

퍼지 로직을 이용한 다중고장 정전복구방안 연구

최인선*, 임성일, 이승재
 명지대학교 차세대전력기술연구센터

하복남, 설일호
 한국 전력 공사 전력연구원

Multiple outage service restoration algorithm using fuzzy logic

In-Sun Choi*, Sung-Il Lim, Seung-Jae Lee,
 Myoungji University Next-Generation Power Technology Center,

Bok-Nam Ha, Il-Ho Seol
 KEPRI KEPCO

Abstract - This paper presents new service restoration algorithm to deal with multiple faults such as main transformer fault, whole substation fault and simultaneous faults. The most important consideration of restoration planning for multiple outage areas is efficient use of redundant backup feeders. The proposed algorithm tries to restore all outage loads using outage area ordering method and tie switch exchange method that are newly proposed in this paper.

1. 서 론

현재 산업발달로 인한 전력수요의 증가와 IT 산업의 혁신적인 발달로 고장으로 인한 정전 발생시 사회생활에 미치는 영향이 커지게 되었으며 정전내용에 대한 관심도 증대되었다. 또한 운용환경이 급격히 변화하고 있는 시점에서 배전계통에 발생하는 문제점을 해결하고 전력 공급의 신뢰도를 높이기 위하여 배전자동화 시스템이 도입되었다. 배전 계통의 경우 방사상으로 운전되고 있으므로 고장으로 인한 정전구간 발생시 인근 연계선으로 정전영역을 절체하여 전력 공급을 지속 할 수 있다. 기존의 경우 사령원의 판단에 의하여 정전영역 복구를 하였으나 배전자동화 시스템의 도입으로 인공지능 기법을 이용한 최적의 정전 복구 방안을 요구하게 되었다. 이러한 정전영역 복구 문제는 연계점 투·개방의 조합 최적화 문제로서 배전계통 운전자동화를 위하여 대단히 중요한 부분이며 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지의 최적 정전영역 복구방안에 관한 연구로는 미분법을 이용한 방법과 인공지능을 이용한 자동 탐색 방법, 그리고 경험적 탐색법을 이용한 방법 등이 연구 되고 있다[1-4]. 최근 실 계통에 사용되고 있는 다양한 선로운전 조건을 고려한 인공지능 기법으로는 선로 허용전류와 차단 전압 강하를 제한 조건으로 복구방안 후보를 도출하고 정전 복구 시 고려해야 할 스위칭 횟수의 최소화, 선로 간 부하 균등 배분 및 건전 부하 절체 최소화와 같은 고려 사항을 평가 기준으로 퍼지 로직을 이용하여 종합적으로 평가하는 방법이다[5]. 그러나 위의 정전영역 복구방안은 다중 고장이 발생한 경우 각각의 정전영역에 대한 복구를 독립적으로 취급한다는 단점이 있다. 본 논문은 배전계통의 다중고장과 변전소·뱅크 고장 시 복구방안에 대하여 기술하였다. 먼저 배전계통의 다중 정전영역 복구방안은 정전 부하량과 연계선로 여유용량을 퍼지 로직을 이용하여 복구 가능성 지수 산출을 통한 복구 우선순위를 결정한 후 복구 우선순위에 따라 순차적으로 복구하는 방법이다. 다음으로 변전소·뱅크 고장 시 복구 알고리즘으로는 모선 절체 및 배전계통 다중 고장 복구 방안으로 복구가 실패하였을 경우 고장 부하를 균등하게 배분하는 연계점 교환법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 다중 정전영역 복구방안 도출 알고리즘

다중 고장이란 분리된 정전구간이 동시에 다발적으로 발생하여 정전구간 간의 공통인 연계선로가 존재하는 것이다. 발생원인으로는 분기점 고장, 홍수, 태풍과 같은 자연 재해를 통한 동시 고장, 뱅크 고장 및 변전소 고장을 들 수 있다. 이러한 다중 고장은 배전계통의 다중 고장과 변전소·뱅크 고장으로 구분할 수 있다. 그리고 뱅크 고장의 경우 모선 고장과 변압기 고장을 들 수 있다. 모선 고장의 경우 모선 절체를 통하여 완벽히 절체할 수 있으나, 변압기 고장 및 변전소 고장의 경우 모선 절체나 배전계통 다중 정전영역 복구 알고리즘으로 복구가 불가능한 경우의 복구 방안인 연계점 교환법을 제시하였다.

