배전계통의 최적 회로재구성을 위한 전문가 시스템

°윤용한*, 김재철*, 장정태**
*숭실대학교, **한전 기술연구원

An Expert System for Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems

Yong-Han Yoon*, Jae-Chul Kim*, Jeong-Tae Jang**
*Soongsil University, ** KEPCO Research Center

ABSTRACT - This paper is described an expert system which performs the network reconfiguration in order to operate distribution systems optimally using heuristic rules. The proposed network reconfiguration is able to not only eliminate abnormal states such as overload of transformers/lines and low voltage violation, but also achieve minimum power loss and optimum load balancing under normal states.

In order to apply the network reconfiguration efficiently, an expert system is adopted a best-first tree searching strategy on the basis of heuristics, and is implemented in AI language Turbo PROLOG. Several examples are used to illustrate concepts described above.

1. 서 론

최근 경제의 고도성장으로 전력의 수요는 급증하는 추세이고, 사회문명의 발전에 따라 전력공급의 신뢰성도 한단계 높아지고 있다. 특히 전력계통의 말단에 위치한 배전계통에서는 양질의 전력 즉, 고 신뢰성의 전력을 공급하기 위하여 배전자동화와 같은 전력설비의 현대화뿐 만 아니라 운용면에서도 계통의 합리적인 운전이 필요하게 되었다.

배전자동화가 이루어진 배전계통은 다수의 변전소 주변압기로부터 인출된 간선(Feeder)들이 상시개로 연계개폐기(Normally Open Tie Switch)를 통하여 상호 연결된 구조를 형성하고, 간선들의 선로에는 구분개폐기(Sectionalizing Switch)가 설치되어 있다. 여기서, 연계개폐기 및 구분개폐기는 중앙제어소(Distribution Control Center)의 명령신호에 따라 원격 개폐동작을 하는 기기이며, 계통의 고장발생시 과전류를 검출할 수 있는 계기가 부착되어 있다.[1][2][3][4]

일반적으로 이들 개폐기의 개폐조작은 계통의 사고나 정전 작업시에 정전구역을 최소화하기 위하여 건전구간을 주위의 타 간선으로 부하절체하는 방편으로 사용되고, 정상상태시에는 계통의 부하상태를 감시하여 계통의 부하를 균등하게 배분하는, 즉 운전손실을 최소화하는 계통으로의 신속한 변경을 위하여 조작된다. 그러나 계통 운용자가 이러한 문제를 처리하기에는 배전계통 자체가 매우 복잡하고 주위여건이 다양하며, 변압기 및 선로의 용량, 전압강하등을 포함한 여러가지 제약조건이 수반되어 상당한 시간이 필요하고, 기존의 수치해석적인 방법으로 처리하기에는 부적합한 논리적 해석이 요구된다. 따라서 경제적이며 고 신뢰성의 전력공급을 위하여 전문가 시스템을 도입함으로써 계통 운용자의 상황판단 및 의사결정 능력을 보조하여 배전계통의 최적운용을 이룩하며, 계통 운용 초보자가 계통을 운용하더라도 오류를 막을 수 있다.[3][4][5]

지금까지 연구되어 온 정상상태시의 부하절체에 관한 연구로는 1975년 A. Merlyn[6]등이 배전계통의 개폐기를 모두 투입시킨 상태의 망(Mesh)배전계통에서 개폐기의 조작으로 Loop를 제거함으로써 감소되는 선로손실에 관한 연구를 시점으로 하여, 1987년 S.Civanlar[1]등이 계통 재구성을 이용한 선로의 전력손실 감소에 관한 연구를 하였으며, 여기서 Civanlar 등은 손실감소분을 보다 용이하게 구하기 위하여 새로운 계산식을 제안하였다. 그리고 최근에는 Taylor[5]등이 효율적인 부하절체 방안의 탐색을 위해 경험적인 지식을 이용해서 계통을 재구성하는 최적우선 탐색기법을 제안하였다. 또한 국내에서는 1991년 고윤석[8]등이 부하평형에 기초를 둔 경험적인 선로재구성 알고리즘을 제시하였고, 조시형 [9]등은 경험적인 규칙을 이용하여 손실감소를 목적으로 한 선로재구성 탐색전략을 제안하였다. 최근 정상상태시 적용하는 회로재구성의 일반적인 기법은 손실감소와 부하평형을 위한 계통으로의 변경을 위하여 경험적인 규칙에 근거한 최적탐색 알고리즘의 개발에 촛점을 두고 진행되고 있다.

