 탐색의 기능을 강화시킨다. 이러한 Reactive Tabu 탐색순서도는 그림 2와 같다.

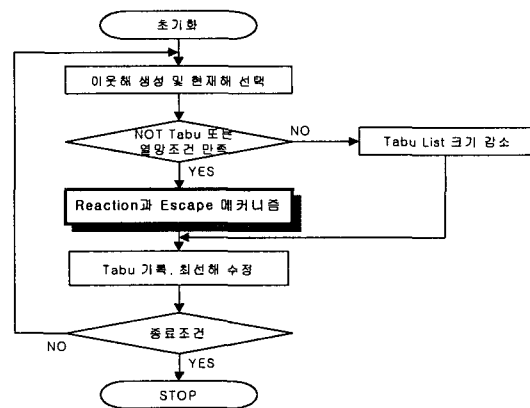


그림 2. Reactive Tabu Search의 순서도
Fig. 2. Procedure of Reactive Tabu Search

그림 2의 순서도에서 Reaction 메커니즘은 현재 해를 검색하여 같은 해가 존재할 경우에 Tabu List의 크기를 증가시키고 오랜기간 방문하지 않을 경우에는 그 크기를 감소시켜서 적용시키는 방법이고, Escape 메커니즘은 같은 해가 자주 방문되는 경우 무작위 이동을 하여 현재해의 위치를 변경시키는 방법이다 이와 같이 Reactive Tabu Search 알고리즘에서는 Tabu List의 크기를 변화와 현재해의 위치를 변경시키는 방식을 제공함으로써 보다 정확한 해를 빠르게 찾을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 Reactive Tabu Search 알고리즘을 효과적으로 구현하기 위해 해싱함수를 이용하였다.

2.3.1 해싱 메모리와 이웃해 선택

현재 선택된 개폐기의 저장과 회복 등의 탐색상태는 해싱함수를 이용하여 효율적으로 구현될 수 있으며 해싱계획에 의한 메모리 구성은 그림 3과 같다.

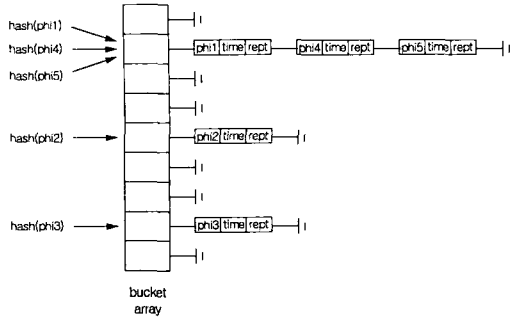


그림 3. 해싱 구조의 예
Fig. 3. Example of Hashing structure

그림 3에서 각각의 리스트에는 현재 개방되어있는 개폐기의 번호(phi), 최근 방문의 반복 시간(time), 총 방문회수(rept)로 구성된다. 그리고 phi의 개방으로 인하여 변화된 손실값은 해싱의 제산함수를 이용하여 계산되어 "bucket array"의 key 값으로 이용된다. Reactive Tabu Search에서 각 단계마다 이웃해 평가와 이동선택의 절차는 다음의 표 1과 같다.

표 1. 이웃해 평가와 현재해 선택에 대한 절차
Table 1. Procedure of neighbor evaluation and current configuration selection

단계 1	현재해로부터 움직일 수 있는 모든 이동을 평가한다.
단계 2	최근에 방문한 해가 해싱 테이블의 메모리 구조에서 탐색되었는지를 살피고, 다양화 탈출 이동에 대한 결정을 내린다.
단계 3	(Default) 만약 모든 이동이 Tabu에 걸려 있고 열망조건을 만족하지 않으면 Tabu의 속성에 무관하게 모든 움직임 중에 최선의 이동을 찾고, Tabu 이동의 수를 감소시키기 위해 Tabu List 크기를 감소시킨다 ($list_size = list_size \times DECREASE$) 그렇지 않다면 현재해를 선택하여 이동하고 Tabu를 기록한다.
	(2) (Escape) 이전에 방문한 적이 없는 해를 무작위로 발생시켜 다양화 이동을 한다.

