

배전계통의 복구 지원 전문가 시스템에 관한 연구

이홍재* · 이경섭* · 이철균**
 *광운대학교 전기공학과 **LG산전 전력계통연구원

A Study on the Restoration Aid Expert System for Distribution Networks

H. J. Lee* · K. S. Lee* · C. K. Lee**
 *Kwangwoon Univ. **LGIS Co., Ltd

Abstract - When a fault occurs on distribution network, blackout region may happen, then it should be restored as fast as possible to minimize interruption of electric service. In this paper, A near optimal method to restore distribution network is proposed. For an optimal restoration, the number or switching operations must be minimized. The proposed method generates a general restoration plan for any distribution network fault and designed to reduce switching operations considering available load transfers. In this method, overall process time can reduce with heuristic rules, which make a reduction of search space before restoration process. To achieve a near optimal solution, multiple load transfer algorithm is proposed too.

연구가 주로 이루어지고 있다.

경험적 지식을 이용한 주요 연구로는 C.C.Liu[1]가 정전부하의 그룹핑 규칙을 이용한 전문가 시스템을 제안 하였으나 복구시의 스위칭 횟수가 배전망의 구조에 의존 한다는 단점을 가지고 있다. Yuan-Yih Hsu[4]는 대 만의 배전계통 구조를 기반으로 하여 배전계통의 가지 단위로 복구를 수행하는 방안을 제안하였으나 이는 대 만의 배전계통에 국한된 방법론이었다. V. Susheela Devi[5]는 너비 우선 탐색을 통해서 스위칭 횟수를 줄 이기 위한 복구 방안을 제안하였다.

본 논문에서는 경험적 지식을 기반으로 하여 가능한 최소한의 스위칭을 통한 복구 방안을 제안하였으며 복구 시 필요한 데이터들을 최대한 활용하여 적절한 복구 방 안을 추천함으로써 복구시간의 단축을 도모하였다. 또한 사례 연구를 통해 제안한 복구 방안의 타당함을 보였다.

1. 서 론

2. 문제의 정의

배전계통은 수용가측에 직접 연결되어 전력을 공급하 는 시스템으로 그 구조가 매우 복잡하며 송전계통에 비 해 사고의 발생 빈도가 매우 높다. 또한 배전계통은 방 사상 구조로 운용되기 때문에 사고의 발생시 그 영향은 매우 크다고 할 수 있다.

배전계통은 다양한 종류의 스위치와 스위치의 연결에 의해 결정되는 구간으로 구성되며, 운영상의 편의등으로 인해 방사상 구조로 운용되고 있다. 현재의 계통 운용상 태는 스위치와 구간들의 연결 구조 및 각 스위치들의 현 재 상태에 의해 결정되며, 그림 1에 간단한 배전계통을 나타내었다.

배전계통에서 사고 복구는 사고구간 분리에 의해서 발 생하는 정전구역에 대해 신속하고 안정적인 전력 공급의 재개를 의미하며, 이는 계통내의 적절한 스위칭 조작을 통한 배전계통의 재구성으로 이루어진다. 따라서 배전계 통의 사고 복구 문제는 정전구역에 신속하게 전력 공급 을 재개하기 위한 최소한의 스위칭 조합을 탐색하는 비 선형 최적화 문제로 귀결된다.

