

(*광운대 공대 전기공학과)

1. 서론

본 고의 목적은 이 특집의 주제인 "시스템진단과 고장허용 제어"의 응용 및 적용사례로써, 전력계통 분야에의 연구동향 및 응용 현황을 소개하는 것이며, 시스템의 진단은 다시 사고를 방지하기 위한 능동적 의미에서의 예방진단과 사고발생 후에 고장의 원인 또는 사고가 발생한 설비나 위치를 식별하기 위한 사후진단으로 분류할 수 있다.

고장허용제어는 앞서도 상세히 소개된 바와 같이 어떠한 설비 또는 센서류의 신뢰도 향상을 위한 설비의 이중화 등, 여러 가지 방법론을 통칭한다. 그러나 전력시스템은 국가의 대표적인 기간산업이므로 이미 많은 설비 또는 시스템의 설계에 이러한 고장허용 개념이 채용되고 있으므로 본 고에서는 지면관계상 고장진단기술에 대해서만 기술하고자 한다.

전력계통에서의 진단기술은 변압기, 동기기, 배전선로 등 각각의 전력용 설비 또는 변전소, 송전망, 배전망 등의 여러 설비들로 이루어진 복합적 시스템을 대상으로하여 이들의 이상 유무를 식별하는 기술이다. 즉 전력용 설비에서 발생하는 이상 징후를 판별하여 설비의 이상 유무를 판단하거나, 다수의 설비들로 구성된 시스템에서 이상이 발생하였을 경우 이의 원인 및 정확한 고장 설비를 파악하는 기술을 의미한다. 따라서 전력계통에서의 진단기술은 천재지변이나 설비의 노후화로 인한 설비의 이상이 발생하였을 경우 신속하게 이를 식별함으로써 손실을 최소로 하는 측면뿐만 아니라 설비에 대한 상시 진단을 통하여 이상이 발생하기 전에 미리 이를 판단함으로써 이로 인한 손실을 예방하는 측면에서도 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

진단기술은 앞에서 기술한 바와 같이 그 목적에 따라 이상의 발생을 미리 감지하여 손실을 예방하는 목적의 예방진단과 이상이 발생하면 이를 신속하게 식별하여 손실을 최소로 하는 목적의 사후 진단으로 분류 할 수 있다. 전력계통에서의 예방 진단은 주로 상시 감시가 용이한 개개의 설비

를 대상으로 현재의 설비 상태를 감시하고 이상 징후의 조기 검출을 통하여 고장을 사전에 예방하고자 하는 것이므로 따라서 예방 진단에서는 각 설비에 대한 징후를 판단하여 이상유무를 정확하게 식별하고 이를 토대로 설비의 수명 등을 예측할 수 있는 기술들이 필요하다. 이와는 달리 사후 진단은 주로 다양한 설비들로 구성된 복합적인 시스템을 대상으로 하고 있으며 시스템 내의 정확한 고장 설비를 식별하기 어려운 경우에 고장으로 인한 정보를 토대로 사고설비 또는 사고위치를 식별하는 것을 의미한다. 그러나 이러한 사후진단은 전력시스템의 규모가 매우 크고, 구조가 복잡하며, 또한 주어진 정보가 불확실한 경우가 많기 때문에 아직까지는 대부분이 오랜 경험을 가진 시스템 운용자에 의해서만 이루어지고 있다.

전력계통에서의 고장진단 기술은 다음 표 1에 정리한 바와 같이 크게 발전과 송전 및 배전시스템에서의 예방 진단과 사후 진단으로 대별할 수 있다. 다음 절에서는 각 부분에 대한 국내외의 연구현황을 살펴보기로 한다.

표 1. 전력계통의 각 부분별 주요 진단대상

진단분야	예방 진단	사후 진단
발전시스템	- 회전자 권선단락진단 - 고정자 과열진단 - 비정상적인 진동진단	- 발전제어설비의 고장진단
송전시스템	- 변압기 열화진단 - GIS 열화진단 - 캐패시터 열화진단	- 송전망의 사고진단 - 변전소의 사고진단 - HVDC의 사고진단
배전시스템	- 지중케이블 절연진단	- 배전망의 사고진단

2. 발전시스템의 진단 기술

일반적으로 수력, 원자력, 화력 발전소 등 각각의 발전소들은 서로 다른 에너지를 사용하여 전기에너지를 발생시키

지만 원동기와 발전기를 이용하여 회전에너지를 전기에너지로 변환한다는 기본적으로 동일한 원리를 가지고 있다. 따라서 각 발전소의 구조는 사용하는 에너지원에 따라 다르지만 동기로 구성되는 기본구조는 모두 동일하기 때문에 전체적인 발전시스템은 그림 1에서와 같이 기계적 에너지에 관련된 기계적 시스템, 전기적 에너지에 관련된 전기적 시스템, 그리고 두 시스템의 적절한 제어를 위한 각각의 제어시스템으로 구성된다.

