

Petri Net 형식론을 이용한 철도차량 주차단기 제어회로 모델링

MCB ladder diagram modeling for Rolling stock using Petri Net formalism

최권희*
Choi, Kwon-Hee

안홍관**
Ahn, Hong-Kwan

김재기***
Kim, Jae-Gi

송중호****
Song, Joong-Ho

ABSTRACT

The computer system is used in many application domains and any system error in these domains may either cause critical loss or threaten environment or human life. Though examples of these domains can be found in many areas, the system, which is used in domains for carrying passengers including rolling stocks in particular, is expected to show satisfactory operation all the time.

The relay control logic, which is used in rolling stocks, is complex in hardware and occupies considerably large volume. Nevertheless, it has been used for a long time, to let the system safely operate even in the occurrence of an error in the computer system. However, the relay control logic circuit is so complex that the analysis of proper circuit operation and interlocking tends to be dependent only on the designer's experiences instead of being systematically performed. Especially, the analysis following a change, addition and deletion of a previous circuit according to the requirements from a source of demand is significantly limited.

In this paper, the accuracy of relay control logic is verified by the use of properties of Petri Net model. In addition, how main circuit breaker (MCB) control circuit is modeled and analyzed by the design methodology is shown.

1. 서론

컴퓨터시스템은 많은 어플리케이션 영역에서 사용되고, 그 영역에서 시스템의 오작동이 중요한 손실을 야기하거나 환경이나 인간의 삶을 위협 할 수 있다. 이러한 영역들의 예는 많은 부분에서 찾아볼 수 있지만, 특히 철도차량과 같이 승객을 수송하는 영역에서 사용되는 시스템은 항상 만족스러운 작동을 보이도록 기대된다.

철도차량에서 사용하는 계전기 제어로직은 하드웨어적으로 복잡하고 많은 부피를 차지하고 있음에도 불구하고 컴퓨터시스템이 오동작을 발생하더라도 시스템을 안전하게 동작시키기 위해 여전히 오랫동안 사용되어 오고 있다. 하지만, 계전기 제어로직 회로는 너무나 복잡하여 회로의 올바른 동작 및 인터로킹에 대한 해석은 체계적으로 이루어지지 못하고 오직 설계자 자신의 경험에 의지하는 경우가 많다. 특히, 수요처의 요구사항에 따라 중전 회로의 변경, 추가, 삭제 등에 따른 해석은 상당히 제한적이다.

Petri Net에 의한 시스템 모델링은 병행적(concurrent), 비동기, 분산, 병렬, 비결정론, 확률론 등의 특성을 가진 정보처리시스템을 기술하고 시스템의 동적거동(dynamic behavior)의 특성을 연구하기 위해 고안된 도식적, 수학적 모델링 도구로써 이러한 문제점을 해결하는 데 매우 유용한 도구이다. 본 논문에서 계전기 제어로직의 정확성은 Petri Net 모델의 속성을 사용하여 구현된다. 추가적으로, 설계 방법론(design methodology)이 어떻게 주회로 차단기(main circuit breaker, MCB) 제어회로를 모델링하고 해석 될 수 있는지를 보인다.

