

퍼지 페트리네트를 이용한 전력계통 고장진단에 관한 연구

노명균, 홍상은  
순천향대학교 정보기술공학부

A Study on Fault Diagnosis of Power System Using Fuzzy Petri Nets

Myong-Gyun Roh, Sang-Eun Hong  
Division of Information Technology Eng. Soonchunhyang University

**Abstract** - As the complexity of power systems increases, especially in the case of multiple faults or incorrect operation of protective devices, fault diagnosis requires new and systematic methods to the reasoning process, which improves both its accuracy and its efficiency. Therefore this paper proposes a method of the modeling of protection systems and fault diagnosis in power systems using Fuzzy Petri Nets (FPN). The proposed method can reduce processing time and increase accuracy when compared with the traditional methods. And also this method can cover online processing of real-time data from SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

1. 서 론

전력계통이 광대화되고 복잡화됨에 따라, 계통에 사고가 발생했을 때 그 사고지점과 사고원인을 찾는 것은 숙련된 작업자에 의하여 이루어지고 있으므로, 즉각적인 대응을 하기에는 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한, 보호장치 동작 및 그 정보의 불확실성으로 인하여 단순한 논리로 고장부위 및 원인을 판별하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 이에 대한 해결 방법으로 전문가 시스템, 패턴인식, 인공지능, 신경 회로망 등을 이용한 여러 가지 방법이 제안되고 개발한 바 있으나 고장진단을 위한 방대한 량의 데이터 처리와 계산시간 때문에 커다란 효과를 얻지 못하고 있다.

일반적으로, 전력계통은 연속적인 시스템으로 구성되어 있지만, 보호시스템에 동작의 관점에서 살펴볼 경우, 이산사건 시스템으로 규정 지을 수 있다. 보호시스템은 전력계통의 사고에 기인하여 동작하는 것이며, 정상적인 상태에서 비정상적인 상태로의 전환이다. 이러한 사고에 의해 전력계통의 보호기기들은 이산적인 동작을 통해서 사고부분을 시스템과 분리시키는 동작을 하게 된다. [1][2]

본 논문에서는 이산사건에 대한 효과적인 모델링 방법으로 페트리네트를 이용 전력계통 보호시스템을 모델링하였으며, 보호장치의 동작정보를 통하여 고장부위 및 원인을 판단하는데 있어서 오동작이나 부동작 등의 불확실한 정보의 처리에 유용한 퍼지 페트리네트를 이용한 고장진단 방법을 제안하였다.

2. 퍼지 페트리네트 (FPN)

2.1 페트리네트

페트리네트는 다음과 같이 다섯 가지 원소를 갖는 구조로 표현한다. [4]

$$PN = (P, T, I, O, M_0)$$

페트리네트는 트랜지션의 집합에 의해 동작된다. 이때, 마킹의 이동에 의한 상태천이는 Linear Algebra로 정리할 수 있으며 [3][4]를 참고할 수 있다.

2.2 퍼지 페트리네트 (FPN)

2.2.1 FPN의 기본 개념

FPN의 기본적인 개념은 페트리네트로부터 얻을 수 있으며, 그래프의 형태 또한 페트리네트와 같이 플레이스와 트랜지션, 이 둘을 연결하는 아크로 이루어져 있다. 페트리네트와 다른점은 플레이스에 놓이는 토큰이 0, 1, 2 등의 정수가 아닌 '0'에서 '1'사이의 값을 갖고, 트랜지션은 '0'에서 '1'사이의 값을 갖는 CF(Certainty

Factor), 그리고  $\lambda$ (threshold)와 관계한다는 점이다.

FPN은 9가지 원소를 갖는 구조로 표현한다.

$$FPN = (P, T, D, I, O, CF, M)$$

여기서,

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} : \text{명제의 유한집합}$$

$$d_i : \text{플레이스 } p_i \text{의 명제}$$

$$I = P \rightarrow T$$

$$O = T \rightarrow P$$

$$CF = [cf_1 \ cf_2 \ \dots \ cf_m]^T : \text{Certainty Factor 벡터}$$

$cf_i$  : 트랜지션  $t_i$ 의 Certainty Factor

$$cf_i \in [0, 1]$$

$$M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n]^T : \text{토큰벡터}$$

$m_i$  : 플레이스  $p_i$ 에 존재하는 토큰값

$$m_i \in [0, 1]$$

만약  $p_j \in I(t_i)$ 이고  $n_j \geq \lambda$ 이면,  $t_i$ 는 점화할 수 있다.  $t_i$ 가 점화하면 입력 플레이스의 토큰은 제거되고, 출력 플레이스로 토큰이 이동하는데 출력 플레이스의 토큰값은 입력 플레이스의 토큰값과 트랜지션의 CF값의 곱과 같다.

