

에이전트 기반 컬러 페트리 넷을 이용한 전력 계통의 정보 흐름 모델링: 광역 보호 시스템에의 적용

논 문
60-7-8

Agent-based Colored Petri Net Modeling of Grid Information Flows : Modeling of Wide Area Protection System

박 병 성* · 허 건†
(Byungsung Park · Kyeon Hur)

Abstract - While most of the existing protection schemes have been designed with local information around individual components, these local schemes are not considered capable of protecting the modern electric power grid with growing complexity. Recent blackouts in North America and Europe have renewed the emphasis on coordinated protection and control actions to avoid systemwide blackouts, utilizing all of the available grid information. Thus, this paper proposes a new methodology, Agent-based Colored Petri Net (ACPN) modeling for systematically representing, modeling and analyzing information flows and interactions among the entities of the electric power grid. The paper demonstrates its efficacy and accuracy by investigating an ACPN model of a wide area protection system for a typical power grid. The proposed modeling and analysis schemes may further provide a framework to help assure reliability and interoperability of diverse smart grid components.

Key Words : Grid information flows, Petri-net, Colored petri-net, Agent, Wide area protection system

1. 서 론

최근 북미와 유럽 등지에서 일어났던 대규모의 정전 사태는 송전 시스템을 광범위한 시각에서 연구해야 할 필요성을 대두시켰다. 기존의 보호 알고리즘들은 부분적인 입력에만 기반하여 결정을 내리고 있지만, 이 알고리즘은 현대의 복잡한 전력 시스템에 잘 맞지 않는 단점이 있다. 따라서 복잡한 전력 시스템에서도 적용할 수 있도록 하는 알고리즘에 대해 활발하게 연구가 되고 있으며, 그 중 광역 보호 시스템에 관심을 갖고 연구가 진행되고 있다[1][2][3]. 광역 보호 시스템의 보안성을 높이기 위해 통신망을 기반으로 하는 에이전트의 기법을 적용하고 있다[1][4][5]. 지능형 전력 기기에 위치한 보호 에이전트 상호간의 전력 정보 교환은 계통시스템에서의 사고를 신속히 발견할 수 있게 해주고, 그 사고가 난 지점을 한정시킬 수 있게 해주는 역할을 한다[3][6][7]. 계통에 있어서 사고에 대한 정확한 진단은 전력 시스템의 대규모 피해를 막을 수 있게 해준다. 다중에이전트 기술은 특유의 자율적이고 협력적인, 그리고 주도적인 특징을 앞세워 분산 보호 시스템을 위한 막강한 해결책을 제시하고 있다. 광역 보호 시스템에서의 다중에이전트 시스템에는 두 가지 구조가 있는데 1) 각 지역의 중심에서 조종하는 구조와 2) P2P 기반으로 에이전트들이 분산된 통제권을 조율하는 구조다. 후자의 구조는 에이전트가 일정한 계층적

구조가 아닌 동등한 능력을 가지고 있다는 점에서 때때로 컴퓨터 네트워크의 P2P 구조와 동일 시 된다[9]. 이 구조는 대부분의 광역 시스템 보호에서의 전력정보 분석 관련 연구에서 사용되었다. 사고가 발생하였을 때, 에이전트들은 그것을 인지함과 동시에 그 장소를 찾기 위해 인접 에이전트들과의 통신을 하여 사고정보를 수집하기 시작한다. 이와 같은 다중에이전트들의 상호작용을 설명하기 위해 페트리 넷 모델링은 유용하다[10].

페트리 넷 (Petri-Net : PN)은 분산 시스템을 설명하고 분석하기 위한 수학적이며, 시각적인 모델로 기존의 방법과 비교해 몇 가지 장점이 있다. 한 가지 예로 페트리 넷은 규칙을 규정하고, Flow chart, 그리고 Finite State Machine (FSM)의 형태로 에이전트들의 행동을 정의 할 수 있다. 페트리 넷은 정지 구조와 정보의 흐름, 충족된 조건, 그리고 다른 상태·조건으로의 이행간의 의존관계(흐름, 순서, 충돌하는 요구사항 등)를 확실하게 보일 수 있다. 따라서, 지금까지 페트리 넷은 전력 시장, 광역 보호 시스템에서의 다중 에이전트 시스템, 전력 시스템 복구와 같은 분야에 성공적으로 적용되었다 [3][5][10]. 컬러와 목적기반의 페트리 넷은 전력계통의 광역 사고 진단하는 연구에 적용되었고, 분산정보 시스템의 특성과 모듈식의 디자인을 위한 체계를 기반으로 하는 페트리 넷의 응용인 G-Net은 객체지향 소프트웨어 공학적인 모델링 방법으로 다중 에이전트 시스템에 연구되어지고 있다[12][13]. Xu, Han과 Kumagai [13]는 한 에이전트를 기반으로 하는 G-net을 에이전트들의 인지와 협력을 설명하기 위해 연구하였다. 하지만, 지금까지의 연구는 에이전트를 적용시키는 방법에 초점을 맞추고 있으며, 그 결과를 토대로 확장시키는 방식을 채택하고 있기 때문에, 다수의 에이전트들 간의 상호협력을 요구하는 복잡한 전력 시스템(광

* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정
† 교신저자, 정회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 조교수
E-mail : khur@yonsei.ac.kr
접수일자 : 2011년 2월 8일
최종완료 : 2011년 5월 23일

역 보호 시스템)에서의 전력 정보의 흐름은 정확하게 파악하기 어렵다. 따라서, 이를 해결하기 위해 우리는 광역 보호 시스템에서 전력정보의 흐름을 다중 에이전트들의 협력을 통해 효율적으로 분석할 수 있는 G-net 기법을 응용하여 컬러 페트리 넷에 기반 한 새로운 에이전트(Agent-based Colored Petri Net : ACPN) 모델을 제안한다. 또한 제안한 ACPN 구조와 정의를 설명하고, 시나리오 모델을 통하여 광역 보호 시스템의 오작동과 고장 상태를 정확하게 파악할 수 있다는 것을 제시한다. 이 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 페트리 넷의 개념에 대해 설명한다. 광역보호시스템과 같은 복잡한 전력 시스템에서의 정보의 흐름을 파악하기 위한 ACPN구조를 3장에 제시한다. 4장에서는 우리가 광역 보호 시스템에서의 전력정보 흐름 분석을 위한 ACPN 모델을 구축하고 시나리오를 통해 유효성을 증명한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론 과 향후 연구에 대해 설명한다.

