

K-AMSAC 설계 기준 및 설계 요건 개발 Design Basis and Design Requirement for K-AMSAC

박현신, 이우준, 반재하
한국전력공사 전력연구원,
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 논문에서는 K-AMSAC 계통 설계의 근거가 되는 10CFR50.62의 요건을 설명하고, 10 CFR50.62의 요건을 만족하는 ATWS 완화설비를 개발하기 위하여, 우선 계통의 기본 설계 기준을 제시하였다. 설계 기준 가운데 특히 중요한 사항은 보호계통에 대한 다양성과 독립성 그리고 ATWS 완화 설비가 비안전등급으로 분류됨에 따른 여러 고려 사항들이다. 본 논문에서는 이러한 설계 기준을 근거로 K-AMSAC 계통이 만족해야할 설계 요건을 정의하였다. 그리고 2 Loop와 3 Loop 발전소에 대해서 각각 계통의 기능을 설명하고 계통 기능 요건에 따라 개략적인 계통 기능도를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 설계 기준 및 요건은 고리 및 영광 발전소와 다양성보호계통이 없는 다른 발전소에 적용이 가능하다.

Abstract

This paper proposes the design basis of ATWS mitigation system (so called K-AMSAC) satisfying 10CFR50.62. Based on this design basis, the design requirements of the system has been defined. The requirements include the diversity and independence from the plant protection system which ensure the mitigation of the transient in case of common mode failure of the protection system. This paper also presents the functional block diagrams for 2 and 3-loop plants, illustrating the functioning of the K-AMSAC. The suggested design basis and requirements are applicable for Kori and Yongkwang plants, and possibly other plants that do not have DPS (Diverse Protection System).

I. 개 요

ATWS는 10 CFR 50 Appendix A General Design Criteria 20에서 정의한 보호계통의 원자로 트립 기능의 고장 이후에 발생한 Anticipated Operational Occurrence로 정의된다. 이러한 ATWS 에 대해서 US-Nuclear Regulatory Commission(NRC) 10 CFR 50.62 "Requirements

for reduction of risk from anticipated transients without scram (ATWS) events for light-water-cooled nuclear power plants"^[2]에서는 모든 경수로에서 만족해야 할 요건을 제시하였다. K-AMSAC은 기본적으로 10 CFR 50.62의 요건을 만족하도록 설계되어야 한다.

K-AMSAC의 기본 설계에 적용되어야 할 10 CFR 50.62 요건은 다음과 같다.

① 모든 가압 경수로에는 ATWS 조건에서 보조급수계통의 작동과 터빈의 트립을 자동으로 개시하기 위해 센서 출력에서부터 최종작동장치에 이르기까지 원자로 보호계통과는 다른 설비를 시설하여야 한다. 이 다양성 설비는 신뢰성 있게 개시기능을 수행할 수 있도록 설계되어야 하며, 센서 출력에서 최종 작동장치에 이르기까지 기존의 원자로 보호계통과는 독립되어야 한다.

② Combustion Engineering 또는 Babcock and Wilcox 이 건설한 가압 경수로에는 센서 출력에서부터 제어봉 전력차단에 이르기까지 다양한 정지계통을 시설하여야 한다. 이 다양성 정지계통은 신뢰성 있게 정지기능을 수행할 수 있도록 설계되어야 하며, 센서 출력에서 제어봉 전력차단에 이르기까지 기존의 원자로 트립 계통과 독립되어야 한다.

10 CFR 50.62에서 가압 경수로에 대한 요건은 위 두 가지이며, 이들 두 가지 요건의 차이점은 CE형 원전과 B&W 원전에 대해서는 다양한 원자로 정지 기능을 요구한다는 것이다. 웨스팅하우스형 원전에서는 ATWS 상황하에서 보조급수 작동과 터빈 트립을 자동으로 개시하는 기능이 요구되며, 다양한 원자로 정지 기능은 요구되지 않는다. K-AMSAC은 한국에 건설되어 운전중인 웨스팅하우스형의 원자력발전소에 적용되는 설비로서, 10 CFR 50.62에서 언급한 위 1항의 요건을 만족하도록 ATWS 상황하에서 기존의 원자로 보호계통과는 별도로 보조급수 작동과 터빈 트립을 자동으로 개시할 수 있도록 설계되어야 한다.

