불확실성을 가지는 배전 SCADA 정보로부터 확률론과 휴리스틱 탐색기법을 이용한 고장위치 확인 앨고리즘 개발

고윤석*, 이호정**
남서울대학교 전자공학과*, 한국전력 인천지사**

Identification of a Faulted Area Based on Probability Theory-Heuristic Rules from Distribution SCADA Data including the uncertainty

Yun-Seok Ko*, Ho-Jung Lee**
Namseoul University*, Korea Electric Power Company**

Abstract - 전력 사업자들은 일반 수용가에 대한 공급 신뢰도를 개선하기 위해서 배전 자동화 시스템을 도입, 실시간 고장구간 탐색 및 계통 재구성을 추진하고 있다. 그러나, 고장 감지기 자체의 오동작이나 통신상의 오류, 다중사고의 가능성 등 불확실성을 포함하고 있기 때문에 비상시 사고구간 추정에 많은 노력과 시간비용이 요구될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 확률론과 휴리스틱 탐색법을 이용하여 배전자동화 시스템에 수집된 정보가 불확실성을 포함하는 경우에도 신속하게 사고 예비후보 지역을 제시함으로써 고장구간 추정시간을 최소화할 수 있는 전문가 시스템이 개발된다.

1. 서 론

배전계통은 수용가 지역을 폭넓게 경유하기 위해 구조적으로 복잡한 방사성 구조로 설계된다. 또한 배전계통은 도시지역과 같은 고밀도 부하지역은 물론 어촌과 같은 염해지 등을 가장 근접하여 경유 함으로써 수용가와 관련된 많은 이벤트들을 경험하게 된다.

배전계통의 이러한 구조적인 특성과 공급 환경상의 문제로 일반 수용가에 대한 전력공급 신뢰도는 심각하게 저하된다. 전력계통 설계자들은 이러한 정전문제 발생시, 가능한 한 정전구간을 최소화하기 위해 선로상에 상호 보호협조가 가능한 보호기기들을 설계하였으며, 또한 사고/작업정전시 사고/작업구간만을 정전지역으로 분리함으로써 정전구간을 최소화하기 위해 구분 개폐기를 설계하였다. 그러나, 일반적으로 배전계통 사고시, 고장구간을 확인하는데에 많은 어려움이 따른다. 도심지의 경우 교통체증으로, 농어촌 선로인 경우 장거리 비포장 도로를 지나야 하기 때문에 고장구간 확인 시간이 증가하여 신뢰도는 심각하게 저하된다.

전력사업자들은 이러한 정전문제 발생시 많은 시간비용이 요구되는 순차투입방식이나 선로순시 등을 통한 고장위치 확인 절차를 배제하고 배전 SCADA 시스템의 자동화된 데이터 수집능력을 이용하여 고장구간을 실시간으로 확인하려는 노력을 기울이고 있다. 그러나, 지금까지의 연구들[1-7]이 자동화된 배전계통에서 선로상의 개폐기들을 제어하여 전력계통을 새롭게 재구성하는 문제에에 집중되었다. 물론, 문헌[8]에서는 고장구간을 확인하려는 노력들이 있었지만, 자동화된 배전계통에서 고장 감지기의 오동작, 통신선로상의 오류 등 불확실성이 포함된 수집 정보로부터 사고의 유형 및 위치를 정확히 확인할 수 있는 앨고리즘은 제안되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 확률론과 휴리스틱 탐색법에 근거하여 배전 SCADA 시스템으로부터 수집된 정보로부터 사고 발생시 신속하게 고장구간을 확인할 수 있는 고장구간 앨고리즘을 제안한다.

2. 문제정의

배전계통은 다분할 다연계 구조로 설계된다. 일반적으로 구간 개폐기는 동일한 선로상에 존재하는 개폐기로써 선로의 일부구간을 선로로부터 분리하기 위해서 설계된다. 반면에, 연계용 개폐기는 부하를 타 선로로 절체하기 위해서 설계된다. 그림 1은 배전계통의 다분할 다연계 구조를 설명한다.

