

피더부하 균등화지수를 이용한 배전계통의 긴급정전복구 및 부하균등화

論 文

51A-5-2

Emergency Service Restoration and Load Balancing in Distribution Networks Using Feeder Loadings Balance Index

崔相烈* · 鄭滌聖** · 申明澈***

(Sang-Yule Choi · Ho-Sung Jung · Myong-Chul Shin)

Abstract -This paper presents an algorithm to obtain an approximate optimal solution for the service restoration and load balancing of large scale radial distribution system in a real-time operation environment. Since the problem is formulated as a combinatorial optimization problem, it is difficult to solve a large-scale combinatorial optimization problem accurately within the reasonable computation time. Therefore, in order to find an approximate optimal solution quickly, the authors proposed an algorithm which combines optimization technique called cyclic best-first search with heuristic based feeder loadings balance index for computational efficiency and robust performance. To demonstrate the validity of the proposed algorithm, numerical calculations are carried out the KEPCO's 108 bus distribution system.

Key Words : Service Restoration, Feeder Loadings Balance Index, Cyclic Best-First Search.

1. 서 론

수용가에 직접 전기를 공급하는 배전계통은, 도시의 재개발 및 신도시의 건설 등으로 인해 더욱 복잡해지고 있다. 이에 따라 공급신뢰도를 향상시키기 위한 2차 계통에서의 사고 후 긴급정전복구문제에 대한 중요성이 차츰 부각되고 있다[1]. 정전구간을 복구하기 위한 알고리즘에는 수치해석 방법으로 최적해를 구하는 방법[2]과 인공지능 기법을 이용한 방법[3-5], 운전원의 경험과 전문가 시스템을 이용한 방법[6-12]등으로 대별 될 수 있으며 구체적인 연구 동향은 다음과 같다.

Aoki등[2]은 최급 강하법(gradient method)기반의 수치해석적 방법을 대규모 배전계통에 적용하였고, Hsu등[3]은 정전복구를 위한 휴리스틱을 구현을 위하여 퍼지추론을 이용하였고, Fukuyama등[4]은 전류, 전압등의 제약조건을 만족시키면서 최대한 많은 양의 부하를 복구시키기 위해 전역적인 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 적용하였다. 최근에는 퍼지와 유전자 알고리즘을 혼합하여 배전계통의 정전복구 문제에 적용[5]하고 있다. 한편 Morelato등[7]은 배전선로의 각 스위치들을 (close/open) 상태에 따라 2진 트리로 구성하고 깊이우선탐색 (depth-first)하는 방식을 제시하였으나 이러한 방식은 탐색 공간이 많아지기 때문에 많은 시간이

소요되어 대규모의 계통에 적용하기 어려운 단점이 있다.

그 후에 소개된 휴리스틱 탐색기법[8]은 선로 과부하 및 부하 불평형을 동시에 해결하기 위하여, 과부하가 발생된 피더내에 존재하는 구분 개폐기와 연계 개폐기를 하나의 조합으로 만들고 그 조합을 트리구조로 재구성하여 최적우선탐색(best-first) 방식으로 탐색하였다. 이것은 경험적인 지식으로 계통을 재구성하는 최적우선탐색의 전문가 시스템으로써 이전 보다 탐색 스위칭 갯수와 스위칭되는 개폐기의 갯수를 줄일 수 있었으나 스위칭을 탐색하는 과정 중에 많은 수의 불필요한 스위칭이 포함되는 문제점이 있다. [7,8]에서 제시된 문제점들을 해결하기 Wu등[9]은 과부하 해소, 정전복구 및 각상간의 불평형을 해결하기 위하여 [8]에서 소개된 트리를 변형시켜서 구성 후 평가함수와 휴리스틱 기법을 이용하여 탐색하였다. 이 방법에서는 연계 개폐기 선정을 위한 함수를 이용하여 close되어야 할 연계 개폐기를 선정 후 상 불평형 정도를 규정한 함수와 선로용량 여유분 함수를 이용하여 open되어야 할 구분 개폐기를 선택함으로써 불필요한 스위칭이 감소되었다. Devi등[10]은 [7]에서 제시된 탐색트리를 휴리스틱 기반의 너비우선탐색(depth-first search)으로 탐색함으로써 최적의 해를 얻을 수 있었으나 탐색공간이 많아지기 때문에 대규모의 계통에 적용 시 많은 수행시간이 요구된다.

본 논문에서는 적은 스위칭 횟수로 빠르게 정전구간 복구 및 각 피더간의 부하불평형을 감소시킬 수 있는 효율적인 알고리즘을 제시한다. 제시되는 알고리즘은 건전피더들이 고장 발생 직후 계통으로 공급하여야 할 부하의 총량을 규정하는 함수로부터 각 피더들이 공급하여야 할 목표치를 도출하고 이러한 목표치를 만족하기 위하여 요구되는 스위칭을 참고문헌[13]에서 제시한 방식을 확대 적용하여 찾는다.

* 正 會 員 : 安養大 디지털미디어學部 講義專任講師 · 工博

** 正 會 員 : 成均館大 産業電子 應用 研究所 · 工博

*** 終身會員 : 成均館大 情報通信工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 8月 1日

最終完了 : 2002年 3月 25日

본 알고리즘을 실제로 서울의 k지사에서 운용되고 있는 108모선에 적용하여 제시함으로써 그 유용성을 입증하였으며, 그 결과 적은 스위칭 횟수로 빠른 시간내에 정전을 복구함과 동시에 피더간의 부하 불균등이 감소되었음을 입증하였다.

2. 정전복구 및 부하균등화 알고리즘

정전복구 문제는 배전계통에서 고장이 발생시 고장구간을 검출한 후 고장구간을 건전구간 으로부터 분리하고 방사상 구성에 따라 발생하는 사고구간 이후의 비고장 정전구간내의 부하를 적절한 스위칭을 통하여 인접된 건전피더로 절제시키는 것이며 이때 방사상 선로구성, 전압, 전류 등의 제약조건들이 만족되어야 한다.

