발전소의 파급되는 고장 Sequence내에서의 비관측 고장진단에 관한 연구

이 승 철 이 순 교
중앙대학교 전기공학과

A Study on Diagnosing Cascading Disturbances in a Power Plant

Seung-Chul Lee Soon-Kyo Lee
Department of Electrical Engineering Chung Ang University

Abstract - This paper discusses a technique that can detect cascading disturbances for automated monitoring and diagnosis systems in power plants.

A multi-layered directed AND/OR graph called a disturbance interrelation analysis graph (DIAG) is utilized to represent the relationships among cascading disturbances and trace them.

Disturbances that cannot be observed directly from sensors can be traced using techniques similar to interpolations and extrapolations on the DIAG.

1. 서 론

발전소 운전중 기기의 고장이 발생할 경우, 고장은 순간적으로 clear되거나 또는 지속적으로 유지되기도 하고 때로는 cascade되어 다른 고장으로 진전되기도 하며 심지어는 전체 시스템을 shut down 시킬 수도 있다. 이러한 다양한 고장들의 경과상태와 파급양상은 시스템 및 기기의 운전특성 및 plant내에서의 상호 연결상태, 기기 및 plant 시스템의 운전 interlock 및 보호계통의 특성, 고장자체의 severity 정도에 따라 복잡하게 전개되어, 통상 중대한 고장이나 교란의 발생시에는 파급되어 발생되는 교란까지 합하여 발전소의 중앙제어실에는 수많은 경보가 울리게 된다. 이 경우 파급되어 발생되는 교란들중 관측이 되지 않은 교란들은 교란들의 전후 파급관계를 이용하여 그 발생을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 발전소의 운전 감시와 고장 진단을 체계적으로 수행하기 위해 개발한 DIAG(Disturbance Interrelation Analysis Graph)라 불리는 data structure [1]를 사용하여 그래프 상에서의 내삽(interpolation)과 외삽(extrapolation)을 통해서 관측이 안된 고장을 체계적으로 추적하는 방안에 대하여 논하였다.

2. 교란과 센서들과의 관계

본 논문에서는 고장감시및 진단뿐만 아니라 운전상태의 중대한 변화의 감시도 함께 다루기 위해 시스템의 고장과 상태 변화를 모두 교란(disturbance)이라고 부르기로 한다.

시스템에 설치된 센서들에 의해 교란은 관측될 수 있고, 또한 센서값이 미리 정한 특정한 값에 도달하면 정의된 교란이 유발될 수도 있다. 그리고 어떤 교란은 다른 교란들을 유발시키기도 한다. 수많은 센서와 센서들에 의해 감지될 수 있는 교란, 교란과 교란과의 복잡한 관계는 아래에서 설명할 그래프 데이터 구조에 의해 명확하게 구현될 수 있다.

3. 교란 그래프(Disturbance Graph)

교란과 교란과의 관계, 교란과 교란들을 탐지하는 센서들과의 관계를 각각 교란 관측 그래프, 교란 유발 그래프, 그리고 교란 파급 그래프로 나타낼 수 있다. 먼저 교란 관측 그래프는 그림 1(a)과 같이 나타낸다. d_i를 임의의 교란이라 하고, s_j는 조건 c_k가 만족되면 교란 d_i를 관찰하고 감지할 수 있는 센서라고 할 때, disturbance와 sensor와의 관계는 그림 1(a)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 그림 1(a)는 s_{j+1}과 s_{j+2}값이 각각 조건 c_{k+1}과 c_{k+2}를 동시에 만족시킬 때도 교란 d_i가 발생한 것을 나타낸다. 여기서 조건 c_k, c_{k+1}, c_{k+2}는 정상적인 운전을 벗어난 조건을 말하며 두 조건은 서로 결합되거나 동일한 한 개의 조건이 될 수도 있다.