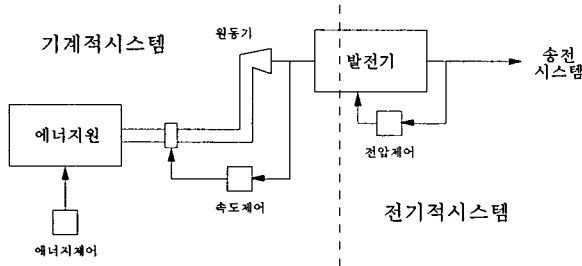


그림 1. 단위 발전시스템의 구성

현재까지 발전소에 관련된 주요 진단기술로는 주로 발전소내의 기계적 시스템을 대상으로 하여 설비의 비정상적인 진동이나 과열을 진단하는 기술, 발전기의 고정자나 회전자 권선 등의 전기적 시스템의 열화를 진단하는 기술, 그리고 각 발전 설비의 적절한 제어를 위한 센서, 액츄에이터 등의 제어시스템 설비에 대한 진단 기술들이 있다.

2.1 진동 및 과열에 대한 진단 기술

발전 설비의 기계적 진동 및 과열 문제는 각 설비의 안정성과 가용성을 감소시킴으로써 결과적으로 발전소의 운용 비용을 증가시키게 된다. 즉 비정상적으로 발전설비의 기계적 진동이 증가하거나 온도가 상승하게 되면 운용자는 안정된 계통운전을 위하여 발전기 출력을 감소시킴으로써 비효율적인 운전을 하게 되고 또한 과도한 진동이나 과열로 인한 시스템의 손상은 막대한 보수 비용을 요구할 뿐 아니라 안정적인 전력 공급에도 심각한 차질을 야기할 수 있다. 따라서 기계적 진동이나 과열로 인한 발전 설비의 상태 파악 및 수명 예측 등의 진단은 발전시스템의 경제적인 운용은 물론 설비 자체의 고장 예방 차원에서도 매우 중요하다.

현재 이러한 발전소내의 비정상적인 진동이나 과열에 관한 진단기술에는 정상적인 모델링을 통한 시뮬레이션 기법이 주로 이용되고 있다. 이 기법은 발전소를 구성하는 각각의 설비들의 적절한 모델링을 통하여 발전소 시스템에 대한 기계적 진동 모델을 도출하고 발전소 운용 조건에 따라 시뮬레이션을 수행함으로써 비정상적인 진동이나 과열을 해석하고 그 결과를 토대로 각 설비에 대한 진단을 수행하는 방법이다. 최근에는 인공지능 기법의 비약적인 발전을 토대로 하여 정확한 해석이 어려운 비선형적인 부분들에 적절하게 적용하는 기술들도 발표되고 있다.

2.2 권선에서의 단락진단

발전기의 전기적 시스템에서 발생할 수 있는 주요한 문제 중의 하나는 열화와 같은 원인으로 발생하는 고정자나 계자 권선에서의 단락이 있다. 밀폐된 발전기내의 권선 단락은 검출하기가 매우 어렵고 단락이 발생하였을 경우에도 이를 보수하기 위해서는 발전기를 분해하고 다시 조립해야하기 때문에 상당한 시간과 경비가 소요될 뿐 아니라 보수 기간 동안에는 발전기를 운전하지 못하기 때문에 이로 인한 경제적 손실 또한 막대하다. 특히 계자 권선 단락의 경우에는 발전기의 여자 시스템에 영향을 미치게 되어 비정상적인 기계적 진동을 발생시킬 수도 있다. 따라서 경제적 손실을 줄이고 계통의 안정성을 유지하기 위하여 신속하게 권선 내에서의 단락 발생과 정확한 위치를 진단하는 것은 매우 중요하다.

초기에는 주로 단락에 의해서 발생하는 진동을 연속적으로 감시함으로써 이를 진단하는 방법이 이용되었으나 발전기 진동의 원인이 다양하기 때문에 정확한 진단이 어려운 단점이 있었다. 현재 제안되는 주요 진단 방법으로는 운전 중에 권선의 임피던스를 간접적으로 측정하여 변화를 감시하는 방법, 계자 권선에 AC 전류를 인가하고 픽업 코일을 이용하여 발생된 자속의 대칭성을 확인하는 방법, 운전 중에 픽업 코일을 통하여 air-gap 자속을 직접 측정하는 방법들이 있다. 임피던스를 측정하는 방법은 간헐적인 단락으로 의해 임피던스가 현저하게 변화하는 경우에는 단락을 정확히 감지할 수 있으나 지속되는 단락의 경우는 그 변화가 없기 때문에 감지하기 어렵다. AC 전류 인가에 따른 자속의 대칭성을 확인하는 방법은 발전기의운전을 정지한 상태에서 진단을 수행하기 때문에 그로 인한 경제적인 손실이 크다. 운전 중에 air-gap 자속을 직접 검출하는 방법은 현재까지 신뢰성이 가장 높은 방법으로 평가받고 있지만 아직 air-gap 자속의 픽업 코일을 갖춘 발전기가 드물기 때문에 초기 설치비용이 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다.