2.3.2 Reaction과 Escape 메커니즘

Reactive Tabu Search에서 이웃해를 평가하고 그 중에 목적함수를 최소로 하는 현재해를 선택한 후 해싱테이블에서 현재해에 대한 재 방문 여부를 검사한다. 이때 재 방문 여부 검사시 발생하는 Reaction 메커니즘은 Escape 메커니즘을 동반되어 빠른증가와 느린 감소의 특성을 갖게 된다. 이러한 Reaction 메커니즘을 순서도로 표현하면 그림 4와 같다.

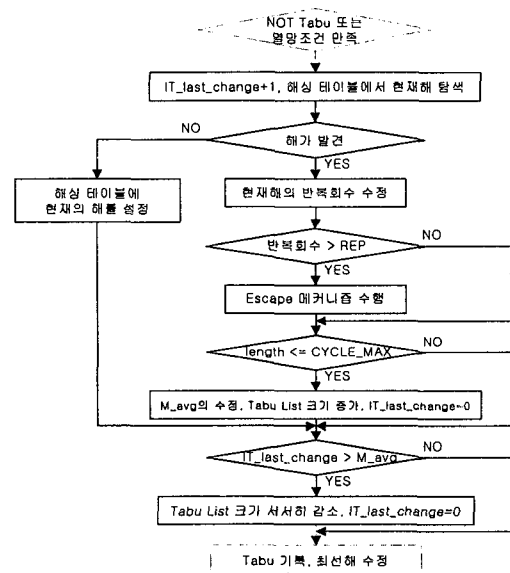


그림 4. Reaction 메커니즘
Fig. 4. Reaction Mechanism

그림 4에서 사용되는 상수들의 설명은 표2에서 설명 되었다. 그리고 위의 Reaction 메커니즘에서, 해의 재 방문시 계속적인 재 방문을 억제하기 위하여 Tabu List의 크기를 증가시키는 것으로 $list_size = list_size \times INCREASE$ 를 적용한다. 이때 Tabu List의 크기가 기하학적으로 증가될 우려가 있으므로 이를 방지하기 위해 Slower 메커니즘이 도입된다. 즉 IT_last_change (Tabu List 크기의 마지막 변화 후에 방문된 반복시간)이 M_avg 보다 크면 $list_size = MAX (list_size \times DECREASE, 2)$ 로 설정하여 크기를 감소시키고 $IT_last_change = 0$ 로 재 설정한다.

2.4 RTS(Reactive Tabu Search) 알고리즘을 이용한 배전계통 재구성의 절차

■ 단계 1 - 초기화 단계

최초 $I_b = I_c$, $f_b = f_c$ 로 초기화 시킨다.

여기서 I_c : 현재해이며 현재 개방된 개폐기

I_b : 최선해이며 탐색으로 얻게되는 개폐기

f_c : 현재해 선택시 목적함수

f_b : 최선해 선택시 목적함수

위의 f_c 는 현재 개방된 개폐기들중 하나를 선택하여 투입 후 방사상 제약조건을 만족하기 위해 새로이 하나의 개폐기가 개방될 경우, 그 때 계산되는 배전계통의 손실량이다. 그리고 f_b 는 계산되어진 여러 f_c 들 중에서 배전계통의 손실량이 가장 적은 f_c 를 f_b 로 지정한다.

■ 단계 2 - 이웃해 생성 단계

현재 개방된 개폐기 I_c 를 투입 후 발생하는 루프 중에서 방사상 제약조건을 만족하기 위해 개방되어야 할 것을 선택한다. 이 때 선택되는 개폐기는 선로 말단에 위치한 연계 개폐기를 우선적으로 선택하여 Tabu 규칙과 강화 전략을 적용한다. 이러한 과정으로 NTS개의 시행 가능한 이웃해 $I_t^1, I_t^2, \dots, I_t^{NTS}$ 를 생성하고 여기에 목적함수 $f_t^1, f_t^2, \dots, f_t^{NTS}$ 을 계산한다.

