

배전 SCADA 기능을 이용한 고장타입·고장위치 진단 전문가 시스템

고윤석* · 신현용** · 신덕호** · 이기서**
 남서울대학교 전자공학과* · 광운대학교 제어계측공학과**

An Expert System for the Diagnosis of the Fault Type and Fault Location in the Distribution SCADA System

Yun-Seok Ko* · Hyun-Yong shin* · Duc-Ko Sheen** · Kee-Seo Lee**
 Namseoul University* · KwangWoon University**

Abstract - 배전선로상에서는 상 불평, 고저항 지락사고나 선로탈락이 발생할 수 있다. 또한, 고장 감지기 정보의 불확실성 등으로 배전 SCADA 정보로부터 정확한 사고유형과 사고위치를 확인하는 작업은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 배전선로상에서 발생할 수 있는 다양한 사고들에 대해 사고유형과 사고발생 위치를 신속하고 정확하게 추론할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 전문가 시스템은 배전 SCADA기능과 수집된 데이터를 종합적으로 활용하게 되는데, 특히, 정확한 사고유형 확인을 위해 절분점 감시 메카니즘이 새롭게 채택되며, 또한, 선로사고시 시스템 운영자들의 오류로부터 발생할 수 있는 파급효과를 최소화하기 위해 고장구간의 자동진단 전략이 개발된다.

1. 서 론

배전계통은 도심지, 염해지, 산림지 등을 경유하기 때문에 자동차 추돌이나 수목접촉 등으로 인한 잦은 정전사고를 경험하게 된다. 따라서, 전력 사업자들은 컴퓨터 감시제어기능을 이용하여 고장위치 확인과 복구절차를 원방에서 직접 실행함으로써 전력공급 신뢰도를 극대화할 수 있는 배전 SCADA 시스템을 도입, 운영하고 있는데, 배전선로상에 발생하는 시스템 이벤트들의 다양성과 불확실성으로 인해 고장구간 확인에 많은 어려움이 발생, 배전 SCADA 시스템의 유효성이 심각하게 저하되고 있다.

실제로, 배전선로상에서는 상 불평형, 고저항 지락사고, 선로탈락이 발생할 수 있다. 또한, 고장위치 확인을 위해 선로 상에 설치되는 고장 감지기들로부터 수집되는 정보가 오동작이나 부동작 등 불확실성을 가질 수 있기 때문에 기존의 고장처리 메카니즘으로는 정확한 사고위치를 확인하는 작업은 극히, 어려운 작업이다. 참고문헌 [1]에서는 배전자동화시스템에 고장구간 확인을 위한 고장 감지기 개념을 제안하며, 참고문헌 [2-11]에서는 배전계통 부하절제 및 고장구간 추정을 위한 방법들이 제안된다. 특히, 문헌 [12]에서는 확률론을 이용하여 불확실성을 포함하는 배전 SCADA 시스템의 고장 감지기 상태정보로부터 고장위치를 확인할 수 있는 고장위치 확인 알고리즘을 제안한다. 그러나, 이들은 배전계통상에서 발생하는 다양한 이벤트들과 불확실성을 포함하는 실제적인 운영환경에 효과적으로 적용하기 어렵다. 즉, 고장구간 추정의 정확성을 높이기 위해서는 SCADA 감시제어 기능과 수집 데이터들을 종합적으로 이용하여 고장구간 추정의 신뢰도를 높일 수 있는 효율적인 고장구간 추정 전략이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 배전선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대한 이벤트 유형과 발생위치를 신속하고 정확하게 추론할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다.

2. SCADA 운영환경

배전계통은 일반 수용가들에게 22.9KV 레벨의 전력

을 공급하기 위해서 배전 변전소의 주변압기, 22.9KV 모선, 선로 보호용 차단기(FCB:Feeder Circuit Breaker), 선로구간, 리클로우저, 개폐기, 주상변압기 등으로 구성된다. 그림 1은 배전계통의 구성과 그 요소를 보인다.

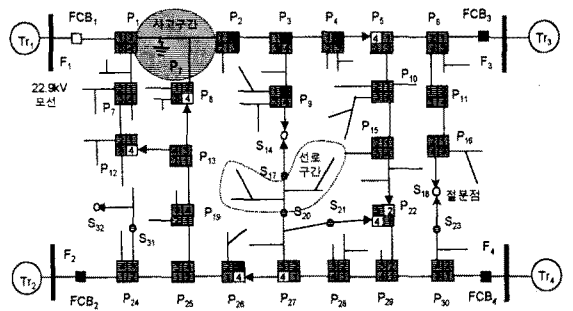


그림 1 배전계통의 구성

Fig. 1 The composition of distribution system

그림 2는 배전 SCADA 시스템의 구성을 보인다. 배전 SCADA 시스템은 감시제어 노드, 전문가 시스템, DB 노드 그리고 MMI 노드와 FEP, SCCU 그리고 RTU로 구성된다.