2.3 제어시스템 설비의 진단

발전시스템은 송전 및 배전시스템과 달리 전력계통의 안정적이고 효과적인 운용을 위한 제어 동작이 수행되는 시스템이며 제어대상 설비 또한 다양하기 때문에 복잡한 제어시스템을 갖추고 있다. 즉, 발전 제어시스템은 각 설비의 제어를 위하여 제어 입력 및 동작에 필요한 다양한 센서들과 액츄에이터들이 서로 유기적으로 결합되어 전체적으로 시스템을 형성하고 있다. 이러한 제어시스템의 구성요소의 고장은 계통의 제어를 불가능하게 만들고 결과적으로는 비정상적인 제어를 수행함으로써 계통의 불안정한 상태를 야기할 수 있다. 따라서 제어 설비의 고장으로 인한 비정상적인 제어를 방지하고 안정적인 계통 제어를 위하여 제어시스템 설비에 대한 고장 진단이 필요하다.

현재 이 분야의 진단방법으로는 진단 대상 시스템의 수학적 모델을 도출하고 이 모델을 기준으로 실제 시스템의 상태를 비교함으로써 설비의 이상유무를 진단하는 방법이 있다.

3. 송전시스템의 진단 기술

송전시스템은 전력의 장거리 전송에 따른 선로 손실을 감소시키기 위해서 154kV이상의 초고압으로 운용되고 있으며 안정된 전력 전송을 위하여 루프 형태를 취하고 있다. 송전시스템의 구성은 송전선로, 변압기, 보호기기로 구성된다. 가공송전선로는 일반적으로 경제적인 이유로 인해 절연을 하지 않으며 대용량의 전류가 흐르고 있기 때문에 사고 발생시에 그 위험성이 매우 높고 또한 사고로 인한 전력 전송의 차질에 따른 경제적 손실도 막대하다. 따라서 송전시스템에는 이러한 사고에 대비하기 위하여 계전기, 차단기와 같은 보호기기들을 갖추고 있으며 이러한 보호기기들의 역할은 송전계통에서 사고가 발생하게 되면 사고를 신속하게 검출하여 사고 설비를 계통에서 분리함으로써 사고의 파급으로 인한 계통의 손실을 최소화 하는 것이다. 그러나 보호기기는 그 종류가 매우 다양하며 안정된 보호시스템의 구축을 위하여 다중의 보호시스템을 형성하고 있기 때문에 보호기기의 오동작이나 부동작이 발생할 경우에는 사고 위치의 명확한 식별이 어렵고 사고로 인한 피해 범위가 확대 될 수 있다.

변전용 변압기는 송전선로와 함께 송전시스템을 구성하는 중요 설비로서 대부분 밀폐 용기 안에 절연을 위하여 절연유가 채워진 유입변압기가 사용되고 있으며 변압기는 사용시간에 따라 변압기를 구성하고 있는 권선, 절연재료의 열화 등의 원인으로 인하여 일정한 수명을 가지고 있기 때문에 지속적인 유지 보수 혹은 교체가 필요한 설비이다. 따라서 이러한 변압기의 적절한 보수 및 교체 시기, 예상 수명 등의 진단이 필요하다.

현재 송전시스템에서 발표되고 있는 대표적인 진단 기술로는 송전시스템에서의 사고시에 보호기로부터의 정보를 통하여 정확한 사고 지점을 식별할 수 있는 송전망의 사고진단 기술과 유입변압기의 예방제어 및 수명예측을 위한 변압기 열화 진단이 있다.

3.1 송전망의 사고진단

송전계통에서 사고가 발생하면 보호기기인 계전기는 전압 이상이나 전류이상을 감지하고 적절한 차단기를 트립하여 사고지역을 계통으로부터 분리시킨다. 그러나 실제계통에서는 상술한 바와 같이 계전기나 차단기의 오동작, 부동작으로 인하여 정전구역이 확대될 수 있으며, 이 경우 사고구간을 제외한 정전구역의 시급한 복구가 이루어져야 하기 때문에 신속하고 정확한 사고구간의 추정이 반드시 필요하다. 그러나 송전망의 보호시스템은 다중의 보호망을 형성하고 있기 때문에 사고로 인해 발생된 정보량이 매우 많으며 특히 이러한 정보를 바탕으로 보호기기의 오동작, 부동작 여부를 판별하여 사고구간을 추정하는 것은 매우 어려운 작업이다. 현재까지 이러한 사고구간의 추정문제는 숙련된 전문가의 경험

적 지식에 의존하여 행하여 왔으나 송전시스템과 그 보호시스템 체계가 복잡해짐에 따라 불확실한 보호기기의 동작 정보까지 고려하여 실시간으로 추정하기란 매우 어려운 일이 되었다. 송전망의 사고진단기술은 상술한 바와 같이 송전망 사고시에 계전기와 차단기 등의 동작정보를 토대로 하여 정확한 사고 구간을 실시간으로 진단하는 기술을 의미한다. 즉 각각의 보호기기 들이 보호하는 송전설비 정보와 현재 송전시스템의 운용 정보, 그리고 사고로 인해서 동작한 보호기기의 정보 등을 이용하여 정확한 사고 설비를 진단하는 기술이다. 근래에는 인공지능 기술의 발달로 인해 신경회로망, 퍼지로지, 전문가 시스템 등과 같은 지능적 기술을 응용한 방법론들이 활발하게 제시되고 있다. 이 가운데에서 현재 가장 주목받고 있는 기술이 사고진단 전문가 시스템 응용기술이다. 사고진단 전문가 시스템은 주로 EMS, SCADA시스템을 대상으로 운전자 지원을 위한 송전선로의 사고진단을 위하여 개발되었고 송전선로와 상이한 보호체계가 적용되는 변전소내의 설비에 대한 사고진단 전문가 시스템도 개발되고 있는 상황이다. 또한 최근에는 송전선로와 변전소내 설비를 통합한 전체 송전시스템의 사고진단 전문가 시스템도 개발되었다.