2. 페트리 넷 (PN)

페트리 넷은 이산적인 분산 시스템의 수학적 모델이며 시스템의 정확성을 측정하기 위한 여러 가지 기준 등의 정보의 흐름과 기본적 특징들을 분석하기 위해 쓰일 수 있다. 페트리 넷은 장소, 변이, 아크로 이루어져 있다[10]. 두 장소(place)가 주어졌을 때(i 와 j) i와 j를 이어주는 곡선은 변이 i를 출발하여 j 로 들어오는 것을 의미한다. 실행 과정에서 입력 혹은 다른 시스템의 규칙에 따라 나타날 수 있는 데이터는 토큰이나 점으로서 표기된다. 예를 들자면 키보드 자판의 'a' 키를 누르면 그에 상응하는 토큰이 키보드에 전달되는 것이다. 이러한 전달은 각각의 입력 장소들의 '토큰'을 가지고 있을 때만 '발사'될 수 있다. 변이가 '발사' 되었을 때 토큰이 각각의 입력 장소에서 상응하는 출력 장소로 이동된다. 페트리 넷의 '토큰'은 이러한 토큰들이 시스템 상에서 어떻게 분포하여 있는지를 보여준다. 페트리 넷의 마킹은 시스템의 현재 상태를 보여준다.

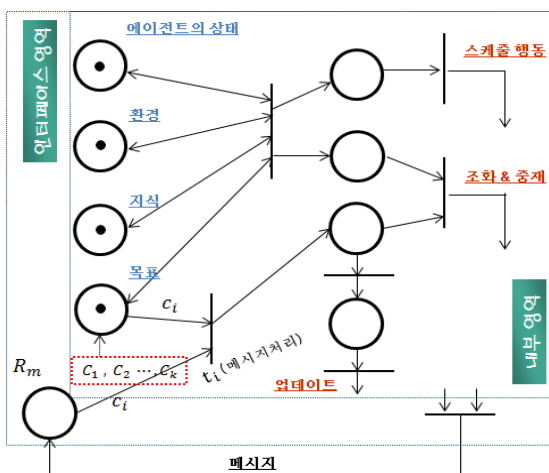


그림 1 컬러 페트리 넷 기반의 에이전트(ACPN) 구조
Fig. 1 Agent architecture based on colored petri-net

3. 컬러 페트리 넷 기반의 에이전트(ACPN)의 구조

기본 페트리 넷의 토큰이 값을 가지지 않는 반면, 컬러 페트리 넷에서는 2장에서 다루어진 예시에서의 키보드의 글자 'a' 와 같이 모든 토큰들이 값을 가진다[10]. 따라서 분산정보 시스템의 특성과 에이전트들의 인지와 협력을 설명하는 G-Net과 컬러 페트리 넷을 접목시켜 전력정보의 흐름을 복잡한 광역 보호 시스템에도 적용 가능한 구조를 제안한다.

3.1 일반적인 ACPN 설계

제안한 ACPN 모델의 설계는 그림 1과 같이 정의 될 수 있다. 우리는 G-net의 에이전트 모델과 컬러 페트리 넷을 기반으로 본 모델의 분석을 단순화시키기 위해 몇 가지 요소들을 추가하였다. '목표 장소' (goal place, 에이전트에 적용될 수 있는 목표를 나타냄) 와 '지식 장소'(knowledge place, 에이전트에 적용될 수 있는 환경이나 내부적 상태를 나타냄)는 본 모델에서 목표 장소로 정의하고 통합한다. 메시지 라우팅을 위한 포괄적인 변화 장소(Generic Switch Place : GSP), 메시지 프로세싱 유닛(Message processing unit : MPU) 그리고, GSP의 장소(보조 메시지 라우팅 유닛)들은 생략되거나 R_m (메시지 도착 장소)이라는 한 개의 장소로 통합한다. 목표 R_m 과 환경 장소(둘러싼 환경의 현재 상태를 나타냄)는 일반적인 장소라고 한다.(페트리 넷에서 일반 장소는 자신 외에는 다른 것을 의미하지 않는다. 복잡한 장소는 한 개의 장소가 복잡한 관계 아래에서 다수의 '장소'를 나타낼 수 있을 때 쓰인다.) 이러한 단순화 작업은 페트리 넷의 동작에 큰 영향을 주지 않는다[12].

본 모델 ACPN은 메시지 의사결정과 에이전트의 동시성과 자발성을 추가하기 위한 자동 스케줄링 능력을 고려한다. 에이전트들의 내부적인 움직임을 의미하는 ACPN의 '변이(Transition)'와 변이들의 상태 조건 등을 보여주는 '장소'로 구성되어 진다. 여기서 컬러 토큰을 사용하는 것은 제안하는 모델의 크기를 줄이고, 에이전트들의 동질성을 고려하여 P2P 에이전트들의 모델링을 하기 위한 것으로 전력정보의 흐름을 파악하는데 적합하다. 컬러 변수 C는 각각의 상태 장소와 각각의 아크에 매겨진 가중치 벡터에서 토큰의 값을 보이기 위해 정의된 것이다. ACPN의 구조는 아래 그림과 같이 통신 인터페이스 영역과 내부 영역으로 이루어져 있다.

