

페트리네트를 이용한 전력계통의 보호시스템 모델링과 고장진단

최진묵, 노명균, 홍상운, 오웅택
 순천향대학교 전기전자공학부, 한국기술교육대학교 전기공학과

Protection Systems Modeling and Fault Diagnosis of Power System
 Using Petri Nets

Jin-Mook Choi, Myong-Gyun Rho, Sang-Eun Hong, Yong-Taek Oh
 Dept of Electrical & Electronic Eng. Soonchunhyang University
 Dept of Electrical Eng. Korea University of a Technology and Education

Abstract - This paper describes a new method of the modeling of protection system and fault diagnosis in power systems using Petri nets. The Petri net models of protection system are compose of the operating process of protective devices and the fault diagnosis process. Fault diagnosis model which makes use of the nature of Petri net is developed to overcome the drawbacks of methods that depend on operator knowledge. The proposed method can reduce processing time and increase accuracy when compared with the traditional methods. And also this method covers online processing of real-time data from SCADA.

- (1) $P \cap T = \emptyset$
- (2) $P \cup T \neq \emptyset$
- (3) $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$

아크는 플레이스와 트랜지션의 관계를 나타내는데 입력 함수와 출력함수로 구별된다. 입력함수는 각 트랜지션과 그에 대한 입력 플레이스와 관계, 출력함수는 각 트랜지션과 그에 대한 출력 플레이스와 관계를 나타낸다. 상태를 표시하는 마킹은 플레이스안의 토큰 수로 나타내며, 점으로 표현한다. 페트리네트는 다음과 같이 다섯 가지 원소를 갖는 구조로 표현한다.

1. 서 론

$$PN = (P, T, I, O, M(0))$$

일반적으로 전력시스템은 연속시간 시스템으로 구성되어 있지만, 보호계통은 이산 사건 시스템으로 볼 수 있다. 즉 사고란 정상적인 상태에서 비정상적인 상태(사고발생상태)로 변화시키는 사건이며, 보호장치의 동작에 의하여 사고부분을 시스템과의 분리시키는 릴레이 동작 또한 상태를 변환하는 사건이다.[1] 전력계통은 보호계기들을 포함하고 있는데 이 장치들은 비정상적인 상태나 사고로부터 시스템을 보호하는 것을 목적으로 하며,[2] SCADA로부터 보호계전기와 회로차단기의 동작상태를 이용해 사고위치를 판별할 수 있다. 최근 전력계통은 점점 복잡화, 거대화되고 있어, 송변전 운영에서 다중 사고나 보호장치의 오동작이 발생하는 경우 현재와 같이 운전원의 경험에 의한 고장 해석과 진단 방법으로는 이에 대한 신속하고 정확한 처리가 어려워지고 있다.[3] 그간의 해결을 위한 방법으로 전문가 시스템, 패턴인식, 인공지능, 신경 회로망 등을 이용한 여러 가지 방법을 개발한 바 있으나 고장진단을 위한 방대한 량의 데이터 처리와 계산시간 때문에 커다란 효과를 얻지 못하고 있었다. 본 논문에서는 사고의 발생 장소, 정전구간 및 주변 장치들의 동작 여부 등의 사고로부터 파생되는 결과를 분석하기 위한 새로운 방법으로 보호계통의 특성을 살펴, 최근 이산 사건 시스템에서 널리 사용되고 있는 페트리네트를 적용한 전력계통 보호 시스템의 모델링 방법과 고장진단 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안한 방법을 모델 계통에 적용한 결과 계산 속도와 정확성 면에서 탁월한 결과를 얻을 수 있었다.

여기서,

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$
- $I: P \rightarrow T$: 입력함수
- $O: T \rightarrow P$: 출력함수
- $M(0)$: 초기 마킹

2. 페트리네트

2.2 실행규칙

트랜지션의 모든 입력 플레이스에 $P \rightarrow T$ 의 아크보다 많거나 같은 수의 토큰이 존재하면 그 트랜지션은 활성화되고 활성화된 트랜지션은 점화할 수 있다. 점화란 사건의 발생이며 페트리네트에서는 트랜지션의 점화라고 표현한다. 트랜지션이 점화하면 입력 플레이스는 $P \rightarrow T$ 의 아크 수만큼 토큰이 제거되고, 출력 플레이스는 $T \rightarrow P$ 의 아크 수만큼의 토큰이 생긴다.