본 논문에서는 배전계통의 운용시에 계통사고로 발전될 수 있는 이상상태(Abnormal state)를 파악하여 이상상태를 해소할 뿐만 아니라, 이상상태가 파악되지 않는 상태에서도 부하평형 및 손실감소를 위하여 최적 부하절체 방안을 제시하는 회로재구성 전문가 시스템을 제안하였다.

여기서의 회로재구성 기법은 계통의 각종 상태를 파악하여 이상상태 및 정상상태의 어떠한 상황에서도 최적적인 부하절체방안을 제시함으로써 계통의 고 신뢰도 운전과 최소운전손실의 계통으로 운용하기 위한 기법이다.

또한, 계통의 부하절체 방안을 탐색하는 횟수를 줄이기 위하여 경험적인 규칙에 근거한 개선된 최적우선트리(Best-First Tree : BFT) 탐색기법을 제시하였다.

2. 회로재구성 기법

배전계통은 전력계통의 말단에 위치하여 직접 수용가와 연결되어 있어 수시로 계통의 확장 및 축소가 이루어지며, 구분개폐기와 연계개폐기의 조작으로 빈번한 부하변화에 대응하게 된다. 그러나 개폐기의 조작으로 계통 운용자가 최적운용의 계통으로 재구성하기에는 계통 특성상 매우 복잡하며, 다음과 같은 제약조건을 고려해야 한다.[2][3]

① 규정전압유지 (전압강하 10%이내)
② 변압기 및 선로의 용량 초과운전 금지
③ 각 선로는 한 전원에서 공급(Loop운전금지, 수지상 구조 유지)

이러한 회로재구성 기법은 변압기 및 선로의 과부하, 선로의 저전압과 같은 이상상태를 해소할 수 있을 뿐만 아니라, 정상상태시에도 손실감소 및 부하평형을 이루는 계통으로 재구성할 수 있다. 그러나, 이를위해 수치 해석적인 방법으로 처리하기에는 부적합한 논리적 해석이 요구되며, 많은 시간이 요구된다. 따라서, 경험적인 규칙에 근거한 최적우선트리 탐색기법으로 계통의 재구성 방안을 찾는 탐색경로를 줄여서 탐색횟수를 감소시키는 전문가 시스템이 요구된다.

최적우선트리 탐색기법은 배전계통의 복잡성을 고려해 볼때 다른 방법의 적용보다 비교적 빨리 재구성 방안을 찾는 잇점이 있으나, 항상 최적방안을 보장하지는 않는다. 그러나 적어도 근사적인 방안은 제시한다.[5][7][8]

다음은 배전계통의 이상상태와 정상상태시의 계통을 재구성하는 규칙베이스이다.[5][6]

2.1 이상상태시 회로재구성 기법에 관한 규칙

최적적인 배전계통의 운용을 위하여 계통의 사고로 발전할 수 있는 이상상태시에는 다음과 같은 규칙의 적용으로 이상상태를 해소한다. 참고적으로 계통의 이상상태는 변압기 및 선로의 과부하 상태, 선로의 저전압 상태로 규정한다.

규칙 1> 과부하 정도가 가장 심한 변압기로 부터 시작한다.

규칙 2> 연계개폐기로 과부하 변압기와 연결된 과부하 상태가 아닌 후보 1단계 변압기들을 탐색한다.

규칙 3> 부하절체시 선로용량을 초과하는 후보 연계개폐기는 제외한다. 여기서는 간단한 대수적 비교를 수행한다.(연계개폐기용량 > 부하절체량 ≥ 과부하량)

규칙 4> 과부하 상태의 변압기와 후보 1단계 변압기들 사이의 부하절체 후의 나타나는 상태에 따라 다음과 같이 분류한다.

상태 1: 과부하를 해소하고, 후보 1단계 변압기에 과부하를 일으키지 않는다.

상태 2: 과부하를 해소하지 못하고, 후보 1단계 변압기에 과부하를 일으키지 않는다.

