

다중 정전영역을 고려한 정전복구 알고리즘

임성일, 하복남, 이종호, 조남훈  
한국전력공사 전력연구원

A Service Restoration algorithm Considering Multiple Outage Areas

Seong-Il Lim, Bok-Nam Ha, Jung-Ho Lee, Nam-Hun Cho  
KEPRI KEPCO

**Abstract** - This paper represents improved service restoration algorithm to deal with concurrent multiple outage areas. Restoration sequence is the most important to use backup feeders effectively. In order to decide restoration sequence, the algorithm calculates restorability of each outage area based on fuzzy evaluation of outage load and total backup feeder margin.

1. 서 론

배전계통에서 사고로 인하여 정전이 발생했을 때 고장 구간을 분리하고 사고구간 아랫단의 정전부하를 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하는 것은 배전자동화시스템에서 가장 중요한 기능이다. 정전복구방안의 도출은 스위치의 ON/OFF 상태를 대상으로 하는 조합 최적화의 문제이므로 경험적 탐색법을 이용하여 제한된 시간내에 준최적해를 구하려는 많은 연구가 진행되어 왔다[2-4]. 국내에서는 선로허용전류와 말단전압강하를 제한조건으로 그룹핑알고리즘에 의해 복구방안 후보를 도출하고, 스위칭수 최소화, 부하균등화, 건전부하절체 최소화, 비상대비도등의 고려사항을 퍼지평가하여 실용적인 해를 도출하는 방안이 연구되어 실제통 적용을 위한 준비단계에 있다[1]. 이 방법은 다양한 기준을 종합적으로 평가함으로써 운전원이 충분한 시간을 가지고 모든 상황을 고려하여 도출하는 복구방안과 유사한 해를 제시한다는 장점이 있으나, 모든 정전구간이 복구가능하다는 것을 전제로 하고 있으며, 여러류음의 정전영역이 발생한 경우 각각의 정전영역에 대한 복구를 독립적인 문제로 취급한다는 단점이 있다.

본 논문은 참고문헌 [1]에 제시된 알고리즘의 후속 연구로서 앞서 언급한 단점을 보완하기 위한 두가지 개선사항을 제시한다. 첫째는 다중 정전영역에 대한 복구방안 도출시 각 정전영역의 복구가능성을 지수화하여 복구방안 도출 순서를 결정함으로써 여러개의 정전영역에 공통으로 연계된 백업피더를 효율적으로 이용하는 방법이다. 복구가능성은 정전부하량과 연계선로의 공급여유용량 합계를 퍼지로그적으로 추론하여 지수화한다. 둘째는 연계선로의 공급여유용량 부족하여 정전영역내의 모든 정전구간이 복구되지 못할 경우 일부 부하만이라도 복구할 수 있도록 개선하였다. 이 방법은 참고문헌 [1]에 제시된 복구후보 도출 스킴중 Triple Grouping Restoration(TGR) 과 Double Grouping Restoration and Level 2 Load Transfer(DGRLT) 을 수정한 것이다.

2. 본 론

2.1 단일 정전영역 복구 알고리즘

참고문헌 [1]에 제시된 기존의 방식은 복구방안을 도출하기 위하여 두 단계를 거친다. 첫 번째 단계에서는

2.1.1에 나타낸 6가지 복구스킴을 이용하여 복구후보를 생성하고 두 번째 단계에서는 4가지 고려요소를 퍼지평가하여 최선의 해를 선택한다.

2.1.1 복구방안 후보 도출 단계

복구방안 후보를 생성하는 단계로서 제한조건인 선로 허용용량과 말단 전압강하 한계를 만족하는 모든 복구방안 후보를 찾아낸다. 정전부하의 분할하는 스위치는 연계선로의 공급여유용량 비율로 결정된다. 6가지 기본적인 복구 스킴은 다음과 같다.

