

## Service Restoration Considering Load Balancing In Distribution Networks

崔相烈\* · 金鍾亨\*\* · 申明澈\*\*\*  
(Sang-Yule Choi · Jong-Hyung Kim · Myong-Chul Shin)

**Abstract** -Service restoration is an emergency control in distribution constrol centers to restore out-of-service area as soon as possible when a fault occurs in distribution networks. therefore, it requires fast computation time and high quality solutions for load balancing. In this paper, a load balance index and heuristic guided best-first search are proposed for these problem. The proposed algorithm consists of two parts. One is to set up a decision tree to represent the various switching operations available. Another is to identify the most effective the set of switches using proposed search technique and a load balance index. Test results on the KEPCO's 108 bus distribution system show that the performance is efficient and robust.

**Key Words** : Service Restoration, Load Balancing, A Load Balance Index, Heuristic Guided Search

### 1. 서 론

배전계통을 구성하는 설비는 대용량화, 다양화 그리고 복잡화되어 가는 추세이며, 정밀산업 부하, 첨단산업 부하 등 부하성비 또한 다양해지면서 배전계통의 운영환경에 민감한 선진국형 부하가 증가하고 있다. 만약 계통의 고장으로 인한 정전이 발생되는 경우 수용가에서 생산되는 정밀 제품의 질 저하라는 중요한 산업시설의 정지 그리고 정보의 손실 등을 발생시켜 이에 따른 막대한 경제적 손실이 초래되게 된다. 따라서 양질의 신뢰성 있는 전력을 공급하기 위해 사고 후 정전시간 및 정전구역을 단축시킬 수 있는 효율적인 정전복구 기법의 필요성이 증대되고 있다.

정전구간을 복구하기 위한 알고리즘으로, Aoki등[1]은 전압, 선로 허용 전류 용량 등의 제약조건을 만족하면서 최대한 많은 양의 부하를 인접된 선로로 절체시키기 위한 다단계 부하 절체를 제시하였다. 그러나 해를 찾는 과정 중에 불필요한 스위칭이 포함되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최급강화법을 확장 적용한 이중 최급강화법(dual gradient method)이 배전계통의 정전 복구에 적용되었다[2]. 적용된 이중 최급강화법은 최대한 많은 정전 구간을 복구시키기 위한 목적함수와 제약조건 위반 정도를 나타내는 상수와의 기울기가 증가되는 방향으로 정전복구를 위한 스위칭을 수행하는 것이다. 이러한 방법으로 정전복구 과정 중에 불필요한 스위칭이 감소되었다. 또한 Taylor 등[8]은 경험적인 지식으로 계통을 재구성하는 최적우선탐색법의 전

문가 시스템을 적용하였다. 적용된 방식은 구분 개폐기와 연계 개폐기를 하나의 조합으로 하는 트리를 구성하고, 각 변압기가 분담하여야 할 계통의 목표 부하량과 각각의 변압기가 실제로 분담해야하는 부하량과의 차를 정식화한 휴리스틱 지수와 최적우선탐색(best-first search) 방식을 이용하여 조합을 탐색하는 것이다. 이러한 방식은 스위칭을 탐색하는 과정 중에 많은 수의 불필요한 스위칭이 포함되는 문제점이 있다. 최근에는 배전계통의 사고시 선로의 복구 능력을 정량화된 지수로 제안하고 이를 이용한 부하절체 방안들이 연구되고 있다[16,17]. 그러나 이와같이 국내외적으로 제시된 연구들은 사고 후 긴급히 정전을 복구시키는 것에만 중점되어 연구되었을 뿐이며 복구 후에 특정 선로에 집중되는 부하를 계통 전체로 분산시키기 위한 부하균등화의 노력은 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 사고 발생 시 단지 정전의 복구뿐만 아니라 부하의 균등화까지도 함께 수행되는 효율적인 정전복구 알고리즘을 제시한다. 제시되는 알고리즘은 건전피더들이 고장 발생 직후 계통으로 공급하여야 할 부하의 총량을 규정하는 함수로부터 각 피더들이 공급하여야 할 목표치를 제안한 참고문헌[16]의 피더부하 균등화지수를 확대 변형한 휴리스틱 지수를 제안하고 또한 지수의 목적 값을 만족하는 스위칭을 찾기 위하여 다단계 부하절체를 응용한 트리 탐색법을 제시한다. 본 알고리즘을 실제로 서울의 k지사에서 운용되고 있는 108모선에 적용하였으며 그 결과 적은 탐색 횟수로 정전이 복구됨과 동시에 건전 선로간의 부하가 균등화되었음을 입증하였다.

### 2. 부하균등화를 고려한 정전복구 알고리즘

#### 2.1 정전복구를 위한 다단계 부하 절체 방안

정전복구 문제는 배전계통에서 고장 발생시 고장 선로 구

\*正 會 員 : 安養大 디지털미디어學部 專任講師 · 工博  
\*\*正 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 博士課程  
\*\*\*終身會員: 成均館大 情報通信工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 2003年 3月 4日  
最終完了 : 2003年 8月 11日

간을 검출한 후 고장 선로 구간을 건전 구간으로부터 분리하고 방사상 구성에 따라 발생하는 사고 구간 이후의 건전 정전구간내의 부하를 적절한 스위칭을 통하여 바로 인접된 건전 선로로 절체시키는 것이며 이때 방사상 선로 구성, 전압, 허용 전류 용량 등의 제약조건들이 만족되어야 한다. 만약 바로 인접한 건전 선로의 용량이 부족하여 정전구간의 부하를 모두 복구시키기 어려운 경우 더 먼 이웃의 건전 선로의 협조(부하절체)가 이루어진다. 그림 1은 이와 같은 협조의 개념을 보여준다[18].

