

디지털 플랜트보호계통의 가변설정치 연산 알고리즘 개발
A Development of Algorithm for Variable Setpoint
in Digital Plant Protection System

성승환^{*)}, 김동훈, 허섭, 한재복

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150번지

*) shseong@kaeri.re.kr

요 약

디지털 보호계통에서 플랜트 상태에 따라 설정치가 변경되는 가변설정치에 대한 연산 알고리즘을 개발하였다. 아날로그 계통은 연속적인 성질을 가지고 있어 설정치가 관련 안전 변수 측정값을 추종하기가 용이하므로 회로 구성에 의해 가변설정치 변경이 쉽게 이루어진다. 그러나 디지털 계통은 불연속적인 샘플링 및 실행 주기에 의해 기능이 수행되므로 플랜트 상태에 따른 가변설정치 변경 알고리즘이 요구된다. 설정치가 허용되는 범위의 측정값을 추종할 수 있고 또 플랜트 이상상태 시에 트립 상태를 판단할 수 있는 가변설정치 연산 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서는, 플랜트 상태와 운전원 수동 입력에 의하여 설정치가 단계적으로 변화하는 수동리셋 설정치 연산 알고리즘을 개발하였고 플랜트의 상태 변화가 허용되는 수준을 만족한다면 그 상태 변화를 추종하고 수준을 벗어나면 설정치가 미리 정해진 비율을 따르도록 하는 변화율제한 가변설정치 연산 알고리즘을 개발하였다.

Abstract

The calculation algorithm for variable setpoint in order to follows various plant conditions in digital plant protection system. Since the analog system has the continuous properties, the variable setpoint can be easily changed on the analog circuits as following the measures to represent the plant conditions. The digital system must, however, require the algorithm for change of variable setpoint according to the plant conditions, because the digital systems have the characteristics of discontinuous sampling and execution period and . We have developed the variable setpoint calculation algorithms which can follow the allowable measures and decide the trip status in the case of abnormal plant conditions. In this paper, we have developed the algorithms for manual reset variable setpoint to be changed step by step from the plant conditions and operator's request and the algorithm for rate-limited variable setpoint to be changed according to the various plant conditions. In the rate-limited variable setpoint, if the measures from plant conditions are changed under the allowable range, then the rate-limited variable setpoint follows the measures. If not, then the rate-limited setpoint should vary as the predefined rate.

I.

보호계통에서 안전 변수의 트립 여부를 판단하기 위한 설정치 종류 중에서 가변설정치(variable setpoint) 연산 알고리즘을 개발하였다. 설정치는 운전 기간 내내 고정된 설정치가 있고, 또한 운전 기간 중에 플랜트 상태에 따라 변화되는 가변설정치가 있다. 기존의 아날로그 보호계통에서는 전기 전자 회로를 이용하여 트립을 판단하기 위한 바이스테이블(bistable) 회로를 구성하지만, 디지털 보호계통은 소프트웨어 논리로 바이스테이블 논리를 구성하게 된다.^{[1][2]} 따라서 가변설정치의 경우 플랜트 상태에 따라 설정치를 변경하는 알고리즘이 요구된다. 기존의 아날로그 계통이 연속적인 물리적 성질을 가지고 있어 가변설정치가 플랜트 상태에 따른 관련 안전 변수 측정값을 추종하기가 용이한 반면, 디지털 계통은 불연속적인 샘플링 및

실행 주기에 의해 기능을 수행하므로 가변설정치가 측정값을 추종할 수 있고 또 트립이 요구되는 상황을 정확히 판단할 수 있는 디지털 논리가 개발되어야 한다. 이에 따라 본 논문에서는 바이스테이블 기능 중에서 가장 복잡하고 중요한 가변설정치의 변경 알고리즘을 개발하였다.