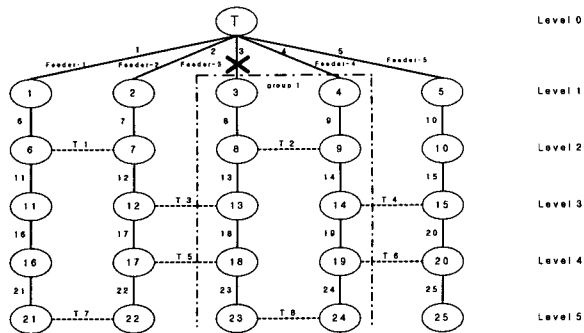


그림 1 5-Feeder 모델 계통
Fig. 1 Five-feeder example system

그림 1에서 3번 선로 구간에서 고장이 발생하는 경우 선로(8,13,18,23)는 비고장 정전구간이 되며, 이러한 정전구간의 복구는 정전구간내의 부하를 인접된 건전피더들로 절제 시킴으로써 이루어진다. 이때 반드시 고려해야할 사항은 고장구간의 부하를 융통하는 인접한 건전피더가 과부하 되어 전압, 전류 등의 제약조건들이 위반될 우려가 있으므로 이것을 방지하기 위한 스위칭이 수행되어야 한다. 정전복구 수행 중 특정피더에서 발생하는 과부하를 감소시키는 방법은 각 피더간의 부하 불균등을 최소로 하도록 하는 스위칭을 수행함으로써 가능하고 또한 이러한 스위칭을 수행함으로써 정전복구시 그 계통에서의 여유전력을 최대한으로 활용 가능해진다.

2.1 피더간 전력배분량의 계산

배전계통내의 각 피더로 흐를 수 있는 부하전력량은 정해져 있으며 이 값은 정전복구 및 부하균등화를 이루기 위해 각 피더가 분담하여 계통으로 공급하여야할 전력량을 결정하는데 중요한 지표가 된다. 본 논문에서는 정상시 계통의 부하균등화를 이루기 위해 각 피더의 공급허용용량을 이용한 참고문헌[8]의 방법을 수정·확장하여 사고 후에 발생하는 정전구간의 복구 및 부하균등화에도 적용 가능한 피더부하 균등화지수를 제안하며 이러한 지수는 각 건전피더의 공

급허용용량에 비례하여 고장구간의 부하 융통이 가능하도록 제안된 것이다. 제안한 피더부하 균등화지수의 자세한 정식화 과정은 다음과 같다.

STEP 1) 계통내 존재하는 모든 변압기들의 공급허용용량을 산출한다

$$TAC_i = \min(TNC_i , \sum_{i \in FD_i} FNC_i) \tag{1}$$

여기서, TAC_i : 변압기 T_i의 공급허용용량 (MVA)

TNC_i : 변압기 T_i의 정격용량 (MVA)

FNC_i : 건전피더 i의 정격용량 (MVA)

FD_i : 변압기 T_i에 속하는 건전피더들의 집합

STEP 2) 선로구간의 사고발생으로 정전된 모든 부하를 시스템차원에서의 복구가능 여부를 판단하기 위해 선로복구지수를 이용한다.

$$FRI = \frac{\sum_{i \in K} SL_i}{\sum_{i \in U} TAC_i} \tag{2}$$

여기서, FRI : 선로복구지수

SL : 건전선로 i의 부하량(MVA)

K : 계통내의 모든 선로들의 집합

U : 계통내의 변압기들의 집합

선로 복구지수의 값이 1보다 클 경우 부하차단 없이 시스템내의 모든 부하에 전력 공급은 불가능하고 1이하인 경우 복구가 가능하다.

STEP 3) 선로 복구지수가 1이하인 경우 정전복구 및 부하균등화를 이루기 위해 각 건전피더가 분담하여야 할 전력부하량인 피더부하 균등화지수를 이용하며 그러한 지수의 정식화는 다음과 같다.

$$LI_i = FNC_i \times FRI \tag{3}$$

여기서, LI_i : 건전피더 i의 피더부하 균등화지수(MVA)

STEP 4) 고장 발생시 정전구간 복구를 위한 스위칭은 건전피더가 분담하는 시스템의 부하량이 식(3)에서 제시된 값에 근접되도록 이루어져야 한다.

그림 1에서 만약 3번 선로 구간에서 고장이 발생된 경우 정전구간의 복구를 위해 연계 개폐기 T2를 close시키면 4번 피더가 과부하 될 우려가 있다. 만약 과부하가 발생된 경우 과부하 해소 및 부하균등화를 위해 4번 피더가 공급하는 부하의 일부를 인접된 건전피더인 2번과 5번 피더로 우선적으로 절제함으로써 4번 피더가 분담하는 시스템내의 부하전력이 허용된 피더부하 균등화지수에 근접하도록 스위칭을 수행한다. 이러한 스위칭을 수행하는 도중 2번 피더가 과부하된다면 2번 피더가 공급하는 일부 부하를 1번 피더로 절제

하여 1,2번 피더도 역시 피더부하 균등화지수에 근접하도록 한다. 이와 같이 정전구간내의 모든 부하를 인접된 건전피더중 여유용량이 가장 큰 하나의 피더로 절체함으로써 인접한 건전피더를 과부하 피더로 만들고 이때 발생한 과부하를 감소시키기 위해 피더부하 균등화지수를 이용하여 부하를 균등화시킨다.