3.2 변압기의 열화 진단

현재 변전기기에 이용되는 고압 변압기는 대부분 유입변압기이며, 유입변압기의 수명은 열적인 열화와 절연재료가 너서지 및 개폐서지 등의 이상전압 또는 외부단락등의 전기적, 기계적 스트레스에 의한 열화로 결정되고, 파괴할 위험도가 증대할 시점에 대한 열화문제를 고려하는 것이 예방보수 차원에서 매우 중요하다. 유입변압기는 각종의 재료가 이용되고 있지만 전기적 성능면에서 절연유, 절연지, 프레소브드 등의 절연재료 열화가 주요한 문제가 되고 있다.

절연유를 이용한 전력기에서 발생하는 주된 열화요인으로는 고온 운전에 따른 열적 열화, 외부단락에 기계적 손상 및 부분방전 열화가 대표적이며 이로 인하여 전기적 성능과 기계적 성능이 저하하게 된다. 이러한 열화에 의하여 이들 전력기에서는 기계적 강도 저하, 진동 증가, 가연성 가스 발생 등이 나타나고 절연파괴로 진전된다.

변압기에 사용되는 대표적인 진단기술로서는 절연유 중의 가스 분석에 의한 진단, 부분방전 측정에 의한 진단, 변압기의 %임피던스 측정에 의한 방법 등이 있다. 절연유중 가스 분석에 의한 진단은 변압기 내부에 국부적인 가열 및 부분방전이 발생하면 절연유 및 절연지가 분해되어 발생하는 가스의 성분, 발생량, 경시변화를 파악하고 Gas chromatography로 분석하여 변압기의 열화 진전상태를 진단하는 방법이다. 이때 가스분석 결과를 이용한 진단방법에 있어서 유효성이 높은 방법으로는 가스패턴에 의한 방법, 조성비에 의한 방법, 특정가스에 의한 방법등이 있다. 부분방전 측정에 의한 진단은 변압기 외함벽에 부착한 초음파 마이크를 이용한 음향법, 부분방전에서 발생된 전류펄스를 중성점 접지선의 Rogoski coil 및 Bushing tap으로부터 검출한 전류법을 병행하는 방



법이 있다. 마지막으로 %임피던스의 변화 측정에 의한 진단은 변압기에 2차 단락이 일어날 경우에는 단락전류에 의해 코일이 변형되어 코일간 gap이 증가하는 현상을 이용한 방법이다. 즉 변압기의 %임피던스를 측정하여 그 변화량을 관측하면 코일의 상태가 추정되므로 변압기의 이상을 진단할 수 있다.

4. 배전시스템에서의 진단

일반적으로 배전시스템은 22.9kV의 배전선로를 기본으로 하여 구조 자체는 루우프 구조(Loop Network)로 되어 있으나 경제적인 이유와 운용상의 편의를 위하여 방사상 구조로만 운용을 하고 있으며, 배전시스템 역시 보호시스템을 적용하고는 있으나 송전시스템에 비해서는 비교적 단순하게 이루어져 있다. 그러나 배전시스템은 송전망으로부터 수 많은 수용가 측으로 전력을 공급하는 시스템이기 때문에 그 구조가 매우 복잡하여 송전계통에 비하여 사고 발생 빈도 또한 높다. 배전망에서도 사고의 발생시 피해를 최소화 하기 위한 운용은 전통적으로 운용자의 경험적 지식에 의한 수동방식에 의존하였으나 근래에는 배전 SCADA의 채용으로 원격감시와 원격제어를 수행하고자 하는 배전자동화 시스템에 관한 연구가 국내외적으로 활발하게 수행되고 있다. 배전망의 사고진단은 상술한 바와 같이 안정적인 배전시스템 운용은 물론이고 배전자동화의 일환으로서 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다.

예방진단의 경우, 배전선로는 전력계통시스템 중에서 수용가에 가장 인접하여 있기 때문에 공공의 안전과 미관을 위해 점차 지중화되고 있는 추세이므로 지중 배전 케이블의 절연에 관한 문제가 최근 부각되고 있으며, 지중배전 케이블은 케이블의 열화로 인해 절연 파괴가 발생할 경우, 보수 및 교체가 용이하지 않기 때문에 예방 진단을 통하여 고장을 미연에 방지하고 예방하기 위한 케이블의 열화 진단 및 수명예측 시스템이 연구되고 있다.

4.1 지중배전케이블의 열화 진단

지중배선용 전력케이블은 절연을 목적으로 고분자재료인 가교 폴리에틸렌(XLPE)을 사용하며, 전계완화를 위하여 절연층 내외부에 반도체층을 사용하고 있다. 고분자재료를 사용하는 전력케이블은 생산공정이 간단하여 경제적이고 고장 발생시 보수가 용이하다는 장점이 있지만, 시간의 경과에 따라 절연능력이 약화되어 결국에는 절연파괴를 유발하므로 이러한 고장을 방지하기 위해서는 고장이 일어나기 전에 전력케이블의 상태를 진단하는 일은 매우 중요하다.

