

경험적 규칙을 이용한 배전계통의 재구성기법

조 시형[○] 최 병윤
한전 기술연구원 배전연구실

우 광방
연세대 공대 전기공학과

Distribution Feeder Reconfiguration Using Heuristic Rules

Si-Hyung Cho[○] Byoung-youn Choi
KEPCO Research Center

Kwang-Bang Woo
Yonsei Uni. Dep. of Electrical Engineering

ABSTRACT

This paper presents a method for feeder reconfiguration in order to operate distribution systems efficiently using heuristic rules. The reconfiguration method presented here not only eliminates various abnormal states but also achieves minimum power loss and optimum load balance of the distribution feeders under normal operating condition transferring loads from one feeder to another applying the experiences of the experts.

To implement the method effectively, a best-first tree searching strategy based on heuristics is used to evaluate the various load transfer alternatives. The development of a rule-based system aimed at the reduction of the search space is presented as a means of implementing the best-first searching strategy. The results of the computer simulation of the above procedure are as follows:

- 1) achieving minimum power loss of the distribution feeder adopting the optimum load transfer alternative.
- 2) Enhancing system reliability and achieving load balance through rational allocation of the feeder loads.

1. 서론

배전계통은 배전용 변전소에 설치되어 있는 주 변압기에서 공급되며, 관련 보호장치로는 변전소의 보호계전기, 선로의 Recloser, Sectionalizer, Fuse 등이 있다. 배전계통 간선은 지리적으로 부하 중심부를 따라 구성되고 부하 전환 및 사고시 정전구간을 축소시키기 위해서 인접한 타 배전계통과 구분 개폐기로 연결되며(Tie), 자체의 선로도 연결되어 있다(Loop). 이들 개폐기의 개/폐 조작은 필요에 따라 수시로 이루어지며, 조작원칙은 운영자의 오랜 경험과 직관에 의존하게 된다. 따라서 부정적이고 부정전 전력공급을 위한 배전계통의 최적운영을 위해서는 축적된 오랜 경험을 바탕으로 하는 전문가 시스템이 필요하며, 이는 인간의 상황판단, 결정 능력을 보조하여 운영자의 인간적인 오류를 최소화 시킬 수 있다.

최근 DAS 연구가 활발해짐에 따라 정상상태 시에 부하 정확유 통한 선로 재구성에 관련된 연구가 진행되었다. 처음 1980년 Castro 등이 탐색 알고리즘을 선로 부하를 비례 배분하고 과부하를 해소하기 위해서 부하전환에 적용하였고, 실배전계통 구성을 표로 나타내는 재구성 기법을 제시하였다.[1] 또한 1987년 Aoki 등이 개개의 다른 변전소를 연결하는 선로의 구분개폐기의 조작을 통해서 배전계통의 전력손실을 최소화시키는 다른 기법을 제시하였다. 이 문제는 불연속적인 최적화 문제로 분류될 수 있으나, 선택할 수 있는 구분 개폐기가 다수 있으므로 정상 개방인 개폐기의 위치를 동정하는 변수는 연속적인 것으로 근사화 된

다.[2] 1988년 Liu 등이 배전계통의 복구와 손실감소를 위한 전문가 시스템을 제시하였으며,[3] 최근에 수많은 연구가 손실 최소화를 위한 최선의 배전계통 구성을 위한 최적화 알고리즘의 개발에 초점을 두고 진행되었다. 1988년 이 승재 등이 최적화 기법을 이용한 수치상 배전계통의 최소손실 구성을 위한 두 알고리즘을 제시하였고[4], Baran 등이 개폐기 조작을 통한 분기교환 방식에 기초를 둔 손실경감과 부하 균형을 위한 재구성 기법을 제시하였다.[5] 또한 Civanlar 등이 한 선로에서 다른 선로로 집단 부하를 이양한 후에 파생되는 부하 변화를 추정하는 공식울 제시하였으며,[6] 1990년 Taylor 등이 효율적인 부하이양 방법의 탐색을 위해 경험적인 방법을 이용해서 전력손실 감소와 주 변압기 과부하 제거, 선로 이상상태를 제거하는 경험적 탐색 전략을 제시하였다.[7]

본 연구에서는 정상운전 조건 하에서 전문가의 경험을 이용하여 개폐기 조작을 통한 부하전환으로 배전선로의 각종 이상상태를 제거하고, 최소손실의 재구성 기법을 사용한 배전계통의 최적운영을 위한 전문가 시스템을 제안하고자한다. 여기서 재구성 기법은 배전계통의 주변압기, 선로, 부하 등의 각종상태를파악하여 각변전소와 선로 사이에 가능한 부하전환을 통해서 주변압기와 선로의 부하 균형을 피하고 그 시스템의 최소 손실운전 조건을 확립하여 배전계통의 최적운영을 이룩하는 것이다. 가능한 부하전환 방안을 찾기 위해서, 배전선로에서 가능한 모든 구성을 탐색하여 평가하는 것은 그 경우의 수가 너무 많기 때문에 비 실용적이므로, 이를 줄이기 위한 경험적 탐색과정이 제시된다.