본 논문의 주된 목적인 사고정보로부터 고장을 진단하기 위해 특별한 연결관계가 필요하며 이는 Fuzzy Production Rule(FPR)로 표현가능하다. FPR은 두 명제의 퍼지관계를 설명하는 룰이며, 'and'와 'or'를 포함하는 연결관계로 이루어지는데, 'and'는 최소값(Min)을 출력하고 'or'는 최대값(Max)을 출력한다[5]. 그리고 FPR은 FPN으로 나타낼 수 있다.

2.2.2 FPR 유형별 FPN 표현

FPN은 4개의 형태로 구별하여 정리하며[5], 각 플레이스에 존재하는 토큰의 개수는 1개로 제한된다. 본 연구에서는 아래와 같은 Type2와 Type3에 경우만을 사용하며 다른 경우는 [5]에 나타나 있다.

• Type 2

$$\text{IF } d_j \text{ THEN } d_{k1} \text{ and } d_{k2} \text{ and } \dots \text{ and } d_{km} \text{ (CF} = \mu_i \text{)}$$

이 형태의 룰은 그림 1와 같이 FPN을 이용하여 모델링한다.

• Type 3

$$\text{IF } d_{j1} \text{ or } d_{j2} \text{ or } \dots \text{ or } d_{jm} \text{ THEN } d_k \text{ (CF} = \mu_i \text{)}$$

이 형태의 룰은 그림 2과 같이 FPN을 이용하여 모델링한다.

2.2.3 FPN의 상태천이방정식

여기에서는 불확실하고 부정확한 정보 처리를 위한 FPN의 상태천이 방정식을 보이기 위하여 몇 가지 행렬, 벡터, 그리고 연산자(operator)들을 정의한다.

모든 트랜지션의 threshold값이 0인 퍼지페트리네트에서 트랜지션의 점화에 의한 M벡터는 다음과 같은 상태천이 방정식에 의해 계산할 수 있다. [7]

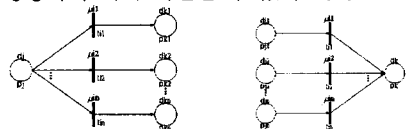


그림 1

그림 2

그림 1. Type 2의 퍼지페트리네트 모델

그림 2. Type 3의 퍼지페트리네트 모델

$$M(t+1) = P \cdot \overline{(Q \cdot M(t) \odot CF)}$$

이 상태전이방정식을 표현하기 위해 몇 가지의 정의가 필요하다.

• 정의 1.

$m \times n$  행렬과  $n \times 1$  열벡터의 퍼지곱 (fuzzy multiplication) 은  $\odot$ 로 정의

• 정의 2.

$n \times 1$  열 벡터와  $n \times 1$  열 벡터의 원소간 곱은  $\odot$ 로 정의

• 정의 3.

퍼지보수(fuzzy complement)는 다음과 같이 행한다.

$$A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n], \quad \overline{A} = [1-a_1 \ 1-a_2 \ \dots \ 1-a_n]$$

• 정의 4.

P행렬은 트랜지션에서 플레이스의 접속관계를 나타내는 행렬로 다음과 같이 정의한다.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix}, \quad p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{만일 } p_i \in O(t_i) \text{이면} \\ 0, & \text{만일 } p_i \notin O(t_i) \text{이면} \end{cases}$$

(n : 플레이스의 수, m : 트랜지션의 수)

• 정의 5.

Q행렬은 플레이스에서 트랜지션으로의 접속관계를 나타내는 행렬로 다음과 같이 정의한다.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix}, \quad q_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{만일 } p_j \in I(t_i) \text{이면} \\ 0, & \text{만일 } p_j \notin I(t_i) \text{이면} \end{cases}$$

(n : 플레이스의 수, m : 트랜지션의 수)

• 정의 6.

