

Dijkstra 알고리즘을 이용한 배전계통에서의 사고복구

*김 훈 *전영재 **이승윤 **김재성 *김재철
*숭실대학교 전기공학과 **한국전력공사

Outage restoration in electric distribution system using Dijkstra algorithm

*Kim Hoon *Jeon Young Jae **Lee Seung Yun **Kim Jae Sung *Kim Jae Chul
*Soong-Sil Univ. Dept. of Electrical Engineering **K.E.P.C.O.

Abstract - This paper presents a restoration method by using Dijkstra algorithm for outage restoration problems in distribution system that considering load capacity constraints and operation constraints. Restoration problem in distribution system is difficult to solve problem in a short times, because of a distribution system that supplies power for customers combined with many tie-line switches and sectionalizing switches and have to satisfy plenty of operation conditions. Therefore, this paper applied Dijkstra algorithm which is satisfy radial operation conditions in distribution system. This proposed method used Kruskal algorithm include to Dijkstra algorithm Therefore, proposed method is restored to a outage sections in a short times and just then to satisfied with a operation conditions in distribution system. A 26-bus, 31-branch model system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

문제에 적용이 가능한 Kruskal 알고리즘을 복합적으로 이용하여 배전계통의 사고복구문제와 방사상 운전조건문제를 해결하였다. 또한 본 논문에서는 제안된 방법의 유용성 검증을 위하여 참고문헌[11]에서 사용된 26모선 31선로의 모델계통에 적용·비교하였다.

2. Dijkstra 알고리즘

2.1 Dijkstra 알고리즘의 개념

Dijkstra 알고리즘은 1959년 Dijkstra에 의해 개발된 것으로 최단경로 문제를 해결하는 알고리즘 중 가장 효율적인 알고리즘의 하나로 알려져 있다[12]. 이 알고리즘의 주된 개념은 최단경로상의 부분경로 또한 최단경로라는 성질을 기초로 개발되었다. 다시 말해서, 정점(Vertex) A와 정점 C 사이의 최단경로상에 정점 B가 존재하면, 정점 A와 B 사이의 최단경로는 정점 A와 C 사이의 최단경로상에 존재한다는 것이다. 예를들어, V는 정점들의 집합이고 P는 경로들의 집합인 그래프 $G=(V, P)$ 에서 각 경로는 음수가 아닌 비용(Cost)를 가졌고, 한 정점에서 각 정점으로 가는 최단 경로를 결정하는 문제에서, 시작 정점과 각 단계별로 최단경로가 알려져 있는 정점들의 집합을 S, 그리고 현재 최단경로가 알려져 있지 않은 정점들의 집합을 C라 하면 전체 정점 $V=S \cup C$ 가 된다. 최초 단계에서는 시작정점만을 알고 있으므로 시작정점을 S의 집합에, 그리고 나머지 정점들은 C의 집합에 포함한 상태에서 시작정점에 인접해 있는 정점 중 최단경로를 갖는 정점을 C집합에서 빼내어 S집합에 포함하고, 다시 S집합에 인접하는 정점 중 최단경로를 갖는 정점을 비교·분류해 내어 S집합으로 옮기는 과정의 반복을 통하여 모든 목적 정점에 다다르게 될 때 이때 집합 S에 포함되어 있는 정점들이 시작정점에서 각 목적정점까지의 최단경로가 된다.

2.2 Dijkstra 알고리즘의 수행과정

Dijkstra 알고리즘의 기본개념을 가지고 최단경로를 결정하기 위해서는 각 경로의 비용(Cost)을 누적하여 비교하는 연산을 수행해야 하므로 임시표지(Temporary label)와 영구표지(Permanent label)의 개념을 사용하여야 한다. 여기서 영구표지(Permanent label)란 한 정점으로부터 다음 단계의 정점들까지의 최단경로의 비용을 말하고, 임시표지(Temporary label)란 한 정점으로부터 다음 단계의 정점들까지의 경로의 비용을 나타내는데 이 경로가 최단경로가 아닐 수도 있기 때문에 임시표지는 실제 최단거리의 상한치(Upper bound)를 나타낸다. 지금까지 설명된 개념을 가지고 최단경로를 결정하는 Dijkstra 알고리즘의 수행과정을 정리하면 다음과 같다

