

보호 계전기와 차단기의 동작 순서를 고려한 전력 시스템 사고 구간 진단을 위한 전문가 시스템

민상원, 이상호, 박종근
서울대학교 전기공학부

An Expert System for Fault Section Diagnosis in Power Systems using the information including operating times of actuated relays and tripped circuit breakers

S.W. Min, S.H. Lee, J.K. Park
SoEE, SNU

Abstract - Multiple faults are hard to diagnose correctly because the operation of circuit breakers tripped by former fault changes the topology of power systems. The information including operating time of actuated relays and tripped circuit breakers is used for considering changes of the network topology in fault section diagnosis. This paper presents a method for fault section diagnosis using a set of matrices which represent changes of the network topology due to operation of circuit breakers. The proposed method uses fuzzy relation to cope with the unavoidable uncertainties imposed on fault section diagnosis of power systems. The inference executed by the proposed matrices provides the fault section candidates in the form of a matrix made up of the degree of membership. Experimental studies for real power systems reveal usefulness of the proposed technique to diagnose multiple faults.

1. 서 론

전력 계통 사고 구간의 빠르고 정확한 진단은 신속한 복구를 위해서 매우 중요하다. 고장 진단은 전문가의 지식에 기반한 복잡한 영역의 문제이기 때문에 지금까지 여러 가지 전문가 시스템이 제시되어 왔다. 초기에 사용된 룰 베이스 전문가 시스템[1]은 수많은 규칙을 나열해야 하므로 시스템을 모델화하여 여러 가지 다른 상황에 적용시킬 수 있는 모델 베이스 전문가 시스템[2]이 제안되었다. 그러나 모델 베이스 시스템은 추론 과정에서 많은 시간이 소비되는 단점이 있다. 신경망 회로[3]나 유전자 알고리즘[4]을 고장 진단에 적용하였을 때에는 각각 빠른 속도와 실제통에의 적용이 용이하다는 장점이 있으나 고장 진단 과정에서 전력 계통의 보호 시스템의 동작을 표현하는 부분이 미흡하다. 퍼지 관계를 이용한 고장 진단[5,6]은 계통의 불확실성을 표현하기에 적당하다. 특히 sagittal diagram을 이용한 [6]의 경우 보호 기기들과 계통과의 관계를 구체적으로 보여준다. 최근, 이러한 장점을 바탕으로 sagittal diagram을 이용하여 보호 기기들의 동작에 의한 계통의 토폴로지 변화가 고장 진단에 적용[7]되었다. 그러나 기존의 방법[6]과 달리 계통의 토폴로지 변화에 따라 새로운 sagittal diagram을 구성해야 하기 때문에 실제통에 적용하기에 어려운 점이 있다.

본 논문에서는 [7]에서 제안된 시간 정보를 고려한 진단 방법을 바탕으로 계통의 토폴로지를 행렬의 형태로 표현하여 토폴로지의 변화에 따라 보호 기기와 계통 간의 퍼지 멤버십값을 쉽게 변화시키는 방법을 소개한다. 이는 구간 중심의 sagittal diagram 표현법과 달리 동작한 계전기를 중심으로 이루어지는 진단 과정을 통해

계통의 모든 구간들의 퍼지 관계를 미리 구성해야 할 필요가 없어졌다.

2. 전력 계통의 보호 시스템

2.1 보호 시스템의 동작 과정과 불확실성

계통에서 사고가 발생하면 보호 계전기는 고장 위치를 판별하여 적당한 차단기를 동작시켜 고장 구간을 계통으로부터 분리한다. zone 1의 계전기의 경우에는 자기 구간의 85%정도, zone 2 계전기의 경우 120~150%정도 보호하도록 되어 있다. [6] 본 논문에서는 동작하는 우선 순위에 따라 3개의 stage로 보호되는 시스템을 고려한다. stage 1과 stage 2는 zone 1의 주 보호 계전기와 후비 보호 계전기이며 stage 3은 zone 2를 보호하는 후비 보호 계전기이다. 이러한 단계적인 보호 시스템으로 이루어진 모의 계통을 다음 그림 1과 같이 구성하였다.

