

트리구조의 배전계통 데이터베이스 구성과 트리탐색기법

김 세 호* 류 현 수* 최 병 유** 조 시 형*** 문 영 천*

* 연세대학교 전기공학과 ** 한전기술연구원 *** 한전서울연수원

The Construction of Tree-structured Database and Tree Search Strategies in Distribution Systems

S. H. Kim*, H. S. Ryu*, B. Y. Choi**, S. H. Cho***, Y. H. Moon*

* Yonsei University ** KEPCO Research Center *** KEPCO Training Center

[ABSTRACT]

This paper proposes the methods to construct the tree-structured database and analyze the distribution system network.

In order to cope with an extensive amount of data and the frequent breaker switching operations in distribution systems, the database for system configuration is constructed using binary trees. Once the tree-structured database has been built, the system tracing of distribution network can be rapidly performed. This remarkably enhances the efficiency of data search and easily adapts to system changes due to switching operations. The computation method of fast power flow using tree search strategies is presented.

The methods in the paper may be available in the field of distribution system operation.

1. 서 론

최근의 전력계통은 수요의 증가와 높은 신뢰도 및 더욱 저렴한 전력공급에 대한 사회적 요청에 의해 계통의 규모는 확대되어 가고 있으며 계통의 연계등에 의하여 복잡화 되고 있다. 특히 배전계통은 방대한 데이터로 구성되고 개폐기의 조작이 수시로 이루어지므로 계통구성을 나타내는 데이터베이스내에서 데이터의 위치가 일정하지 않고 데이터의 탐색이 자주 이루어지고 있다[1]. 따라서 데이터의 참조나 계통추적시에 탐색효율을 향상시키고 계통의 변경에 쉽게 대응하기 위하여 데이터베이스를 트리구조로 구성하고자 한다. 데이터베이스는 인공지능에 많이 사용되는 2진트리를 사용하여 구성되며 개폐기 조작 후에 변경되는 트리에 대해서는 모든 데이터를 탐색하지 않고 종류방향이 바뀌는 경로만 탐색하여 계통변경시에 신속하게 대응하고 트리구조의 데이터베이스를 탐색하는 트리탐색법을 이용하여 간단하게 조류계산을 수행하는 방안을 제시한다.

2. 트리구조의 배전계통 데이터베이스

배전계통 구성의 복잡성과 개폐기의 빈번한 조작에 대응하기 위하여 2진트리를 이용하여 계통구성 데이터베이스를 트리구조로 구성한다.

2진트리를 표현하는 방법은 다음과 같다.

- o 특수기호(nil)는 빈트리를 나타낸다.
 - o 비어있지 않은 트리(non-empty tree)는 세가지의 요소(뿌리, 좌측부트리, 우측부트리)로 이루어진 작용자로 표현한다.
- 배전계통은 분기선로가 존재하므로 데이터베이스 구성시에 분기선로를 고려해야 한다. 두개의 분기선로까지는 2진트리의 좌우측 부트리로 구성하면 되지만 3개 이상의 분기선로가 존재하는 경우에는 2진트리로 구성할수가 없으므로 3개이상의 분기가 존재하는 경우에는 더미(dummy)뿌리를 가정하여 2진트리구조를 유지하도록 하였다. 배전계통의 분기지점에 대한 2진트리

의 구성을 그림 1에 표시하였다.