2.2 부분트리 구성

비고장 정전구간의 복구를 위한 스위칭은 연계 개폐기를 이용하여 정전구간내의 부하를 인접된 건전피더로 절체하여 이루어지며 이때 재구성 후에도 계통은 방사상 구성을 이루어야 한다. 그림 1에서 3번 선로 구간에서 사고가 발생한 경우 비고장 정전구간내의 부하는 현재 여유용량이 가장 큰 피더인 4번 피더로 우선적으로 절체되어야 하며 이때 연계 개폐기 T2의 사고전의 양단 전압차가 가장 크다면 T2는 우선적으로 close되어야 할 1차 연계 개폐기가 된다. T2가 close될 경우 group1은 과부하 또는 중부하 선로구간이 되고 만약 이러한 과부하로 인하여 전압, 전류의 제약조건 위반이 발생하는 경우 group1과 인접한 건전피더와 연계하는 상시 open된 연계 개폐기를 close시키고 group1내의 상시 close된 구분 개폐기를 open시킴으로써 group1의 제약조건 위반은 해소된다. 만약 group1의 4번 피더의 허용 피더부하 균등화지수에 근접하도록 하는 (close/open) 스위칭 조합이 T3 과 S13인 경우 이것을 (T3,S13)로 표현한다. 각 피더에게 허용되는 피더부하 균등화지수 만큼의 부하전력을 피더가 담당하도록 하기 위한 스위칭 조합의 탐색방법은 과부하 group과 인접된 건전피더를 연계하는 연계 개폐기를 탐색의 시작점으로 하여 과부하 group의 전원 측 방향으로 탐색한다. 즉 과부하 group과 인접한 건전피더를 연결하는 연계 개폐기를 close시킨 후 과부하 group내에서 open되어야 할 개폐기를 연계 개폐기에 근접된 순서대로 탐색하여 과부하 group의 전원측 방향으로 진행한다.

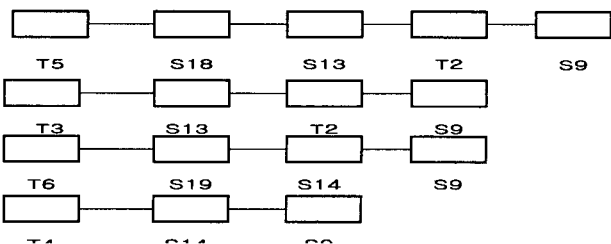


그림 2 모델 계통의 탐색 경로
Fig. 2 Main search paths for example system

그림 2에서 연계 개폐기중 T3만이 close되어 4번 피더에게 허용되는 부하량 배정에 이용될 경우 open 되어야 할 개폐기는 S13→T2,→S9 순서로 탐색되며 가능한 스위치 조합은 (T3,S13), (T3,T2), (T3, S9)이고 이중 스위칭 조합 (T3,S13)이 4번 피더의 목적된 피더부하 균등화지수에 근접하도록 하는 조합일 경우 이것이 찾고자 하는 해가 된다. 또한 연계 개폐기 T3, T6이 사용될 경우 가능한 스위칭 조

합은{(T3,S13), (T6,S19)}, {(T3,S13),(T6,S14)}, {(T3,S13),(T6,S9)}, {(T3,T2),(T6,S19)}, {(T3,T2),(T6,S14)}, {(T3,T2),(T6,S9)}, {(T3,S9),(T6,S19)}, {(T3,S9),(T6,S9)}, {(T3,S9),(T6,S9)}이고 방사상 제약조건을 위반하는 스위칭 조합인 {(T3,S9),(T6,S9)}

은 탐색 대상에서 제외시킨다. 이와 같이 과부하 group의 전압, 전류 제약조건 위반 해소 및 목적된 전력배분량의 배분을 이루기 위해 두 개의 연계스위치가 필요한 경우, 방사상 구성 제약조건을 위반하는 스위칭 조합은 부분트리 구성시 제외시킴으로써 방사상 구성 제약조건 위반을 미연에 방지한다.

과부하 피더가 허용된 피더부하 균등화지수 만큼의 부하전력을 분담토록 하는 스위칭 조합을 찾기 위해 가능한 모든 스위칭 조합을 노드로 하여 부분트리를 구성하면 그림 3과 같다.

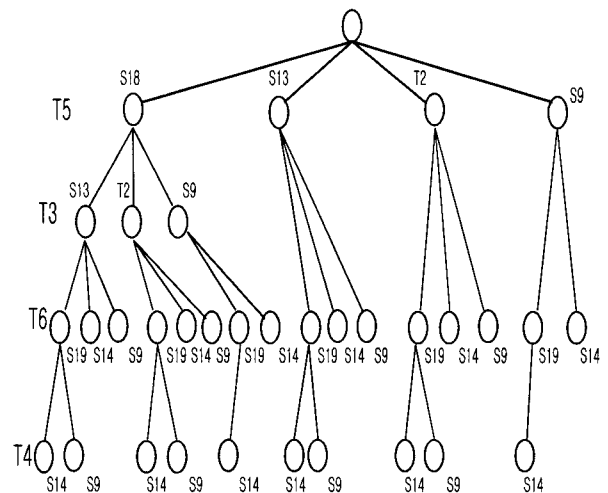


그림 3 4개의 연계 개폐기를 갖는 부분트리
Fig. 3 Sub tree with four tie switches

그림 3과 같이 부분트리는 비고장 정전구간을 과부하 구간으로 전환시키고 전환된 과부하 구간의 제약조건 위반 해소 및 부하균등화를 이루기 위해 실행 가능한 스위칭 조합들을 노드로 하여 구성된 트리이다. 이러한 트리를 구성하여 탐색함으로써 탐색공간의 수는 최초 $2^{13} = 8192$ 개에서 33개로 줄어든다.

2.3 순환적 최적우선 탐색

구성된 부분트리에서 모든 노드를 검색하여 최적의 해를 얻는 방법은 작은 계통에서는 적용 가능하지만 대규모 계통에 적용할 경우 최적의 해를 탐색하는데 많은 시간과 노력이 요구되어 대규모 시스템의 사고시 긴급정전복구에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 참고문헌[13]에서 제시된 순환적 최적우선탐색법을 수정·확장된 방식을 적용함으로써 최적에 가까운 스위칭 조합을 찾는다.

