

최소신장트리를 이용한 배전선로 다중 과부하 해소 방법

(Load Balancing Technique to Release Multiple Overloading of Distribution Feeders using Minimum Spanning Tree)

오성현* · 이한성 · 김영국 · 임성일**

(Seong-Hyeon Oh · Han-Seong Lee · Young-Kook Kim · Seong-Il Lim)

Abstract

Power supplying capacity of the distribution feeder should be maintained within thermal capacity of the wire. This paper presents the minimum spanning tree based load balancing technique to release multiple overloading of distribution feeders. In order to minimize number of involved backup feeders, Dijkstra and Prim algorithm are adopted to construct minimum spanning tree. Simulation testing result based on part of KEPCO's commercial distribution systems shows effectiveness of proposed scheme.

Key Words : Load Balancing, Multiple Overloading, Minimum Spanning Tree, Dijkstra Algorithm, Prim Algorithm, Distribution System

1. 서 론

배전계통에서 전력의 지속적인 공급을 위해서는 선로에 흐르는 최대 부하전류가 항상 전선의 열적허용용량 이내로 유지되어야 한다. 부하의 급격한 변동으로 과부하가 발생하면 신속히 부하의 일부를 이웃한 연계선로로 절체하여 전선을 열적 손상으로부터 보호하여야 한다. 과부하를 해소를 위한 부하절체 방안의 도출 문제는 개폐기의 투입/개방 상태를 해공간으로 하

는 전형적인 조합최적화 문제이다. 일반적으로 목적함수는 부하균등화이고 제약조건은 규정전압 및 전류의 유지이다.

과부하 해소방안에 대한 선행연구로는 브랜치 교환법[1-2], 퍼지추론[3], 근사추정법[4], 객체지향 모델링[5], 연계점이동법[6] 등이 있다. 기존의 연구는 느슨하게 연결된 망구조의 배전선로에서 조합최적화 문제의 해를 도출할 때 전역적 최적해에 근접하면서 탐색시간을 최소화하는 것이 대부분이었다. 이러한 선행연구들은 실계통에서 과부하를 해소할 때 선로의 변경이 최소화되어야 한다는 실무적 요구사항을 반영하지 못하고 있다.

본 논문에서는 실용적인 과부하 해소방안을 도출하기 위하여 참여하는 연계선로의 수를 최소화하는 방안을 제시한다. 이를 위하여 Dijkstra 및 Prim 알고리즘을 이용하여 최소신장트리를 구성하고, 연계점 교환

* Main author : Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, Student for Master Course

** Corresponding author : Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, Professor
Tel : 055-249-2630, Fax : 0505-999-2161
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr

Received : 2014. 9. 16
Accepted : 2014. 12. 9

법을 적용하여 최적해를 탐색한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1에서는 기존의 과부하 해소방안과 문제점을 기술한다. 2.2에서는 본 논문에서 제시하는 과부하 해소방안 도출방법을 설명한다. 2.3에서는 제주계통을 대상으로 한 유용성 검증결과를 수록한다.

2. 본 론

2.1 기존 다중 과부하 해소의 문제점

배전계통은 과부하 없이 모든 선로에 정상적으로 전력을 공급해야 한다. 한전의 배전선로 운전 허용용량은 ACSR 160mm²인 경우 14MVA까지 가능하다. 하나의 선로에 총 부하량이 14MVA 이상이면 과부하 선로이다. 과부하를 해소하기 위해 모든 연계선로를 이용하여 부하량이 14MVA 이하가 될 때까지 연계점 교환법을 반복 수행한다.

2.1.1 연계점 교환법을 이용한 과부하 해소

두 선로 사이의 직선경로 상에 존재하는 상시개방점을 이동하면 나머지 선로 운영에는 영향을 미치지 않는다. 상시개방점은 배전선로를 방사상 구조로 운영하기 위해 이용하는 자동화 개폐기이다. 자동화 개폐기는 원격에서 제어 및 조작이 가능하다.

그림 1에서 DL₂는 구간 2, 구간 3, 구간 4에 전력을 공급하고 있다. 세 구간 부하량 합이 14MVA 이상으로 과부하 선로이다. 이러한 경우 과부하를 해소하기 위해서 DL₂의 상시개방점을 이동한다. 상시개방점을 이동하기 위해 인접한 여러 참여연계선로 중 하나를 선택한다. 참여연계선로는 DL₁, DL₃, DL₄ 모두 이용할 수 있다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 DL₃을 참여연계선로로 선택하였다. 두 선로를 방사상 구조로 운영하기 위해 S₄가 상시개방점이고, 개폐기 상태는 Open이다.

