

교란들의 인과관계구현 데이터구조에 기초한 발전소의 고장감시 및 고장진단에 관한 연구

論 文
51D-9-4

Power Plant Fault Monitoring and Diagnosis based on Disturbance Interrelation Analysis Graph

李承哲* · 李淳教**
(Seung-Chul Lee · Soon-Gyo Lee)

Abstract - In a power plant, disturbance detection and diagnosis are massive and complex problems. Once a disturbance occurs, it can be either persistent, self cleared, cleared by the automatic controllers or propagated into another disturbance until it subsides in a new equilibrium or a stable state. In addition to the physical complexity of the power plant structure itself, these dynamic behaviors of the disturbances further complicate the fault monitoring and diagnosis tasks.

A data structure called a disturbance interrelation analysis graph(DIAG) is proposed in this paper, trying to capture, organize and better utilize the vast and interrelated knowledge required for power plant disturbance detection and diagnosis. The DIAG is a multi-layer directed AND/OR graph composed of 4 layers. Each layer includes vertices that represent components, disturbances, conditions and sensors respectively. With the implementation of the DIAG, disturbances and their relationships can be conveniently represented and traced with modularized operations. All the cascaded disturbances following an initial triggering disturbance can be diagnosed in the context of that initial disturbance instead of diagnosing each of them as an individual disturbance. DIAG is applied to a typical cooling water system of a thermal power plant and its effectiveness is also demonstrated.

Key Words : Fault Monitoring, Fault Diagnosis, Disturbance, Power Plant, Fault Propagation, Knowledge Representation

1. 서 론

발전소의 운전중 중대한 교란(disturbance)¹⁾이 발생하면 통상 여러 곳에서 그 상황이 감지되며, 또한 그로 인하여 다른 교란들이 연쇄적으로 파급되어 발생되기도 한다. 이때 각 교란들은 순간적으로 소멸 또는 제거되거나 지속적으로 유지되기도 하며 때로는 전체 시스템을 정지(shut down)시키기도 한다. 이러한 다양한 교란들의 경과 상태와 파급양상은 시스템 및 기기들의 운전특성 및 발전소 내에서 이들간의 상호 연결관계, interlock 및 보호회로의 특성, 고장자체의 심각성(severity) 정도에 따라 복잡하게 전개되어, 특히 중대한 고장이나 교란이 발생했을 경우 발전소의 중앙 제어실에는 수많은 정보가 울리게 된다. 이때 발전소의 운전원(operator)들은 빠른 시간 내에 경보들과 센서들의 값을 분석하여 상황을 파악하고 적절한 조치를 취해야 한다. 긴박한 시간 제약하에서의 제어내용 결정의 필요성, 이에 더하여 센서의 고장이나 외란 등으로 센서들의 값 자체가 잘못되거나 각종 보호 계전기들이 오동작되어 기기들이 급정지되었을 가능성에 오조작시 기기의 추가적인 파손가능성까지 더해져서 주요기기의 급정지나 고장발생시 운전원들에게는 통상 과중한 스트레스가 걸리게 된다.

이와 같이 중대한 교란 발생시 운전원에게 걸리는 과중한 정신적 부하를 경감시키고 보다 안정적으로 발전소를 운전하기 위해서는 전개되는 상황을 신속하고 체계적으로 분석하여 진단을 적기에 내려주는 시스템이 개발되어야 한다.

지금까지 일반 플랜트나 시스템의 경보분석과 고장진단에 대하여 제안된 방법은 크게 두 가지 즉, 모델기반 접근방법(model-based approach) [1-11] 과 고장열거식 접근방법(fault enumeration approach) [12-14] 에 기반을 두고 있다. 발전소와 같이 복잡한 시스템의 경우, 주 급수 및 주 증기시스템은 물론이고 이들을 보조하는 부속시스템들을 구성하는 수많은 기기들을 전부 모델링하여 모델기반 접근방법으로 고장을 진단하기 위해서는 기기들간의 연결 및 동작관계를 체계적으로 추적할 수 있는 데이터 구조가 필요하다. 더구나 이들 시스템이나 기기들의 계측 제어 및 보호시스템, 그리고 각종 레벨(level)스위치, 리미트(limit) 스위치, 릴레이(relay), 등을 이용한 인위적인 한계치들의 셋팅(setting)과 기기들 상호간의 인터록(interlock)은 모델기반 접근방법의 적용을 어렵게 하고 있다. 또한 기기, 계측 제어 및 보호 시스템의 복잡한 구성과 동작의 상호연관성에 따라 일일이 열거하기에는 너무나 많은 교란 내용들의 다양성 때문에 순수한 고장열거식 접근방법으로도 실험용(prototype) 시스템 수준을 탈피

* 正 會 員 : 中央大學 電氣工學科 教授 · 工博

** 準 會 員 : 中央大學 電氣工學科 (碩士)

接受日字 : 2001年 9月 4日

最終完了 : 2002年 7月 15日

1) 본 논문에서는 발전소의 운전상황에 중요한 변화를 일으키는 모든 상황을 교란이라고 부르기로 한다. 따라서 기기의 고장은 물론 운전원에 의한 주요기기의 시동이나 정지도 교란으로 간주하며 필요에 따라 이들 표현을 혼용하기도 한다.

하기 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 상기 두 주요 고장진단 접근방식을 함께 이용하면서 이들의 문제점을 보완하는 방안으로서 방대하며 서로 복잡한 인과관계로 얽혀있는 발전소의 고장관련 지식들을 체계적으로 정리하고 이들을 이용해 효과적이며 신뢰성 높은 고장진단을 수행해 나갈 수 있도록 하기 위해 교란상관관계 분석그래프(Disturbance Interrelation Analysis Graph (DIAG))라는 데이터 구조(Data Structure)를 제안하였다. DIAG는 복합층(multi layer)구조의 방향성 그래프로서 교란 발생의 감지, 교란의 파급시작 교란(initial disturbance)의 추적, 그리고 여러 곳에서 관측된 교란이 동일한 교란인지 여부의 판정을 위해 필요한 정보들을 적절한 추상레벨(abstraction level)까지 포함시킬 수 있다. 또한 효과적인 고장추적을 위하여 기기들의 상세한 물리적 연결관계를 파악할 수 있도록 경계점 집합(Boundary Set)과 관련 집합 연산(Set Operation)을 정의하였다.

DIAG는 시스템 구조 표현그래프(System Structure Representation Graph (SSRG))로 이루어진 기기층(COMP-Layer), 교란을 나타내는 교란층(DIST-Layer), 교란발생 조건을 나타내는 조건층(COND-Layer), 그리고 계측기 즉 센서를 나타내는 센서층(SENS-Layer)의 4개의 층으로 구성되어있고, 각 층간의 서로 관련된 노드끼리는 연결되어져 있다.

DIAG의 구현으로서 발전소의 고장감지와 진단에 필요한 방대한 지식의 축적 및 관리를 모듈화 할 수 있고, 고장과 관련된 다양한 정보도 노드와 이들을 연결하는 아크(arc), 그리고 이들

의 속성으로서 나타낼 수가 있어 교란들간의 상호 연관성을 자연스럽게 표현할 수 있다. 또한 여러 교란들이 동시에 감지되는 복잡한 상황 속에서도 노드와 아크들의 체계적인 추적으로 발생한 상황에 대한 설명과 고장 진단을 수행해 나갈 수 있다.

2. 시스템의 구조 관련 지식의 표현

교란이 발생한 기기와 위치를 정확히 발견하고 교란의 파급양상을 추적할 수 있기 위해서는 운전감시 및 고장진단을 하는 감시시스템(supervisory system)이 기본적으로 발전소의 구조와 각 구성요소, 즉 각 기기 및 기기들이 속하는 부속시스템²⁾들의 물리적인 상호 연결관계에 대해 충분한 지식을 갖고 있어야 한다.

