2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

경로 추적 알고리즘을 이용한 배전 계통의 정전 복구

김성현, 최상열, 신명철
성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과

Service Restoration Technique by Using Routing Algorithm in Distribution Sys

Sung-hyun Kim, Sang-youl Choi, Myung-chul Shin.
Dept of Electrical & Computer Eng. SungKyunKwan Univ.

Abstract - 본 논문은 배전 계통 정전복구에 있어서 빠르고 효율적인 방법을 보여준다. 정전복구 문제는 제약적인 최적화 문제로 계산되어지고, 빠른 시간과 더 우수한 방법을 요구한다. 왜냐하면 비교장 정전 구역는 가능한 빠르게 복구되어져야 하기 때문이다. 제한된 방법는 빠른 시간안에 해를 구할 수 있으며, 계통망의 개폐기와 선로의 조류계산을 통한 허용 전류 가중치를 이용한 딕스트라 알고리즘에 의해 정전복구 방법이 설계되어진다. 시뮬레이션 결과는 36모선에서 제안된 방법의 경우의 유용성과 효율성이 나타난다.

1. 서 론

최근 전력수요가 급증함에 따라 효과적인 관리를 통하여 배전 계통의 효율 및 신뢰도를 향상시킬 수 있는 배전 자동화의 필요성이 높아지고 있다. 배전 자동화의 여러 기능들 중에서 정전복구는 매우 중요한 기능이다. 방사상 구조로 운영되고 있는 배전 계통에서 정전복구 기능은 적절한 스위칭을 통해 계통의 구성을 변경하여 부하를 절체하는 방법으로 이루어지며, 이때 백업 피더의 선정 및 스위칭은 계통의 안정도와 신뢰도에 매우 큰 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

배전선로에 영구 사고가 발생하면 고장구간을 검출하여 분리한 후, 부하 측의 정전구역에 대하여 전력을 공급하기 위하여 피더의 예비용량, 보호기기 협조조건, 접압강하 제한조건을 만족하는 범위 내에서 개폐기의 조작순서를 구해야 하는데 보다 안전하고 효율적인 개폐기 조작순서를 구하기 위한 문제해결 전략을 배전선로 자동화 알고리즘이라고 하며 자동화 알고리즘을 정립하기 위하여 크게 전문가시스템에 적용한 방법, 휴리스틱 기법에 적용한 것이 있다.

Aoki[9]등은 단일단계 배전계획에 대한 최적 근사해를 위해 선로 교환법(Branch Exchang :BE)알고리즘을 제시했다. Aoki등은 개연성이 있는 루프 회로에서 출발하여 높은 비용과 제약조건에 위해되는 선로를 차례로 제거해 가는 경험적인 알고리즘을 제시했다. 최근에는 유전(Genetic Algorithm : GA)과 시뮬레이티드 어닐링(SA)[10]등의 인공지능 기법을 도입한 연구들이 이루어졌다. 또한 최근에는 퍼지추론을 적용 각모선의 공급타당성지표를 계산하여 정전복구에 이용하는 방법이 제안되었다.

본 논문에서, 큰 배전 계통에서 정전복구를 위한 적절한 방법을 찾기 위해 다른 조합적인 최적화 알고리즘보다 적은 계산 시간을 가지는 Dijkstra 알고리즘을 적용한다. 방사상 구조의 제약조건을 만족하기 위해, Kruskal 알고리즘이 정전 복구과정에 도입되었다. 그리고 가중치를 찾기 위한 방법으로 제약 조건을 적용해서 각각의 스위치나 선로의 전류 허용량을 검색해 전류 허용량을 가중치로 변환하는 알고리즘을 적용한다.

실제 계통상에서 Dijkstra 와 Kruskal 알고리즘을 혼합하여 사용하여 정전 복구에 적용한다. 이 두가지 알고리즘은 최적의 방사상 계통망을 구축할 수 있는 좋은 알고리즘이다. 우리는 32모선 계통망에 실제 적용 시켜 보기로 한다.