* 현대로템(주), 기술연구소, 기술사/선임연구원, 정회원

E-mail : khchoi@hyundai-rotem.co.kr

TEL : (031)460-1334 FAX : (031)460-1789

** 현대로템(주), 기술연구소, 책임연구원

*** 현대로템(주), 기술연구소, 수석연구원

**** 서울산업대학교, 전기공학과, 교수

2. 본문

2.1. Petri Net

Petri Net은 1962년 독일 Bonn대학의 Carl Adam Petri의 박사 학위 논문에서 처음 제시되었다[1]. Petri Net은 일종의 방향성 그래프로서 세 가지 유형의 객체들로 구성된다. 시스템의 상태(state) 혹은 조건(condition)을 나타내는 플레이스(place)는 원(circle)으로 표시되며, 시스템내의 함수 또는 상태간의 부분관계 및 사건(event)을 나타내는 트랜지션(transition)은 바(bar) 혹은 박스(box)로 표시되고, 흐름을 나타내는 방향아크(directed arc)는 화살표로 표시된다. 또한 플레이스 조건의 진위 또는 시스템의 가용 자원을 나타내는 토큰(token)는 플레이스 원 안에 점(dot)으로 표시된다. Petri Net의 플레이스와 트랜지션은 그래프에서 노드(node)로 표시되고 이들 사이를 연결하는 아크는 간선(edge)으로 표시된다[1][2]. 특히 금지아크(inhibitor arc)는 끝에 작은 원으로 표시하며, 인에이블 아크(enabling arc)는 내부가 비어있는 화살표로 표시한다[4].

어떤 시스템을 Petri Net으로 모형화 했을 때, Petri Net 구조는 시스템의 정적인 구조가 되며, 시스템의 동적거동(dynamic behavior)은 플레이스 내에 토큰이라는 추상적 개체의 분포로 표시한다. 토큰은 0 혹은 양수의 값을 잠재적으로 가지고 있어야 하며 토큰의 존재유무에 따라 해당 플레이스에 관련하는 조건이 참인지 거짓인지를 파악하는 것이 가능하다. 이 경우 해당하는 플레이스는 마킹(marking)되었다고 한다. 토큰은 Petri Net의 플레이스 안에 귀속되며, 토큰의 개수와 위치는 Petri Net의 실행 중 변화할 수 있다. 토큰은 Petri Net의 실행을 정의하는 데에 이용되며, 시스템의 초기 상태는 초기 마킹 M_0 로 표시된다[3].

Petri Net의 이론은 많은 연구자들에 의해 다양한 목적을 가지고 연구되어 왔으며 본래의 이론에 다양한 수정 및 확장이 가해졌다. 따라서 Petri Net의 정의도 다양하며 이 중 본 논문에서 인용한 Petri Net은 Marked Petri Net이며 다음과 같이 5개의 튜플(tuple)로 정의된다[2,3].

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

여기서, P : 플레이스의 유한집합, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n \geq 0$, T : 트랜지션의 유한집합, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m \geq 0$, I : 트랜지션의 입력함수, $t_j \in T \rightarrow I(t_j) \in P$, O : 트랜지션의 출력함수, $t_j \in T \rightarrow O(t_j) \in P$, $P \cup T \neq \emptyset$ and $P \cap T = \emptyset$, $M_0: P \rightarrow 0, 1, 2, 3, \dots$ 초기마킹이다.

Petri Net에서 아크는 플레이스와 트랜지션을 상호 연결하는 것으로써, $P \times T \rightarrow N$ 아크와, $T \times P \rightarrow N$ 아크가 있다. 아크가 플레이스 p_i 에서 시작하여 트랜지션 t_j 를 가리킨다면, 이것은 $I(p_i, t_j) \neq 0$ 에 한해서 p_i 가 t_j 의 입력 플레이스임을 의미한다. 유사하게, 아크가 트랜지션 t_j 에서 시작하여 플레이스 p_i 를 가리킨다면, 이것은 $O(t_j, p_i) \neq 0$ 에 한해서 p_i 가 t_j 의 출력 플레이스임을 의미한다. 도식적 표현에서, 플레이스(또는 트랜지션)를 연결하는 병렬 아크의 가중치는 $I(p_i, t_j) = W(p_i, t_j)$ 또는 $O(t_j, p_i) = W(t_j, p_i)$ 로 나타낸다. 그리고 플레이스 $p_i \in P$ 와 트랜지션 $t_j \in T$ 의 $p \cdot (\cdot p)$ 또는 $t \cdot (\cdot t)$ 는 다음과 같이 정의된다[2][3].

$$\begin{aligned} \cdot t_j &= \{p_i \mid I(p_i, t_j) > 0\}, & t_j \cdot &= \{p_i \mid O(t_j, p_i) > 0\} \\ \cdot p_i &= \{t_j \mid O(t_j, p_i) > 0\}, & p_i \cdot &= \{t_j \mid I(p_i, t_j) > 0\} \end{aligned}$$