2.1 시스템 구조 표현 그래프(System Structure Representation Graph)

화력발전소의 경우 전체 시스템은 크게 터빈-발전기 및 부속시스템(Turbine-Generator & Auxiliary System), 보일러 및 부속시스템(Boiler and Auxiliary System), 주 급수 및 주 증기 시스템(Feed Water and Main Steam System), 냉각수 시스템(Cooling Water System), 순환수 시스템(Circulating Water System)등으로 구성되어 있고, 이중 냉각수시스템은 그림 1에서 보인바와 같이 Cooling Water Coolers³⁾, 각종 Lube Oil Cooler

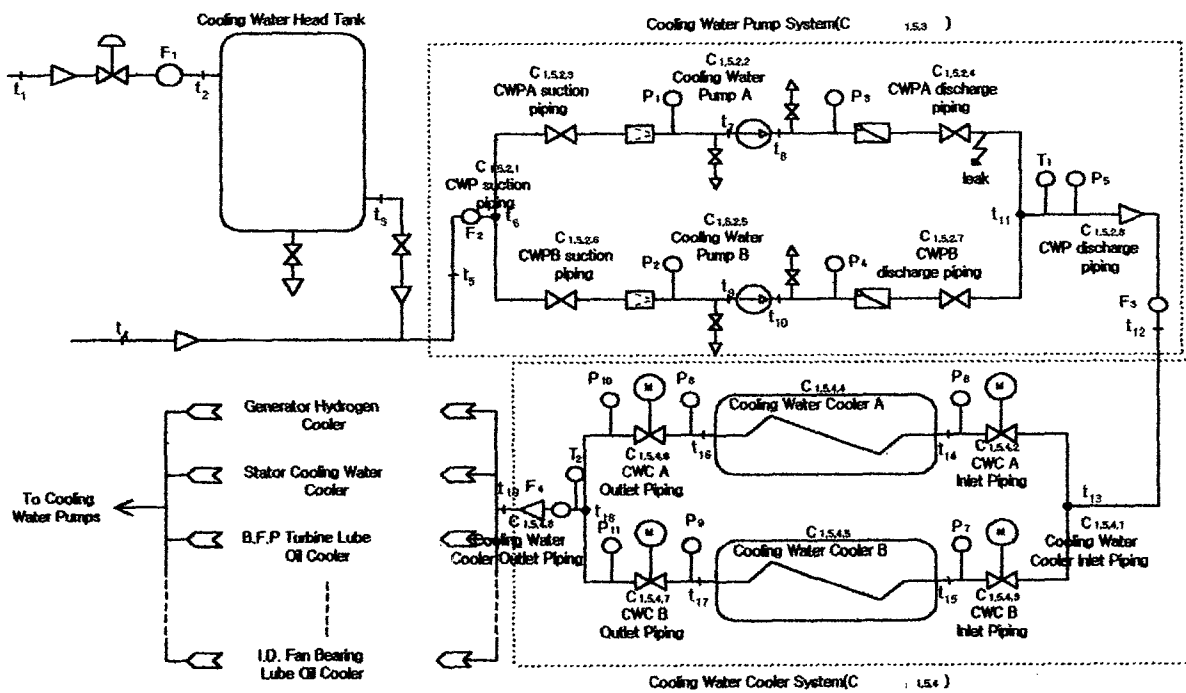


그림 1 화력 발전소의 기기 냉각수 계통도
Fig. 1 Cooling Water System of a Thermal Power Plant

2) 본 논문에서 “기기”는 따로 명시하지 않는 한 “기기” 및 기기들이 속한 “부속시스템(Subsystem)”을 함께 지칭하기로 한다.

3) 본 논문에서는 그림과 본문에서 필요시 발전소 현장에서 통상 사용되는 기기 및 경보의 경우는 원어표현을 편의상 그대로 사용하기로 한다.

들, Cooling Water Pump System과 부속 piping system, 등으로 나눌 수 있으며, 이중 Cooling Water Pump System은 그림 1의 윗부분에서 점선으로 친 부분으로 다시 세분할 경우 Cooling Water Pump Suction Piping, Cooling Water Pump Discharge Piping, Cooling Water Pump A, Cooling Water Pump B, 등으로 나눌 수 있다[15]. 이러한 계층적인 관계는 그래프 데이터 구조(graph data structure)를 이용하여 편리하게 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 그래프를 시스템 구조 표현 그래프(System Structure Representation Graph (SSRG))라 하고 다음과 같이 정의한다.

정의 1. 시스템 구조 표현 그래프(System Structure Representation Graph (SSRG)) : 시스템 구조 표현 그래프는 방향성을 가진 그래프로서 $G_s = (N_s, A_s)$ 로 나타낸다. 여기서 N_s 는 각 기기들을 나타내는 노드(node)들의 집합이고 A_s 는 이들 노드들을 연결하는 아크(arc)들의 집합으로서 전체시스템을 나타내는 노드로부터 시작하여 각 부속시스템들, 그리고 최종 기기들을 나타내는 노드에 이르기까지 아크로 연결된 계층구조를 가진다.

그림 1에서 보인 발전소 냉각수 시스템을 포함한 화력발전소의 간략화된 SSRG를 그림 2에 보였다. 상기한 SSRG의 구성 목적은 2.2절에서 정리할 경계점 집합(Boundary Set)과 더불어 한 기기가 고장이 났을 때 그로 인하여 고장난 기기가 속한 부속시스템의 기능에 미치는 영향 분석과 고장이 해당 기기 레벨에서 뿐만 아니라 그 기기가 속한 상위 부속시스템 레벨 및 연관된 여러 곳에서 관측되는 경우, 또 이들이 동일한 고장인 경우의 분석을 가능하게 해주기 위함이다.

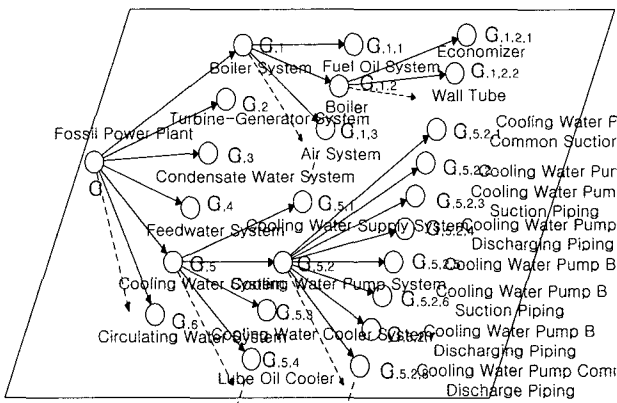


그림 2 발전소의 구조표현 그래프
Fig. 2 System Structure Representation Graph for a Thermal Power Plant

2.2 기기들간의 물리적인 연결관계의 표현

전기한 SSRG는 각 시스템을 구성하는 기기들간의 계층적(hierarchical)인 소속관계를 나타낼 수 있으나 기기들 상호간의 물리적인 연결관계에 관한 정보는 가지고 있지 않다. 기기들이 서로 어떻게 유기적으로 협조하여 전체시스템의 기능을 수행하는지에 관한 분석과 고장 발생 시 고장이 어떻게 파급되어 나가는지의 분석을 가능하기 위하여는 기기들간의 물리적인 연결관계를 파악해야하게 이를 위하여 각 기기와

부속시스템을 나타내는 노드들의 한 속성(attribute)으로서 다음과 같이 경계점 집합(Boundary Set)을 정의한다.