가변설정치 종류는 첫 번째로 플랜트가 정상적인 정지 운전을 수행하는 경우에 플랜트가 안전한 상태를 유지하는 조건으로 측정값이 감소하는 경우에 그 측정값을 추종하기 위하여 플랜트 상태에 적절하게 요구되는 운전원 수동 입력에 의하여 설정치가 단계적으로 변화를 하는 수동리셋(manual reset) 가변설정치가 있다. 두 번째로 플랜트가 정상적인 기동 및 정지 운전을 수행할 때 측정값이 계속 변화하게 되는데 측정값의 변화가 적절한 범위 이내를 유지한다면 플랜트의 안전 조건을 위배하지 않으므로 이러한 경우에 플랜트 트립 없이 변화를 계속 추종할 수 있는 변화율제한(rate-limited) 가변설정치가 있다. 변화율제한 가변설정치는 증가형과 감소형 두 종류가 있으며 증가형 변화율제한 가변설정치는 측정값의 변화를 추종하여 설정치가 측정값보다 높은 값을 유지하면서 계속 증가 및 감소하다가 측정값이 정해진 비율 이상으로 급격하게 증가하는 경우에 설정치는 변화율제한 값만큼만 변화하여 결국에는 트립 조건이 걸리게 되는 형태이다. 또한 감소형 변화율제한 가변설정치는 설정치가 측정값보다 낮은 상태에서 측정값을 추종하다가 측정값이 급격하게 감소하는 경우에 결국에는 트립이 발생하게 되는 종류이다.^[3]

디지털 보호계통에서 이러한 가변설정치 변경 알고리즘을 개발하기 위하여 보호계통의 기능 요건에서 디지털 논리 및 알고리즘을 위한 기준을 설정하고 그 기준에 적합하도록 가변설정치의 변경을 알고리즘을 개발하였다. 논문의 나머지 부분은 제 2 장에서 알고리즘 개발을 위한 기준을 제시하고 제 3 장에서는 아날로그 논리와 유사한 수동리셋 가변설정치에 대한 알고리즘을 기술하였으며 제 4장에서는 변화율제한 가변설정치 알고리즘을 증가형을 기준으로 설명하였다. 마지막으로 제 5 장에서 연구 결과 및 추후 연구 과제에 대해 논의하였다.

보호계통의 설계 및 기능요건 그리고 설계 기준 중에서 디지털 보호계통의 소

소프트웨어에 관련된 내용을 추출한 후에 다시 가변설정치 변경 알고리즘에 관련된 요건 및 기준을 정리하였다. 알고리즘 개발에 관련한 상세한 기준을 다음과 같으며 이를 만족하기 위한 바이스테인블 기능의 전체 순서도는 그림 1과 같다.^[1-4]

1. 가변설정치는 미리 계산되어 측정값을 입력되는 경우에 설정치에 대한 연산 없이 곧 바로 바이스테인블 논리를 수행할 수 있어야 한다.
2. 바이스테인블 논리는 무조건 순차적인 연산을 반복 수행하도록 해야 한다. 1번과 연계하여 바이스테인블 논리에서 운전우회(operating bypass) 판단 후에 바로 트립을 판단한 후에 가변설정치 변경 알고리즘을 수행하여야 한다. 이러한 알고리즘은 오류에 대해 좀 더 강인한 구조를 가진다고 판단된다.
3. 측정값에 대한 연산과 설정치에 대한 연산을 최대한 분리시키고 상호 독립적으로 수행하도록 한다.
4. 디지털 시스템의 샘플링 및 실행 주기에 따른 불연속성을 고려하여 그 영향을 최소화하도록 한다. 현재 25msec로 샘플링 및 실행 주기를 가정하고 있으므로 모든 연산에 따른 불연속성은 25msec 이내에서 평균값을 사용하고 가능한 그 특성이 다음 시간 영역으로 전파되지 않도록 한다. 불가피하게 다음 단계로 전파되어야 하는 특성은 그 영향이 보호계통의 설계 요건인 플랜트가 보수적으로 안전한 특성을 지니도록 한다. 기존의 아날로그 회로로 수행되던 관련 기능과 비교할 때 많은 시간 지연이 발생하지 않고 최종적으로 100msec (총 4회 실행 주기) 지연 과정을 거쳐 불필요한 트립을 방지할 수 있도록 한다.
5. 필요한 연산과정을 최소화하고 +, - 와 같은 단순한 산술연산만으로 가능한 모든 알고리즘을 구성하도록 한다. \times , \div 연산 과정은 가급적 도입하지 않으며 특히 \div 연산은 프로세서의 연산과정이 복잡할 뿐만 아니라 반올림 오차 등도 발생하므로 사용하지 않도록 한다.
6. 내부 연산을 위한 메모리 사용량과 통신망의 부하를 최소화하기 위하여 불가피하게 사용되어야 하는 경우를 제외하고는 가능한 정수 개념의 16진수(hexadecimal) 연산을 수행한다. 이 경우 측정값 역시 A/D 변환 후에 16진수 형태로 표현되므로 연산 과정의 일관성을 보일 수 있다. 그리고 운전원에게 표시가 되어야 될 사항은 단위 변환을 통해 공학적 단위로 표현한다.