■ 단계 3 - 이웃해의 평가와 현재해의 선택 단계

$f_t^1, f_t^2, \dots, f_t^{NTS}$ 를 오름차순으로 정렬 후 $f_t^{[1]}$ 이 Tabu에 걸려있지 않거나 또는 Tabu에 걸려있어도 $f_t^{[1]} < f_b$ 가 되어 열망조건이 만족되면 $I_c = I_t^{[1]}$, $f_c = f_t^{[1]}$ 로 수정 후 단계 4로 진행한다. 만약 그렇지 않으면 $I_c = I_t^{[L]}$, $f_c = f_t^{[L]}$ 로 수정하고 단계 4로 진행한다. 여기서 $I_t^{[L]}$ 은

Tabu가 걸리지않은 $I_t^{[2]}, I_t^{[3]}, \dots, I_t^{[NTS]}$ 들 중 최선해이고 $f_t^{[L]}$ 은 최선해 선택시의 목적함수이다. $I_t^{[2]}, I_t^{[3]}, \dots, I_t^{[NTS]}$ 가 모두 Tabu에 걸려 있다면 Tabu List의 크기를 감소시키고 $I_t^{[1]}$ 을 선택한 후, 단계 5로 진행한다.

■ 단계 4 - Reaction 과 Escape 메커니즘 실행 단계

선택된 이동 $I_t^{[1]}$ 을 실행하여 계통의 구성을 바꾸고, 현재 방문한 해가 이전에 반복된 것인지 여부를 해싱테이블에서 찾는다. 만약 해싱테이블에서 해가 발견되면, Reaction 과 Escape 메커니즘의 실행여부를 판별하고 추가되는 반복을 억제하기 위하여 Tabu List의 크기를 증가시킨다. 그러나 만약 Tabu List의 크기가 너무 커지게 되면 Slower 메커니즘에 의해 그 크기를 감소시킨다.

■ 단계 5 - 현재해와 최선해의 수정 단계

Tabu List의 맨 밑에 현재의 이동 I_c 에서 $off \rightarrow on$ 으로 변경되는 개 폐기를 삽입하고 $length = length + 1$ 로 수정한다.

(만약 $length = list_size + 1$ 이면, Tabu List의 첫 번째 원소를 삭제하고 $length = length - 1$ 로 수정한다.) $f_c < f_b$ 이면 $I_b = I_c$, $f_b = f_c$ 라고 하여 현재해를 최선해로 수정한다.

■ 단계 6 - 종료조건 검사 단계

$K=IMAX$ 이거나 정해진 반복회수 만큼 최적해가 연속하여 변하지 않으면 탐색을 종료하며 이때의 I_b 는 구하고자 하는 최종해이고, f_b 는 최종해로 인하여 발생하는 계통의 손실 값이 된다. 만약 종료조건이 만족되지 않으면 $K=K+1$ 후 단계 2로 진행한다.

3. 사례 연구

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 참고문헌[2]의 32모선에 적용하여 제안된 방법과 성능을 비교하였다.

3.1 32모선 모의 계통의 적용

3.1.1 32모선 모의 배전 계통의 개요

그림 7은 32모선 계통도이다. 초기 개방된 5개의 연계 개폐기를 점선으로 표시하였고 초기 투입된 32개의 구분 개폐기를 실선으로 표시 하였다. 여기서 급전선의 전압은 12.66[KV]이고, 전체부하는 3715[KW], 2300[KVAr] 이고 최초 손실은 199.619[KW] 이다. 그리고 표 2는 탐색과정에 대한 초기상태 및 제약조건을 설정을 위한 모의 실험 계수이다.

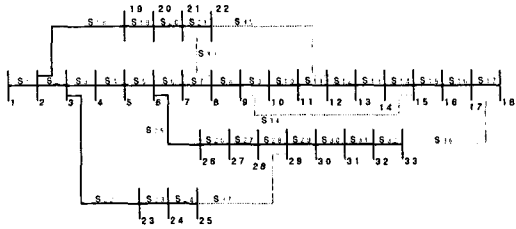


그림 5. 32모선 모의 배전계통
Fig. 5. Sample of distribution system with 32 bus

표 2. RTS의 모의 실험 계수
Table 2. Simulation parameters of RTS

List_size (초기 Tabu List 크기)	2
IMAX (종료조건을 위한 최대반복횟수)	100
REP (해시 테이블의 반복횟수)	2
CYCLE_MAX (Tabu List 크기증가의 한계)	7
해시 테이블의 크기	100
M_avg의 초기 값 (Tabu List 크기 감소 시작점을 알리는 flag 변수) IT_last_change > M_avg 이면 리스트 감소	0
IT_last_change의 초기 값 (초기 방문 반복시간)	0
INCREASE (Tabu List 증가를 위한 변수) Tabu list_size = list_size * INCREASE	1.2
DECREASE (Tabu List 감소를 위한 변수) Tabu list_size = list_size * DECREASE	0.8
NTS (이웃해의 생성개수)	5

3.1.2 적용 방식

그림 5의 초기 개폐기의 on/off 상태는 다음과 같다.