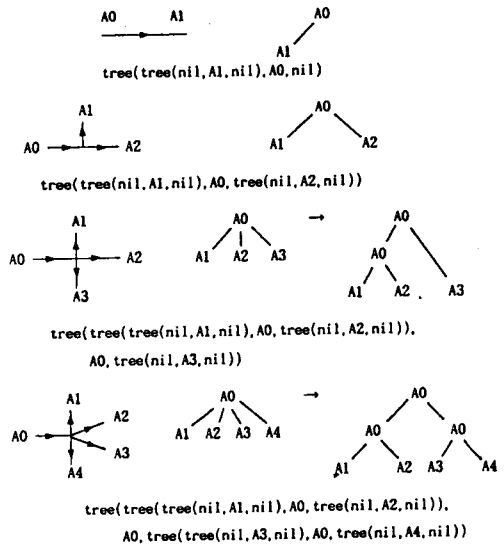


그림 1. 2진트리의 구성

트리구조의 데이터베이스 구성

데이터베이스의 구성시에 분기를 고려해야 하므로 모든 모선에 연결되는 분기수를 초기화하고 피더모션으로부터 추적을 시작하며 추적시에 구간선로내의 개폐기 상태를 파악한다. 만약 개폐기가 개방상태이면 개폐기는 수치상 구조를 유지하기 위한 연계개폐기이므로 추적은 중단되고 투입상태이면 분기수를 1만큼 증가시키고 반대방향에 연결되는 모션을 파악하여 좌측부트리에 삽입시킨다. 이때 삽입되는 좌측부트리는 2진트리구조를 유지하여야 한다. 좌측부트리에 삽입된 모션으로 출발하여 위의 과정을 반복하면서 모선에 연결되는 분기수를 갱신한다.

분기수가 1이면 좌측에 부트리를 형성하고 2이면 우측부트리로 트리구성을 한다. 만일 3개의 분기가 존재하는 경우에는 더미뿌리를 가정하여 이미 구성된 2개의 분기로 이루어진 트리를 가정한 더미뿌리의 좌우측 부트리로 다시 구성하고 3번째 분기를 원래 뿌리의 우측부트리로 형성한다. 4개의 분기가 존재하는 경우에는 또다시 더미뿌리를 가정하여 3번째 분기는 새로 가정한 더미뿌리의 좌측부트리로 4번째의 분기는 우측부트리를 형성하도록 한다. 이와같은 과정을 수행하면 많은 분기선로가 존재하는 경우에도 항상 2진트리구조를 유지할 수 있다.

트리구조의 데이터베이스 구성 흐름도는 그림 2와 같다.

데이터베이스 수정방법

개폐기의 상태가 변할때마다 데이터베이스를 재구성하는 경우

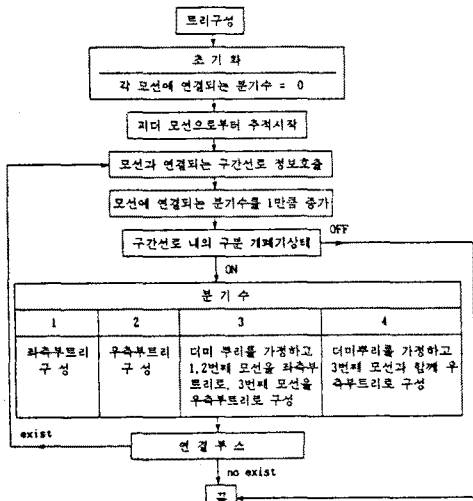


그림 2. 트리구조 데이터베이스 구성의 흐름도

많은 시간이 소요되므로 변경된 개폐기사이의 구간중 조류방향 이 변하는 구간만을 추적하여 계통구성의 변화에 대응하고자 한다. 조류방향이 변하는 구간은 조작개폐기사이의 경로를 추적함으로써 파악할 수 있으며 추적시에 경로에서 분기되는 부 트리는 추적할 필요없이 그대로 경로와 함께 저장하고 경로의 추적이 종결되면 경로의 역방향으로 트리를 구성하여 변경된 공급피더의 데이터베이스에 경로의 역방향 트리를 삽입한다. 데이터베이스의 수정방안을 그림 3에 표시하였다. 그림 3(a)