2. 본 론

2.1 목적 함수와 제약 조건

●스위치 제약 조건

$$|I_k^p| \le |I_k^{max}| \quad \forall_k \in N$$

$$|V_k^{min}| \le |V_k^p| \le |V_k^{max}| \quad \forall_f \in N, \quad p \in A, B, C$$

N : 복구되어진 모선의 집합
$I_{L,k}$: 모선 k에 흐르는 부하 전류의 총합
I_k^p : p상 k 모선에 흘러 들어가는 전류
V_k^p : P상 k 모선의 전압

●선로와 급전선 용량 제약조건

$$\sum L_j \le b_j \ (i \in U, j \in D)$$

i,j : 정점 또는 모선
U : 모든 정점 또는 모선의 집합 (U= 1,2,.....,n)
x_{ij} : i와 j 사이의 변수 결정 (x_{ij} =0 또는 1)
D : 모든 모선 i의 모든 밑의 모선 집합
L_j : 모선 j에서 부하 량
b_j : 모선 i에서 한계 용량

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

E : 목적함수
i,j : 접점 또는 모선
U : 모든 접점과 모선의 집합 (U=1,2,.....,n)
d_{ij} : i와 j 사이의 가중치
x_{ij} : i와 j 사이의 변수 결정 (x_{ij}= 0 또는 1)

위의 방정식에서, 최소화 목적 함수는 동작 제약 조건이 만족되어지는 동안에 정전복구의 해를 구하게 된다.

2.2. Dijkstra 와 Kruskal 알고리즘

2.2.1 Dijkstra 알고리즘

그래프 G=(V,E)는 정점 V와 E의 집합이다. 정점은 공간상의 점이다. 그리고 간선은 두 정점사이의 연결이다. 정점을 노드라고 부른다. 정점 a와 b사이의 간선은

(a,b)로 쓸 수 있다. 정점 a로 부터 b까지의 길은 그래프에서 간선에 의해 연결되어진 연속적인 정점의 리스트이다. 그것은 근접 가지의 리스트이다. 가중 그래프는 각각의 간선에 할당한 수치 가중치가 있는 그래프이다. 경로의 값은 경로에 따른 가중치의 합이다.

Dijkstra 알고리즘은 그래프에 있어서 정점부터 목적지까지 가장 짧은 경로를 발견하는 문제를 풀 수 있는 유용한 방법이다.

Dijkstra 알고리즘은 방향성이 없는 무방향 그래프 G=(V,E)에서 동작되어진다. 이것은 시작 정점에서 모든 다른 정점까지 최단 경로를 찾는다. 이 알고리즘의 주된 개념은 정점에 관한 순간적인 표시를 영구적인 것으로 바꾸는 것이다. 정점의 영구적인 표시는 시작 정점에서 현재의 정점까지의 가장 짧은 경로로 표시되어진다.

이 알고리즘의 구현을 위해 인접 가중 행렬 구축한다. 가중 그래프가 인접 행렬(Adjacency Matrix)로 표현되어 있다면 매우 쉬운 방법으로 최단 경로 나무를 구할 수 있다. 이 알고리즘을 구현하기 위해서는 가중 그래프의 인접 행렬에 특별한 규약을 둔다. 인접 행렬을 W라고 하고 W[x,y]를 W행렬의 x행, y열 원소라고 한다면 W[x,y]는 다음과 같은 규칙으로 작성된다. 만약 x=y라면 W[x,y]는 0 이고, 만약 x와 y를 연결하는 간선이 없으면 ∞ 이고, 그외의 경우는 해당된 가중치를 부여한다. 위와 같은 규칙으로 가중 그래프를 인접 행렬로 구축하여 최단 거리 경로를 구할 수 있다.

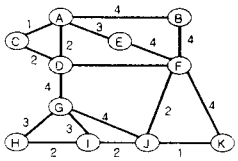

그림 1. 초기에 주어진 가중 그래프

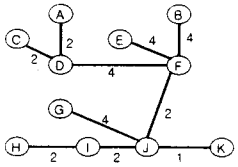

그림 2. F에서 시작하는 최단 경로 나무

2.2.2 Kruskal 알고리즘

이 알고리즘은 방향 또는 비 방향 그래프에서 최소 신장(spanning)트리를 찾는 것이다. 이 방법은 갈망 탐색 방법중에 하나이다. 처음에 단일 정점 트리로 이루어진다. 각각의 단계에서, 두개의 나무들이 함께 합쳐지기 위해 간선이 추가 되어진다. 만약, 루프가 형성되어진다면, 단일 연결 나무가 이루어지도록 두 정점에는 간단한 연결이 이루어진다.

우선 순위 탐색도 최소 비용 신장 트리를 구하는 같은 목적을 가진 알고리즘이지만 우선 순위 탐색과 Kruskal 알고리즘의 방법은 전혀 다른 접근 방식을 사용한다.