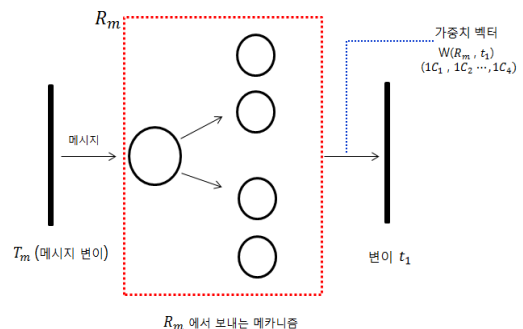


그림 2 R_m 모듈에 전송하는 메카니즘
Fig. 2 Transmission mechanism to the R_m module

1) 통신 인터페이스 영역 : 발신/송신된 통신 인터페이스, 발신된 인터페이스들은 발신되는 아크와 T_m 메시지 변이(메시지가 다른 에이전트들로 보내지는 곳)으로 이루어진다. 다른 에이전트들로부터 메시지를 받았을 때 R_m 모듈은 이를 분석하고 어떤 변이로 목표 에이전트들이 발사되어야 할지 결정한다. 메시지 프로세싱 모듈(MPM)은 메시지들을 해석하고 사전에 프로세스 한다.

2) 내부영역 : 지능형 구성요소들은 목표, 지식, 환경, 그리고 에이전트의 상태 모듈이다. 에이전트들은 정상, 오류, 혹은 실패의 상태로 있을 수 있다. 센서와 스케줄링 모듈에서 내부적 사건들은 지역적 환경에서 에이전트들이 그것의 동료들과 조율을 시작하게끔 하는 것으로 감지될 수 있다. 행동들은 스케줄링 모듈에서 지역적이고 협동적으로 공유된 정보에 따라 계획되고 실행된다. 조화와 중재 모듈에서는 다른 에이전트들로부터의 변수와 판단을 포함한 메시지들이 센서의 가장 최근의 입력과 함께 처리된다. 조화 에이전트 목적에 따라서, 다양한 정보들이 서로 연관이 있는 에이전트들로부터 수집된다. 다수의 에이전트들로부터 도출된 통합적인 판단이 충돌을 해소하고 전체 시스템의 목표를 달성할 수 있게 한다. 위에서 다루어지지 않은 기타 각종 일반 변이와 위치도 존재한다.

3.2 ACPN의 도식적 모델

다중에이전트 시스템(Multi-agent System)은 2개의 요소로, $MS = \langle A, R_e \rangle$ 로 정의 되어진다. A는 에이전트 서브 넷의 집합이다. 즉 $A = \{A_i, i=1,2,\dots,n, i \in N\}$ 이고, A_i 는 에이전트 i 의 페트리 서브 넷의 모델이다. R_e 는 에이전트들 사이의 관계이고 $R_{e_{ij}}$ 는 에이전트 i 와 j 사이의 상호 관계를 나타낸다. 에이전트 i 의 페트리 서브넷 A_i 는 9개의 요소로 이루어진 집합, $A = \langle P, T, F, C, W, M, IIF, OIF, IU \rangle$ 로 정의되어진다.

- P 모델을 구성하기 위한 최소한의 장소 수
- T 모델을 구성하기 위한 최소한의 변이(Transition) 수. 변이들은 일반적이고, 지능적이고, 그리고 메시지 변이들의 종류로 분류되어진다. 지능적인 변이들은 지능형 유닛(Intelligent Unit :IU)로 설명되어진다.
- F 장소와 변이들 $F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ 사이에 관계를 화살표(Arcs)로 표현된다. 그 화살표는 장소 또는 변이들에 의해서 발생된 변수 v 로 수행
- C 장소에 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 값을 가지는 색깔 집합 $C(P)$
- W $W: F \rightarrow \{[0,1]c_1, [0,1]c_2, \dots, [0,1]c_k\}$. F에서의 가중치 함수 W_a 의 값은 0 또는 1
- M 장소의 표시 : $M: S \rightarrow \{[0,1]c_1, [0,1]c_2, \dots, [0,1]c_k\}$ M_a 의 값은 0 또는 1
- IIF 들어오는 인터페이스 $IIF = \langle PM, IA \rangle$ IA 다른 에이전트들로부터 들어오는 아크를 나타낸다.

OIF 나가는 인터페이스 $OIF = \langle OA, T_m \rangle$, T_m 은 다른 에이전트들에게 메시지를 보내기 위한 메시지 변이다. OA 는 다른 에이전트들에게 나가는 아크를 나타낸다. 즉, $F(T_m, R_m)$.

IU 의사결정, 운영능력과 중재, 그리고 센서 모듈을 포함하는 지능형 유닛들을 위한 기준을 나타낸다. 목표, 지식, 환경 장소들은 에이전트들의 상태로서 생각되어 질 수 있는 것을 설명하는데 사용되어진다.

