2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

제어모드 순위 선정의 자동화
Automatic Selection of Control-Mode Priority

나만균, 심영록, 정동원, 신선호

조선대학교

광주 동구 서석동 375

이윤준

제주대학교

제주도 제주시 아라1동 1

Jose March-Leuba and Richard T. Wood

Oak Ridge National Laboratory

P.O. Box 2008, Oak Ridge, TN 37831-6004

요 약

제어계통의 고신뢰도는 제어 알고리듬의 강인성 및 성능의 향상으로 표현될 수 있으며, 고등 제어 알고리듬의 개발과 진단을 통한 발전소 조건의 변화에 따른 적절한 제어모드를 선정하므로써 달성될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 여러 제어 알고리듬의 라이브러리로부터 요구된 필수요건을 반드시 만족시키면서 목적 비용함수를 최소화하는 제어모드 순위 선정 자동화 기술을 개발하였다. 개발된 방법은 발전소 상태의 변화 (운전조건의 변화, 기기고장 및 이상상태 등이 진단기술에 의하여 탐지), 필수 요건 혹은 최적화 요건의 변화에 의하여 적절한 제어모드 순위를 결정하여 운전원에게 제시하므로써 적절한 조치를 취하게 하거나 필요한 정보를 제공하여 준다.

Abstract

High reliability of control systems can be expressed as enhancement of their robustness and performance and can be accomplished by designing advanced control algorithms and selecting appropriate control modes according to changes of plant conditions through diagnostics. In this work, by combining control and diagnostic algorithms, we have developed the automatic design technology of control systems which can determine control mode priority among a variety of control algorithm libraries according to operating conditions and key requirements of plants. The developed method enables operators to take appropriate actions or provide necessary information to operators by determining the control mode priority according to changes of key and optimizing requirements and/or changes in the states of nuclear power plants.

1. 서 론

미국과 공동으로 연구중인 NERI 프로젝트인 "미래형 원전 고신뢰도 제어구조 자동개발에 관한 기초연구"는 미래형 원자로 계측제어 구조에 적용될 수 있는 개념을 정립하기 위함이며, 발전소 전 운전기간 동안 직접적으로 추적 가능한 설계요건을 명시적으로 하여 제어계통 자동 생성을 위한 방법론 개발이다. 즉, 설계과정동안 "제어엔진" 내부에 설계요건을 부과하고, 이 제어엔진은 제어계통의 초기 구현을 자동화할 뿐만 아니라 발전소 전 기간 동안 조건이 변한다 할지라도(과도상태, 단일고장) 원래의 설계요건을 달성하도록 하는 것이다[1]. 제어계통의 고신뢰도는 제어 알고리듬의 강인성 및 성능의 향상으로 표현될 수 있으며, 고등제어 알고리듬의 개발과 진단을 통한 발전소 조건의 변화에 따른 적절한 제어모드를 선정하므로써 달성될 수 있을 것이다. NERI 프로젝트의 세부과제인 "고신뢰도 제어계통 자동설계 기술개발"과 관련된 고등제어 알고리듬의 개발을 위하여 증기발생기와 원자로를 대상으로 이들에 대한 모델링 및 고등제어 알고리듬을 이용한 다양한 제어 시스템을 설계하였다[1]. 플랜트의 운전 조건이 변한다거나 동특성이 바뀌는 상황에서도 영향을 덜 받는 강인한 제어 알고리듬 그리고 최고 성능을 달성하기 위한 여러 고등제어 방법들이 제시되었다. 본 연구에서는 제어계통 설계를 자동화하는 방법을 제시하려고 한다.