2.3 Linear Algebra

이산사건시스템은 트랜지션의 점화에 의해 동작된다. 이때 마킹의 이동에 의한 상태천이는 Linear Algebra로 정리할 수 있으며 이를 위해 필요한 접속행렬 D는 다음과 같이 정의한다. [3][5]

$$D = D^+ - D^-$$

여기서,

$$D^+ : \begin{cases} \#(p_i, O(t_j)) & , \text{ if } T \rightarrow P \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$D^- : \begin{cases} \#(p_i, I(t_j)) & , \text{ if } P \rightarrow T \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases}$$

2.1 기본구조

페트리네트는 두 개의 노드와 아크(A)로 구성되는데, 각각의 노드는 플레이스(P)와 트랜지션(T)으로 이루어진다. 플레이스는 원으로, 트랜지션은 막대로 표현되며 다음 조건을 만족한다.

상태 k의 마킹 $M(k)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$M(k) = [p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)]^T$$

여기서,

$p_i(k)$: 상태 k에서 p_i 의 마킹

상태 k의 점화가능 벡터 $U(k)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$U(k) = [t_1(k), t_2(k), \dots, t_n(k)]^T$$

여기서, $t_i(k)$ 는 상태 k에서 점화하면 1이고, 점화하지 않으면 0이다.

임의의 상태에서 트랜지션의 점화에 의한 다음 상태로의 천이는 다음과 같은 방정식으로 표현한다.

$$M(k+1) = M(k) + D \cdot U(k)$$

여기서,

$M(k)$: 상태 k에서의 마킹

$U(k)$: 상태 k에서의 점화가능벡터

$M(k+1)$: 상태 k+1의 마킹

3. 모델링

이 장에서는 전력계통의 간단한 예를 들어 각 보호계전기를 중심으로 모델링하는 방법을 설명한다.

3.1 사고시 보호장치 동작 과정

전력계통은 페트리네트를 이용하여 모델링이 가능하며, 플레이스에 해당하는 모선, 선로, 보호계전기, 회로차단기의 상태와 트랜지션에 해당하는 보호계전기와 회로차단기의 동작으로 나타낸다. 플레이스에 놓이는 토큰에 의해 각각 모선사고상태, 선로사고상태, 보호계전기 동작가능상태, 회로차단기의 동작상태를 나타낸다. 만약 토큰이 없다면 반대의 상태를 나타낸다.

보호계전기는 주보호와 후비 보호로 동작할 수 있으며, 후비보호는 1차 후비보호, 2차 후비보호로 나누어진다. 후비보호는 주보호가 실패했을 때 동작하며, 1차 후비보호가 실패하면 2차 후비보호가 동작한다.

그림 1의 L1에서 사고가 발생한 경우, 주보호계전기인 L1Am과 L1Bm은 각각 CB2와 CB3이 동작하도록 한다. 만약 CB2와 CB3가 동작하지 않으면, 후비보호계전기가 동작하게 된다. CB3가 L1Bm에 의해 동작하지 않으면, zone1의 후비보호계전기인 L1Bp에 의해 동작하게 된다. [8] 그래도 동작하지 않아 사고상태가 지속되면, zone2의 후비보호를 위해 Bm에 의한 CB4 동작시도, L2Cs에 의한 CB5의 동작순으로 사고지역을 전력계통으로부터 분리시킨다. 표 1은 그림 1의 각 종류의 보호계전기 중 하나의 동작논리를 표현한 것이다. [9][10]

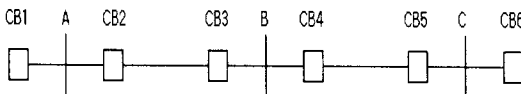


그림 1. Simple example

본 논문은 페트리네트의 장점인 모듈화에 의해 각 부분을 간단히 모델링하였다.

(1)Am Bm Cm, (2)L1Am L1Bm L2Bm L2Cm, (3)L1Ap L1Bp L2Bp L2Cp의 각 (1), (2), (3)내의 모델의 형태는 같다. 즉 각 모델은 같은 사건행렬을 갖는다.