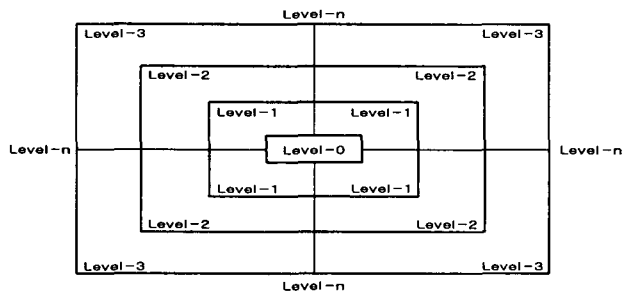


그림 1 건전 정전구간 복구를 위한 부하 절체 레벨  
Fig. 1 Load transfer level for recovery of safe outage section

여기서,

- Level-0** : 정전구간
- Level-1** : 정전구간과 직접 연계 가능한 인접 선로, 본 연구에서는 이 레벨에 속한 선로들을 1차 백업선로로 정의
- Level-2** : Level-1 선로와 직접 연계 가능한 선로, 2차 백업선로로 정의.
- Level-3** : Level-2 선로와 직접 연계 가능한 선로, 3차 백업선로로 정의한다.
- Level-N** : Level-(N-1) 선로와 직접 연계 가능한 선로

위와 같은 절체 레벨 개념에서 정전구간에 대한 용통 문제는 단단계 부하 절체 과정을 통하여 구현할 수 있다.

다음의 표기에서 ← 표시는 부하절체의 방향을 의미한다.

- Stage-1 : (Level-1) ← (Level-0)
- Stage-2 : (Level-2) ← (Level-1) ← (Level-0)
- Stage-3 : (Level-3) ← (Level-2) ← (Level-1) ← (Level-0)
- Stage-N : (Level-N) ← (Level-(N-1)) ← ... ← (Level-1) ← (Level-0)

레벨 개념을 이용한 부하 절체의 예를 다음의 그림 2를 이용하여 설명하면 다음과 같다.

만약 3번 선로 구간에 고장이 발생하는 경우 선로 구간 (8,13,18,23)은 Level-0에 속하는 건전 정전구간이 된다. 이때 2번과 4번 선로는 1차 백업선로가 되고 1번과 5번 선로는 2차 백업선로가 된다. 정전복구는 정전구간내의 부하를 우선적으로 1차 백업선로들로 절체 시킴으로써 이루어진다.

이때 1차 백업선로가 부하 절체 후 과부하 되어 전압, 전류 등의 제약조건 위반이 발생되면 1차 백업선로에 속한 일정량의 부하를 2차 백업선로로 절체하는 스위칭을 수행하여 1차 백업선로에 발생된 제약조건 위반을 해소한다.

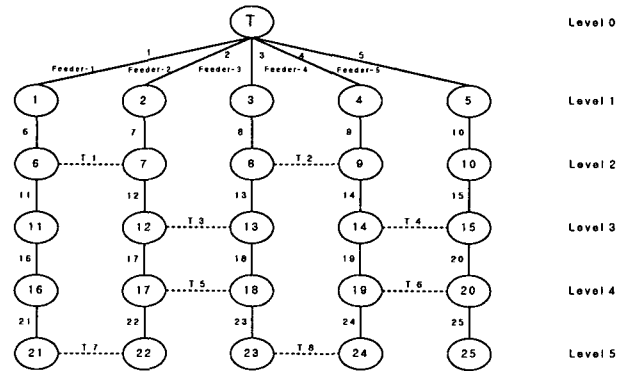


그림 2 5개의 선로로 구성된 모델 계통  
Fig. 2 Five-feeder model system

### 2.2 선로간 부하 배분량의 계산

배전계통내의 각 선로가 분담 가능한 부하량은 정해져 있으며 정해진 부하량은 정전발생 후 각 선로가 분담하여 계통으로 공급하여야할 부하량을 결정하는데 중요한 지표가 된다. 본 논문에서는 정전복구 시 특정 선로에 집중된 부하를 계통전체로 분산시키기 위해 참고문헌[16]에서 제시한 피더부하 균등화 지수를 수정·보완한 휴리스틱 기반의 부하 평형 지수 제시한다. 부하평형지수를 이용함으로써 각 건전 선로는 허용공급용량에 비례하여 고장구간의 부하 유통이 가능해진다. 부하 평형 지수의 정식화 과정은 다음과 같다.

$$FL_i = FNC_i \times \frac{\sum_{i \in K} SL_i}{\sum_{i \in U} TAC_i} \quad (1)$$

$$LI_i = FL_i - SL_i \quad (2)$$

$$LI_{sum} = |LI_1| + |LI_2| + |LI_3| + \dots + |LI_i| \quad (3)$$

- FL<sub>i</sub>** : 건전선로 i가 분담하여야할 목표 부하량(MVA)
- LI<sub>i</sub>** : 건전선로 i가 분담하여야할 목표 부하량과 선로 부하량과의 차 (MVA)
- LI<sub>sum</sub>** : 부하평형지수
- SL<sub>i</sub>** : 건전선로 i의 부하량(MVA)
- TAC<sub>i</sub>** : 변압기 T<sub>i</sub>의 공급허용용량 (MVA)
- FNC<sub>i</sub>** : 건전선로 i의 허용공급용량 (MVA)
- U** : 계통내의 변압기들의 집합
- K** : 계통내의 모든 선로들의 집합

식 1에서 목표 부하량은 건전 정전구간의 복구 및 건전 선로간의 부하 균등화를 위해 건전 선로i가 분담하여야 할

는 부하량이다. 식 2에서 만약  $FL_i > SL_i$ 인 경우( $LI_i > 0$ )는 건전 선로의 부하량이 목표 부하량 이하이므로 해당 선로가 보다 많은 계통의 부하를 분담할 수 있도록 하는 스위칭이 수행되어야 한다. 만약  $FL_i < SL_i$ 인 경우( $LI_i < 0$ )는 건전 선로의 부하량이 목표 부하량 이상이므로 해당선로에 연결되어 있는 일부의 부하를 인접된 선로로 절체시켜야 한다. 식 3에서 제시된 부하평형지수는 사고발생 후 각 건전 선로의  $|LI_i|$ 의 합으로 정의된다. 따라서 건전 선로의 부하량이 건전 선로가 분담하여야할 목표 부하량에 근접될수록 부하평형지수는 감소되며 만약 모든 건전 선로의 부하량이 사고 후 건전 선로가 분담하여야 하는 목표 부하량과 일치할 경우는  $LI_{sum} = 0$  이 된다.