M(t)벡터는 시간 t에서 각 플레이스의 토큰값의 집합이다.

$$M(t) = [m_1(t) \ m_2(t) \ \dots \ m_n(t)]^T \quad (n: \text{플레이스의 수})$$

### 3. 모델링

이 장에서는 전력계통의 간단한 예를 들어 본 논문에서 제안하는 FPN을 이용한 모델링 방법을 설명한다. [11]

모선, 선로, 계전기, 차단기의 상태는 플레이스, 계전기와 차단기의 동작은 트랜지션으로 나타낸다. 플레이스에 토큰이 존재한다면, 토큰 값의 정도만큼 각각 모선사고, 선로사고, 계전기 리셋(reset), 차단기 트립(trip)의 가능성을 의미하게 된다.

#### 3.1 FPN을 이용한 보호시스템 모델링

사고시 보호 기기의 동작과정을 모델링하기 위한 전력계통의 간단한 시스템은 그림 3과 같으며, 7개의 구역, 19개의 계전기, 6개의 차단기로 이루어진다. [6]

본 연구에서는 [6]에서 제시하고 있는 그림 3과 같은 시스템을 FPN의 모델링 대상으로 사용하고 있다.

모든 계전기의 동작 논리를 이용하여 그림 3의 예를 각 구역별로 모델링하면 그림 4와 같다.

그림 4의 각 모델에 포함되어 있는 트랜지션에 관련된 CF값은 사고발생시 보호기기들의 부정확한 동작을 고려하여 통계적으로 나타낸 값이다. [6]

• 선로보호 계전기의 경우,

i) 모선과 가장 가까이 위치하고 있는, 주보호 계전기와 관련된 CF값은 0.8로 한다.

ii) 1차 후비보호계전기와 관련된 CF값은 0.7로 한다.

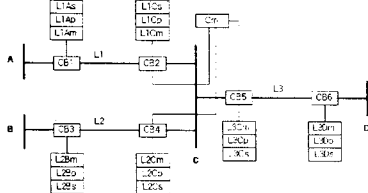


그림 3. Sample System

iii) zone-2, 즉 다음 구역의 차단기를 제어하는 2차 후비보호 계전기와 관련된 CF값은 좀더 작은 0.55로 한다.

• 모선보호 계전기의 경우,

i) 모선에 연결된 선로의 수가 증가하면, 모선의 부정확성 또한 커진다. 즉, 많은 선로와 연결된 모선의 모델인 경우, 적은 수의 선로와 연결된 모선에 비해 작은 CF값을 갖는 트랜지션으로 연결된다.

보호기기의 부정확성을 비교할 때, 차단기가 계전기보다 부정확한 동작을 할 가능성이 작다. 계전기는 수십 킬로미터 떨어진 선로로부터의 정보에 의해 동작하고 외부에 노출되어있는 선로에 의해 정보를 전송하는 반면, 차단기의 경우는 계전기로부터 정보를 전송하는 선로는 외란에 강하다. 그러므로 계전기와 차단기 사이의 트랜지션에 관련된 CF는 구역과 계전기 사이의 이것보다 큰 값을 갖는다.

그림 4의 모델은 사고발생 구역으로부터 계전기, 차단기의 동작으로 이어지는 구조를 갖는다. 이 경우 사고발생으로부터 각각 보호기기들의 동작가능성을 계산하는 방법으로 유용하지만, 사고로부터 발생한 보호기기의 동작여부 정보를 이용하여 역으로 고장을 진단하는 것은 곤란하다. 이에 본 논문에서는 이 모델을 직접 사용하는 것이 아니라 역방향성을 갖는 새로운 모델을 만들어 사용한다.

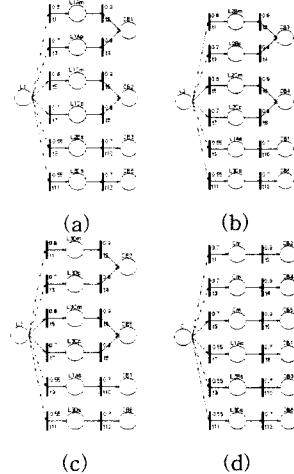


그림 4. 그림 3의 퍼지페트리네트 모델

#### 3.2 역방향 FPN을 위한 대우명제화

사고로부터의 정보를 이용하여 고장진단을 위해 역방향성을 갖는 퍼지페트리네트 모델을 다시 설계해야 한다. 이는 룰의 대우명제화를 이용함으로써 가능하며, 간단한 예를 통해 설명한다.

우선 그림 4에서 계전기와 차단기사이의 룰 형태인 "IF A Then B (CF=0.7)"을 "IF A Then  $\overline{B}$  (CF=0.3)"로 바꾸고, 모델을 역으로 나타내기 위해 대우명제화 시킨다.