- SELF(Self Restoration) : 사고선로가 루프로 이루어져 사고구간에 정전구간으로 가는 또 다른 경로가 있을 때 우선 배정함.
- SGR(Single Grouping Restoration) : 정전구간 전체를 하나의 연계선로에 절체하는 방안
- DGR(Double Grouping Restoration) : 정전구간을 마진비율로 나누어 두 개의 연계선로에 절체하는 방안
- TGR(Tripplle Grouping Restoration) : 정전구간을 마진 비율로 나누어 세 개의 연계선로에 절체하는 방안
- SGRLT(Single Grouping Restoration & Level-2 Load Transfer) : 정전구간 전체를 하나의 연계선로에 절체하고 연계선로의 과부하를 건전부하절체를 통하여 해소하는 방안
- DGRLT(Double Grouping Restoration & Live Load Transfer : 정전부하를 한쪽 연계선로만 과부하가 발생하도록 두 개의 연계선로로 나누어 절체한 후 건전부하절체를 통하여 연계선로의 과부하를 해소하는 방안

2.1.2 복구방안 평가 단계

실제적인 고려요소인 스위칭 최소화, 부하균등화, 건전부하절체 최소화, 비상대비도를 퍼지로그적으로 평가하여 이전 단계에서 도출된 복구후보중에서 최선의 해를 선택함.

표 1. 고려요소와 우선순위

| 우선순위 | 고려요소                                 |
|------|--------------------------------------|
| 1    | 복구의 신속성, 스위칭수                        |
| 2    | 부하균등화, 비상대비도, 전압강하, 건전부하절체최소화, 손실최소화 |
| 3    | 보호기기협조                               |

2.1.3 기존방식의 문제점

모든 정전구간이 복구 가능하다는 전제하에 세워진 알고리즘이므로 연계선로의 공급여유용량 부족시 정전부하의 일부에 대하여 복구를 포기하고 가능한 나머지만 복구하는 복구방안후보를 도출할 수 없다. 다중 정전영역

사고시 각각의 정전영역을 독립된 문제로 처리함으로써 여러개의 정전영역에 중복되어 연결되어 있는 연계선로를 효율적으로 사용할 수 없다. 따라서 모든 정전구간을 종합적으로 고려하는 방법에 비해 좋지 못한 해를 구하거나 복구불가능 부하가 커진다.

## 2.2 다중 정전영역 복구 알고리즘

배전계통에서는 다음의 원인에 의하여 다중의 정전영역이 발생할 수 있다.

- 뱅크사고 : 변전소 주변압기 사고
- 변전소사고 : 변전소 전체의 공급능력상실 사고 (월계 변전소 화재, 도봉 변전소 제어케이블 고장)
- 분기점을 포함한 구간에서 사고가 발생하여 이랫단의 고장구간이 분리되는 경우
- 태풍, 홍수등 지역적인 기상여건에 의한 동시다발적인 사고

다중의 정전영역을 복구하기 위해선 각각의 정전영역 독립적으로 보아 하나씩 처리해가는 방법과 다중의 정전영역을 동시에 고려한 해를 도출하는 방법이 있을 수 있다. 후자는 전자에 비하여 복구포기 정전부하량을 최소화 할 수 있고, 더 좋은 해를 도출할 수 있지만 매우 복잡하고 많은 연산량을 수반한다는 단점이 있다. 여기서는 두가지 방법을 절충하여 각각의 정전영역을 독립한 문제로 보는 기존의 단일정전영역 복구알고리즘을 기본으로 하면서, 정전구간의 복구가능성지수 개념을 도입하여 복구방안 도출 순서를 결정함으로써 여러개의 정전구간에 중복되어 연결된 연계선로를 효율적으로 이용하는 방안을 제시한다.