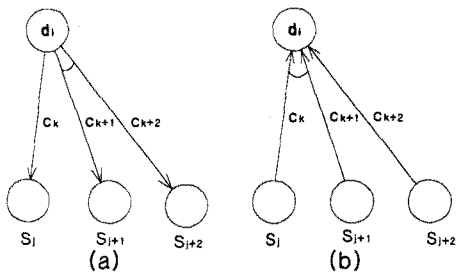

그림 1 교란 관측 및 교란 유발 그래프

각종 Alarm, pump trip등과 같은 교란(disturbance)은 센서값이 특정한 수치에 도달될 때 유발되도록 set 또는 interlock 되어있는 경우가 많다. 그림 1(b)는 교란 d_i가 센서 s_j와 s_{j+1}값이 각각 조건 c_k와 c_{k+1}을 동시에 만족시키거나 s_{j+2}값이 조건 c_{k+2}를 만족시킬 때 유발되는 것을 보여준다.

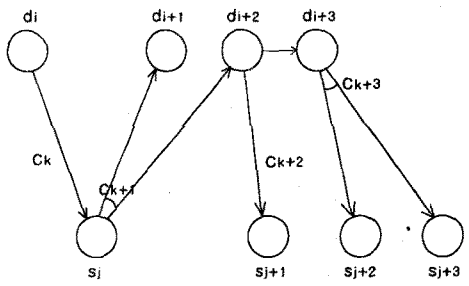

그림 2 교란 파급 그래프

한 교란이 발생하면, 그 교란을 감시하는 센서에 의해 다른 교란이 유발될 수 있다. 그림 2에서 센서 s_j의 값이 조건 c_k를 만족하면 교란 d_i가 발생된 것을 알 수 있고, s_j의 값이 조건 c_{k+1}을 만족하면 d_{i+1}과 d_{i+2}이 동시에 유발되고, d_{i+2}가 유발되면 d_{i+3}이 자동적으로 파급되어 유발된다. d_{i+3} 의 발생은 s_{j+2}와 s_{j+3} 의 센서값이 조건 c_{k+3}를 만족할 때 관측 될 수 있다. 이때 d_{i+1}, d_{i+2}, d_{i+3}는 d_i의

발생에 따라 파생된 교란으로 볼 수 있다.

4. 시스템 구조 표현 그래프(System Structure Representation Graph)

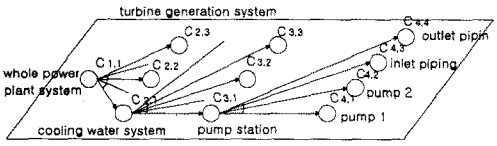

그림 3 System Decomposition Graph

교란의 위치와 교란이 plant 내에서 미치는 영향범위를 알아내기 위해서는 운전감시 및 고장진단을 하는 supervisory system이 발전소의 구조와 각 구성요소의 동작에 대해 충분한 지식을 갖고 있어야 한다.

본 논문에서는 이를 System Decomposition Graph (SDG)를 이용하여 전체 system을 subsystem, subsubsystem등으로 나타내었다. 그림 3은 간략화한 발전소 Cooling Water System에 대한 SDG이다.

그림에서 System Decomposition Graph(SDG) $G_c = (V_c, E_c)$는 directed AND/OR graph로서, V_c는 전체 system과 이것으로부터 계층적으로 분류된 subsystem들을 나타내는 vertex들의 집합이고, E_c는 이 vertex들을 연결해주는 edge의 집합이다. 만일, 한 subsystem의 모든 children component가 정상적으로 동작해야 해당 subsystem이 정상운행을 한다면 subsystem과 children component들은 AND edge에 의해 연결된다. 또한 children component중 하나만 정상적으로 동작해도 해당 subsystem이 정상운행을 한다면 subsystem과 children component들은 OR edge에 의해 연결된다.