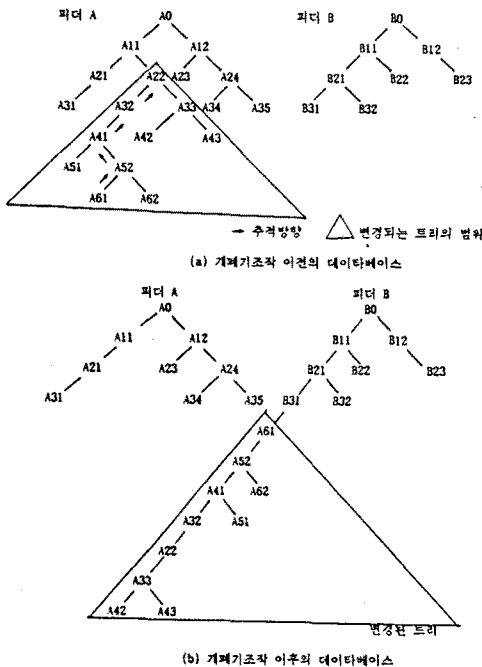


그림 3. 데이터베이스 수정 방안 I

에서 [A61, B31]구간선로내의 연계개폐기와 [A11, A22]구간선로 내의 구분개폐기를 통해 개폐기조작이 이루어질경우 A22와 A61 사이의 경로를 탐색하면서 경로에서 분기되는 부트리를 경로와 함께 저장하고 연계개폐기 B31의 부하측에 경로의 역방향트리를 삽입하면 (b)와 같은 형태의 데이터베이스로 수정이 된다. 조작개폐기가 더미부리에 연결된 개폐기이면 더미부리에 연결되는 분기수가 1만큼 감소하므로 조작후 더미부리의 존재여 부를 파악한다. 더미부리에 연결된 개폐기의 조작예를 그림4에

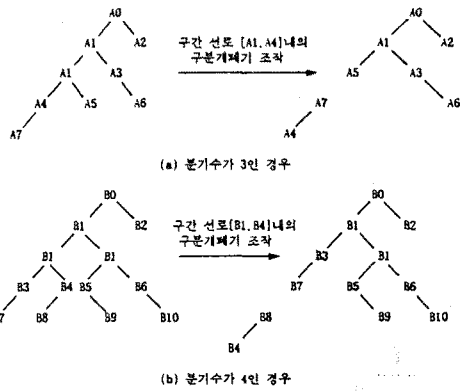


그림 4. 데이터베이스의 수정방안 II

표시하였다. 그림 4(a)에서 A1과 A4사이, A1과 A5사이 또는 A1과 A3사이의 구분개폐기를 조작할 경우 모선 A1에 연결되는 분기수가 1만큼 감소하여 더이상 더미부리를 가정할 필요없이 2진 트리구조를 유지한다. 또한 그림 4(b)와 같이 두개의 더미 부리가 존재하는 경우 더미부리에 연결된 개폐기를 조작하 면 조작개폐기의 방향으로의 더미부리는 존재할 필요가 없다. 데이터베이스 수정방안을 그림 5에 표시하였다.

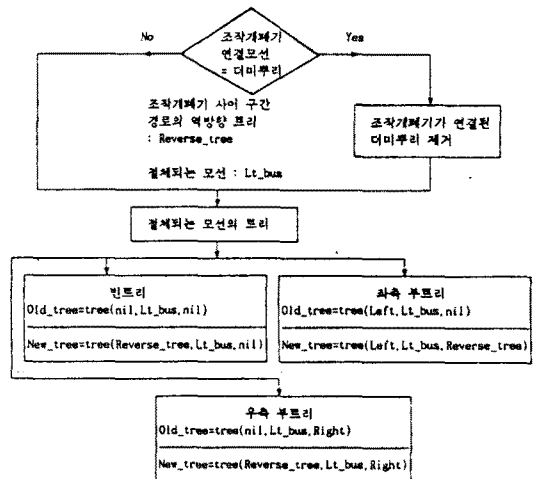


그림 5. 데이터베이스 수정방안의 구성도

3. 트리탐색법을 이용한 계통해석

트리구조의 계통구성 데이터베이스를 탐색하는 트리탐색법을 이용하여 계통을 해석하고자 한다.

조류계산방안

수직상 구조의 피더에 대해 손실을 무시하는 경우 조류계산식은 다음과 같다[4].

$$P_{i+1} = P_i - PL_{i+1} \text{ 또는 } P_{i+1} = \sum_{j=i+2} P_{Lj} \quad (1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - QL_{i+1} \text{ 또는 } Q_{i+1} = \sum_{j=i+2} Q_{Lj}$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i)$$

식(1)은 전력조류가 선로손실을 무시한다면 부하조류의 합으로 표현된다는 것을 의미한다.

부하조류는 각 부하의 설비용량을 기준으로 비례배분으로 할당할 수 있으며 관련식은 다음과 같다.

$$P_{Li} = \sqrt{3} V_i I_i \cos \theta_i, \quad Q_{Li} = \sqrt{3} V_i I_i \sin \theta_i, \quad V_i \geq V_0 \quad (2)$$

$$I_i = I_F \times \frac{L_{di}}{L_{sum}}, \quad L_{sum} = \sum_{i=1}^N L_{di}, \quad L_{sum} = \sum_{i=1}^N L_{di}$$

P_{Li}, Q_{Li} : 모선 i의 하유효전력 [kW]과 부하무효전력 [Kvar], I_i :

모선 i 의 추정전류[A], I_f : 피더의 공급전류[A], L_{sum} : 피더가 담당하는 모선의 설비부하총계[kVA], L_{i1} : 모선 i 의 설비부하 총계[kVA], N : 해당피더에서 공급하는 모선의 총개수, V_i : 모선 i 의 전압[kV], V_0 : 변전소 인출전압[kV], $\cos\theta_i$: 모선 i 의 부하역률

식(2)에서 모선전압은 변전소 인출전압과 같고 부하의 역률은 알고있다고 가정하며 식(2)의 부하전력을 식(1)의 조류계산식에 대입함으로써 각 모선의 전력, 전압을 추정하게 된다.