지금까지의 전력케이블의 절연진단에 관한 연구로는 거의 대부분이 고전압 인가시의 직류누설전류나 전압감쇄 측정에만 국한되어 왔다. 그러나 이러한 방법들은 다중접지 방식의 배전 시스템에서는 접지로부터 유입되는 잡음의 크기가 측정하려는 신호보다 크기 때문에 전기적 신호를 측정하여 진단한다는 것은 매우 어렵다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 현

재 국내외적으로 지중 배전케이블의 열화상태를 진단하기 위해서 전기적 방법 이외에 화학적, 물리적, 미세구조적 분석방법을 응용한 새로운 방법들을 사용하고 있다. 이 방법의 원리는 고분자 절연재료에 기계적, 전기적 EH는 환경적 외부요인이 가해질 경우 고분자의 구조가 변하게 되어 결국은 전기적 특성에 영향을 미친다는 사실에 기초한 것이다. 즉, 고분자 특성분석을 통하여 열화와 연결될 수 있는 특성을 파악한 다음 전력 케이블의 열화판정과 관련된 전기적 특성과의 연관성을 찾는 방법이다. 전기적 방법은 단말처리 또는 주변환경에 의해 측정치가 너무 영향을 받기 때문에 심지어 측정된 수치의 신뢰성부터 의심되는 경우가 많을 정도로 불확실하다. 이에 반하여 고분자 특성분석 방법은 열화요인이 종류에 상관없이 재료의 특성을 변화시키므로 재료의 특성 변화만 정확하게 파악하면 전력케이블의 열화정도를 알 수 있으며 이를 전기적 특성과 잘 연결시키면 잔존 수명까지도 예측이 가능하다. 따라서 전력케이블의 열화상태를 진단하기 위해서는 케이블 이력, 중성선 부식정도, 반도체층의 체적고유저항, 불순물 및 보이드의 밀도와 크기, 고장빈도 등에 관한 사항을 기본적으로 알아야 하고 절연층 및 반도체층의 건전성을 평가하여 종합적으로 진단해야 한다.

4.2 배전망에서의 사고진단

배전망의 보호시스템은 과전류 계전기, 재폐로 스위치, 차단기, 구분스위치 등으로 구성되는 비교적 단순한 구조를 갖고 있다. 그러나 배전망의 사고 발생 빈도는 송전망에 비해 상당히 높고 고저항 사고와 같이 보호시스템으로는 검출이 쉽지 않은 사고의 발생 빈도 또한 높다. 더욱이 배전망은 방사상 구조로 운용되기 때문에 사고로 인한 영향이 수용가 측에 직접 미치게 된다. 따라서 배전망에서의 사고시 이에 대응하는 신속하고 정확한 복구 조치가 필요하기 때문에 사고 지점을 정확히 판단 할 수 있는 사고 진단이 필요한데, 배전망에서의 사고 진단은 신속한 사고 지점의 진단을 위하여 사고 설비만을 진단하는 송전망과는 달리 배전선로의 정확한 사고 지점의 진단이며 이는 SCADA로부터 취득된 사고 전후의 스위치 정보 및 현재 배전망의 운용 정보등을 토대로 하여 진단이 가능하다. 즉, 취득된 정보들을 통하여 각 보호기기로부터 사고위치까지의 거리를 계산함으로써 비교적 정확한 사고 위치를 진단할 수 있다. 이외에도 통신기능을 갖춘 사고 센서, 주요 수용가로부터의 정보를 추가적으로 이용하여 보다 정확히 사고위치를 진단할 수 있는 기술들도 발표되고 있다. 초기에 발표된 진단기술에는 주로 진단에 관련된 정보의 해석을 통한 정성적인 방법들이 발표되었으나 최근에는 취득된 정보의 불확실성을 고려하여 보다 신뢰성 있는 진단을 위하여 신경회로망, 퍼지이론, 전문가 시스템등을 이용한 진단 기법이 많이 발표되고 있다.

5. 결론 및 향후 전망

지금까지 전력계통분야에서 현재 활발하게 연구되고 있는

【 전력계통분야에서의 고장진단기술 현황 】

표 2. 전력계통의 주요 진단기술

전력시스템의 진단 기술 분야		주요 진단 기법	진단종류
발전 시스템	진동 및 과열에 대한 진단 기술	· 정상적인 모델링을 통한 시뮬레이션	예방진단
	권선 단락에 대한 진단 기술	· 간접적인 권선 임피던스의 측정 · AC전류 인가에 따른 자속의 측정 · 직접적인 air-gap 자속의 검출	예방진단
	발전제어시스템에 대한 고장진단 기술	· 기준 모델을 통한 상태 비교	사후진단
송전 시스템	송전망의 사고진단 기술	· 전문가 시스템, 신경회로망, 퍼지이론 등의 인공지능 기법 응용	사후진단
	전력용 변압기의 열화 진단 기술	· 절연유중의 가스 분석 · 부분방전 측정 · %임피던스의 측정	예방진단
배전 시스템	지중배전케이블의 열화 진단 기술	· 직류누설전류 및 전압감쇄 측정 · 열화에 따른 고분자 재료의 특성분석	예방진단
	배전망의 사고진단 기술	· 사고로 인한 정보의 수학적 해석 · 전문가 시스템, 신경회로망, 퍼지이론 등의 인공지능 기법 응용	사후진단