1. 서 론

산업의 발달에 따라 배전계통은 더욱 복잡·다양해지고 있다. 이에 따라 배전계통의 상태를 충분히 만족시키 가면서 양질의 신뢰도 높은 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 배전자동화 기술의 개발이 필수적 요소로 자리 잡게 되었다. 또한 배전계통의 자동화가 진척되어 감에 따라, 배전계통에서 발생하는 사고를 빠른 시간 내에 복구하는 문제는 매우 중요한 문제로 자리 매김 되었다. 그러나 배전계통 사고복구 문제는 수많은 연계개폐기와 구분개폐기들의 조합에 의해 구성되어 있으며 많은 제약 조건들을 가진 배전계통에서 해결되어야 하는 문제이므로 문제를 해결하는 데에는 많은 시간이 걸린다. 이와 같은 배전계통 정전복구문제 해결을 위한 방법들은 1980년대 초반부터 제안되기 시작하였는데, 1980년에 C.H.Castro에 의해 제안된 퍼디의 재구성법(1)과 1981년에 D.W.Ross에 의해 제안된 탐색법을 이용한 정상상태에서의 최적운전을 위한 방사상계통 구성프로그램(2), 그리고 1980년대 중반에 소규모 배전계통에만 적용이 가능한 방법(3),(4)과 비조합적인 문제로 접근하여 근사해를 찾는 알고리즘들(5)-(9)이 제안되었다. 또한 최근에는 퍼지추론을 적용 각 모선의 공급타당성지표를 계산하여 정전복구에 이용하는 방법이 제안되었다(10). 또한 국내에서는 참고문헌(10)의 방법을 수정·확장한 방법이 1995년에 제안되었다(11).

본 논문에서는 배전계통에 발생한 사고를 복구하기 위하여 최단경로문제에 주로 적용되는 Dijkstra 알고리즘과 최소비용트리(Minimum cost spanning tree)구성

단계 1 : [초기화]

모든 정점의 집합 U에서 비용 C_{ij} 는 시작정점 i와 연결경로가 있으면 임시 표지 T_j 로, 그리고, 연결경로가 없으면 ∞ 로 기록한다.

이때, 시작정점의 비용 C_{ii} 는 0으로 기록한다.

- $C_s \leftarrow 0$
(C_s : 현재까지 결정된 최단경로비용)
- $T_j \leftarrow C_{ij}$, ($i, j \in U$)

단계 2 : [최단경로 선택]

모든 임시표지 T_j 중에서 최소값을 선택하여 이를 영구표지한다.

- $P_j \leftarrow \min(T_j)$, ($j \in U$)

단계 3 : [우회경로 비교]

단계 2에서 영구표지 된 정점 j의 모든 인접점들의 임시표지를 수정한다. 그리고, 영구표지 된 P_j 에 현재까지 결정된 최단경로 비용 C_s 를 합한 값과 기존의 임시값 T_j 와 비교한 값 중 작은값을 선택하여 C_s 에 추가로 기록, 합산한다.

- $C_s \leftarrow \min(T_j, P_j + C_s)$

단계 4 : [끝냄]

비교되지 않은 정점이 있으면 단계 2로 가고 모든 정점을 비교하였으면 Stop.

Dijkstra 알고리즘을 수행하는데 있어서는 각 정점과 정점간의 비용(Cost)을 합리적으로 결정하여 수행하는 것이 매우 중요하다. 각 정점(Vertex)간의 비용(Cost)을 합리적으로 결정하였을 때 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

3. Dijkstra 알고리즘을 적용한 사고복구

3.1 목적함수와 제약조건

배전계통의 사고복구를 위해서는 배전계통을 구성하는 개폐기들의 조합과 여러 가지 제약조건들을 만족하면서 전력을 공급받는 부하점들을 가능한 한 많이 복구하는 것이 관건이다. 이러한 사고복구를 수행하는데 사용되는 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\text{minimize } E = \sum_{(i,j) \in U} d_{ij} x_{ij} \quad (i < j) \quad (1)$$

[제약조건]

- i-j-경로내의 정점 j에서의 흐름제약조건

$$\sum_{(k,j) \in U} x_{jk} - \sum_{(i,k) \in U} x_{ij} = \begin{cases} 1, & j \text{ 시작정점} \\ -1, & j \text{ 도착정점} \\ 0, & \text{나머지점들} \end{cases} \quad (2)$$

- 결정변수 x_{ij}

$$x_{ij} \begin{cases} 0 : \text{unselected} \\ 1 : \text{selected} \end{cases} \quad (i < j, (i, j) \in U) \quad (3)$$

- 선로용량 제약조건

$$\sum_{(i,j) \in U} d_{ij} x_{ij} \leq \sum_{(i,j) \in U} b_{ij} \quad (4)$$

- 피더용량 제약조건

$$\sum_{(i,j) \in U} d_{ij} x_{ij} \leq b_{f(k)} \quad (5)$$

여기서,

d_{ij} : 정점 i 와 j 구간의 부하크기.