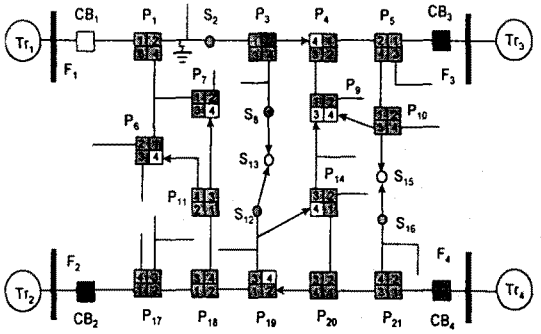

그림 1. 다분할 다연계 구조의 대표적인 배전계통

배전선로에서 사고가 발생하면복구절차의 시작은 고장구간 확인절차로부터 시작한다. 그림에서, 지락이 발생한 부분을 선로사고가 발생한 지역이라 가정하자. 일반적으로, 고장구간을 추정하는 일은 상당히 어려운 작업에 속한다. 특히, 지중선로인 경우 사고구간을 확인할 수 있는 방법이 없기 때문에 더욱 어렵다. 현장 운영자들은 이러한 문제를 해결하기 위해서 순차투입방식에 의해 고장구간을 확인하게 된다. 지락 사고구간을 확인하기 위한 순차투입방식 절차는 다음과 같다. 먼저, 부하측에 가장 가까운 S_8을 개방한 다음, 사고로 개방된 차단기 CB_1을 재 투입한다. 그러나, 사고구간이 아니기 때문에 CB_1은 트립된다. 다음, P_{34}를 개방한 다음 CB_1을 재투입한다. 이때, P_{34}와 S_8사이의 구간이 사고구간이 아니기 때문에 CB_1은 트립된다. 이와같은 절차는 P_{12}가 개방된 후 CB이 트립되지 않음으로써 사고구간이 P_{12}와 S_2사이의 구간임을 확인할 수 있다. 그러나, 이와같은 과정은 주변압기 등 배전 설비에 심각한 전기적 피로를 누적시킴은 심각한 인명피해를 가져올 수 있다. 따라서 [1]에서는 고장 감지기를 제안한다. 만약, 선로 F_1의 지락발생지점에서 사고가 발생하는 경우 F_1상의 개폐기들중에서 CB_1, P_{11}, P_{12}, S_2, P_{31}, P_{34}에 탑재된 고장 감지기만이 고장전류를 감지하기 때문에 고장발생 직후, 신속하게 고장이 P_{12}와 S_2사이에서 발생했음을 알 수 있다. 그러나, 고장 감지기로부터의 정보는 부정확할 수 있다. 고장 감지기 자체의 오류나 통신상의 오류, 다중사고 등의 운영환경은 신속하게 고장 유형과 고장위치를 추정하는 것을 어렵게 한다. 확률론과 휴리스틱 탐색법은 이와같은 상황하에서 고장구간 확인 절차를 확률론과 휴리스틱 규칙에 근거하여 수행함으로써 고장구간을 신속하게 추정하는 것을 가능하게 한다.

3. 휴리스틱 앨고리즘

배전계통 고장감지기들의 전기적 연결성 및 구성은 그림 2와 같은 트리구조로 모델링될 수 있다. 노드에서, ○는 정상상태를, ●는 고장전류 감지상태를 나타낸다.

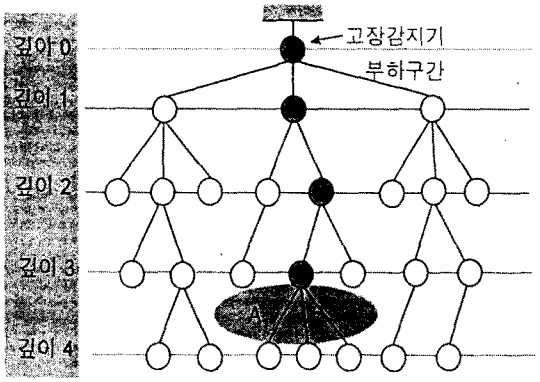

그림 2. 배전계통의 트리구조 모델링

3.1 단일사고, 고장감지기 정보가 정확한 경우

그림 2에서와 같이 A_i으로 표시된 지역에서 사고가 발생한 경우, ●으로 표시된 고장 감지기들만을 추적함으로써 최종적으로 사고발생지역이 A_1지역임을 쉽게 확인할 수 있다. 사고지역 A_1의 부하측 고장 감지기들은 고장전류를 경험하지 않기 때문이다.