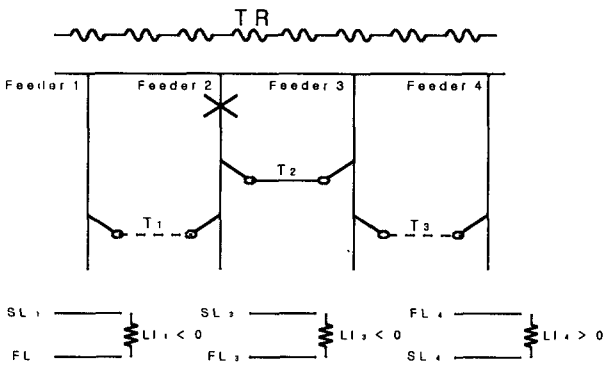


그림 3 선로간 부하균등화로 인한 부하균등화지수의 감소  
Fig. 3 Decreasing the load balancing index by load balancing

그림 3에서 2번 선로 사고시 정전구간내의 부하를 제1차 백업선로인 3번 선로로 절체하는 경우 3번 선로로 부하가 집중되어  $|LI_3|$ 은 증가된다. 이때  $|LI_3|$ 값을 감소시키기 위해  $LI_1 < 0$  인 1번 선로로 부하를 절체하는 경우는 비록  $|LI_3|$ 의 값은 감소되지만  $|LI_1|$ 의 값이 증가되어 부하균등화지수의 값은 변화가 없게 된다. 따라서 3번 선로의 부하는  $LI_4 > 0$  인 4번 선로로 절체시켜야  $|LI_3|$ 과  $|LI_4|$ 은 모두 감소되어 부하균등 지수의 값은 감소하게 된다. 이와 같이 정전구간의 부하를 시스템 차원에서 분산시키기 위한 (close, open)스위칭 조합의 선택은 부하균등 지수를 최소화시킬 수 있는 스위칭 조합이 선택되어야 한다.

2.3 정전복구를 위한 탐색트리 구성

계통의 사고 발생 후 발생하는 Level-0에 속한 모든 건전 정전구간을 Level-1에 속한 특정의 1차 백업선로와 강제적으로 연결하여 특정의 1차 백업선로를 과부하 선로로 만들고 그러한 1차 백업선로에 연결된 일정량의 부하가 계통내의 모든 건전 선로에 고르게 분산되면 정전이 복구됨과 동시에 건전 선로간의 부하도 균등화된다. 여기서, 1차 백업선로를 선택하는 방법은 2차 백업선로의 개수가 가장 많은 선로를 선택한다. 그것은 비록 제시되는 방식이 마진이 가장 큰 선로를 선택하는 경우보다는 정전복구를 위한 스위칭 탐

색 공간은 증가되지만 부하균등화를 위한 정확한 스위칭 조합을 찾을 수 있기 때문이다. 그림 2에서 만약 4번 선로 구간에서 고장이 발생한 경우, Level-1에 속하는 1차 백업선로는 3번과 5번 선로가 되며 이중 2차 백업선로의 개수가 많은 3번 선로가 선택되어 건전 정전구간 내의 모든 부하를 3번 선로로 절체한다. 이때 부하의 절체에 이용가능한 연계 개폐기는 T2와 T8 이며 이중 양단 전위차가 큰 T2를 이용한다. T2가 투입된 후 1차 백업선로인 3번 선로는 과부하 또는 중부하 선로가 되며 이와 같은 과부하를 해소하고 건전 선로간의 부하균등화를 이루기 위해서는 3번 선로의 부하를 계통 전체로 분산 시켜야 한다.

본 논문에서는 1차 백업선로의 부하를 계통 전체로 분산시키기 위해 요구되는 (close, open)스위칭 조합을 찾기위해, 참고 문헌[9]에서 제시한 트리 구조에 다단계 부하절체의 개념을 확대 적용한 탐색 트리를 제안하며 트리 구성 방법은 다음과 같다.

우선 1차 백업선로의 부하를 2차 백업선로로 절체하기 위해 요구되는 (close,open) 스위칭 조합을 찾기위해 1차와 2차 백업선로를 연계하는 연계 계폐기를 투입시킨 후 1차 백업선로내에서 개방 되어야할 구간 개폐기를 연계 개폐기에 근접한 순서대로 시작하여 1차 백업 피더의 전원측 방향으로 탐색한다. 그 후에 2차 백업선로의 부하를 3차 백업선로로 절체하기 위해 2차와 3차 백업선로를 연계하는 연계 개폐기를 투입 시킨 후 2차 백업선로내에서 개방 되어야할 구간 개폐기를 연계 개폐기에 근접한 순서대로 시작하여 2차 백업선로의 전원측 방향으로 탐색한다. 이와 같이 탐색되어지는 (close, open)스위칭 조합을 트리로 표현하면 다음의 그림 4와 같다.