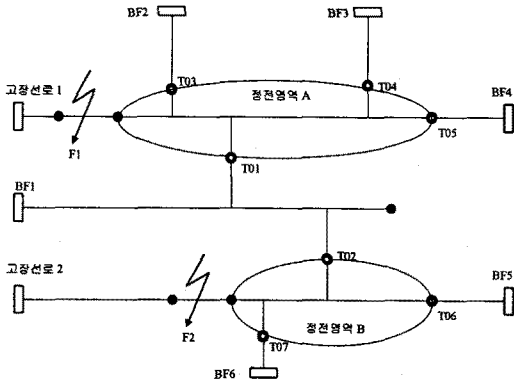


그림 1 다중 정전영역 사고

그림 1에서 사고 F1과 F2가 동시에 발생했을 때 정전영역 A에는 연계선로 BF1, BF2, BF3, BF4가 있고 정전영역 B에는 BF1, BF5, BF6의 연계선로가 있을 때 BF1을 어느 정전영역의 연계선로로 사용하는 것이 좋은가를 결정하는 문제이다. 확실한 방법은 BF1을 빼고 복구방안을 도출해 보았을 때 복구가 잘 안되는 정전영역의 연계선로로 사용하는 것이다. 그런데 정전영역의 수가 많으면 모든 정전영역의 복구방안을 도출하여 본 후에 결정하기는 어려우므로 간단히 복구가능성을 검토해 볼 방법이 필요하다. 여기서는 두가지 기준을 제시하는데 정전부하가 작아야 한다는 것과 연계선로 공급여유용량의 총량이 많아야 한다는 것이다. 정전부하가 2000~3000(kVA) 정도로 작다면 쉽게 절제 가능할 것이다. 연계선로가 12000(kVA)이상의 중부하로 운전된다면 복구 불가능하겠지만 우리나라의 배전계통 운전 상황에서는 거의 있을 수 없는 일이다. 연계선로의 공급

여유용량이 클 때 복구가능성이 높은 것도 당연한 일이다. 복구가능성지수는 정전부하량과 연계선로 공급여유용량을 동시에 고려하기 위하여 그림 1.2에 나타난 멤버십퍼센트와 표 1에 나타난 퍼지를 및 여기에는 나타나지 않았지만 복구가능성지수의 결론부 멤버십퍼센트를 이용하여 퍼지로그적으로 추론하여 계산한다.

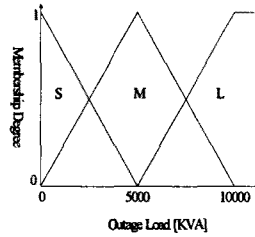


그림 2 정전부하량의 소속함수

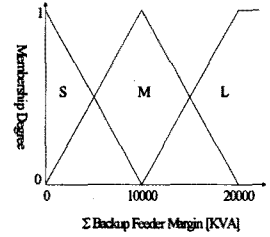


그림 3 백업피더 마진의 소속함수

표 2. 복구가능성의 퍼지룰

|   |
|---|
| if OL is LARGE and BM is SMALL then RP is VERYPOOR  |
| if OL is LARGE and BM is MEDIUM then RP is POOR     |
| if OL is LARGE and BM is LARGE then RP is POOR      |
| if OL is MEDIUM and BM is SMALL then RP is MEDIUM   |
| if OL is MEDIUM and BM is MEDIUM then RP is MEDIUM  |
| if OL is MEDIUM and BM is LARGE then RP is GOOD     |
| if OL is SMALL and BM is SMALL then RP is GOOD      |
| if OL is SMALL and BM is MEDIUM then RP is VERYGOOD |
| if OL is SMALL and BM is LARGE then RP is VERYGOOD  |

\*OL: 정전부하량 \*BM: 백업마진합계 \*RP: 복구가능성

복구방안의 도출 순서는 다음과 같다.

- ① 각 정전영역에 대하여 중복된 연계선로를 제외한 상태에서 복구가능성지수를 계산한다.
- ② 복구가능성지수가 높은 정전구간으로부터 중복된 연계선로를 제외한 나머지 연계선로를 이용하여 복구방안을 도출한다.
- ③ 복구방안이 존재하지 않거나 연계선로가 중복된 정전구간의 복구방안이 도출되었으면 중복된 연계선로를 포함하여 복구방안을 도출한다.
- ④ 중복된 연계선로를 사용하여도 복구방안이 존재하지 않으면 2.3항에 나타난 방법을 이용하여 일부부하만을 복구한다.