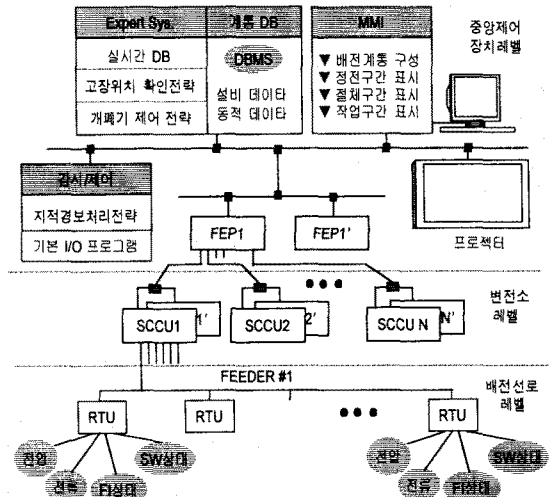


그림 2 배전 SCADA 시스템 구성

Fig. 2 Composition of distribution SCADA system

FEP는 2중화 구조로 설계되는데, 스케줄러에 따라 (CB상태)와 선로상의 개폐기들에 대한 (전압, 전류, FI 상태, 개폐기 상태)등을 정해진 주기에 따라 수집한다. 또한, 상위 노드의 명령에 따라 CB나 개폐기들의 상태를 제어한다. SCADA 시스템의 감시제어 절차는 다음과 같다. 먼저, 감시제어 노드는 FEP로부터 I/O 기능을 이용하여 CB 정보를 주기적으로 수집하며, 경보 처리 모듈에 의해 사고유형을 정확히 확인한다. 다음, 비상시 전문가 시스템을 구동시켜 실시간 DB상의 계통 연결성을 탐색하여 고장위치를 확인하고 계통 운영목적에 맞는 계통 재구성 전략을 수립하게 된다. 다음 MMI를 통해 개폐기들을 수립된 전략에 따라 순차적으로 제어한다. 그러나, 선로상에는 고저항 지락사고나 선로탈락의 경우 지락전류의 크기가 작거나 흐르지 않아 계전기 동작하지 않기 때문에 지락사고를 정확히 감지하기 어렵다. 고장전류가 정확히 흐르는 경우라도 고장위치 확인을 위해 선로상에 설치된 고장 감지기(Fault Indicator)들이 오동작하거나 부동작할 수 있기 때문에 사고위치를 정확히 확인하기 어렵다.

3. 경보처리 전략

본 연구에서는 CB대신에 절분점을 주기적으로 감시하는 절분점 감시 메카니즘에서 사고유형 확인을 위한 수개의 경보처리 규칙(RL : Rule)들이 제안된다.

- RL 1] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작으면 시스템 사고이다. 이 규칙은 CB 감시 메카니즘 대신에 절분점 감시 메카니즘을 이용하기 위한 규칙이다.
- RL 2] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 개방 상태이면 선로사고이다.
- RL 3] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 개방 상태이고 CB 3상의 고장감지기가 고장 감지상태인 경우 3상단락 사고이다.
- RL 4] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 개방 상태이고 CB 2상의 고장감지기가 고장 감지상태인 경우 선단 단락사고이다.
- RL 5] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 개방 상태이고 CB FI가 영상전류 감지상태인 경우 1선 지락 사고이다.
- RL 6] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 투입 상태이고 CB 전압, 전류가 0가 아니면 고저항 지락사고이거나 선로탈락 사고이다.
- RL 7] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 투입 상태이고 CB 전압, 전류가 0이고 CB 고장 감지기가 감지상태이면 선로사고이다.
- RL 8] 만약, 절분점 전압이 E/2보다 작고 CB가 투입 상태이고 CB 전압, 전류가 0이고 CB 고장 감지기가 비감지상태이면 모선사고이다.
- RL 9] 만약, 선로사고이고 동일선로의 직렬 경로상에서 단 사고후보지역이 존재하면 단일사고로 간주한다.
- RL 10] 만약, 선로사고이고 동일선로의 2개이상의 분기선로상에 사고후보지역이 존재하면 선로 다중사고로 간주한다.

4. 고장구간 결정 전략

고장구간은 아래의 수개규칙들에 의해서 결정된다.

- RL 11] 사고 이벤트가 RL 6)을 만족하는 고저항 지락 사고이거나 선로탈락 사고이면 최초의 정전상태 구간을 사고부하구간으로 한다.
- RL 12] 사고 이벤트가 RL 8)을 만족하는 변전소 모선 사고이면 CB전원단을 고장구간으로 한다.
- RL 13] 사고 이벤트가 RL 2,3,4,5,7)중의 한 규칙을 만족하는 선로사고이면 최종 고장감지 노드의 부하구간

을 고장구간으로 한다. RL 14] 사고 이벤트가 RL 9, 10)을 만족하는 선로사고이면 HR 1~4)에 의해 사고가능성이 가장 높은 부하구간을 사고구간으로 결정한다.