2.2. Petri Net 형식론 일례

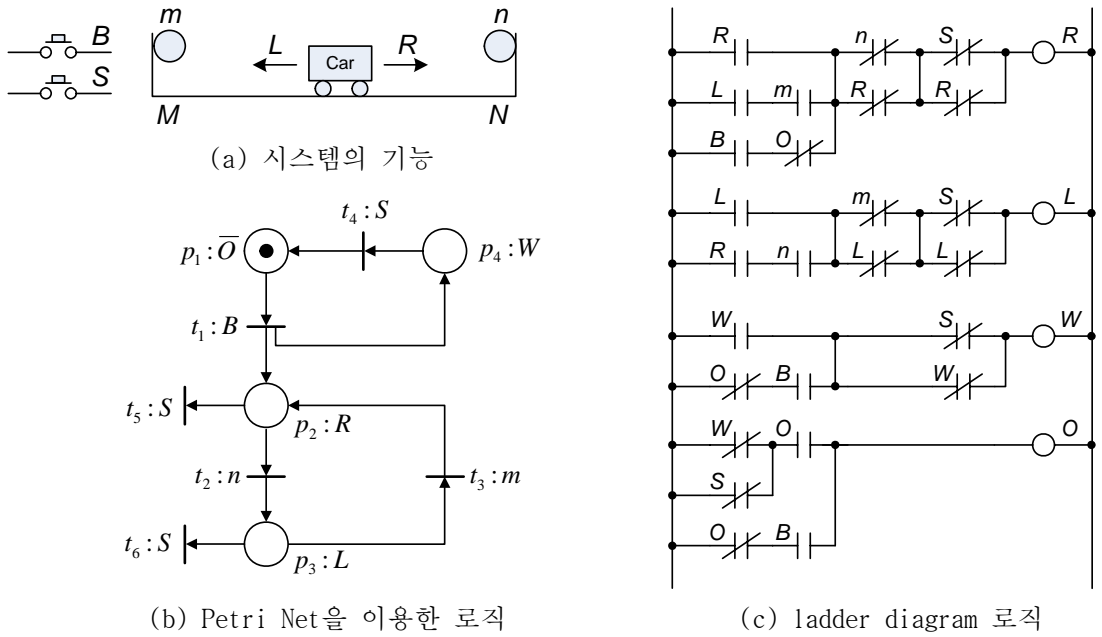


그림 1 차량 왕복시스템 동작 일례

Petri Net의 동작을 간단하게 설명하기 위해 그림 1(a)와 같은 시스템을 고려해 보자[5]. 시스템 초기 상태에서 차(car)는 트랙의 임의의 지점에 위치한다. 시작버튼(B)을 누르면 차는 우측(R)으로 이동하고, 차가 지점 N에 도달하면 자동으로 좌측(L)으로 이동한다. 좌측으로 이동하는 차가 지점 M에 도달하면

자동으로 우측(R)으로 이동한다. 임의의 상태에서 정지버튼(S)을 누르면 차는 현 위치에서 바로 정지하게 되고, 시작버튼(B)을 다시 누르면 차는 우측(R)으로 이동하여 지점 M과 N사이를 반복 운행한다.

위와 같은 차의 동작을 Petri Net 기법으로 도시하면 그림 1(b)와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그림 1(b)에서 B와 S는 에지입력(edge input)을 표시하고, n과 m은 레벨입력(level input)을 표시한다. Petri Net에서 원은 플레이스이고, 바(bar)는 트랜지션이며, p_1 은 초기상태를 나타내는 플레이스이다. 초기상태에서 \bar{O} 는 O의 보수(complement)를 나타내며, p_1 안의 점은 시스템의 상태를 표시하는 토큰(token)을 나타내고 있다. 즉, 그림 1(a)에 도시된 피제어시스템에서 시작버튼(B)이 눌리면 p_1 에 있는 토큰은 p_2 와 p_4 로 이동한다. 그 의미는 p_2 는 차가 우측으로 이동하고 있음을 나타내고, p_4 는 차가 동작상태에 있음을 나타낸다. 여기에서, n이 입력되면 토큰을 p_3 로 이동하여 차가 좌측으로 이동하고 있음을 나타내게 된다. m이 입력되면 토큰을 p_2 로 이동하여 차가 우측으로 이동하고 있음을 나타내게 된다. 결국, 차가 좌, 우로 반복적으로 이동하는 상황이 Petri Net에 도시되어 있다. 그림 1(c)는 Petri Net 그래프로부터 ladder diagram으로 변환한 것이며, 이들에 대한 방법은 별도의 문헌을 참조하기 바란다[5].