## 2.3 일부구간 복구포기를 고려한 알고리즘

한전계통은 연계선로에 공급여유용량을 충분히 확보한 상태로 운전하고 있으므로 단일정전영역 사고에 대해서는 모든 정전구간이 복구 가능하다. 그러나 하계 피크부하시 인근지역에 다중의 정전영역이 발생하는 최악의 조건을 고려해 볼 때 모든 정전구간이 복구 불가능한 경우에 대해서도 처리방안을 가지고 있어야 한다. 본 논문은 참고문헌 [1]에 제시된 알고리즘을 개선하고자 하므로 2.1.1에 나타난 7가지 복구방안 후보 도출 방법을 바탕으로 해결방법을 찾는다.

기존의 방식은 최대 3개의 연계선로를 사용하고 있는데 한전의 배전계통 구성상황에서 하나의 정전영역을 복구하기 위하여 4개 이상의 연계선로를 사용하는 것은 비현실적이므로 복구방안 자체는 확장하지 않는다. 다시 말해서 연계선로 3개를 사용하는 TGR, DGRLT에서 해가 없더라도 정전부하를 4개로 나누어 절제하거나 두번 이상의 건전부하절제를 포함하는 방안은 사용하지 않는다. 그렇다면 TGR과 DGRLT만을 수정하면 되는데 그 이유는 TGR이 SGR과 DGR의 확장이며 DGRLT가 SGRLT의 확장이기 때문이다.

### 2.3.1 부하차단을 고려한 TGR

일부부하에 대한 복구를 포기한다는 것은 TGR 복구 스킴으로 해가 존재하지 않는다는 의미이므로 TGR의 백업피더 세 개중 적어도 하나는 분기점을 포함한 구간까지 전력을 공급할 수 없다. 다시 말하면, 그림4에서 현재 평가중인 TGR의 후보가 L1BF1, L1BF2 와 L1BF4 일 때 적어도 셋 중의 하나는 분기점을 포함한 Z07의 부하를 절체 받을 수 없다. 따라서 분기구간을 중심으로 연계선로가 연결되어 있는 가지의 부하와 백업 피더의 여유용량을 비교하여 부족분이 가장 큰 연계선로에 타이스위치로부터 분기점까지의 직선 경로상의 스위치 중에서 여유용량에 가장 가까운 분할스위치를 결정할 수 있다. 그림 4에서 L1BF1이 가지부하에 대한 여유용량의 부족분이 가장 크다면 직선경로 스위치인 S04, S05, S06, S07 과 S11 중에서 첫 번째 부하분할 스위치가 결정된다.

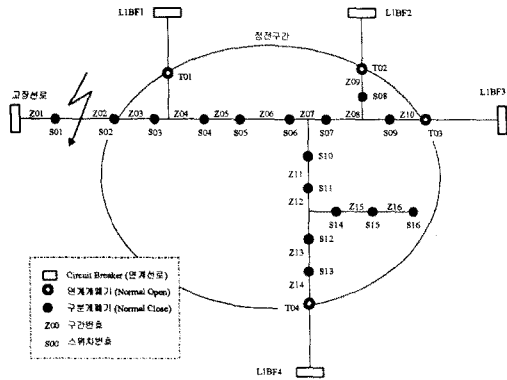


그림 4 부하차단을 고려한 TGR

이제 연계선로 두 개가 남으면 각각의 타이스위치를 연결하는 직선경로상에서 여유용량 만큼 부하를 절체하는 분할 스위치 두 개를 찾는다. 그림에서는 S09, S07, S10, S11, S12 와 S13 사이에서 두 개의 부하 분할 스위치를 찾는다. 물론 두 연계선로의 공급범위는 중첩될 수 없다. 마지막으로 부하분할 스위치에 인접한 구간의 부하중에 절체 가능한 구간이 있으면 세 개의 연계선로의 최대부하가 가장 낮게 되는 순서로 절체해 나간다. 만약, 이러한 방법에 의해 처음 S06이 분할 스위치로 결정되고 S07, S11이 나머지 분할스위치로 결정되었다고 하면 복구는 표3과 같이 완료된다.