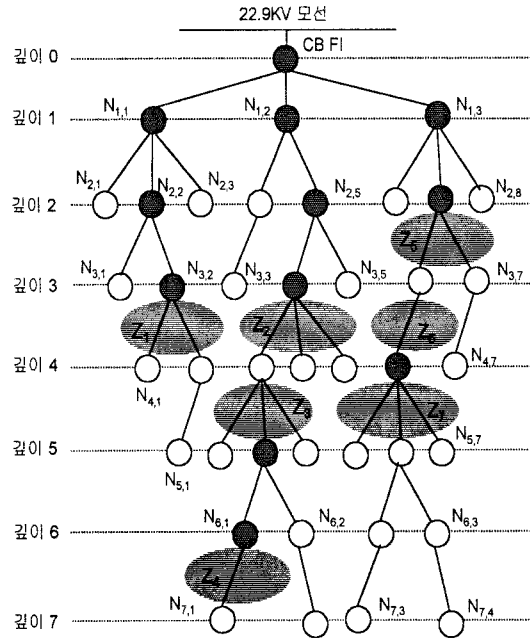


그림 3 고장 감지기 탐색트리 구조
Fig. 3 Search tree structure of fault indicator

- HR 1] 전원투입/부하투입시 투입 부하구간내의 사고후보지역이 우선선택된다.
- HR 2] $\max(d_1 + d_2 - d_3)$ 을 가지는 사고후보그룹이 우선선택된다.
- HR 3] $\max(p(H_i))$ 값을 가지는 구간이 우선선택된다. [12]

$$p(H_i | E_1 E_2 \dots E_n) = \frac{pA_i pB_i pC_i pD_i p(H_i)}{\sum_{k=1}^n pA_k pB_k pC_k pD_k p(H_k)}$$

여기서, $pA_k = \prod_{j_1=1}^{q_1} p(E_{j_1} | H_k)$

$$pB_k = \prod_{j_2=1}^{q_2} p(E_{j_2} | H_k)$$

$$pC_k = \prod_{j_3=1}^{q_3} p(E_{j_3} | H_k)$$

$$pD_k = \prod_{j_4=1}^{q_4} p(E_{j_4} | H_k)$$

5. 추론절차

SCADA 시스템의 고장구간 확인절차는 다음과 같은 수개의 단계로 구성된다. 먼저, 감시제어 노드상의 경보처리 모듈은 FEP로부터 절분점상에 위치하는 모든 개폐기들의 전압 값 V_e 를 수집하여 RL 1)의 만족여부를 검사한다. 만약, RL 1)을 만족하는 선로가 존재하는 경우, 그림 4에 보인 절차에 의해 사고유형을 확인하고 다

음 사고위치를 확인하게 된다.

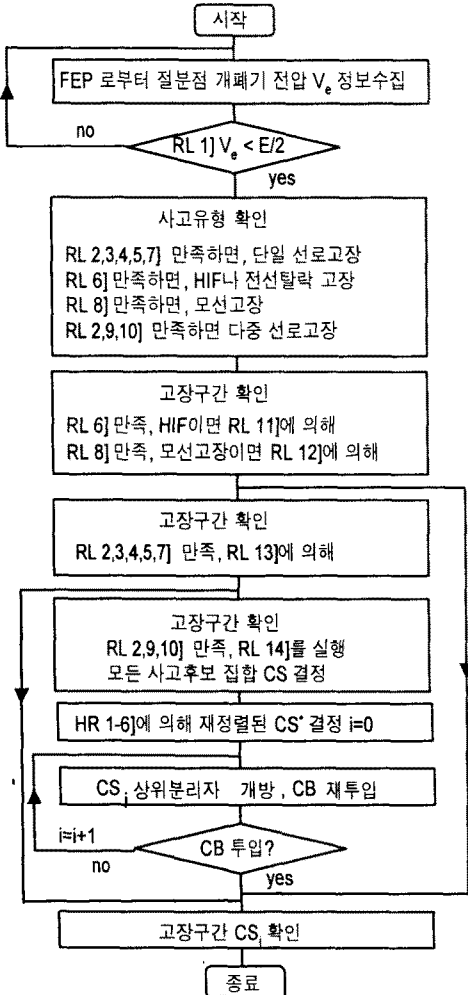


그림 4 고장구간 진단절차
Fig. 4 Fault Section Diagnosis Procedure

6. 시뮬레이션 결과

그림 5에 보인 바와 같이 2개의 완전한 배전선로 F₁, F₂와 말단지역만을 보이는 두 개의 배전선로 F₃, F₄로 구성되는 배전계통에 대해 제안된 문제해결전략의 유효성이 검증된다.