DL₂와 DL₃에서 상시개방점이 될 수 있는 개폐기는 직선경로 상에 존재하는 S₂, S₃, S₄, S₆이다. DL₂가 공급하는 세 구간의 과부하를 해소하기 위해 S₄ 개폐기 상태를 Close, S₂ 개폐기 상태를 Open으로 변경한다.

상시개방점을 이동하여 DL₂는 구간 3과 구간 4에 전력을 공급하여 총 부하량이 감소하고, DL₃은 구간 2, 구간 5, 구간 6에 전력을 공급하여 총 부하량이 증가한다.

하지만 각각 두 선로의 총 부하량이 14MVA 이하이기 때문에 선로를 운영하는데 문제점은 없다. 또한 두 선로 사이의 직선경로 상에 존재하는 개폐기를 조작하면 다른 연계선로의 부하량 변화에는 영향을 미치지 않는다.

이와 같이 두 선로 사이의 상시개방점을 이동하여 부하를 균등하게 하는 것을 연계점 교환법이라고 한다. 연계점 교환법을 이용하면 모든 선로의 과부하를 해소할 수 있다.

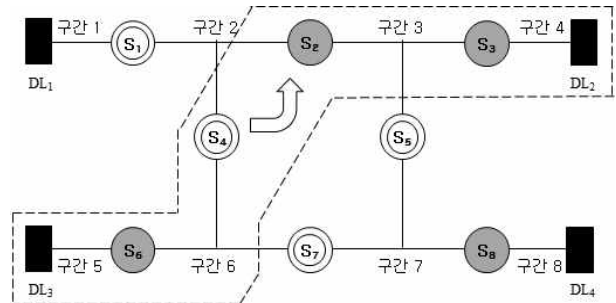


그림 1. 연계점 교환법을 이용한 과부하 해소
Fig. 1. Overload release using tie switch exchange method

2.1.2 기존 방식의 문제점

그림 2는 16개 배전선로가 방사상 구조로 연결된 것을 나타내고 있다. 선로 간의 상시개방점은 표시하지 않았다. DL₅, DL₆, DL₉, DL₁₃, DL₁₅는 과부하 선로를 나타내고 있다.

기존 방식으로 과부하를 해소하기 위해 모든 선로를 참여연계선로로 이용하여 연계점 교환법을 반복 수행함으로써 과부하를 해소하였다. 이 경우 모든 선로의 부하량이 같거나 비슷해지므로 선로를 안정적으로 운영할 수 있는 장점이 있다.

하지만 모든 선로를 참여연계선로로 이용하기 때문에 과부하를 해소하는데 많은 시간이 소비되고, DL₁₂, DL₁₆과 같이 과부하 선로와 인접하지 않은 선로를 참여연계선로로 이용하기 때문에 비효율적이다. 또한

모든 선로의 상시개방점을 이동하기 때문에 개폐기 조작 횟수와 원상태로 선로를 재구성할 때 개폐기 조작 시간이 증가한다.

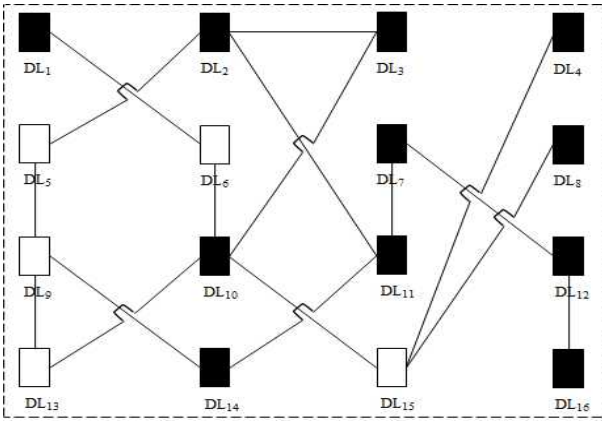


그림 2. 모든 선로를 이용한 연계점 교환법
Fig. 2. Tie switch exchange method using all feeders

2.2 최소 참여연계선로로 과부하 해소방안

과부하를 해소할 때 불필요한 참여연계선로 수를 최소화하기 위해 과부하 선로를 최소 신장트리로 연결한다. 이후 인접한 연계선로 중 부하량이 가장 작은 선로를 선택하고 연계점 교환법으로 과부하를 해소한다. 연계선로의 부하량이 작을수록 추가적인 참여연계선로 수를 최소화할 수 있다. 또한 참여연계선로 수가 작을수록 상시개방점 이동 횟수를 감소시켜 개폐기 조작 시간을 단축할 수 있다.