II. K-AMSAC 설계

K-AMSAC은 모든 주급수 공급이 상실되는 예상과도 사건에서 보조급수와 터빈 트립이 발생되도록 하기 위하여, 증기발생기의 수위와 터빈 출력 신호를 감시하고, 이들 공정변수를 설정치와 비교하고 동시논리를 수행하여 그 결과 동작 신호를 Isolator를 거쳐서 기존의 터빈 트립 계통과 보조급수 개시회로에 전달하는 기능을 수행한다.^{[1],[4]} 이러한 기능을 수행하기 위하여 K-AMSAC 계통은 센서 신호를 받아들이는 입력 모듈, 비교 및 동시 논리, 최종 동작 신호 출력 모듈 등으로 구성되며 Isolator는 기존 터빈트립계통과 보조급수 개시회로 입력단에 설치된다. 그리고 국내 웨스팅하우스형 원전의 경우 K-AMSAC 동작을 위한 센서는 보호계통에 사용되는 것으로, K-AMSAC은 이들 센서의 신호를 Isolator를 통해서 입력받게 된다.

국내 웨스팅하우스형 원전은 증기발생기의 설치 개수에 따라서 크게 2-Loop와 3-Loop로 나

누어진다. ATWS 완화 설비인 K-AMSAC은 이들 두 가지 형태의 원전에 모두 적용되어야 하며, 발전소 형태에 따라, K-AMSAC은 내부적으로 일부 변경된 논리로 구성된다.

1. 설계 기준

1.1 다양성

AMSAC 보조급수 공급을 위한 기기는 센서 출력에서부터 최종 Actuation device (포함되지는 않음)까지 충분한 기기 다양성을 가지도록 설계되어야 한다. 센서 신호 처리 기기, 트립 인식, 논리 및 트립 개시 논리는 제작자 및 설계 그리고 설계 원리 및 절차에서 다양성을 가져야 한다. 최종 동작 기기, 즉 Auxiliary feedwater system component control 논리는 기존의 안전등급 동작 계통과 공유할 수 있다. 다양성을 만족하는 설계를 위해서, 발전소보호계통이 "Deenergize to Actuate" 개념의 설계인데 반해서 AMSAC 계통은 "Energize to Actuate"로 설계한다.

1.2 전원

ATWS 완화 설비의 논리를 수행하는 기기는 Non Class 1E의 전원으로부터 공급받는다. 그리고 AMSAC Aux. Feedwater Actuation Logic 전원은 기존의 발전소보호계통의 전원과 독립적이어야 한다. Non Class 1E 전원은 non interruptable 전원이어야 한다.

1.3 안전관련 연계 사항

AMSAC 계통으로 인하여 기존 발전소보호계통에 적용된 설계 기준이 위배되지 않아야 한다. 예를 들어, AMSAC 계통으로 인하여 기존 발전소보호계통에 적용된 분리 기준이 위반되지 않아야 한다.

1.4 품질 보증

ATWS 완화 설비는 안전등급 계통에 적용된 방법에 준해서 설계, 구매, 문서화, 시험, 조사 및 취급 되어야 한다.

1.5 보수 유지 우회

출력 운전중에 AMSAC 계통의 부적절한 보호 동작을 일으키지 않고 시험, 보수 유지, 고장 수리 및 보정을 할 수 있도록 Bypass 기능이 제공되어야 한다. 그리고 AMSAC 기능이 우회되었을 때, 이 상태는 제어실에 계속적으로 그리고 자동으로 표시되어야 한다.

1.6 운전 우회

운전 우회 상태는 제어실에 계속적으로 표시되어야 한다.

1.7 우회 수단

우회 기능을 위한 기기는 영구적으로 설치되어야 하고, 인간공학을 고려한 우회 스위치 또는 비슷한 기기로 이루어져야 한다.

1.8 수동 개시

운전원에 의한 수동 터빈 트립 및 보조급수 동작이 가능하도록 설계되어야 한다.

1.9 기존 원자로보호계통과 전기적 독립

Sensor 출력에서부터 최종 동작 기기 (Final actuation device)까지 기존 안전계통과 전기적 독립이 유지되어야 하며, 비안전관련 회로와 안전 관련 회로는 품질 검증된 Class 1E Isolator로 격리되어야 한다. 기존의 Isolator를 사용 가능하다. 그러나 Isolator를 사용하는 경우에는 최악의 고장 조건하에서 기존의 Isolator가 정상적으로 동작할 것이라는 것을 증명하는 해석과 시험이 제공되어야 한다.

