

실 배전계통 자동화를 위한 개선된 고장복구 알고리즘 개발

오 화 진* · 문 경 준** · 김 형 수** · 서 정 일** · 황 기 현*** · 박 준 호****
* 부산대학교 전기공학과 석사과정* 부산대학교 전기공학과 박사과정 **
부산대학교 전기공학과 공학박사 *** 부산대학교 전기공학과 교수****

임 성 일***** · 하 복 남*****
***** 전력연구원

Development of Enhanced Real-Time Service Restoration Algorithm for Distribution Automation System

H. J. Oh*, K. j. Mun* · H. S. Kim* · J. I. Seo* · G. H. Hwang* · J. H. Park* · S. I. Lim** · B. N. Ha**
*Dept. of Electrical Eng. Pusan Nat'l Univ. **Korea Electric Power Research Institute

Abstract - This paper presents a GA for service restoration in electric power distribution systems. The aim of the service restoration is to restore service with maximizing the amount of total load restored while minimizing the number of required switch operation when a fault or overload occurs in distribution system. This paper develops GA for service restoration problem with constrained multi-objective optimization problem. The results show the effectiveness of the proposed method for solving the problem.

업정전 구간 및 작업시간대를 지정하면 작업시간대에 예상되는 최대 부하에 대해 부하절체 방안을 제시하며 과부하 발생시 일부 부하를 인접 피더로 절체하는 과정 등을 처리하는 프로그램이다. 본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 배전계통 고장복구 알고리즘을 적용하였다. 즉, 배전계통에서 고장이 발생한 경우 또는 작업정전구간을 설정한 경우, 제한된 고장 복구 알고리즘은 판단한 고장구간 또는 작업정전구간 양단의 자동화 개폐기를 조작하여 고장구간 또는 작업정전 구간을 건전 계통과 분리하고 고장구간 이후의 건전 정전구간의 부하량을 산정한다. 그 후, 개폐기 조작횟수 최소화, 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건, 건전구간 부하 절체 최소화, 비상사고 대비도, 중요 수용가 우선권 등의 여러 제약조건을 고려하여 정전구간 부하를 고장선로와 연계된 선로를 찾아 절체하는 방안을 제시하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 수도권 지역 30개의 D/L에 적용해본 결과, 배전계통에서 고장이 발생한 경우 및 정전작업을 할 경우 고장구간 및 정전작업구간을 건전계통과 분리하고 이 구간 이후의 부하를 복구함을 알 수 있었다.

1. 서 론

정보화 사회로의 발전이 급속도로 진전됨에 따라 안정적인 전력공급의 책임은 더욱 중대되고 있다. 특히 배전계통은 고객과 직결되어 전력을 공급하는 시스템으로서 고장 발생시 정전을 수반하므로 신속한 고장 대처로 그 피해를 최소화하여야 한다. 따라서 배전계통의 시설 및 운용면에서는 배전계통 각 계층간의 자동화 및 상호연계에 의해 정전횟수 및 정전시간의 대폭감소는 물론 선로손실, 전압강하를 최소화하도록 배전계통을 효율적으로 운용하여 고객에 대한 서비스를 향상시켜야 할 것이다.

일반적으로 배전계통에서는 계통 사고나 정전 작업 및 과부하 발생시 광범위한 정전구역이 발생할 경우 또는 과부하 운전시, 사고구간을 제외한 건전 구간 및 과부하 발생구간을 주위의 타 피더로 부하를 절체함으로써 정전구역 및 과부하 발생구역을 최소로 하도록 운용하고 있으며 이러한 문제는 계통의 구성 상태와 연계 선로의 예비력, 손실 최소화, 개폐기 조작 횟수 최소화, 보호기기 협조조건, 전압강하 제약조건 등의 여러 제약조건이 수반된다. 따라서 배전계통 고장복구 알고리즘은 운전중인 배전계통의 고장 발생시 해당 고장구간을 파악하여 자동으로 고장구간을 분리하고 건전 정전구간을 복구하는 과정이며, 또한 특정구간의 작업정전이 필요한 경우 작

2. 유전 알고리즘을 이용한 배전계통 고장복구

2.1 유전 알고리즘

본 논문에서는 진화연산의 종류 중에서 해의 다양성과 수렴 속도면에서 좋은 특성을 나타내는 유전 알고리즘을 이용하였다. 유전 알고리즘은 다변수의 제약조건이 많은 복잡한 비선형 최적화 문제에 특히 유용하다. 유전알고리즘의 가장 단순한 형태인 SGA (Simple Genetic Algorithm)를 이용하여 최적해를 구하는 과정으로 부호화 (coding) 및 초기화 (initializing), 평가 (evaluation), 복제 (reproduction), 교배 (crossover) 및 돌연변이 (mutation) 과정을 거친다. 이 과정을 반복하여 수행하고 세대수 혹은 수렴기준을 만족할 경우 종료한다.