표 3. 수정된 TGR 수행 결과

| 정전구간                    | 연계선로  |
|-------------------------|-------|
| Z03, Z04, Z05, Z06      | L1BF1 |
| Z08, Z09, Z10           | L1BF2 |
| Z12, Z13, Z14, Z15, Z16 | L1BF4 |
| Z07, Z11                | 복구포기  |

### 2.3.2 부하차단을 고려한 DGRLT

DGRLT는 2개의 레벨1 연계선로와 1번의 건전부하 절체를 포함한다. 먼저 두 개의 레벨1 연계선로가 선택되면 건전부하 절체량을 최대로 하는 레벨2 연계선로를 찾는다. 그림5에서 두 개의 레벨1 백업피더를 L1BF1과 L1BF4로 선택했다면 L2BF1, L2BF2, L2BF3 중에서 건전부하절체량을 최대로하는 레벨2 연계선로를 찾는다. 건전부하 분할스위치는 레벨1백업피더와 레벨2 백업피더의 분기점과 해당 레벨2 타이 스위치 사이의

직선경로상에 있다. 건전부하 절체가 결정되어 두 개의 레벨1 백업피더만이 남으면 2.3.1의 수정된 TGR에서와 같은 방법으로 부하 분할 스위치를 결정한다.

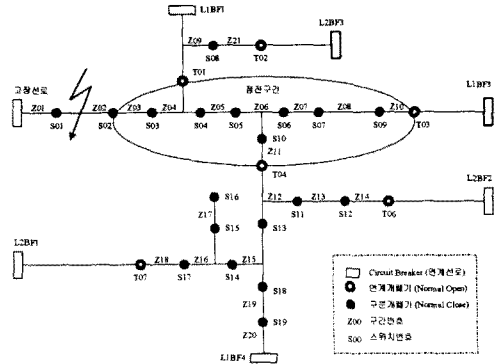


그림 5 부하차단을 고려한 DGRLT

## 3. 결 론

본 논문은 참고문헌 [1]에 제시된 정전복구 알고리즘의 후속연구로서 기존의 방식이 단일정전영역만을 대상으로 하는 것을 개선하여 다중 정전영역시에도 전체적으로 더 나은 해를 제시할 수 있도록 2가지를 개선하였다. 첫째는 여러 정전영역에 중복 연결된 연계선로를 효율적으로 이용하기 위하여 정전부하량과 연계선로의 총 공급 여유용량을 피지추론한 복구가능성지수를 이용하여 복구방안 도출순서를 결정하는 방법이며, 둘째는 연계선로의 공급여유용량 부족으로 모든 정전구간을 복구할 수 없을 때 일부 구간만이라도 전력공급을 재개할 수 있도록 복구방안 후보 도출 스킴을 수정하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] S. J. Lee, S. I. Lim, B. S. Ahn, "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, August 1998.
- [2] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh, H. Kuwabara, "A New Algorithm For Service Restoration In Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1832-1839, July 1989.
- [3] K. H. Jung, H. Kim, Y. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm For Automated Distribution Systems Based On Artificial Intelligence Approach", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.8, no.4, pp. 1933-1941, Oct. 1993.
- [4] Y. Y. Hsu, M. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C. W. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, R. T. Kuo, "Distribution System Service Restoration Using A Heuristic Search Approach", Proceedings of th 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas, TX, USA, pp. 639-645, Sept. 1991
- [5] A. Muzzin, "Benefits of Feeder Simulation in Distribution Automation Applications", Proceedings of Third International Symposium on Distribution Automation and Demand side Management, DA/DSM 93, Palm Springs, CA, USA, pp. 414-420, Jan. 1993.