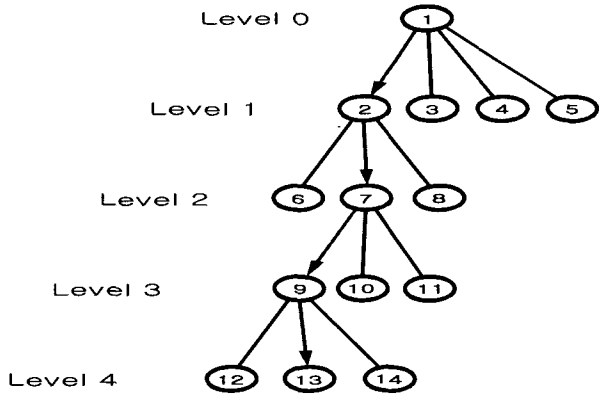


그림 4. 1차 순환적 최적우선탐색
Fig. 4 The first step of cyclic best-first search

그림 4에서 각각의 노드는 스위칭 조합을 의미한다. 여기서 ①번 노드는 탐색의 시작이 되는 시작노드이고, ⑬번 노드가 탐색의 결과로 선택된 최종노드이다. ①번 노드에서 탐색을 시작하면 자식 노드는 ②,③,④,⑤가 되고 이러한 자식 노드중 과부하 피더의 허용 부하량을 가장 만족하는 ②번 노드가 선택된다. 만약 level 1에서 선택된 ②번 노드에 해당되는 스위칭으로 인하여 계통내의 모든 건전피더에게 허용되는 피더부하 균등화지수에 근접하고 제약조건 위반들이 모두 해소된다면 탐색은 여기서 종료된다. 이와 같은 방식의 탐색을 반복 수행하면 경로 ①→②→⑦→⑨→⑬이 선택되고 1차 순환적 최적우선탐색이 종료된다. 만약 1차 탐색으로 선택된 경로에 해당되는 스위칭으로 과부하 피더가 분담하는 계통의 전력이 허용된 피더부하 균등화지수가 만족되지 않는다면 2차로 순환적 최적우선탐색이 수행된다.

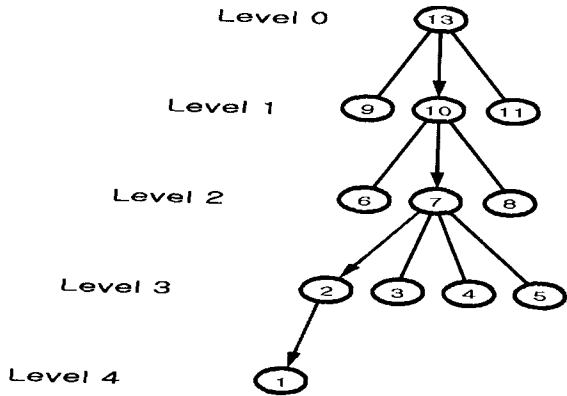


그림 5 2차 순환적 최적우선탐색
Fig. 5 The second step of cyclic best-first search

1차 최적우선탐색의 결과로 그림 4에서 선택된 최종노드인 ⑬번 노드를 탐색의 시작점으로 하여 1차 탐색에서 이용된 트리의 레벨을 역으로 하는 역트리를 구성 후 2차 순환적 최적우선탐색을 진행하면 그림 5와 같으며 이때 선택된 경로는 ⑬→⑩→⑦→②→①이다. 1차 탐색으로 선택되었던 ⑨번 노드가 2차 탐색에서는 ⑩번 노드로 변경되면서 과부하 피더의 허용된 피더부하 균등화지수가 만족될 가능성이 증대된다.

이와 같이 상위 레벨에서 하위 레벨로 탐색이 진행됨에 따라 각 레벨에서 선택된 스위칭으로 인하여 선로의 접속형태가 변경되어 계통의 건전피더가 분담하는 부하량이 변화되기 때문에 이미 상위 레벨에서 선택된 스위칭이 그 하위 레벨 단계에서도 피더부하 균등화지수를 만족시키는 최적의 스위칭임을 보장할 수는 없다. 따라서 구성된 부분트리내에 피더부하 균등화지수를 만족시키는 스위칭 경로가 존재하더라도 그 경로를 찾지 못하는 경우가 발생할 우려가 있다. 그러나 순환적 최적우선탐색에서는 근사 최적으로 판단되어지는 결과노드를 트리의 시작노드로 재구성하여 2차 탐색을 수행함으로써 정전복구를 위한 보다 최적의 경로가 선택된다. 만약 탐색 후 선택된 스위칭으로 인한 부하의 질체로 인접 건전피더가 과부하로 될 경우 이러한 피더가 목적된 피더부하 균등화지수 만큼의 부하전력을 계통에 공급할 수 있도록 새로이 과부하 group으로 지정 후 같은 방식으로 순환적 최적우선탐색을 수행한다.