정의 2. 경계점 집합(Boundary Set) : SSRG내의 임의의 노드 C_i 는 그 속성 중에 하나로서 C_i 가 나타내는 기기나 부속시스템이 주변의 기기나 부속시스템들과 연결되는 경계점으로 이루어진 경계점 집합 B_i 를 갖는다.

B_i 를 구성하기 위해서는 그림1과 같은 single line diagram 상에서 C_i 가 주변의 다른 기기들과 연결된 경계점에 경계점 $t_p, t_{p-1}, t_{p-2}, \dots$ 을 부여한다. 각 경계점의 정확한 실제 위치는 해당 시스템의 운전원 또는 엔지니어가 적절하다고 판단되는 위치를 선정하며 이러한 mapping 정보는 각 경계점의 속성으로서 저장한다.

정의 3. 경계점에서의 매체의 흐름방향 : 정상운전시의 SSRG내의 임의의 노드 C_i 의 한 경계점 $t_p \in B_i$ 는 그 속성으로서 그 경계점을 통해 흐르는 매체의 흐름방향에 대한 정보 f_i 를 갖는다. 즉, f_i 의 값은 C_i 가 나타내는 기기의 관점에서 보아 매체가 C_i 로 흘러 들어오면 "in"이고 C_i 로부터 흘러나가면 "out"의 값을 갖는다.

예를 들면, 그림 1의 냉각수 계통에서 한 부속시스템인 Cooling Water Pumping System ($C_{1.5.2}$)에 속한 기기인 Cooling Water Pump A($C_{1.5.2.2}$)의 경계점 집합 $B_{1.5.2.2}$ 는

$$B_{1.5.2.2} = \{t_7, t_8\}$$

이고, $f_7 = in, f_8 = out$ 이 된다. 그러므로 같은 경계점이라도 그 경계점이 속한 기기에 따라 매체 흐름의 방향은 달라질 수 있다. 또한 Cooling Water Cooler와 같이 한 기기가 냉각수계통과 순환수(Circulation Water)계통과 같이 2개 이상의 계통에 따로 속해 있을 때는 각 계통별로 경계점 집합도 각각 따로 구성해야한다.

3. 기기의 상호 연결관계의 추적

앞에서 정의한 경계점 집합과 각 경계점에서의 매체의 흐름방향에 관한 정의들을 이용하여 주어진 시스템 내에서 각 기기나 부속시스템들이 상호 어떻게 연결되어 있는지를 파악할 수 있다.

정리 1. 두 기기의 직접 연결 : 두 기기 C_i 와 C_j 의 경계점 집합 B_i 와 B_j 에 있어서 $B_i \cap B_j = \emptyset$ 이면 두 기기는 직접적으로 연결되어 있지 않다. $B_i \cap B_j \neq \emptyset$ 이면 두 기기는 집합 $B_i \cap B_j$ 의 각 요소 경계점에서 서로 연결되어 있다.

정리 2. 두 기기의 병렬연결 : 두 기기 C_i 와 C_j 의 경계점 집합 B_i 와 B_j 에 있어서 $B_i = B_j$ 이고 각 경계점에서의 매체의 흐름방향값이 모두 같으면 C_i 와 C_j 는 병렬로 연결되어 있다.

정리 3. 두 기기의 직렬연결 : $B_i \neq B_j, B_i \cap B_j \neq \emptyset$ 이고, $B_i \cap B_j$ 의 모든 경계점 요소에 대하여 B_i 에 속한 요소들은 매체의 흐름방향이 "out"이고 B_j 에 속한 요소들은 매체의 흐름방향

이 “in”이면 C_j 는 C_i 에 직렬로 연결되어 있다.

C_i 와 C_j 가 직렬로 연결되었을 경우 연결되는 경계점이 존재하여야 하므로 $B_i \cap B_j \neq \emptyset$ 이 된다. 또 직렬로 연결되어 있으므로 각 경계점에서 한 기기의 output이 다른 기기의 input이 되어야 한다.

여러 개의 기기들이 합쳐서 하나의 부속시스템(subsystem)을 이룰 경우 해당 부속시스템의 경계점을 도출하기 위하여 다음과 같은 집합 연산을 정의한다.

정의 4. 상호배제교차(Exclusive Intersection) : 임의의 두 경계점 집합 B_i 와 B_j 간의 상호배제교차는 $B_i \cap_x B_j$ 로 나타내고 그 값은 B_i 와 B_j 에 공통으로 속해 있는 경계점들 중 매체의 흐름방향이 반대인 경계점들간의 집합을 말한다.

정의 5. 2개 이상의 경계점 집합간의 상호배제교차 : 2개 이상의 경계점 집합간의 상호배제교차 가능한 모든 짝조합(pair combination)에 대한 상호배제교차를 행한 집합들의 합집합(union)으로 한다.

예를 들어, 3개의 기기 C_i, C_j 및 C_k 의 경계점 집합들의 상호배제교차는

$$B_i \cap_x B_j \cap_x B_k = (B_i \cap_x B_j) \cup (B_j \cap_x B_k) \cup (B_k \cap_x B_i)$$

로 된다.

정의 5를 이용하여 2개 이상의 기기로 구성되어 있는 임의의 부속시스템의 경계점 집합과 그 소속 기기들의 경계점 집합간의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

정리 4. 임의의 부속시스템과 그 소속기기들간의 경계점 집합과의 관계 : 2개 이상의 기기 $C_i, C_j, C_k \dots$ 가 연결되어 한 부속시스템 C_s 를 이룰 경우 C_s 의 경계점 집합은

$$B_s = (B_i \cup B_j \cup B_k \dots) - (B_i \cap_x B_j \cap_x B_k \dots)$$

가 된다.

수식에서 $B_i \cup B_j \cup B_k \dots$ 는 부속 기기들의 전체 경계점 집합을 나타내고 $B_i \cap_x B_j \cap_x B_k \dots$ 는 이들 기기들이 연결되어 C_s 를 이룰 경우 C_s 의 대외적인 경계점들의 집합인 B_s 에 속하는 경계점들을 제외한 내부 부속 기기들간의 경계점들의 집합이 된다.

예를 들어 그림 1의 상단에 점선으로 표시된 냉각수 펌프 시스템(Cooling Water Pump System)을 구성하고 있는 8개 기기의 경계점 집합은 각각

$$\begin{aligned} B_{1,5,2,1} &= \{t_5, t_6\} \\ B_{1,5,2,2} &= \{t_7, t_8\} \\ B_{1,5,2,3} &= \{t_6, t_7\} \\ B_{1,5,2,4} &= \{t_8, t_{11}\} \\ B_{1,5,2,5} &= \{t_9, t_{10}\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{1,5,2,6} &= \{t_6, t_9\} \\ B_{1,5,2,7} &= \{t_{10}, t_{11}\} \\ B_{1,5,2,8} &= \{t_{11}, t_{12}\} \end{aligned}$$

와 같이 되고 이들이 함께 구성하는 부속시스템인 냉각수 펌프 시스템의 경계점 집합은

$$\begin{aligned} B_{1,5,2} &= (B_{1,5,2,1} \cup B_{1,5,2,2} \cup \dots \cup B_{1,5,2,8}) - (B_{1,5,2,1} \cap_x B_{1,5,2,2} \cap_x \dots \\ &\quad \cap_x B_{1,5,2,8}) \\ &= \{t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}\} - \{t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}\} \\ &= \{t_5, t_{12}\} \end{aligned}$$

와 같이 된다. 즉, 그림 1에서 점선으로 표시된 냉각수 펌프 시스템의 경계점은 t_5, t_{12} 이고 t_5 로부터 매체인 냉각수가 흘러들어 오고, t_{12} 로 매체가 흘러 나가는 것을 알 수 있다.

