

분산전원을 고려한 배전계통 고장 복구문제에 타부탐색법 적용

배 병현, 문 경준, 김 형수, 박 준호
부산 대학교 전기공학과

Application of Tabu Search for Service Restoration of Distribution System with Dispersed Generators

Byung-hyun Bae, Kyeong-Jun Mun, Hyung-Su Kim, June Ho Park
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea

Abstract - 본 논문에서는 차세대 대체 에너지원으로 서 주목받고 있으며, 상용화되고 있는 분산전원이 도입 된 배전계통에서 고장이 발생한 경우, 경험적 최적화 알고리듬인 타부 탐색법을 적용한 고장 복구 알고리즘을 제안하고자 한다. 배전계통 고장복구 문제는 배전 선로 상에 고장 발생시 최적의 부하절체를 함으로써 건전 정 전구간을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 배전자동화 시스템에서 분산전원 계통을 자동화하여 분산전원의 동작 상태를 감시하고 고장검출, 계통분리 또는 원격스위 치를 제어함으로써 고장복구 방법을 제시한다.

제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌의 예제 계통에 제안한 방법을 적용해 본 결과, 제안한 알고리즘이 해의 탐색속도 및 해의 성능면에서 우수함을 확인하였다.

1. 서 론

최근 경제성장과 산업·사회활동의 고도화에 따라서 안정적인 전력공급의 책임은 더욱 증대되고 있다. 또한 전력품질에 대한 요구가 갈수록 높아지고 있고, 증대되는 전력수요에 대해 에너지 자원과 지구 환경의 제약문제가 대두되고 있어 전력수급의 장기적 안정을 확보하기 위해서는 다양한 에너지원을 효율적으로 활용하기 위한 방법 으로서 분산전원의 도입이 불가피하다. 특히 배전계통은 고객과 직결되어 전력을 공급하는 시스템으로서 고장 발생시 정전을 수반하므로, 신속한 고장 대처로 그 피해를 최소화하여야 한다. 따라서 배전계통의 시설 및 운용면 에서는 배전계통 각 계통간의 자동화 및 상호연계에 의 해 정전횟수 및 정전시간의 대폭감소는 물론 선로 손실, 전압강하를 최소화하도록 배전계통을 효율적으로 운용하 여 고객에 대한 서비스를 향상시켜야 할 것이다.

배전계통의 고장 복구문제는 선로고장시 정전구간의 정 전구간을 이웃한 연계선로로 신속히 절체하여 전력공급 을 함으로써 정전구간을 최소화하는 문제이다. 이러한 문제는 계통의 방사상 구성 상태와 연계 피더의 예비력, 개폐기 조작 횟수 최소화, 부하 균등화, 변압기 및 피더 의 용량 제약조건, 전압강하 제약조건 등의 여러 제약조 건이 수반된다. 배전계통의 고장복구에 관한 연구로서는 경험적 방법, 가지교환 방법, 전문가 시스템, 신경회로 망, 퍼지 시스템을 이용한 방법[1-3]등이 제안되었으 나, 계산 결과가 근사적이거나 대부분 전역 최적해를 찾 지 못하는 단점을 가진다. 그리고 유전알고리즘은 비교적 우수한 해를 찾아주지만 국부 탐색 능력에 많은 시간 이 소비된다.

분산전원이란, 태양광발전, 열병합발전, 연료전지발전, 풍력발전 등의 기술을 이용한 소규모 발전시스템으로서 소비지 근방에 분산배치가 가능한 전원을 말한다. 분산 전원은 소유 관점에서 비전기사업자와 전기사업자로 나눌수 있고, 운영 주체 관점에서는 독립적으로 운영하는 경우와 전력계통과 연계된 상태에서 운전하는 경우로 나눌수 있다. 이러한 분산전원을 배전계통에 연계하여 운 용할 경우 특히, 배전계통의 고장 복구문제는 분산전원

이 백업용 전원으로서의 역할을 함으로써 신뢰도 향상에 기여할 수 있다[4].