표 1 차량 왕복시스템에서 플레이스의 의미

플레이스	변수	의미
p_1	O	시스템 초기상태
p_2	R	우측으로 이동
p_3	L	좌측으로 이동
p_4	W	시스템 동작상태

3. MCB 투입/차단 제어회로의 모델링

3.1. 모델링 개요

그림 2는 판토타프를 포함한 교직류(ADV)겸용 철도차량 주회로차단기(MCB)의 시스템 개략도를 보인 것이다. 전차선 전압이 정상상태에서 판토타프가 상승하면 직류구간에서는 변성기(PT)의 2차권선의 전기저항이 적기 때문에 DCVR 코일에 직류전압이 인가되고 직류전압계전기(DCVR)가 동작한다. 그리고 교류구간에서는 PT의 2차측에 교류전압이 유도되어 교류전압계전기(ACVR)가 동작한다. 이들 ACVR 및 DCVR이 동작하면 교류전압 시한계전기(ACVRTR) 또는 직류전압 시한계전기(DCVRTR)가 동작한다. 시한계 전기를 사용하는 이유는 교류의 경우, 교류-교류 섹션 통과시에 일시적으로 무전압으로 되어 ACVR이 석방, 주회로차단기(MCB)가 트립(trip)하는 일이 없도록 하고 DCVRTR은 직류구간에서의 직류-직류 섹션 통과시 혹은 판토타프의 이선을 고려하여 DCVR이 일시적으로 석방하더라도 MCB를 함부로 동작시키지 않도록 하기 위함이다[6].

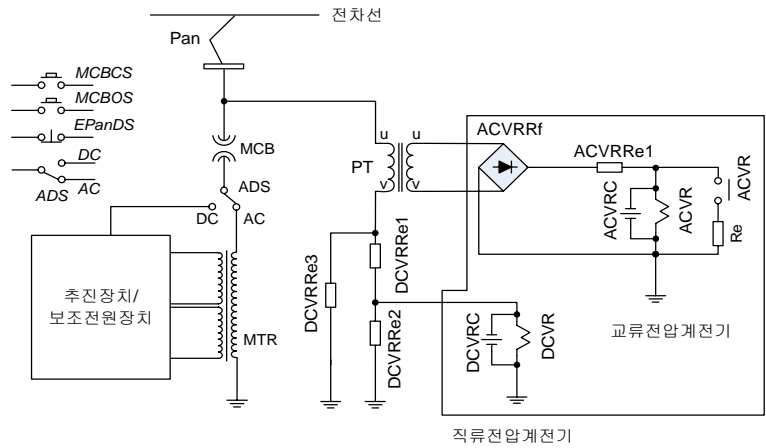


그림 2 주회로차단기(MCB) 시스템 회로

주변압기(MTR) 1차권선은 교직절환스위치(ADS)의 AC측에 연결되고, 추진장치 및 보조전원장치는 교직절환스위치의 DC측에 연결된다. 시스템의 초기상태는 운전반에서 전차선 전원표시등(ACV, DCV) 점등으로 판토타프 상승 및 전차선 전원공급 상태가 확인되고, 운전실내 주간제어기 회로차단기(MCN) ON상태와 각종 회로차단기 및 주차단기 공기관 록크 상태정보 입력 등에 대해서는 모델링을 보다 간단하게 표현하기 위해 주회로차단기 시스템 회로에는 포함시키지 않았다. 다만, 이들에 대한 로직은 Petri Net 그래프의 트랜지션 상태에서 표 3과 같이 부울함수식