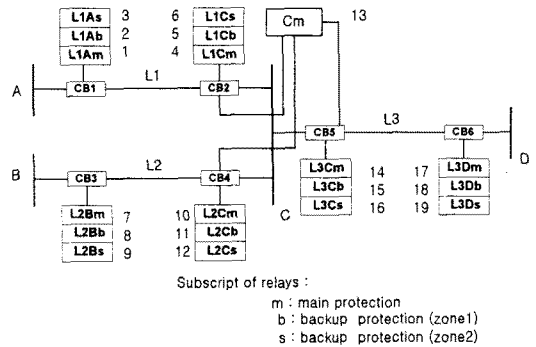


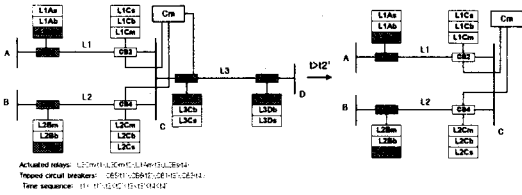
그림 1 전력 시스템 모의 계통도

일반적으로 보호 시스템의 동작 과정은 모든 기기들이 올바르게 동작하지 않을 수도 있다는 가능성으로 바탕으로 구성되어 있다. 특히, stage 3의 zone 2 후비 보호 계전기의 경우 인접 구간 전로의 길이가 자기 구간에 비해 현저히 길면 그 구간의 사고를 감지하기가 더욱 어려워진다. 본 논문에서는 이러한 불확실성을 처리하기 위하여 전문가 시스템에 퍼지 이론을 적용한다.

2.2 계통의 토폴로지 변화

계통의 보호 시스템의 zone 2의 계전기들은 zone 1의 이전 단계의 계전기들이 작동해야 함에도 불구하고 작동하지 않은 경우에 백업해 주는 기능을 가지고 있다. 이 때 zone 2의 백업할 기기들은 전적으로 계통의 토폴로지에 따라 결정된다. 예를 들면 그림 1의 모의 계통도에서 L1이나 L2의 사고 시에 zone 1의 계전기들이

CB2나 CB4를 트립시키지 못한 경우 zone 2의 L3Ds 계전기가 CB6을 트립시켜서 계통을 보호한다. 그러나 계통에서 L3이 어떤 이유에서 제거된 후에는 L1이나 L2의 사고 시에 L3Ds의 기능은 할 수 없게 된다. 이는 그림 2의 사고 예에서 명확하게 보여 준다.



(a)L3과 L1의 다중 사고 (b)토폴로지의 변화
그림 2 계통의 토폴로지

3. 보호 시스템의 퍼지 관계와 행렬 표현

3.1 구간 사고와 계전기 동작 사이의 퍼지 관계

보호 시스템을 퍼지 관계로 표현하기 위해 stage별로 멤버십값을 정한다. 표 1의 각 stage 멤버십값(7)은 사고가 발생하였을 때 그 stage의 모든 보호 기기가 제대로 동작하였을 때 해당 구간 사고와의 관련 정도에 대한 값을 의미한다.

표 1 각 stage의 멤버십값

Stage <i>i</i>	1	선로	모선	3
		2	2	
멤버십값 S_i	0.995	0.800	0.750	0.650

각 stage들의 멤버십값이 결정되면 각 계전기들과 그 의 해당 구간 간의 퍼지 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l_i = \frac{S_i}{n_i^w} \quad (1)$$

여기서 l_i 는 stage i 의 각 계전기의 멤버십값, S_i 는 stage i 의 멤버십값, w 는 유니온 함수의 파라미터, n_i 는 stage i 에 속하는 계전기들의 개수이다. 식 (1)은 토폴로지 변화를 고려하지 않았을 때 stage i 에 속하는 모든 계전기들의 멤버십값을 퍼지 유니온한 것이 S_i 가 되도록 하였다. 이 때 유니온 함수는 Yager class에서 정의된 함수를 사용하는데 그 식은 다음과 같다.

$$u_w(a, b) = \min \left[1, (a^w + b^w)^{\frac{1}{w}} \right] \quad (2)$$

본 논문에서 w 는 동작한 계전기가 많을수록 해당 구간의 사고 가능성을 높일 수 있도록 비교적 유연한 값인 3을 사용한다.