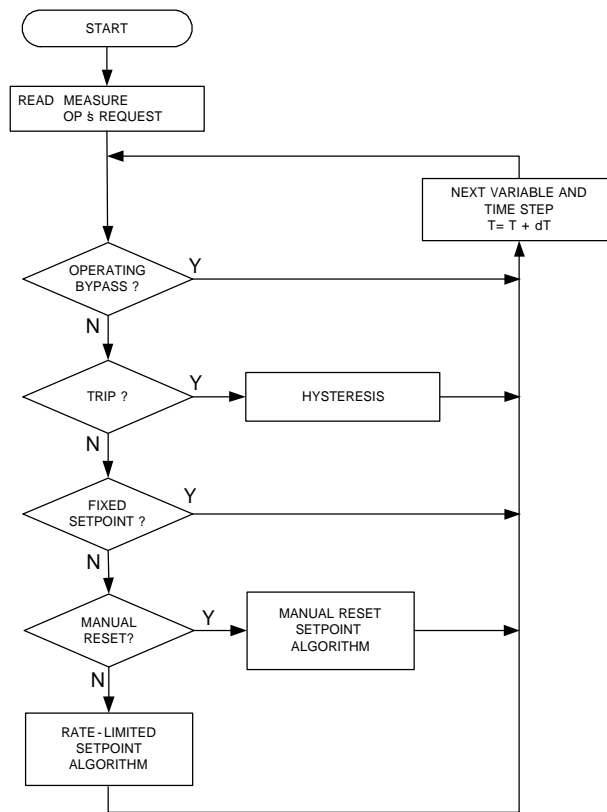


그림 1 바이스테이블 기능 순서도

가

수동리셋(manual reset) 변경 알고리즘이 적용되는 가변설정치 종류는 Low Steam Generator #1 Pressure와 Low Steam Generator #2 Pressure 그리고 Low Pressurizer Pressure가 있다. 세 변수 모두 설정치와 관련 상수가 다를 뿐이고 동작원리나 수동리셋에 의한 가변설정치 변경 알고리즘이 동일하므로 Low Steam Generator Pressure(L SG P) 알고리즘만을 기술한다. 수동리셋 가변설정치는 수동으로 설정치를 변화시키는 가변설정치로써 운전원 모듈이나 유지보수 패널에서 수동리셋 요구가 입력될 때 수동리셋 허용 조건을 만족하면 해당 설정치는 정해진 값만큼 설정치를 감소시킨다. 수동리셋 허용 조건으로는 현재 예비 트립 상태이어야 하고 또한 시간 제약이 있다. 시간 제약은 가지고 있어 정해진 시간 안에 여러 번 감소가 일어나지 않도록 즉, 급격한 플랜트 변화는 트립을 발생시키도록 설계되어 있다. 수동리셋에 의해 설정치가 조정된 후에는 다시 리셋 신호가 허용 및 입력

되기 전까지는 설정치를 고정시킨다. 그리고 관련 안전 변수 값이 다시 증가하는 경우에는 자동적으로 증가 분을 추종하도록 되어 있다. 그리고 Low Pressurizer Pressure는 특정 압력이하에서는 운전우회(operating bypass) 알고리즘이 수행되어야 하나 수동리셋 알고리즘과는 독립적으로 수행되어 상호 기능상의 연결이 없으므로 본 논문에서는 기술하지 않는다.