4. 기기들의 교란과 교란들간의 파급관계를 추적하기 위한 데이터 구조

4.1 교란의 표현

SSRG의 각 노드에 해당하는 기기들에서 발생하는 교란은 해당 기기를 나타내는 노드의 별도의 자식노드(children node)들로 표현하고 각 교란 노드들간의 파급관계는 이들 교란 노드들을 파급경로를 따라 아크로 연결하여 나타낸다.

4.2 교란의 감지와 파급

자동화된 운전감시 시스템의 경우 교란은 시스템에 설치된 각종 센서들에 의해서만 관측될 수 있다. 또한 센서값이 미리 정한 한계값(threshold value)에 도달하면 경보가 울리며 정보등이 점멸하는 등, 정의된 교란이 발생된 것으로 간주한다. 그리고 어떤 교란은 다른 교란들을 직접적으로 유발시키기도 한다. 교란과 교란과의 관계, 교란과 교란들을 탐지하는 센서들과의 관계를 각각 교란 관측 그래프, 교란 유발 그래프, 그리고 교란 파급그래프로 나타낸다.

4.2.1 교란관측 그래프 (Disturbance Observation Graphs)

그림 3은 센서값들이 교란 발생 조건을 만족시키면 교란의 발생이 감지되는 과정을 나타낸 교란관측 그래프(DOG)이다. 그림 3(a)는 센서 s_j, s_{j+1}, s_{j+2} 의 값 중 하나 이상이 각 센서와 연결된 교란 발생 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2} 를 만족시키면 교란 d_i 가 발생한 것을 나타낸다. 따라서 이러한 조건들은 OR 노드에 의해 교란 d_i 에 연결되어있다.

즉 그림 3(a)는

$$d_i \Rightarrow c_k(s_j) \vee c_{k+1}(s_{j+1}) \vee c_{k+2}(s_{j+2})$$

와 같이 표현한다. 여기서 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2} 는 각 센서 s_j, s_{j+1}, s_{j+2} 의 값이 정상적인 값을 벗어난 교란 발생 조건을 나타낸다.

그림 3(b)의 경우는 센서 s_j, s_{j+1}, s_{j+2} 의 값이 동시에 각 센서와 연결된 교란 발생 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2} 를 만족시킬 때 교란 d_i 가 발생된 경우를 나타낸다. 따라서 이러한 조건들은 AND 노드에 의해 교란 d_i 에 연결되었다.

즉 그림 3(b)는

$$d_i \Rightarrow c_k(s_j) \wedge c_{k+1}(s_{j+1}) \wedge c_{k+2}(s_{j+2})$$

와 같이 표현한다. 그림 3(c)는 AND 와 OR 노드들로 결합된 일반적인 경우의 교란 관측 그래프의 형태를 나타낸다.

즉,

$$d_i \Rightarrow c_k(s_j, s_{j+1}) \vee [c_{k+1}(s_{j+2}) \wedge c_{k+2}(s_{j+3})]$$

가 된다. 이때 조건 c_k 에서는 두 개의 센서 s_j 와 s_{j+1} 값들이 함께 사용됨을 나타낸다.

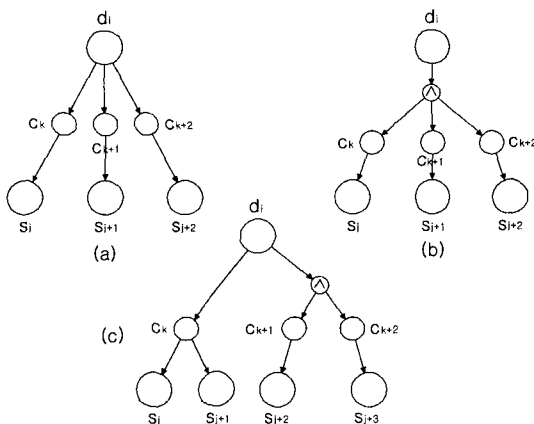


그림 3 교란 관측 그래프
Fig. 3 Disturbance Observation Graphs

4.2.2 교란유발 그래프 (Disturbance Initiation Graph)

교란 중에는 시스템의 안전과 기기의 보호를 위해 중요한 상태변수들의 값이 미리 정해진 일정한 한계값에 이르면 경보를 울리거나 기기를 정지시킴으로써 발생하는 경우도 있다. 이 경우 교란은 정해진 한계값이나 interlock을 변경하면 그 발생여부나 시점이 변경될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 교란들을 유발 교란이라 부르기로 한다. 앞에서 설명한 교란 관측 그래프와 유사하게 센서와 교란들의 관계를 나타낼 수 있으며, 센서의 설정값에 의해 교란이 발생하므로 아크들의 방향을 센서노드에서 교란노드로 향하도록 하고 이를 교란유발 그래프(DIG)라 부르기로 한다. 그림 4는 센서값들이 교란 유발 조건을 만족시킬 때 교란이 유발되는 것을 보여주는 교란 유발 그래프의 예를 나타낸 것이다.

그림 4(a)는 센서 s_j, s_{j+1}, s_{j+2} 의 값이 각 센서와 연결된 교란 유발 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2} 중 하나만 만족시키면 교란 d_i 가 유발되는 것을 나타낸다. 그림 4(b)는 센서 s_j, s_{j+1}, s_{j+2} 의 값이 각 센서와 연결된 교란 유발 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2} 를 동시에 만족시킬 때 교란 d_i 가 유발되는 것을 나타낸다. 보다 일반화한 교란유발 그래프를 그림 4(c)에 보였다. 그림 4(c)에서 교란 발생 조건 c_{k+2} 는 센서

s_{j+2} 와 s_{j+3} 를 변수로 가지고,

$$d_i \Leftarrow [c_k(s_j) \wedge c_{k+1}(s_{j+1})] \vee c_{k+2}(s_{j+2}, s_{j+3})$$

와 같이 표현한다.

4.2.3 교란파급 그래프 (Disturbance Propagation Graph)

발전소와 같이 복잡한 시스템의 경우 하나의 교란이 발생하면 다른 교란들이 파급되어 발생하는 경우가 많다. 그림 5에서 센서 s_j 의 값이 교란 발생 조건 c_k 를 만족시키면 교란 d_i 가 발생된 것을 관측할 수 있고 교란 d_i 에 의해 센서 s_{j+1} 의 값이 교란유발 조건 c_{k+1} 을 만족시키면 교란 d_{i+1} 이 파생되어 발생하며, 또한 d_{i+1} 은 센서 s_{j+1} 과 s_{j+2} 의 값이 각각 교란 발생

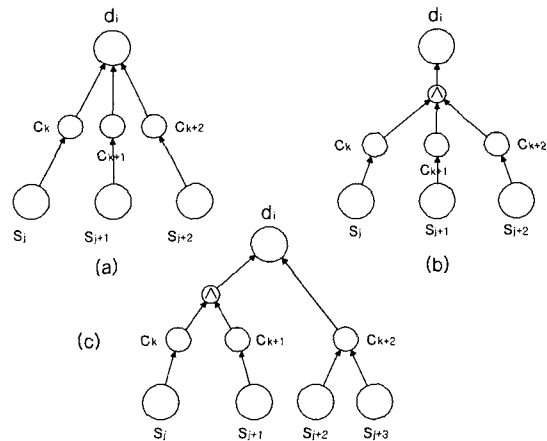


그림 4 교란 유발 그래프
Fig. 4 Disturbance Initiation Graphs

조건 c_{k+2}, c_{k+3} 을 동시에 만족시킬 때 관측될 수 있음을 보였다. 또한 교란 d_i 에 의해 d_{i+2} 가 직접적으로 파급되어 발생하며, d_{i+2} 에 의해 d_{i+3} 도 직접적으로 파급되어 발생되고, 교란 d_{i+3} 의 발생은 센서 s_{j+3} 과 s_{j+4} 의 값이 교란 발생 조건 c_{k+4} 를 만족할 때 관측되는 경우를 보였다. 이때 교란 d_{i+2} 를 관측하고 감지하는 센서는 없지만 교란 파급 관계를 통해 d_i 와 d_{i+3} 이 발생하면 d_{i+2} 의 발생을 유추할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 교란들 사이의 파급관계를 나타내는 그래프를 교란 파급 그래프(DPG)라 부르기로 한다. 실제로 DPG의 구성은 한 개의 특정교란으로부터 파생되는 트리(tree)구조로 구성하고 각 교란들은 한 개이상의 DPG에 속할 수 있다. 이때 각 DPG의 뿌리가 되는 교란 노드를 원천교란(root disturbance) 노드라고 부르기로 한다.