따라서 본 논문에서는 이러한 분산전원을 고려한 배전 계통의 고장 복구문제에 최적해 탐색 속도 및 탐색 성능 이 우수한 타부 탐색법(5)을 적용하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 참고문헌[7-8]의 예제계통에 적용함으로써 제안한 방법의 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 문제의 정식화

배전계통의 고장복구 문제는 가능한 한 빠른 시간내에 건전 정전구간 부하를 인접 연계 피더로 절체하는 것이 다. 따라서 배전계통 고장복구 문제의 목적함수로는 복 구하지 못한 부하량 최소화, 개폐기 조작횟수 최소화, 부하 균등화 제약조건으로는 변압기 및 피더의 용량 제 약조건, 전압강하 제약조건 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 목적함수 및 제약조건들을 적절히 고려하여 연계 선로의 조합에 의한 배전계통 고장 복구시 종합지수를 식 (1)과 같이 선정하였고, 종합지수의 각 항목을 고찰 하면 다음과 같다..

$$\text{종합지수} = \text{Min}(\rho_1 \cdot IC^h + \rho_2 \cdot ILB^h + \rho_3 \cdot IP^h + \rho_4 \cdot IS^h + \rho_5 \cdot I^h + \rho_6 \cdot IV^h) \quad (1)$$

여기서, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_6$: 가중계수

h : h 번째 후보해

- 개폐기 조작 비용 (IC^h)

$$IC^h = N_g \quad (2)$$

여기서, N_g : 상태가 변경된 개폐기 수

- 부하 균등화 지수 (ILB^h)

$$ILB^h = \exp\left[\frac{3\sigma}{(y_{\max} - \bar{y})}\right] \quad (3)$$

여기서, $\bar{y} = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} y_i$

y_i : i 번째 피더의 실제부하/ i 번째 피더의 허용용량

$$\sigma = \frac{1}{n_f} \left[\sum_{i=1}^{n_f} (\bar{y} - y_i)^2 \right]^{1/2}$$

- 복구하지 못한 부하량 (IP^h) : h 번째 후보해의 복구하지 못한 부하는 식 (4)에서와 같이 일반 부하와 중요 부하의 가중 합으로 구성된다

$$IP^h = p \sum_{i \in a_s^h} P_i^h + q \sum_{i \in a_c^h} P_i^h \quad (4)$$

여기서, a_s^h, a_c^h : 일반 및 중요부하의 집합

p, q : 가중계수

P_i^h : i 번째 부하단의 부하량

- 변압기의 용량제약 지수 (IS^i)

$$IS^i = \begin{cases} \text{Max} \exp\left[\frac{S_{TSi}^i - S_{TSi}^n}{S_{TSi}^n}\right] & \text{if } S_{TSi}^i > S_{TSi}^n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, n_{TS} : 변압기 대수

S_{TSi}^n, S_{TSi}^i : i 번째 변압기의 정격용량과 실제 용량
 $i = 1, 2, \dots, n_{TS}$

- 피더의 용량제약 지수 (IJ^j)

$$IJ^j = \begin{cases} \text{Max}_{ij} \exp\left[\frac{I_{ij}^j - I_{ij}^n}{I_{ij}^n}\right] & \text{if } I_{ij}^j > I_{ij}^n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, n_j, j = 1, 2, \dots, n_{si}$

I_{ij}^n, I_{ij}^j : i 번째 피더의 j 번째 구간에서의 정격전류 및 실제전류

n_j : 고장복구시 사용된 피더의 수

n_{si} : i 번째 피더가 전력을 공급받는 구간수

- 전압강하 제약조건 (IV^k)

$$IV^k = \text{Max} \exp\left[\left(\frac{V_r^k - V_{th}^k}{V_r^k}\right)\right] \quad (7)$$