1.10 기존 원자로보호계통과의 물리적 분리

ATWS 완화 설비로 인하여 기존 원자로보호계통에 적용된 격리 기준이 위배되지 않아야 한다.

1.11 환경 검증

ATWS 완화 설비는 Anticipated Operational Occurrences 환경 조건에서만 환경이 검증이 이루어지면 된다.

1.12 운전중 시험

계통 설치 이전에 그리고 주기적으로 비안전관련 ATWS 완화 설비를 시험하기 위한 수단이 설정되어야 한다. ATWS 완화 설비의 시험은 Bypass 된 상태에서 수행 가능하다. ATWS 완화 설비 출력단에서부터 최종 동작 기기까지의 시험은 발전소 정지시에 수행된다.

1.13 완화 동작의 완료

ATWS 완화 설비는 한번 동작이 발생되면 터빈 트립 및 보조급수 회로 동작이 완료되어야 한다.

1.14 다중성

기본적으로 기존의 원자로보호시스템이 다중화 되어 있으므로 ATWS 완화 설비 자체에 다중성은 요구되지 않는다. 그러나 비안전 계통인 ATWS 완화 설비의 단일 고장으로 인하여 원치 않는 계통 동작이 발생하지 않도록 설계해야 한다. 이러한 다양성 개념은 ATWS 완화설비의 부적절한 동작 발생 가능성을 감소시키고, 발전소 이용률을 향상시킬 수 있다. K-AMSAC은 계통 자체의 단일 고장으로 인한 오동작 발생 가능성을 줄이고 발전소 이용률을 높이기 위하여 두 채널로 계통을 구성하고 각 채널에서 2 out of 2 논리를 구성한다.

1.15 내진 요건

Anticipated Operational Occurrence (AOO)가 발생하고 기존 원자로보호시스템에 고장이 발생하고 또 기기에 심각한 물리적 손상을 줄 수 있는 지진이 동시에 발생할 확률은 매우 낮기 때문에, 기본적으로 ATWS 완화 설비에 대한 내진 검증은 요구되지 않는다. 그러나 ATWS 완화 설비는 지진이 발생한 경우 다른 계통이나 운전자에게 피해를 주지 않도록 Safe Shutdown Earthquake (SSE) 발생시에 물리적 손상 없이 견딜 수 있어야 한다. 이때 계통의 기능 수행은 요구되지 않는다.

1.16 안전등급

ATWS 완화 설비는 비안전 계통으로 분류되며, 안전관련 기기에 적용되는 모든 요건을 만족할 필요는 없다. 그러나 ATWS 완화 설비로 인하여 기존 보호시스템에 적용되고 있는 안전 기준이 위반되지 않도록 해야 한다.

2. 설계 요건

2.1 K-AMSAC 기능 요건

국내 원전에 웨스팅하우스형의 발전소에 적용할 K-AMSAC은 10 CFR 50.62의 요건을 만족할 수 있도록, ATWS 상황하에서 기존 발전소보호시스템과는 다양한 방법으로 보조급수 동작 및 터빈 트립을 발생하는 기능을 수행한다.

2.1.1 보조급수계통 (Auxiliary Feedwater System : AFAS) 동작

2-Loop의 원전에 대해서 K-AMSAC 계통은 두 개의 증기발생기의 수위를 감시하여 수위 신호가 설정치 이하로 떨어지면 보조급수를 동작시킨다. K-AMSAC에 사용되는 증기발생기 수위 센서는 안전계통과 공유하는 것으로 이들 신호는 Isolator를 거쳐서 K-AMSAC 입력 모듈에 연결된다. 각 증

기발생기에는 안전관련 수위 센서가 모두 세 개씩 설치되어 있는데, K-AMSAC에서는 이들 세 개의 센서 가운데 두 개의 센서 신호를 사용한다. 이들 두 센서로부터의 출력 신호는 각각 하나씩 K-AMSAC의 채널 1과 채널2에 하나씩 입력되게 된다. 입력된 신호는 이미 내장되어있는 증기발생기 수위 설정치와 비교된다. 이와 같이, 각 증기발생기에 대해서 두 개의 수위 신호를 입력하여 두 개의 수위 신호가 모두 수위 설정치 이하가 될 때 K-AMSAC 각 채널에서 하나씩 보조급수계통 펌프(모터 구동 및 터빈 구동) 동작 신호를 출력한다. (그림 1, 3 참조)