2.2 배전계통 고장복구시 부하절체 방안

부하절체 방안을 제시하기 위해서는 고장구간을 분리한 개폐기의 조작에 의해 계통내에 정전이 발생한 경우, 우선 계통내의 정전구간 및 해당 정전구간에 대한 연계점과 연계 피더를 탐색하고 이들의 용량 및 연계상태를 파악하여 이를 복구과정에서 활용한다. 정전이 발생한 구간은 계산된 정전구간의 부하량을 토대로 하여 연계된 건전선로로의 부하절체 방안을 제시해야 한다.

2.3. 배전계통 고장복구시 유전 알고리즘 적용 방안

가) 복구 방안 I

: 전체 정전부하를 하나의 연계피더로 절체하는 경우

복구방안 I에서는 하나의 연계피더에 대해 모든 건전정전구간 부하를 절체시키는 방안이다. 각 방안을 평가하기 위한 적합도 함수는 스위칭 횟수를 최소화하고 인접 연계 피더로 부하를 균등하게 분배하면서 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건을 만족하도록 식 (1)과 같이 선정하였다.

나) 복구방안 II

: 연계 피더가 두 개 이상인 경우에 대한 유전 알고리즘의 스트링 구성

복구방안 II에서는 우선 연계 피더 중 두 개를 유전 알고리즘을 이용하여 채택한 후 선택된 연계 피더쌍 사이의 구간개폐기 중 개방될 개폐기를 유전 알고리즘으로 결정하는 방법을 제시하였다. 복구방안 II에 대한 유전 알고리즘의 해집단 구성은 그림 1과 같다. 각 스트링을 평가하기 위한 적합도 함수는 스위칭 횟수를 최소화하고 인접 연계 피더로 부하를 균등하게 분배하면서 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건을 만족하도록 식 (1)과 같이 선정하였다.

string 1	BF ₁₁	BF ₁₂	SW ₁₁
string 2	BF ₂₁	BF ₂₂	SW ₂₁
⋮			
string p	BF _{p1}	BF _{p2}	SW _{p1}

여기서, BF₁₁, BF₁₂ : i번째 스트링의 연계 피더쌍
 SW₁₁ : i번째 스트링의 연계 피더쌍의 경로상의 개방될 개폐기
 p : 해집단의 크기

그림 1 복구방안 II에 대한 해집단의 구조

$$fitness = A / Obj \quad (1)$$

여기서,

$$Obj = B \cdot SWNo + C \cdot LoadBalance + \sum_{i=1}^n D_i \cdot Penalty_i$$

A, B, C, D_i : 가중계수

SWNo : DGR 방안에 대한 스위칭 수

$$LoadBalance = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (F_i - \bar{F})^2$$

$$F_i : i\text{번째 피더의 공급용량}, \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n F_i$$

Penalty_i : 변압기 및 피더의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건의 위반에 따른 벌점함

나) 복구방안 III

: 연계 피더가 세 개 이상인 경우에 대한 유전 알고리즘의 스트링 구성

복구방안 III에서는 인접한 연계점 중 3개의 연계 피더쌍을 유전 알고리즘으로 선정한다. 그 후 각 연계 피더간의 연결경로를 탐색하고 이 경로 중 중복되지 않는 경로상에서 개방될 개폐기의 위치를 유전 알고리즘으로 선정하였다.

다) 복구방안 IV

: 건전구간 부하 절체시 유전 알고리즘의 스트링 구성

복구방안 IV에서는 앞의 각 복구방안에서 개방될 개폐기의 위치는 앞에서 설명한 방법으로 선정한 후 건전구간 부하를 절체하기 위한 연계 피더와 이 연계 피더로 건전부하를 절체하기 위해 개방해야 할 개폐기의 위치를 유전 알고리즘으로 결정하여 해당 연계 피더의 건전부하 중 일부를 절체시킴으로써 여유용량을 확보한다. 따라서 복구방안 IV에 대한 유전 알고리즘의 해집단 구성은 그림 2와 같다.