여기서, V_r^k : 피더 전압

V_{th}^k : i 번째 피더의 k 번째 부하단의 실제전압

$i = 1, 2, \dots, n_j, k = 1, 2, \dots, n_{si}$

2.2 배전계통의 분산전원

분산전원은 기존의 전력회사의 대규모 집중형 전원과 달리 소규모로서 소비자 근방에 분산 배치가 가능한 전원을 말한다. 이는 에너지 절약, 에너지 Security의 향상, CO₂배출대책 등의 환경적인 측면에서와 전력시스템의 측면에서 다양한 에너지원의 효율적 활용을 가능하게 한다. 이러한 분산전원은 대체에너지 전원으로서의 기술적인 특성상, 단독운전 보다는 기존의 한전계통에 연계하여 운전하는 것이 경제적 및 자원의 효율적 이용, 수용가의 공급안정성 확보면 등에서 유리하므로 계통연계운전이 필수적이다. 배전계통에 연계되어 운전되는 분산전원의 형태는 크게 3가지로 분류될 수 있다[6].

- 분산전원의 시동이나 계획적인 분리 유무
 - ① BDG(Black-start DG): 타여자 기기형(열병합 발전등) - 날씨가 기후에 상관없이 발전
 - ② NBDG(Non Black-start DG): 자여자 기기형(풍력 발전, 태양광 발전등) - 날씨가 기후에 관계하여 발전
- 배전 자동화 센터에서 분산전원의 제어가능성 여부
 - ① CDG(Controllable DG): 배전계통과 분산전원의 협조제어가 가능한 형태
 - ② NCDG(Non-Controllable DG): 배전계통과 분산전원의 협조제어가 불가능한 형태
- 고장구간 분리후의 분산전원의 동작 상태
 - ① SDG(Survived DG): 고장 고립 후에도 배전계통과 상호 연계되어 동작되는 형태
 - ② NSDG(Non-Survived DG): 고장난 동안 배전계통과 연계가 이루어지지 않는 형태

그러나 분산전원이 계통연계 시에는 전력품질, 보호협조, 단독운전시의 안정성 등에 관련된 문제들이 발생한다. 따라서 이에 대한 계통 연계시의 해결책으로는 고조파 발생의 경우는 필터설치, 단락용량증가에 대해서는 회전기와 정지기의 한류리액터 설치와 전류 제한기능 부여, 보호협조의 경우는 보호 릴레이의 협조조정 등이 있으나 가장 큰 문제점이라 할 수 있는 것은 역조류 문제라고 할 수 있다. 본 논문에서는 배전계통의 고장복구

문제에 있어 이러한 역조류 문제에 대해 제안한 방법을 통해 분산전원의 발전량을 결정함으로써 역조류를 발생시키지 않음을 확인 할 수 있었다.

2.3 타부 탐색법(Tabu Search, TS)

타부 탐색법은 경험적인 알고리즘으로 특히, 조합 최적화 문제를 푸는데 아주 효과적인 방법이다. 타부 탐색법은 다른 최적화 방법에 비해 메모리 구조에서 차이를 가지고 있다. 유전 알고리즘과 simulated annealing 과 같이 메모리를 가지지 않는 방법과 분지한계법 같이 고정 메모리를 가지는 방법과는 달리 타부 탐색법에서는 유연한 메모리를 이용하여 한번 방문한 탐색지점에 대해서 반복 탐색을 금지하여 국부최소값에서 벗어날 수 있게한다. 또한 초기해에 많이 의존하지 않고 우수한 해를 찾을수 있고 프로그램하기도 비교적 쉽다는 장점이 있다. 타부탐색법의 탐색 성능을 향상시키기 위해 강화 및 다양화 전략을 도입할 수 있다. 과정을 살펴보면 우선 문제의 제약조건을 만족하는 영역에서 하나의 해를 선택한 후 이를 현재해로 설정한다. 다음 과정에서는 설정한 현재 해 근처에서 이웃해를 생성하고 이웃해를 평가한 후, 가장 우수한 목적함수 값을 가지는 해를 현재해로 설정한다. 이때 이동하는 해의 속성이 tabu list에 포함되어 있으면 이동하지 않고, tabu list에 포함되어 있고 열망기준에 만족하면 tabu로 설정된 해의 속성이 해제되고 해는 tabu list에서 제외된다. 그리고 해가 국부 최소값에 수렴한 경우에는 전역 탐색 성능을 가진 다양화과정을 수행한다. 계속적인 탐색을 통해 정해진 반복 횟수에 도달하거나 해의 개선 정도가 일정수준 이하로 될 경우에 탐색을 종료한다.