2. 배전계통의 재구성기법

배전계통은 특성상 부하 추중적으로 구성되어 수시로 확장 축소가 필요하다. 구분 개폐기로 연결된 Tie, Loop 지점을 통해서 개폐기 조작을 통한 부하전환이 빈번하여 계통상태의 변화가 심하므로 기존의 수치해석적 알고리즘으로 다루기에는 비효율적이다. 따라서 이러한 특성을 가진 배전계통의 최적운영을 위하여 일정한 시스템의 조건을 만족시키면서 전력손실을 최소화 시키고 수치상 구조의 시스템을 유지시키는 개폐기의 상태를 규정하는 재구성 기법에는 다음과 같은 장점이 있으며, 이의 흐름도는 그림 1.에 있다

2.1 재구성 기법의 장점

○ 선로 과열상태 제거

선로의 과열기준은 어떤선로나 선로 부분에서 중부하 기간에 초과할 수도 있다. 이런 상황에서 가장 확실한 해결책은 즉시 그 선로를 더 높은 선중으로 재가선하는 것이다. 그러나 설비 투자비를 줄일 수 있고, 신속하면서도 실용적인 해소책은 초과 부하를 과부하 선로에서 여유있는 다른 선로로 전환시켜 부하를 재분배하는 것이다.

○ 손실 최소화

선로과열 상태를 제거한 후에, 선로재구성 기법은 선로의 전력 손실을 더 낮추는데 이용될 수 있다. 이를 위해 결정트리 해석기법을 채택한다.

0 시스템의 신뢰도 향상

정전중의 정전시간과 정전 고객수는 시스템의 신뢰도 측면에서 가장 중요한 요소이다. 정전 전력량과 고객의 불만을 최소화 시키기 위해서, 개폐기의 개폐 상태를 재조정 해서 정전 부하를 건전한 타선으로 전환시킬 수 있다.

0 선로와 변전소의 부하균형

한 집단의 선로나 변전소의 전체 부하는 선종이나 주 변압기 등의 기준용량에 비례하여 재 배분될 수 있다. 이는 배전계통 운용의 신뢰성 증가, 주 변압기의 수명연장, 유지 보수비의 절감을 꾀할 수 있다.

2.2 재구성 기법의 구성 요소

0 선로계통도 : 변전소 위치, 선로 위치, 개폐기의 위치와 개폐 상태, 사형실(재어소)의 위치 등

0 선로 데이터 : 선로구간 임피던스, 선로 길이, 선종 등 현재의 시스템 구성 상태

0 기준조건 : 선로부하 허용용량, 주변압기 기준 용량, 전압강하 기준 등

0 선로의 부하 형식에 대응하는 KW/KVAR 비율

0 데이터 인식 시스템에서의 실시간 측정치 : P, Q, |V|, |I| 등

0 각각의 다른 형식의 일부하 곡선

2.3 재구성 기법의 목표

재구성 기법의 목표는 수지상 구조인 시스템 안에 루프를 만들지 않고 모든 선로 부하를 계속적으로 공급하면서, 전력 손실을 최소화 시키기 위해서 정상운영 시에 각 선로에 대한 최적의 공급 영역을 찾는 것이다. 이를 위한 시스템의 제한 조건은

0 전압강하는 10% 이내여야 한다.

0 선로 전류는 각 선종의 용량을 초과해선 안된다.

0 각 선로는 수지상 구조여야 한다. (Loop 운전 금지)

0 각 변전소 주변압기의 부하는 자기 기준용량 이하여야 한다.

0 각 선로는 '한전원 즉 한 변전소 주변압기에서 공급되어야 한다.'

3. 경험적 규칙

3.1 경험적 규칙의 적용단계

효율적인 배전계통의 운영을 위한 최적부하 절환방안을 규정하기 위한 경험적 규칙은 다음과 같이 적용한다. 여기서 1순위 변압기는 과부하 변압기에 직접 연계된 변압기를 말한다.

0 1단계 : 시스템의 과부하 정도가 제일 심한 변압기 부터 시작한다.

0 2단계 : 과부하 변압기와 1순위 변압기 사이의 모든 연계 개폐기를 식별한다.

0 3단계 : 연계 부분에서 선로 용량기준을 초과하는 후보 개폐기는 제거한다.

여기서 연계 개폐기가 있는 정상개방 구간의 허용용량과 절환될 말단구간의 부하 사이에 간단한 대수적 비교를 수행한다.