그림 2에 아날로그 보호계통의 회로에서 수행되었던 수동리셋 가변설정치의 동작원리가 나타나 있으며 디지털 시스템의 경우도 같은 동작원리를 가지게 된다. 다만 수동리셋의 경우 실제로는 디지털 시스템의 특성상 최대 25msec 미만의 지연이 불가피하게 발생하게 된다. 예비트립 판단 후에 운전원 모듈에 그 내용이 표시되어야 하고 또한 표시된 예비트립 신호에 따라 운전원에 의한 수동리셋 요구 신호를 받아들여야 하므로 그 사이에 디지털 시스템의 특성인 실행 주기와 모듈간의 통신 문제 때문에 25msec 이후에 예비 트립 알람과 운전원 요구 처리가 된다. 그러나 이 경우에도 설정치가 늦게 낮아지므로 플랜트의 안전성 확보 관점에서 보수적인 안전한 방향으로 설정치가 변경되고 있으며 운전원 반응시간을 (디스플레이 요건인 1-2 초 이상으로 반응한다) 고려할 경우에 운전상이나 보호계통의 기능 수행에 문제가 되지 않는다고 판단된다. 또한 트립이 이미 발생한 경우에는 비록 가변설정치일지라도 트립 시점에서 고정된 값을 가지고 이력(hysteresis) 연산을 수행하며 그림 1에서 보는 바와 같이 설정치 변경 알고리즘이 적용되지 않는다.

그리고 측정값이 증가하는 경우는 설정치가 측정값 아래에 있으므로 변화량을 그대로 추종할 수 있다. 그리고 이 경우에도 아날로그 회로처럼 연속적으로 설정치가 측정값을 추종하는 것이 아니라 디지털 논리 처리상 25msec 마다 시간대가 불연속적으로 진행하므로 실제 논리상으로는 25msec 씩 설정치가 고정되어 있다가 계속 증가하는 동작원리를 가지고 있다. 즉, 하나의 샘플링 및 실행 주기가 실행되고 난 후에 다음 단계의 실행이 이루어지는 25msec 동안의 시간에서는 평균값이 사용되는 개념으로 기존의 아날로그 회로 역시 내부 부품이 동작하는 시간과 케이블을 통하여 신호가 전송되는 시간이 요구되므로 비슷한 수준의 실행 주기를 가지고 있다고 판단된다. 따라서 위와 같은 특성을 가지는 수동리셋 설정치 연산 알고리즘은 다음 그림 3과 같다.