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

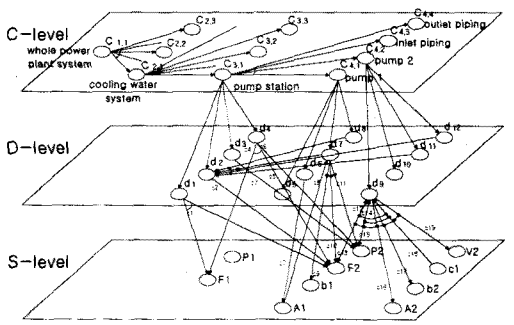

그림 4 발전소 cooling water system일부의 DIAG

SDG의 각 기기나 subsystem들과 이들로부터 발생할 수 있는 각종 교란들의 관계는 SDG의 각 노드들과 교란 그래프의 해당 노드들을 연결함으로써 나타낼 수 있다. 이러한 그래프는 발전소에서 발생하는 교란들의 원인과, 한 교란에 의해 파급되는 교란들의 범위, 그리고 교란으로 인해 영향을 받는 기기나 subsystem의 범위, 또 각종 경보의 원인과 limit의 setting값 등, 운전상황 감시, 고장예방, 고장진단 및 조치 등을 위해 필요한 방대한 정보를 체계적으로 정리하고 나타내는데 편리하며, 본 논문에서는 이러한 그래프를 Disturbance Interrelation Analysis Graph (DIAG)로 정의한다.

정의 : Disturbance Interrelation Analysis Graph $G_d = (V_d, E_d)$ 는 3개의 level(C-level, D-level, S-level)을 가진 directed AND/OR 그래프이다.

1. Three major level
   i) The system decomposition level (C-level)
      - Component의 vertex($c_{i,j}$)들을 계층적으로 분류한 level이다.
   ii) The disturbance level (D-level)
      - 모든 disturbance의 vertex(d_i)들로 이루어진 level이다.
   iii) The sensor level (S-level)
      - observing disturbance와 initiating disturbance감지를 위해 이용된 sensor의 vertex(s_j)들로 이루어진 level이다.
2. V_d 는 component, disturbance, sensor노드들의 총 집합을 나타내고, E_d는 각 노드들을 연결해 주는 전체 edge들의 총 집합을 나타낸다.

그림 4는 앞서 예로든 cooling water system의 일부분과 교란과의 관계를 나타낸 DIAG의 일부분을 보인 것이다.

6. 교란 감지와 진단

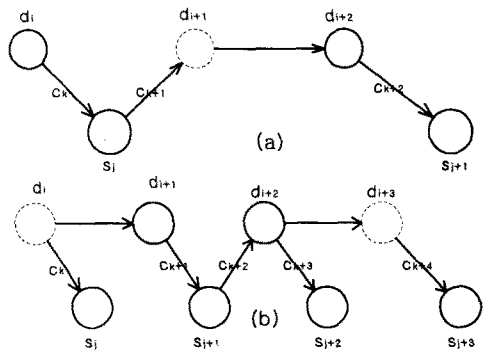

그림 5 관측이 안된 고장감지를 위한 DPG

교란의 진단은 수집된 센서값을 각 센서와 관련된 교란조건과 비교한 후 조건을 만족하는 센서가 있는지 확인한다. 만일 교란의 조건을 만족하는 센서가 존재하면 그 센서와 edge를 통해 연결된 교란이 발생되었거나 유발되었다고 할 수 있다. 특히 고장이 잠시 존재하다가 스스로 또는 보호장치들에의해 소멸되거나 다른 고장으로 파급, 전이되는 경우, 센서값을 통한 고장의 관측이 어렵다. 이 경우 관측이 안된 교란들을 그래프 상의 내삽(Interpolation)과 외삽(Extrapolation)을 이용하여 발견하거나 발생 가능성을 추정할 수 있다.