상태 3: 과부하를 해소하고, 후보 1단계 변압기에 과부하를 일으킨다.

상태 4: 과부하를 해소하지 못하고, 후보 1단계 변압기에 과부하를 일으킨다.

여기서 상태 1은 변압기의 과부하를 가장 적절하게 해소하는 대안이며, 상태 4는 필요없는 선택이다. 상태 2와 상태 3은 새로운 탐색구조를 발생시켜 규칙 1 부터 다시 실행하지만 차이점은 상태 2는 선택할 수 있는 대안이고, 상태 3은 선택할 수 있는 대안이 없을때 선택한다는 점이다. 만약 선택할 수 있는 대안이 다수 존재하면 최적방안의 기준에 따라 한가지 대안을 선택한다.

이와같은 과정으로 변압기의 과부하를 해소하고, 같은 과정을 선로의 이상상태시에도 유사하게 되풀이하여 적용할 수 있다. 선로의 이상상태 해소시 변압기의 과부하 해소와 다른 한가지 차이점은 선로에 관한 문제는 회로의 구성상태가 자주 변하기 때문에 위와 같은 과정 중간에서 선로의 전압, 전류의 변화를 파악하기 위해서 전력조류 계산을 실행해야 한다.

2.2 정상상태시 회로재구성 기법에 관한 규칙

이상상태가 아닌 배전계통의 정상상태시에는 계통의 최적운용을 위하여 개폐기의 조작으로 손실감소 및 부하를 균등하게 배분하는 계통으로의 재구성을 할 수 있다.

하지만 이를 위하여 계통 전체의 전력조류 계산을 한다는 것은 정확한 재구성 방안은 제시할 수 있겠지만 상당한 시간이 요구된다. 그러나 1989년 Baran등이 제시했던 Backward & Fordward Update of DistFlow(BFUD)기법은 완전한 전력조류 계산식에 비해서는 다소 근사적이지만 계통전체에 대한 전력조류를 계산하지 않고 지역적인 데이타를 가지고 조류 계산을 수행하여 손실감소분을 계산하기 때문에 계산 시간적인 면에서 많은 잇점을 지니고 있다.[2][9]

본 논문에서는 계통의 경험적인 지식과 Backward & Forward Update of DistFlow(BFUD, 이하 BFUD로 표기함)기법으로 정상상태시의 최적구성 방안을 제시하는 규칙을 다음과 같이 제안한다.

규칙 1> 배전계통의 연계개폐기를 확인한다.

규칙 2> 연계개폐기로 연결되어 있는 양 부하의 전압강하를 파악한다 - 내림차순 정렬

규칙 3> 전압강하가 큰 연계개폐기를 투입하고 전압강하가 낮은쪽에서 높은쪽으로 구분개폐기를 개방하면서 손실감소분을 BFUD기법으로 계산한다.

규칙 4> 계산된 손실감소분이 양수(손실감소)인지, 음수(손실증가)인지 파악하여 음수인 경우 투입된 연계개폐기는 개방하고 다음 연계개폐기를 투입하기 위하여 규칙 3부터 다시 실행한다.

규칙 5> 손실감소분이 양수(손실감소)인 경우 투입된 선로가 과부하 상태인지 파악하여 과부하인 경우 투입된 선로는 개방하고 다음 연계개폐기를 투입하기 위하여 규칙 3부터 다시 실행한다. 그리고 과부하가 아닌 경우에는 그 방안을 채택한다. 일반적으로 정상상태시의 배전계통에서는 전압강하가 큰 양부하 사이의 연계개폐기를 투입하고 전압강하가 높은쪽에서 개폐기를 개방하면, 부하가 균등하게 배분되면서 손실도 감소한다.

BFUD기법으로 손실감소분에 대한 계산은 전체적인 계통을 고려하면서 손실감소분을 계산하지 않고, 필요한 지역의 유효전력, 무효전력, 전압의 크기로 계산하기 때문에 다소 오차를 포함하고 있으나 계산 속도 면에서 아주 우수한 특징을 가지고 있다. 또한 BFUD기법의 오차는 초기 데이타의 정확성에 관계하고 있으나, 본 논문에서는 배전자동화로 정확한 Data를 취득하고 있는 것으로 가정하고 있기 때문에 큰 오차는 발생하지 않는다.