2.4 전체 흐름도

그림 6은 지금까지 설명된 정전복구 및 부하균등화 알고리즘을 나타내며 순서도의 각 단계별 세부적인 설명은 다음과 같다

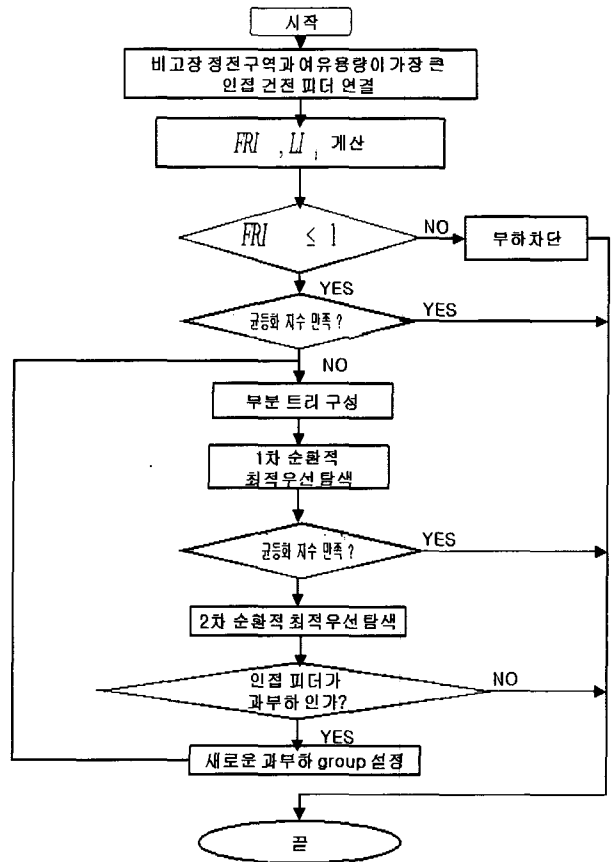


그림 6 정전복구 및 부하균등화 알고리즘
Fig. 6 Flowchart for the proposed service restoration and load balancing

(STEP 1) : 비고장 정전구간내의 모든 부하를 허용용량이 가장 큰 인접된 건전피더로 절체시킨다. 이때 부하 절체를 위해 사용되는 정전구간내의 연계 개폐기는 정전구간의 부하를 용통하는 건전피더측 전압이 사고전에 가장 높은 연계 개폐기를 이용하며 연계 개폐기가 close된 후에 시스템내의 각 피더가 허용되는 피더부하 균등화지수와 제약조건이 만족되면 탐색은 종료된다.

(STEP 2) : 제약조건 위반 또는 허용된 피더부하 균등화지수가 만족되지 않을 경우는 피더를 과부하 group으로 지정 후 2.2에서 제시된 방식으로 부분트리를 구성한다. 부분트리 구성시 방사상 제약조건을 위반하는 스위칭 조합은 트리 구성에서 제외시켜서 불필요한 탐색을 사전에 방지한다.

(STEP 3) : 상위 레벨에서 하위 레벨로 1,2차에 걸친 순환적 최적우선탐색을 수행하되 탐색도중 부분트리의 특정 레벨에 속한 모든 노드가 전압, 전류 제약조건 위반 및 부하불균등을 심화시킬 경우 해당 레벨을 무시하고 하위의 레벨로 탐색을 진행한다. 만약 탐색도중 선택된 스위칭으로 인하여 제약조건 위반해소 및 피더부하 균등화지수가 만족되면 탐색은 종료된다.

(STEP 4) : 2차 순환적 최적우선탐색 후 과부하 group내의 부하를 절체받는 인접된 건전 피더가 과부하로 되는 경우 이러한 피더를 새로이 과부하 group으로 지정 후 이전에 과부하 group으로 지정되었던 피더를 제외한 이용되지 않은 여분의 건전피더를 이용하는 부분트리를 구성하여 탐색을 진행한다.

(STEP 5) : 최종적으로 선택된 경로에 포함되는 노드들은 정전구간 복구 및 부하균등화를 이루기 위해 (close/open) 되어야할 개폐기들의 조합이 된다.

3. 사례 검토

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 실제 시스템의 일부분인 서울의 k지사의 108모선에 제한한 알고리즘을 적용하였다. 그림 7에서 108개의 구분개폐기는 실선으로 표시하였고 14개의 연계개폐기는 점선으로 표시하였다. 기준전압은 22.9[KV], 전체부하는 72.27[MW], 32,78[MVAR]이다. 실제로는 하나의 변압기가 여러개의 피더로 전력을 공급하지만 본 알고리즘의 적용에 있어서는 하나의 변압기가 오직 하나의 피더로만 전력을 공급한다고 가정하였고 또한 각 피더의 정격용량은 20[MVA]로 가정하였다. 그리고 선로의 전압 제약조건은 0.9[PU]이고 허용 전류의 최대치는 2.0[PU]이다. 초기 각 피더의 부하량은 표1과 같다

표 1 각 피더의 부하량

Table 1 Feeder loadings for example system

사고전 각 피더의 부하량[MVA]						
피더 1	피더 2	피더 3	피더 4	피더 5	피더 6	피더 7
14.47	5.17	13.04	8.38	14.34	9.88	13.80