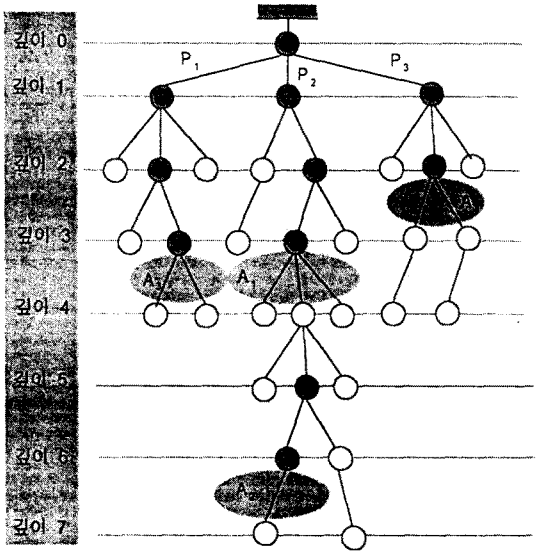

그림 3. 시스템의 트리구조와 고장 감지기 정보

3.2 다중사고/고장감지기 정보가 오류를 가지는 경우

선로상에서는 다중사고가 발생할 수 있으며, 고장감지기나 통신상의 오류로 인하여 정확하게 고장구간을 추정하기 어려운 상황이 발생할 수 있다. 그림 3은 다중사고이거나 고장 감지기 정보가 오류를 포함하는 다양한 상황을 설명하기 위해 도입된 계통의 트리구조를 설명한다. P_{ij}는 i번째 깊이에서 j번째로 분기되는 경로이다.

〔HR 1〕 고장전류를 감지한 노드를 우선 선택하다.
〔HR 2〕 수개의 예비후보지역이 발생된 경우, PA 값이 0.9보다 큰 후보들에 대해 다중사고로 간주한다.

$$PA=\frac{\prod_{i=1}^{n} p(E_i|H)}{\max[p(E_1|H),\ldots,p(E_n|H)]^n} \quad (1)$$

여기서, n은 주어진 선로상의 모든 감지기들의 수를 나타내며, $p(E_i|H)$는 주어진 가설(사고) H에 대한 i번째 증거를 관찰하기 위한 조건확률을 의미한다.
HR 4〕 부하측 사고예비후보를 우선선택한다.
HR 5〕 이미 선택된 경로상의 목적노드를 탐색 우선후보로 한다.
HR 6〕 다회로 개폐기의 전원단자에 속하는 고장 감지기가 목적노드인 경우 개폐기 고장으로 하고 부하단 단자의 고장 감지기가 목적노드인 경우 선로구간 사고로 한다.

3.3 불확실성의 확률론적 처리

배전선로상의 가설들에 대한 사전확률을 다음과 같은 방법으로 설정할 수 있다.

$$p(H_i)=\frac{NOZ_i}{\sum_{k=1}^{n} NOZ_k} \quad (2)$$

여기서, n은 주어진 선로의 구간수를 나타내며, NOZ_i는 i번째 선로구간의 사고건수를 나타낸다. 일단, 시스템 운영자로부터 모든 가설들에 대한 사전확률 $p(H_i)$와 제공된 증거(E_1, E_2,... , E_k)에 근거한 가설들에 대한 조건확률이 얻어지면, 모든 사고지역들, 즉 가설들 (H_1, H_2, ... , H_m)에 대한 사후확률 값, $P(Hi|E_1, E_2, \ldots, E_k)$은 식 (3)을 이용하여 를 계산할 수 있다.

$$p(H_i|E_1\ldots E_n)=\frac{p(E_1|H_i)\ldots p(E_n|H_i)p(H_i)}{\sum_{k=1}^{m} p(E_1|H_k)\ldots p(E_n|H_k)p(H_k)} \quad (3)$$

식 (3)의 사후확률식은 자동화된 배전 SCADA 로부터 수집되는 고장 감지기 정보들의 오류들로부터 불확실성 처리를 위해 식 (4)와 같이 표시될 수 있다.