간단한 예로  $R_1$ 이 "IF C and D Then E (CF=0.7)"인 경우  $\overline{R_1}$ 는 "IF  $\overline{E}$  Then  $\overline{C}$  or  $\overline{D}$  (CF=0.7)"이다. 이와 같은 방법을 이용하여 모델을 대우명제화 시키는 과정은 다음과 같다.

i) Type 2형태로 되어있는 구역과 계전기 사이의 연결관계는 Type 3형태로 바꾸어 준다. 이때 각각의 트랜지션과 관련된 CF는 변함없다.

ii) Type 3형태로 되어있는 계전기와 차단기 사이의 연결관계는 Type 2형태로 바꾸어 준다. 이때 각각의 트랜지션과 관련된 CF는 변함없다.

### 4. 적용 예

이 장에서는 시스템의 고장진단과정 및 결과를 살펴봄으로써 제안한 모델링과 고장진단 방법을 평가한다. 아울러 모든 트랜지션의 threshold값은 '0'으로 한다.

▶ 고장진단 과정 ◀

전력계통의 보호시스템이 복잡해짐에 따라 퍼지페트리넷 모델 또한 복잡해지고 커져 계산시간 및 효율 면에서 단점으로 나타날 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 동작하지 않은 계전기와 관련된 플레이스를 제거하여 향상된 결과를 얻을 수 있는데 그 과정을 다음과 같이 정리한다.

1. 동작정보가 없는 계전기와 관련된 플레이스를 그래프에서 삭제하고 접속관계 행렬 P와 Q를 구한다.
2. 사고로부터의 발생정보 중 차단기의 정보를 이용해 초기 마킹을 설정한다. 동작한 차단기에 해당하는 플레이스에 놓이는 토큰 값은 '1'로 한다.
3. 정리 1의 공식을 사용하여 M벡터를 구한다.
4. 최종마킹 중 구역에 해당하는 플레이스의 토큰값은 그 구역에서 사고가 발생하지 않았을 가능성을 나타내며, 토큰값이 가장 작은 구역을 사고발생의 가능성이 가장 큰 구역으로 결론 내린다. 즉, 사고발생구역으로 진단한다.

이 시스템은 그림 3 시스템의 비교적 간단한 예로, 한 가지 경우를 들어 보호계통을 모델링하고 사고를 진단한다. 이는, 모선 C에서 사고가 발생하여 모선 주 보호계전기인 Cm이 동작하여, CB2, CB4, CB5를 트립시키려 하였으나 CB2, CB4는 트립실패, 각각에 대한 후비 보호로서 L1As와 L2Bs가 동작하여 CB1과 CB3가 트립되었다. 이로써 사고 구역을 진단구역으로부터 분리시켰으나 L3Ds가 오동작하여 CB6가 트립되었다.

· L1의 경우

L1Am, L1Ap, CB1, L1Cm, L1Cp, CB2 플레이스와 t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8 트랜지션을 제거. 접속관계 행렬 P와 Q는 지면관계상 생략한다. 초기마킹 M(0)로부터 M(2)를 구한다.

$$M(0) = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$$

$$CF = [0.55 \ 0.3 \ 0.55 \ 0.3]^T$$

$$M(1) = P \cdot [(Q \cdot M^c(0)) \% CF] = [0 \ 0.3 \ 0 \ 0.3 \ 0]^T$$

$$M(2) = P \cdot [(Q \cdot M^c(1)) \% CF] = [0.165 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

· L2의 경우

L2Bm, L2Bp, CB3, L2Cm, L2Cp, CB4 플레이스와 t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8 트랜지션을 제거한다. 이 때, 접속관계 행렬 P와 Q, 마킹벡터 M(0), M(1), M(2)는 L1의 경우와 같다.

· L3의 경우

L3Dm, L3Dp, CB3, L3Cm, L3Cp, CB5 플레이스와 t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8 트랜지션을 제거. 이 때의 접속관계 행렬 P와 Q, 마킹벡터 M(0), M(1), M(2)는 L1의 경우와 같다.