제어계통 설계요건에 직접적으로 추적 가능한 제어계통의 자동 생성 방법을 개발하기 위하여 우리의 최종 목표는 설계자로 하여금 단지 제어계통이 견디어 내야 하는 상위요건 및 여러 스트레스 인자를 명시만 하게 하며, "제어엔진"이 자동으로 플랜트의 현 상태에서 최적화된 제어 알고리듬 및 파라메타를 자동으로 선정하여 검증하는 것이다. 제어엔진은 자동으로 검증된 알고리듬으로부터 제어 소프트웨어를 자동으로 생성한다. 여기서 스트레스 인자는 과도 사건(설정치 변경, 부하 감발과 같은 일련의 사건)과 가정된 기기고장이 한 예가 될 수 있다. 이런 스트레스 인자는 설계자에 의해 명시되고, 규정된 과도사건과 기기고장의 데이터베이스가 된다. 제어계통 후보군이 시험되고 이런 각각의 스트레스에 대하여 파라메타가 최적화된다. 상위 요건의 예는 반응시간이 몇 초보다 작다든지 오버슈트가 몇 퍼센트보다 작다 등이 예가 될 수 있다. 수학적인 용어로는 이런 유형의 요건이 제한조건으로 정의되고, 제한조건에 부속된 목적함수를 최소화하는 표준화된 수학적 방법이 존재한다. 원리상으로 제시된 모든 제한 조건을 만족시키는 어떠한 제어설계도 허용될 수 있기 때문에 설계자는 제어설계의 좋고 나쁨을 묘사하는 목적함수를 선정해야 한다. 목적함수의 예는 제어노력의 양, 혹은 에너지 평형을 최소화한다든지가 한 예가 될 수 있다.

제어계통 설계과정이 그림 1에 체계적으로 묘사되어 있다[1]. 우리의 최종 목표는 모든 설계요건을 자동으로 만족시키는 신뢰할만한 제어계통을 구현하는 방법을 개발하는 것이다. 그림에서 점선 화살표에 의하여 표시되었듯이 설계요건으로부터 직접적으로 구현단계까지 설계과정을 완전 자동화하므로써 달성된다. 방법론의 구현은 이 그림에서 아래 경로를 택한다. 이런 구현을 위해 설계요건이 "제어엔진" 안으로 들어가고 제어 알고리듬과 검증된 플랜트 모델을 이용하여 반복적 최적화 과정을 이용하여 제어설계에 도달하게 된다. 제어설계는 다음에 검증된 제어구조를 이용하여 구현되고, 신뢰도 요건이 만족되는지를 보이기 위하여 자동적으로 시험된다. 최종적으로 발전

소 수명주기 동안 온라인 진단계통에 의하여 플랜트 모델이 새롭게 유지관리 된다.

2. 제어모드 순위 선정의 자동화 방법론

제어모드 순위 선정의 자동화 방법론은 다음 단계를 따른다[2].

1) 제어계통 성능에 관련된 설계요건의 선정 : 첫 단계는 관련 문제에 적용을 위한 설계요건을 검토하는 것이다. 자동화된 제어계통은 제어계통의 성능에 직접적으로 관련되는 설계요건을 다룬다. 배타적인 요건은 수동적인 방식으로 분리되어 언급되어야 할 것이다. 요건의 한 예는 모든 기기가 220Volts 전압과 60Hz의 주파수를 전원공급을 가지고 동작해야 한다고 명시하는 것이다. 분명히 이것도 제어 하드웨어를 구입할 때 명시되어야 하는 타당한 요건이라고 판단되나 직접적으로 제어성능에는 관련되지 않는다. 그리하여 이런 유형의 요건은 자동화된 제어엔진 요건에 포함되지 않는다. 타당한 요건의 예는 원자로 제어계통이 특정 과도 상태하에서 정지 없이 원자로를 제어해야 한다는 것이다. 예를 들어, 급수제어기가 자동으로 원자로의 정지 없이 단일 히터의 손실을 자동으로 조종할 수 있어야 한다고 제어 요건으로 명시할 수 있다. 분명히 이런 유형의 요건은 직접적으로 제어성능에 관련되고 자동화된 제어엔진 요건 범주에 포함되어야 한다. 적정 설계요건의 선정은 설계과정에서 분명히 중요한 단계중의 하나이다. 몇몇 요건은 위의 예와 같이 명백하게 드러나지 않을 것이다. 그런 경우에 제어 엔지니어와 요건 제공자간에 이견을 좁히기 위하여 반복적인 검토과정이 있어야 한다. 제안된 자동화된 설계과정의 장점은 분명히 지루한 구현 작업을 컴퓨터가 수행하도록 하여 제어 엔지니어로 하여금 상위 목표에 집중하도록 하게 한다는 것이다.