모의 1) F₁의 A₃지역 HIF(CB[ON]).
S₃₁의 V_e=4000V, V_{CB}=12200V)
경보처리 모듈은 S₃₁의 V_e(E/2이므로 RL 1]에 의해 시스템 이벤트가 발생했음을 확인한다. 다음, CB가 투입상태이고 CB단의 전압 V_{CB}>E/2이므로 경보처리 규칙들 중 RL 6]을 만족, HIF나 전선탈락 사고임을 확인한다. 따라서, 전원단에서 부하단까지의 고장구간을 너비반복 탐색법에 의해 탐색, 전압을 확인하게 되는데, CB, P_{1.1}, P_{1.3}, P_{1.4}, P_{2.1}, P_{2.3}, P_{2.4}, P_{9.1}, P_{9.4}, P_{9.3}, P_{9.2}, P_{3.1}, P_{3.3}, P_{3.2}, P_{1.3}, P_{4.1}, P_{4.3}, P_{4.4}, P_{10.1}, P_{10.4}, P_{10.3}, P_{5.1}, P_{5.2}, P_{5.3}, P_{15.1}, P_{15.2}, P_{15.4}, P_{11.4}, P_{11.3}, P_{6.1}, P_{6.2}, P_{6.3}, P_{14.1}, P_{14.2}, P_{14.3}, P_{14.4}, P_{16.1}, P_{16.4}, P_{16.3}, P_{7.1}, P_{7.3}, P_{7.4}까지

전압값이 E/2보다 크고 부하 전류가 흐르나 P_{13.1}에서 전압값이 E/2보다 작고 부하전류가 흐르지 않으므로 고장구간 결정 전략 RL 1]에 의해 A₃지역이 HIF/전선탈락 사고지역임을 확인할 수 있다.

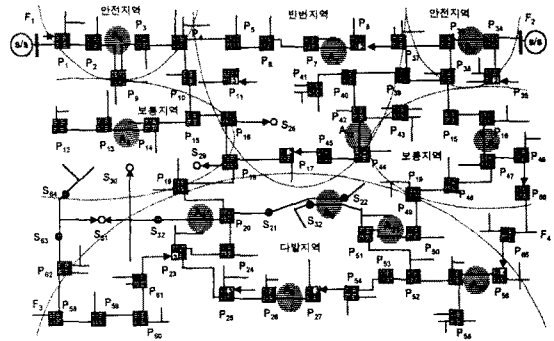


그림 5 성능평가를 위한 시험 배전계통
Fig. 5 The distribution system for performance evaluation

모의 3) F₂의 A₁₂지역 단일사고(CB[ON], P_{56.4}의 V_e=50V, V_{CB}=50V, F_{ICB}(고장감지)))
경보처리 모듈은 P_{56.4}의 F₂측에 대한 V_e(E/2이므로 RL 1]에 의해 시스템 이벤트가 발생했음을 확인한다. 다음, CB가 투입상태이고 CB단의 전압 V_{CB}<E/2, CB의 고장 감지기 상태 F_{ICB}가 고장전류 감지상태이므로 RL 7]에 의해 계전기 부동작 상황하의 선로사고임을 확인할 수 있다. 따라서, 전원단에서 부하단까지의 고장 감지기 상태를 탐색하게 되는데, CB, P_{34.1}, P_{34.4}, P_{36.1}, P_{36.4}, P_{38.1}, P_{38.3}, P_{15.1}, P_{15.2}, P_{16.1}, P_{16.4}, 까지의 전원공급경로상의 개폐기들에 상의 FI상태가 고장감지상태를 보이는 반면 P_{47.1}부터 부하단의 모든 개폐기들에 대한 FI상태들이 미감지상태를 보이므로 RL 13]에 의해 사고지역이 A₁₂임을 확인할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 불확실성을 포함하는 배전 SCADA 정보로부터 배전선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트가 발생할 때 신속하고 정확한 사고유형 인식 및 고장구간 진단을 지원할 수 있는 전문가 시스템을 제안하였다. 전문가 시스템은 고저항 지락사고, 전선탈락사고, 모선사고 또는 불확실성을 가지는 FI정보를 포함하는 지락사고 등 수개의 시뮬레이션 결과에서 신속하고 정확한 추론결과를 보임으로써 그 유효성을 입증하였다.

(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.
[11] 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.
[12] 고유석, 이호정, "불확실성을 가지는 배전 SCADA 정보로부터 확률론과 휴리스틱 탐색법을 이용한 고장 구간 확인 알고리즘 개발", 전기학회 논문지, Vol. 48, No. 12, pp. 1423-1248, 1998년 12월.