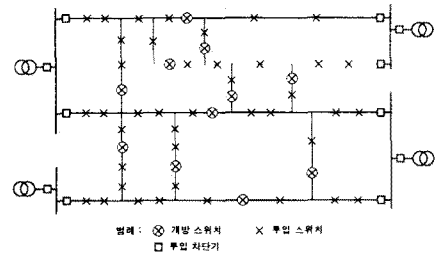


그림 1. 배전계통의 방사상 구조

현재까지 이러한 비선형 최적화 문제의 해결을 위한 연 구경향은 크게 수학적인 모델을 이용한 방법[2,3]과 경 험적인 지식을 이용한 방법[1,4,5]의 두 가지 방법으로 대별할 수 있다. 먼저 수학적 모델을 이용한 방법은 문 제에 대한 수학적 모델을 도출하고 이를 알고리즘을 통 하여 해를 구하는 방법으로서 최적해를 구할 수 있는 장 점은 있으나 배전계통의 복잡성 및 다양한 제약조건으로 인하여 정확한 수학적 모델의 도출이 어려울 뿐 아니라 최적해를 구하는데 상당한 계산시간을 필요로 한다. 이 와 달리 경험적인 지식을 이용한 방법은 복구문제에 대 한 전문가의 경험적 지식 등을 이용하여 해를 구하는 방 법으로서 수학적 모델을 이용한 방법에 비해 최적해를 도출하기는 어려우나 상대적으로 신속하게 가능한 해를 도출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 배전계통의 사고복 구 문제는 정상시 손실을 줄이기 위한 배전계통의 재구 성 문제와는 달리 사고 발생시 피해를 최소화하기 위해 서는 신속하게 이루어져야 하기 때문에 효율보다는 시 간 적인 제약에 충족된다. 따라서 사고복구 문제의 경우 에는 경험적 지식을 이용한 방법이 적합하다고 할 수 있 으며, 최근 이러한 경험적 지식을 이용한 방법론에 관한

배전계통에서의 사고 복구는 현재의 계통 구조와 피더 의 과부하 방지 및 방사상 구조의 유지와 같은 운용상의 제약 조건을 고려하여 적절한 스위치 조작을 통하여 이 루어진다.

3. 사고 복구 과정

스위칭 횟수의 최적화를 위해서는 모든 정전구역을 가 능하면 한 개의 그룹으로 복구를 수행하는 것이 타당하 며, 이는 1회의 스위칭 조작만으로 복구가 가능하기 때 문이다. 그러나 한 개의 그룹으로 복구를 수행할 수 없 는 경우에는 피더의 용량을 고려하여 정전구역을 몇 개 의 작은 그룹으로 분할하여 복구를 수행해야 한다. 또한 피더의 여유용량 부족으로 인한 부하절체의 경우 스위칭

횃수가 부하절체의 횃수에 비례하여 증가하기 때문에 가능한 적은 횃수의 부하절체를 수행하여 복구하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서 제안한 복구 과정은 크게 복구 계획 및 부하절체의 단계로 구성되었다. 복구 과정은 전반적으로 복구 계획에 의해 수행되지만 이용 가능한 피더의 용량으로 복구가 불가능한 경우에는 부하절체를 통해 피더의 여유용량의 증가를 시도하였으며, 복구 과정에서 경험적 지식 기반의 규칙을 이용한 추론 과정을 통하여 복구에 소요되는 스위칭 횃수를 줄이고자 하였다.

3.1 복구 계획

복구 과정의 간결한 표현을 위해 복구에 필요한 데이터들을 다음과 같이 정의하였다.

- L_T : 사고로 인한 정전구역의 전체 정전부하
- n : 정전구역에 직접 연결 가능한 인접 피더의 수
- F_i : 정전구역에 직접 연결 가능한 i 번째 인접 피더
- I : 인접 피더들의 집합 $I = \{i | F_i, 1 \leq i \leq n\}$
- $C(F_i)$: i 번째 피더의 여유용량
- C_T : 인접 피더 전체의 여유용량
- $$C_T = \sum_{i=1}^n C(F_i)$$
- C_{LT} : 부하절체를 통해 확보된 여유용량
- C_{Tnew} : 부하절체 수행 후 인접 피더 전체의 여유용량 $C_{Tnew} = C_T + C_{LT}$

제안된 복구 계획은 네 가지 단계로 이루어져 있으며 각 단계의 세부절차는 다음과 같다.

단계 1 :

- $L_T > C_T$ → 부하절체
- $L_T \leq C_T$ → 단계 2

안정적인 복구를 수행하기 위해서는 인접 피더 전체의 여유용량이 전체 정전부하 이상이어야 하며 피더의 여유용량이 충분하지 못한 경우 부하절체를 반드시 수행해야 한다.