2) 수학적인 형식으로 요건 구현 : 일단 적절한 설계요건이 명시되면, 각각은 서브루틴의 형태로 문서화되어야 한다. 이 서브루틴은 입력으로 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 받아서 특정 요건이 만족되었는지를 나타내는 값을 내보낸다. 이런 문서화는 정확하고 검토 가능한 요건의 수학적인 서술이 된다. 모든 요건을 문서화하는 일련의 서브루틴이 제어문제의 완전한 묘사가 된다. 사실상 이 단계는 설계요건의 두 번째 선별 절차가 된다. 만일 설계요건이 수학적인 형태로 표현될 수 없다면 그것은 적절한 제어 설계요건이 될 수 없다. 기본 아이디어는 요건이 시험 가능해야만 한다는 것이다. 다시 말해 컴퓨터 시뮬레이션의 결과가 주어지면 제어 엔지니어는 요건이 만족되었는지를 분명히 결정할 수 있어야 한다. 그리하여 적절한 요건이 항상 서브루틴의 형태로 문서화될 수 있어야 한다. 분명히 두 번째 단계를 완결하기 위하여 제어 엔지니어와 요건 제공자 사이에 모든 요건이 수학적인 형태로 문서화될 때까지 추가의 반복적 과정이 있어야 한다. 이것은 일련의 요건들의 완성도와 적절성을 검토할 또 다른 기회를 제공하게 된다.

3) 제어 알고리듬 라이브러리의 개발 : 제어계통 개발을 자동화하기 위하여 제어 엔진은 다양한 종류의 제어 알고리듬이 구비되어야 한다. 이런 라이브러리는 기존의 비례적분 혹은 고

등 다변수 제어 방식과 같은 표준 제어 알고리듬을 포함한다. 라이브러리는 특정 문제의 알고리듬을 포함할 수도 있다. 예를 들어 증기발생기 수위를 조절하기 위하여 라이브러리에 three-element 제어기를 포함할 수 있다. 제어 라이브러리는 바라여진대로 포괄적이고 세련될 수도 있다. 이것은 특정 문제중심의 모델-기반 제어기, 뉴럴 네트워크 제어기, 퍼지 제어기 등이 될 수 있다. 유일한 요건은 그런 알고리듬이 파라메타화 해야 된다는 것이다. 그리하면 제어엔진은 각 알고리듬을 위한 최적 파라메타를 선택하여 최종 제어가 모든 요건을 만족시키도록 최적의 알고리듬을 선정할 것이다.

4) 플랜트 모델의 개발 및 검증 : 자동화된 제어 설계를 위해 요구된 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위하여 검증된 플랜트 모델이 요구된다. 플랜트 모델은 검증되어야 하며, 플랜트 수명동안 진단계통에 의하여 새로워져야 한다.

5) 자동화된 제어 설계 개발 : 본 연구의 핵심은 모든 요건을 만족시키는 제어설계의 자동화된 개발이다. 이것은 표준의 구속조건이 있는 최적화 방법을 이용하여 달성된다. 여기서 요건은 수학적인 제한조건이 되며, 제어엔진은 설계가 명시하는 목적 비용함수를 최소화한다.

