

유전 알고리즘과 Tabu Search를 이용한 배전계통 사고복구

조철희, 신동준, 정현수, 김진오
한양대학교 전기공학과

A Service Restoration of distribution network using Genetic algorithm and Tabu search

Chul Hee Cho, Dong Joon Shin, Hyeon Soo Jung, Jin O Kim
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - 산업의 발달에 따라 배전계통의 자동화가 서서히 자리 매김하고 있다. 이에 따라 배전계통에서 발생하는 사고를 계통의 상태와 신뢰도를 동시에 만족시키고, 빠른 시간 내에 복구하는 문제는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 배전계통 사고복구 문제는 많은 개폐기들의 조합에 의해 구성되어 있고, 계통의 구성상태와 연계선로의 예비력 등 많은 제약조건들로 인하여 사고복구에 많은 시간이 걸린다. 본 논문에서는 유전 알고리즘과 Tabu Search (TS) 기법을 이용하여 계통의 사고 후 선로손실과 신뢰도손실을 최소화하는 배전계통 사고복구 알고리즘을 제안하고자 한다. 전역 최적해 탐색 및 여러 해의 동시 탐색이 가능한 유전알고리즘과 전역적 탐색은 약하지만 빠른 시간 내의 국부적 탐색(local search)이 우수한 TS를 서로 연계한 알고리즘의 우수성을 계통의 모의실험을 통하여 증명하였다.

1. 서 론

오늘날의 배전계통은 다양한 부하들의 전력수요 증가 추세에 따라 점점 대규모화되어 가고 있으며 계통의 변화는 자주 발생하고 있다. 이러한 대규모 전력 시스템의 효율적인 운용과 사고 대처 능력 향상을 위해서 배전계통의 자동화는 서서히 자리 매김하고 있다. 배전계통의 사고복구는 계통의 사고 시 수용가에게 신속하고 안정적으로 전력을 재공급하는 측면에서 상당히 중요한 배전계통 자동화의 한 분야이다. 일반적으로 배전계통에서는 계통 사고나 정전 작업시 정전구역이 발생하면 건전구간을 연계한 타 급전선(feeder)으로 부하를 절체하여 정전구간을 최소화하도록 운용하고 있으며, 이러한 문제는 계통의 구성상태와 연계선로의 예비력, 개폐기 조작회수의 최소화 등 여러 가지 제약조건이 수반된다.

지금까지의 연구는 이러한 제약조건으로 정전구간의 모든 부하를 복구할 수 없는 경우, 선로손실비용만을 고려하여 사고를 복구하는 최소 선로손실방식이었다. 하지만 이는 차단시간에 따른 차단비용이 높은 부하의 신뢰도를 고려하지 않기 때문에 경우에 따라 최적의 계통 사고복구를 제공하지 못할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 선로손실비용과 전력차단으로 인한 수용가별 차단비용을 함께 고려하여 계통의 사고복구 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 선로손실비용

배전계통을 운용할 때 전송선로의 저항성분에 의한 전송선로손실이 발생한다. 배전계통의 경우에 사고나 정전 작업에 따른 부하 절체시 방사상 구조의 계통을 재구성하게 되는데, 이때 선로손실이 최소가 되고 안정적으로 전력을 재공급할 수 있도록 인접한 급전선 개폐기의 개·폐를 결정한다.

새로 구성된 배전계통의 선로손실은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PL = \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|} \quad (1)$$

여기서 r_i 는 선로 i 의 저항이다.

선로손실비용(Lost Cost: LC)은 식(1)로부터 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$LC = k_e \cdot PL \quad (2)$$

k_e 는 단위시간당 전력생산비용(\$/kw/hour)이다.

2.2 차단비용

계통 요소의 고장에 따른 전송차단으로 수용가는 전송 손실의 비용을 부담하게 되는데, 이러한 손실비용이 차단비용(Interruption Cost: IC)이다.