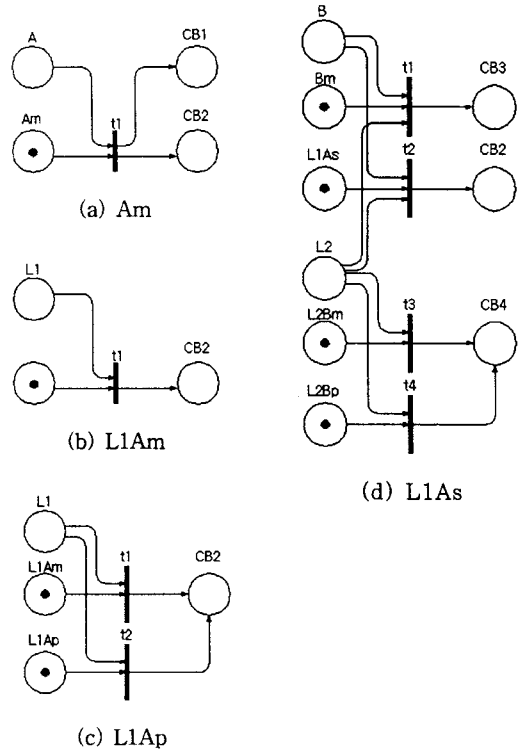


그림 2. 보호시스템 모델링

표 1 보호계전기의 동작논리

보호계전기	동작논리
Am	If A 사고발생 then Am에 의해 CB1, CB2 동작
L1Am	If L1 사고발생 then L1Am에 의해 CB2 동작
L1Ap	If L1 사고발생 and L1Am 동작실패 then L1Ap에 의해 CB2가 동작
L1As	If B 사고발생, CB3 동작실패. OR If L2 사고발생, CB3, CB4 동작실패. Then L1As에 의해 CB2동작

3.2 고장 진단 과정

SCADA 시스템으로부터의 신호, 즉 보호계전기와 회로차단기의 최종 동작상태 정보만으로 사고위치를 검출하기 위해, 최종상태로부터 초기상태로 모델링된 대상을 거꾸로 동작시켜 그 신호를 해석함으로써 고장 진단 과정이 이루어진다. 이처럼 기존의 페트리네트를 역으로 나타내는 것을 backward 페트리네트라 한다. [3] 기존의 페트리네트의 초기마킹은 backward 페트리네트의 최종마킹이 된다.

고장을 진단하기 위하여 우선 몇 가지를 살펴본다. 첫째, 보호계전기의 동작에 인한 최종 마킹은 '0'이다. 그러므로 Backward 페트리네트에 의해 동작한 보호계전기의 초기마킹과 최종마킹은 [0 1]로, 이는 보호계전기의 정상작동 즉 사고가 있음을 의미한다. 이러한 방법은 모선의 주보호차단기, 선로의 주보호와 zone1 후비보호의 모델의 정보를 해석하는데 사용하며 이 때의 결과는 사고로 인한 정전구역을 나타낸다. 둘째, zone2 후비보호의 모델로부터 사고발생 지역을 판별한다. 첫 번째 방

법과 동일한 방법을 사용하나 zone2 후비호는 시간적인 개념을 포함하고 있어 사고발생위치를 파악할 수 있다. 셋째, 접화가능 벡터 $U(k)$ 의 모든 원소는 1로 한다. 이렇게 함으로써 모든 트랜지션의 접화확률은 100%가 되고 이로써 얻어지는 마킹의 변화를 통해 어떤 트랜지션이 접화했는지를 알아 어떤 보호계전기가 동작했는지 알 수 있게된다.

그림 2.(a)의 경우 SCADA로부터 Am, CB1, CB2의 동작정보를 받았다면 이때의 초기마킹 M0, Linear Algebra를 통한 최종마킹 M1, 그리고 사건행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & A \quad Am \quad CB1 \quad CB2 \\
 M0 &= [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1]^T \\
 M1 &= [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \\
 D &= [1 \quad 1 \quad -1 \quad -1]^T
 \end{aligned}$$

위의 결과를 보아 Am이 동작했고 그에 대한 모션인 A에서 사고가 있었음을 알 수 있다.