4.2.4 기기들의 연결관계에 따른 교란의 파급

하나의 교란이 발행하면 기기들의 상호 연결관계에 따라 대개의 경우 여러 곳에서 교란이 관측 또는 감지된다. 이때 교란이 처음 발행한 기기를 제외하면 교란이 관측되는 다른 기기들은 단지 교란의 영향권 내에 있을 따름이고 실제로는 해당 기기들에는 이상이 없는 경우가 많다. 그러나 이와 같

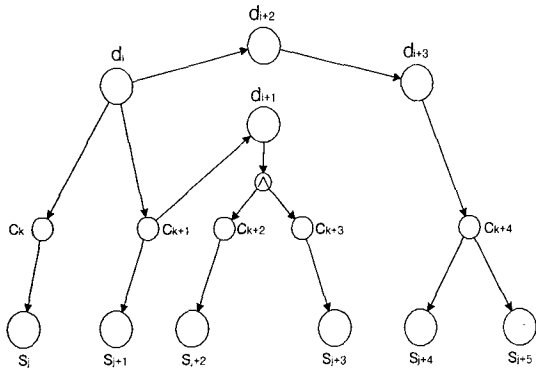


그림 5 교란 파급 그래프
Fig. 5 Disturbance Propagation Graphs

은 경우에도 여러 곳에서 경보가 발생해 운전원들에게 혼란을 가져오는 경우가 종종 있다. 각 기기의 모델과 2절에서 설명한 시스템 구조 표현 그래프, 경계점 집합 이론 및 관련 정리들을 이용하여 여러 곳에서 발생한 경보가 동일한 교란에 의한 것인지의 판별이 가능하다.

4.3 기기 모델의 표현과 포괄교란(Generic Disturbance)

발전소의 각 기기에서 발생 가능한 수많은 고장들을 모두 일일이 교란노드들로 나타낸다는 것은 그 숫자가 기하급수적 (combinational explosion)으로 늘어나 현실적으로 타당성이 거의 없다. 특히 새로 설계하여 건설되는 시스템의 경우는 고장 경험이 충분치 못하기 때문에 가능한 고장들을 열거하는 데에 어려움이 많다. 그러나 주어진 기기나 부속시스템들의 입력과 출력간에 정상 운전시에 만족해야 할 주요 변수들간의 인과관계가 올바르게 성립되지 못할 경우에는 최소한 해당 기기나 부속시스템이 비정상(abnormal)이라는 사실을

알 수가 있다. 따라서 가능한 고장들을 일일이 모두 나타내는 대신에 각 기기나 부속시스템마다 이들이 단지 정상이 아니라는 사실만을 나타내는 교란노드를 별도로 연결함으로써 열거하기가 어려운 교란, 그리고 열거가 따로 필요치 않다고 여겨지는 경미한 교란들을 총체적으로 대표하도록 하고 이를 포괄교란(generic disturbance)이라 한다.

포괄교란의 발생여부를 테스트하는 조건노드는 그 속성으로서 해당기기가 정상으로 운전될 때의 입출력관계, 중요변수들의 상하한 값, 등으로 구성된 정상운전모델을 가진다. 이때, 포괄교란은 관측된 센서값들이 정상운전모델을 만족시키지 못할 때 발생한 것으로 간주한다.

5. 교란 상관관계 분석 그래프 (Disturbance Interrelation Analysis Graph)

지금까지 정의된 데이터 구조들을 전체적으로 결합(integrate)시킬 경우 하나의 커다란 다계층 그래프(multi-layer graph)를 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 그래프는 발전소에서 발생하는 교란들의 원인, 한 교란에 의해 파급되는 교란들의 범위, 그리고 교란으로 인해 영향을 받는 기기나 부속시스템의 범위, 또 각종 경보의 원인 등, 운전상황 감시, 고장예방, 고장진단 및 조치 등을 위해 필요한 방대한 정보를 체계적으로 정리하고 나타내는데 편리하게 이용될 수 있다. 지금까지 정의한 모든 그래프들을 결합하여 다음과 같이 교란 상관관계 분석 그래프 (Disturbance Interrelation Analysis Graph (DIAG))를 정의한다.

정의 6. 교란 상관 관계 분석 그래프(Disturbance Interrelation Analysis Graph) : $DIAG_{Gdiag} = (N_{diag}, A_{diag})$ 는 아래와 같은 4개의 층으로 구성된 방향성 AND/OR 그래프이며, N_{diag} 는 4개 층에 존재하는 모든 노드들의 집합을 나타내고, A_{diag} 는 이들 각 노드들을 연결해 주는 아크들의 총 집합을 나타낸다

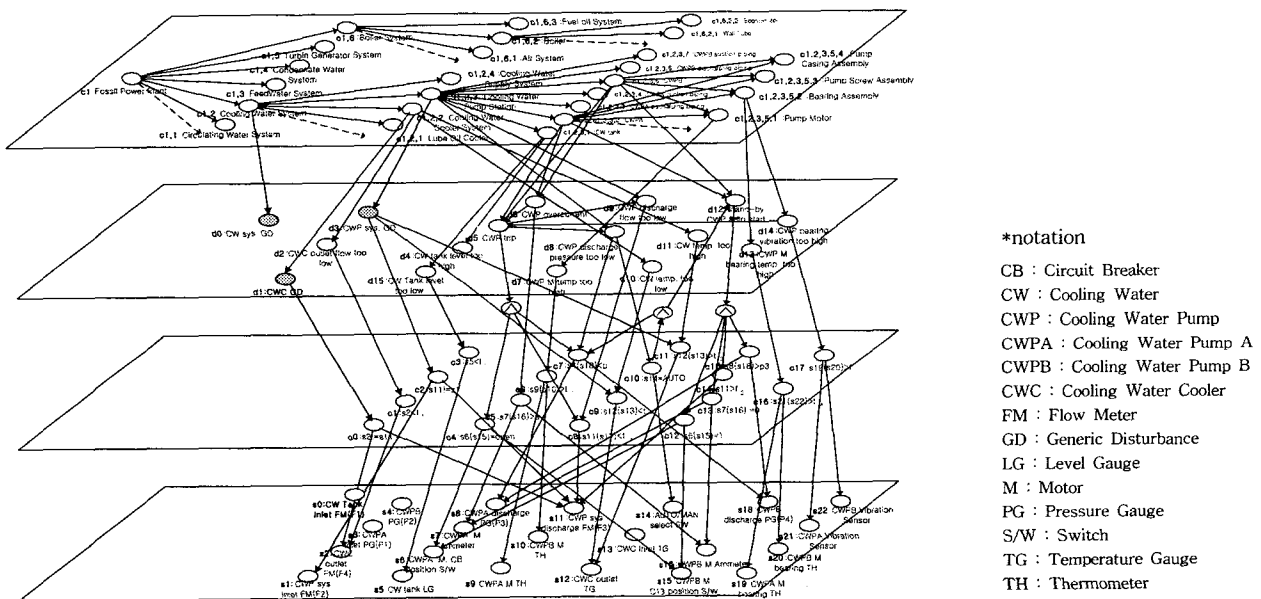


그림 6 화력발전소의 DIAG의 일부
Fig. 6 Part of DIAG for a Thermal Power Plant

DIAG를 구성하는 4개의 층은 다음과 같다.