2.4 배전계통 고장복구 알고리즘

본 논문에서 제안한 타부탐색법을 이용한 배전계통 고장 복구과정은 다음과 같다.

- I. 고장 구간 입력(임의로 고장발생 구간 입력)
- II. 고장 구간 및 건전 정전구간의 부하량 파악
- III. 연계 개폐기 및 연계 선로의 허용용량 파악
- IV. 여러 연계 개폐기 투입시 부하 분할을 위해 개방한 개폐기 탐색
- V. 건전 부하 절제가능 경로 탐색
- VI. 타부 탐색 실행
 - 제약조건을 만족하는 영역에서 초기해 생성
 - 종합 지수 및 각 평가지수의 결정
 - 분산전원의 공급용량 결정
 - 복구 방안에 대해 우선순위로 조작할 개폐기 결정

3. 사례연구

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 제안한 방법을 참고 문헌의 예제 계통에 적용(7-8)하였다. 예제 계통은 4대의 배전용 변압기, 6대의 피더 및 78개소의 부하단 및 15대의 분산전원으로 구성되어 있고, 이들은 그림.1에 나타내었다. 표.1에서는 분산전원에 대한 정보를 나타내었다. 여기서 분산전원의 최대 발전량은 분산전원의 최대용량에 효율을 곱하여 전류용량으로 제시하였다. 본 논문에서는 4번 변압기에 고장이 발생한 경우를 모의하였다. 이 경우 타부 탐색법을 적용하기 위한 파라미터는 최대 반복회수는 40회, Tabu List의 크기는 10으로 적용하였다.

배전계통 및 분산전원 모의시 전제조건은 다음과 같다.

- 부하는 균등하게 분포된 전류 부하이고, 역률은 0.8(지상)이다.
- 분산전원 설치위치 및 최대 발전량[A]이 제시된다.
- 분산전원은 BDG, CDG, SDG의 형태만 고려한다.

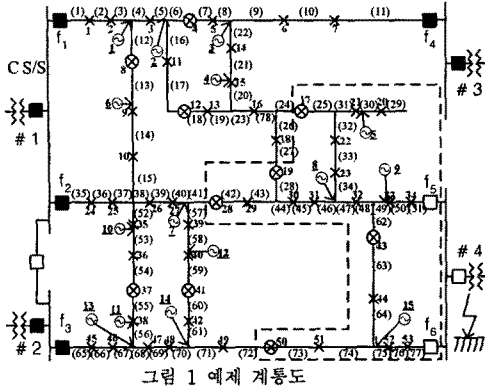


그림 1 예제 계통도

표 1 분산전원에 대한 정보

DGNO.	DG(A)	DGNO.	DG(A)	DGNO.	DG(A)
1	13	6	26	11	52
2	13	7	52	12	52
3	26	8	52	13	26
4	52	9	26	14	13
5	13	10	13	15	26

그림 1에서와 같이 고장이 발생한 경우 건전 정전구간은 점선으로 표시하였으며 건전 정전부하량은 410[A]이다. 또한 건전 정전구간내에 분산전원의 공급량은 117[A]이다. 표 2는 제안한 알고리즘에 의해 구한 복구방안의 종합지수 및 각 평가지수를 우선순위로 나타내었으며 표 3에는 우선순위별 복구방안에 대한 조작될 개폐기명을 나타내었다. 표 4에서는 각 우선순위별 고장 복구 실행 후 연계선로의 변경상태를 나타내었다. 표 5에서 나타낸 바와 같이 제안한 방법에 의해 구한 분산전원의 발전량이 변경됨으로써 고장복구 이후 역조류 발생량을 확인할 수 있었다.