우리는 T_m 을 제외하고는 각 에이전트들의 변이는 다른 에이전트들에 상관없이 오직 각각의 장소(Place)에만 관계를 가진다고 모델을 한정한다. 예를 들어 에이전트2에서 발사한 변이1은 오직 모듈 R_m 의 마킹 벡터 $M(R_m)$ 과 에이전트2의 목표 상태인 $M(Goal)$ 에 의해서만 결정되는 것을 의미한다. 이 두 요소는 다시 에이전트2의 $F(R_m, T_1)$ 과 $F(Goal, T_1)$ 무게 벡터 $W(R_m, T_1)$ 과 $W(Goal, T_1)$ 에 의해 결정된다. 또한 이 네 벡터들은 $(0, 1c_2, 0, \dots, 0)$ 같은 형태로 표현한다. 에이전트 i 의 메시지 변이 T_m 이 다른 에이전트들에게 메시지를 보내기 위해 발사되었을 때, 우리가 제한한 ACPN 모델의 R_m 모듈은 수신단의 정보를 수신하고 분석하는 역할을 담당한다. 그리고는 R_m 모듈의 마킹 벡터 $M(R_m)$ 으로 변환하고, t_1 이 목표 에이전트로 발사된다. R_m 의 발신 방법은 그림 2에 설명되어 있다. 예를 들어 에이전트1이 T_{m1} 을 통해 에이전트2와 에이전트3에게 메시지를 보내면 R_m 은 그것을 받아서 $M(R_m) = (0110\dots0)$ 을 만든다. 이는 에이전트2와 에이전트3의 t_1 변이가 각각 발사되었음을 뜻하는 것이다.

4. 광역 보호 시스템에서의 전력정보흐름 분석을 위한 ACPN 모델과 시나리오

광역보호시스템은 기본적인 목적과 그것을 구성 체계는 유사할 지라도 기기, 설치 장소 및 운영자에 따라 다양한 형태로 설계될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전력정보흐름 분석을 위한 ACPN을 적용할 광역 보호 시스템을 그림 4와 같이 간략화된 전력계통과 이의 다중 에이전트 시스템으로 나타낸다. 본 모델의 주 아이디어는 지능형 전기 디바이스가 탑재된 에이전트들이 전력 계통의 인트라넷 네트워크를 통해 통신하는 것으로 에이전트들의 협력을 통한 송배전 선로의 사고를 찾는 방식으로 규정한다. 여기서 지능형 전기 디바이스(Intelligent Electronic devices : IED)는 소프트웨어 에이전트를 지원에 필요로 하는 통신, 입력/출력 능력 그리고 정보를 계산할 수 있는 능력을 가진 하드웨어를 의미한다. 그림 3과 같이 이 지능형 전기 디바이스를 기반으로 한 에이전트들은 자동적으로 운영되고 환경과 에이전트들 간의 상호작용을 한다[3],[4]. 또한 광역보호정보는 정확하고 빠르게 사고를 감지하기 위하여 보호 에이전트들이 정보가 교환되어지고, 보호 에이전트들은 그림 4의 A,B,C,D,F라는 서브스테이션에 위치되어짐을 가정한다.

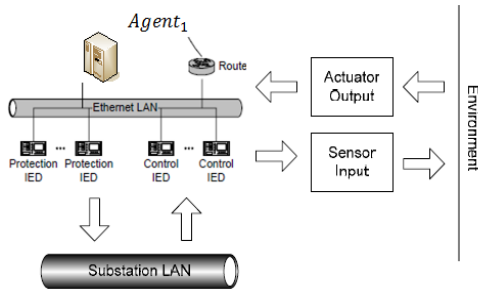


그림 3 지능형 전기 디바이스 기반 에이전트 구조
 Fig. 3 Architecture of agent based on intelligent electronic devices

4.1 광역 보호 시스템에 ACPN 모델 적용

광역 보호 시스템에서의 전력정보흐름을 정확하게 분석하는 ACPN 모델은 시스템의 제어 흐름과 고정된 구조로 모델링하기 위하여 순환형 킬러 패트리 넷으로 구성하였다. 광역 보호 시스템에서의 전력정보흐름 모델은 그림 4와 같이 에이전트 1~8을 포함하여 구축하고, 전력정보흐름 추적은 그림 4와 같이 제안한 ACPN 모델을 기반으로 구축된 시스템을 모델링 한다. 킬러 패트리 넷에서 장소와 변이는 <표 1,2>에 각각 나타내었다. 여기서 각각의 에이전트들의 구조는 동일하다. 본 구축된 시스템은 에이전트의 행렬 $A_{n \times m}$, $n = \|II\| = 46$, $m = \|PI\| = 29$ 로 전력정보의 흐름을 분석할 수 있다. 에이전트들은 각 장소와 변이를 통하여 전력정보를 파악할 수 있고, 이 과정에서 변이 t_2 (환경 인식)는 주기적으로 활성화 된다. 본 모델에서의 전력정보는 선로의 이상과 보호 장치의 오작동 및 사고 위치를 파악 할 수 있도록 하는 데이터를 의미한다. 결국 차단기 작동유무, 보호 계전기의 동작 여부를 파악 할 수 있도록 하는 필수적인 정보인 것이다.

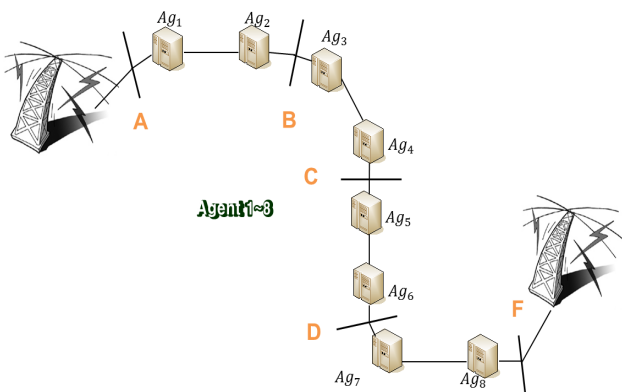


그림 4 다중에이전트 시스템을 이용한 전력네트워크 모델
 Fig. 4 Model of power network using multi agent system