우선 순위 탐색법은 최소 비용 신장 트리를 차근 차근 하나씩 붙여 나가는 방법이지만은 Kruskal 알고리즘 최소 비용 신장 트리의 간선들을 여기 저기서 찾아낸다.

한 마디로 말해서 Kruskal 알고리즘 은 회로(Cycle)를 이루지 않는 가장 비용이 적은 간선을 하나씩 찾아내는 과정의 연속이다. 그림 4를 보면 Kruskal 알고리즘에 대한 이해를 할 수 있다. 우선 가장 작은 비용인 가중치 1을 가지는 간선 중에서 JK, AC를 선택한다. 다음으로 가중치 2를 가지는 간선 중에서 FJ, HI, CD, IJ 를 선택한다. AD 간선은 선택될 경우 회로(Cycle)를 이루게 되므로 제외된다. 이렇게 모든 정점이 다 방문되는 최소비용 신장 트리가 구해진다.

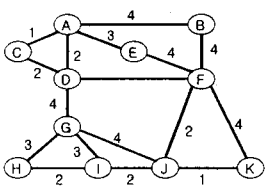

그림 3. 초기에 주어진 가중 그래프

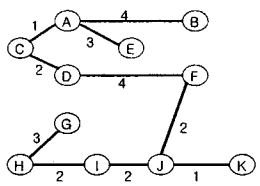

그림 4. Kruskal 알고리즘의 과정

2.2.3 Dijkstra 과 Kruskal 알고리즘의 연계

Dijkstra 알고리즘은 시작 정점에서 모든 다른 정점으로 가는 가장 짧은 경로를 찾는 문제에 적당하다, 그러나 때때로 루프를 가지는 해가 만들어 지게 된다. 방사상의 구조를 이루는 신장트리를 확실하게 발견할 수 있는 방법은 Kruskal 알고리즘을 적용하는 것이다. 그러나 Kruskal 알고리즘의 해의 성질은 Dijkstra 알고리즘 보다 떨어진다. 그러므로, 우리는 Dijkstra 알고리즘에 의해 해를 발견하고, 그 후에 Kruskal 알고리즘를 적용하여 해를 찾아낸다. 만약 해에 루프가 없다면, 같은 해가 Kruskal 알고리즘에 의해 얻어진다.

2.3 스위치의 전류 허용 용량에 의한 가중치 지표

상시 개방 개폐기(normally open switch)의 최대 여유 용량 그리고 상시 투입 개폐기(normally closed switch)에 의한 전달 부하의 양을 가중치로 적용한다. 먼저 3상 조류 해석을 통해서 얻어지는 전류의 흐름으로부터 구하고자 하는 값이 결정되어진다.

2.3.1 상시개방 개폐기(normally open switch)의 최대 여유 용량

각각의 피더는 그것의 가지중의 하나가 과부하가 걸리거나 또는 그것의 보호장치중의 하나가 작동되어지기 전에 유지할 수 있는 가장 작은 전류의 량(I_M) 을 갖는다. 상시 개방 개폐기에 대한 최대 여유 용량은 3상 조류해석의 분석과 변전소 방향의 상시 개방 개폐기의 1차측으로부터 발견할 수 있는 해이다.

3상 조류 해석은 각각의 가지마다 각각 상에서의 전류의 흐름(I_k^p)을 계산한다.

$$I_M^{k,p} = I_k^{\max} - I_k^p$$

주어진 경로에서 모든 가지의 모든 상에 대해 발견되어진 $I_M^{k,p}$ 는 상시 개방 개폐기의 최대 여유 용량으로 간주된다.

2.3.2 상시 투입 개폐기(normally closed switch)에 의한 절체 부하량

이것은 각각의 상시 투입 개폐기가 상시 개방 개폐기로 전이 시킬 수 있는 부하의 량이다 : 그러므로 이것은 상시 개방 개폐기에 의존한다. I_{ss}는 상시 투입 개폐기로부터 밑 부분의 모든 부하의 합으로 계산되어진다.

$$I_{SS} = \sum_{C_d} I_L$$

C_d는 상시 투입 개폐기의 2차측으로부터 밑에 놓여 있는 모든 모선들의 집합들이다.

2.4. 알고리즘의 적용

2.4.1 가중치 결정

각각의 선로와 스위치에 가중치를 적용함으로 최단 경로 추적 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘을 적용하게 된다.