- i) 시스템 구조 표현층(System Structure Representation Layer) : SSRG로 이루어진 층이며 "COMP-Layer" 부른다.
- ii) 교란 표현층(Disturbance Enumeration Layer) : 각 기기나 부속시스템에서 발생될 수 있는 교란들을 나타낸 층으로서 모든 DOG, DIG 및 DPG의 교란노드들을 포함하며 "DIST-Layer"라 부른다. 각 교란들은 해당 기기나 부속시스템을 나타내는 "COMP-Layer"의 노드에 자식노드(child-node)로 연결되고, 상호 파급되어 발생하는 교란들끼리는 파급 방향에 따라 아크(arc)로서 연결된다.
- iii) 조건층(Condition Layer) : 교란 발생 관측 조건 또는 인위적 교란의 유발 조건을 나타내는 층으로서 "COND-Layer"라 부르고 각 교란 노드들과 센서 노드를 연결시켜 준다.
- iv) 센서층(Sensor Layer) : 교란을 관측하거나 유발시키는데 이용되는 센서들로 구성된 층으로서 "SENS-Layer"라 부른다.

DIAG에서 각 기기와 교란을 나타내는 노드의 삽입과 삭제는 해당 노드와 연결된 아크만을 삽입 또는 제거하면 되므로 전체 시스템의 일관성(consistency)과 온전성(integrity)의 유지가 쉽고, 노드의 삽입과 제거가 전체적으로 미치는 영향도 자연스럽게 반영될 수 있다. 그림 6은 정의 6을 토대로 실제 발전소 냉각수계통의 DIAG의 일부를 보인 것이다.

6. DIAG를 이용한 고장의 발견 및 추적

본 절에서는 앞에서 정의한 DIAG를 이용하여 고장을 발견하고 그 파급경로를 추적하는 방안에 대하여 설명한다.

6.1 직접적인 관측에 의한 고장의 발견

SENS-Layer의 센서들을 통하여 들어오는 입력들을 수집하고 이들 센서값들이 COND-Layer의 각 교란발생조건이나 교란유발조건들을 만족하는지 여부를 테스트하여 교란 또는 고장 발생 여부를 파악 할 수 있다. 센서값들이 단독 또는 동시에 주어진 조건들을 만족하는지의 여부는 각 센서값들의 정밀도를 고려한 오차의 한계와 파급관계를 이용하여 통계적으로 판단하도록 한다[16].

6.2 관측이 안된 고장의 추적

각 교란의 발생여부는 센서들에 의해 직접적으로 감지할 수 있는 것 외에 DIST-Layer상에서 선행하거나 추종하는 교란들의 발생여부로부터 추정할 수가 있다. 잠시 존재하다가 스스로 또는 보호장치들에 의해 소멸되는 교란의 경우, 센서값을 통한 교란의 관측이 어렵다. 그러나 이와 같은 경우 DIST-Layer 상에서 선행하거나 후속되는 노드들의 교란 발생여부가 확인되면 관측이 안된 교란일지라도 그 발생여부를 추정할 수가 있다.

6.3 여러 곳에서 관측된 고장들의 상호 연관성 추적

발전소와 같이 복잡한 플랜트의 경우 한 개의 고장이 발행하면 통상 여러 곳에서 교란이 감지되기도 하고 또 다른기기들의 고장으로 파급되기도 한다. 따라서 정확한 고장 진단을 위해서는 여러 곳에서 감지되는 교란들이 동일한 고장이 관측되는 것인지 또는 여러 고장들이 실제로 발생한 것인지의 여부를 판정해야 한다.

6.3.1 여러곳에서 관측된 고장들이 동일한 고장일 경우의 발견

한 기기가 고장이 났을 경우 그 기기를 포함하고 있는 상위 부속시스템 레벨에서도 고장증상이 나타나는 경우가 많다. 한 기기에 고장이 발생하면 연결된 DIST-Layer의 포괄교란이 감지된다. 포괄교란은 포괄교란노드에 연결된 COND-Layer의 조건노드에서 기기의 정상운전모델조건이 수집된 센서값들을 사용하여 테스트할 경우 성립이 될 수 없을 때 탐지된다. 이때, 고장기기를 포함하고 있는 상위 부속시스템도 포괄교란이 탐지되었을 경우 그 부속시스템내의 각 기기들의 경계점 집합이론에 따른 연결관계와 각 기기들의 운전모델을 이용하여 관측된 고장이 동일한 고장인지를 추적할 수가 있다. 이때 고장이 실제 발생한 기기에서의 교란을 원천교란(source disturbance)이라 부르기로 한다.

6.3.2 여러 곳에서 관측된 고장들이 특정고장에서 파급되어 실제 발생한 경우

한 기기에서 발생한 교란이 그기기와 연관된 기기에 파급되어 새로운 교란을 유발할 경우에는 교란이 유발된 각 기기들이 모두 포괄교란조건들을 만족하게 된다. 또 이들 교란들의 파급경로는 6.3.1의 경우와 마찬가지로 DIST-Layer의 DPG와 기기들의 연결관계 그리고 기기들의 정상운전모델을 사용하여 추적할 수 있다.

6.4 관측된 고장의 재확인

DIST-Layer내에서 같은 부속그래프(subgraph)에 속하는 연관된 고장들의 발견은 해당 고장들이 발생한 것을 상호 재확인시켜주므로 고장발견의 신뢰도를 현저하게 높여줄 수가 있다.

6.5 센서의 고장으로 인해 발생한 교란

센서의 고장으로 인해 발생한 교란의 경우에는 센서가 관측하는 기기에 실제 이상은 없으므로 해당기기에서는 포괄교란이 발견되지 않는다. 단 센서값과 interlock되어 있어 파급 발생하는 교란들은 관측되므로 결국 센서값이 잘못 되었다는 것을 유추할 수 있다. 센서값들의 오류는 센서값들간의 상관관계를 체계적으로 분석함으로써 발견할 수 있다[16-17].

7. 모의실험 및 결과

앞에서 제시한 방법들을 기초로, 그림 1에 보이는 발전소의 기기 냉각수 계통에 대한 DIAG(그림6)를 C**을 이용해서 구현

하였다.