2.2 배전계통 다중 정전영역 복구방안 도출 알고리즘

기존의 알고리즘에서는 다중 고장을 각각의 단일 고장으로 판단하여 중복연계선로에 대한 효율적 사용이 어려웠다. 이를 해결하기 위한 다중 정전영역 복구방법에는 각각의 정전영역을 동시에 복구하는 방법과 순서에 따라 단일 정전영역을 복구하는 방법이 있다. 본 논문에서는 복구 가능성 지수를 도출한 후 복구 가능성이 높은 정전영역부터 복구하는 후자의 방법을 도입하였다.

2.2.1 다중 정전영역 복구 알고리즘 흐름도

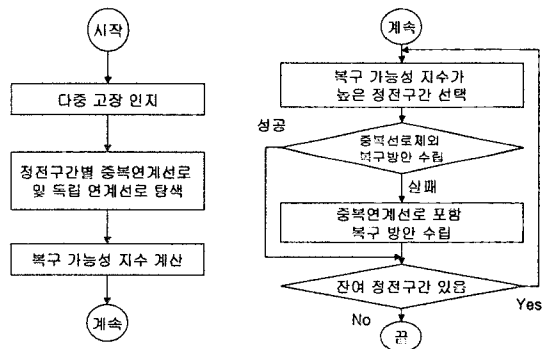


그림 1 다중 정전영역 복구 알고리즘 흐름도

다중 정전영역 복구에서는 중복 연계 선로의 중복 이용은 정전영역 복구 실패의 가능성이 높으므로, 중복 연계 선로의 사용 방법이 가장 중요한 문제이다. 이에 본 알고리즘은 중복 연계 선로의 효율적인 사용 방법을 제안하고 있다. 그림 1은 다중 정전영역 복구 알고리즘 흐름도를 도시하고 있다.

2.2.2 다중 정전영역 복구 가능성 지수 도출

그림 2는 다중 고장을 도시한 것이다. 두 곳의 고장 구간이 동시에 발생한 것으로, 두 곳의 고장 구간 간의 중복 연계선로는 F9이다. 고장 구간 1은 독립연계선로가 F1, F3, F4로 3개 있으며, 고장 구간 2는 독립연계선로가 F6, F7로 2개 있다.

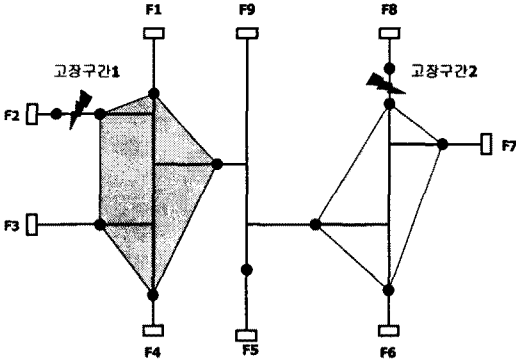


그림 2 다중 고장

그림 3은 복구 우선순위 소속도 함수를 도시하였다. 복구 가능성은 정전 부하량과 연계선로 여유용량에 영향을 받게 된다. 정전 부하량은 적고 연계선로 여유용량이 많을수록 복구 가능성은 높다. 표 2의 복구 우선순위 퍼지들은 이를 잘 나타내고 있다. 복구 가능성 지수가 높은 것일수록 중복 연계선로를 사용하지 않고도 복구될 가능성이 높기 때문에 복구 우선순위를 결정하여 복구함으로써 중복 연계선로를 효율적으로 사용할 수 있다.