조명 · 전기설비학의논문지 제17권 제5호, 2003년 9월

$$OFF = \{ S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37} \}$$

$$ON = \{ S_1, S_2, \dots, S_{31}, S_{32} \}$$

I. 첫 번째 이동

(1-1) 33번 개폐기 선택

$$OFF = \{ S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37} \},$$

$$ON = \{ S_1, S_2, \dots, S_{31}, S_{32}, S_{33} \}$$

33번 개폐기의 선택으로 하나의 루프가 형성되고 off되어야 할 개폐기를 Tabu 및 제약조건을 고려하여 선택한다. 7번 개폐기가 선택되고 이때의 on/off 조합은 다음의 1-2과 같다.

$$(1-2) \quad OFF = \{ S_7, S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37} \},$$

$$ON = \{ S_1, S_2, \dots, S_6, S_8, \dots, S_{32}, S_{33} \}$$

(2-2) 34번 개폐기를 ON시킨 후 연계되는 후보해

$$OFF = \{ S_{14}, S_{33}, S_{35}, S_{36}, S_{37} \},$$

$$ON = \{ S_1, \dots, S_{13}, S_{15}, \dots, S_{32}, S_{34} \}$$

(3-2) 35번 개폐기를 ON시킨 후 연계되는 후보해

$$OFF = \{ S_8, S_{33}, S_{34}, S_{36}, S_{37} \},$$

$$ON = \{ S_1, \dots, S_7, S_9, \dots, S_{32}, S_{35} \}$$

(4-2) 36번 개폐기를 ON시킨 후 연계되는 후보해

$$OFF = \{ S_{32}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{37} \},$$

$$ON = \{ S_1, \dots, S_{31}, S_{36} \}$$

(5-2) 37번 개폐기를 ON시킨 후 연계되는 후보해

$$OFF = \{ S_{28}, S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36} \},$$

$$ON = \{ S_1, \dots, S_{27}, S_{29}, \dots, S_{32}, S_{37} \}$$

위의 방식으로부터 (1-2), (2-2), (3-2), (4-2), (5-2)의 후보해 중에서 대응하는 목적함수 값을 비교하여 가장 작은 것을 선택하면 (2-2)의 개폐기 구성이 선택되어 이동된다. 이와 같은 과정중 (2-2)를 해시 메모리 구조를 이용하여 표현하면 다음의 그림 6과 같다.

목적함수 인덱스	현재해	최근 방문 반복 시간	총 방문 회수
52	S ₁₄ , S ₃₃ , S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇	1	1
bucket array		IT_Last_ change	

그림 6. 해시 메모리 구조의 예
Fig. 6. Example of Hashing memory structure

Reactive Tabu Search 알고리즘을 이용한 배전계통의 손실 최소화

그림 6에서 현재의 목적함수 값 152.469는 계산함수와 나머지 연산에 의해서 해싱테이블 크기 내의 적절한 값으로 변경되어 bucket array의 키 값으로 작용되고 연결된 리스트에는 현재해, IT_last_change, 총 방문회수가 기록된다.

Tabu List의 해
S34

그림 7. Tabu List의 예
Fig. 7. Example of Tabu List

Tabu List에 기록되는 내용은 그림 7과 같이 off→on 되는 34번 개폐기가 기록된다.

II. 두 번째의 이동

두 번째 이동에서는 첫 번째에서 선택된 (2-2) 개폐기 상태를 시작점으로 하여 같은 방식으로 반복하여 다음의 이동을 찾게 된다.

