

부분 tree 탐색을 이용한 배전계통의 손실 최소화

최상열*, 신명철*, 남기영**, 조필훈***, 박재세****
 *성균관대 **전기연구소 ***한국전력 ****인천전문대

Loss Minimization for Distribution Network using Partial Tree Search

S. Y. Choi*, M. C. Shin*, G. Y. Nam**, P. H. Cho***, J. S. Park****
 *Sungkyunkwan Univ. **KERI. ***KEPCO ****Inchon junior college

Abstract - Network reconfiguration is an operation task, and consists in the determination of the switching operations such to reach the minimum loss conditions of the distribution network. In this paper, an effective heuristic based switch scheme for loss minimization is given for the optimization of distribution loss reduction and a solution approach is presented. The solution algorithm for loss minimization has been developed based on the two stage solution methodology. The first stage of this solution algorithm sets up a decision tree which represent the various switching operations available, the second stage applies a proposed technique called cyclic best first search. Therefore, the solution algorithm of proposed method can determine on-off switch statuses for loss reduction, with a minimum computational effort.

적인 기법에 비하여 보다 정확한 해를 얻을 수 있도록 한다.

2. 배전선로의 스위치의 ON-OFF 변환을 통한 손실최소화 알고리즘

2.1 배전계통의 손실 최소화 문제

배전 계통에서의 손실최소화 문제의 배전계통에서 부하 불평형 또는 과부하가 발생하는 피더를 확인한후 구분 개폐기와 연계 개폐기를 조작하여 위반 요소를 해소함으로써 손실을 최소화 함과 동시에 선로 구성, 전압, 전류등의 제약조건을 만족하는 문제이다. 목적함수를 이용한 선로 재구성을 수행함으로써 위반이 발생된 지점의 부하가 다른 쪽으로 절체되고 부하분담이 균등하게되어 손실이 최소화된다.

2.1.1 목적함수

목적함수는 식 (1)에서 구한 손실을 전체 시스템의 관점에서 최소화하는 것이며 다음의 식과 같이 모든 선로 손실의 합으로 간단히 표현될 수 있다.

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} + A + B \quad (1)$$

P_i, Q_i : 구간 i 에서의 유효 및 무효전력

r_i : 구간 i 에서의 선로 저항

V_i : i 번째 부하단의 전압

A, B : 전압, 전류 제약 조건 위반시의 가중치

2.1.2 제약조건

— 선로 전류 제약조건

$$I_k \leq I_k^{\max} \quad j=0, 1, \dots, n \quad (2)$$

I_k : k번째 지선의 유입전류

I_k^{\max} : 도체의 허용 전류용량

지선 k를 흐르는 전류 I_k 는 도체 허용전류용량 한계치 이하 이여야 한다

— 전압강하 제약조건

$$V_k \geq V_k^{\min} \quad (3)$$

V_k : k번째 부하단의 전압

V_k^{\min} : 부하단의 허용전압 하한치

부하단의 전압인 V_k 는 허용전압 하한치 이상 이여야 한다.

— 방사상 제약조건

$$T = e - e_c, e_c = n - 1 \quad (4)$$

T : 연계 개폐기의 갯수

e : 선로 갯수

n : 모선의 갯수

e_c : 닫혀있는 개폐기의 개수

1. 서 론

소득 수준 향상에 따른 가정용 전력수요의 증가와 3차 산업의 급성장에 따른 전력수요의 증가 등으로 인해 배전계통은 점점 확장되고 복잡해지고 있다. 이에 따라 점차 증가되는 배전선로의 손실 감소시키기 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

배전계통의 손실을 최소화하기 위한 알고리즘으로, Aoki 등[1]이 sectionalizer에 의한 변압기와 피더들간의 부하 균형을 위한 알고리즘을 제시하였고 Shirmohamadi 등 [2]이 모든 개폐기를 닫은 망 상태의 배전계통에서 조류 계산을 하여 전류가 가장 적게 흐르는 개폐기를 열어 방사상 구조를 유지하는 방법을 제안하였고 Baran 등[3]과 Cinvarlar 등[4]은 개폐기 조작을 통해 저장된 손실을 계산하는 근사적인 조류계산 방식을 제시하였고, Goswami 등[5]이 KVL 과 KCL (Kirchhoff의 전압,전류 법칙)을 이용하여 손실감소를 위한 배전계통 재구성의 알고리즘을 제안하였다.

한편 wu등[6]등은 연계 개폐기와 구분 개폐기의 조합을 트리 구조상의 노드로 전환시키고 평가함수를 통하여 노드를 탐색함으로써 과부하 해소, 정전복구, 각상간의 불평형을 해결하는 알고리즘을 제안하였다.