3-Loop의 원전에 대해서 K-AMSAC 계통은 세 개의 증기발생기 수위를 감시하여, 두 개 이상의 증기발생기의 수위가 설정치 이하로 떨어지면 보조급수를 동작시킨다. 2-Loop에서와 마찬가지로 K-AMSAC은 증기발생기에 설치되어있는 수위 센서를 안전계통과 공유한다. 3-Loop의 경우, 각 증기발생기에는 모두 네 개의 센서가 설치되어있는데, K-AMSAC에서는 이들 네 개의 센서중에서 두 개의 센서로부터 신호를 입력한다. 각 증기발생기에서 입력한 두 개의 신호가 모두 설정치 이하가 되고, 그리고 두 개 이상의 증기발생기에서 설정치 이하가 될 때 보조급수계통 펌프 동작 신호를 출력한다. (그림 2, 4)

K-AMSAC에서 출력된 보조급수 동작 신호는 보조급수 동작을 위한 회로 (Motor Driven Aux. Feedwater Pump와 Turbine Driven Aux. Feedwater Pump 구동 회로)에 입력된다. K-AMSAC은 두 채널로 구성되어 있으며, 각 채널에서 하나씩 보조급수 동작 신호가 발행되는데 이들 신호는 AND 회로 연결되어 K-AMSAC의 두 채널에서 모두 신호가 발생될 때만 보조급수 펌프가 동작 되도록 한다. 그리고 K-AMSAC에 의한 보조급수계통 펌프 동작은 보호계통에서 신호가 발생되지 않을 때에만 가능하도록 한다. 즉 보호계통이 정상 동작을 하는 경우에는 K-AMSAC의 기능은 필요하지 않다. (그림 1, 2 참조)

2.1.2 터빈 트립 기능

K-AMSAC 계통은 증기발생기의 수위가 설정치 이하로 떨어져서 보조급수 동작이 개시되면 동시에 터빈제어계통에 터빈트립 요구 신호를 출력하게 된다. 터빈 트립 신호는 K-AMSAC의 두 개 채널에서 하나씩 발생되는데, K-AMSAC의 출력 모듈에서 Hardwired AND 로 연결되어 터빈제어계통에는 하나의 신호로 제공되게 된다. 이러한 터빈 트립 기능은 2 Loop와 3 Loop 모두 동일하게 적용된다.

2.2 안전 등급

K-AMSAC은 비안전계통으로 분류된다. 그러나 품질 측면에서 K-AMSAC 계통은 안전등급의 계통에 준한 품질을 가지도록 한다.^[8]

2.3 검증

2.3.1 내진 요건

K-AMSAC 기기는 Seismic Category II로 정의된다. K-AMSAC은 발전소의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE) 동안에 구조적 건전성을 유지하도록 설계되어야 하며 운전기준지진(Operational Basis Earthquake : OBE) 또는 안전정지지진(SSE)가 발생한 동안 또는 그 이후에 계속적인 기능 수행은 요구되지 않는다.

2.3.2 환경 요건

K-AMSAC 기기는 사고 환경에서 동작이 요구되지 않는다. K-AMSAC이 동작해야 할 환경 조건은 정상적인 발전소 운전 조건 또는 Anticipated Operational Occurrence (AOO) 시에 예상되는 환경이다.

2.4 다중성

K-AMSAC 계통은 기기의 단일 고장으로 인하여 오동작이 발생하지 않도록 두 채널로 구성된다.

2.5 다양성

K-AMSAC 계통은 센서 출력에서부터 최종 동작 기기까지 발전소보호계통과 다양한 설비로 구성된다.

2.6 독립성 및 분리성

K-AMSAC 계통은 발전소보호계통과 물리적 분리와 전기적 독립성을 유지하여야 한다. 이러한 분리성과 독립성은 현장 센서의 출력단부터 보조급수계통 기기 제어회로까지 유지되어야 한다. K-AMSAC 기기는 Non Class 1E 전력 계통으로부터 전원을 공급받는다. 이러한 Non 1E 전력 계통은 발전소보호계통에 사용되는 Class 1E 전원과 독립적이어야 한다.

2.7 K-AMSAC 계통 구성

K-AMSAC 캐비닛은 현장 및 운전원 제어 신호를 입력하기 위한 아날로그 및 Discrete 입력 모듈과 입력 신호를 받아서 비교하고 동시 논리를 수행하기 위한 프로세서 모듈 그리고 처리된 결과를 타 계통 및 운전원에게 제공하기 위한 아날로그 및 Discrete 출력 모듈로 구성된다. 그리고 K-AMSAC 캐비닛은 계통 운전을 감시하고 시험하기 위한 운전원 모듈을 포함한다. 운전원 모듈은 터치스크린 형

태의 산업용 PC로 구성된다. 운전원 모듈은 K-AMSAC 계통의 현 상황을 파악하고 설정치를 변경하고 계통 운전을 시험하며 계통의 현재 상태를 확인할 수 있도록 통신 수단을 제공한다.