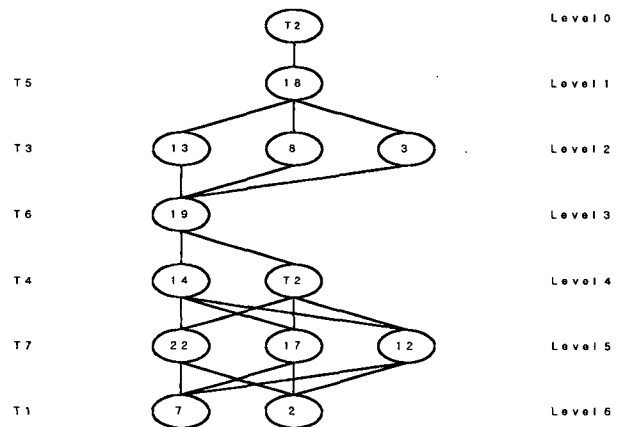


그림 4 6개의 연계 개폐기를 갖는 부분 트리  
Fig. 4 Sub tree with six tie switches

그림 4에 제시된 부분트리는 4번 선로에 사고 발생시 1차 백업피더에 발생하는 과부하를 계통전체로 분산시키기 위해 실행 가능한 (close, open)스위칭 조합을 표현하기 위한 것이다. 그림의 각 레벨에 해당되는 것은 부하 절체를 위해 투입될 수 있는 연계 개폐기를 의미하며 각 노드는 각 레벨의 연계 개폐기가 투입 되었을 때 방사상 제약 조건을 만족하면서 인접된 선로로 부하를 절체 하기 위해 반드시 개방

되어야할 구간 개폐기를 의미한다. 그림 4를 Level 0,1,2,3과 Level 3,4,5,6으로 분리하여 표현하면 그림 5.a와 5.b이다.

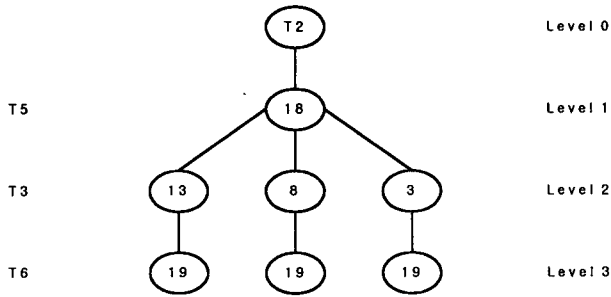


그림 5.a Level 0,1,2,3의 매핑 관계  
Fig. 5.a Mapping relation for Level 0,1,2,3

그림 5.a의 Level 0의 T2 노드는 4번 선로 구간 사고시에 우선적으로 투입되어야 할 연계 개폐기이므로 시작 노드가 된다. 연계 개폐기 레벨에서 각각의 구분 개폐기 노드들은 좌측에서 우측으로 갈수록 과부하 선로의 전원단과 가까운 구분 개폐기가 되므로 만약 Level 2의 연계 개폐기 T3이 투입될 경우 개방 되어야할 구간 개폐기는 좌측에서 우측으로 즉 13, 8, 3 순서대로 탐색하며 탐색 후 실행 가능한 (close,open) 스위칭은 (T3,13),(T3,8),(T3,3)중의 하나가 된다.

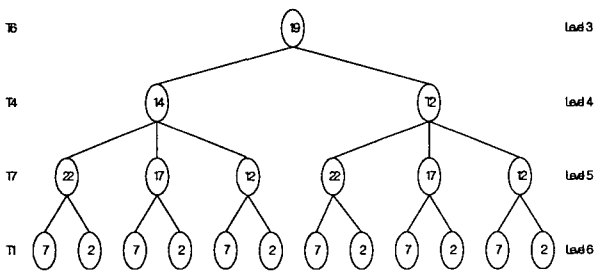


그림 5.b Level 3,4,5,6의 매핑 관계  
Fig. 5.b Mapping relation for Level 3,4,5,6

1차 백업선로는 트리의 연계 개폐기 레벨 T5, T3, T6, T4에서 선택된 수행된 (close,open) 스위칭으로 부하가 감소되지만 반대로 2차 백업선로가 담당하는 부하량은 증가된다. 따라서 증가된 2차 백업선로의 일부 부하를 3차 백업선로로 절체 가능하도록 T7과 T1이 트리 레벨 구성에 이용된다.

### 2.4 다단계 부하절체를 고려한 순환적 최적우선탐색

구성된 부분트리에서 가능한 모든 경우를 검색하여 최적의 스위칭 조합을 찾는 것은 소규모의 작은 계통에서는 적용 가능하지만 대규모 계통의 정전복구에 적용할 경우 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 참고문헌

[13]에서 제시된 순환적 최적우선탐색법에 다단계 부하절체 개념을 도입한 휴리스틱 탐색 기법을 제시한다.

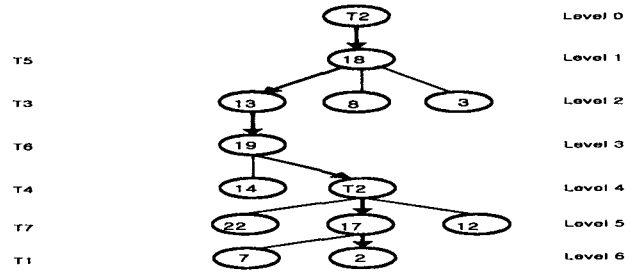


그림 6 정전복구를 위한 1차 최적우선탐색  
Fig. 6 First step of best-first search for feeder restoration

그림 6에서 T2가 시작노드이고 2번 노드는 탐색의 결과로 얻은 최종노드이다. 1차 최적우선탐색은 제시한 부하평형지수가 최소가 되도록 하는 (close, open)스위칭 조합을 찾기 위해, 트리의 상위 레벨로부터 최하위 레벨까지 노드를 선택하는 과정을 반복적으로 수행하여 최종노드를 찾고 그에 따른 경로를 찾는 것이다. 선택된 경로에 해당되는 스위칭 조합은 부하평형지수가 최소로 되는 스위칭 조합이다. 이와 같은 방법으로 선택된 스위칭 조합은 {(T5, 18), (T3,13), (T6, 19), (T4, T2), (T7, 17), (T1, 2)}이고 1차 최적우선탐색에서 선택된 결과 노드인 2번 노드를 시작 노드로 하는 역트리 구성후 2차 최적우선탐색을 진행한다.