7.1. DIAG를 이용한 고장진단 알고리즘

본 논문에서는 다음과 같은 "DIAG 고장진단 알고리즘"을 사용하였다.

step1. SENS-Layer의 모든 센서들에 대하여 센서리스트 L_s 를 집합으로 초기화하고 정해진 출력으로 정상운전을 할 경우의 전형적인 센서값들로 구성된 정상센서 값 파일을 일정 시간 간격으로 읽어들이어 각 센서값을 세트한다. 또 총발생교란 리스트(Total Occurred Disturbance List) L_{do} , 원천교란리스트(Root Disurbance List) L_{ir} , 시작교란리스트 L_{di} 를 각각 집합으로 초기 화한다.

step2. 발생시키려고 하는 고장상황을 포함하고 있는 고장 센서값 파일을 선택하여 입력으로 공급한다.

step3. $L_s = \emptyset$ 이면 모든 센서값들의 테스트가 완료되었으므로 **step6**로 간다. $L_s \neq \emptyset$ 이면 $L_s = L_s - \{s_i\}$ 로 세트한다.

step4. s_i 의 값이 **step1**에서의 값과 비교하여 변화가 있으면 s_i 에 연결된 COND-Layer의 각 조건 c_j 를 테스트한다. 이때 교란 조건이 만족되지 않으면 다음 센서 값을 테스트하기 위해 **step3**로 간다.

step5. 만족된 교란조건 c_j 에 연결된 교란노드 d_k 에 속한 발생(Occurrence) Flag를 세트한후 d_k 를 총발생교란리스트 L_{do} 에 추가하고 **step3**로 간다.

step6. $L_{di} = \emptyset$ 면 발생교란이 없거나 모두 검사되었으므로 **step8**로 간다. L_{do} 에서 첫 번째 교란을 d_p 로 세트하고 COMP-Layer상에서 d_p 의 부모노드가 되는 기기 C_p 의 포괄교란 발생여부를 검사한다. 포괄교란이 발생하지 않았으면 C_p 자체에서는 고장이 발생하지 않았으므로 **step3**로 간다.

step7. DIST-Layer상의 d_p 를 뿌리노드로 하는 부속트리(sub-tree)를 찾아 이를 sub-DPG_p라 한다. L_{do} 에서 Sub-DPG_p에 속한 노드들은 Sub-DPG_p에 표시하고 L_{do} 에서는 모두 삭제한다. **step6**로 간다.

step8. **step7**에서 찾아낸 각 sub-DPG_i에서 시작교란인 뿌리노드로부터 트리를 따라가며 트리내에서 관측이 표시된 교란노드들을 중심으로 교란들의 파급관계를 설명한다. 이때 필요시 경계점 집합이론을 이용한 기기들의 연결관계와 포괄교란의 조건노드에 포함된 기기들의 운전모델을 이용한 운전 상태 변수의 파급관계도 이용한다. **step1**으로 복귀한다.

상기 알고리즘에서는 고장이 실제 발생한 기기들의 경우 포괄교란의 감지가 가능한 것으로 가정하였다. 실제 현장의 경우 센서들의 설치장소와 숫자에 따라 이러한 가정은 조정되어야 한다.

7.2. 모의 실험(Simulation Test)

본 절에서는 고장 발생시 보호 및 인터록(Interlock)계통의 동작에 의해 고장이 파급되어나가면서 다른 교란을 유발하는 경우와 기기의 연결관계에 의해 동일한 교란이 여러 곳에서 관측되는 경우에 DIAG와 전절의 알고리즘을 이용해 고장을 진단하는 예를 보인다.

(1) 보호 및 Interlock계통에 의해 파급되어 발생하는 교란들의 추적

현재 작동하고 있는 펌프가 Cooling Water Pump A ($C_{1.5.2.2}$)이고 펌프 A motor가 overcurrent(d_6)되었을 경우, Cooling Water Pump A Ammeter(s_7)의 값이 교란 발생 조건 $c_5(s_7 > A_1, t > t_1)$, 단 A_1 과 t_1 은 각각 overcurrent relay setting curve에서 얻어지는 전류와 시간의 한계값)를 만족시키고 이때 교란이 발생된 것을 관측할 수 있다. 기기 냉각수 펌프 A에서 overcurrent상태가 발생하면 Cooling Water Pump A trip(d_5)이 보호 계진기에 의해 유발되어 펌프의 motor circuit breaker는 open되고 이 교란은 s_6 (Cooling Water Pump A Circuit Breaker Position Sensor)에 의해 감지된다. 또 냉각수 펌프가 trip되면 펌프의 출력측 압력계 P_3 의 값(s_8)과 유량계 F_3 의 값(s_{11})이 감소되어, Cooling Water Pump outlet pressure too low(d_8)과 Cooling Water Pump outlet flow too low(d_9) 교란을 일으킨다. Cooling Water Pump trip(d_5)은 차단기센서 s_6 에 의해서 직접적인 관측이 가능하지만 센서 s_6, s_{11}, s_8 에 의해 세 개의 조건 c_5, c_7, c_8 이 동시에 만족될 때 관측되도록 3개의 교란 발생조건을 AND 노드로 연결시켜 교란 발생 감지의 정확성을 높여주었다.

Cooling Water Pump B는 예비용 펌프(stand-by pump)이다. AUTO/MAN selector S/W(S_{14})가 AUTO position(c_{10})에 있고, 동작되는 펌프의 출력측 압력계 P_3 의 값 s_8 이 일정 압력보다 작은 값을 가지면 인터록에 의해 자동적으로 예비용 펌프 B가 투입된다(d_{12}). 펌프의 투입교란은 Circuit Breaker Position Sensor(s_{15})의 close 조건(c_{12})이 만족됨으로서 관측된다. 예비용 펌프 B가 동작되면 펌프의 출력측 유량계 F_3 의 값 s_{11} , 펌프의 출력측 압력계 P_3 값 s_8 , 전류계(s_{16})값이 모두 일정한 값 이상(condition c_{14}, c_{15}, c_{13})으로 회복되고, 이들 4개의 조건들을 AND 노드에 의해 결합함으로써 예비용 펌프 투입 교란 감지의 정확성을 높여 준다.

교란 파급 그래프의 추적으로 발생한 일련의 교란들은 냉각수 펌프(cooling water pump) A가 과전류(overcurrent)에 의해 일시 정지(trip)됨으로서 파급되어 발생된 교란임을 알 수 있다. 따라서 이때 냉각수펌프의 과전류가 시작교란(Initial Disturbance)이 된다. 고장진단결과를 그림7에 보인다.

(2) 동일한 고장이 여러 곳에서 관측될 경우의 고장의 추적

Fault Monitoring and Diagnosis based on DIAG 그림 1에서 보인 바와 같이 냉각수 펌프 A의 출력측 stop valve의 flange가 파열되어 다량의 냉각수가 누출될 경우, 냉각수 유량계 F_3 의 값(s_{11})에 의해 Cooling Water Pump Discharge Cooling Water Flow too low(d_9)의 교란과 유량계 F_4 의 값(s_2)에 의해 Cooling Water Cooler Outlet Cooling Water Flow too low(d_2)교란이 거의 동시에 관찰된다. 유량계 F_3 에서의 경계점 t_{12} 를 경계점 집합에 포함하는 부속시스템은 Cooling Water Pump System($C_{1.5.3}$)와 Cooling Water Cooler System($C_{1.5.4}$)이며 이들의 경계점 집합은

되지 않았으며 추가로 연구가 필요한 부분이다.

8. 결 론

본 논문에서는 발전소와 같이 규모가 크고 복잡한 플랜트 환경에서 교란들의 발견과 그 파급 및 인과관계의 추적을 위해 필요한 다양하고 방대한 지식들을 체계적으로 축적하고 조직화하여 이를 효과적으로 이용할 수 있게 하기 위한 방안으로써 DIAG 데이터구조를 제안하였다. 고장의 진단과 그 파급의 효과적인 추적을 위해 필요한 시스템의 구조에 관한 지식을 SSRG로 구성된 COMP-Layer 와 경계점집합이론으로 나타내었다. 각 기기들에서 발생할 수 있는 교란들은 DIST-Layer를 구성하여 나타내었고 일일이 열거할 수 없는 교란들을 포함한 총합적인 교란으로서 포괄교란(Generic Disturbance)을 정의하였다. 특히 포괄교란의 감지를 위해 기기의 운전모델을 사용함으로써 교란들간의 파급관계의 추적 및 동일한 교란이 여러 곳에서의 관찰될 때 이를 판별하는 방안을 제시하였다.