4. 적용예

이 장에서는 그림 3의 시스템에 앞에서 소개한 모델링 기법을 적용을 해 보았다. 이 시스템은 16개의 구역, 56개의 보호계전기, 28개의 회로차단기로 구성되어 있다.

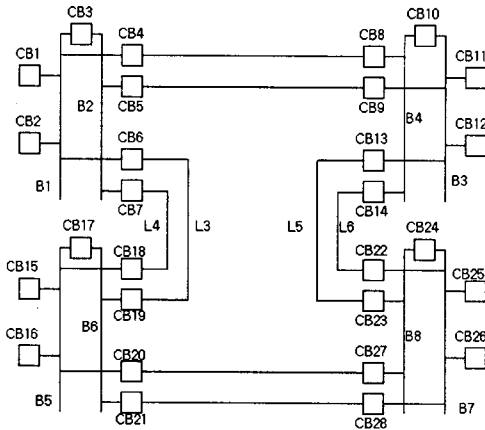


그림 3. 적용 시스템

표 2는 위 시스템의 사고 발생시 SCADA system으로부터 받을 수 있는 정보들의 가상시나리오와 시뮬레이션 결과이다. 이 정보들을 이용, Pentium 200MHz, RAM- 64MB사양의 PC에서 시뮬레이션 한 결과 1초 이하의 처리시간동안 정확한 사고위치를 검출할 수 있는 것을 알 수 있었다.

표 2. 시뮬레이션 결과

SCADA system으로부터의 정보	시뮬레이션 결과 (사고위치)
B1m, L1B4p, L1B1m, CB1, CB3, CB4, CB6	B1, L1
B1m, B2m, L1B4m, L1B1p, L2B3m, CB1, CB2, CB3, CB4, CB6, CB7, CB8, CB9	B1, B2, L1, L2
L1B4m, L1B1p, L2B2p, L2L7B8p, L7B5m, L8B6m, L8CB4, CB5, CB8, CB9, CB20, CB27, CB28	L1, L2, L7, L8
L2B3m, CB5, CB9	L2

5. 결론

본 논문은 backward 페트리네트를 이용하여 전력계통의 모델링과 고장위치검출을 목적으로 진행하였다. 페트리네트의 큰 장점중의 하나인 모듈화를 적절히 이용함으로써 복잡한 시스템을, 일반적으로 비슷한 형태를 갖는 간단한 여러 개의 모델로 나누어 생각함으로써 시간이나 여러 가지 측면에서 효율적인 결과를 가져왔다. 앞으로의 연구목표는 시간을 고려한 좀 더 효과적인 모델링에 대한 것을 첫 번째로 들 수 있고, 두 번째는 확률을 고려하여 정확하지 않은 정보 등에 대한 해석을 하는 것이다.

(참고 문헌)

- [1] L. Jenkins and H. P. Khincha, "Deterministic and Stochastic Petri Net Models of Protection Schemes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.1, pp.84-90, January 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. Trecat, "Power systems fault diagnosis using Petri nets", IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., Vol. 144, No.3, pp.231-236, May 1997.
- [4] C. S. Hwang and J. M. Lee, "Analysis of Matrix Equation Based on Petri Net for Discrete System Control", Proceedings of the 29th SICE Annual Conference International Session, p639-696, July 1990.
- [5] James L. Peterson, "Petri net theory and the modeling of system", Prentice-Hall
- [6] C. Rodriguez, S. Rementeria, J. I. Martin, A. Lafuente, J. Mugureza, and J. Perez, "A Modular Neural network approach to fault diagnosis", Trans. on Neural Networks, Vol. 7, No. 2, pp.326-340, March 1996.
- [7] Hyun-Joon Cho and Jong-Keun Park, "An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems using Fuzzy Relations", IEEE Trans, on Power systems, Vol. 12. No. 1. Feb. 1997
- [8] K. P. Brand and J. Lopainsky, "Principles and engineering of process control with Petri Nets", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.33, No.2, pp.138-149, Feb. 1988.
- [9] C.S.Chang and L.Tian, F.S.Wen, "A new approach to fault section estimation in power systems using Ant system", Electric Power Systems Research 49 (1999) 63-70
- [10] 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) (1997) 160-168