여기서 2차 최적우선탐색은 1차 탐색과는 다른 방식으로 탐색된다. 즉 1차 최적우선탐색은 각 레벨에 속한 모든 노드를 탐색하였으나 2차 탐색에서는, 1차 탐색에서 선택되었던 연계 개폐기 레벨을 탐색할 경우 레벨에 있는 모든 노드를 탐색하지 않고 오로지 1차 탐색에서 선택된 노드의 오른쪽 방향으로만 탐색한다. 이것은 적용된 부분 트리의 상위 레벨에서는 2차 백업선로와 연결된 연계 개폐기를 이용하고 하위 레벨로 갈수록 3차 4차 백업선로와 연결된 연계 개폐기를 이용하기 때문에 만약 1차 부분트리 탐색에서 3차 백업선로와 2차 백업선로가 연결된 연계 개폐기가 선택되어 스위칭이 이루어진 경우(그림 6의 (T7,17), (T1,2)의 노드 선택시)는 2차 백업선로의 일부 부하가 3차 백업선로로 절체된 경우이므로 2차 백업선로의 여유용량이 증가된 것을 의미한다. 따라서 1차 백업선로의 부하는 2차 백업선로로 보다 많이 절체될 수 있으므로 2차 최적우선탐색에서는 1차 백업선로의 부하가 2차 백업선로로 보다 많이 절체될 수 있는 방향으로 오른쪽 방향으로만 탐색한다.

그림 7에서 진하게 표시된 원은 2차 최적우선탐색에서 새로이 탐색된 노드이며 2차 탐색으로 선택된 스위칭 조합은 {(T1, 2), (T7, 12), (T4, T2), (T6, 19), (T3, 8), (T5, 18)}이다. 2차 최적우선탐색에서는 1차 최적우선탐색에서 선택된 스위칭 조합인 {(T5, 18), (T3,13), (T6, 19), (T4, T2), (T7, 17), (T1, 2)}의 오른쪽 방향으로만 탐색되므로 2차 탐색에서 새로이 탐색된 노드의 개수는 3개이다. 이와 같은 탐색을 수행함으로써 적은 스위칭 탐색으로 정전을 복구함과 동시에 특정 선로에 발생하는 과부하 해소가 가능해진다.

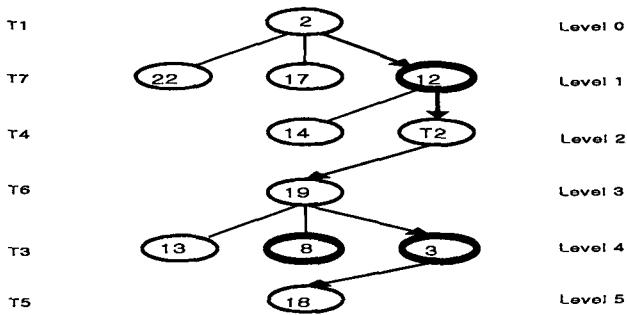


그림 7 정전복구를 위한 2차 최적우선탐색  
Fig. 7 Second step of best-first search for feeder restoration

### 3. 사례 검토

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 실제 시스템의 일부 분인 서울의 k지사의 108모선에 제안한 알고리즘을 적용하였다. 그림 8에서 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 정적용량은 20[MVA]로 가정하였다.

표 1 108모선 각 선로의 부하량  
Table 1 Feeder loadings for 108 bus system

각 선로의 부하량 [MVA]						
선로 1	선로 2	선로 3	선로 4	선로 5	선로 6	선로 7
14.47	5.17	13.04	8.38	14.34	9.88	13.80

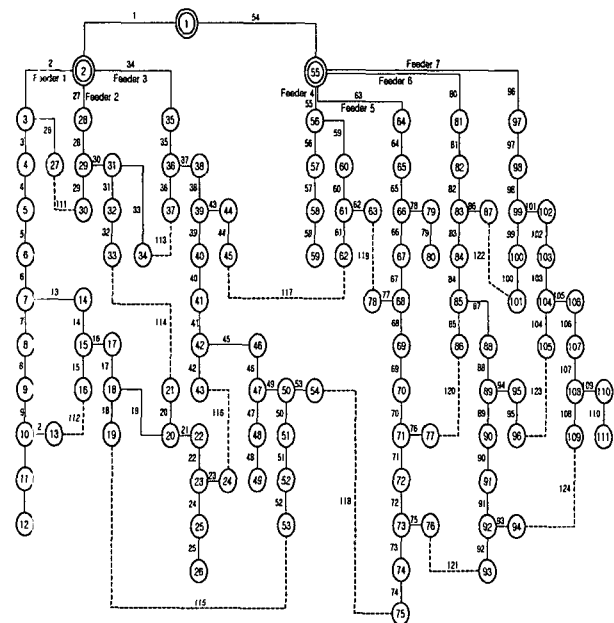


그림 8 108 모선 시스템의 초기구성  
Fig. 8 Initial configuration of 108 bus system

부하균등화를 고려한 배전계통의 정전복구

### 3.1 80번 선로 구간 사고

80번 선로 구간 사고 시 Level-1에 속하는 1차 백업선로는 5번과 7번 선로이고 이 중 2차 백업선로의 개수가 많은 5번 선로로 건전 정전구간내의 모든 부하를 절체한다. 절체 후 각 선로가 분담하여야 할 목표 부하량은 13.54[MVA]이며 각 선로의 부하량은 표 2와 같다.

표 2 80번 선로 구간 사고 시 T120 개폐기 투입 후 각 선로의 부하량

Table 2 Feeder loadings after closing T120 tie switch on fault line section 80

각 선로의 부하량 [MVA]						
선로 1	선로 2	선로 3	선로 4	선로 5	선로 6	선로 7
14.47	5.17	13.04	8.38	26.06	0	13.80

표 2에서 5번 선로는 과부하 상태이므로 일정량의 부하를 계통전체로 분산시켜야 한다. 이를 위한 스위칭 조합을 찾기 위해 다단계 부하절체 개념을 도입한 1차 최적우선탐색을 수행하면 그림 9와 같다.