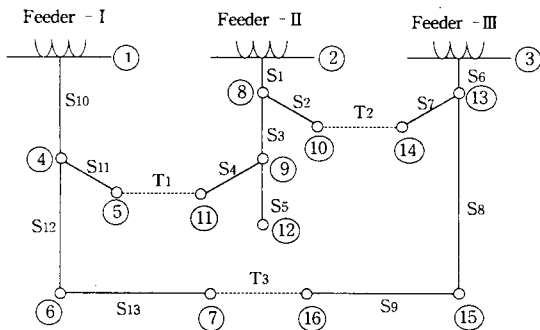
본 논문에서는 선로의 과부하 해소와 방사상 제약조건 해결이 용이한 트리를 적용한 논문[6]의 알고리즘을 수정 보완한 방법을 소개한다. 여기에서는 구성된 트리의 노드를 손실을 인덱스로 하는 best-first탐색을 시도하여 근사 최적 경로를 구하고, 경로상의 최하위 레벨의 노드를 최상위 루트 노드로 하는 역tree로 재구성하여 탐색하는 순환적 best-first 탐색 방식을 적용하여 실 계통으로의 적용시 요구되는 시간제약을 극복하고 기존의 경험

배전 계통의 조류는 흐름이 루프를 형성해서는 안되고 방사상으로 흘러야 한다.

2.2 스위치 탐색을 위한 부분 트리 구성

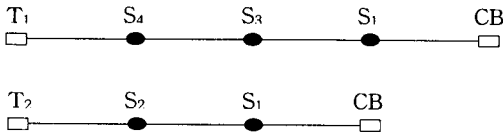
배전계통은 선로와 구분 개폐기가 연속적으로 연결되므로 구분 개폐기를 포함한 구간선로와 마디로 표현되는 모선이 연결되는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 배전선로는 구간선로와 모선을 이용하여 트리로 구성하고 트리의 가지사이에는 상시 open된 연계 개폐기가 존재 하는 것으로 표현이 가능하다.

선로손실을 최소화 하기위한 계통재구성은 하나의 상시 open된 연계개폐기를 close시키고 하나의 상시 close된 구분개폐기를 open시켜서 선로과부하를 해소시킴으로써 이루어진다. 따라서 N개의 연계개폐기를 갖는 선로의 과부하 해소를 위한 인접 백업선로의 갯수는 N개가 되고, 과부하 해소를 위해 ON-OFF 되어야 할 스위칭 조합의 갯수도 N개가 된다.



<그림 1> 3-Feeder 모델계통

그림 1에서 만약 피더 2가 위반 피더라고 하면 피더 1과 3은 위반을 해소하기 위한 백업 피더가 된다. 위반을 해소하기 위하여 부하를 절제하기 위한 스위칭은 T1을 close시키고 S4를 OPEN 시킴으로써 가능하고 이것을 (T1, S4)로 표현한다. 스위칭(T1, S4), (T2, S2)는 동시에 수행 가능하고 이러한 스위칭 후의 배전계통의 구조는 여전히 트리형태의 구조를 유지한다. 선로 과부하를 해소하기 위한 스위칭 조합의 탐색 방법은 위반 피더의 연계개폐기를 탐색의 시작점으로 하여 위반 피더의 전원측 방향으로 탐색해 나간다.

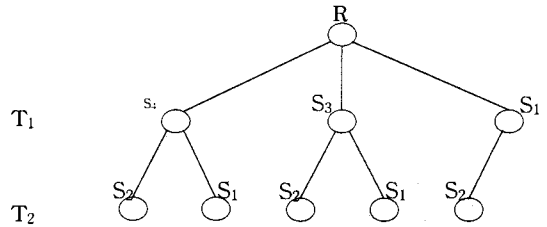


<그림 2> 모델 계통의 탐색 경로

그림 2에서 백업 피더가 1이라고 가정하면 구하고자 하는 스위칭 조합의 탐색은 T1에서 시작하여 S4, S3, S1순으로 탐색 되므로 가능한 스위칭 조합은 (T1, S4), (T1, S3), (T1, S2)이 되고 이 중에서 가장 손실이 최소가 되는 조합을 찾는다.

그림 3에서 만약 백업 피더가 1과 3이라면 가능한 스위칭 조합은 {(T1, S4), (T2, S2)}, (T1, S4), (T2, S1)}, {(T1, S3), (T2, S2)}, {(T1, S3), (T2, S1)}, {(T1, S1), (T2, S2)}이다

그러나 {(T1, S1), (T2, S1)}와 같은 조합은 방사상으로 구성되어야 하는 배전계통의 제약조건을 위반하므로 고려 대상에서 제외시킨다.