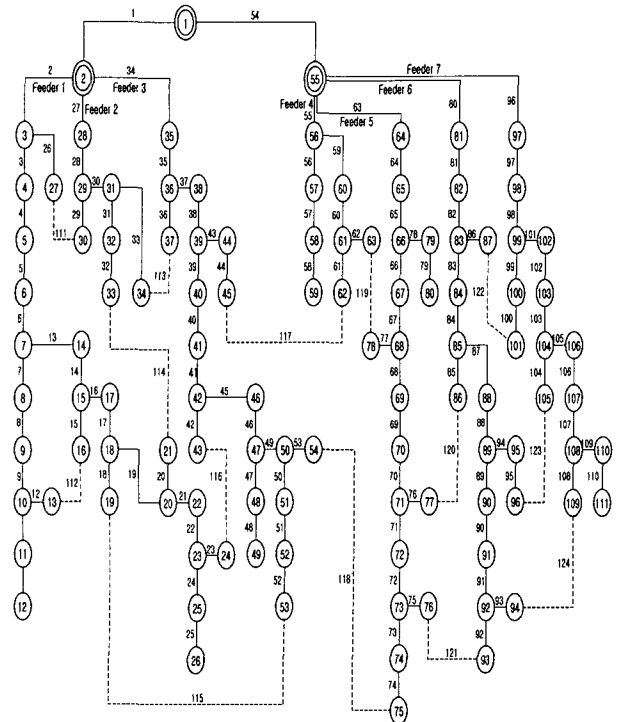


그림 7 108 모선 시스템의 초기구성
Fig. 7 Initial configuration of 108 bus system

3.1 단일 사고에의 적용

3.1.1 96번 선로 구간 사고시

96번 선로 구간 사고 후 발생하는 정전구간내의 모든 부하를 인접된 6번 피더가 담당하도록 스위칭을 수행하고 FRI 계산시 0.8이다. 따라서 정전구간을 부하 차단 없이 복구가 가능하고 피더부하 균등화지수 LI_6 계산시 16.04[MVA]이지만 6번 피더의 부하량 20.15[MVA]이다. 따라서 목표치인 LI_6 만큼의 부하량을 6번 피더가 담당하도록 과부하 group으로 지정 후 부분트리 구성 및 순환적 탐색을 하면 그림 8과 같다

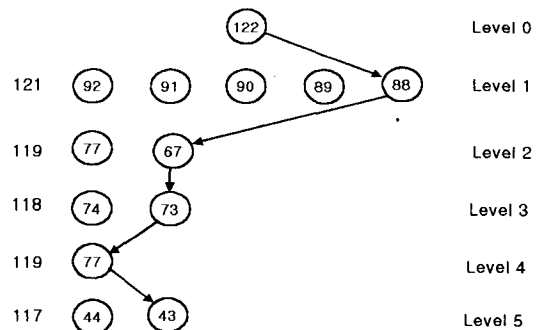


그림 8 96번 선로 구간 사고 시 복구를 위한 탐색 트리
Fig. 8 Search tree after isolation of fault on line section 96

위의 그림 8에서 12회에 걸친 노드 탐색과 4회에 걸친 스위칭으로 정전복구 및 부하균등화를 이루었다. 여기서 Level

0이 122인 이유는 122번 개폐기를 close시켜서 고장구간내의 모든 부하를 6번 피더로 절체시키기 때문이다. 아래의 표 2는 그림 6에서 각 레벨에 해당되는 스위칭으로 인하여 변화되는 각 피더의 부하량이다.

표 2 96번 선로 구간 사고시의 정전복구후 각 피더의 부하량

Table 2 Feeder loadings after restoration on fault line section 96

레벨 번호	선택된 스위칭 조합	스위칭 후 각 피더의 부하량[MVA]							과부하 피더의 피더부하 균등화 지수 [MVA]
		1번 피더	2번 피더	3번 피더	4번 피더	5번 피더	6번 피더	7번 피더	
0	(122)	14.47	5.17	13.04	8.38	14.34	20.15	0	LL ₆ = 16.04
1	(121,88)	14.47	5.17	13.04	8.38	20.29	14.94	0	LL ₅ = 16.04
2	(119,67)	14.47	5.17	13.04	20.92	4.35	14.94	0	LL ₄ = 14.70
3	(118,73)	14.7	5.17	16.34	15.66	4.35	14.94	0	LL ₃ = 14.70 LL ₄ = 14.70
4	(67,77)	14.47	5.17	16.34	9.80	14.13	14.94	0	LL ₃ = 14.70
5	(117,43)	14.47	5.17	11.69	11.98	14.13	14.94	0	LL ₃ = 13.79

표 2의 level 0에서 6번 피더가 허용된 피더부하 균등화 지수를 초과하므로 6번 피더를 과부하 group으로 지정 후 부분트리를 구성하여 탐색을 진행한다. level 1의 스위칭 (121,88)을 수행하여 6번 피더의 부하량은 목표치 이하가 되었으나 5번 피더의 부하량이 목표치의 피더부하 균등화지수를 초과하였으므로 5번 피더를 새로이 과부하 group으로 지정하고 부분트리 구성 후 탐색을 진행한다. level 2에서 목표치의 피더부하 균등화지수가 변한 이유는 6번 피더로 흐르는 전력은 level 1에서 이미 목적치 이하로 되었기 때문에 FRI 계산시 제외시키고 나머지 피더만으로 FRI를 계산하였기 때문이다. 이와 같이 전력배분량이 일단 목적치에 도달된 피더는 탐색대상에서 제외시키기 때문에 FRI 계산시 또한 제외시킨다. level 3에서 선택된 스위칭 후 3, 4번 피더가 모두 허용된 피더부하 균등화지수를 초과하였으나 탐색의 주목적이 4번 피더의 피더부하 균등화지수가 만족되는데 있으므로 4번 피더의 과부하 감소를 위한 순환적 최적우선탐색을 level 4에서 수행하면 스위칭이 (67,77)로 변한다. 여기서 Level 2에서 선택된 스위칭이 변경된 이유는 level 3에서의 (118,73) 스위칭으로 4번 피더가 담당해야할 부하량이 변화되었기 때문에 비록 level 2에서는 (118,67)이 최적이었으나 Level 4 단계에서도 최적임을 보장할 수가 없기 때문이다. level 5에서 모든 피더로 흐르는 부하전력이 허용된 피

더부하 균등화지수를 만족하므로 탐색은 종료된다. 여기서 최종적으로 선택된 스위칭 순서는 (117,43)→(119,77)→(118,73)→(121,88)이다. 비록 2번 피더의 여유 전력공급량은 96번 사고모의에서 이용되지 않았으나 더욱 가혹한 사고 발생시는 이용되어야 한다.

3.1.2 사고복구 결과

제시한 알고리즘을 계통내의 다양한 지점에서의 사고에 적용후 각 피더로 흐르는 부하전력과 수행시간은 표 3과 같다. 여기서 수행시간은 PentiumIII 700MHz 컴퓨터로 계산된 것이다.