2.2.1 연계선로를 이용한 정전구역 부하절체

그림 3은 다수의 선로에 전력설비를 교체하거나 선로를 증설할 때 발생하는 정전구역에 전력을 공급하기 위한 방안을 나타내고 있다.

DL₁에서 S₂, S₃, S₆이 둘러싸고 있는 ① 정전구역을 첫 번째로 전력을 공급한다. DL₁에 인접한 연계선로는 DL₃과 DL₅가 있다. 두 선로 중 부하량이 작은 선로를 선택한다. ② 정전구역도 위와 동일한 방법을 이용한다. ① 정전구역에 전력을 공급한 DL₃은 총 부하량이 14MVA 이하로 과부하 선로가 아니지만, ② 정전

구역에 전력을 공급한 DL₆은 14MVA 이상으로 과부하 선로가 된다.

이와 같이 정전구역에 순차적으로 전력을 공급하면 과부하 선로가 발생될 수 있다. 따라서 생성된 과부하 선로를 최소 신장트리를 이용하여 연결한다.

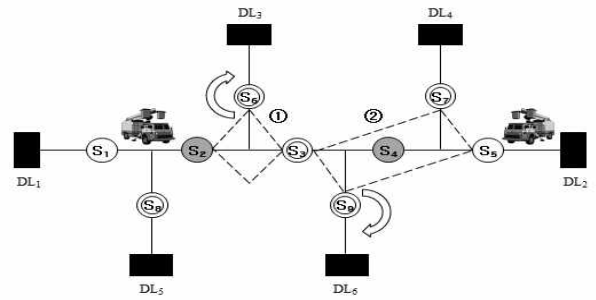


그림 3. 전력설비를 교체할 경우 부하절체 방안
Fig. 3. Load transfer plan in case of power equipment change

2.2.2 최소 신장트리로 과부하 선로 연결

과부하를 해소할 때 시간 단축 및 선로 효율성을 높이기 위해서는 참여연계선로를 선택하는 것이 가장 중요하다.

참여연계선로 수를 최소화하기 위해 최소 신장트리를 이용한다. 최소 신장트리는 과부하 선로 간의 최단 거리를 직선경로로 연결하는 것이다. 최소 신장트리는 2가지 알고리즘을 이용한다. 첫 번째는 Dijkstra 알고리즘으로 하나의 과부하 선로로부터 모든 선로 간의 직선경로를 탐색한다. 두 번째는 Prim 알고리즘으로 최소 신장트리를 완성한다.

Dijkstra 알고리즘을 이용하기 위해서는 과부하 선로를 연결하는 직선경로에 가중치를 부여하고, 가중치를 합산하여 최소값을 가지는 경로를 선택한다. 그림 4에서 DL₁, DL₂, DL₆은 과부하 선로, A부터 O는 선로 간 직선경로를 나타내고 있다. 직선경로의 가중치는 모두 1로 동일하다.

DL₁을 기준으로 직선경로를 탐색한다. DL₁과 DL₃을 연결하는 직선경로는 DL₂를 지나가는 A-B, DL₄를 지나가는 D-C 두 가지이다. 이 경우 가중치는 2로 같다. 이와 같이 두 가지 이상 동일한 가중치를 가지는

직선경로가 존재할 경우 전체 부하량이 작은 직선경로를 선택한다. DL₂가 과부하 선로이기 때문에 DL₄를 지나가는 경로의 부하량이 작다. 이에 따라 직선경로는 D-C로 결정된다. DL₄와 같이 과부하 선로 간 직선경로 상에 존재하는 선로의 부하량이 작을수록 추가적인 참여연계선로를 이용하지 않고 과부하를 해소할 수 있다. 따라서 참여연계선로 수를 줄일 수 있다.