주요 진단분야를 발전, 송전, 배전시스템으로 분류하여 고찰하였으며, 각각의 주된 진단기술을 요약하면 표 2와 같다. 표에서 알 수 있듯이 예방진단의 경우에는 주로 설비에 대한 분석 또는 해석적인 방법을 통하여 고장을 진단하거나 수명을 예측하는 방법이 이용되고 있으며, 사후진단인 사고진단의 경우에는 인공지능 기법을 도입하여 진단하는 방법, 특히 전문가시스템을 응용한 방법이 많이 이용되고 있음을 알 수 있다.

참고로 다음 표 3에서는 전력계통의 진단에 관하여 최근 5년간 국내외의 학술지에 발표된 논문현황을 소개한다.

표 3의 발표 논문실적을 살펴보면 국내외적으로 공히 송전시스템의 진단에 관한 논문이 가장 많이 발표되었고, 다음으로는 배전시스템, 발전시스템의 순위로 발표되었음을 알 수 있다. 송전시스템 진단에 관련된 발표논문 중에서는 사후진단인 송전망의 사고진단에 관한 논문이 많이 발표되었는데 이는 최근 인공지능 기법의 발전으로 인해 이의 응용 기술이 많이 연구되고 있음을 보여준다.

표 3. 최근 5년간 학술지 발표 논문수

분야	학술지 발표 논문수	
	국외학술지 ¹⁾	국내학술지 ²⁾
발전시스템	4	2
송전시스템	28	10
배전시스템	13	3
계	45	15

¹⁾ 국외학술지 : IEEE Trans. on Power Delivery, Power Systems, Energy Conversion, Dielectrics & Electrical Insulation

²⁾ 국내학술지 : 대한전기학회 논문지

주제별 참고 문헌

- 발전기 진동 및 과열에 대한 진단 기술 -

- [1] Rioual M., "Presentation of a System for the Improvement of the On-Line Thermal Monitoring on 900MW Turbogenerators for Predictive Maintenance Purposes", IEEE Trans. on EC, Vol. 12, No. 2, pp. 157-165, June 1997
- [2] Konidaris D. N., Tegopoulos J. A., "Investigation of Oscillatory Problem of Hydraulic Generating Units Equipped with Francis Turbines", IEEE Trans. on EC, Vol. 12, No. 4, pp. 419-425, Dec. 1997

- 발전기 권선의 단락진단 -

- [3] Streifel, R. J., Marks R. J. II, El-Sharkawi M. A., Kerszenbaum I., "Detection of Shorted-Turns in the Field Winding of Turbine-Generator Rotors Using Novelty", IEEE Trans. on EC, Vol. 11, No. 2, pp. 312-317, June 1996
- [4] 황동하, 김진봉, 김용주, 박명수, 김택수, "수력 발전기 권선에서의 운전중 부분방전 측정기법", 대한전기학회논문지, 1996년 2월호

- 발전제어시스템 설비의 진단 -

- [5] Ben-Abdenour A., Lee K. Y., "An Autonomous Control System for Boiler-Turbine Units", IEEE Trans. on EC, Vol. 11, No. 2, pp. 401-406, June 1996
- [6] 김재화, 서열규, 장태규, "Oscillatory 과형감지에 의한 보일러 플랜트 드럼수위 제어시스템의 고장 진단", 대한전기학회논문지 A권, 1998년 1월호

- 송전망의 사고진단 -

- [7] Bernard J. P., Durocher D., "An Expert System for Fault Diagnosis Integrated in Existing SCADA System", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 9, No. 1, pp. 548-554, Feb. 1994
- [8] Kobayashi T., Moridera D., Komai K., Fukui S., Matsumoto erification Results by Connecting to an Operator Training Simulator", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 10, No. 1, pp. 167-174, Feb. 1995
- [9] Hong-Tzer Yang, Wen-Yeou Chang, Ching-Lien Huang, "Power