3.2 보호 시스템의 행렬 표현

계통의 토폴로지를 나타내기 위하여 토폴로지 행렬을 구한다. n 개의 모선으로 이루어진 계통은 0과 1을 구성 원소로 갖는 $n \times n$ 의 토폴로지 행렬 T 로 나타낼 수 있는데, T 는 모선 i 와 j 가 직접 연결되어 있으면 ij 원소는 1이고, 대각 성분을 포함한 나머지는 모두 0인 행렬이다. 그림 1의 모의 계통의 토폴로지 행렬 T 를 구

해보면 다음과 같다.

$$T = \begin{matrix} & A & B & C & D \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

다음은 행렬 T 를 바탕으로 각 모선을 잇는 선로의 차단기를 행렬 CB 를 구성한다. 이 때 zone 2 계전기의 보호 영역을 알 수 있도록 차단기가 가까운 쪽의 모선번호가 행번호와 일치하도록 구성한다. zone 2 계전기의 보호 영역은 계전기 행렬 구성 부분에서 설명한다. 예를 들면 그림 1의 CB1은 모선 A와 모선 C사이 에 놓여 있지만 모선 A와 가까운 쪽에 있으므로 행렬 CB 의 (1,3) 성분에 위치시킨다. 이와 같은 규칙으로 그림 1의 모의 계통의 CB 를 구하면 다음과 같다.

$$CB = \begin{matrix} & A & B & C & D \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 2 & 4 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 6 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

마지막으로 각 차단기를 트립하는 계전기들의 행렬들을 구성한다. 3개의 stage로 보호하는 시스템이므로 계전기 행렬 역시 3개로 구성한다. 계전기 행렬에서 각 계전기는 자신이 트립시키는 차단기 행렬과 같은 위치에 놓여 진다. 다만 모선을 보호하는 차동 계전기는 자신이 보호하는 모선 번호와 일치하는 대각 성분에 놓인다. 그림 1의 모의 계통의 계전기 행렬들은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} & A & B & C & D & & A & B & C & D & & A & B & C & D \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 \\ 4 & 10 & 13 & 14 \\ 0 & 0 & 17 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 5 & 11 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 18 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 \\ 6 & 12 & 0 & 16 \\ 0 & 0 & 19 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (5) & (6) & (7) \end{matrix}$$

위의 행렬들로부터 각 계전기가 담당하는 구간을 쉽게 알 수 있다. zone 1의 선로 계전기들의 자기 구간만 보호하므로 행렬 상에서 매우 명확하다. 모선의 차동 계전기는 자신과 같은 행의 차단기를 담당한다. 위에서 설명하였듯이 zone 2의 보호 시스템은 자기 구간의 인접 구간을 담당하며 이전 stage의 보호 기기들이 동작하지 않아야 동작하는 복잡한 동작 규칙을 가지고 있는데 이는 행렬 상에 간단하게 표현되어 있다. 즉, zone 2 계전기는 그 계전기 위치의 열번호를 행번호로 갖는 차단기가 동작하지 않았을 경우의 후비 보호 시스템이다. 또한 자신의 행번호를 열번호로 갖는 차단기에는 모선의 stage 2 후비 보호이고 그 나머지 차단기에 대해서 선로의 stage 3 후비 보호이다. 이는 다음 장에서 모의 계통의 사고를 예를 들어 구체적으로 설명한다.

4. 고장 진단 과정

위의 행렬들을 이용하여 사고 구간을 진단하는 과정은 다음과 같다.

- 1단계 : 동작한 계전기를 동작 순서대로 나열한 후 그 의 stage를 조사한다.
- 2단계 : 동작한 계전기에 의해 트립된 차단기와 같은 위치의 토폴로지 행렬의 성분을 0으로 만든다.

- 3단계 : 동작한 계전기를 zone 1의 선로 계전기, 모선의 차동 계전기, zone 2 계전기로 나눈다.
 4단계 : 변화된 계통의 토폴로지에서 동작한 계전기가 담당하는 모든 구간의 퍼지 멤버십값을 식 (1)을 이용하여 구한다. 이 때 zone 1의 선로 계전기만은 토폴로지 변화에 그다지 영향을 받지 않기 때문에 변화되지 않은 토폴로지 행렬 상에서 멤버십값을 구한다.
 5단계 : 각 계전기가 담당하는 구간이 겹치면 각 퍼지 멤버십값을 식 (2)에 따라 유니온을 한다.

위의 각 단계를 그림 2 모의 계통에서의 다중 사고에 적용시키면 다음과 같다. 그림 2의 사고에서 동작한 계전기는 순서대로 stage 1의 14, stage 1의 17, stage 1의 1, stage 3의 9이다. 먼저 stage 1의 14, 17 계전기가 CB5, CB6을 트립시키므로 토폴로지 행렬 T 와 각 퍼지 멤버십값은 다음과 같다.

$$T = \begin{matrix} & A & B & C & D \\ A & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & & \\ B & & & & \\ C & & & & \\ D & & & & \end{matrix}$$

그림 3 L3의 사고 후 T 와 진단 과정

위의 T 는 그림 2(b)의 토폴로지를 표현한다. stage 1의 1은 L1의 주 보호 계전기이므로 그 보호 영역이 명확하다. stage 3인 계전기 9는 행B, 열C에 위치하므로 T 의 행C, 즉 L1과 모선 C가 자신의 보호 영역이다. 그림 4는 L1Am과 L2Bs의 동작에 의한 사고 진단 과정이다.