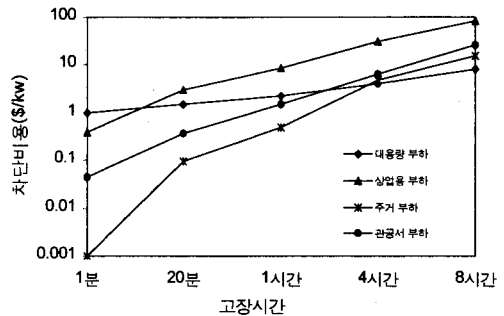


그림 1. 부하유형별 고객손실합수 (\$/kw)

그림 1은 부하유형별 고객손실합수[3]를 나타내고 있다. 차단비용은 그림에서 볼 수 있듯이 부하의 유형에 따라 차이가 있으므로 배전계통의 사고복구시 차단비용이 높은 부하를 먼저 복구하는 것은 계통의 신뢰도를 높이는 것이며, 이는 계통의 운용측면에서 매우 중요하다. 차단비용은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$IC = L_i \cdot C_i(d) \quad (3)$$

여기서 L_i 는 전송경로의 i 번째 부하요구량(kw), d 는 고장시간(hours), 그리고 $C_i(d)$ 는 부하유형별 고객손실합수(\$/kw)이다.

2.3 전체비용

배전계통의 사고복구시 계통을 운용하는 전체비용(Total Cost: TC)은 식(2), (3)에서 보인 선로손실비용과 차단비용의 합으로 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

계통의 사고복구는 전체비용을 최소로 하는 목적함수를 가지고 있으며 여러 가지 제약조건을 만족하여야 한다.

- 목적함수

$$\min TC = LC + IC \quad (4)$$

- 제약조건

1. 절체된 부하를 공급하는 인접 급전선(feeder)의 허용용량을 초과해서는 안된다.
2. 선로의 허용전류를 초과해서는 안된다.
3. 부하 절체시 방사상구조의 계통으로 재구성되어야 한다.
4. 사고복구를 위해 조작하는 스위칭 동작의 수는 가능한 한 최소가 되어야 한다.

배전계통의 사고복구시 전체부하를 복구할 수 없는 경우에는 이와 같이 선로손실비용과 차단비용을 함께 고려하여야 계통의 신뢰도 향상과 더불어 운용비용을 절감할 수 있으며 부하 절체를 통한 계통의 최적 재구성은 이러한 전체비용의 최소화로 결정될 수 있다.

2.4 Genetic-Tabu Algorithm

유전 알고리즘은 생물의 진화과정을 모방한 확률적 탐색기법으로 하나의 해가 아닌 해 집단을 동시에 탐색하는 기법으로 전역적 탐색(global search)이 우수한 알고리즘이며, Tabu Search는 메모리를 효율적으로 사용하는 경험적인 최적화 기법으로 전역적 탐색은 약하지만 빠른 시간 안에 국부적 탐색(local search)이 가능한 알고리즘이다.

본 논문에서는 두 알고리즘의 장·단점을 상호 보완하여 새로운 Genetic-Tabu 알고리즘을 제안하였다.

유전 알고리즘은 다른 최적화 기법에 비해 많은 장점을 가지고 있지만 구조적인 문제점이 있다. 즉 여러 해의 동시 탐색으로 전역적 탐색이 우수하지만 세대가 어느 정도 지나면 더 좋은 해가 도출되지 못하여 수렴이 느리거나 멈추어 버리는 조기 수렴의 문제가 있다. 이를 극복하기 위해 돌연변이 확률을 높임으로써 어느 정도 극복이 가능하지만, 정해진 돌연변이 확률로는 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서 제안한 Genetic-Tabu 알고리즘의 가장 큰 특징은 Tabu Search의 집중성(intensification)을 강화하는데 있다. 즉 tabu list에 저장된 해의 속성을 통해 유전 알고리즘의 돌연변이 확률을 조절하여 보다 빨리 전역해로 수렴하도록 유도한다.

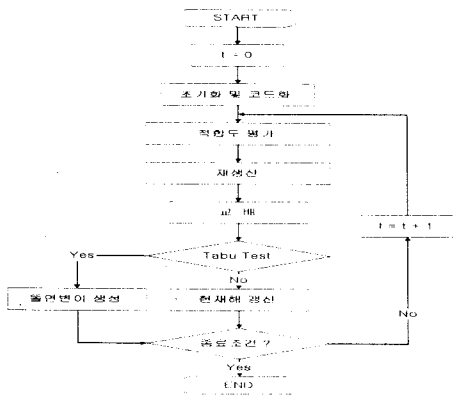


그림 2. Genetic-Tabu 알고리즘 흐름도

사례연구를 통해서 Genetic-Tabu 알고리즘과 유전 알고리즘을 비교하였으며, 제안한 알고리즘이 전역적 탐색과 수렴속도면에서 유전 알고리즘보다 우수함을 입증

하였다.