6) 제어 구조 개발 : 제어와 정보계통 구조와 관련된 전반부 연구는 기능요건의 개발을 포함한다. 우리가 생각하는 플랜트 구조는 기능성을 위한 통합 플렛폼을 확립하며, 운전, 보수, 기술지원을 제공하는 분산 통신 프레임워크를 확립하도록 하게 한다. 분산 네트워크는 자료취득 소스로부터 정보를 처리하는 사용자와 어플리케이션에게 정보를 제공하는 백본을 제공할 수 있다. 본 연구에서 취급되는 구조 관련 이슈는 ① 계측제어 계통에 공통되고 일관된 인터페이스를 제공하고, ② 분산 자료 소스에 대한 균일하고 투명한 접근을 가능하게 하고, ③ 정보와 어플리케이션(예, 진단과 제어)의 통합을 용이하게 하는 계산환경을 확립하고, ④ 기능적인 특성의 구현과 확장성에서 융통성을 허용하는 시스템 구조를 정의하며, 마지막으로 ⑤ 원전 산업에서 표준화 함수 및 인터페이스 관례를 위한 기초를 닦는 어플리케이션 지원에 대한 접근 방법을 정의하는 것이다. 다양한 시스템 사이에 네트워크를 단순하게 연결하고 워크스테이션을 네트워크 노드로 설치하는 것은 미래형 원전에서 발전소 요원을 위한 바람직한 지원 방식의 단지 일부에 지나지 않는다. 이 연구의 주요 목적은 표준화된 기능적 지원과 서비스를 제공하는 통합된 계산 구조의 진보를 통하여 제어와 정보 시스템의 구조를 통한 공통의 기능을 제공하는 것이다. 이러한 방법으로, 발전소 종사자가 그들의 작업을 수행하는데 있어서 효용성이 증대되고, 다중 시스템과 데이터 소스와 상호 작용하는 동안 사용자의 실수 가능성은 줄어들 수 있을 것이다. 제안된 구조 개념이 어플리케이션의 기능성 (진단과 제어)을 지원하는 어플리케이션 환경의 능력과 서비스를 갖는 계층화된 접근방법에 기초한다.

7) 제어 설계 구현 : 일단 제어엔진이 모든 요건을 만족시키는 제어설계를 확인하였으면 제어설계가 검증된 제어구조를 이용하여 실제 플랜트에 구현된다.

8) 플랜트 모델을 갱신하는 진단 방법 개발 : 이런 연구의 목표는 발전소 수명 동안 요구된 요건을 지속적으로 만족시키도록 설계를 유지하는 것이기 때문에, 플랜트 모델이 새롭게 갱신되어야 하는 것은 당연하다. 그리하여 이런 기술의 구현은 기기 고장과 퇴화를 알아낼 수 있는 진단 방법의 개발을 요구한다. 이런 기기 퇴화는 플랜트 모델에 반영되어야 한다. 자동화된 제어엔진이 새로이 갱신된 모델을 가지고 온라인으로 구현되어 원래의 설계요건이 새로운 플랜트 구성을 가지고 만족된다는 것을 보장하여야 한다.

본 연구는 제어계통 자동설계 기술개발을 위한 핵심 부분인 여러 제어모드 사이에서 우수한 모드를 자동으로 선정하게 하는 제어엔진 개념에 중점을 둔다.

3. 증기발생기 수위제어계통에 적용

제어모드 선정의 자동화 연구의 데모를 위해 단순한 증기발생기 선형모델에 적용하려고 한다. 여기에서 적용된 선형 모델은 Irving 모델이며, 다음과 같이 전달함수로 표현된다[3]:

$$Y(s) = \frac{G_1}{s}[U(s) - V(s)] - \frac{G_2}{1 + t_2 s}[U(s) - V(s)] + \frac{G_3 s}{t_1^{-2} + 4p^2 T^{-2} + 2t_1^{-1} s + s^2} U(s) \tag{1}$$

여기서 $Y(s)$, U(s) 및 V(s) 는 증기발생기 수위, 급수유량 및 증기유량의 라플라스 변환된 값을 나타낸다. 여러 출력준위에서 증기발생기의 파라메타 값들이 표 1에 주어져 있다.

본 적용 연구에서 고려된 필수 설계요건은 최대 허용 급수유량, 90% 상승시간, 최대 정상상태 에러이다. 단순히 원리를 검증하기 위하여, 본 연구에서는 단지 두 종류의 제어 알고리듬의 라이브러리를 이용한다. 이용된 제어 알고리듬 라이브러리는 비례제어와 비례적분 제어이다. 제어기는 다음과 같은 방정식으로 표현된다:

비례제어 : $$U(s) = K_{p1}[Y_r(s) - Y(s)] + K_{p2}[V(s) - U(s)], \tag{2}$$

비례적분제어 : $$U(s) = K_{p1}[Y_r(s) - Y(s)] + \frac{K_{i1}}{s}[Y_r(s) - Y(s)] + K_{p2}[V(s) - U(s)] + \frac{K_{i2}}{s}[V(s) - U(s)]. \tag{3}$$