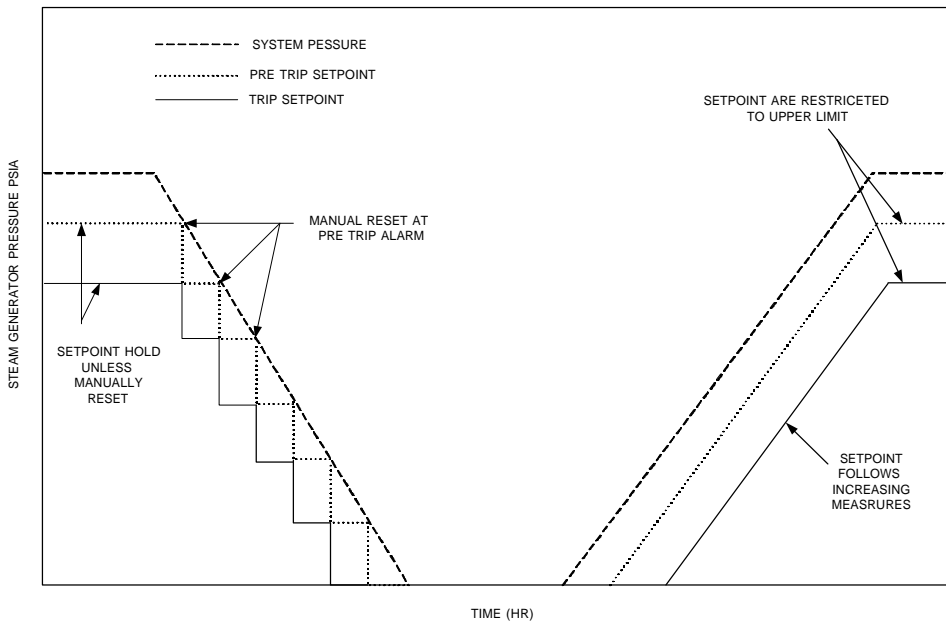


그림 2 수동리셋 설정치 (L SG P) 동작원리

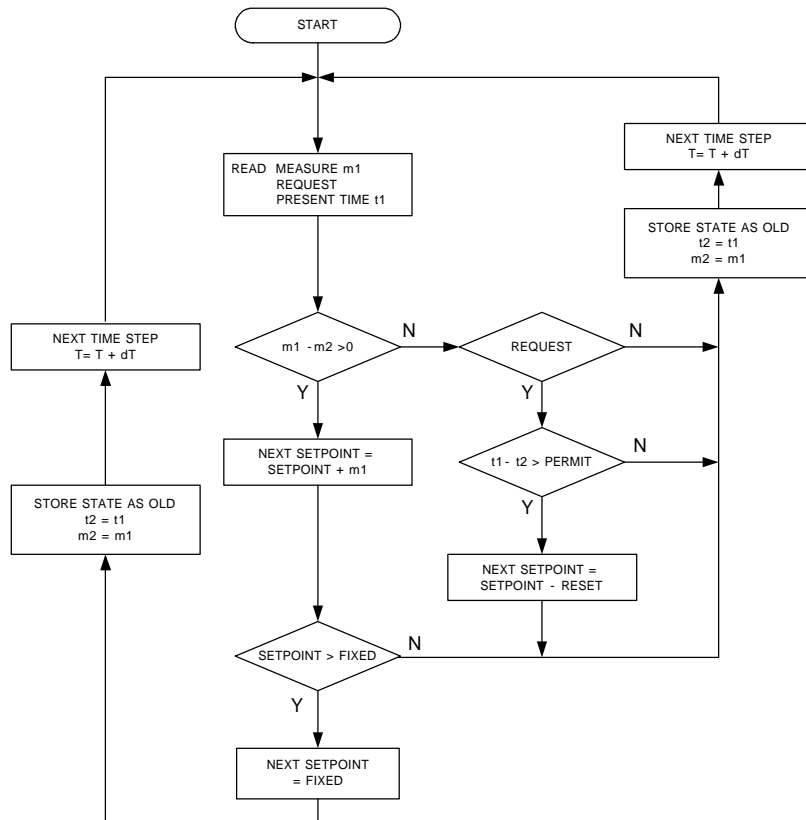


그림 3 수동리셋 설정치(L SG P) 연산 알고리즘

가

변화율제한 가변설정치는 증가형 변화율제한 가변설정치와 감소형 변화율 제한 가변설정치로 나누어진다. 증가형 변화율제한 가변설정치는 안전 변수 측정값의 증가 분이 일정 값 이하인 경우에 그 값을 추종하여 설정치가 증가하지만 측정값의 변화율이 일정 값을 넘어서는 경우에는 정해진 변화율만큼만 설정치가 변화하여 원자로의 상태에 규정되지 않은 변화를 감지하여 트립이 발생하도록 설계되어 있다. 반대로 감소형 변화율 제한 가변설정치는 안전 변수의 감소 분이 일정 값 이하인 경우에 그 값을 추종하여 설정치가 감소하지만 측정값의 변화율이 일정 값을 넘어서는 경우에 정해진 변화율만큼만 설정치가 변화하여 원자로의 상태에 규정되지 않은 변화를 감지하여 트립이 발생하도록 설계되어 있다. 가변설정치 종류는 다른 변수는 VOP(Variable Over Power) 그리고 Low Steam Generator #1 $\Delta P/F$ 와 Low Steam Generator #2 $\Delta P/F$ 가 있고, VOP 변수는 증가형 변화율제한 가변설정치의 한 종류이며, Low Steam Generator #1 $\Delta P/F$ 와 Low Steam Generator #2 $\Delta P/F$ 는 감소형 변화율 제한 가변설정치의 종류이다.