상태 P7는 다른 에이전트들의 명령에 상관없이 에이전트가 판단에 반응하게 하여 자동적으로 스케줄 상태로 가는 것이다. P7은 논리적으로 자동적으로 작동하는 능력을 가진 P6와 유사하다. 메시지를 처리하는 변이 t_1 은 $P_1 \sim R_m$ 로부터 처리되어지는 다양한 메시지에 반응하고 처리한다. 본 모델에서는 신호 샘플링과 정상 상태와 현재 상태를 비

교한 후에, 확인 응답 문자를 통해서 에이전트들은 그 지역의 환경 변화에 대한 정보를 획득한다. P9~P13의 장소(place)을 통해서 발생할 수 있는 작업은 path 0,1,2(보호처리과정), 차단 실패 그리고 half-고장 상태이다. 환경변화에 맞는 상황 변화를 파악하기 위해 이 확인 응답 문자를 사용하는 것이다. 확인 응답 문자의 결과가 Msg1 Trip 실패와 Msg2 half-고장의 경우라면 현재의 에이전트들이 비정상 상태를 나타내는 것이고, Msg5 선고장, Msg4 보호신경, Msg6 현 상태와 같이 파악할 수 있도록 하게 하는 것이다.

보호 상태 메시지들은 t_{17} 에 의해 처리되어진다. 다른 마지막 라인에서 동작하는 에이전트로부터 수신된 현재의 신호를 고려하는 메시지는 t_{19} 에 의해 처리되어진다. 변이 t_{17} 이나 t_{19} 가 발생되기 위한 전제조건은 토큰이 협력하는 P_{14} 에 반드시 존재해야 한다. 변이 $t_{20} \sim t_{23}$ 은 각각 라인에 고장이 났으며, 인접한 라인의 정상상태이고, 다른 라인의 끝 부분의 에이전트들의 half 고장 상태며 그리고 차단 실패를 나타내는 메시지를 처리하는 과정을 나타낸다.

전력계통의 오작동은 변이 t_{24}, t_{31}, t_{45} 의해 발견되어 질 수 있다. 그 에이전트는 변이 t_{25} 와 t_{32} 를 통해서 고장 라인을 알아내는 라인의 양 끝에 보호 상태를 사용한다. 변이 t_{25} 와 t_{33} 에서 통합 보호 전략이 라인 양쪽 끝에서 동작할 때, 현재와의 차이가나는 원칙은 변이 $t_{19}, t_{26}, t_{27}, t_{40}$ 을 통하여 고장을 찾는데 사용되어 진다. 라인의 한쪽 끝에서 에이전트에 half-실패가 발생하면, 그 에이전트는 변이 $t_{21}, t_{29}, t_{22}, t_{35}$ 통해서 라인의 고장을 찾는다.

본 모델과 같이 에이전트의 실패 상태의 확률이 고려되어 질 때, 다중 광역 보호 에이전트들 사이의 협력은 더 복잡해지고 어려워진다. 하지만 우리가 제안한 모델은 설명한 것과 같이 각 상황별로 정보의 흐름을 에이전트들의 활동과 상호작용을 통하여 모니터링하기 때문에 계통 분석에서 일어날 수 있는 결함을 최소화하였다.