6.1 DPG의 고장진단에의 이용

발전소와 같이 수많은 subsystem과 기기 들로 이루어져있는 복잡한 plant의 경우 발생 가능한 교란들의 수는 방대하다. 더구나 이들 교란들은 각기 교란 발생, 교란지속시간, 타 교란에의 파급정도 등이 다양하기 때문에, 정확한 고장진단을 위해 이러한 정보를 모두 수용하기 위해서는 DIAG의 D-level인 교란그래프(Disturbance Graph)의 node수와 edge의 label수가 막대해 지게 된다. 특히 중요한 교란의 경우 한 교란이 발생하면, 교란발생 기기에 전기적, 기계적으로 연관된 부분들에 교란이 파급되어 퍼져나가게 된다. 따라서 교란 그래프 내에는 수많은 DPG가 subgraph로서 존재하게 된다. DPG는 소속된 특정 교란

의 발생여부를 DPG내에서의 해당 특정 교란의 전후 교란들의 발생여부를 확인함으로써 추정할 수 있다. 즉, DPG는 교란의 관측에 있어 redundancy를 제공한다.

DPG는 교란의 시발이 되는 source 교란, 그리고 source 교란으로부터 퍼져나가는 intermediate 교란들, 그리고 퍼짐이 종결되는 terminal 교란들로 각각 구성되어있다. 자생적으로 발생하는 source 교란은 동시에 다른 DPG의 intermediate 교란이 될 수도 있다.

6.2 DPG내에서의 내삽(Interpolation)에 의한 고장 추정

그림 5(a)는 교란 d_i와 d_{i+2}가 센서 s_j와 s_{j+1}을 통해 관측되고 점선으로 표현된 교란 d_{i+1}은 관측이 되지 않은 것을 나타낸다. 그림 5(a)에서 교란 d_{i+2}는 d_{i+1}에 의해 파급되고, d_{i+1}은 d_i에 의해 파급되므로 d_i와 d_{i+2}의 발생 관측으로부터 관측이 안된 교란 d_{i+1}의 발생을 추정할 수 있다. 이와 같이 각 교란의 발생여부를 교란 자체를 감지하는 센서들에 의해 감지하는 것 외에 그래프 상에서 선행하거나 추종하는 교란들의 발생여부로부터 추정하는 것을 DPG상에서의 내삽에 의한 고장 추정이라고 한다.

6.3 DPG내에서의 외삽(Extrapolation)에 의한 고장 추정

그림 5(b)에서 d_{i+1}과 d_{i+2}는 센서 s_{j+1}, s_{j+2}에 의해 관측이 되고 d_i와 d_{i+3}은 관측이 되지 않았다고 할 때, 만일 d_{i+1}이 반드시 d_i가 발생해야만 발생되는 교란이고 d_{i+3}은 d_{i+2}가 발생시 자동적으로 발생되는 교란이라고 하면 교란 파급 관계를 통해 d_i와 d_{i+3}이 발생했다는 것을 추정할 수 있다.

이와 같이 특정한 교란의 발생여부를 해당 교란으로부터 파급하여 가는 교란들의 발생여부 또는 해당교란을 일으키는 교란들의 발생여부로부터 추정하는 것을 DPG상에서의 외삽에 의한 고장 추정이라고 한다.

6.4 DIAG에서의 고장진단을 위한 추론

발전소의 고장진단은 수많은 교란들중 고장에 해당하는 교란들이 발생하였을 경우 행하게 된다. 이때 해당 고장을 포함하는 DPG내의 전후 교란 node들은 고장진단의 자연스러운 추론 경로를 제공해 준다.. 즉, 해당 고장의 ancestor node들은 고장 발생원인의 설명을 가능케 하며, descendant node들은 고장 후 전개될 파급효과에 대한 설명을 가능케 하여 준다. 더구나 각 교란에 해당 기기나 subsystem에 미치는 영향, 즉 기기의 정지 또는 감량운전의 필요성, 정상운전의 지속가능 여부 등을 severity 등급과 component level에서의 상하 파급범위에 관한 정보로서 각 교란 node의 속성의 일부로 저장해 줄 경우 보다 상세한 고장 진단이 가능해 지며 현재 이 분야의 연구를 진행 중에 있다.