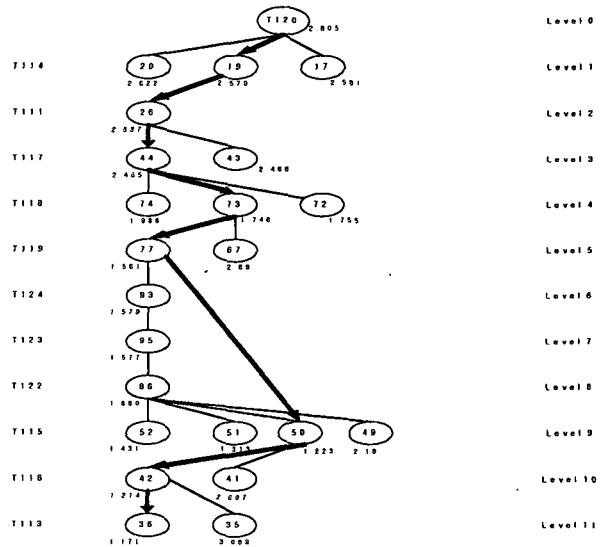


그림 9 80번 선로 구간 사고 발생 시 정전복구를 위한 1차 최적우선탐색

Fig. 9 First step of best-first search for restoration on fault line section 80

그림 9에서 각 노드에 표시된 수치는 해당되는 스위칭 조합이 수행되었을 경우의 부하평형지수이다. 스위칭 조합의 선택 방법은 스위칭이 수행되었을 경우의 부하평형지수가 가장 적은 것을 선택한다. 1차 탐색으로 선택된 스위칭 조합은 {(T114,19), (T111,26), (T117,44), (T118,73), (T119,77), (T115,50), (T116,42), (T113,36)}이고 보다 정확한 스위칭 조합을 찾기위해 역트리를 구성후 2차 최적우선탐색을 수행하면 그림 10과 같다.

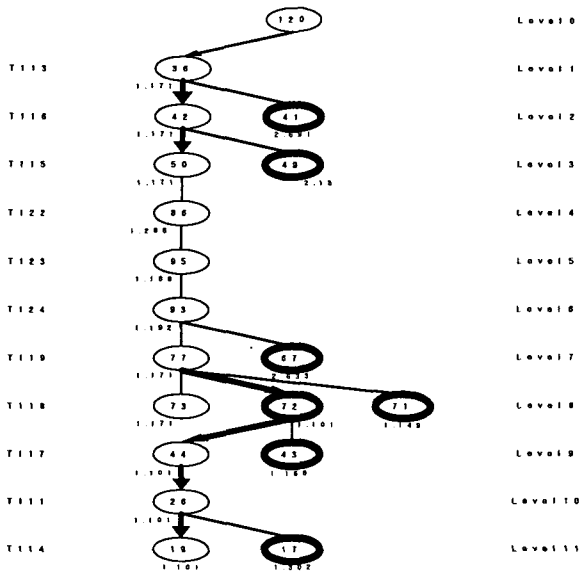


그림 10 80번 선로 구간 사고 발생 시 정전복구를 위한 2차 최적우선탐색

Fig. 10 Second step of best-first search for restoration on fault line section 80

그림 10에서 진하게 표시한 원은 2차 최적우선탐색에서 새로이 탐색된 노드이다. 이와 같이 1차 탐색에서 선택되었던 스위칭 조합이 있는 연계 개폐기를 2차에서 다시 탐색할 때는 1차 탐색에서 선택된 스위칭 조합 노드의 오른쪽 방향으로만 탐색하여 1차 최적우선탐색보다 탐색공간을 줄인다. 이것은 제한한 탐색방법의 목적이 과부하로 된 1차 백업선로의 부하를 계통전체로 분산시키기 위한 근사 최적의 스위칭 조합을 탐색하는 것이므로 만약 2차 최적우선탐색에서 왼쪽 방향으로 탐색하여 노드가 선택된다면 부하절체의 방향이 (Level-3) → (Level-2) → (Level-1)로 되어 과부하로 지정된 1차 백업선로로 부하가 집중되는 현상이 발생할 우려가 있다. 비록 왼쪽 방향의 탐색으로 선택된 스위칭 조합이 Level-2에 속하는 2차 백업선로 상호간 혹은 Level-3에 속하는 3차 백업선로 상호간의 부하 불균형을 감소시켜서 부하평형지수의 값을 감소시킬 수 있으나 보다 적은 탐색으로 1차 백업선로의 과부하를 감소시키기 위하여 2차 탐색에서는 무시한다. 2차 탐색에서 새로이 탐색된 노드의 개수는 10개이고 탐색 결과 선택된 스위칭 조합은 ((T114,19), (T111,26), (T117,44), (T118,72), (T119,77), (T115,50), (T116,42), (T113,36))이다. 1차 탐색과 비교하여 2차 탐색에서는 1차 탐색에서 선택되었던 스위칭 조합 (T118, 73)이 2차 탐색에서 (T118, 72)로 변경되었다. 그러한 이유는 1차 탐색에서 T118의 하위 레벨인 T115, T116, T113의 스위칭 수행으로 2차 백업선로인 3번 선로가 공급하던 부하의 일부가 3차 백업선로인 1번과 2번 선로로 절체되어서 3번 선로의 여유 용량이 증가되어 과부하로 된 1차 백업선로의 부하를 2차 백업선로가 보다 많이 절체해 올 수 있기 때문이다. 단단계 부하절체를 고려한 순환적 부분 트리 탐색후 각 선로의 부하량은 다음의 표 3과 같다.