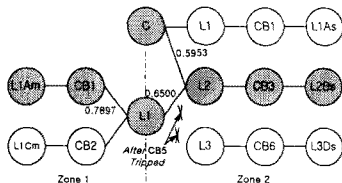


그림 4 L1 사고의 진단 과정

계전기의 동작에 의한 각 구간의 사고 가능성은 (8)의 행렬식으로 표현된다.

$$\text{FaultCandidates} = \begin{matrix} & A & B & C & D \\ A & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.9154 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5953 & 0.9950 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & & \\ B & & & & \\ C & & & & \\ D & & & & \end{bmatrix} \quad (8)$$

행렬 (8)은 모선 C의 사고 가능성이 매우 작으므로 무시하면, 모선 A와 C를 잇는 L1과 모선 C와 D를 잇는 L3의 다중 사고라는 가정과 일치된 결과를 보여준다. 또한 그림 3과 그림 4에서처럼 동작된 계전기만을 고려하기 때문에 빠른 진단을 한다. 이는 진단 속도가 계통의 크기보다는 동작한 계전기의 수에 의존한다는 것을 의미한다.

4. 사례 연구

그림 5는 345KV 송전선 계통의 일부이다. 제안된 일련의 행렬들을 L10-9m, L10-8m, L6-8m, L5-4s, L12-10s, L13-11s, L7-5s가 작동되어 차단기를 트립시킨 사고[7]에 적용하여 보았다. sagittal diagram의

표현없이 그림 2의 모의 계통 사고의 4×4행렬을 단지 11×11행렬로 대체한 것에 불과한 간단한 연산으로 같은 L6(0.915), L10(0.995), B8(0.750)의 다중 사고라는 결과를 보여 주었다.

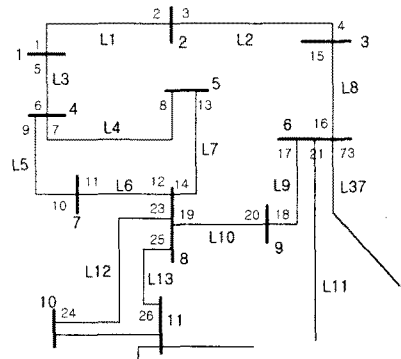


그림 5 345KV 전력 계통 시스템

5. 결 론

빠르고 정확한 다중 사고의 진단을 위해서는 계통의 토폴로지 변화를 고려해야 하는데, 본 논문은 계통의 토폴로지 변화에 따라 퍼지 멤버십값을 함께 변화시킬 수 있는 보호 시스템 행렬을 제안하였다. 또한 고장 진단 과정에서 계전기의 종류를 나누고 동작한 계전기만을 고려하기 때문에 빠른 속도를 보여주었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Fukui, D., Kawakame, J., "An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers", IEEE Trans. PowerDelivery., (4), pp.83-90, 1986.1
- [2] Komai, K., Matsumoto, K. and Sakaguchi, T., "A diagnostic application specific expert systems shell for network fault diagnosis", Electr. Power & Energy Syst., 14, (2/3) pp. 217-224, 1992
- [3] Z.E. Aygen, S. Seker, M. Bagriyanik, F.G. Bagritanik, E. Ayaz, "Fault section estimation in electrical power systems using artificial neural network approach", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE Volume: 2, pp. 466 -469 vol.2, 1999
- [4] Wen, F.S., Chang, C.S., "Probabilistic approach for fault-section estimation in power systems based on a refined genetic algorithm", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-Volume: 144 2, pp. 160 -168, 1997.3
- [5] Chang, C.S., Chen, J.M., Srinivasan, D., Wen, F.S., Liew, A.C., "Fuzzy logic approach in power system fault section identification", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-Volume: 144 5, pp. 406 -414, 1997.9
- [6] Hyun-Joon Cho, Jong-Keun Park, "An expert system for fault section diagnosis of power systems using fuzzy relations", Power Systems, IEEE Transactions on Volume: 12 1, pp. 342 -348, 1997.2
- [7] 조인호, "퍼지 관계를 이용한 전력 계통 사고 구간 진단", 석사학위논문, 서울대학교 전기공학부, 1999