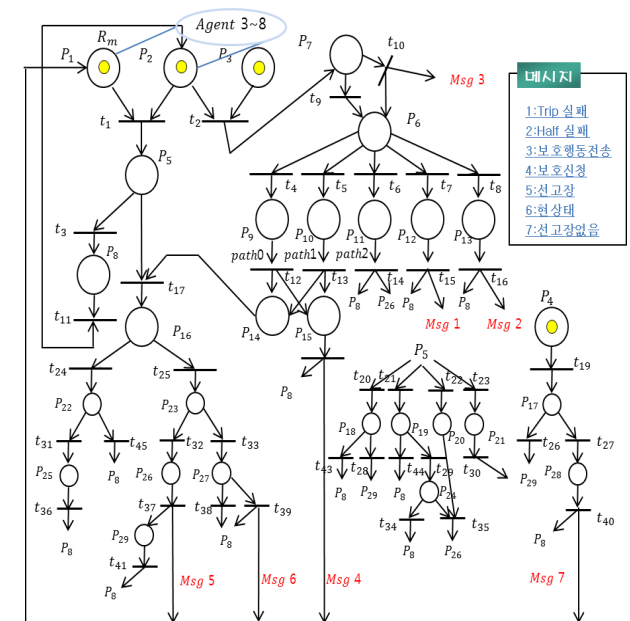


그림 5 광역 보호 시스템을 위한 ACPN 모델
 Fig. 5 ACPN model for wide area protection system

표 1 그림 5의 상태에 대한 설명

Table 1 Places in Fig 5 and their descriptions

상태	내용
P_1	P_M 은 메시지를 받고, 목표 에이전트들을 위한 메시지들을 분석
P_2	목표와 지식 상태들을 위한 병합된 플레이스
P_3	환경 플레이스
P_4	에이전트 상태 플레이스
P_5	실패 상태를 전송하기 위한 플레이스
P_6	사건을 점검하기 위한 플레이스
P_7	자동 스케줄링 위한 플레이스
P_8	메시지를 기록 또는 무시하는 플레이스
P_9	path0에서의 보호 처리과정을 위한 플레이스
P_{10}	path1에서의 보호 처리과정을 위한 플레이스
P_{11}	path2에서의 보호 처리과정을 위한 플레이스
P_{12}	차단기 실패를 위한 플레이스
P_{13}	half-고장을 고려하기 위한 플레이스
P_{14}	협력하는 상태를 나타내는 플레이스
P_{15}	보호 상황을 위해 할당된 플레이스
P_{16}	협력하는 에이전트들로부터 보호 상황 과정을 위한 플레이스
P_{17}	에이전트들로부터 현재의 신호정보 처리과정을 위한 플레이스
P_{18}	메시지 처리과정을 위한 플레이스
P_{19}	협력하는 에이전트들로부터 메시지 처리과정을 위한 플레이스
P_{20}	에이전트들로부터 오는 "Half-고장" 이라는 메시지를 처리하는 플레이스
P_{21}	인접한 에이전트들로부터 전송을 멈추는 실패 메시지를 처리하는 플레이스
P_{22}	협력하는 에이전트들로부터 보호 작업이 없는 것을 가리키는 플레이스
P_{23}	에이전트에 보호 작업이 있을 때의 과정
P_{24}	인접 라인에서의 고장이 있을 때의 과정
P_{25}	오작동 보호 처리과정
P_{26}	라인에서의 고장을 처리
P_{27}	다른 라인의 끝에 있는 에이전트의 현재 신호를 나타냄
P_{28}	이 라인에서 고장이 발생하지 않음
P_{29}	지역적인 차단을 멈추게 하는 과정

4.2 시나리오 예제

그림 4에서 세 번째 라인에서 사고가 발생한다고 가정하자. 그 현상이 발생했을 때, 에이전트5, 에이전트3, 그리고 에이전트8은 에이전트6에 대한 상호협력 에이전트이다. 그것들은 세 번째 라인의 사고를 파악하기 위하여 에이전트6에 각각의 보호 거리를 전송한다. 그 사고는 에이전트5의 보호 영역과 에이전트6의 보호영역에서 발생 한 것이라는 것을 상호협력으로 알 수 있다. 에이전트3은 에이전트4와 상호통신 함으로써 두 번째 라인에서의 오진된 사고를 파악할 수 있다. 유사하게, 에이전트8도 에이전트7과 상호협력 함으로써 네 번째 라인에서의 오진된 사고를 찾을 수 있다. 다중에이전트들 사이의 협력과 중재를 통하여 각 영역별 보호를 확실히 할 수 있는 것이

다. 모든 에이전트의 초기 상태는 $M = \{01_2 1_3 1_4 0 \dots 0\}^1$ 이고, 목표 장소 P_2 , 환경 장소 P_3 , 그리고 에이전트 자기 상태 장소 P_4 에 각각 토큰이 있다. 각 에이전트들은 전력 계통의 내부 네트워크를 통하여 무선 기기들과 통신할 수 있다. 전체 시스템의 협상 과정은 장소 p_1 , 발사 순서 σ_1 , 그리고 발사 카운트 벡터 τ_1 으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = [A5]: t2, t9, t6, t14, t11; t37, t11; t41, t11 \quad (1)$$

$$\begin{matrix} [A6]: t1, t20, t28, t41, t11; \\ [A3]: t1, t3, t11; \end{matrix}$$

$$\tau_1 = [2_1 \ 1_2 \ 1_3 \ 1_6 \ 1_9 \ 5_{11} \ 1_{14} \ 1_{20} \ 1_{28} \ 1_{37} \ 2_{41}]^T$$

$$B = A^T \tau_1 = [0 \dots 0]^T$$

표 2.1 그림 5의 변이에 대한 설명

Table 2.1 Transitions in Fig. 5 and their descriptions

변이	내용
t_1	메시지 처리 과정
t_2	환경 인식
t_3	들어오는 메시지의 기록 및 무시
t_4	path1을 거쳐서 보호가 감지되는 것을 암시
t_5	Path2를 거쳐서 보호 작업을 인식
t_6	Path0을 거쳐서 모든 보호 작업 인식
t_7	차단 실패 인식
t_8	Half-실패 인식
t_9	인식된 사건들을 처리하는 과정
t_{10}	이용자들에게 그것의 보호 단계를 전송
t_{11}	목표와 인식 상태를 업데이트
t_{12}	path0을 지남
t_{13}	path1을 지남
t_{14}	path2을 지남
t_{15}	협력하는 에이전트들에게 Trip-실패 메시지를 전송
t_{16}	협력하는 에이전트들에게 Half-실패 메시지를 전송
t_{17}	협력하는 에이전트들로부터 보호 상태를 수신
t_{18}	향후 보호 업데이트를 받기 위한 협력하는 에이전트를 예약하는 메시지 처리 과정
t_{19}	에이전트로부터 현재의 신호 메시지를 수신
t_{20}	에이전트로부터 "라인#에 고장이 있다"는 메시지를 수신
t_{21}	인접한 에이전트들로부터 "라인#에는 고장이 없다"라는 메시지를 수신
t_{22}	에이전트로부터 Half-고장 메시지 수신
t_{23}	에이전트로부터 Trip-실패 메시지 수신
t_{24}	보호 작업이 현재 없다는 것을 의미
t_{25}	작업된 보호지역의 인증과 그 수를 의미
t_{26}	이 라인에서의 현재 차이를 발견
t_{27}	이 라인에서의 현재 차이가 없음
t_{28}	이 라인에서의 고장을 발견하고 차단을 작동시킬 준비가 됨