그림 2는 Genetic-Tabu 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있으며, 알고리즘의 수행절차는 다음과 같다.

- 단계1) 초기화 및 코드화 : 계통의 사고로 인하여 절체되는 부하의 유형 및 위치로 코드화된 유전자(gene)집단을 생성한다.
- 단계2) 적합도 평가 : 유전자 배열을 통하여 계통의 전체비용을 평가한다.
- 단계3) 재생산 : 확률적 기법으로 우수해를 재생산한다.
- 단계4) 교배 : 우수 유전자들을 더 좋은 유전 배열로 만들어 우수해의 속성을 지속시킨다.
- 단계5) Tabu Test : 세대(generation)내에서 가장 좋은 해를 구하여 해의 변화된 속성을 tabu list에 저장하고, 현재해를 갱신한다. 이때 그 속성이 이미 tabu list에 저장되어 있거나, 열망수준(aspiration)에 만족하지 못하면 돌연변이 생성을 유도한다.
- 단계6) 수렴조건 : 수행 반복회수가 만족할 때까지 단계2)~단계5)까지 반복한다.

2.5 사례연구

본 논문에서는 선로손실비용최소화 사고복구와 선로손실비용과 차단비용을 동시에 고려한 전체비용최소화 사고복구를 4시간의 계통사고시 3개의 급전선(feeder)과 18개의 부하점을 가진 배전계통을 사용하여 검증하였다.[2]

표 1. 모델 계통의 부하 데이터

구분	feeder1의 부하점	feeder2의 부하점	feeder3의 부하점
주거용 부하 (0.8668MW)	3,4,5,6,8	-	15,16,17
관공서 부하 (0.9167MW)	7	-	18
상업용 부하 (0.844MW)	1,2	-	11,12,13,14
대용량 부하 (1.8721MW)	-	9	-
대용량 부하 (1.6279MW)	-	10	-

모델 계통에서 사용한 부하 데이터는 표 1에 나타내었으며 그림 3은 계통 구성도이다. 급전선의 허용용량은 9.2[MW], 선로의 최대 허용전류는 160[A], 임피던스는 0.391[ohm/km]이고, 단위시간당 전력생산비용 k_e 는 0.0767[\$/kw/hour]이다.

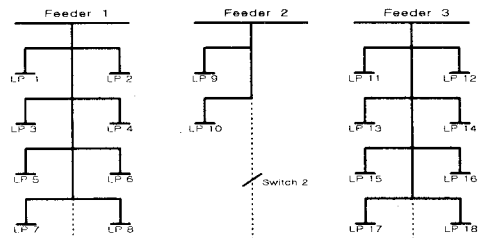


그림 3. 계통 구성도

그림 4, 5는 급전선 1 사고에 의한 사고복구 과정에서 모든 부하를 복구할 수 없는 경우, 선로손실비용만을 고려한 사고복구와 전체비용을 고려한 사고복구에 대하여 본 논문에서 제안한 Genetic-Tabu 알고리즘을 적용한 결과를 나타내고 있다.

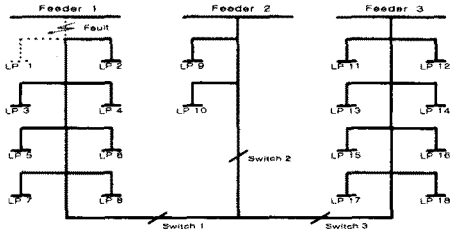


그림 4. 선로손실비용만을 고려한 사고복구

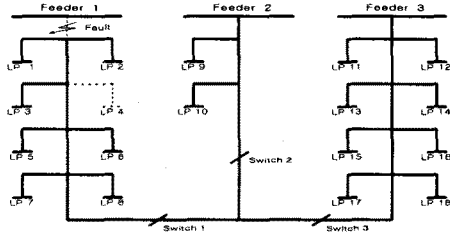


그림 5. 전체비용을 고려한 사고복구

모델 계통의 사고복구 결과로부터 선로손실비용만을 고려한 사고복구는 상업용부하(LP1)에 전력을 공급하지 못하고 있는데 반하여 전체비용을 고려한 사고복구는 주거부하(LP4)에 전력을 공급하지 못하고 있음을 보여 주고 있다.