모선전력 계산방안

식(1)로부터 n 개의 모선으로 구성된 계통에서 모든 모선전력을 구하기 위해서는 $n+(n-1)+(n-2)+\dots+2+1=n(n+1)/2$ 만큼의 계통을 추적하므로 많은 시간이 소요되지만 트리구조를 이용하면 간단하게 모선전력을 계산할 수 있다.

임의의 모선의 트리형태는 다음과 같다.

$tree(Left, Root, Right)$

Left or Right : 모선 Root의 부하측 모선을 나타내는 부트리 모선의 트리형태 표현으로부터 모선전력은 다음과 같이 쉽게 계산될 수 있다.

$$P_{Root} = P_{LRoot} + P_{Left} + P_{Right} \quad (3)$$

P_{Root} : Root의 전력, P_{LRoot} : Root의 부하전력

P_{Left} : Left의 전력, P_{Right} : Right의 전력

식(3)은 뿌리로 표현되는 모선의 전력은 모선의 부하전력과 좌·우측 부트리의 전력합으로 계산된다는 것을 나타낸다.

좌·우측 부트리의 전력은 이미 계산이 되어 있으면 그대로 사용할 수 있으며 계산이 되어있지 않을 경우에는 좌·우측 부트리가 트리구조이므로 식(3)의 모선전력 계산식을 다시 호출하여 부트리의 전력을 계산한다. 따라서 트리구조를 이용하여 모든 모선전력을 계산하는 경우 피더로부터 출발하여 발달모선까지 계통을 추적한 후 후향대입을 하면 모든 모선전력이 계산되므로 단지 2회의 계통추적만이 행해진다.

모선전력 계산방안을 그림 6에 표시하였다.

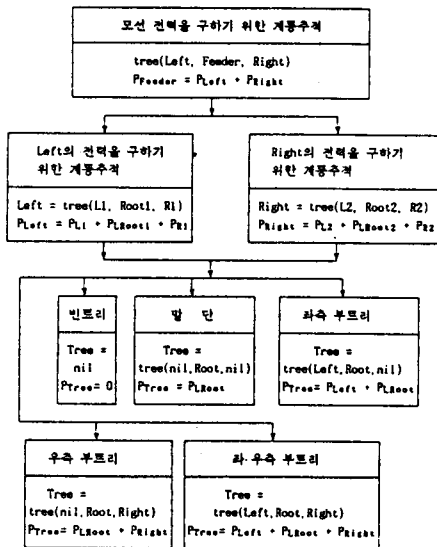


그림 6. 모선전력 계산방안의 구성도

모선전압 계산방안

뿌리로 표현되는 모선전압을 알고있을때 뿌리의 좌·우측부트리인 부하측 모선전압은 뿌리와 좌·우측부트리로 표현되는 선로임피던스를 이용하여 추정되며 전압계산방안은 다음과 같다.

$tree(Left, Bus, Right)$

Left or Right = $tree(L, L_{bus}, R)$

선로정보 ([Bus, L_bus], r, x, d)

모선정보 (Bus, P1, Q1, V1), 모선정보 (L_bus, P2, Q2, V2)

부하측 모선의 전압 $V2^2 = V1^2 - 2(r \cdot d \cdot P2 + x \cdot d \cdot Q2)$

위의 전압계산 방안을 이용하여 변전소 인출점으로부터 깊이 우선 탐색으로 계통을 추적하면서 전압을 파악할 수 있으며 모선전압 계산방안을 그림 7에 표시하였다.