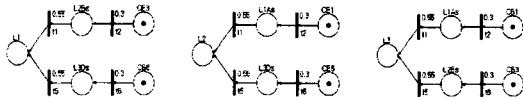


그림 5. 각 선로의 간략화된 FPN 모델

· C의 경우

퍼지페트리넷 모델은 그림 6과 같다. 이 때의 접속관계 행렬 P와 Q는 지면상 생략한다. 초기마킹 M(0)로부터 M(2)를 구한다.

$$M(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$$

$$CF = [0.7 \ 0.1 \ 0.7 \ 0.1 \ 0.7 \ 0.1 \ 0.55 \ 0.3 \ 0.55 \ 0.3 \ 0.55 \ 0.3]^T$$

$$M(1) = P \cdot [(Q \cdot N(0)) \% CF] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.1 \ 0 \ 0.3 \ 0 \ 0.3 \ 0 \ 0.3 \ 0]^T$$

$$M(2) = P \cdot [(Q \cdot N(1)) \% CF] = [0.07 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

· 최종 결과 및 평가 : 표 1과 같이 4개 구역의 계산 결과중 모선 C의 토큰 값이 0.07로 선로 L1, L2, L3에 비해 작다. 그러므로 모선 C에서 사고가 발생했을 가능성이 가장 크다. 이는 사고발생구역과 같으며, 정확한 고장진단결과를 얻었다고 평가할 수 있다.

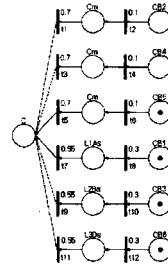


그림 6. 모선 C의 퍼지페트리넷 모델

표 1. 시뮬레이션 결과

| 사고예상 구역 | 구역의 최종 마킹 | 우선순위 |
|---------|-----------|------|
| C       | 0.07      | 1    |
| L1      | 0.165     | 2    |
| L2      | 0.165     | 2    |
| L3      | 0.165     | 2    |

5. 결 론

본 논문에서는 불확실하고 부정확한 정보를 갖는 이산 사건시스템을 모델링하기 위한 방법으로 FPN을 이용, 전력계통의 보호시스템 고장진단에 적용하였다. FPN을 사용함으로써 얻게된 장점은 다음과 같다.

- 1) 각 구역별 모델의 일정한 형태를 모듈화 할 수 있어, 전력계통이 수시로 변하는 경우에 효과적 대처 가능.
- 2) 간단한 행렬 계산만으로 사고 진단이 가능.
- 3) 모든 룰을 검색, 비교하여 고장진단하는 전문가 시스템의 추론엔진과 비교하여, 단시간내에 사고를 진단.
- 4) Graphical한 표현이 가능하여 시스템의 구조 파악이 쉬워 모델링할 때 설계자의 실수를 방지.

[참고 문헌]

- [1] L.Jenkins and H.P.Khincha, "Deterministic and Stochastic Petri Net Models of Protection Schemes", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No.1, pp.84-90, Jan. 1992
- [2] J.Tang and F.Wang, "Modeling of a transmission network protection system using Petri nets", Electric Power Systems Research Vol.44, pp.175-181, 1998
- [3] K.L.Lo and H.S.Ng and J.Treçat, "Power systems fault diagnosis using Petri nets", IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., Vol.144, No.3, pp.231-236, May 1997
- [4] James L. Peterson, "Petri net theory and the modeling of system", Prentice-Hall
- [5] Shyi-Ming Chen, Jyh-Sheng Ke, Jin-Fu Chang, "Knowledge Representation Using Fuzzy Petri Nets", IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering, Vol.2, No.3, pp.311-319, Sept. 1990
- [6] Hyun-Joon Cho and Jong-Keun Park, "An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems using Fuzzy Relations", IEEE Trans. Power systems, Vol. 12, No. 1, Feb. 1997
- [7] Amit Konar and K.mandal, "Uncertainty Management in Expert Systems Using Fuzzy Petri Nets", IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering, Vol.8, No.1, Feb. 1996.
- [8] Carl.G.Looney, "Fuzzy Petri Nets for Rule -Based Decisionmaking", IEEE Trans. on Systems Man And Cybernetics, Vol.18, No.1, pp.178-183, Jan. 1988.
- [9] F.S.Wen and C.S.Chang, "Probabilistic approach for fault section estimation in power systems based upon a refined genetic algorithm", IEE Proc. Generation, Transmission Distribution, UK, 144(1), pp.160-168, 1997
- [10] 이흥재, 이철균, 박동용, 김성희, 안복신, "가능성 이론을 이용한 전력계통 고장진단", 전기학회논문집 48A권 6호, pp.665-670, 1999
- [11] 최진목, 노명균, 홍상은, 오용택, "페트리넷트를 이용한 전력계통의 보호시스템 모델링과 고장진단", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1136- 1138, 1999