●각각의 모선 사이의 선로의 가중치는 선로에 걸리는 부하량을 조류해석이 이루어진 후 선로의 허용가능 전류를 통해 구한다.
●상시 개방 개폐기(normally open switch)의 최대 여유용량의 측정을 통해 가중치가 부여된다.
●상시 투입 개폐기(normally closed switch)에 의한 전이 부하의 량을 조류해석을 통해 구한 후 가중치를 부여한다.

단위(A)	선로및 스위치의 전류 허용 용량				
I_k^b	ts1	ts2	ts3	ts4	·
상시 개방 개폐기의 최대 허용 용량	100.4	150.3	180.8	130.2	·
I_{ss}	ss1	ss2	ss3	·	·
상시 투입 개폐기의 전이 부하 용량	110.1	130.9	160.3	·	·
I_j	line1	line2	line3	line4	line5
선로의 허용 전류 용량	110.4	120.7	150.3	130.0	140.1

표 1 선로및 스위치의 전류 허용량

	가중치(weight)				
I_k^b	ts1	ts2	ts3	ts4	·
상시 개방 개폐기의 최대 허용 용량	100	60	30	80	·
I_{ss}	ss1	ss2	ss3	·	·
상시 투입 개폐기의 전이 부하 용량	90	70	50	·	·
I_j	line1	line2	line3	line4	line5
선로의 허용 전류 용량	90	80	60	80	70

표 2 전류 허용량의 가중치로의 변환 값

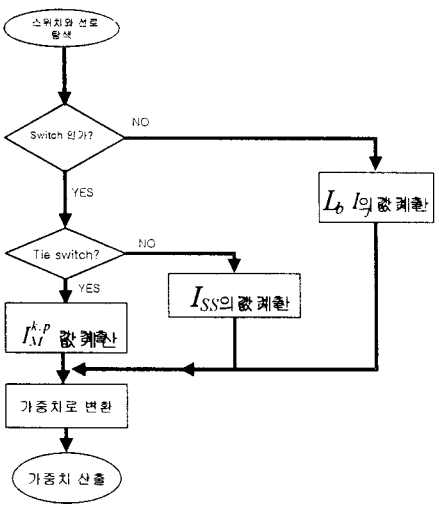

그림 5 가중치 산출 흐름도

2.4.2 정전 복구 알고리즘

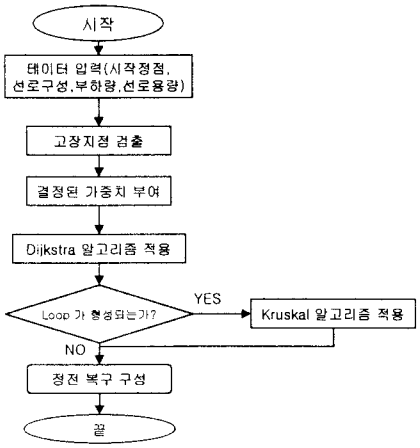

그림 6 정전 복구 알고리즘

3. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 정전 복구에 있어서 효율적인 방법을 제시하였다. Dijkstra 알고리즘을 이용하여 전력계통망의 최적의 경로를 구성할 수 있었으며, 또한, 스위치와 선로의 전류허용 용량은 가중치를 결정하는데 사용되었고, 결과적으로 정전복구에 있어서 스위칭 횟수를 현저히 감소시키고 ,정전복구 속도를 감소시키는 결과를 나타내었다. 향후 가중치 결정함에 있어서 다른 중요한 조건들을 연계시킨다면 더욱 안정적이고 빠른 정전복구를 할 수 있을 것이라 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1]Karen Nan Miu, Hsiao-Dong Chiang "Fast Service Restoration for Large-Scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints" IEEE Transactions on Power Systems, Vol 13, No 3, August 1998

[2]김낙경, 전영재 "다익스트라 알고리즘을 이용한 배전계통의 향상된 사고복구 기법" Trans. KIEE. Vol. 50A No 2, FEB 2001

[3]W.STALLINGS "Data and Computer Communications" MACMILLAN 1994 pp 288~298

[4]함경수 " 데이터 구조 " 도서출판 아진,2001 pp 594~597

[5]Dariush Shirmohammadi "Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No 2, April 1992

[6]R.Ciric, N.Rajakovic " Restoration of Radial Distribution Networks" ETEP Vol. 7 No. 1 January 1997

[7]Daruish shirmohammandi "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No 2,April 1989

[8]Mesut E. Baran "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 2, April 1989

[9]Aoki. K. at al., "New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning " IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, 1990.

[10]Satish Jonnavithula, Roy Billinton, "Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Delievery, Vol. 11, No 4, October, 1996.