즉 두 번째 이동의 시작점은 다음과 같다.

$$OFF = \{S_{14}, S_{33}, S_{35}, S_{36}, S_{37}\},$$

$$ON = \{S_1, \dots, S_{13}, S_{15}, \dots, S_{32}, S_{34}\}$$

(1-1) 33번 개폐기 선택

$$OFF = \{S_{14}, S_{35}, S_{36}, S_{37}\},$$

$$ON = \{S_1, \dots, S_{13}, S_{15}, \dots, S_{32}, S_{33}, S_{34}\}$$

(1-2) 33번 개폐기를 ON시킨 후 연계되는 후보해

$$OFF = \{S_7, S_{14}, S_{35}, S_{36}, S_{37}\},$$

$$ON = \{S_1, S_2, \dots, S_6, S_8, \dots, S_{13}, S_{15}, \dots, S_{34}\}$$

같은 방식으로 14번, 35번, 36번, 37번 개폐기들을 ON시킨 후의 목적함수값을 비교하여 값이 가장 작은 후보해를 선택한다. 그리고 세번째 이후의 이동은 위의 첫 번째와 두 번째 이동과 같은 방식으로 반복 탐색한다.

3.1.3 사례별 적용 결과

사례 1) 초기해가 $\{S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37}\}$ 인 경우

그림 5의 최초 off된 연계 개폐기를 초기해로 하여 제안한 방법 적용 후 수렴도는 그림 8이며 최종적으로 선택된 해는 $S_7, S_{10}, S_{14}, S_{32}, S_{37}$ 이다.

여기서 Escape 메커니즘이 실행되기 전에 전역 최적해에 수렴하여 빠른 결과를 보였다. 이것은 최종적인 해의 위치가 초기해와 근접해 있어서 지역최소해에 빠지지 않고 바로 전역최적해에 도달하여 계통전체적으로 보다 많은 손실을 감소 시킬수 있었다.

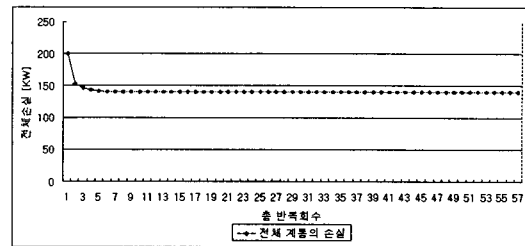


그림 8. 초기구성에서의 수렴도
Fig. 8. Convergence diagram at initial configuration

사례 2) 초기해가 $S_{12}, S_{19}, S_{21}, S_{25}, S_{34}$ 인 경우 제안한 알고리즘 적용 후의 수렴도는 그림 9이며 최종적으로 선택된 해는 $S_7, S_{10}, S_{14}, S_{32}, S_{37}$

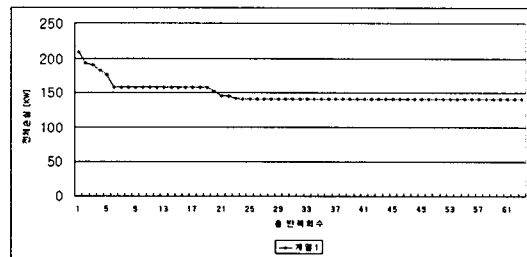


그림 9. $S_{12} S_{19} S_{21} S_{25} S_{34}$ 개방시 수렴도
Fig. 9. Convergence diagram at $S_{12} S_{19} S_{21} S_{25} S_{34}$ open

그림 9의 수렴곡선에서 최선해가 연속해서 변하지 않는 구간이 있는데, 이것은 초기해의 위치로 인해 지역최소해에 빠진 것이며 이때 다양화를 위한 Escape 메커니즘을 통해 지역 최소해를 빠져 나와서 전역최소해에 도달하였다.

3.2 종래의 방법과의 비교

표3은 그림 7의 계통에서 발생된 손실을 최소화하기 위해 적용된 참고문헌[2]와 제안한 방법을 비교 제시한 것이다. 표 3에서 제시된 바와 같이 참고문헌[2]는 초기구성에 비하여 24.26 [%]의 손실이 감소되었고 제안한 방법은 29.56 [%]로 5.30 [%]의 배

전계통의 손실을 더욱 감소 시킬 수 있었다. 그리고 최저 전압은 최초 0.908100에서 참고문헌[2]에서 0.908029[pu]로 별다른 상승이 없었으나 제안한 방식에서는 0.930762[pu]로 되어 2.43 [%]의 전압 상승이 있었음을 알수 있다. 이와 같이 향상된 결과가 나온 이유는 본연구에서 제시된 방식이 탐색도중 지역 최소해에 빠지지 않고 바로 전역최적해에 도달하여 계통전체적으로 보다 많은 손실을 감소 시킬수 있기 때문이다.