표 2 제안한 알고리즘에 의한 우선순위별 평가지수

순위	항목	지 수					종합지수
		IC ^a	ILB ^b	IS ^b	IP ^b	IV ^b	
1	1	0.9446	0	0	1.0082	0	1.0102
2	1	1.0695	0	0	1.0089	0	1.0110
3	2	0.8645	0	0	1.0082	0	1.0111

표 3 제안한 방법에 의한 우선순위별 개폐기 조작순서

순위	항목	투입 및 개방된 개폐기 조작순서
1		28, 50-투입
2		19, 50-투입
3		22-개방 17, 28, 50-투입

표 4 고장복구 이후 연계피더의 변화량

순위	항목	연계피더명	용량 변화량
1		2	115[A] → 292[A]
		3	251[A] → 367[A]
2		4	220[A] → 397[A]
		3	251[A] → 367[A]
3		4	220[A] → 263[A]
		2	115[A] → 249[A]
		3	251[A] → 367[A]

표 5 분산전원의 발전량 결정

항목 순위	분산전원 NO.	분산전원 발전량
1 3	11	52[A] → 33[A]

4. 결 론

본 논문에서는 분산전원을 고려한 배전계통 고장복구 문제에 타부 탐색법을 적용하였다. 이러한 타부 탐색법을 적용하기 위해 배전계통 고장복구 문제에 적합한 목적함수와 제약조건을 제시하였으며, 이 경우 역조류가 발생하지 않는 최적의 분산전원 발전량을 결정하였다. 제안한 알고리즘의 유용성을 입증하기 위해 참고문헌의 예제 계통[7-8]에서 제안한 방법을 적용한 결과 제시된 복구방안은 정전되는 부하량이 적으면서 정전부하를 적절히 분할하여 각 연계 피더로 할당하는 복구방안과 연계피더의 허용용량을 확보하기 위해 연계 피더의 부하를 미리 절체시켰다. 각 분산전원이 주어졌던 제약조건을 만족되도록 하면서 역조류를 발생시키지 않도록 각 분산전원의 발전량이 결정되는 복구방안을 우선 순위별로 적절히 구해냄을 알 수 있었다.

그러나 제시된 분산전원의 사례는 배전자동화 센터에서 분산전원에 대한 협조제어가 가능해야 한다는 단점이 있다. 따라서 이러한 점은 분산전원 소유주 특히 비전기사업자에 대해 인센티브를 적용한다는 등의 정부의 지원이 이루어져야 한다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

(참 고 문 헌)

- [1] Yuan-Yih Hsu, H. M. Huang, H. C. Kuo, S. K. Peng, C. W. Chang, K. J. Chang, H. S. Yu, C. E. Chow, R. T. Kuo, "Distribution System Service Restoration using A Heuristic Search Approach", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 734-740, April, 1992
- [2] Chen-Ching Liu, Seung Jae Lee, S. S. Venkata, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 619-626, May, 1988
- [3] Seung-Jae Lee, Seong-Il Lim, Bok-Shin Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, Aug., 1998
- [4] 김 용상, 김 슬기, "대체 에너지 전원의 배전계통 연계기술", 대한전기학회지, 제50권 제6호, 2001년 6월.
- [5] Fred Glover, Manuel Laguna, Tabu Search, Kluwer Academic Publisher, 1997
- [6] Joon-Ho Choi, Jae-Chul Kim, Seung-Il Moon, "Integrating Strategy of Dispersed Generation to Automation Distribution Center for Distribution Network Reconfiguration", ICEE proceedings : vol5, pp 2231-2236, 2002
- [7] Aoki K. Nara K, Itoh M, Satoh T, Kuwabara H, "A new algorithm for service restoration in distribution systems", *Power Delivery*, IEEE Transactions on , pp 1832 -1839, Volume 4 Issue: 3 , Jul 1989
- [8] Nara, K.; Hayashi, Y.; Ikeda, K.; Ashizawa, T, "Application of tabu search to optimal placement of distributed generators", *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE* , Volume: 2 , pp. 918 -923 vol.2, 2001