$$p(H_i \mid E_1\ldots E_n)=\frac{pA_a\, pB_a\, pC_a\, pD_a\, p(H_i)}{\sum_{i=0}^{n} pA_i\, pB_i\, pC_i\, pD_i\, p(H_i)} \quad (4)$$

여기서,
$$pA_i=\prod_{j_1=1}^{n_1} p(E_{j1} \mid H_i)$$
$$pB_i=\prod_{k_1=1}^{m_1} p(E_{k1} \mid H_i)$$
$$pC_i=\prod_{j_2=1}^{n_2} p(E_{j2} \mid H_i)$$
$$pD_i=\prod_{k_2=1}^{m_2} p(E_{k2} \mid H_i)$$

pA_i는 i번째 가설에 대해서 고장전류를 경험할 위치에 있는 고장 감지기들이 고장전류 감지상태를 보일 조건확률들의 적이며, pB_i는 그 반대의 경우이다.반면에, PC_i는 i번째 가설에 대해서 고장전류를 경험하지 못할 위치에 있는 고장 감지기들이 고장전류 미감지상태를 보일 확률들의 적이며 pD_i는 그 반대의 경우이며, n은 추정시간을 최소화하기 위해 휴리스틱 탐색에 근거한 사고지역 예비후보들의 수로 제한된다.

* 4:시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서는 고장 감지기가 각 개폐기 위치에 하나씩 존재한다고 가정한다.

4.1 모든 가설들에 대한 사전확률 설정

표 1은 구간특성들에 데이터를 이용하여 각 가설들에 대한 사전확률들을 보인다.

표 1. 가설(사고구간)들의 사전확률

구간특성	부하구간	p(H_i)
안정지역	CB-$P_{10.1}$ $P_{5.1}$	0.1
일반지역	$P_{10.1}$-)$P_{19.2}$	0.2
빈번지역	$P_{5.1}$-말단	0.3
다발지역	$P_{19.2}$-) 말단	0.4

여기서는, 각각의 가설(고장)들에 대해 고장 감지기가 정상적으로 동작할 확률을 0.8로 한다. 반면에, 고장 감지기 상태는 자체의 오동작이나 통신상의 오류로 인해 부정확한 결과를 보일 수 있는데, 주어진 가설들에 대해 전원측 고장감지가 오동작을 보일 확률을 0.2로 하고 부하단 측 고장 감지기가 오동작할 확률을 0.2로 한다. 그림 4는 제안된 앨고리즘의 유용성을 평가하기 위한 배전계통 모델을 보인다.

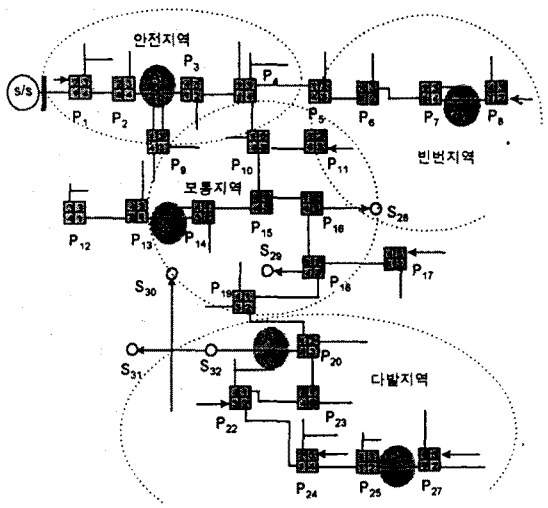

그림 4. 시험 평가를 위한 배전 시스템

4.2 정확도 검증을 위한 적용 예

본 연구에서는 고장 감지기들의 오동작 상황을 설명하기위해 "$P_{19.2}$, $P_{22.1}$상의 고장감지기 오동작과 부하지역 A_5에 대한 사고를 모의한다.