제어 알고리듬의 라이브러리로부터 알고리듬의 선정 및 파라메타의 최적화는 상용의 최적화 기법을 이용하여 달성될 수 있다. 본 연구에서는 유전자 알고리듬을 이용하여 제어 알고리듬을 선정함과 아울러 비례적분 이득을 최적화시켰다. 유전적 알고리듬에서 염색체(Chromosome) 혹은 객체(Individual)는 자주 Bit String으로 코딩된 관련 문제의 후보 해에 해당하며, 각 염색체는 후보 해들의 탐색공간에서 한 점으로 생각될 수 있다. 유전적 알고리듬은 염색체의 한 집단(Population)을 처리하고, 그런 한 집단을 새로운 집단으로 대체한다. 유전적 알고리듬은 현 집단에서 각 염색체에 점수를 할당하는 Fitness 함수를 요구한다. 각 염색체의 Fitness는 이 염색체가 문제의 해에 얼마나 적절하냐를 나타내는 지표가 된다. 일단 염색체의 초기 집단이 무작위로 선정된 후, 전형적인 유전적 알고리듬은 선택연산자, 교배연산자, 돌연변이 연산자 등을 통하여 집단을 진화시키면서 최적 해를 구해나가게 된다.

유전적 알고리듬은 집단내 각 염색체가 주어진 목표에 얼마나 적절한지를 평가하기 위하여 비용함수를 이용하는데, 이런 각 염색체의 Fitness는 이들 에너지에 의하여 계산되며, 더 낮은 에너지를 갖는 염색체가 더 높은 Fitness를 갖게 된다. 비례제어기 혹은 비례적분제어기를 최적화시키기 위해 수위 설정치의 스텝 증가에 따른 수위 응답을 탐색하므로써 이루어졌다(그림 2 참조). 여기서 에너지 함수는 다음 식에 의하여 정의된다.

$$E_1 = \sum_{k=1}^{N} \left| y_r(k) - y(k) \right|, \tag{4}$$

$$E_2 = \left| \min\{y(k), 0\} \right|_k , \tag{5}$$

$$E_3 = \left| \max\{y(k) - y_r(k), 0\} \right|_k , \tag{6}$$

$$E_4 = \sum_{k=1}^{N} \left| u(k) - u(k-1) \right|, \tag{7}$$

$$E_5 = \begin{cases} \text{아주 큰수}, & if \;\; u(k) \ge u_{\max} \\ 0, & if \;\; u(k) < u_{\max} \end{cases} \tag{8}$$

$$E_6 = \begin{cases} \text{아주 큰수}, & if \;\; t_r \ge t_r^r \\ 0, & if \;\; t_r < t_r^r \end{cases} \tag{9}$$

$$E_7 = \begin{cases} \text{아주 큰수}, & \text{정상상태 에러가 존재하는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases} \tag{10}$$

여기서 y는 수위, y_r은 수위 설정치, u는 급수유량, t_r은 상승시간, t_r^r은 요구된 상승시간을 나타낸다. 따라서 E_1은 수위 설정치와 측정된 수위간의 오차의 절대값의 합을 줄이기 위한 것이며, E_2는 수위 설정치 증가에 따른 급수유량의 증가에 의해 나타나는 수축 현상을 최소화하기 위한 것이다. E_3는 오버슈트를 줄이기 위한 것이며, E_4는 제어 노력(Control Effort)을 감소시키기 위한 것이다. 그리고 E_5, E_6 및 E_7은 각각 급수 유량이 허용된 최대 급수유량을 넘어가는 것을 방지하며, 요구된 상승시간을 달성하고, 정상상태 에러를 제거하기 위하여 설정된 에너지 값들이며, 이들 세가지 에너지 함수들은 필수요건을 구성하게 된다. 에너지 함수 E_1, E_2, E_3, E_4 를 최소화하고, 허용된 최대 급수유량이 초과되는 것을 방지하며(E_5), 요구된 상승시간을 달성(E_6)하고, 정상상태 에러를 제거(E_7)하기 위하여 선정된 적합도 함수 (Fitness Function)는 다음과 같다:

$$F = \exp(-m_1 E_1 - m_2 E_2 - m_3 E_3 - m_4 E_4 - E_5 - E_6 - E_7) \quad , \tag{11}$$

여기서 m_1, m_2, m_3, m_4 는 최소화 요건을 달성하기 위한 가중치 상수들이다.