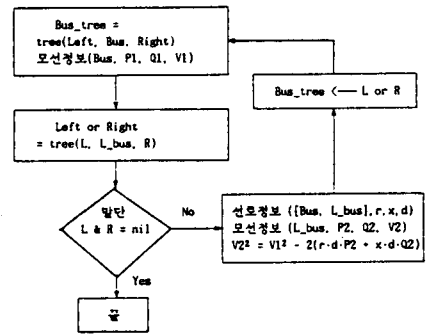


그림 7. 모선전압 계산방안의 구성도

피더손실 계산방안

임의의 피더에 대한 손실은 피더에서 공급하는 전 구간선로의 전력손실을 누계하여 정하며 그 식은 다음과 같다.

$$L_{feed} = \sum_{i=1}^N L_i \quad (4)$$

$$L_i = r_i d_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2$$

L_{feed} : 피더에서 공급하는 구간선로 손실누계[kW], L_i : 구간선로의 손실[kW], N : 해당피더에서 공급하는 구간선로수, r_i : 장주별 선로저항[Ω/km], d_i : 구간선로의 공장[km], P_i : 모선 i 의 유효전력[kW], Q_i : 모선 i 의 무효전력 [kVar], V_i : 모선 i 의 전압[kV]

식(4)로 표현되는 피더손실은 피더의 트리구조로부터 간단하게 계산될 수 있으며 손실 계산방안은 다음과 같다.

$tree(Left, Feeder, Right)$

Left or Right = $tree(L, R_{root}, R)$

$$Loss_{Feeder} = Loss_{Left} + Loss_{Right} \quad (5)$$

$Loss_{Left}$ or $Loss_{Right} = r \cdot d \cdot (P^2 + Q^2) / V^2 + Loss_L + Loss_R$

선로정보 ([Feeder, Root], r, d), 모선정보 (Root, P, Q, V)
피더손실은 피더와 좌·우측부트리의 뿌리로 나타내어지는 구간선로 손실을 구하고 좌·우측부트리에서 발생하는 손실을 계산하여 합하면 된다. 좌·우측부트리의 손실계산시에는 부트리가 트리형태로 표현되므로 모든 구간선로 손실이 계산될 때까지 계속해서 식(5)의 손실계산 방안을 호출함으로써 구해진다. 피더손실계산 방안을 그림 8에 표시하였다.

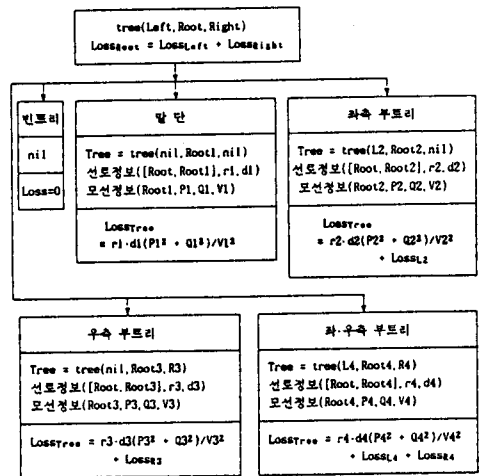


그림 8. 피더손실 계산방안의 구성도

조류계산 수행후에는 피더별로 최대전압강하를 계산하여 계통운용시에 이용한다. 최대전압강하는 말단에서 발생하므로 피더부터 말단까지 전계통을 추적하여야 하며 피더전류 변경시에는 조류계산을 다시 수행하여 최대전압강하를 계산하므로 많은 시간이 소요된다. 그러나 부하설비, 선종, 공장이 변하지 않거나 계통구성이 바뀌지 않는다면 피더전류가 변하여 계통조류가

변경된다 하더라도 최대 전압강하 발생지점은 바뀌지 않는다. 따라서 최대전압강하 발생지점을 파악한 후에 피더부터 최대전압강하 발생지점까지 경로를 추적하여 저장시킴으로서 피더전류의 변경시에도 다시 계통을 추적할 필요없이 저장된 경로를 따라 전압강하를 계산하여 계통추적 시간을 감소시킬 수 있다.

4. 사례연구

트리구조의 데이터베이스를 추적하여 계통을 해석함으로써 데이터 탐색효율이 향상되고 신속한 조류계산이 가능하다는 것을 입증하기 위하여 5개변전소의 18개피더로 구성된 그림9의 모델계통에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며 부하절체를 위한 전문가시스템[5]의 수행시간과 비교하여 표 1에 수록하였다.