- System Distributed On-Line Fault Section Estimation Using Decision Tree Based Neural Nets Approach", IEEE Trans. on PWRD, Vol 10, No. 1, pp. 540-546, Jan. 1995
- [10] Minakawa T., Ichikawa Y., Kunugi M., Shimada K., Wada N., Utsunomiya M., "Development and Implementation of a Power System Fault Diagnosis Expert System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 2, pp. 932-940, May 1995
- [11] Hanjin Miao, Sforma M., Chen-Ching Liu, "A New Logic-Based Alarm Analyzer for On-Line Operational Environment", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 3, pp. 1600-1606, Aug. 1996
- [12] Sidhu T. S., Cruder O., Huff G. J., "An Abductive Inference Technique for Fault Diagnosis in Electrical Power Transmission Networks", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 515-522, Jan. 1997
- [13] Young-Moon Park, Gwang-Won Kim, Jin-Man Sohn, "A Logic Based Expert System (LBES) for Fault Diagnosis of Power System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 363-369, Feb. 1997
- [14] Vazquez M. E., Chacon M. O. L., Altuve F. H. J., "An On-Line Expert System for Fault Section Diagnosis in Power Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 357-362, Feb. 1997
- [15] Yann-Chang Huang, Hong-Tzer Yang, Ching-Lien Huang, "A New Intelligent Hierarchical Fault Diagnosis System [for Power Networks]", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 349-356, Feb. 1997
- [16] Hyun-Joon Cho, Jong-Keun Park, "An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems Using Fuzzy Relations", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 342-348, Feb. 1997
- [17] Billinton R., Aboreshaid S., Fotuhi-Firuzabad M., "Diagnosing the Health of Bulk Generation and HVDC Transmission Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 4, pp. 1740-1745, Nov. 1997
- [18] Narendra K. G., Sood V. K., Khorasani K., Patel R., "Application of a Radial Basis Function (RBF) Neural Network for Fault Diagnosis in a HVDC System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 1, pp. 177-183, Feb. 1998
- [19] Teo. C. Y., "Conventional and Knowledge Based Approaches in Fault Diagnosis and Supply Restoration for Power Network", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 1, Feb. 1998
- [20] 박영문, 이홍재, "전력계통의 고장진단 전문가 시스템에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 1990년 1월호
- [21] 박영문, 이홍재, "전력계통의 고장진단 전문가 시스템에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 1990년 10월호
- [22] 김광호, 박종근, "전력계통 사고구간 판정을 위한 Connectionist Expert System", 대한전기학회논문지, 1992년 4월호
- [23] 이홍재, 박영문, 임찬호, "조직원 훈련을 위한 전력계통의 사고 모의 및 고장진단 전문가 시스템의 연구", 대한전기학회논문지, 1994년 4월호
- [24] 이재용, 백영식, "지향 프로그래밍 기법을 이용한 전력계통의 고장진단시스템에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 1995년 4월호
- [25] 이홍재, 박영문, 임찬호, 추진부, 권태원, "SCADA 시스템을 위한 고장진단 및 복구 지원 전문가 시스템의 개발", 대한전기학회논문지, 1995년 11월호
- [26] 최준혁, 이화석, 박준호, "신경회로망을 이용한 전력계통의 고장진단에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 1997년 5월호
- [27] Kezunovic M., Spasojevic P., Fromen C. W., Sevcik D. R., "An Expert System for Transmission Substation Event Analysis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 8, No. 4, pp. 1942-1949, Oct. 1993
- [28] Hong-Tzer Yang, Wen-Yeau Chang, Ching-Lien Huang, "On-Line Fault Diagnosis of Power Substation Using Connectionist Expert System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 1, pp. 323-331, Feb. 1995
- [29] Alves da Silva A. P., Insfran A. H. F., da Silveira P. M., Lambert-Torres G., "Neural Networks for Fault Location in Substations", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 1, pp. 234-239, Jan. 1996
- [30] 박영문, 이홍재, 윤용범, 임찬호, "변전소 자동화를 위한 고장진단 전문가 시스템 연구", 대한전기학회논문지, 1995년 3월호
- [31] 이화석, 문경준, 황기현, 윤재영, 박준호, 김정택, "확률신경회로망을 이용한 지역변전소에서의 고장진단에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 1997년 11월호

- 변압기의 열화 진단 -

- [32] Nukaiyama Y., Takagi I., Ishihara H., Kudo A., Makino Y., Hosokawa N., "Principal Decomposition By-Products Generated at Various Abnormalities in Gas-Insulated Transformers", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9, No. 4, pp. 1885-1891, Oct. 1994
- [33] Bak-Jensen J., Bak-Jensen B., Mikkelsen S. D., "Detection of Faults and Ageing Phenomena in Transformers by Transfer Functions", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 1, pp. 308-314, Jan. 1995
- [34] Mizuno K., Ogawa A., Oe E., Mori E., "Diagnostic Techniques and Apparatus for Detecting Faults in Perfluorocarbon Liquid Immersed Transformers", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 2, pp. 909-916, April 1996
- [35] Bengtsson C., "Status and Trends in Transformer Monitoring", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 3, pp. 1379-1384, July 1996
- [36] Lesieutre B. C., Hagman W. H., Kirtley J. L. Jr., "An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in an On-Line Monitoring and Diagnostic System", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 1, pp. 249-256, Jan. 1997
- [37] Yann-Chang Huang, Hong-Tzer Yang, Ching-Lien Huang, "Developing a New Transformer Fault Diagnosis System Through Evolutionary Fuzzy Logic", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 2, pp. 761-767, April 1997
- [38] Jalbert J., Gilbert R., "Decomposition of Transformer Oils: a New Approach for the Determination of Dissolved Gases", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 2, pp. 754-760, April 1997
- [39] Saha T. K., Darveniza M., Hill D. J. T., Le T. T., "Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation: B. Accelerated Aged Insulation Samples", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 4, pp. 1555-1561, Oct. 1997
- [40] Wang Z. Y., Liu Y. L., Griffin P. J., "A Combined ANN and Expert System Tool for Transformer Fault Diagnosis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 4, pp. 1224-1229, Oct. 1998
- [41] Huecker T., Gorablenkow J., "UHF Partial Discharge Monitoring and Expert System Diagnosis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 4, pp. 1162-11167, Oct. 1998
- [42] Yang H. T., Huang Y. C., "Intelligent Decision Support for