DIAG 데이터구조는 특히 복잡한 플랜트나 시스템들의 운전감시와 고장진단을 위한 지능감시 지식기반 시스템 (knowledge-based system)의 지식기반 구축 및 고장진단 추론을 위한 지식 표현(knowledge representation)의 한 기본 틀로써 이용할 수 있을 것이다. DIAG의 구현으로 발전소의 고장진단에 필요한 방대하고 복잡한 지식의 모듈화된 축적과 활용이 일부 가능해졌으나, 실제규모(practical scale)수준 플랜트의 효과적인 고장 진단을 위해서는 앞으로 보호계전 시스템과 Interlock계통의 적절한 추상레벨(abstraction level)에서의 모델링방법과 기기들의 상세운전모델의 수립에 관한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

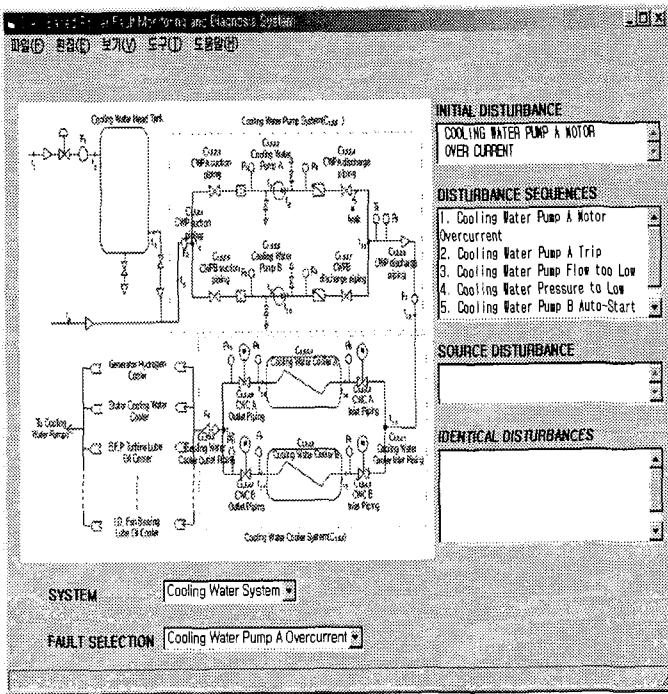


그림 7 DIAG에 기반한 고장감시 및 진단
Fig. 7 Fault Monitoring and Diagnosis based on DIAG

$$B_{1,5,3} = \{t_5, t_{12}\}$$

$$B_{1,5,4} = \{t_{12}, t_{19}\}$$

이고

$$B_{1,5,3} \cap B_{1,5,4} = \{t_{12}\}$$

로 되어 이들 두 부속시스템은 직접 직렬로 연결되어 있고 Cooling Water System에 속해있으며 연결점은 t_{12} 가 됨을 알 수 있다. 따라서 Cooling Water Pump System의 출력측 냉각수 유량이 그대로 Cooling Water Cooler System의 입력측 냉각수 유량으로 되고 Cooling Water Pump System의 포괄교란 발생조건 모델을 상용한 경계점 위치에서의 유량계 값으로 나타내면 간단히 $F_2(t_5) = F_3(t_{12})$ 이 되고 Cooling Water Cooler System의 입출력 모델도 $F_3(t_{12}) = F_4(t_{19})$ 이 된다. 단 여기서 $F_i(t_i)$ 는 경계점 t 부근에 설치된 유량계 F_i 의 값을 나타낸다. 그러나 경계점 t_5 와 t_{12} 사이에서 다량의 냉각수 유출로 인하여 $F_3(t_{12}) < F_2(t_5)$ 가 되나 $F_3(t_{12}) = F_4(t_{19})$ 이 되어 Cooling Water Pump System의 포괄교란 d_3 의 조건은 만족되나 Cooling Water Cooler System포괄교란조건 d_4 은 만족되지 않음을 알 수 있다. 따라서 Cooling Water Cooler Outlet Cooling Water Flow too Low 교란 d_2 는 단지 Cooling Water Pump System의 고장이 이들 부속시스템들의 연결관계에 의하여 Cooling Water Cooler 출력측에서도 관찰되었음을 알 수 있다. 따라서 d_3 은 원천교란이 되며 d_2 는 동일교란으로 진단한다.

상기 고장진단에서 경계점집합의 연산에 의한 기기 연결관계 규명 및 포괄교란의 발생조건으로 나타내어지는 기기 모델을 이용한 입출력 파급추적 알고리즘의 구현은 본 연구 범위에 포함

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Davis, R. "Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior." Artificial Intelligence, 24(1-3): 347-410
- [2] Adams, T.L. "Model-Based Reasoning for Automated Fault Diagnosis and Recovery Planning in Space Power System." IECEC Conf. Proc., pp.1763-1769, 1986
- [3] de Kleer, J., and Williams, B. C. 1987. Diagnosing multiple faults. Artificial Intelligence 32:97-130.
- [4] Obreja, I. 1990. Diagnosis of Power Plant Faults Using Qualitative Models and Heuristic Rules. Proc. Third International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems, July Chareston.
- [5] Rafea, a., El-Dewouki, A., and ElMoniem, S.

"Combined Model Expert System for Electronics Fault Diagnosis." Proc. Third International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems, July, charleston, 1990.

- [6] Moore, R.L., Hawkinson, L.B., Kinckerbocker, C.G., and Charchman, L.M. "A Real-Time Expert System for Process Control." 1st Conf. on AI Applications, pp. 569-576, December, Denber, 1984.
- [7] Marios M. Polycarpou, "Automated Fault Detection and Accommodation", IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, VOL. 25, no. 11, November, 1995
- [8] Reiter, R. 1987. A theory of diagnosis from first principles. Artificial Intelligence 32:57-95
- [9] Davis, R., and Hamscher, W. 1988. Model-based Reasoning: Troubleshooting. In Exploring AI, eds. H. E. Schrobe and AAAI, pp. 297-346, Palo Alto, Calif.: Morgan Kaufmann.
- [10] de Kleer, J., and Williams, B. C. 1987. Diagnosing multiple faults. Artificial Intelligence 32:97-130.
- [11] Poole, D. 1989. Normality and Faults in Logic-Based Diagnosis. Proc Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1304-1310, August 20-25, Detroit.
- [12] Gallanti, M., Roncato, M., Stefanini, A., and Tornielli, G. 1989. A Diagnostic Algorithm Based on Models at Different Level of Abstraction. Proceedings Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1350-1355, August 20-25, Detroit.
- [13] Struss, P., Dressler, O., 1989. Physical Negation-Integrating Fault Models into the General Diagnostic Engine. Proc. of the 11th IJCAI, pp 1318-1323, August 20-25, Detroit. nter
- [14] Laffey. T. J., Cox, P. A. Schmidt, J. L., Kao, S. M., Read, J. Y. 1988. Real-Time Knowledge Based Systems. AI Mag., Spring:27-45.
- [15] 보령화력 3, 4호기 운전 지침서
- [16] 이승철, 어래진, "계측값들의 인과관계를 이용한 체계적인 계측값 검증기법에 관한 연구", 전기학회논문지, 제 47권 10호, pp1768-1773. 1998.
- [17] "Sensor Value Validation based on Systematic Exploration of the Sensor Redundancy", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 4, pp. 594-605, April, 1994.

저 자 소 개



이 승 철(李承哲)

1946년 6월 16일생. 1969년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1972년 재무부 전매청 신탄진 연초제조창 전력과장. 1977년 현대 엔지니어링 기전사업부 차장. 1982년 미국 Univ. of Florida 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 졸업(박사). 1985년 미국 테네시대 우주항공대학원 전기 및 컴퓨터공학과 부교수. 1995년~현재. 중앙대학교 공과 대학 전자전기공학부 교수.



이 순 교(李淳教)

1972년 9월20일생. 1997년 2월 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동대학원 졸업(석사). 현재 LG전자 DTV 연구소 연구원.