정전 부하량의 소속함수 연계선로 여유용량의 소속함수

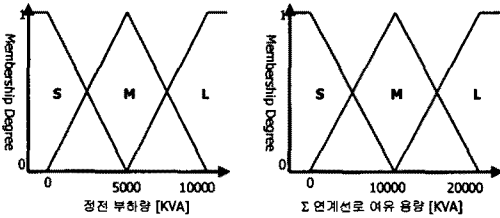


그림 3 복구 우선순위 소속도 함수

표 2. 복구가능성의 퍼지들

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

2.2.3 다중 정전영역 복구

그림 1의 다중 정전영역 복구 알고리즘 흐름도에 따라 복구 가능성 지수를 도출한 후 복구 가능성이 높은 정전구간을 선택하고 중복 연계 선로를 제외한 단일 정

전 영역 복구 방안을 수립한다. 여기서 중복 연계 선로를 제외하는 이유는 복구 가능성 지수가 높은 정전 영역은 중복 연계 선로를 제외하고도 복구 가능성이 높기 때문이다.

2.3 뱅크 및 변전소 고장 복구 알고리즘

뱅크 고장의 경우 모선 절체를 통하여 정전영역을 복구한다. 그러나 변압기 고장과 같은 경우는 모선 절체로 모든 정전영역을 복구할 수 없을 수 있다. 그러므로 모선 절체를 실패한 뱅크 고장과 변전소 고장의 경우는 타 변전소 연계 급전선을 통하여 정전 영역을 복구 하여야 한다. 이에 변압기 고장의 경우는 모선 절체를 타 변전소 연계 급전선이 아닌 경우를 우선순위로 하여 절체해야 한다. 본 논문은 가능한 모선 절체를 하였으나 정전영역 복구에 실패하여 정전영역이 발생한 경우 먼저 배전계통 다중 정전영역 복구 알고리즘으로 복구하고 만약 실패한 경우 다음 절에 제시하는 연계점 교환 알고리즘으로 복구한다.

2.3.1 연계점 교환 알고리즘

모선 절체 및 배전계통 다중 정전영역 복구 알고리즘을 통하여 복구되거나 혹은 고장 부하로 남아 있는 부하는 고장 발생 구역에 집중되어 있다. 본 알고리즘은 연계점 개폐를 통하여 배전 계통의 부하를 평균화하여 이러한 고장 부하 및 과부하를 해소하는 방법이다.

복구 방안 도출 순서는 다음과 같다.

- ① 이동 대상 연계점을 선택한다.
- ② 연계점에 대한 직선 경로 탐색을 한다. 하나의 개폐기는 하나의 직선 경로를 가지고 있으며 그림 4에서는 개폐기를 포함하는 직선 경로를 탐색하는 것을 보여주고 있다.
- ③ 직선 경로 양단의 급전선의 부하가 균등한 개폐기로 연계점을 이동한다.
- ④ 모든 연계점에 대해 부하가 균등하면 최적화 되었다.

2.3.2 연계점 교환 알고리즘 원칙

연계점 교환 알고리즘은 연계점 직선 경로와 부하 흐름 등 두 가지 원칙이 있다. 이러한 두 가지 원칙에 의해 다음의 목적함수를 만족한다. 이 목적 함수는 전체 부하 평균화를 뜻한다.

$$\text{목적 함수} : \text{Min}(\sqrt{\sum_i (S_{ave} - S_i)^2}), \quad i : \text{급전선}$$

2.3.2.1 연계점 직선 경로 원칙

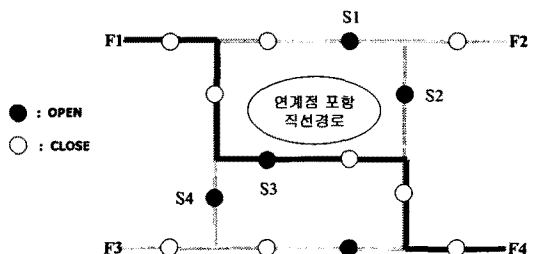


그림 4 직선 경로 탐색

그림 4와 같이 하나의 연계점에는 하나의 직선 경로를 가지고 있다. 이러한 직선 경로를 따라 연계점이 이동할 경우에도 방사상의 배전 계통을 유지한다.

2.3.2.2 부하 흐름 원칙

그림 5는 연계점 이동에 따른 부하의 흐름을 도시하고 있다. 직선 경로 상의 연계점이 양단의 급전선의 부하를 평균화 할 경우 부하는 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르게 된다. 부하는 연계점의 이동에 따라 큰 부하에서 작은 부하로 흐르게 된다. 이와 같은 원칙을 부하 흐름 원칙이라 한다.