DL₁과 DL₉를 연결하는 직선경로는 DL₄와 DL₃을 지나가는 D-C-F, DL₄를 지나가는 D-E이다. D-C-F는 합산한 가중치가 3이고, D-E는 2이다. 따라서 DL₁과 DL₉를 연결하는 직선경로는 D-E로 결정된다.

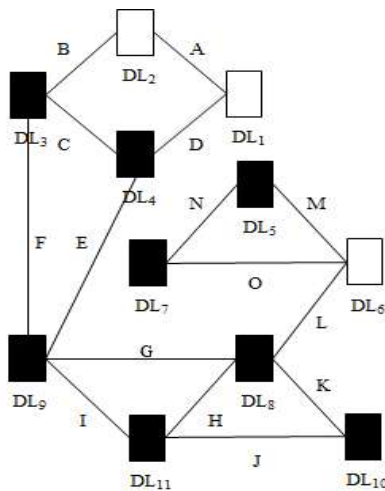


그림 4. Dijkstra 알고리즘을 이용한 직선 경로 탐색
Fig. 4. Search for shorted path using Dijkstra algorithm

표 1은 DL₁부터 다른 선로 간의 직선경로를 나타내고 있다. 동일한 방법으로 과부하 선로인 DL₂를 기준으로 모든 직선경로를 탐색한다.

Dijkstra 알고리즘으로 탐색된 직선 경로 정보로 최소 신장트리를 완성하기 위해 Prim 알고리즘을 이용한다. Prim 알고리즘은 가중치가 작은 직선경로를 순서대로 연결한다.

그림 5는 그림 4의 과부하 선로와 과부하 선로를 연결하는 직선경로를 간단히 나타내고 있다. 먼저 연결된 세 선로 중 하나를 기준을 선택한다. DL₁이 기준이 되면 DL₂와 연결되는 가중치는 1, DL₆은 4이다. 가중

치가 작은 DL₂를 선택하여 연결한다.

DL₁에서 DL₆, DL₂에서 DL₆의 가중치가 동일하다. 따라서 가중치를 비교하여 연결 순서를 결정할 수 없다. 이와 같은 경우 과부하 선로에 존재하는 모든 부하량을 합산하고, 부하량이 작은 경로를 선택한다. DL₂, DL₃, DL₉, DL₈, DL₆을 합산한 부하량이 30MVA, DL₁, DL₄, DL₉, DL₈, DL₆의 합산한 부하량은 32MVA이다. 따라서 DL₁-DL₂-DL₆ 순서로 연결된다.

표 1. DL 1을 기준으로 탐색한 직선 경로
Table 1. Search for shortest path from DL1

도착 선로	직선 경로
DL ₂	A
DL ₃	D - C
DL ₄	D
DL ₅	D - E - G - L - M
DL ₆	D - E - G - L
DL ₇	D - E - G - L - O
DL ₈	D - E - G
DL ₉	D - E
DL ₁₀	D - E - I - J
DL ₁₁	D - E - I

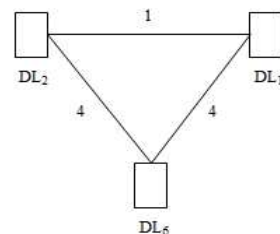


그림 5. Prim 알고리즘을 이용한 직선 경로 선택
Fig. 5. Search for shortest path using Prim algorithm

2.2.3 부하량을 고려한 참여연계선로 선택

여러 과부하 선로를 최소 신장트리를 이용하여 최단 직선 경로로 연결하고, 참여연계선로를 연결하여 연계점 교환법으로 과부하를 해소한다.

최단 직선 경로 상의 선로 중에는 과부하 선로가 아닌 경우가 존재할 수 있다. 따라서 과부하 선로와 과

부하가 아닌 선로를 이용하여 연계점 교환법으로 부하량이 균등하도록 한다. 이를 통해 선로의 과부하가 해소되면 추가적인 연계선로를 연결하지 않으므로 참여연계선로 개수를 최소화할 수 있다.

하지만 과부하가 해소되지 않을 경우 참여연계선로를 연결하여 과부하를 해소한다. 모든 연계선로를 참여시키는 기존 방식과는 달리 과부하 선로와 최단 직선 경로 상에 있는 선로에 연결된 연계선로 중 현재 부하량이 가장 작은 선로를 선택한다. 참여연계선로의 부하량이 작을수록 상시개방점 이동 횟수와 과부하 해소 시간을 단축할 수 있다.