단계 2 :

- $\exists i, L_T \leq C(F_i)$ → 결과 출력
- $\forall i, L_T < C(F_i)$ → 단계 3

단계 2에서는 전체 정전부하와 각 피더의 여유용량을 비교하여 한 개의 피더로 복구가 가능한가를 조사한다. 이때 여유용량이 전체 정전부하보다 큰 인접 피더가 존재하면 이 피더를 이용하여 복구가 가능하며 1회의 스위칭 조작으로 복구가 완료된다. 피더의 여유용량이 충분하지 않으면 단계 3을 실행한다.

단계 3 :

- $\exists M, L_T \leq \sum_{m \in M} C(F_m), (M \subset I)$ → 단계 4
- $\emptyset, L_T \leq \sum_{m \in M} C(F_m), (M \subset I)$ → 부하절체

단계 3에서는 각 피더의 용량을 고려하여 정전구역을 2개 이상의 그룹으로 분할한 후 각 그룹의 정전부하와 그 그룹에 관련된 인접 피더들의 여유용량을 비교하여 복구에 사용할 피더들을 선택한다. 복구에 사용할 피더들이 선택되면 구조적 제약조건인 방사상 구조를 유지하는지를 조사하기 위한 단계 4를 수행한다. 정전구역을 분할할 경우에는 스위칭 횃수를 고려하여 분할할 그룹의 수를 단계적으로 증가시킨다.

단계 4 :

- 방사상 구조 유지 → 결과 출력
- 방사상 구조 유지 못함 → 부하절체

단계 3에서 선택된 피더들을 사용하여 복구를 수행하였을 때 구조적 제약조건인 방사상 구조를 유지하는지를 조사한다. 선택된 인접 피더들의 여유용량은 충분하지만 계통의 구조적인 제약조건으로 인하여 복구가 불가능한 경우도 존재한다. 위의 사례를 그림 2에 나타내었다.

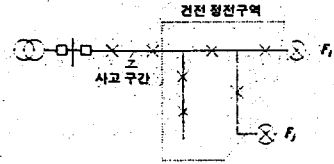


그림 2. 계통 구조의 문제

그림 2는 6개의 정전구간과 2개의 연결 가능한 인접 피더가 존재하는 정전구역을 나타낸다. F_i, F_j 및 각 구간의 부하를 각각 30, 40, 10이라 하면 연결 가능한 피더들의 전체 여유용량은 70으로 전체 정전부하인 60보다 크지만 계통의 구조적인 제약조건으로 인하여 복구가 불가능한 상태를 보여준다. 따라서 이러한 경우에는 다른 인접 피더들을 사용하여 복구를 수행해야 한다.

3.2 부하절체

전술한 단계 1과 단계 3에서 복구를 수행하기 위해서는 반드시 부하절체가 이루어져야 하며 여유용량이 부족한 피더의 경우 부하절체를 통해서 복구에 필요한 여유용량을 충분히 확보할 수 있다. 부하절체의 과정은 다음과 같다.

부하절체 :

- 순차적으로 부하절체를 수행
- $L_T \leq C_{Tnew}$ → 단계 2
- $L_T > C_{Tnew}$ → 부하절체

스위칭 횃수는 부하절체의 수에 비례하여 증가하므로 1회, 2회, 3회의 순서에 의해 단계적으로 부하절체의 수를 증가시킨다. 즉, 1회의 부하절체를 통해 여유용량이 충분히 확보되지 않으면 부하절체의 수를 단계적으로 증가시켜 여유용량이 충분히 확보될 때까지 반복적으로 수행한다.

복구 계획 및 부하절체의 전체적인 복구 과정을 그림 3에 나타내었다.