표 2 주회로차단기 제어회로 주요 플레이스의 의미

플레이스	변수	의미
p_1	\bar{O}	초기상태
p_2	$MCBHR-C$	주차단기 제어계전기 투입코일
p_3	$MCBHR-O$	주차단기 제어계전기 차단코일
p_4	ADS	교직절환스위치
p_5	$ADC_q(AC)$	AC측 위치
p_6	$ADC_q(DC)$	DC측 위치
p_9	$ACVR$	교류전압계전기
p_{10}	$DCVR$	직류전압계전기
p_{11}	$ACVRTR$	교류전압 시한계전기
p_{12}	$DCVRTR$	직류전압 시한계전기
p_{14}	$MCBR1$	주차단기 제1계전기
p_{15}	$MCB-C$	주차단기 투입 코일
p_{16}	$MCBR2$	주차단기 제2계전기
p_{18}	$MCB-T$	주차단기 차단 코일

(boolean function)으로 처리된다. 그리고 표 2는 Petri Net 그래프에서 사용되는 주회로차단기 제어회로에 대한 주요 플레이스의 변수 및 의미를 보인 것이다. 플레이스 중 주차단기 제어계전기(p_3, p_{19})와 주차단기 계전기(p_{15}, p_{20})는 키프계전기(keep relay) 또는 래치계전기(latch relay)를 사용한다. 이 계전기는 단일 부품 안에 코일이 2개가 내장되어 있어 투입 또는 차단이 상호 배타적으로 동

작한다. 코일의 정격은 단시간 정격이므로 자기접점으로 코일을 끊도록 하고 있으며 한번 전환 하면 전원을 제거하여도 계속 그 상태를 유지하는 특성을 가지고 있다[6].

표 3 부울함수식(Boolean function)

$$t_1 = MCBCS \cdot MCN \cdot HCR \cdot p_1, \quad t_2 = \overline{EPanDS} \cdot MCBHR, \quad t_3 = MCBHR \cdot MCBOS$$

$$t_4 = AC, \quad t_5 = DC, \quad t_6 = \overline{MCB} \cdot ADAN \cdot ADS(AC), \quad t_7 = \overline{MCB} \cdot ADDN \cdot ADS(DC)$$

$$t_{12} = ADC_g(AC) \cdot MCBN1 \cdot ADAR1 \cdot ACVRTR \cdot \overline{DCVRTR}$$

$$t_{13} = ADC_g(DC) \cdot MCBN2 \cdot ADDR1 \cdot \overline{ACVRTR} \cdot DCVRTR$$

$$t_{14} = PanPS1R \cdot PanPS2R \cdot \overline{UCORR} \cdot \overline{MTAR}$$

$$t_{15} = (\overline{ADC_g} + ADC_g) \cdot \overline{L1} \cdot (MCBOR + COR2) \cdot SqR2 + \overline{K} \cdot MCBR1 \cdot \overline{MCBR2} \cdot \overline{MCBR2}$$

$$t_{17} = P_{17} \cdot MCBR2, \quad t_{18} = ADAR1 \cdot ADS(AC), \quad t_{19} = ADDR1 \cdot ADS(DC),$$

$$t_{20} = \overline{MCBR1} \cdot MCBHR, \quad t_{22} = \overline{MCBHR-0} \cdot ADS, \quad t_8 = t_9 = t_{16} = t_{21} = t_{23} = t_{24} = 1$$

3.2. 주회로차단기 투입

전차선 전압이 정상상태에서 판토 그래프가 상승되고, 주회로차단기(MCB) 투입 회로의 초기조건이 만족되었을 경우, 운전반의 MCB 투입 스위치(MCBCS)가 눌리면 트랜지션 t_1 이 점화되어 토큰은 p_2 로 이동한다. 이것은 주차단기 제어계전기 투입코일(MCBHR-C)이 동작하는 것을 의미한다. 여기서 t_2 조건이 만족되면 토큰은 p_4 로 이동한다. p_2 는 래치계전기이므로 한 번 동작하면 차단코일이 동작하지 않는 한 전원을 제거하여도 계속 그 상태를 유지하기 위하여 t_{22} 을 통해 궤환 회로로 구성된다.