그림 6은 다수의 과부하 선로가 존재할 경우 제안하는 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

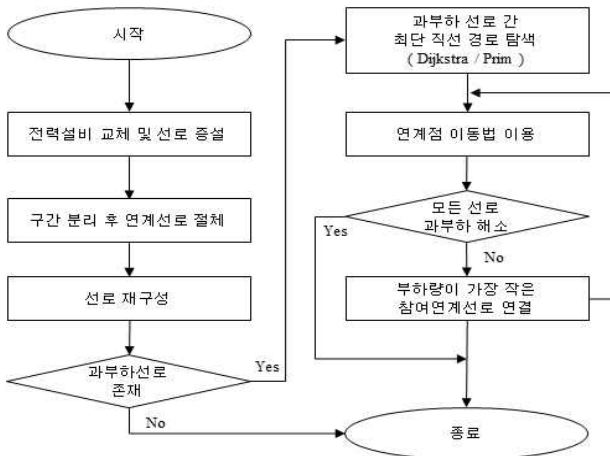


그림 6. 다중 과부하 해소 순서도
Fig. 6. Flowchart of Multiple overload release

그림 7은 16개의 선로 중 5개 과부하 선로가 발생한 것을 나타내고 있다. DL₅, DL₆, DL₉, DL₁₃, DL₁₅는 과부하 선로, DL₁₀은 최소 신장트리를 이용하여 과부하 선로를 연결할 때 최단 직선 경로 상에 존재하는 선로이다.

먼저 최단 직선 경로 상에 존재하는 6개의 선로에 대해 연계점 교환법을 이용하여 과부하를 해소한다. 그림 7에서 6개의 선로만으로 과부하가 해소되지 않으므로 참여연계선로를 이용한다. 참여 연계선로로는 DL₁, DL₂, DL₃, DL₄, DL₈, DL₁₄가 있다.

첫 번째로 6개 참여 연계선로 중 현재 부하량이 가

장 작은 DL₄을 연결하고, 연계점 이동법을 이용하여 과부하가 해소되는지 확인한다. 과부하가 해소되지 않는다면 두 번째로는 부하량이 작은 DL₃, 세 번째로는 DL₄를 순차적으로 연결한다.

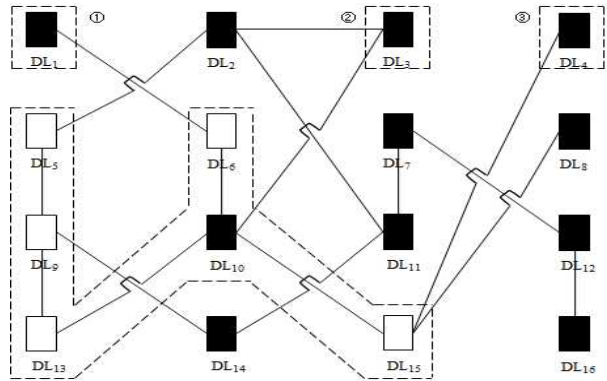


그림 7. 최소 신장 트리를 이용한 연계점 교환법
Fig. 7. Tie switch exchange method using minimum spanning tree

이와 같이 과부하 선로가 존재할 경우 제안하는 알고리즘을 이용하면 최소의 참여연계선로만으로 최단 시간 내에 정상적으로 전력을 공급할 수 있다.

2.3 사례연구

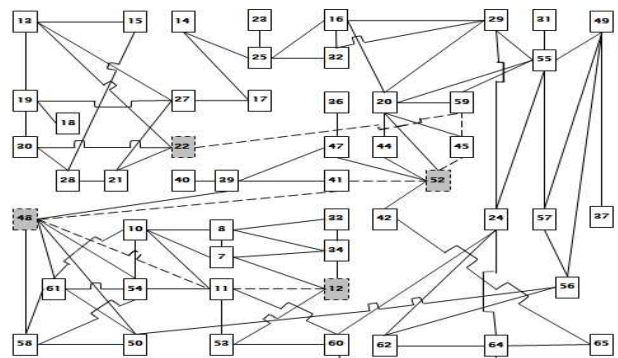


그림 8. 최소 신장트리를 이용한 과부하선로 연결
Fig. 8. Overloaded feeder connection using minimum spanning tree

본 논문에서 제안하는 방법의 유용성을 검증하기 위해 제주계통을 이용하였다. 그림 8은 4개의 과부하 선로가 생성된 것을 나타내고 있다. 과부하 선로는 DL₁₂,

최소신장트리를 이용한 배전선로 다중 과부하 해소 방법

DL₂₂, DL₄₈, DL₅₂이다. 점선은 과부하선로를 최소 신장 트리를 이용하여 연결된 것을 나타내고 있다.