그림 3으로부터 세대가 진화를 거듭함에 따라 적합도 함수가 증가하여 제어기의 성능이 좋아져서 최적의 제어기 파라메타를 선정하는 과정을 확인할 수 있다. 유전적 알고리듬은 다변수 목적함수를 최적화하는데 적절한 방법으로 알려져 왔으며, 위에서와 같이 여러 에너지 함수값들을 최소화하는데 성공적으로 적용될 수 있다. 그림 3에서 최적의 적합도를 갖는 염색체(객체)는 세대가 거듭되어도 꼭 살아남도록 프로그램을 하여 Maximum Fitness는 항상 증가하도록 하였는데, 이것은

최적의 해에 도달하였음에도 불구하고 Fitness Value가 수렴하지 않고 진동하는 특성을 잠재우기 위한 것이다.

제어엔진의 구현 방법을 예를 들어 설명하기 위하여 다음과 같이 3가지 조건의 변경에 따른 제어 모드의 자동선정에 관하여 설명하도록 하겠다:

1) 2가지 필수 요건 : ① 최대 급수유량 제한치의 변경 (정상상태 유량의 150%초과, 175%초과, 200%초과), ② 상승시간 요건 변경 (200초, 250초, 300초) - 본 예제들은 3가지 필수요건 중에서 2가지 필수 요건(에너지 함수 E_5 와 E_6 관련)의 변경에 따른 제어 모드 자동 선정이 성공적으로 적용되는지를 판별하기 위한 것이다.

2) 1가지 최적 요건 : 수축현상의 최소화를 위한 가중치의 변경 – 최적화 관련 4가지 에너지 함수 (E_1, E_2, E_3, E_4) 관련 가중치의 조정을 통하여 각 제어 성능의 강조점의 변경에 따른 제어 모드의 자동선정을 고찰하기 위한 것이며, 본 예제에서는 수축현상의 최소화에 관련된 에너지 함수 E_2 관련 가중치 m_2 의 변경에 따늘 제어 모드 자동선정 결과를 고찰하였다.

먼저 허용 최대 급수유량의 변경에 따른 제어모드의 자동 선정을 고찰하기로 한다. 본 상황은 입력밸브를 통한 가용 유량이 제한되는 것을 의미하며, 밸브에서의 Cavitation 및 한 급수 펌프의 고장에 의해 유발될 수 있다. 우리는 정상상태 유량의 150%, 175%, 200%로 제한되는 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행했다. 각 경우에 대한 최대유량, 상승시간, 에너지 가중치, 적합도, 제어기 이득값이 표 2(a)에 주어져 있다. 제어엔진이 진단 알고리듬을 통하여 펌프가 고장났거나 Cavitation이 발생하였는지 혹은 Fouling 등에 의하여 허용 최대 급수유량이 변경된 것을 인지하고 이에 맞추어 자동으로 제어모드를 선정하고 제어 이득치를 구하는 알고리듬의 예를 제시하였다. 2가지 제어 알고리듬 라이브러리(비례제어기, 비례적분 제어기)로부터 정상상태 에러제거라는 필수요건을 만족시키기 위하여 정상상태 에러가 존재하는 비례제어기는 선정되지 않고, 정상상태 에러를 제거하는 비례적분 제어기가 선정되었다. 선정된 비례적분 제어기는 3가지 각 경우에 대하여 3가지 필수요건(상승시간, 허용 최대 급수유량, 정상상태 에러)을 만족시키는 것을 알 수 있다 (표 2 및 그림 4 참조). 3가지 경우 중에서 제한이 가장 작은 정상상태 유량의 200%로 제한한 경우가 가장 좋은 적합도(Fitness Value)를 갖는 것을 알 수 있다.