교직절환스위치(ADS)의 선택에 따라 토큰은 AC측(p_5) 또는 DC측(p_6)으로 이동한다. 만일 AC측으로 선택되었다면, 토큰은 p_5 로 이동하고 t_6, t_{12}, t_{14} 의 점화 조건이 만족되면 토큰은 p_{11} 로 이동한다. 이것은 주차단기 제1계전기(MCBR1)가 동작하는 것을 의미한다.

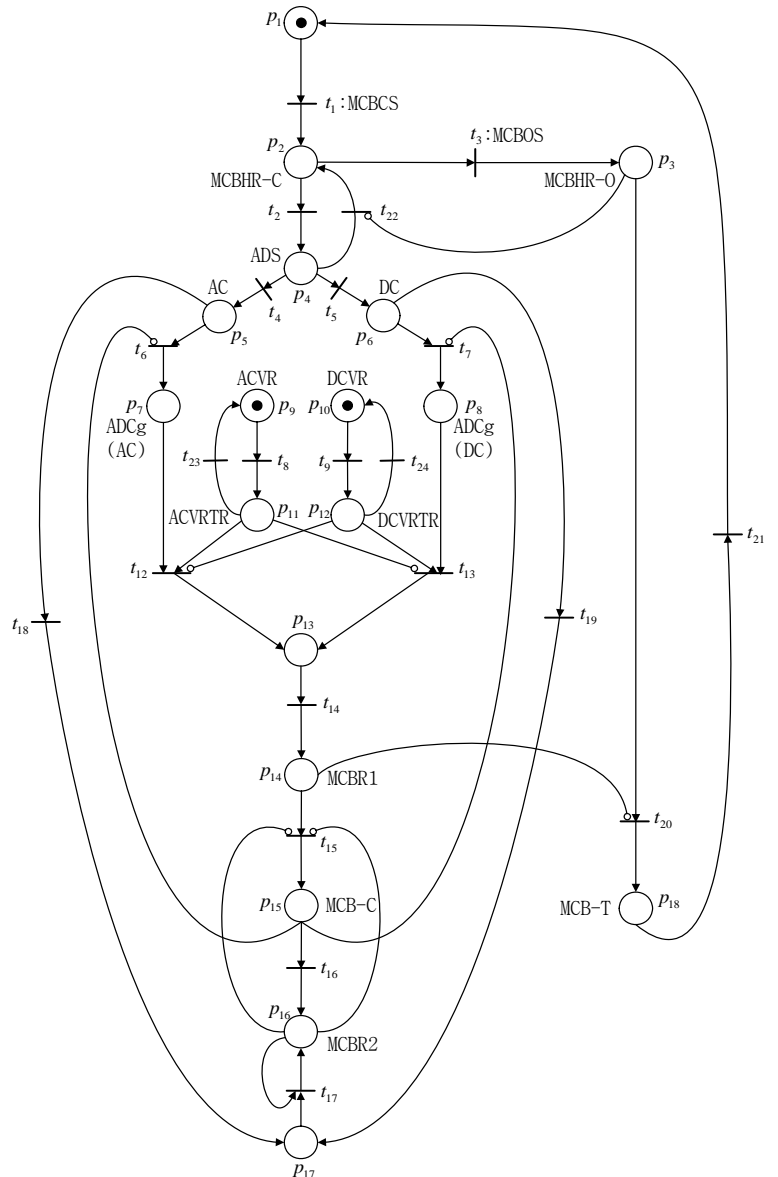


그림 3 Petri Net을 이용한 MCB 투입/차단 제어회로 로직

주차단기 제1계전기(MCBR1)가 동작하면 t_{15} 는 p_{14} 에 토큰이 존재하고 p_{16} 에는 토큰이 존재하지 않을 때 그리고 입력 부울함수식이 만족되면 점화된다. t_{15} 가 점화되면 토큰은 p_{16} 으로 이동한다. 이것은 주차단기 투입 코일(MCB-C)이 동작하는 것을 의미한다. 주차단기 투입 코일(MCB-C)이 동작하면 토큰은 p_{16} 으로 이동한다. 이것은 주차단기 제2계전기(MCBR2)가 동작하는 것을 의미한다. 예로서 MCB가 어떠한 원인으로 트립하더라도 전원을 한번 끊지 않는 한 재투입이 되지 않는 소위 앤티펌핑(antipumping) 로직이다. 만일 교직절환스위치(ADS)가 직류로 선택되었다면, 토큰은 p_6, p_8, p_{13}, p_{14} 를 경유하여 AC측과 유사하게 동작한다. 주차단기 투입 코일(MCB-C)은 에지상태에서 동작하고, 주차단기 제2계전기(MCBR2)가 동작하면 주차단기 투입 코일에 인가되는 전원을 차단한다. 그러나 주차단기 차단 코일이 동작하지 않는 한 전원을 제거하여도 계속 그 상태를 유지한다.

3.3. 주회로차단기 차단

주회로차단기를 정상적으로 차단하기 위하여 운전실의 MCB 차단 스위치(MCBOS)를 누르면 t_3 이 점화되어 토큰은 p_3 으로 이동한다. 이것은 주차단기 제어계전기 차단 코일(MCBHR-0)이 동작하는 것을 의미한다. 여기에서 t_{20} 이 점화되면 즉, p_3 에 토큰이 존재하고 p_{14} 에는 토큰이 존재하지 않을 때 그리고 입력 부울함수식이 만족되면 점화된다. t_{20} 이 점화되면 토큰은 p_{18} 로 이동한다. 이것은 주차단기 차단 코일(MCB-T)이 동작하는 것을 의미한다. t_{20} 의 부울함수식에는 정상상태의 차단조건과 고장 또는 사고시 조건이 포함되어 있다. 주차단기 사고차단은 주변압기 또는 주변환장치에 이상전류나 돌발적인 상황이 발생시 주회로를 차단하여 기기를 보호한다. 교류과전류 계전기(ACOCR), 교류모진보호 계전기(ArrOCR), 주회로차단기 차단계전기(MCBOR), 차단계전기(COR2) 등이 이에 해당한다.