표 3 사고모의 결과

Table 3 The simulation results

고장선로 구간	최초 과부하 피더 번호 및 부하량 [MVA]	탐색 노드 갯수	스위칭 횟수	수행 시간 [sec]	스위칭 후 각 피더의 부하량[MVA]						
					1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번
2	2번 피더 19.90	7	3	0.11	0	9.90	17.20	11.30	15.63	9.88	13.80
27	3번 피더 18.51	3	2	0.05	14.47	0	16.51	11.30	15.63	9.88	13.80
34	2번 피더 15.24	0	0	0	14.47	15.24	0	8.38	14.34	9.88	13.80
55	3번 피더 18.42	6	2	0.11	10.95	15.85	12.21	0	14.34	9.88	13.80
63	4번 피더 20.04	4	2	0.05	14.47	5.33	16.7	15.46	0	9.88	13.80
80	7번 피더 25.02	14	4	0.17	14.47	5.17	16.34	9.1	16.57	0	17.43
96	6번 피더 20.15	12	4	0.17	14.47	5.17	11.69	11.98	14.13	14.94	0

표 3에서 최초 과부하 group으로 지정된 피더의 일정량의 부하는 대체로 인접된 피더로 분산되었으나 정확히 균등화되진 않았다. 보다 정확한 균등화를 이루고자 하면 상대적으로 많은 부하량의 피더를 과부하 group으로 지정 후 부

분트리를 구성하여 탐색을 진행하면 된다. 그리고 34번 선로 고장시 탐색노드의 갯수가 0인 이유는 인접된 2번 피더와 연결된 113번 개폐기를 단순히 close 시킴으로써 목적된 피더부하 균등화지수 만큼의 부하량을 2번 피공급하기 때문이다. 최대로 시간이 많이 소요된 것은 80번 선로 사고시이며 이때 최대 14개의 노드 탐색에 0.17초가 소요되고 4회에 걸친 스위칭으로 정전복구 및 부하균등화를 이루었다. 이와 같이 스위칭 조합을 찾기 위한 탐색노드의 갯수가 비교적 많지 않아 빠른 계산시간으로 정전복구에 요구되는 스위칭 조합을 찾을 수 있기 때문에 보다 큰 대규모 계통의 긴급정전복구에도 적용 가능 할 것이라 사료된다.

3.2 다중 사고에의 적용

63번 선로 구간과 84번 선로 구간에서 동시에 고장이 발생하는 경우 피더 5가 공급하던 모든 부하는 4번피더로 절체되고 84번 이후로 정전된 구간의 모든 부하는 7번 피더로 절체된다. 이와 같이 다중사고 발생시는 2개의 과부하 구간이 존재하며 이것은 하나씩 순서대로 해소하여 부하를 균등화시킨다. 그림 9는 2개의 과부하 group내의 부하를 시스템 내의 건전피더로 분산시키기 위해 적용된 것이다.

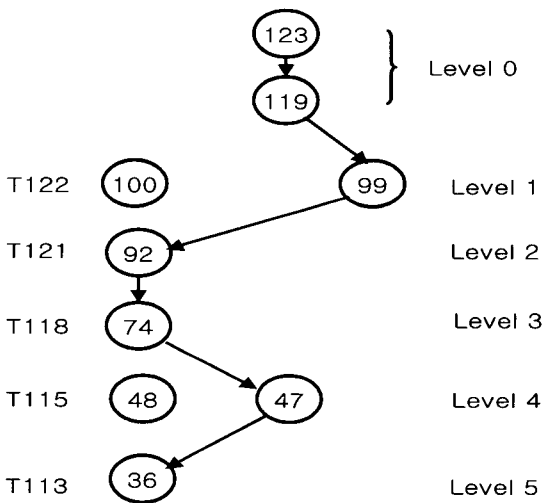


그림 9 63번과 84번 선로 구간 동시 사고 시 정전 복구를 위한 탐색트리

Fig. 9 Search tree after isolation of fault on line section 63, 84

그림 9에서 보인것과 같이 7회에 걸친 노드의 탐색과 5회에 걸친 스위칭으로 목적된 부하 배분을 이룰 수 있었다. Level 0이 123과 119인 이유는 123번 개폐기를 close 시켜서 84번 선로 이후의 모든 부하를 7번 피더로 절체시키고 또한 123번 스위치를 close 시켜서 5번 피더가 담당하던 부하는 이웃된 4번 피더로 절체되기 때문이다. 아래의 표 4는 그림 9에서 각 레벨에 해당되는 스위칭으로 인하여 변환 각 피더의 부하량이다.

표 4 63번, 84번 선로 구간 동시 사고시의 정전복구후 각 피더의 부하량

Table 4 Feeder loadings after restoration on fault line section 63, 84

레벨 번호	선택된 스위칭 조합	스위칭 후 각 피더의 부하량[MVA]							과부하 피더의 피더부하 균등화지수 [MVA]
		1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	
0	(123) (119)	14.47	5.17	13.04	20.17	0	3.47	20.76	LL ₄ = 16.36, LL ₇ = 16.36
1	(122,99)	14.47	5.17	13.04	20.17	0	4.46	19.07	LL ₄ = 16.36, LL ₇ = 16.36
2	(121,92)	14.47	5.17	13.04	20.66	0	4.46	18.15	LL ₄ = 18.25
3	(118,74)	14.7	5.17	18.36	16.03	0	4.46	18.15	LL ₃ = 17.41
4	(115,47)	16.30	5.17	16.63	16.03	0	4.46	18.15	LL ₃ = 16.33
5	(113,36)	16.30	5.75	16.22	16.03	0	4.46	18.15	LL ₃ = 16.33