표 3. 실험결과와의 비교
Table 3. Compare with test result

	초기구성	참고문헌[2]	제안한 방식
최저 전압의 모선번호	18번 모선	32번 모선	32번 모선
최저전압 [pu]	0.908100	0.908029	0.930762
off 된 개폐기 번호	S ₃₃ S ₃₄ S ₃₅ S ₃₆ S ₃₇	S ₆ S ₁₁ S ₃₁ S ₃₄ S ₃₇	S ₇ S ₁₀ S ₁₄ S ₃₂ S ₃₇
선로손실 [KW]	199.619	151.191	140.624

4. 결 론

본 논문에서는 경험적인 탐색방법인 Reactive Tabu Search법 배전계통의 최적 재구성에 적용하였다. 그리고 본 알고리즘에 대한 유용성과 편리성을 입증하기 위하여 기존의 32모선에 적용하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

제안한 방법을 계통에 적용 시 초기해에 무관하게 동일한 최종해를 얻는 것을 보임으로써 그 효율성을 입증하였다.

(1) 단기메모리 관점에서는 Tabu List의 제약과 열망조건을 이용하여 방금 방문한 해와 자주 반복되는 해가 선택되지 않도록 하였고, 중기 메모리 관점에서는 배전계통에서 연계 개폐기의 전압이 낮은 부분에 절체될 가능성이 높다는 점을 해의 이동과정에 적용시킴으로써 탐색이 강화되었고 또한 수렴속도를 높일 수 있었다.

(2) 장기 메모리 관점에서 탐색성능을 개선시키기 위해서 해의 재 방문 회수를 점검하여 Reaction 메커니즘과 Escape 메커니즘을 수행하여 다양성 전략을 통해 전역 최적해를 얻을 수 있었다.

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제5호, 2003년 9월

References

- [1] Y. J. Jeon, J. C. Kim, "Application of Simulated Annealing and Tabu Search for Loss Minimization in Distribution Systems", Trans. KIEE. Vol. 50A, NO. 1, Jan 2001.
- [2] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 1401-1407, April 1989.
- [3] S. Cinavanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for losses reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-3, 1988, pp.1217-1223, July 1988.
- [4] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp.1484-1491, July 1992.
- [5] R. J. Sarfi, M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani, "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: An Algorithm Based on Network Partitioning Theory", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp.504-510, February 1996.
- [6] J-Y, Fan, L. Zhang, J.D. McDonald, "Distribution Network Reconfiguration : Single Loop Optimization", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1643-1647, August 1996.
- [7] T.E. McDermott, I.Drezga, R. P. Broadwater, "A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Distribution system Reconfiguration", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp 478 - 483, May 1999.
- [8] H-C. Chang, Ch-Ch. Kuo "Network Reconfiguration in Distribution Systems using Simulated Annealing", Electric Power Systems Research, Vol. 29, pp. 227 - 238. 1994.
- [9] K.Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, T. shihara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution system Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Trans. Power System, Vol. 7, No. 3, pp.1044 -1051. August 1992.
- [10] Fred Glover, Manuel Laguna, "Tabu Search", Univ of Colorado at Boulder, 1997
- [11] F. Glover, "Tabu Search - Part 1", ORSA Journal on Computing Vol. 1, No. 3, pp. 190-206, 1989.

◇ 저자소개 ◇

최상열 (崔相烈)

1970년 8월 24일생. 1996년 성균관대 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학). 2002년~ 현재 안양대학교 디지털미디어학부 전임강사.

장경일 (張景一)

1974년 12월 3일생. 1998년 성균관대 전기공학과 졸업, 2000년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사), 2002 ~ 현재 한국전력공사 서울 전력소.

신명철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수. 1978~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.