x_{ij} : 정점 i 와 j 구간의 경로선택을 위한 결정변수 (선택될 경우 1, 선택되지 않을 경우 0)

b_{ij} : 정점 i와 j 구간의 선로용량

$b_{f(k)}$: 피더 k의 용량

U : 전체 선로들의 집합 ($U=1,2,\dots,N$)

3.2 Dijkstra 알고리즘의 적용

배전계통의 사고복구 문제에 Dijkstra 알고리즘을 적용하는데 있어 전체적인 수행과정은 Dijkstra 기본알고리즘과 동일하다. 그러나 배전계통 특유의 제약조건들을 고려하고 운전조건을 고려하여 수행해야 한다. 그림 1은 배전계통의 사고복구 문제에 Dijkstra 알고리즘을 이용하여 문제를 해결하는 과정을 순서도로 나타낸 것이다.

순서도에 나타난 것처럼 최초 단계에서는 배전계통의 데이터(시작선로, 선로구성, 부하량, 선로용량)를 입력하고 입력된 데이터를 바탕으로 인접행렬을 구성한다. 그리고 주어진 인접행렬을 가지고 Dijkstra 알고리즘을 수행하기 위해서 시작선로 s와 연결된 선로는 부하량 C_{sj} ($j=1,2,\dots,n$)을 그리고 연결이 안된 선로는 ∞ 로 초기값을 준다. 그리고 입력된 임시표지를 가지고 인접한 경로 중 최단경로를 산출하고, 이 산출된 경로와 우회경로의 비교를 통해 실제의 최단경로를 산출한다. 그리고 최단경로의 산출이 끝난 후에 방사상 운전조건을 점검하고 나서 조건이 맞다면 추가적으로 탐색해야할 선로가 있는지의 여부를 확인하고 추가탐색이 필요한 경로가 있다면 다시 현재의 선로로부터 초기화를 거치고 그렇지 않고 더 이상 탐색해야될 선로가 없다면 선로구성을 출력하고 프로그램을 끝내는 순서로 배전계통에 발생한 사고를 복구한다.

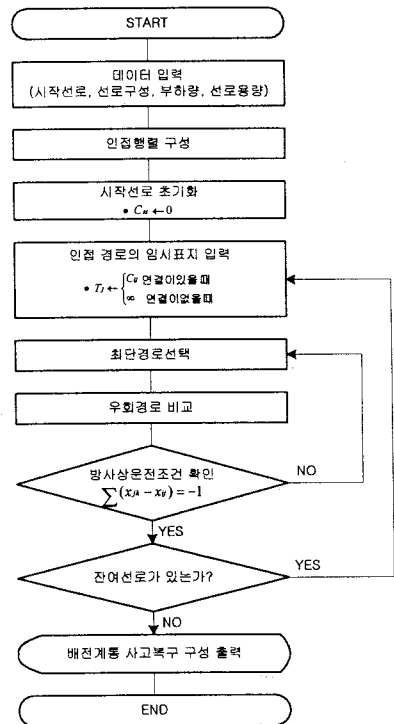


그림 1. Dijkstra 알고리즘을 이용한 사고복구 순서도

4. 사례 연구

본 논문에서는 참고문헌[11]에서 사용된 그림 2와 같은 26모선 31선로의 예제계통에 Dijkstra 알고리즘을 사용하여 시뮬레이션하였다.

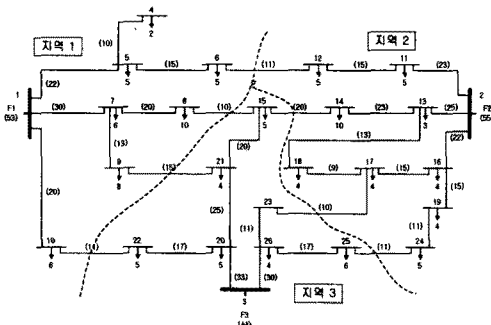


그림 2. 26모선 31선로 예제계통

그림 3에는 그림 2의 예제계통을 가지고 3-20구간에 사고가 발생하였을 때 Dijkstra 알고리즘을 가지고 복구한 결과를 보였다.