3. 최적우선트리(BFT) 탐색 기법을 구성하는 경험적 규칙

대규모 배전계통의 최적 회로재구성 방안을 탐색하는 기법에 있어서 가능한 모든 것을 탐색하는 기법보다는 경험적 규칙에 근거한 최적우선트리 탐색기법의 활용은 매우 효율적이다. 이 기법은 계통의 재구성방안 탐색시 경험적 규칙을 적용함으로써 탐색 경로를 줄여 탐색 횟수를 감소시킬 수 있다.[5][7]

최적우선트리 탐색기법에 적용된 경험적 규칙은 다음과 같다.

<경험적 규칙 1>

전압강하가 낮은측에서 높은측으로 부하를 절체한다.

<경험적 규칙 2>

다른 변압기와 비교하여 상대적으로 경부하인 변압기로 부하를 절체한다.

<경험적 규칙 3>

최근에 이상 또는 사고가 발생했던 변압기/선로로의 부하절체는 피한다.

<경험적 규칙 4>

변압기의 용량이 큰 것은 그렇지 않은 것보다 상대적으로 많은 부하를 책임진다.

<경험적 규칙 5>

조건위반이 심한 경우, 후보 1단계 변압기가 2이상이 있으면, 그 중 여유용량이 많은 후보 2단계 변압기를 갖는 후보 1단계 변압기를 선택한다. 즉, 후보 1단계 변압기에서 과부하된 양을 모두 책임지지 못한다면 일부를 후보 2단계 변압기로 이양한다.

<경험적 규칙 6>

최적 회로재구성 방안의 탐색시 이들 재구성 방으로 계통에 문제를 일으킬 방안은 제외시킨다.

<경험적 규칙 7>

실부하가 계획부하보다 작은 변압기로 부하절체를 시도한다. 즉, 변압기 용량에 비례하여 변압기에 부하를 배분한다.

실부하 i : 변압기 i의 부하

$$\text{계획부하 } i : \frac{\text{변압기 } i\text{의 용량}}{\text{모든 변압기의 용량}} \times \text{총 계통부하}$$

<경험적 규칙 8>

다수의 회로재구성 방안의 존재시 계통 부하평형 계수(LBs)가 가장 작은 것을 선택한다.

$$\text{변압기 } i\text{의 부하평형 계수}(LBi) = \text{계획부하 } i - \text{실부하 } i$$

$$\text{계통 부하평형 계수}(LBs) = |LB_1| + |LB_2| + \cdots + |LB_n|$$

$1, \cdots, n$: 계통의 주 변압기 수

<경험적 규칙 9>

조건위반의 해소시 변압기를 먼저 해소한 후 선로를 해소하며, 선로에서는 전원측에 가까운 선로부터 해소한다.

<경험적 규칙 10>

개폐기의 개폐조작 횟수는 가능한 줄인다.

<경험적 규칙 11>

조건위반이 장시간인 것과 단시간인 것을 구별하여 장시간인 것만을 고려한다.

<경험적 규칙 12>

부하절체로 인한 개폐기의 조작시 변압기의 병렬운전을 만족하면 건전구간의 일시적인 정전을 방지하기 위하여 개폐기를 개방전에 투입하는 방식으로 조작한다.

4. 전문가 시스템의 구성

본 논문에서 제안한 배전계통의 최적 회로재구성을 위한 전문가 시스템의 전체적인 구성은 그림 1과 같다.

본 본문에서 제안한 전문가 시스템은 지식베이스, 추론기관 그리고 인간-기계 접속부로 구성되어 있다. 그밖에 필요시 수치해석적인 문제를 처리하기 위하여 전력조류 계산 및 Backward & Forward Update of DistFlow의 손실감소분 계산을 수행하는 팩키지 프로그램과 연결되어 있다.