최소 신장트리를 완성하기 위해서 Dijkstra 알고리즘을 적용한다. DL₁₂를 기준으로 3개의 과부하 선로에 대한 직선 경로를 탐색한다. 기준 선로로부터 DL₂₂로 연결되는 경로는 DL₁₂-DL₁₁-DL₆₀-DL₂₄-DL₅₅-DL₅₉이고, DL₄₈로 연결되는 경로는 DL₁₂-DL₁₁이다.

표 2는 각각의 과부하 선로를 직선경로로 연결한 것을 나타내고 있다.

그림 9는 Dijkstra 알고리즘으로 과부하 선로와 연결된 최단 직선 경로를 간단히 나타낸 것이다. DL₁₂와 DL₂₂ 사이에는 5개 선로가 존재하여 가중치는 6이다. 이와 같이 그림 8에서 과부하 선로 사이에 연결된 선로의 개수를 가중치로 나타내고 있다.

표 2. 과부하 선로간 직선 경로 탐색
Table 2. Search for shortest path between overloaded feeder

기준 선로	도착 선로	직선 경로
12	22	11 - 60 - 24 - 55 - 59
	48	11
	52	11 - 48 - 41
22	48	59 - 45 - 52 - 41
	52	59 - 45
48	52	41

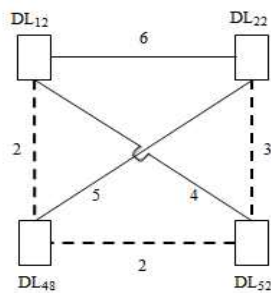


그림 9. 예제 계통 간소화
Fig. 9. Simplifying of example system

DL₁₂를 기준으로 연결된 DL₂₂, DL₄₈, DL₅₂의 가중치를 비교한다. 세 선로 중 가중치가 가장 작은 DL₄₈을 첫 번째로 연결한다. DL₁₂에 연결된 DL₂₂와 DL₅₂는 가

중치가 6, 4이고, DL₄₈에 연결된 DL₂₂와 DL₅₂는 5, 2이다. 두 번째로 DL₄₈과 DL₅₂를 연결한다. DL₁₂와 DL₂₂는 가중치가 6, DL₄₈과 DL₂₂는 5, DL₅₂와 DL₂₂는 3이다. 이 중 가중치가 가장 작은 DL₅₂와 DL₂₂를 마지막으로 연결한다.