2.7.1 Processor chassis

K-AMSAC은 계통 기능을 위하여 두 개의 Processor chassis가 설치되어야 한다. 각각의 chassis는 K-AMSAC Channel 1 과 K-AMSAC Channel 2의 기능을 수행하며, 하드웨어적으로 동일한 CPU Processor와 입출력 모듈로 구성되어야 한다.

2.7.2 운전원 모듈

K-AMSAC 캐비닛에는 계통 운전을 위하여 하나의 운전원 모듈이 캐비닛에 장착되어야 한다. 운전원 모듈은 Touch-screen을 가지는 컴퓨터 기반의 Flat panel display로 구성된다. 운전원 모듈은 다음과 같은 기능을 수행한다.

- o 계통 상태 정보 표시
- o K-AMSAC 각 채널에 대한 설정치 정보 표시
- o K-AMSAC 각 채널에 대한 설정치 변경
- o 운전원에 의한 Bypass 및 시험을 위한 기능

2.8 K-AMSAC 운전

2.8.1 발전소 정상 조건에서의 운전

K-AMSAC은 정해진 발전소 변수를 계속적으로 감시한다. 그리고 이들 변수를 이미 설정되어있는 설정치와 비교한다. 만약 변수 하나가 설정치보다 높아지는 (또는 낮아지는) 경우 한 채널에 트립이 발생하게 된다. 그리고 같은 변수에 대해서 다른 하나의 채널에서도 트립이 발생하게 되면, 발전소 상태가 이상 상태에 있는 것으로 판단하고 정해진 기능을 수행하도록 자동으로 보조급수와 터빈 트립 동작 신호를 출력한다.

2.8.2 발전소 비정상 조건에서의 운전

K-AMSAC은 Anticipated Operational Occurrence 상태에서 자동으로 그 기능을 수행하도록 설계된다.

2.8.3 발전소 사고 조건에서의 운전

K-AMSAC은 발전소 사고 조건에서 운전이 요구되지 않는다.

2.9 시험

K-AMSAC 계통은 발전소 출력 운전중 또는 정지시에 주기적으로 시험이 가능하도록 설계되어야 한다.

2.9.1 센서 시험

K-AMSAC에 사용되는 현장 신호 센서는 앞에서 언급한바와 같이 보호계통과 공유하므로, K-AMSAC에서 사용되는 현장 센서는 그 신호를 받는 보호계통의 요건에 따라 시험되어야 한다.

2.9.2 프로세서 시험

K-AMSAC의 논리를 수행하는 프로세서는 자체적으로 가지고 있는 자기진단 (Self Diagnostic) 기능을 사용하여 CPU 및 Memory의 건전성을 시험한다. 그리고 자기진단기능을 사용하여 입출력 카드의 상태를 확인할 수 있어야 한다.

2.9.3 수동 시험

K-AMSAC에 대한 수동 시험은 운전원 모듈을 통하여 이루어진다. 수동 시험은 입력 모듈과 입력 모듈을 통하여 들어온 현장 신호를 설정치와 비교하여 트립 신호를 발생하는 비교 회로, 그리고 각 채널의 비교회로부터 비교 결과를 입력받아 그 결과를 최종 동작 신호를 출력하는 동시논리 회로에 대한 시험을 수행할 수 있어야 한다. 그리고 시험을 수행하는 동안 관련 출력 신호는 Bypass되어 불필요한 동작이 수행되지 않도록 설계되어야 한다. 수동 시험 결과는 운전원 모듈에 표시되어야 한다.

2.9.4 자동 시험

K-AMSAC에 대한 자동 시험은 운전원 모듈을 통하여 이루어진다. 자동 시험은 K-AMSAC 각 채널별로 각각의 입력 신호에 대한 동작이 이루어지도록 해야 한다. 그리고 자동 시험이 수행되는 동안에는 K-AMSAC의 동작 신호는 자동으로 Bypass되어야 하며, 타 계통으로의 신호 역시 Bypass되어야 한다. 자동 시험 결과는 운전원 모듈에 표시되어야 한다. 그리고 K-AMSAC 계통이 계속적으로 자동 시험 상태에 있지 않도록 설계되어야 한다.