표 2는 사고복구를 통하여 재구성된 경로의 운용비용과 제약 조건 결과를 나타내고 있다.

표 2. 사고복구 결과 비교

	선로손실비용최소화 사고복구	전체비용최소화 사고복구
선로손실비용 (\$/hour)	8.3808	8.3861
전체비용 (\$/hour)	26439.93	4267.84
최대전류 (<160A)	156.14	156.01
급전선 최대용량 (<9.2MW)	8.6	8.9
개폐기 조작 회수	3	3

표 2에서 볼 수 있듯이 선로손실비용은 전체비용최소화 사고복구가 다소 높게 나타나지만 전체비용은 4시간의 정전사고시 \$22172.09의 이익을 선로손실비용최소화 사고복구에 비해 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 차단비용이 높은 상업용부하에 전력을 공급하는 반면, 차단비용이 낮은 주거부하에는 전력을 공급하지 않는 결과에서 비롯된 것이다. 그림 6은 급전선 3의 사고시 전체비용최소화 사고복구의 결과를 나타내고 있다.

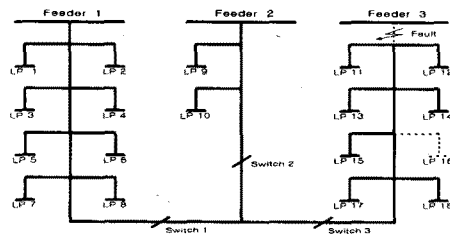


그림 6. 급전선 3의 사고시 사고복구

그림 7, 8은 Genetic-Tabu 알고리즘과 유전 알고리즘을 300번 반복 수행한 수렴곡선을 보여주고 있다. 수렴곡선을 통해서 제안한 Genetic-Tabu 알고리즘이 유전 알고리즘보다 빨리 수렴하고 있음을 보여주고 있으며, 이는 집중성(intensification)이 강한 Tabu Search의 빠른 수렴 특성의 결과이다. 이 결과를 통해 제안한 Genetic-Tabu 알고리즘의 우수성을 증명하였다.

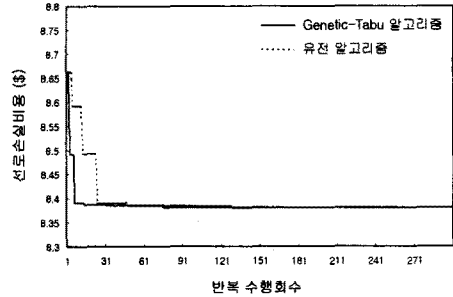


그림 7. 선로손실비용만 고려한 사고복구 탐색결과

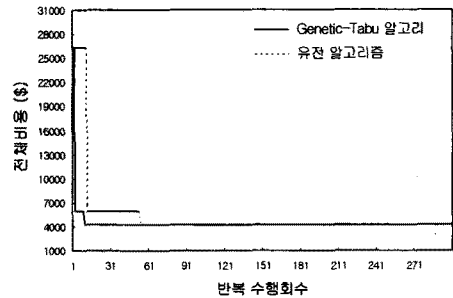


그림 8. 전체비용을 고려한 사고복구 탐색결과

3. 결 론

배전계통의 사고복구는 사고발생시 적절한 스위칭을 통하여 부하를 절체하는 방법으로 이때, 신속하고 안정적인 전력공급과 더불어 계통의 신뢰도를 함께 고려하여야 한다. 본 논문에서는 선로손실비용과 차단비용을 함께 고려하여 전체비용 손실이 최소가 되는 배전계통 사고복구에 대하여 논의하였다. 또한 최적의 해를 구하기 위하여 국부적인 탐색이 우수한 Tabu Search 기법과 전역적인 탐색이 우수한 유전 알고리즘의 장·단점을 상호 보완한 Genetic-Tabu 알고리즘을 제안하였고, 사례 연구를 통하여 제안한 알고리즘의 우수한 수렴특성을 증명하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. Billinton, Peng Wang, "Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical and Sequential Simulation Techniques", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 4, pp.1245-1250, Nov, 1998.
- [2] R. Billinton, R. N. Allan, "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, pp.813-820, May, 1991.
- [3] 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.
- [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.