표 2.2 그림 5의 변이에 대한 설명

Table 2.2 Transitions in Fig 5 and their descriptions

변이	내용
t_{29}	인접한 라인들에 고장이 없고, 보호 작업이 있다면 규칙 9를 사용할 준비가 됨을 발견
t_{30}	에이전트는 인접한 라인에 고장이 명백한 차단을 작동시킬 준비
t_{31}	이 에이전트에 보호 오작동 발견
t_{32}	이 라인에 고장 발견
t_{33}	이 라인에 고장이 있다는 것을 확신 못함
t_{34}	인접한 라인에 고장이 없음
t_{35}	라인에 고장이 존재함
t_{36}	보호 오작동 기록
t_{37}	협력하는 에이전트들에 라인#에 고장 메시지 전송
t_{38}	작동된 보호 지역의 수를 기록
t_{39}	현재 신호를 지정하는 다른 라인에 에이전트를 더함
t_{40}	협력하는 에이전트들에 라인#에 고장이 없음 메시지 전송
t_{41}	차단기 작동
t_{42}	에이전트들의 협력 상태 기록
t_{43}	라인에 고장이 있고, 차단기가 작동되었다는 것을 알려줌
t_{44}	인접한 라인에 고장이 없고 그것을 기록
t_{45}	협력하는 에이전트들에서의 정보를 기반으로 보호 작동이 없다는 것을 기록
t_{46}	환경으로부터 알려진 사건들을 위한 다양한 방법의 처리과정 수행

$B=0$ 은 발사 순서 σ_1 가 초기 토큰 M_0 를 다시 만들어내고 전체적인 시스템의 상태가 변화지 않는 것을 의미한다. A6, A5, A3는 협상하는 과정들에 참여한다. 그 후 각각의 에이전트에 일어나는 결과와 발사 카운트 벡터들은 한 쌍으로 $(\sigma_{1:6}, \tau_{1:6}), (\sigma_{1:5}, \tau_{1:5}), (\sigma_{1:3}, \tau_{1:3})$ 와 같이 정의되어진다. 각각의 에이전트를 위한 상태변화와 그 이후의 결과는 아래와 같다.

$$\tau_{1:5} = [1_2 \ 1_6 \ 1_9 \ 3_{11} \ 1_{14} \ 1_{37} \ 1_{41}]^T, A^T \tau_{1:5} = [200 \dots 0]^T, \quad (2)$$

$$M_{1:5} = M_{0:5} + A^T \tau_{1:5} = [2 \ 1_2 \ 1_3 \ 1_4 \dots 0]^T$$

$M_{1:5}$ 에서의 장소 R_m 의 첫 번째 단위를 제외하고, 다른 장소들을 위한 모든 토큰들은 변화지 않는다. 첫 번째 장소인 R_m 은 메시지들의 수를 나타낸다. (메시지들을 보내는 것은 '+', 받는 것은 '-' 이다.) 값 2는 에이전트5가 두 개의 메시지를 밖으로 보내는 것을 의미한다. 그래서 A5는 초기 상태인 $M_{0:5}$ 로 되돌아가는 것이다.

$$\tau_{1:6} = [1_1 \ 1_{11} \ 1_{20} \ 1_{28} \ 1_{41}]^T, A^T \tau_{1:6} = [-100 \dots 0]^T, \quad (3)$$

$$M_{1:6} = M_{0:6} + A^T \tau_{1:6} = [-1 \ 1_2 \ 1_3 \ 1_4 \dots 0]^T$$

A6는 다른 에이전트들로부터 하나의 메시지를 받고, 그 후 초기 상태 $M_{0:6}$ 로 되돌아간다.

$$\tau_{1:3} = [1 \ 1_3 \ 1_{11}]^T, A^T \tau_{1:3} = [-100 \dots 0]^T, \quad (4)$$

$$M_{1:3} = M_{0:3} + A^T \tau_{1:3} = [-1 \ 1_2 \ 1_3 \ 1_4 \dots 0]^T$$

A3는 그것의 초기 상태로 돌아간다. 라인 3의 사고가 발생하였을 때, 광역 보호 시스템에서 전력정보의 흐름을 분석하여 사고에 대처할 수 있고, 이것은 각각의 A3,A5, 그리고 A6의 협력을 통하여 나온 결과이다. 따라서 에이전트들 상호간의 협력을 통하여 제안된 모델이 어떻게 동작하여 어느 라인에서 문제가 발생했는지를 파악하는 과정을 보였고, 모델의 유효성을 증명하였다.

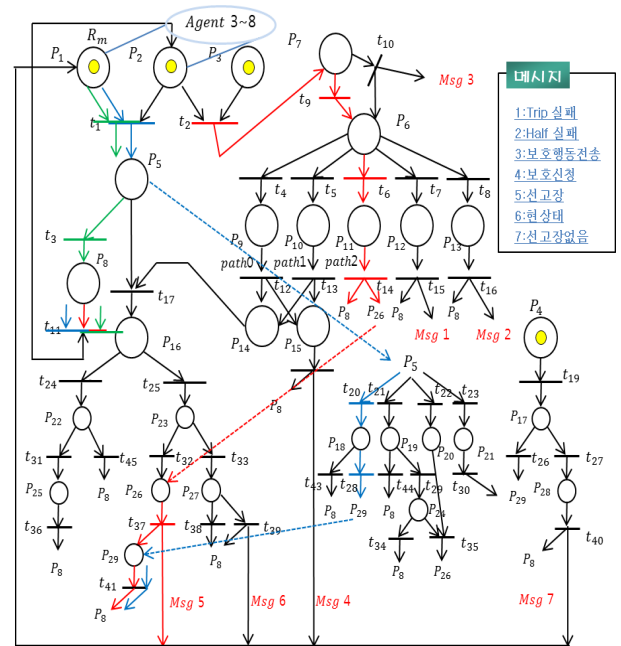


그림 6 ACPN 모델에서의 정보흐름추적 구조도
Fig. 6 Grid Information Flows in ACPN model

5. 결론

전력 계통의 복잡성 및 불확실성이 지속적 증가에 따라, 고안정성, 고품질의 전력 계통 유지를 위해, 즉, 계통의 혼잡 및 전력 품질, 정전을 방지하기 위해 전기 에너지의 전송상태, 사고 등과 같은 정보들을 실시간으로 정확히 파악하는 것이 더욱 중요시 되고 있다. 따라서 산업 현장에서 전력 운영 정보의 흐름을 체계적으로 파악하는 것에 대한 연구가 광범위하게 이루어지고 있으며, 또한 각각의 개별적인 정보들의 상호 연관성을 파악하여 분석할 수 있게 하는 기법에 대한 관심이 증가하고 있다.