2.10 Bypass

K-AMSAC은 계통 수준의 Bypass 기능과 Component Group 동작을 Bypass 하기 위한 기능이

제공되어야 한다.

III. 결론

본 논문은 국내 웨스팅하우스형의 원전에 적용할 한국형 ATWS(Anticipated Transient Without Scram) 완화 설비 K-AMSAC (Korean ATWS Mitigation System Actuation Circuitry)의 기본 설계 기준 및 설계 요건을 개발하기 위하여 고리 1/2발전소 및 영광 1발전소를 방문하여 현장 조사를 수행한 결과를 근거로 작성하였다.

본 논문에서는 먼저 K-AMSAC 계통 설계의 근거가 되는 10CFR50.62의 요건을 설명하고, 10 CFR50.62의 요건을 만족하는 ATWS 완화설비를 개발하기 위하여, 우선 계통의 기본 설계 기준을 제시하였다. 설계 기준가운데 특히 중요한 사항은 보호계통에 대한 다양성과 독립성 그리고 ATWS 완화 설비가 비안전등급으로 분류됨에 따른 여러 고려 사항들이다. 본 보고서에서는 이러한 설계 기준을 근거로 K-AMSAC 계통이 만족해야할 설계 요건을 정의하였다. 그리고 2 Loop와 3 Loop 발전소에 대해서 각각 계통의 기능을 설명하였다. 그리고 이러한 계통 기능 요건에 따라 개략적인 계통 기능도를 제시하였다.

본 논문에서 제시한 K-AMSAC 계통에 대한 기본 설계 기준 및 설계 향후 수행될 상세 설계 및 발전소에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 참고문헌

- [1] NUREG-0800, US-NRC Standard Review Plan Section 7.8 Diverse Instrumentation and Control Systems.
- [2] 10 CFR 50.62, 1993, Requirements for reduction of risk from anticipated transients without scram (ATWS) events for light-water-cooled nuclear power plants.
- [3] GL B5-06, Quality Assurance Guidance for ATWS Equipment That is not Safety -Related.
- [4] KOPEC, System Design Requirement for Alternate Protection System for KNGR, 1998.