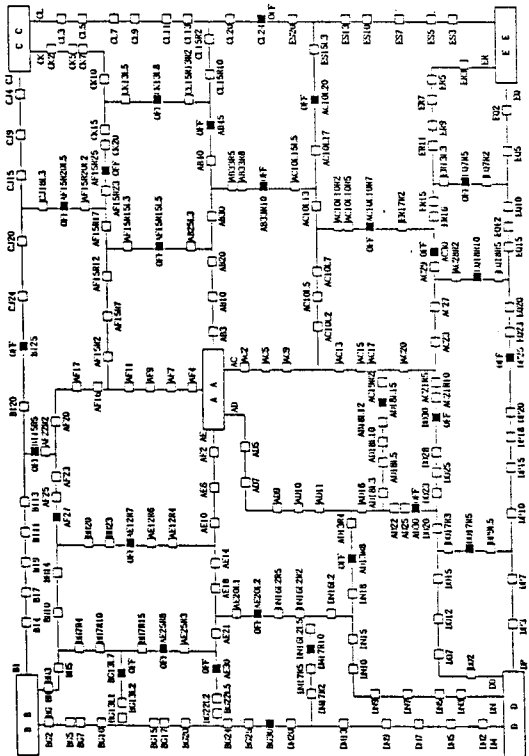


그림 9. 모델계통도

부하절체 전문가시스템은 데이터베이스가 구간선로와 개폐기의 데이터로 구성되어 있으며 구간선로의 사황을 판정하면서 조류방향과 공급피더를 파악하여 계통추적이나 조류계산시에 이용한다. 그러나 계통추적시마다 구간선로 또는 개폐기의 정보를 발견할 때까지 데이터베이스를 탐색하여야 하므로 표 1에 나타나있는 바와 같이 선로전류나 개폐기전압 계산시에 많은 시간이 소요된다. 한편 본 논문의 계통해석방안은 트리구조의 데이터베이스 구성시에 약간의 시간이 소요되며 일단 구성이 종료되면 모선전력이나 전압계산은 신속하게 수행된다. 모선전력과 모선전압 계산시의 시간차이는 모선전압 계산시에는 선로 임피던스를 파악하기위해 선로데이터를 탐색하기 때문이다.

피더손실 계산시에는 부하절체를 위한 전문가시스템의 수행속도가 빠른 것을 알 수 있는데 그 이유는 구간선로내에 공급 피더 정보가 포함되어있어 해당피더에 속한 모든 구간선로의 파악이 1회의 데이터베이스 추적만으로 가능하기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 계통구성 데이터베이스를 트리로 구성하고 트리탐색법을 이용하여 계통을 해석하는 방안을 제시하였다. 계통구성 데이터베이스를 2진트리를 이용하여 트리형태로 구성함으로써 데이터의 탐색효율이 향상되고 계통추적이 쉽게 수행되었다. 또한 개폐기 조작후에 변경되는 트리에 대해서는 모든

표 1 수행속도 비교표

부하절체를 위한 전문가시스템	트리탐색법을 이용한 계통해석
선로사할 데이터 데이터베이스구성	14 [sec] 트리구조의 데이터베이스 구성 15 [sec]
선로전류 계산	103 [sec] 모선전력 계산 3 [sec]
개폐기전압 계산	61 [sec] 모선전압 계산 6 [sec]
피더손실 계산	3 [sec] 피더손실 계산 7 [sec]

계통을 추적하지 않고 조류방향이 바뀌는 경로만 탐색하여 계통변경시에 신속하게 적응하였으며 트리구조의 데이터베이스를 탐색하는 트리탐색법을 이용하여 신속하게 조류계산을 수행하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 트리탐색법을 이용하여 계통을 해석하는 방안을 배전계통 운용에 적용할 경우 효율적인 계통운동이 기대된다.

6. 참고문헌

- [1] K. Kamei, Y. Nakamura, S. Abe, S. Takeda, J. Tsukamoto, T. Kaga, "Highly Interactive Operator Workstation for Distribution Automation System Using Spatial Data Management", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.1 pp. 180-186, February 1992.
- [2] T. Taylor, D. Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No.1, pp. 239-246, Jan. 1990.
- [3] A.L. Morelato, A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241, October 1989.
- [4] M.E. Baran, F.F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [5] 문영현, 최병윤, 김세호, "배전계통에서의 최적 부하절체를 위한 전문가 시스템", 대한 전기학회, 제 39권, 제9호, pp. 903-911, 1990. 9.