두 번째로 상승시간의 변경에 따른 제어모드의 자동 선정을 고찰하기로 한다. 플랜트가 빠른 응답이 요구될 때, 상승시간 요건의 변경을 통하여 제어 알고리듬의 파라메타가 최적화될 수가 있다. 우리는 상승시간 요건이 각각 200초, 250초, 300초인 경우에 대하여 제어 모드의 자동 선정을 살펴보았다. 각 경우에 대한 최대유량, 상승시간, 에너지 가중치, 적합도, 제어기 이득값이 표 2(b)에 주어져 있다. 첫 번째와 같이 2가지 제어 알고리듬 라이브러리(비례제어기, 비례적분 제어기)로부터 정상상태 에러가 존재하는 비례제어기는 선정되지 않고, 정상상태 에러를 제거하는 비례적분 제어기가 선정되었다. 선정된 비례적분 제어기는 3가지 각 경우에 대하여 3가지 필수요건(상승시

간, 허용 최대 급수유량, 정상상태 에러)을 만족시키는 것을 알 수 있다 (표 2(b) 및 그림 5 참조). 3가지 경우 중에서 제한이 가장 작은 상승시간이 300초인 경우가 가장 좋은 적합도(Fitness Value)를 갖는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 적합도 함수내의 가중치의 변경을 통한 우리가 원하는 각 성능지표의 중요도의 변경에 따른 제어모드의 자동 선정을 고찰하기로 한다. 여기에서는 수위 설정치의 계단 증가에 따른 급수유량의 갑작스런 증가로 나타나는 수축현상을 살펴보기로 한다. 여기에서는 이 가중치가 각각 0.01, 1, 100인 3가지 경우를 살펴보았고, 각 경우에 대한 최대유량, 상승시간, 수축된 정도, 에너지 가중치, 적합도, 제어기 이득값이 표 2(c)에 주어져 있다. 첫 번째와 두 번째와 같이 2가지 제어 알고리듬 라이브러리(비례제어기, 비례적분 제어기)로부터 정상상태 에러가 존재하는 비례제어기는 선정되지 않고, 정상상태 에러를 제거하는 비례적분 제어기가 선정되었다. 선정된 비례적분 제어기는 3가지 각 케이스에 대하여 3가지 필수요건(상승시간, 허용 최대급수유량, 정상상태 에러)을 만족시키는 것을 알 수 있다 (표 2(c) 및 그림 6 참조). 미리 예측할 수 있는 바와 같이 수축현상 관련 가중치의 값이 커짐에 따라 수축현상이 상대적으로 중요하게 되어 이를 감소시키려는 요구가 거세져 수축현상을 줄이는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 제어 알고리듬 라이브러리로부터 적절한 알고리듬을 자동으로 선정하고, 선정된 알고리듬의 파라메타를 자동으로 최적화하는 방법을 개발하였다. 개발된 방법은 발전소 상태의 변화 (운전조건의 변화, 기기고장 및 이상상태 등이 진단기술에 의하여 탐지), 필수 요건 혹은 최적화 요건의 변화에 의하여 적절한 제어모드 순위를 결정하여 운전원에게 제시하므로써 적절한 조치를 취하게 하거나 필요한 정보를 제공하여 줄 수 있다. 이를 효과적으로 달성하기 위해서는 다양한 제어 일고리듬 라이브러리를 확보하는 것이 중요하다.

참고문헌

[1] J. March-Leuba, et al, A New Paradigm for Automatic Development of Highly Reliable Control Architectures for Nuclear Power Plants, Phase I Pregress Report, NERI Project 99-119, Report No.: ORNL/TM-2000/265.

[2] J. March-Leuba, et al, A New Paradigm for Automatic Development of Highly Reliable Control Architectures for Nuclear Power Plants: Attachment I Advanced Control Tools and Methods, Phase II Pregress Report, NERI Project 99-119, Report No.: ORNL/TM-2001/187.

[3] E. Irving, C. Miossec, and J. Tassart, “Toward Efficient Full Automatic Operation of the PWR Steam Generator with Water Level Adaptive Control,” BNES, London, Boiler Dynamic and Control in Nuclear Power Stations, pp. 309-329 (1980).