고장전류를 경험할 위치에 있는 선로상의 개폐기들 CB, P_{11}, P_{14}, P_{21}, P_{24}, P_{91}, P_{92}, P_{31}, P_{32} P_{41}, $P_{10.1}$, $P_{10.4}$,$P_{15.1}$, $P_{15.4}$, $P_{16.1}$, $P_{16.4}$, $P_{18.1}$, $P_{18.3}$, $P_{19.1}$, $P_{19.2}$, $P_{20.1}$, $P_{20.3}$, $P_{23.1}$, $P_{23.4}$, $P_{22.2}$, $P_{24.1}$, $P_{24.4}$, $P_{25.1}$, $P_{25.2}$상의 고장 감지기들은 고장감지 상태를 보이나 $P_{19.2}$, $P_{22.1}$상의 고장 감지기들이 오동작을 함으로써 3개의 예상후보지역을 추론한다. 3개의 예비후보들은 개폐기 C_1={$P_{19.2}$}, 구간 C_2={$P_{22.2}$-)$P_{24.1}$}, 구간 C_3=A_5인데, 이들이 동일 공급경로 선로상에 존재하기 때문에 단일사고로 가정되며, 3개의 예비후보들 중 사후확률을 근거로 우선순위가 가장 높은 부하지역 A_5가 사고지역으로 추론된다.

$$p(C_1)=\frac{0.8^{14}\times0.2^{1}\times0.8^{89}\times0.2^{1}\times0.2}{\Delta}=0.0294$$

$$p(C_2)=\frac{0.8^{15}\times0.2^{2}\times0.8^{88}\times0.2^{0}\times0.2}{\Delta}=0.0294$$

$$p(C_3)=\frac{0.8^{22}\times0.2^{0}\times0.8^{83}\times0.2^{0}\times0.4}{\Delta}=0.9412$$

$$\Delta=(0.8^{21}\times0.2^{0}\times0.8^{75}\times0.2^{9}\times0.2)+(0.8^{25}\times0.2^{1}\times0.8^{75}\times0.2^{4}\times0.4)+(0.8^{28}\times0.2^{2}\times0.8^{75}\times0.2^{0}\times0.4)$$

5.연구결과

본 연구에서는 자동화된 배전계통에서 고장감지기 정보로부터 고장구간을 신속하게 추정할 수 잇는 고장구간 추정 앨고리즘을 제안하였다. 특히, 제안된 앨고리즘은 확률론과 휴리스틱 탐색법을 도입하여 고장 감지기 오동작이나 통신상의 에러 등 부정확한 수집정보로부터 단일 고장이나 다중고장 유형 및 사고위치를 높은 신뢰도로 신속히 추정할 수 있도록 하였다. 제안된 앨고리즘은 한전의 실선로들 중 지중과 가공이 혼재된 복잡한 선로를 대상으로 그 정확성이 검증되었다. 실험결과들은 비교적 정확성과 유용성을 보임으로써 배전자동화시스템에 적용되어 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

[1] Castro, C. H., J. B. Bunch, and T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. pp. 549-557, March/April 1980.

[2] Aoki, K., H. Kuwabara, T. Satoh, and M. Kanezashi, "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1865-1872, October 1988.

[3] Kim, H. Y. S. Ko, and K. H. Jung, "Artificial Neural-Net Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 3, pp 1356-1366, July 1993.

[4] Jung, K. H., H. Kim, Y. S. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm for Automated Distribution Systems based on Artificial Intelligence Approach," IEEE PWRD WM-93 Feb. 1993.

[5] 고윤석, 김호용, "인공지능기법을 이용한 배전자동화시스템의 종합제어전략 수립지원 소프트웨어의 개발", 전기학회 논문지, Vol. 44, No. 5, pp 563-573, 1995년 5월.

[6] 고윤석, 이기서, "배전 SCADA 시스템의 부하분담 균등화 및 선로손실 저감화 타스크를 위한 실시간 전문가 시스템의 구현", 전기학회논문지, Vol. 44 , No. 11 ,pp. 1423-1429, 1995년 11월.

[7] 고윤석, 김호용, 장정태, 하복남, 이기서외 1인, "효율적 휴리스틱에 근거한 실시간 배전 SCADA 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 46 , No.4 ,pp.461-467, 1995년.

[8] Jarventausta, P., P. Verho, I. Partanen, "Using Fuzzy Sets to Model the Uncertainty in the Fault Location Process of Distribution Networks", IEEE Trnas. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 954-60, April 1994.