<그림 3> 2 단계 부분 트리

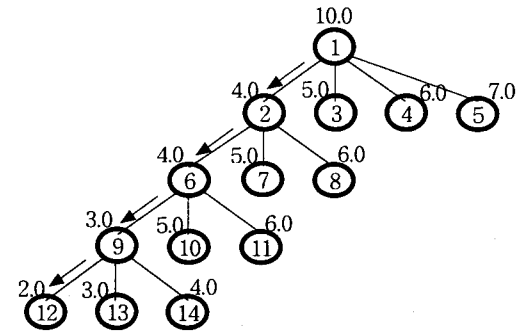
그림3 에서와 같이 부분 트리 생성시 생성된 트리의 총 레벨의 개수는 과부하 선로가 갖는 연계개폐기의 수와 같게 된다.

2.3 순환적 best-first 탐색 기법

구성된 트리에서 모든 노드를 검색하여 최적의 해를 얻는 방법은 작은 계통에서는 적용 가능하지만 대규모 계통에 적용할 경우 최적의 해를 탐색하는데 많은 시간과 노력이 요구되어 실 시간적인 제어가 요구되는 배전자동화 시스템에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 빠른 탐색 속도로 인하여 실시간 시스템에 적용이 용이한 순환적 best-first 탐색 방법을 이용한다. 순환적 best-first 탐색 방법 기존의 best-first 탐색 기법을 기반으로 하여 보다 정확한 해를 얻기 위하여 순환성을 부가한 것이다.

3.3.1 best-first 탐색

best-first 탐색은 트리의 각각의 상위 노드로부터 손실이 최소가 되는 하위노드를 선택하는 과정을 반복해가면서 손실이 최소가 되는 노드를 찾는다.

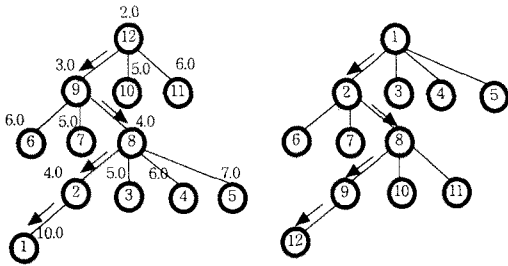


<그림 4> best-first 탐색

그림 4에서 ①번노드는 탐색의 시작이 되는 루트 노드이고 ②노드가 탐색 결과로 구해진 결과 노드이다 ①번 노드에서 탐색을 시작하면 자식노드는 ②,③,④,⑤가 되고 이러한 자식 노드중 손실이 최소가 되는 ②번 노드가 선택되어 탐색이 진행된다. ②번 노드에서의 하위노드는 ⑥,⑦,⑧노드가 되고 이중 손실이 최소가 되는 노드인 ⑥번 노드가 선택된다. 이와같은 탐색의 반복으로 최종적으로 노드 ⑫를 선택하고 탐색은 종료된다.best-first 탐색의 장점은 depth-first탐색이나 breadth-first탐색에 비하여 빠른 시간내에 결과 노드를 찾을 수 있으나 선택된 최종의 노드가 언제나 최적의 노드가 되지 않고, 또한 구성된 부분 트리에 적용시 반드시 요구되는 최적의 탐색 경로를 보장하지 않는다. 즉 위에서 선택된 경로는 ①→②→⑥→⑨→⑫이지만 이러한 경로는 최적의 경로가 아닌 근사 최적의 경로이다. 따라서 본 논문에서는 구성된 부분 트리에 적용 가능하고 최적에 가까운 탐색 경로를 찾기 위하여 순환적 best-first 탐색을 이용한다.

3.3.2 순환적 best-first 탐색

순환적 best-first 탐색은 구성된 부분 트리에서 필수적으로 요구되는 최적의 경로를 찾기 위하여 best-first 탐색에 순환성을 부여한 것이다. 즉 구성된 트리에서 최적의 경로를 선택하기 위하여 최초로 best-first 탐색으로 시작 노드로부터 최종 노드까지의 경로를 선택하고 그 후 선택된 최종 노드를 탐색의 시작점으로 하여 best-first 탐색을 역으로 수행함으로써 좀더 최적에 가까운 경로를 선택하게 되는 것이다.