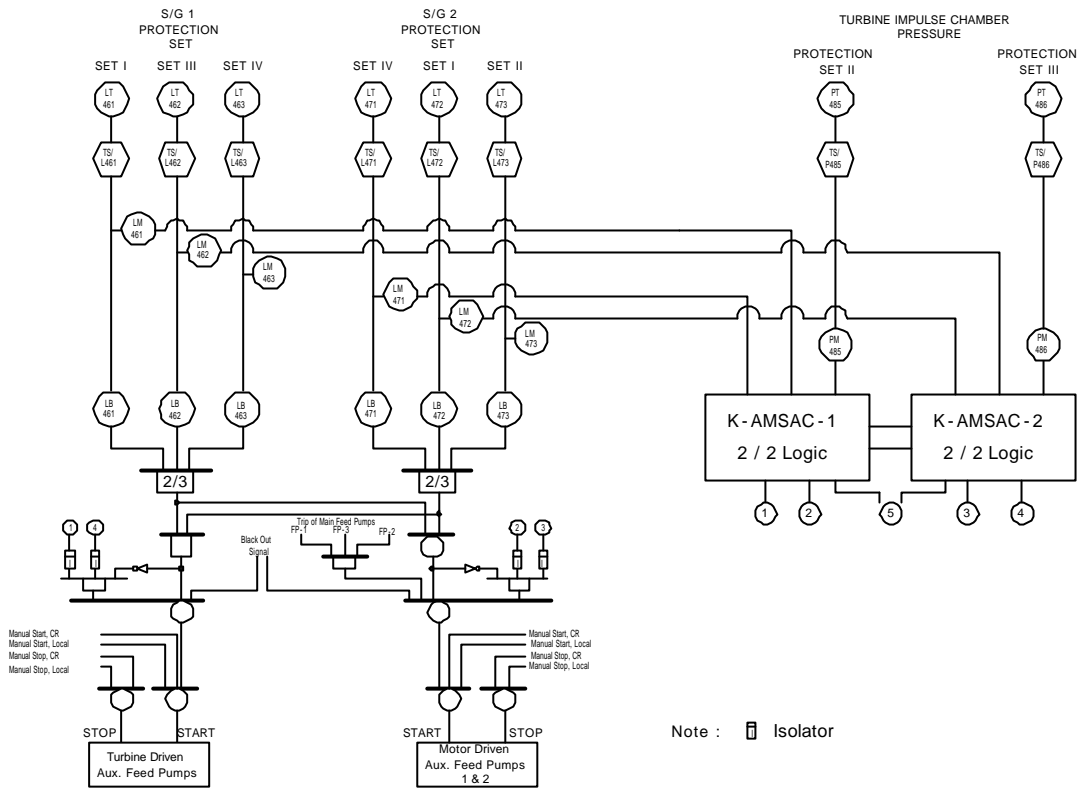


그림 1. 국내 2 Loop형 원전의 ATWS 완화설비 기본 기능블록선도

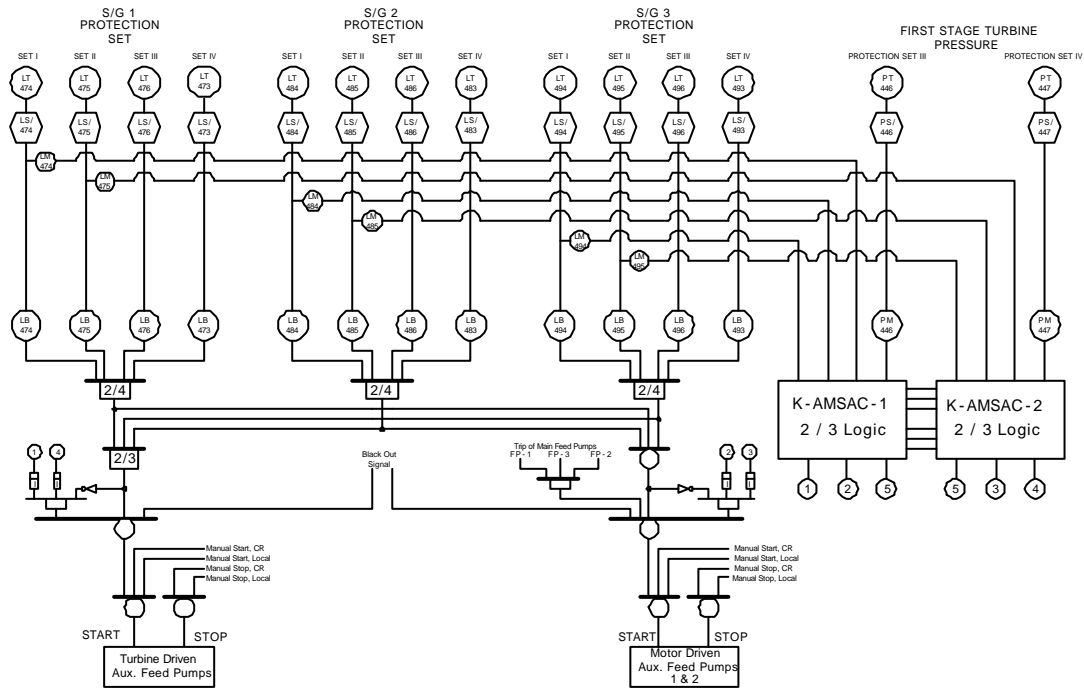


그림 2. 국내 3 Loop형 원전의 ATWS 완화설비 기본 기능블록선도