그림 4에 아날로그 보호계통의 변화율제한 가변설정치의 대표적인 종류인 VOP 설정치의 동작원리가 나타나 있으며 감소형 가변설정치는 증가형과는 설정치 변화율과 나머지 상수들의 부호가 반대이고 동작원리나 설정치 연산 알고리즘이 동일하므로 증가형 변화율제한 가변설정치 연산 알고리즘만을 기술한다. 특히 VOP 설정치는 변화율제한 가변설정치 특성과 일정 값 이상으로 설정치가 증가하는 경우에는 더 이상 증가하지 않고 설정치가 고정되는 고정 설정치 그리고 단계 변화에 대한 트립을 결정하는 설정치 등 세 가지 종류의 설정치 특성을 모두 가지고 있다. 여기서 단계 변화에 대한 설정치는 측정값의 단계 변화에 대해 트립을 발생시키므로 설정치 자체는 플랜트 상태에 따라 변경이 필요 없는 고정형이므로 가변설정치 변경 알고리즘에 포함되지 않는다.

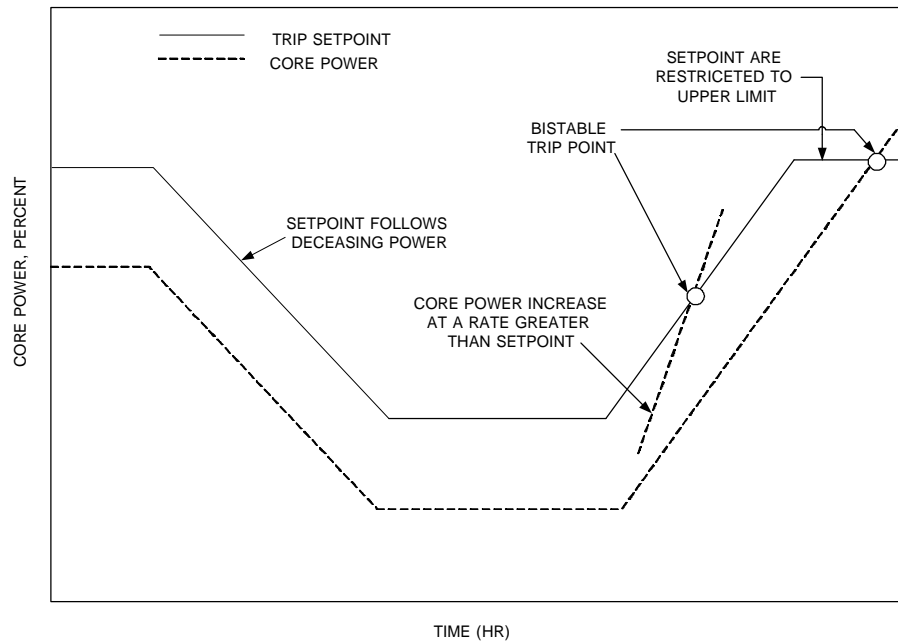


그림 4 변화율제한 가변설정치 (VOP) 아날로그 동작원리

설계 기준을 만족하면서 이러한 가변설정치 연산 기능을 디지털 알고리즘으로 구현하기 위하여 마진(margin) 개념을 개발하였다. 마진은 가변설정치에서 현재 측정값과 설정치 사이의 정해진 일정한 간격을 의미하며 변화율제한 가변설정치가 측정값을 추종하는 경우에 그 사이의 간격이 항상 유지하도록 그 사이에 정해진 간격의 크기를 마진을 정의한다. 이러한 값은 초기 기동이나 설정치가 측정값을 추종하는 기존의 아날로그 회로에서 계산 가능하다. 개발된 마진 개념을 이용하면 변화율제한 가변설정치가 단순한 연산에 의해 설정치 변경이 가능해진다. 즉, 미리 정의된 변수별 최대 마진 값을 고려하여 다음 설정치를 위한 참조설정치를 계산한다. 현재 설정치와 측정값의 차이가 마진 값을 비교하여 그 차이가 마진보다 적으면 현재 설정치가 참조설정치가 되고 크면 측정값 더하기 마진이 참조설정치가 된다. 그리고 참조설정치에 근거하여 다음 단계의 설정치를 계산한다. 이는 디지털 시스템이 가지는 불연속(discrete) 성질에 기인한 것으로 설정치는 현재 측정값이 입력되는 순간에 미리 계산되어 있어야 하고 또한 가변설정치는 설정치의 변화량이 미리 정해져서 그 이내에서만 설정치가 측정값을 추종하여야 하기 때문이다. 논리 전개에 편의를 위해 임의로 가정한 설정치 인자를 이용한 계산 예는 다음과 같다. 마진을 8%, 가변 제한 값 5% 이라고 가정한다. VOP 변수에서 초기 시작 시에는 설정치가