0 4단계 : 과부하 변압기와 1순위 변압기 사이에 부하절환 후의 상태에 따라 다음과 같이 분류된다.

- P1 : 과부하를 해소하고, 1순위 변압기에 과부하를 일으키지 않는다.
- P2 : 과부하를 해소못하고, 1순위 변압기에 과부하를 일으키지 않는다.
- P3 : 과부하를 해소하고, 1순위 변압기에 과부하를 일으킨다.
- P4 : 과부하를 해소못하고, 1순위 변압기에 과부하를 일으킨다.

여기서 P1은 과부하를 해소하기 위한 적절한 대안이고, P2는 1 - 4단계를 다시 반복하여 후보개폐기를 찾는 결정트리 해석기법을 만든다. P3는 다른 대안이 없을때 마지막으로 선택할 수 있는 대안이며, P4는 필요없는 선택이다. 또한 P1, P2에서 원하는 대안을 찾았으면 시스템의 구성을 갱신시켜서 변압기의 과부하를 제거한다.

이와 같은 과정을 되풀이하여 변압기의 과부하를 제거한 후에, 같은 과정을 배전선로에 대해서도 적용하여 선로의 이상상태를 제거한 후에 최소손실의 시스템을 찾는다.

3.2 경험적 규칙의 예시

- (규칙 1) 부하절환 : 다른 변압기에 비해서 상대적으로 경부하인 변압기로 부하를 옮긴다.
- (규칙 2) 과부하나 조건위반이 발생한 경력이 있는 변압기나 선로는 피한다.
- (규칙 3) 전압강하 고려 : 높은 전압강하 측에서 낮은 전압강하 측으로 부하를 옮긴다.
- (규칙 4) 조건위반이 심한 경우 : 1순위 변압기가 2 이상이면, 그 중 여유용량이 많은 2순위 변압기를 갖는 1순위 변압기를 선택한다.
- (규칙 5) 실부하가 비례부하 보다 작은 변압기로 부하를 옮긴다. 여기서 비례부하는 시간 t 시점에서의 총 시스템부하 * 변압기의 기준용량 / 총 시스템 용량을 말한다.
- (규칙 6) 조건위반 해소 우선순위 : 변전소의 변압기를 우선 해소한 후에 배전선로를 해소하며, 선로에서는 전원 측에 가까운 간선부터 해소한 후에 분기를 해소한다.
- (규칙 7) 개폐조작 회수 : 가능하면 적을수록 좋다.
- (규칙 8) 부하절환 우선순위 : 같은 조건이면 연계지점이 전원 측에 가까운 쪽에서 절환한다

4. 선로 재구성의 예시

경험적 규칙을 이용하기 위해서 인공지능 언어인 PROLOG 언어를 이용하여 최적부하 절환을 위한 선택안을 규정했으며, 부하조류 해석은 C 언어를 이용하여 수행했다. 또한 이의 효율적인 수행을 위하여 최적우선 탐색기법을 사용하고, 사용된 컴퓨터는 32 bit IBM - PC 이다. 예시를 위해 사용된 모델계통도는 그림 2.에 있다.

4.1 배전선로 제한

- 0 선로전압 : 22.9 kv-y
- 0 변압기 용량 : 변압기 1 (30MVA), 변압기 2 (45MVA)
- 0 선종 : AL-OC 95
- 0 선로공장 : A D/L:15km, B D/L:18km, C D/L:16km, D D/L:14km, E D/L:23km

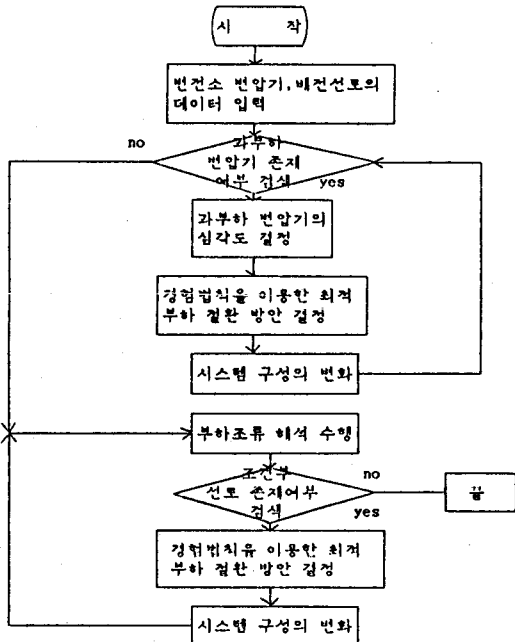


그림 1 재구성 기법의 흐름도
Fig.1 Feeder Reconfiguration Flow Chart

4.2 이상상태 예시
 0 변압기의 과부하 : 변압기 1
 0 선로저전압 : E D/L

4.2.1 변압기 과부하 해소

우선 변압기의 과부하를 해소하기 위해서 연계개폐기를 식별하면, B30R5(P1), B65R19 (P2)이다. 여기서 P2인 B65R19를 추적하면 (B65R19, B30R5 : P1), (B65R19, B65 : P3)가 나온다.