7. 모의실험 및 결과

앞에서 제시한 방법들을 기초로, 그림 4에 보이는 간략화한 발전소의 cooling water pump station에 대한 DIAG를 C^{++}을 이용해서 구현했다.

본 시뮬레이션에서는 실시간 적으로 임의의 고장상태의 센서값을 공급하여 고장조건 c_1, c_2, c_3 … 와 비교한 후 각 component들의 고장유무를 판단하고 고장의 원인을 추적하였다.

그림 6에 전체 plant system중 간략화된 cooling water system에 대한 DIAG를 나타내었다. pump1은 동작 중에 있는 pump이고 pump2는 pump1이 off되거나 trip되었을 때 동작되는 stand-by pump이다. 만일 pump2가 auto start되었다고 하면 이 교란은 A2, b2,

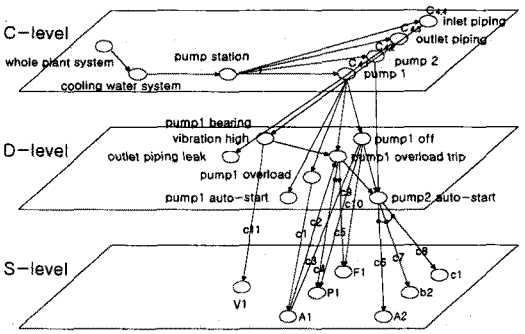

그림 6 pump station의 DIAG

c1센서에 의해 관측이 된다. 교란파급 관계에서 pump2 auto start를 유발시킨 교란은 pump1 off이거나 pump1 trip으로 볼 수 있으며 센서 P1과 F1를 통해 pump1 overload trip이 pump2 auto start를 유발시킨 교란으로 관측되었다. pump1 overload trip은 교란파급 관계를 통해 pump1 bearing vibration high에 의해 유발된 교란으로 볼 수 있다. 이와 같은 교란파급 관계를 이용해서 pump2 auto start교란의 근본 원인을 찾아갈 수 있다.

8. 결 론

발전소의 안전운전을 위해서는 발생한 고장의 근본적인 원인을 조기에 찾아내어 사고의 파급을 미연에 방지하거나 발생한 사고는 신속히 제거하여야 한다.

본 논문에서는 규모가 큰 공장이나 발전소의 고장 감지를 체계적으로 수행하기 위해 DIAG내의 DPG를 이용한 고장 추적 기법을 제시하였다. 복잡한 발전소의 수많은 고장종류들의 표현도 modularize된 노드의 삽입과 삭제에 의해서 나타낼 수 있고, 고장진단을 파급되는 고장들간의 인과관계를 이용한 arc의 traversal operation으로 행할 수 있어 신속하고 정확한 고장진단의 가능성을 제시하였다.

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

[참 고 문 헌]

[1] 이승철, 이순교, "다계층 그래프 데이터 구조를 이용한 발전소의 고장진단", 1997 하계학술대회 논문집, G권, p2316-2318, 1997

[2] Davis, R. "Diagnostic Reasoning Based on Structure and Behavior." *Artificial Intelligence*, 24(1-3): 347-410

[3] Adams, T.L. "Model-Based Reasoning for Automated Fault Diagnosis and Recovery Planning in Space Power System." *IECEC Conf. Proc.*, pp.1763-1769, 1986

[4] 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.

[5] Moore, R.L., Hawkinson, L.B., Kinckerbocker, C.G., and Cherchman, L.M. "A Real-Time Expert System for Process Control." *1st Conf. on AI Applications*, pp. 569-576, December, Denber, 1984.

[6] Marios M. Polycarpou, "Automated Fault Detection and Accommodation", IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, VOL. 25, no. 11, November, 1995

[7] P. M. Flank, "Fault diagnosis in dnamic systems using analytical and knowledge-based redundancy-A survey and some new results", Automatica, vol. 26, pp. 459-474, 1990