string 1	BF ₁₁	BF ₁₂	BF ₁₃	SW ₁₁	SW ₁₂
string 2	BF ₂₁	BF ₂₂	BF ₂₃	SW ₂₁	SW ₂₂
⋮					
string p	BF _{p1}	BF _{p2}	BF _{p3}	SW _{p1}	SW _{p2}

여기서, BF₁₁, BF₁₂, BF₁₃ : i번째 스트링에 의해 구한 고장구간과 인접한 연계 피더
 SW₁₁, SW₁₂ : i번째 스트링의 각 연계 피더간의 경로상에 존재하는 개폐기
 n : 고장구간과 인접한 연계 피더의 수
 p : 해집단의 크기

그림 2 복구방안 IV에 대한 해집단의 구조

3. 사례 연구

제안한 방법의 유용성을 검증하기 위해서 현재 자동화되어 있는 수도권 지역 실 배전계통에 대해 변압기의 부하분담, 피더전류, 최대전압강하 등을 고려한 고장복구 방안을 적용 및 검토하였다.

- 1) 길동 D/L의 고장모의 : 길동 OCB와 길동지 2 사이 구간에서 고장이 발생한 경우
 - 동작 보호기기명 : 길동 OCB
 - 고장구간 분리 스위치
 전원측 : 길동 OCB
 부하측 : 길동지 2

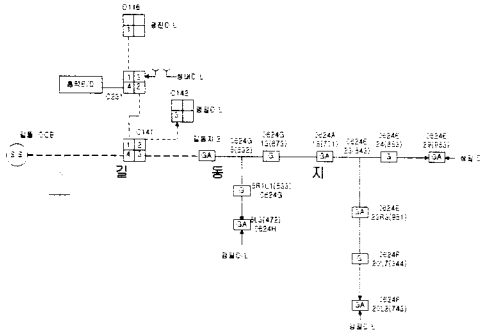


그림 3 길동 D/L의 계통도

- a) 복구 방법 : 복구방안 I
 b) 투입된 개폐기 : 강일간 20L2
 c) 복구전후 변경된 변압기 전력공급량

복구 전	복구 후
mtr 1 : 0.749 pu	mtr 1 : 0.661 pu
mtr 2 : 0.826 pu	mtr 2 : 0.826 pu
mtr 3 : 0.754 pu	mtr 3 : 0.819 pu
mtr 4 : 0.703 pu	mtr 4 : 0.703 pu

- d) 정전부하량 : 12[A]
 절체된 부하량 : 51[A]
 e) 복구전후 변경된 피더 전력공급량
 - 길동 D/L: 107[A](0.382pu) → 6.69[A](0.024pu)
 - 강일 D/L: 110[A](0.393pu) → 138.56[A](0.66pu)
 f) 최대전압강하
 - 하일지 92R12에서 최대전압강하 발생
 - 최대전압강하 : 19903V (0.869 pu)
 g) 목적합수값 : 종합지수 5.97
 i) 스위칭 회수 : 1회
 목적합수값 : 1

- ii) 부하분담 균등화

목적합수값 : 0.789

- iii) 최대 전압강하 : 19903[V]

목적합수값 : 0.869

- iv) 과부하 : 발생 안함

목적합수값 : 1

4. 결론

본 논문에서는 배전계통 고장복구 알고리즘에 전역 최적해 탐색성능을 가진 유전 알고리즘을 적용하였고, 유전알고리즘의 탐색속도를 향상시키기 위해 탐색한 연계점과 연계 선로의 갯수에 따라 복구방안을 복구방안 I, 복구방안 II, 복구방안 III, 복구방안 IV로 나누어 이들 각각의 경우에 유전알고리즘을 적용하였다.

개발한 알고리즘을 검증하기 위해 30개의 D/L로 구성된 강동변전소에 적용한 후 부하절체 방안을 구하여 우선 순위별로 정렬한 후 운전원에게 제시함으로써 운전원이 최종 복구방안을 선정할 수 있게 하였으며 그 결과, 배전계통에서 고장이 발생한 경우 고장구간을 건전계통과 분리하고 이 구간 이후의 부하를 적절히 복구하였으며 과부하가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

- [1] V. Susheela Devi, D. P. Sen Gupta, G. Anandalinggam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, pp. 430-438, Jan. 1993
 [2] Whei-Min Lin, Hong-Chan Chin, "A New Approach for Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, pp. 870-875, July, 1998.
 [3] Tsutomu Oyama, "Restorative Planning of Power System Using Genetic Algorithm with Branch Exchange Method", pp.175-179, 1996
 [4] S. Lee, S. Lim, b. Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, Aug. 1998