【 전력계통분야에서의 고장진단기술 현황 】

- Diagnosis of Incipient Transformer Faults Using Self-Organizing Polynomial Networks", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 13, No. 3, pp. 946-952, Aug. 1998
- [43] 이준호, 이동영, 최중갑, 김재철, 박희로, 권태원, 한민구, "전력용 변압기 절연유의 비파괴 진단 시험법 비교연구", 대한전기학회논문지, 1991년 8월호
- [44] 권동진, 박희로, 정상진, 김정부, "초음파 신호 수의 이동평균에 의한 전력용 변압기 예방진단", 대한전기학회논문지, 1996년 3월호
- [45] 남창현, "절연유중 용존가스 추출특성 및 변압기 감시장치의 개발 연구", 대한전기학회논문지, 1997년 9월호
- [46] 권동진, 전영갑, 조국희, "가속열화된 변압기 절연유에서 열화진단센서의 특성", 대한전기학회논문지, 1998년 2월호
- [47] 윤용한, 전영재, 김재철, "유중 가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장 진단용 코호넨 네트워크", 대한전기학회논문지, 1998년 6월호
- [48] Vanegas O., Mizuno Y., Naito K., Kamiya T., "Diagnosis of Oil-Insulated Power Apparatus by Using Neural Network Simulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, pp. 290-299, June 1997
- [49] Okabe S., Koto M., Muraoka T., Suganuma K., Takahashi K., "Techniques for Diagnosing Deterioration of Oil-Impregnated Paper-Film Power Capacitors", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 4, pp. 1751-1759, Oct. 1997
- 지중 배전케이블의 열화 진단 -
- [50] Mammeri M., Laurent C., Salon J., "Influence of Space Charge Buildup on the Transition to Electrical Treeing in PE under AC Voltage", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, pp.27-35, Feb. 1995
- [51] Okamoto T., Tanaka T., "Auto-Correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp. 857-865, Oct. 1995
- [52] Gulski E., "Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 630-640, Aug. 1995
- [53] Cachin C., Wiesmann H. J., "PD Recognition with Knowledge-Based Preprocessing and Neural Networks", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 578-589, Aug. 1995
- [54] Hucker T., Krantz H. G., "Requirements of automated PD Diagnosis Systems for Fault Identification in Noisy Conditions", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 544-556, Aug. 1995
- [55] Montanari G. C., Motori A., Bulinski A. T., Bamji, S. S., Densley J., "Application of Oxidation Induction Time and Compensation Effect to the Diagnosis of HV Polymeric Cable Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 3, pp. 351-360, June 1996
- [56] Hoof M., Freisleben B., Patsch R., "PD Source Identification with Novel Discharge Parameters Using Counterpropagation Neural Networks", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, pp. 17-32, Feb. 1997
- [57] Contin A., Gulski E., Cacciari M., Montanari G. C., "Inference of PD in Electrical Insulation by Charge-Height Probability Distribution - Diagnosis of Insulation System Degradation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 1, pp. 110-117, Feb. 1998
- [58] Bozzo R., Gemme C., Guastavino F., Cacciari M., Contin A., Montanari G. C., "Aging Diagnosis of Insulation Systems by PD Measurements-Extraction of Partial Discharge Features in Electrical Treeing", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 1, pp. 118-124, Feb. 1998
- [59] 최영찬, 송광화, 송일근, 김주용, 김상준, "퍼지추론에 의한 XLPE 케이블의 절연진단 전문가 시스템 구축", 대한전기학회논문지, 1995년 2월호
- [60] 이우영, 김광화, 송일근, 김주용, 김상준, "23kV급 전력케이블 조립형 직선 접속재의 활선진단 부분방전 검출기기 개발", 대한전기학회논문지, 1998년 3월호
- 배전망에서의 사고진단 -
- [61] 이동영, 김상준, 송일근, 김주용, "직류전압감쇄법을 이용한 전력케이블의 절연열화진단", 대한전기학회논문지, 1998년 3월호
- [62] arventausta P., Verho P., Partanen J., "Using Fuzzy Sets to Model the Uncertainty in the Fault Location Process of Distribution Networks", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 9, No. 2, pp. 954-960, April 1994
- [63] Togami M., Abe N., Kitahashi T., Ogawa H., "On the Application of a Machine Learning Technique to Fault Diagnosis of Power Distribution Lines", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 10, No. 4, pp. 1927-1936, Oct. 1995
- [64] Jun Zhu, Lubkeman D. L., Girgis A. A., "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 2, pp. 801-809, April 1997
- [65] Momoh J. A., Dias L. G., Laird D. N., "An Implementation of a Hybrid Intelligent Tool for Distribution System Fault Diagnosis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 2, pp. 1035-1040, April 1997

저 자 소개



이흥재 (李興載)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업(석사). 1990년 동대학원 졸업(공학). 1983-1984년 금성사 중앙연구소 연구원, 1995-1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수, 1990-현재 광운대 공대 전기공학과 부교수.