4. 결론 및 향후계획

이 논문은 Petri Net을 이용하여 주회로차단기 제어회로를 모델링하기 위한 실제적인 방법을 제안하였다. Petri Net는 그래프로 표시할 수 있으므로 숙련된 회로 설계 기술자가 아니더라도 로직의 동작 뿐 아니라 인터로킹과 같은 시스템의 특성에 대해서도 쉽게 이해할 수 있다. 향후에는 Petri Net을 이용하여 차상제어장치(추진장치, 제동장치 등)와 연계하여 시스템의 성능/신뢰성 모델링 및 분석에 대해 연구하고자 한다.

참고문헌

- [1] C.A.Petri, 1962. *Kommunikation mit Automaten*. English Translation, 1966 : Communication with Automata, Technical Report RADC-TR-65-377, Rome Air Dev. Center, New York.
- [2] T. Murata, Petri Nets : Properties, Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE, Vol. 77, no.4, pp.541-560, 1989.
- [3] Jiacun Wang, Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling
- [4] Uzam, M. and Jones, A.H. Discrete event control system design using automation Petri Nets and their ladder diagram implementation, International journal of Advanced Manufacturing Technology, 716-728, 1998.
- [5] GI BUM LEE, HAN ZANDONG, JIN S.LEE, Automatic generation of ladder diagram with control Petri Net, Journal of Intelligent Manufacturing, 15, 245-252, 2004.
- [6] 인버터제어 전동차 기초설명집, KORAIL, 2003.