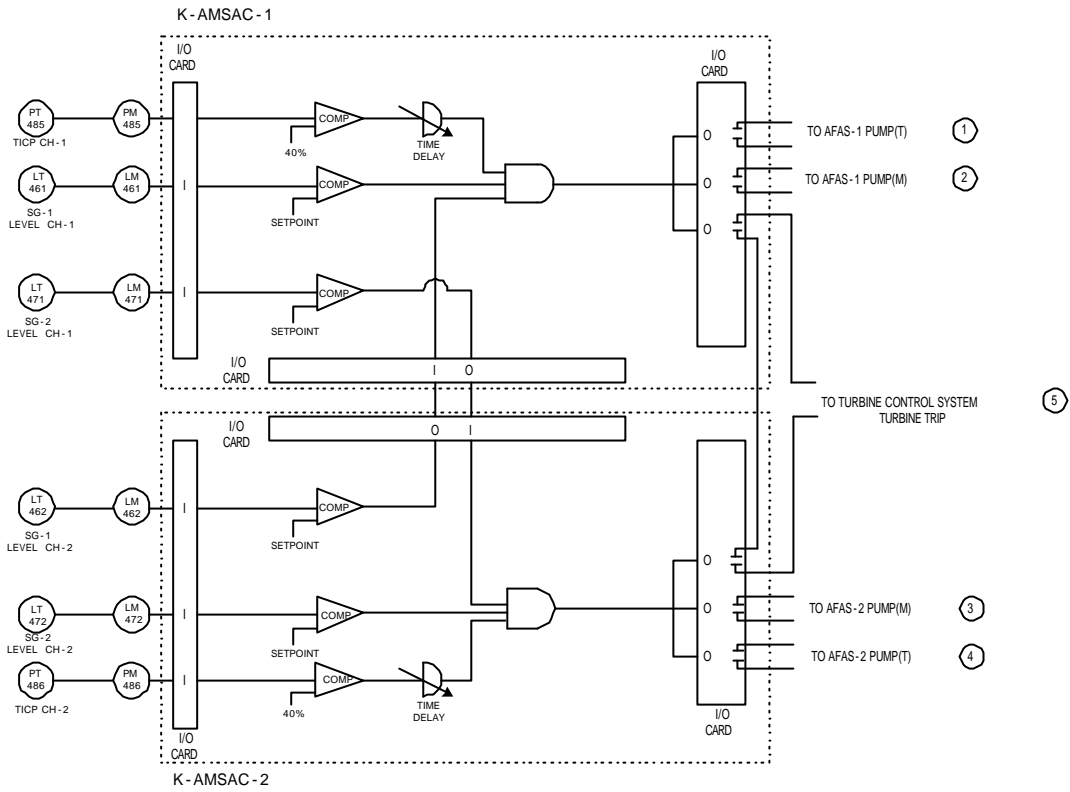


그림 3. 국내 2 Loop형 원전의 ATWS 완화설비 내부 기능도

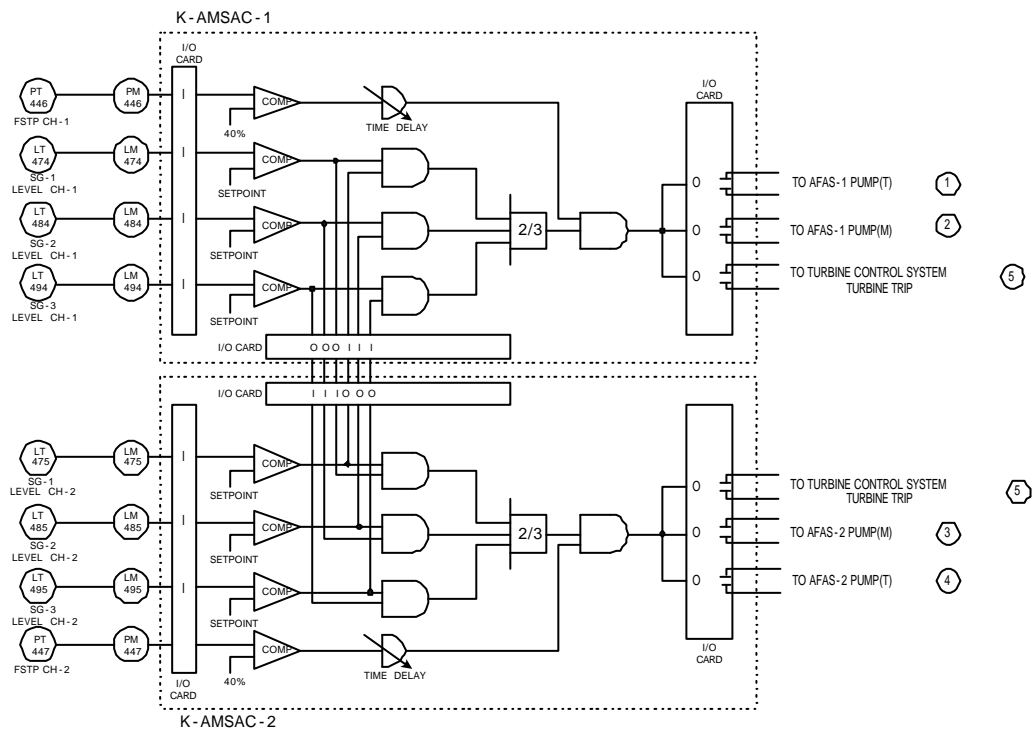


그림 4. 국내 3 Loop형 원전의 ATWS 완화설비 기본 기능블록선도