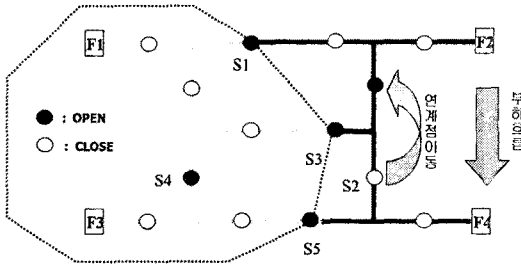


그림 5 연계점 이동에 따른 부하 흐름

3. 사례연구

그림 6은 배전계통에서의 다중 고장에 대하여 고장을 모의한 것이다. 계통은 고장 구간이 두 곳 있으며, 각 고장 구간은 F6을 중복 연계선로로 가진다. 고장 구간 1은 독립 연계선로가 2개로 F1과 F5가 있으며 고장 구간 2는 1개로 F2가 있다. 표 3은 그림 6에서의 정정된 부하용량과 연계선로의 여유용량을 나타내며, 이 데이터는 배전계통 다중 정전영역 복구 알고리즘에서 복구 우선순위 도출을 위하여 사용된다.

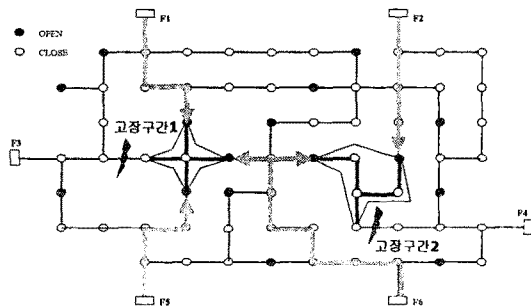


그림 6 배전 계통 다중 정전 영역 모의 계통

표 3 우선순위 계산 데이터

평가 데이터	정전구간1	정전구간2
정전된 부하 용량	3000[kVA]	1500[kVA]
연계선로 여유 용량	11000[kVA]	8000[kVA]

그림 6에서 정전구간 1,2에 대한 정전복구방안을 도출하기 위하여 복구 우선순위 소속도합수와 복구 가능성 퍼지 로직을 적용하고 표 3의 정정된 부하 용량과 연계선로 여유 용량을 사용하여 복구 가능성 지수를 계산하

면 표 4와 같다. 모의 결과 복구 가능성 지수가 높은 고장 구간 2를 먼저 복구하고 고장구간 1은 나중에 복구하는 방안이 도출된다. 2.2.3절에 서술한 다중 정전 영역 복구법에 따라 중복 연계선로를 제외한 후 복구하고 나머지 정전구간을 복구한다.

표 4 퍼지 평가 결과 및 복구 우선순위 결정

고장구간	고장구간1	고장구간2
평가항목		
복구 가능성 지수	0.63	0.72
복구 우선순위	2	1

4. 결 론

본 논문은 기존의 정전영역 복구 알고리즘이 단일 정전영역만을 대상으로 하는 것을 보완하여 다중 정전영역 복구 알고리즘에 대하여 기술하였다. 다중 고장을 배전 계통의 다중 고장과 변전소·뱅크 고장으로 나누어 정전영역 복구 알고리즘을 기술하였다. 먼저 배전계통의 다중 고장의 경우는 정전 부하량과 연계선로의 총 공급 용량을 퍼지 추론한 복구 가능성 지수를 이용하여 복구방안 도출 순서를 결정하였으며, 뱅크 및 변전소 사고의 경우 모션 절제와 배전계통 다중정전영역 복구 알고리즘으로 복구가 실패하였을 경우 연계점 교환법을 이용하여 전체 배전 계통을 균등 부하로 만들어서 정전영역을 복구할 수 있음을 제안하였다. 이러한 다중 정전영역 복구 방안은 사령원이 정전복구 방안을 작성하는 것과 유사한 절차에 따라 수행됨에 따라 배전자동화시스템을 통한 정전영역 복구 방안 수립에 유용할 것이다.

[감사의 글]

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술재단의 ERC 프로그램과 한전 전력연구원 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas, TX, USA, pp. 639-645, Sept. 1991.
- [4] 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.
- [5] 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.