지식베이스는 규칙베이스와 동적 데이타베이스로 구성되어 있으며, 문제 해결에 필요한 규칙베이스는 계통의 상태파악과 이상상태및 정상상태시에 적용하는 IF-THEN 형식의 규칙들로 형성되어 있고, 동적 데이타 베이스는 계통의 데이타 및 팩키지 프로그램과 상호 연결 될 수 있는 형식의 데이타들로 구성되어 있다. 또한 추론기관은 지식베이스의 지식들을 효율적으로 사용하여 배전계통의 최적 재구성 방안을 제시 하도록 순차적인 형식으로 구성되어 있으며, 인간-기계 접속부는 계통운용자의 편리를 도모하고 계통운용의 초보자가 사용하더라도 손쉽게 사용할 수 있도록 Menu-Driven 형식으로 구성하였으며, 또한 계통의 구성상태를 모니터상에 나타내도록 Graphic 처리하였다.

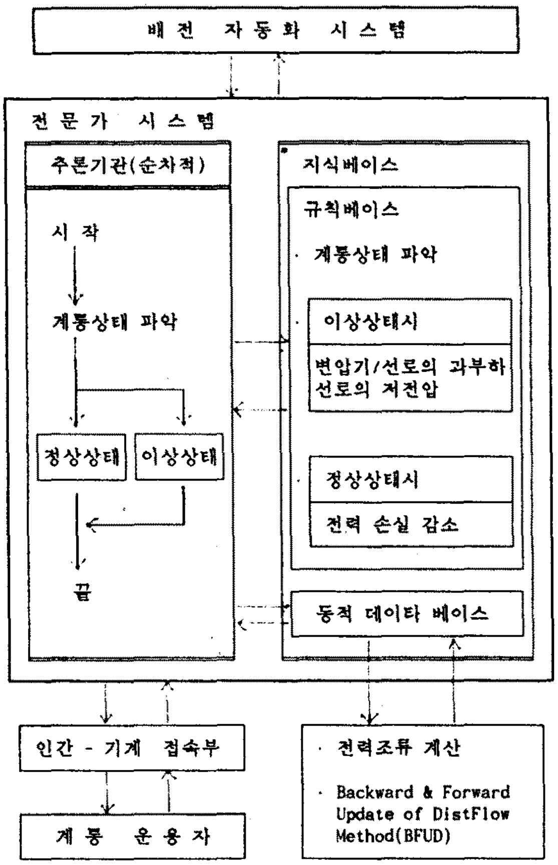

그림 1. 최적 회로재구성을 위한 전문가 시스템의 구성도

본 논문에서 제안한 전문가 시스템은 논리적인 문제를 수행하기에 편리하고, P.C.상에서 수행할 수 있는 Turbo PROLOG로 개발하였으며, 인간-기계 접속부는 Turbo PROLOG에서 제공하는 "BGi Graphics package" 와 "Toolbox"를 이용하였다. 그리고 전력조류 계산과 Backward & Forward Update of DistFlow 프로그램을 팩키지화 하였으며, Turbo PROLOG의 "system" 명령으로 상호 연결되도록 데이타의 입·출력 형식을 일치화 하였다.

5. 사례연구 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 전문가 시스템의 성능을 입증하기 위하여 주 변압기가 3대로 구성된 배전계통을 기초로 그림 2와 같은 모델계통을 구성하였다. 모델계통의 구성시 각 사례연구의 적용을 위해 계통의 데이타를 변화시켜 계통의 이상상태를 유발하였다.

그리고 본 논문의 전문가 시스템 및 전력조류 계산 그리고 Backward & Forward Update of DistFlow 프로그램은 32-Bit IBM-PC상에서 수행하였다.

5.1 모델계통의 개요

① 변압기의 전압 : 154/23 [kV]

② 변압기의 용량 : 변압기 1 - 60/80 [MVA]
변압기 2 - 60/80 [MVA]
변압기 3 - 45/60 [MVA]

③ 선종 : ACSR 160 [mm^2]