본 논문에서는 다중에이전트를 적용한 컬러 페트리 넷으로 광역보호시스템을 모델링하고, 전력의 전송상태, 사고 등과 같은 정보들을 에이전트들이 상호협력 하여 전력계통의 정보흐름을 파악하였다. 제안된 모델은 복잡한 시스템에서도 적용 가능한 다중에이전트 시스템 분석과 모델링 프레임워크 제공에 대한 솔루션을 될 수 있을 것으로 기대 된다. 즉, 에이전트들이 협력하는 과정동안, 제안된 ACPN 모델을 통해 시스템이 운영되는 광역 보호 에이전트들의 협력 행동

순서를 정확하게 리스트 할 수 있고, 따라서, 사고 위치를 정확하게, 발견할 수 있으며, 체계적 상호 관계를 제시하는 본 모델링 기법은 실제 시스템 구현에 큰 도움이 될 수 있음을 증명하였다. 요약하자면, 본 논문에서 제시한 컬러 페트리 넷 모델의 적용을 통해, 개발 시스템의 신뢰성과 견고성을 높일 수 있다. 향후 본 논문을 발전하여 스마트그리드 도래와 함께, 예상되는 다양하고 복잡한 구성 요소 상호 운용성 및 운영 정보흐름 모델링 문제에 확장 적용 및 실계통 적용을 위한 모델링 및 해석 도구 개발 등에 대한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(20104010100590)

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011001440)

참 고 문 헌

[1] J. C. Tan, P. A. Crossley, D. Kirschen, J. Goody, and J. A. Downes, "An expert system for the back-up protection of a transmission network,"IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, Apr. 2000.

[2] R. Giovanini, K. Hopkinson, D. V. Coury, and J. Thorp, "A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents,"IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1222 - 1230, Jul. 2006.

[3] Somani, A, Tesfatsion. L, "An Agent-Based Test Bed Study of Wholesale Power Market Performance Measures," Computational Intelligence Magazine, IEEE., vol. 2, pp.56 - 72, Oct. 2008.

[4] S. J. Lee, B. W. Min, and S.H. Kang, "Adaptive optimal protection of a distribution system using a multi-agent system," in Proc. 8th Inst. Elect. Eng. Int. Conf. Developments in Power System Protection, 2004, pp. 611 - 614.

[5] G. Jiroveanu and R. K. Boel, "A common architecture for distributed diagnosis and wide-area backup protection," in Proc. 8th Inst. Elect.Eng., Int. Conf. Developments in Power System Protection, 2004, pp.756 - 759.

[6] I. Nimmo, "Adequately address abnormal situation operations," Chem.Eng. Progr., vol. 91, no. 9, 1995.

[7] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis part III: Process history based methods," Comput. Chem. Eng., vol. 27, pp. 327 - 346, 2003.

[8] Stoustrup and Niemann, "Fault estimation - A standard problem approach," Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 12, pp. 649 - 673, 2002.

[9] W. Cong, Z. Pan, and L. Ding, "Study of a high-speed communication network based wide-area protection system," in Proc. 8th Inst. Elect. Eng. Int. Conf. Developments in Power System Protection, 2004, pp.689 - 692.

[10] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis, and applications," Proc. IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541 - 580, Apr. 1989.

[11] X. Tong and X.Wang, "Agent-oriented petri net based modeling of dynamic behavior for wide-area backup protection," in Proc. 8th ACIS Int. Conf. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, Qingdao, China, 2007, pp. 160 - 165.

[12] A. Perkusich and J. C. A. d. Figueiredo, "G-nets: A petri net based approach for logical and timing analysis of complex software systems,"J. Syst. Softw., vol. 39, pp. 39 - 59, 1997.

[13] W. Han and M. A. Jafari, "Controller synthesis via mapping task sequence to petri nets in multi-agent collaboration applications," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom., 2003, pp. 4312 - 4317.

[13] W. Han and M. A. Jafari, "Controller synthesis via mapping task sequence to petri nets in multi-agent collaboration applications," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom., 2003, pp. 4312 - 4317.

저 자 소 개



박 병 성 (朴 昞 鏞)

2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 부졸업(학사)
 2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 과(공학석사)
 2007년~현재: 연세대학교 전기전자공학 과 박사과정
 <관심분야> 전력보호시스템, 페트리 넷 모델링, 홈 네트워크, 상황인지, 유비쿼터스 컴퓨팅



허 건 (許 堅)

1996년 2월 : 연세대학교 전기공학과(학사)
 1998년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학 석사)
 2007년 5월: The University of Texas at Austin, TX, USA (Ph.D.)
 1998년 2월 ~ 2003년 5월 : 삼성전자 메 카트로닉스 센터 선임 연구원
 2007년 3월 ~ 2008년 7월 : Electric Reliability Council of Texas (ERCOT), Taylor, TX, USA, Operations Engineer
 2008년 7월 ~ 2010년 2월 : Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA, Senior Project Scientist,
 2010년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 <관심분야> 스마트그리드, 신재생 에너지 계통 연계, 전력전자 기반 송배전 제어기, 직류송전, 전력품질 등