표 4에서 보인 것과 같이 우선적으로 7번 피더에 집중된 부하량을 감소시키는 방향으로 스위칭을 수행하고 일단 7번 피더의 부하량이 피더부하 균등화지수 이하일 경우 7번 피더의 과부하 해소를 위한 스위칭은 중단하고 4번 피더의 과부하 해소를 위한 스위칭을 수행한다. 비록 7번 피더의 과부하 해소를 위한 스위칭 수행도중 4번 피더가 분담하는 부하량이 증가되어 일시적으로 과부하는 심화되었으나 하위 레벨로 진행될수록 이러한 과부하는 감소되어 결국 3번,7번 피더를 통해 집중적으로 흐르던 부하전력은 계통전체로 분산되었다. 이와 같이 다중 사고가 발생한 경우에도 본 알고리즘을 적용함으로써 정전복구 및 부하균등화를 이룰 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 사고 후 발생하는 정전구간의 복구를 위하여 각각의 건전피더가 분담하여야 할 부하의 총량을 규정하는 피더부하 균등화지수와 참고문헌[13]에서 제시한 방식을 확대 적용한 알고리즘을 이용하여 정전복구 및 부하를 균등화시키는 알고리즘을 제시하였다. 그리고 본 알고리즘에 대한 유용성과 편리성을 입증하기 위하여 실제로 서울 k지사에서 운용되는 시스템의 일부분인 108모선에 적용하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

- (1) 정전구간내의 모든 부하를 여유용량이 가장 큰 인접 피더로 절체하여 과부하 group으로 지정 후 개선된 순환적 최적우선탐색을 적용함으로써 적은 탐색공간과 수행시간으로 정전복구 및 부하균등화를 이루었다. 따라서 본 알고리즘을 실시간 제어가 요구되는 배전자동화 시스템의 정

전복구 알고리즘에 적용이 가능하리라 사료된다.

- (2) 제시한 선로복구지수와 피더부하 균등화지수의 값이 적을수록 피더간의 부하를 더욱 균등히 배분가능하며 그리고 사고 후 건전피더의 갯수가 많을 수록 그 지수 값들은 적어지므로 피더의 갯수가 적은 소규모의 계통보다는 피더의 갯수가 많은 대규모의 계통에 적용시 보다 효율적으로 적용될 것이라 사료된다.
- (3) 알고리즘을 적용후 각 피더로 흐르는 부하전력은 비교적 균등화를 이루었으나 완벽한 균등화를 이루지는 않았다. 만약 보다 정확한 부하균등화를 이루고자 하면 각 피더간 흐르는 부하전력을 비교하여 상대적으로 과부하인 피더를 과부하 group으로 지정 후 같은 방식으로 탐색을 반복하면 보다 정확한 부하균등화를 이룰 수 있다.
- (4) 본 알고리즘은 계통내의 정전구간 발생시 정전된 부하를 모두 복구가능 하다는 전제하에서 수행된 것이다. 따라서 대규모의 정전이 발생하여 계통에서 모든 정전 부하를 복구하는 것이 불가능 할 경우 일정량의 부하차단이 이루어진 후 본 알고리즘이 적용되어야 하며 이때 어떤 부하를 차단한 후 정전을 복구 할 것인가에 관한 연구는 차후에 추진할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 송길영, 김용하, 이범, 차준민, 남궁재용, 이승원, "배전계통의 효율적인 선로접속변경에 의한 긴급정전복구알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 7, pp 843 - 851, 1995. 7
- [2] K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, H. Kuwabara, "A New Algorithm for service restoration in distribution systems", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol 4, NO. 3, pp 1832-1839, July 1989
- [3] Y. Y. Hsu, H. Kuo, "A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, pp 1950-1957, April 1994.
- [4] Y. Fukuyama, H. D. Chiang, K. N. Miu, "Parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems", Electric Power & Energy Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 111 - 119, 1996.
- [5] Y. T. Hsiao, C. Y. Chien, " Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination Fuzzy- GA method" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp 1394 - November 2000.
- [6] D.shirmohammai, "Service restoration In distribution Networks via networks reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp 952 - 958, April 1992.
- [7] A. L. Morelato, A. Monticelli, "Heuristic search approach to distribution system restoration ", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235 - 2241. October 1989.
- [8] T.Taylor, D. Lubkeman, "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 239-246. January 1990.
- [9] J. S. Wu. K. L. Tomsovic, C. S. Chen, "A heuristic

search approach to feeder switching operations for overload, fault, unbalanced flow and maintenance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp.1579-1585, October 1991.

- [10] V. S. Devi, G. Anandalingam, "Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries", IEEE Trans, Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp 430 - 437, January 1995.
- [11] 고윤석, 김호용 "인공지능기법을 이용한 배전자동화 시스템의 종합제어전략 수립지원 소프트웨어의 개발" 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 5, pp 566 - 573, 1995. 5
- [12] C. C. Liu, S. J. Lee, S, S. Venkata, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, pp 619 - 626, May, 1988
- [13] 최상열, 신명철 "순환적 부분트리 탐색법을 이용한 중부하 배전계통의 손실최소화" 대한전기학회 논문지, Vol. 50, No. 5A, pp 241-247, 2001. 5
- [14] 南, 金, 林, 奈良 : "放射狀配電係統負荷 バランス 問題の新しい 高速近似解法", 電學論 B, 117卷, 10号, 平成 9年

저 자 소 개



최 상 열 (崔 相 烈)

1970년 8월 24일 생. 1996년 성균관대 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학). 2002년~ 현재 안양대학교 디지털미디어학부 강의전임강사
E-mail : ppk99@aycc.anyang.ac.kr



정 호 성 (鄭 浩 聖)

1995년 성균관대 전기공학과 졸업. 2002년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학)
2002년 ~ 현재 성균관대 부설 산업전자응용연구소 연구원
E-mail: hsjung@pscal.skku.ac.kr



신 명 철 (申 明 澈)

1947년 4월 3일 생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1978년 충북대학교 전기공학과 조교수. 2000년~2001년 미국펜실바니아 주립대학교 방문교수. 1978~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수
E-mail: mcshin@speed.skku.ac.kr