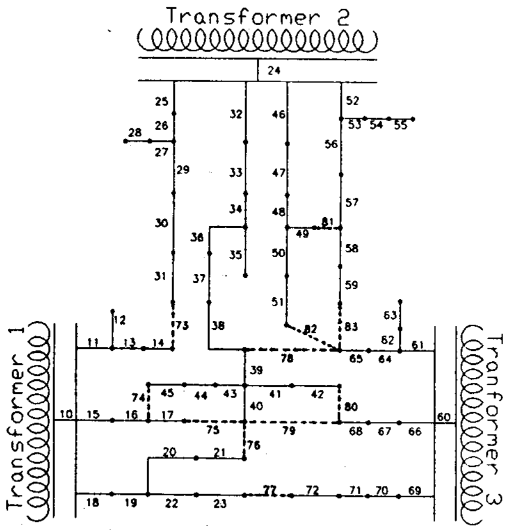

그림 2. 모델 계통도

5.2 사례연구

① 이상상태 1 : 변압기 2의 과부하
해소방안 : (73투입 - 31개방)
② 이상상태 2 : 선로 45의 저전압
해소방안 : (74투입 - 43개방)
③ 정상상태 : 최적구성방안 : (76투입 - 40개방)

5.3 결과분석

본 전문가 시스템의 사례연구 적용시 비교적 만족 할 만한 결과를 얻었다. 변압기 2의 과부하와 선로 45의 저전압과 같은 이상상태시 각각의 재구성 방안들은 정확한 전력조류계산으로 계산하였을 때와 같이 계통 부하평형 계수 및 계통의 전력손실 또한 감소하고 결과도 상호 일치함으로 정확하게 최적구성방안을 제시함을 알수있다. 또한 정상상태시에도 비교적 전력손실이 많은 감소하는 방안을 제시하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 배전 자동화가 이루어진 계통의 최적 회로재구성을 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 본 전문가 시스템은 배전계통의 주변압기, 선로 그리고 부하등의 각종 상태를 파악하여 변압기 및 선로의 과부하, 선로의 저전압등과 같은 계통의 이상상태를 경험적인 규칙에 근거한 최적우선트리 탐색기법으로 해소하는 재구성 방안을 제시하였다. 또한, 이상상태가 발견되지 않은 정상상태시에도 경험적인 규칙과 간단한 계산으로 손실감소 및 부하평형을 이루는 최적 계통으로 재구성하는 방안을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 회로 재구성기법은 이상상태시에는 계통 부하평형 계수를, 정상상태시에는 손실감소분을 최적기준으로 삼아 이상상태 또는 정상상태의 어떠한 상황에서도 항상 최적 회로재구성 방안을 제안한다. 그러나 경험적인 규칙의 사용으로 항상 최적 방안을 제시하지는 않지만 적어도 최적 방안에 가까운 근사적인 회로재구성 방안은 제시한다.

개발된 전문가 시스템의 효율성을 입증하기 위하여 이상상태 및 정상상태의 3가지 사례를 가지고 컴퓨터 시뮬레이션을 하였으며, 그 결과 만족 할 만한 결과를 얻었다. 따라서 본 전문가 시스템의 적절한 활용은 중앙제어소의 운용자에게 계통운용에 있어서 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대되며, 배전계통의 신뢰도는 크게 증진될 것으로 판단된다.

7. 참고 문헌

[1] S.Civanlar, J.J.Grainger, H.Yin, S.S.H.Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, No.3, July 1988, pp.1217-1223.

[2] Mesut E.Baran, Felix F.Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No. 2, April 1989, pp.1401-1407.

[3] 문영현, 최병윤, 김세호, "배전계통에서의 최적 부하절체를 위한 전문가 시스템", Trans. KIEE, Vol.39, No.9, Sep. 1990, pp.903-911.

[4] Chen-Ching Liu, Seung Jae Lee, S.S.Venkata, "An expert system operational and for restoration and loss reduction of distribution systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.2, May 1988, pp.619-626.

[5] Tim Taylor, David Lubkeman, "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No.1, Jan. 1990, pp.239-246.

[6] A.Merlyn, H.Back, "Search for a minimal loss operating spanning tree configuration in urban power distribution systems", Proc. of 5th Power Systems, Comp. Con., Cambridge, U.K., Sep., 1-5, 1975.

[7] 정경희, 김호용, 고윤석, "경험적 탐색기법에 근거한 배전계통의 선로 재구성 알고리즘", '91 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.350-353.

[8] 조시형, 최병윤, 우광방, "경험적 규칙을 이용한 배전계통의 재구성 기법", '91 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.363-365.

[9] 금병선, "배전계통의 손실감소와 부하평형을 고려한 선로 재구성에 관한 연구", 숭실대학교 대학원 석사학위 논문, 1991.8.