그러면 1) B30 개방후, B30R5 투입으로 C D/L로 부하절환,
 2) B65 개방후, B65R19 투입과 B30 개방 후, B30R5 투입으로 C D/L로 부하절환의 두 가지 선택안이 있으나 1) 안으로 변압기의 과부하가 해소된다 (규칙5)

4.2.2 선로 저전압 해소

위와 같은 방법으로

- 1) E81 개방후 C55R23 투입으로 C D/L로 부하절환
- 2) E90 개방후 E103 투입으로 D D/L로 부하절환
- 3) E75 개방후 E75L18 투입으로 D D/L로 부하절환

의 세 가지 선택안이 나오나 최소 손실이 되는 2)안으로 선로 저전압이 해소된다. 이와같이 변압기의 과부하와 선로 저전압을 해소하면서, 최소 손실화를 이룩했다.

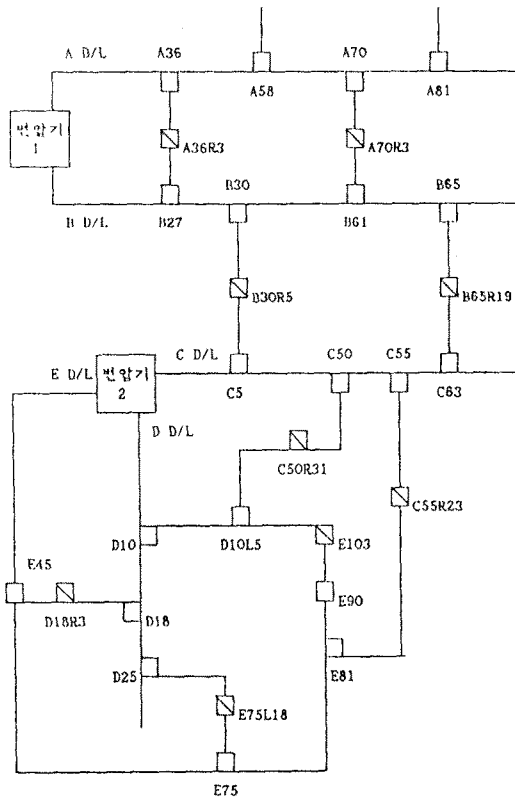


그림 2 모델 계통도
 Fig.2 Model Distribution System

5. 결 론

본 연구에서는 DAS 연구가 실제계에 적용됐을때, Volt/Var 제어 등과 함께 DAS 운영의 중요한 역할을 수행할 배전계통의 재구성기법을 경험적 규칙을 이용하여, 최적의 부하절환 방법의 채택으로 배전선로의 손실을 최소화시켰으며, 배전용 변전소의 주변압기와 배전선로 부하의 합리적인 배분으로 부하균형을 이룩하여 시스템의 신뢰성을 증가시켰다.

또한 이 결과를 활용함으로써 배전선로를 직접 운영하고 있는 전력회사의 입장에서는 손실감소로 인한 전력

생산원가의 절감, 신뢰성 증가로 인한 대 고객 봉사수준의 향상, 부하균형으로 인한 변전소 중설의 연기로 얻어지는 자본적 이익 등을 얻을 수 있다

앞으로 이 배전선로 재구성기법의 경험적 규칙을 더욱 개발하여 부하 밀집 지역의 실선로에 확대 적용할 예정이며, 정상상태의 운영 뿐만 아니라 배전선로의 초기 계획 시에도 적용하는 문제로 발전시킬 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- [1] T. Taylor, D. Lubkeman : "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, NO. 1, Jan 1990.
- [2] S. Civanlar, J. Grainger : "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July, 1988, pp. 1217-1223
- [3] C.H. Castro, J.B. Bunch, T.M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 2, March/April 1980, pp. 549-557
- [4] K.Anki, T. Ichimori, M. Kanezashi, "Normal State Optimal Load Allocation in Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987, pp. 147-155
- [5] C. Liu, S. Lee, S.S. Venkata, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [6] C.C. Liu, S.J. Lee, K. Vu, "Loss Minimization of Distribution Feeders: Optimality and Algorithms," Presented at IEEE/PES 1988 Summer Meeting, Portland, Oregon, July 1988, 88 SM 580-3
- [7] M.E. Baran, F.F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," Presented at IEEE/PES 1988 Summer Meeting, Portland, Oregon, July 1988, 88 SM 556-3