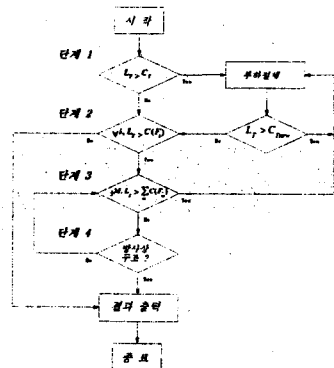


그림 3. 정전 복구 과정

4. 사례 연구

그림 4는 사례 연구를 위한 모의 계통으로 구간 "z23"에서 사고가 발생하여 사고구간의 분리가 이루어진 후의 상태를 나타낸다

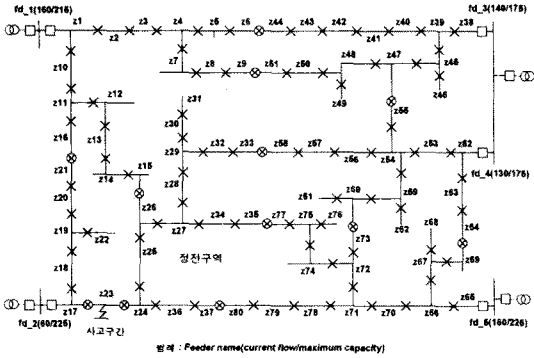


그림 4. 모의 배전계통

모의 계통은 5개의 피더, 80개의 구간과 85개의 스위치로 구성되었고 각 구간의 부하는 10으로 하였다. 사고로 인한 정전구역의 전체 정전 부하는 140이며 인접 피더들의 여유용량은 165이다. 인접 피더들의 여유용량이 정전부하보다 크지만 구조적 제약조건으로 인하여 부하절체를 수행해야만 한다. 본 논문에서 제안한 방법에 의한 복구 과정을 표 1에 나타내었으며 그 결과는 그림 5와 같다.

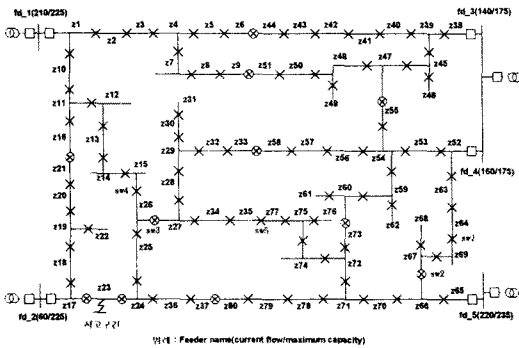


그림 5. 사고 복구 결과

5회의 스위치 조작을 통해 복구가 완료되었으며 복구 과정에서 1회의 부하절체가 수행되었고 정전구역은 2개의 그룹으로 분할되었다. 사례 연구를 통하여 제안된 복구 방안은 최소의 스위치 동작으로 정전구역의 복구가 가능함을 보였다.

표 1. 복구 과정

순서	스위치 동작	비 고
1	sw1 개방	(z67,z68,z9)를 fd_5에서 fd_4로 부하절체
2	sw2 투입	(z67,z68,z9)를 fd_5에서 fd_4로 부하절체
3	sw3 개방	(z24, z25, z26, z36, z37), (z27,z28,z29,z30,z31,z32,z33,z34,z35)으로 정전구역 분할
4	sw4 투입	(z24,z25,z26,z36,z37) 복구
5	sw5 투입	(z27,z28,z29,z30,z31,z32,z33,z34,z35) 복구

4. 결 론

본 논문에서는 배전계통에서의 사고시 스위칭 횟수를 가능한 최소로 할 수 있는 새로운 복구 방안을 제안하였다. 이를 위하여 복구 과정에서 경험적 지식 기반의 규칙과 다양한 부하절체의 방법을 도입하였다. 사례 연구 결과 피더의 여유용량이 충분하지 못한 상황에서도 상대적으로 적은 스위칭 횟수를 통한 복구가 가능함을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. C. Liu, et. al, "An Expert System Operation Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 2, PP. 619-626, May 1988
- [2] K. Aoki, et. al, "A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 3, PP. 1832-1839, July 1989
- [3] E. N. Dialynas, et. al, "Interactive Modeling of Supply Restoration Procedures in Distribution System Operation", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 3, PP. 1847-1854, July 1989
- [4] Y. Y. Hsu, et. al, "Distribution System Service Restoration Using A Heuristic Search Approach", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 2, PP. 734-740, April 1992
- [5] V. Susheela Devi, et. al, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 1, PP. 430-438, January 1995
- [6] K. Aoki, et. al, "Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4 October 1987
- [7] D. Shirmohamma, "Service Restoration in Distribution Network via Network Reconfiguration", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 2, pp. 952-958, April 1992
- [8] N. D. R. Sarma, et. al, "A New Network Reconfiguration Technique for Service Restoration in Distribution Network", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9, No. 4, pp. 1936-1942 October 1994