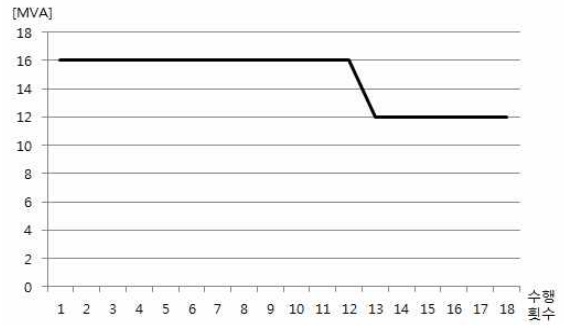


그림 10. DL₁₂의 부하량 변화
Fig. 10. Load variation of feeder DL₁₂

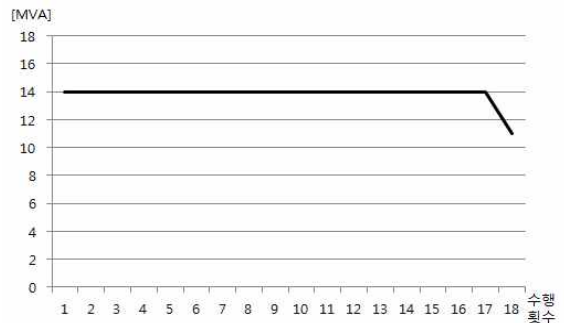


그림 11. DL₅₉의 부하량 변화
Fig. 11. Load variation of feeder DL₅₉

그림 10은 과부하 선로인 DL₁₂, 그림 11은 과부하 선로를 최소 신장트리로 연결할 때 이용하는 DL₅₉의 부하량 변화를 나타내고 있다. DL₅₉는 과부하 선로가 아니었으나 최소 신장트리로 연결하고 연계점 이동법으로 다른 선로의 부하를 절체받아 과부하 선로가 되었다. x축은 참여연계선로를 증가시키면서 연계점 교환법을 이용한 수행횟수, y축은 부하량을 나타내고 있다. DL₁₂의 부하량이 16MVA 이상이므로 과부하 선로였으나, 13개의 참여연계선로를 이용하면 선로 과부하는 해소된다. 하지만 그림 11과 같이 다른 선로의 과부하가 해소되지 않기 때문에 참여연계선로 수를 18개까지 증가시킨다.

표 3은 5개 과부하 선로의 부하량 변화를 나타내고 있다. 모든 선로에 과부하를 해소하기 위해 18개 연계 선로를 이용하여 정상적으로 전력을 공급하였다.

표 3. 과부하 선로의 부하량 변화
Table 3. Load variation of overloaded feeder

선로	부하 절체	연계점 이동	참여연계선로 수							
			1	2	...	13	14	16	18	
12	16.2	16.2	...	...	...	11.8	...	...	11.8
22	14.8	12.4	...	...	...	...	...	11.8	11.5
48	14.4	10.2	8.2	7.4	...	...	6.7	...	6.7
52	18.3	11.0	10.6	...	...	...	...	...	10.6
59	11.6	14.1	...	...	...	...	...	...	11.1

3. 결 론

본 논문에서는 배전선로에 설비 교체 등으로 선로를 재구성할 때 생성되는 과부하를 해소하기 위한 방법을 제안하고 있다. 과부하 선로는 최소 신장트리를 이용하여 최단 직선 경로로 연결한 후 참여연계선로 수를 최소화하여 과부하를 해소한다.

기존 방식의 경우 모든 선로의 연계점을 이동하기 때문에 불필요한 연계선로를 이용함에 따른 효율성이 떨어지고, 전력 공급 시간이 증가한다. 하지만 제안하는 방법을 이용할 경우 참여연계선로 개수를 최소화하고 개폐기 조작 시간을 단축하고 전력 공급 시간을 줄일 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법을 이용하면 최소 참여연계선로만을 이용하여 과부하를 해소하여 모든 선로에 전력을 공급할 수 있을 것으로 보여진다.

References

[1] Mesut E. Baran, Felix F. Wu "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 4, No. 2, pp. 1401-1407, 1989.
[2] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, "A Geometric Approach for Three-Phase Load Balancing in Distribution Networks", IEEE Power System Technology, Vol 1, pp. 293-298, 2000.

[3] B. Naga Raj, K. S. Prakasa Rao, "A New Fuzzy Reasoning Approach for Load Balancing in Distribution System", IEEE Trans. Power Systems, Vol 10, No. 3, pp. 1426-1432, 1995.
[4] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi, "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol 3, No. 4, pp. 1865-1872, 1988.
[5] G. S. Seo, Y. S. Baek, "A Study of Reconfiguration for Load Balancing in Distribution Power System", Trans. KIEE, Vol 56, No. 8, pp. 1360-1365, 2007.
[6] I. H. Lim, S. I. Lim, M. S. Choi, S. J. Lee, C. H. Shin, B. N. Ha, "A Method for Optimal Location of Feeder Tie Switches for Improving Equal Load of Electric Power Equipment in Distribution Automation System", Trans. KIEE, Vol 56, No. 5, pp. 821-828, 2007.

◇ 저자소개 ◇



오성현(吳成顯)

1989년 12월 10일생. 2013년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 첨단공학과 석사과정.
Tel : (055)275-3206
E-mail : ohsy2604@gmail.com



이한성(李韓成)

1987년 6월 16일생. 2012년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 첨단공학과 졸업(석사).
Tel : (055)275-3206
E-mail : leehanseong0616@gmail.com



김영국(金永局)

1952년 7월 8일생. 1975년 경북대학교 물리학과 졸업. 1977년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수.
Tel : (055)241-6311
E-mail : youngkim@kyungnam.ac.kr



임성일(林星日)

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수.
Tel : (055)249-2630
E-mail : slim@kyungnam.ac.kr