표 3 80번 선로 구간 사고 발생 시 정전복구를 위한 순환적 부분 트리 탐색후 각 선로의 부하량

Table 3 Feeder loadings after cyclic sub tree search fault on line section 80

각 선로의 부하량 [MVA]						
선로 1	선로 2	선로 3	선로 4	선로 5	선로 6	선로 7
13.17	11.29	13.37	11.70	17.91	0	13.80

표 3에서 5번 선로의 부하량은 탐색전 26.06[MVA]에서 17.91[MVA]로 약 31[%]감소되었다. 5번 선로를 제외한 나머지 건전선로들은 부하가 거의 균등화 되었음을 알 수 있다.

### 3.2 63 선로 구간과 84 선로 구간의 동시 사고

두 개 이상의 선로 구간에서 동시에 고장이 발생하는 다중 사고 시, Level-0에 속하는 정전구간내의 부하를 절체하기 위한 1차 백업선로의 선정 방법은 단일 사고 시와 동일하다. 즉 84번 선로 구간 이후 발생하는 건전 정전구간의 부하를 절체하기 위한 1차 백업선로는 오직 7번 선로만이 존재하므로 1차 백업선로로 7번 선로가 선정된다. 그리고 63번 선로 사고로 인한 정전을 복구하기 위한 1차 백업선로는 3번과 4번 선로이고 이중 2차 백업피더의 개수가 많은 3번 선로가 1차 백업선로로 선정된다. 이와 같이 다중사고 발생 시는 여러개의 과부하인 1차 백업선로들이 존재하며 이러한 선로에 연결된 부하를 계통전체로 분산시키기 위해서는 하나씩 순서대로 부하를 감소시키는 스위칭을 수행한다. 각각의 1차 백업선로로 정전구간의 부하를 절체 후 각 선로가 분담하여야 할 목표 부하량은 13.44[MVA]이며 그때 각 선로의 부하량은 표 4와 같다.

표 4 63, 84 선로 구간 동시 사고 발생 시 T118, T123 투입 후 각 선로의 부하량

Table 4 Feeder loadings after closing T118, T123 tie switch on fault line section 63, 84

각 선로의 부하량 [MVA]						
선로 1	선로 2	선로 3	선로 4	선로 5	선로 6	선로 7
14.47	5.17	27.33	8.38	0	3.36	29.67

표 4에서 3번과 7번 선로가 과부하 되어 있으므로 이러한 선로들의 일정량의 부하는 계통전체로 분산되어야 한다. 7번 선로의 부하를 계통으로 분산시키기 위한 2차 백업선로는 3번과 6번이고 3번 선로에 집중된 부하를 분산시키기 위한 2차 백업선로는 1번, 2번, 4번, 7번 선로가 된다. 여기서 3번 선로와 7번 선로는 서로가 서로를 위한 백업선로가 되어 이것을 트리 구성에 반영할 경우 트리 구성의 일관성이 없어진다. 따라서 이와 같은 경우는 2차 백업선로의 개수가 적은 3번 선로가 7번 선로에 대한 과부하 선로가 된다. 그러한 이유는 2차 백업선로의 개수가 많은 7번 선로가 3번 선로 보다 많은 부하를 인접된 2차 백업선로로 절체할 수

있는 가능성이 높기 때문이다. 그림 11은 정전복구를 위한 1차 최적우선탐색이다.

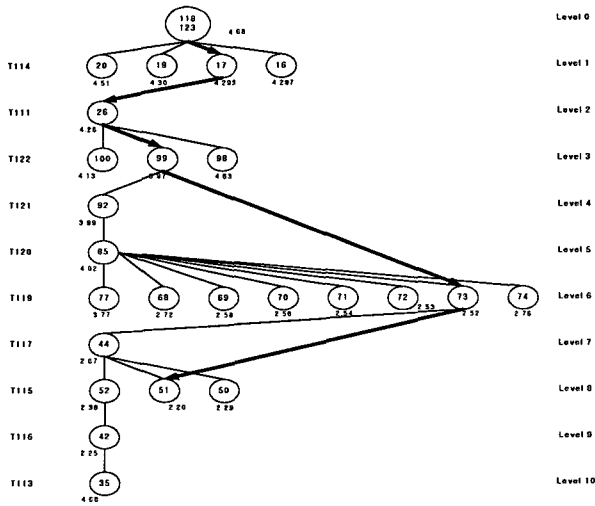


그림 11 63, 84 선로 구간 동시 사고 발생 시 정전복구를 위한 1차 최적우선탐색

Fig. 11 First step of best-first search for restoration on fault line section 63, 84

1차 탐색의 결과 선택된 스위칭 조합은 {(T114,17), (T111,26), (T122, 99), (T119, 73), (T115, 51)}이고 2차 탐색을 수행하면 그림 12와 같다.

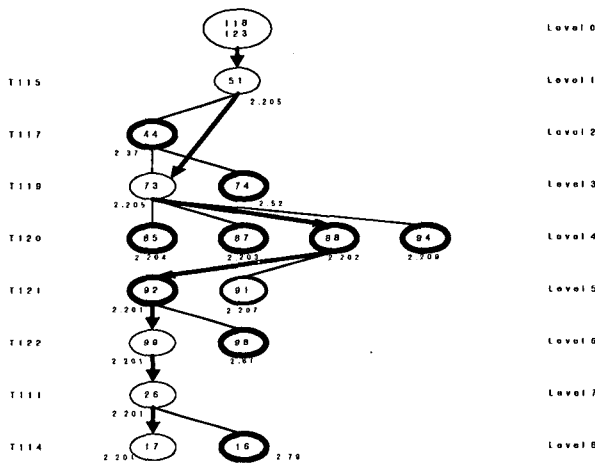


그림 12 63, 84 선로 구간 동시 사고 발생 시 정전복구를 위한 2차 최적우선탐색

Fig. 12 second step of best-first search for restoration on fault line section 63, 84

그림 12에서 연계 개폐기 T116과 T113은 2차 탐색을 위한 트리 구성시 사용되지 않았다. 그 이유는 1차 탐색에서 Level 9, Level 10 에 속한 노드들은 선택되지 않았으므로 상위 레벨에서 선택된 스위칭 조합의 부하평형지수에 영향을 주지 못하기 때문이다.