미리 정해진 마진을 가지고 설정치가 정해져 있고 그 다음 단계의 설정치는 측정값과 무관하게 최대로 변화할 수 있는 양만큼 증가가 가능하기 때문에 현재 측정값 0%에서 마진이 8%이고 가변 제한 값이 5%라면 다음 단계 설정치는 13%가 된다. 그리고 시간이 진행되어 다음 단계 측정값이 3%라고 입력되면 측정값과 설정치 차이가 마진(8%) 보다 크므로 참조설정치는 11% (3%+8%)이 되고 그 다음 설정치는 16%(11%+5%)이다. 만일 다음 측정값이 13%가 입력되면 설정치와 차이가 마진보다 적으므로 현재의 설정치 13%가 참조설정치가 되고 그 다음 단계의 설정치는 18%가 된다. 이로써 가변설정치의 변화 제한 값을 지키면서 설정치가 측정값을 추종하게 된다. 그 다음 단계 측정값이 19%가 되면 트립에 걸리게 되고 트립이 발생하면 가변설정치도 더 이상 변경되지 않고 이력(hysteresis) 연산에 의해 설정치가 고정되게 된다. 또한 VOP 변수는 최대 설정치가 정해져 있으므로 그 이상은 측정값을 추종하지 않고 고정된 설정치를 가진다. 그림 5에 변화율제한 가변설정치인 VOP 설정치의 디지털 알고리즘에 의한 동작원리가 나타나 있고 그림 6에 변화율제한 가변설정치의 설정치 연산 알고리즘이 나타나 있다. 동작원리에서 나타나듯이 측정값이 감소하는 경우에는 설정치는 무조건 측정값을 추종하게 되어 있고 측정값이 증가하는 경우에는 증가 분의 크기에 따라 변화율제한 값만큼 설정치가 바뀌거나 아니면 측정값을 추종하게 되어 있다.