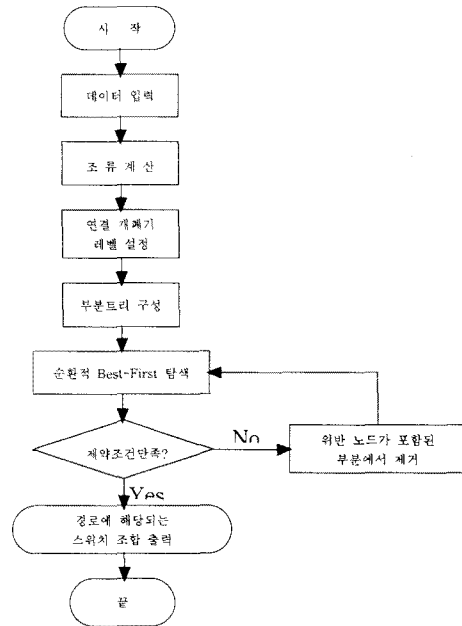


<그림 5> 순환적 best-first 탐색

그림 5-A에서 ⑫노드는 최초의 best-first 탐색에 선택된 결과 노드이다. 이 노드를 탐색의 시작점으로 하고 최초로 구성된 트리의 레벨을 역으로 구성한 트리에서 재구성하여 best-first 탐색 방식으로 탐색하면 하위의 노드는 ⑨, ⑩, ⑪ 노드이고 이중 손실이 최소인 ⑨번 노드가 선택된다. 같은 방식으로 탐색을 진행하여 최종적으로 ①번 노드에 도달하면 탐색은 종료되며 선택된 최적의 경로는 ⑫→⑨→⑧→②→①이 된다. 이와같은 방식으로 선택된 경로 역시 최적이라고 할 수 없으므로 그림 5-B에서와 같이 ①번 노드를 루트 노드로 하여 순환적인 탐색을 계속하면 ①→②→⑧→⑨→⑫와 같은 경로를 얻게 된다 이러한 경로는 이전 탐색시 선택된 경로와 같으므로 탐색을 종료한다. 최초의 best-first 탐색으로 선택된 경로와 순환적인 best-first 탐색으로 선택된 경로가 서로 다른 이유는 구성된 부분 트리의 상위 레벨일수록 지역적인 국부해에 가깝고 하위 레벨로 내려 갈수록 전역적인 최적해에 가까워지기 때문이며 따라서 비록 상위 레벨에서 선택된 노드가 그 선택된 레벨에서는 최적의 노드일지라도 시스템 관점에서 볼 때 최적의 노드가 되지 않을 수 있고 결과적으로 최종 선택된 노드를 포함한 경로도 최적의 경로가 되지 않을 수 있다. 특히 본 논문에서와 같이 스위치 조합을 노드로 하는 부분 트리에서 최적의 경로를 탐색할 경우 한 레벨에서 노드를 선택하면 그 노드에 해당되는 스위칭으로 인하여 그에 상응하는 손실 값이 변하게 되어 하위 레벨의 노드뿐만 아니라 상위 레벨에서 선택된 노드의 손실값에도 영향을 주게 됨으로 최종적으로 선택된 경로가 시스템 관점의 최적 경로임을 보장하는 것은 어려워진다. 순환적 best-first 탐색에서는 이미 근사 최적으로 판단되어지는 결과 노드를 트리의 루트로 하여 탐색을 반복함으로써 시스템 관점에서 보다 최적의 경로를 선택할 수 있게된다.

3.4 전체 흐름도

그림 6은 지금까지 설명된 순환적인 부분 트리 탐색을 통한 손실 최소화 알고리즘은 다음과 같다.



<그림 6> 손실 최소화 알고리즘

4. 결론

본 논문에서 제시한 알고리즘의 장점은 부분 tree 기법을 이용하여 노드 탐색횟수가 줄어들어 실 계통 적용이 용이 하도록 하였고, 국부 최적해에 빠질 가능성이 순환 기법을 이용함으로써 줄어들었다.

[참고문헌]

- [1] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh, M. Kanezashi, "An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 1865-1872. October 1988.
- [2] D. Shirmohammadi, H.Y. Hong, "Reconfiguration of electrical distribution networks for resistive line losses reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 1492-1498. May 1988.
- [3] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, 1989, pp. 1401-1407, April 1989.
- [4] S. Cinavanlar, J. J. Grainger, H. Yin, S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for losses reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-3, 1988, pp.1217-1223, July 1988.
- [5] S. K. Goswami, S. K. Basu, "A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1484-1491, July 1992.
- [6] J. S. Wu, K. L. Tomsovic, C. S. Chen, "A heuristic search approach to feeder switching operations for overload, fault, unbalanced flow and maintenance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October 1991.