2차 탐색에서 새로이 탐색된 노드의 개수는 10개이고 선택된 스위칭 조합은 {(T115,51), (T119,73), (T120,88), (T121,92), (T122,99), (T111,26), (T114,17)}이다. 이중 1차 탐색의 결과와는 달리 스위칭 조합 (T120,88), (T121, 92)가 새로이 추가되었다. 이와 같은 새로운 스위칭 조합이 추가된 이유는 1차 최적우선탐색에서 Level 7 에서의 (T119,73) 스위칭으로 7번 선로의 부하를 절체할 수 있는 2차 백업선로가 1차 탐색전 3번 선로에서 1차 탐색 후 4번 선로로 변경되어서 2차 탐색에서는 7번 선로의 일부 부하가 4번 선로로 절체될 수 있기 때문이다. 이와 같은 2차 탐색 후 각 선로의 부하량은 표 5와 같다.

표 5 63, 84 선로 구간 동시 사고 발생 시 정전복구를 순환적 부분 트리 탐색 후 각 선로의 부하량

Table 5 Feeder loadings after cyclic sub tree search fault on line section 63, 84

각 선로의 부하량 [MVA]						
선로 1	선로 2	선로 3	선로 4	선로 5	선로 6	선로 7
9.95	12.76	<b>14.29</b>	16.79	0	4.37	<b>16.99</b>

표 5에서 3번 선로의 부하량은 최초 27.33[MVA]에서 순환적 최적우선탐색 후 14.29[MVA]가 되어 약 48[%]의 감소 효과가 있었고, 7번 선로는 최초 20.67[MVA]에서 16.99[MVA]로 약 18[%]의 감소가 있었다. 그러나 4번 선로의 부하량은 탐색전 8.38[MVA]에서 탐색 후 16.79[MVA]가 되어 약 100[%]가 증가되었다. 이것은 과부하로 된 1차 백업선로의 부하가 여유 용량이 많은 4번 선로로 가장 많이 절체되었기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 배전 계통에서의 사고 시 건전 정전구간의 복구를 위하여 부하균등지수와 다단계 부하절체 개념이 도입된 순환적 부분트리 탐색법을 이용하여 건전 정전구간의 복구 뿐만 아니라 동시에 건전 선로간의 부하도 균등화 시킬 수 있는 방법을 제시하였으며 다음과 같은 주요한 결론을 얻었다.

- (1) 부하균등지수는 '사고 발생 후 건전 정전구간의 복구를 위하여 각각의 건전 선로가 분담하여야 할 목표 부하량과 선로 부하간의 차를 이용한 지수로서 그 값이 최소로 되는 스위칭이 수행 될수록 각 건전 선로간의 부하는 정확히 균등화 되었다.
- (2) 다단계 부하절체 개념이 도입된 순환적 부분 트리 탐색법은 정전구간내의 모든 부하를 1차 백업선로로 절체하여 1차 백업선로를 과부하로 만든 후 부분 트리를 구성하고, 부하균등지수가 최소로되는 (close,open)스위칭 조합을 찾기 위해 탐색 방향을 다단계 부하절체가 고려되도록 트리의 오른쪽 방향으로만 한정함으로써 적은 스위칭탐색으로 정전복구 동시에 부하균등화도 역시 이루어지는 합리적인 스위칭 조합을 찾을 수 있었다.
- (3) 제시된 방식은 건전 정전구간의 복구가 완료되는 시점

에서 건전 선로간의 부하가 균등화 된다. 따라서 고장 구간 수리 후 원계통으로 복귀하기 까지의 한시적인 계통운용 상태에서 또다른 사고가 발생할 때 또는 갑작스런 과부하 상태가 발생하더라도 본 방식을 적용함으로써 별 무리없이 대처 가능하리라 사료된다.

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공 동연구소 주관으로 수행된 과제이며 이에 감사드립니다.

**참고 문헌**

[1] K. Aoki, T. Satoh, N. Itoh, H. Kuwabara, H. Kanezashi, "Voltage drop constrained of supply by switch operation in distribution systems", IEEE Trans, Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988.

[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.shirmohammadi, "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] 고유석, 김호용 "인공지능기법을 이용한 배전자동화 시스템의 종합제어전략 수립지원 소프트웨어의 개발" 대한전기학

회 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

[13] 김세호, 최병윤, 문영현, "트리탐색법을 이용한 사고복구 전문가 시스템", 대한전기학회 논문지. Vol.43, NO. 3, pp. 363 -371, 1994. 4.

[14] 송길영, 김용하, 이범, 차준민, 남궁재용, 이승원 "배전계통의 효율적인 선로접속변경에 의한 긴급정전복구 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 7, pp 843 - 851, 1995. 7

[15] 최상열, 신명철, "순환적 부분트리 탐색법을 이용한 중부하 배전계통의 손실최소화" 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No.5, pp 241 - 247, 2001. 5

[16] 최상열, 정호성, 신명철, "피더부하 균등화지수를 이용한 배전계통의 긴급정전복구 및 부하균등화", 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No.5, pp 217 - 224, 2002. 5

[17] 임성일, 진보건, 이승재, "배전계통 복구능력 평가방안 및 응용", 대한전기학회 논문지, Vol 51A, No.7, pp 333 - 340, 2002. 7

[18] 한국전기연구소 보고서 " 배전자동화 알고리즘 정립 및 표준화 연구", 한국전력공사 용역 보고서, 1993. 5

**저자 소개**



**최 상 열 (崔相烈)**

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



**김 중 형 (金鍾亨)**

1973년 4월 29일생. 1997년 성균관대 전기공학과 졸업(공학사). 1999년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 1999년~현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정  
E-mail : proa@ece.skku.ac.kr



**신 명 철 (申明澈)**

1947년 4월 3일 생. 1970년 성균관대 전기공학과 졸업. 1978년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1978~현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수  
E-mail: mcshin@speed.skku.ac.kr