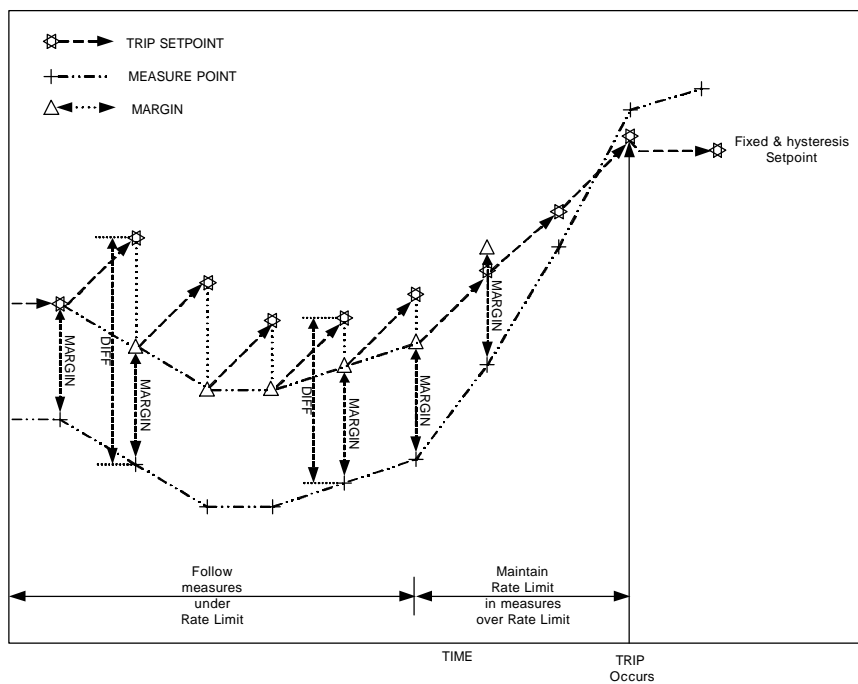


그림 5 변화율제한 가변설정치 (VOP) 디지털 동작원리

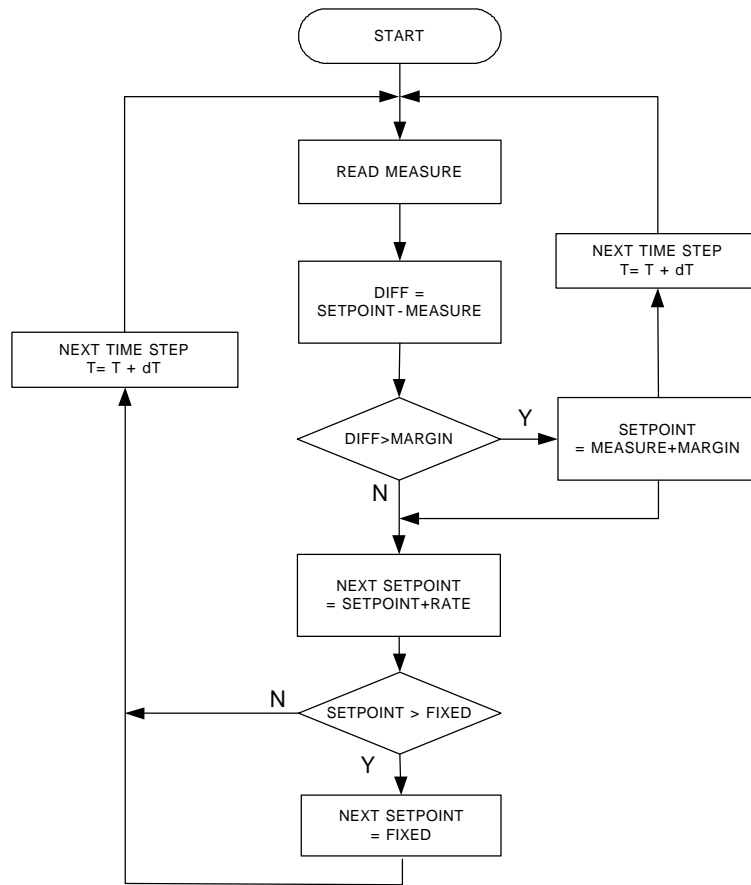


그림 6 변화율제한 가변설정치 (VOP) 연산 알고리즘

본 논문에서는 디지털 보호계통의 가변설정치 연산 알고리즘을 개발하였다. 디지털 보호계통은 소프트웨어 논리로 바이스테이블 논리를 구성하게 되므로 가변설정치의 경우 플랜트 상태에 따라 설정치를 변경하는 연산 알고리즘이 요구된다. 아날로그 계통이 연속적인 물리적 성질을 가지고 있어 설정치가 관련 측정값을 추종하기가 용이한 반면에 디지털 계통은 불연속적인 샘플링 및 실행 주기에 의해 기능을 수행해야 하므로 설정치가 측정값을 추종할 수 있고 또 트립이 요구되는 상황을 정확히 판단할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 실행 주기를 가지는 디지털 계통의 특성을 고려하여 강인한 구조를 가질 수 있도록 가능한 한 단

순한 산술 연산 논리와 최소한의 지연 시간이 발생하도록 개발되었고 개발된 알고리즘은 아날로그 계통과 유사한 지연 시간 및 특성을 가지도록 하였다. 추후 연구 과제는 개발된 알고리즘의 확인 및 검증을 수행하고 원형 개발을 실제 성능을 확인하는 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었다.

[]

1. 성승환 외, "디지털 플랜트 보호계통 구조 개발," 2000년 춘계학술대회 한국원자력학회, 5월 26-27, 고리, 한국.
2. 성승환 외, "Development of Digital Plant Protection System," Proceeding of the 2000 American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies, Washington D.C, Nov. 13-16, 2000.
3. 성승환 외, 디지털 보호계통의 구조 및 프로그램 논리 개발, KAERI/TR-2465/03, 2003.
4. N. Storey, Safety-Critical Computer System, Addison-Wesley, 1996.
5. 영광원자력발전소 3,4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사.