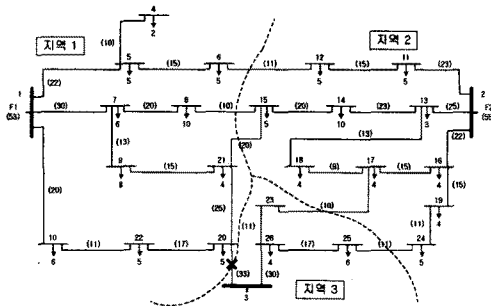


그림 3. 제안한 방법을 사용하여 복구된 계통

표 1에는 기존에 제안된 방법 중 결과가 우수한 퍼지 추론을 적용한 방법[10]과 참고문헌[10]의 방법을 수정·확장한 방법[11], 그리고 본 논문에서 제안한 방법 간의 사고복구 결과를 비교하였다.

표 1 제안한 방법과의 비교

사고 선로	참고문헌[10]		참고문헌[11]		제안한 방법	
	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]
	1-5	4	2	4	2	4
1-7	7	6	7	5	7	6
1-10	9	8	7	5	9	8
2-11	-	-	-	-	-	-
2-13	11	4	-	-	-	-
2-16	13	2	-	-	-	-
3-20	-	-	-	-	-	-
3-26	20	3	-	-	20	3
4-5	25	6	26	4	26	4
20-21	4	2	4	2	4	2
	-	-	-	-	-	-

본 논문에서 제안한 방법을 사용하여 배전계통에서 발생한 사고를 복구할 경우 다수의 구간 사고에 있어서 사고가 복구되었으나, 일부 구간의 사고에 있어서는 복구

가 되지 않는 경우도 있었다. 이는 제안된 방법이 최초 출발 정점으로부터 인접되어 있는 경로를 하나씩 비교해 나가면서 최종 목적 정점에 도달해 나가는 방법을 이용하는 알고리즘을 사용하였기 때문에 배전계통의 사고구간과 배전계통 구성 제약조건을 고려하여 사고를 복구하는 데에는 일부 구간 사고 발생 시 완전한 정전복구가 이루어지지 않는 경우도 발생함을 알 수 있었다. 그러나 기존에 제안된 방법들 보다 수행속도가 개선되었고 사고 복구결과가 만족스러운 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 배전계통에서 사고가 발생했을 때 사고 복구문제에 Dijkstra 알고리즘을 적용하여 보았다. 부하복구의 측면에서는 참고문헌[11]과 비슷한 결과를 보였으나, 해를 찾는데 걸리는 시간에 있어서는 만족스러운 결과를 볼 수 있었다.

향후 연구에서는 제안된 방법과 다른 최적화 기법과의 연계를 통해 사고복구 문제를 연구한다면 현재의 결과보다 더욱 우수한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구는 기초전력공학공동 연구소의 "AI 기법을 이용한 배전 계통의 최적 라우팅 기법 개발"에 따른 연구비로 수행되었음.

(참고 문헌)

- [1] C.H.Castro, J.B.Bunch, T.M.Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No-2, pp.549-557, 1980
- [2] D.W.Ross, T.Patton, A.I.Cohen, M.Carsen, "New methods for Evaluating Distribution Automation and Control (DAC) Systems Benefits", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, pp.2978-2986, 1981
- [3] S.Kato, T.Naito, H.Kohno, H.Kanawa and T.Shoji, "Computer Based Distribution Automation", IEEE PICA San Francisco, May (1985)
- [4] C.A.Castero Jr., and A.L.M. Franca, "Automatic Power Distribution Reconfiguration Algorithm Including Operating Constraints", IFAC Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, 1985
- [5] K.Aoki, T.Ichimori and M.Kanezashi, "Normal State Optimal Load Allocation in Distribution Systems", IEEE Trans on PWRD, Vol. PWRD-2, No.1, 1987
- [6] K.Aoki, H.Kuwabara, T.Satoh and M.Kanezashi, "Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems", IEEE Trans on PWRD, Vol. PWRD-2, No.2, Oct, 1987
- [7] K.Aoki, T.Satoh, M.Itoh, H.Kuwabara and M.Kanezashi, "Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems", IEEE PES Summer Meeting, 1987
- [8] K.Aoki, H.Kuwabara, T.Satoh and M.Kanezashi, "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformer and Feeder by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE PES Summer Meeting, 1987
- [9] K.Aoki, H.Kuwabara, T.Satoh and M.Kanezashi, "Load Smoothing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Distribution Systems", Trans. IEE Japan, Vol. 107-B, No.9, Sep., 1987
- [10] 今村 譲 外, "配電融通問題へのフェジ推論の適用", 日本電気學會 論文誌 b, 113卷 5號, 平成 5年
- [11] 송길영, 김용하, 이 범, 차준민, 남궁재용, 이승원, "배전 계통의 효율적인 선로접속변경에 의한 긴급 정전복구 알고리즘", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 7, Jul, 1995
- [12] 강명규, "네트워크와 알고리즘", 박영사, pp.76, 1991