Table 1. Parameters of a steam generator linear model at several powers [3].

$$Y(s) = \frac{G_1}{s}\left[U(s) - V(s)\right] - \frac{G_2}{1 + t_2 s}\left[U(s) - V(s)\right] + \frac{G_3 s}{t_1^{-2} + 4p^2 T^{-2} + 2t_1^{-1}s + s^2}U(s)$$

Power level (%)	G_1	G_2	G_3	t_1 (sec)	t_2 (sec)	T (sec)	V_0 (kg/sec)
5	0.058	9.630	0.181	41.9	48.4	119.6	57.4
15	0.058	4.46	0.226	26.3	21.5	60.5	180.8
30	0.058	1.83	0.310	43.4	4.5	17.7	381.7
50	0.058	1.05	0.215	34.8	3.6	14.2	660.0
100	0.058	0.47	0.105	28.6	3.4	11.7	1435.0

Table 2. Automatic selection of control mode priority.

(a) flow constraint requirement

case	maximum flow/flow constraint	rise time /required rise time	m_1	m_2	m_3	m_4	fitness value	control gains			
								K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}
1	1.42 u_0 1) /1.5 u_0	170/250	0.01	0.001	0.001	0.002	0.4665	10.383	42.523	4.362	49.770
2	1.72 u_0 /1.75 u_0	150/250	0.01	0.001	0.001	0.002	0.4923	11.871	27.643	3.879	46.142
3	1.90 u_0 /2.0 u_0	140/250	0.01	0.001	0.001	0.002	0.4996	20.002	37.929	3.969	49.150

1) u_0 = steady-state feedwater flowrate

(b) rise time requirement

case	maximum flow/flow constraint	rise time /required rise time	m_1	m_2	m_3	m_4	fitness value	control gains			
								K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}
1	1.74 u_0 /1.75 u_0	160/200	0.01	0.001	0.001	0.002	0.4066	15.384	35.209	3.934	37.404
2	1.72 u_0 /1.75 u_0	150/250	0.01	0.001	0.001	0.002	0.4923	11.871	27.643	3.879	46.142
3	1.65 u_0 /1.75 u_0	190/300	0.01	0.001	0.001	0.002	0.5166	37.215	98.400	2.919	39.339

(c) shrink minimization

case	maximum flow/flow constraint	rise time /required rise time	maxi-mum shrink	m_1	m_2	m_3	m_4	fitness value	control gains			
									K_{p1}	K_{p2}	K_{i1}	K_{i2}
1	1.49 u_0 /1.75 u_0	190/300	3.4cm	0.01	0.01	0.001	0.002	0.5148	27.958	98.009	2.929	40.763
2	1.33 u_0 /1.75 u_0	155/300	3.1cm	0.01	1.0	0.001	0.002	0.3664	18.601	98.598	3.567	49.026
3	1.17 u_0 /1.75 u_0	170/300	2.9cm	0.01	100.0	0.001	0.002	5.4E-15	5.884	97.242	3.639	48.622

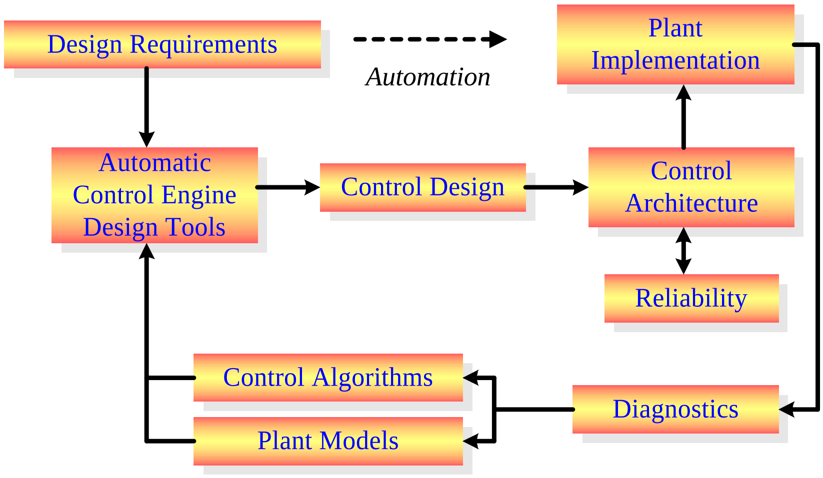


Fig. 1. Schematic diagram of the automated control design process.

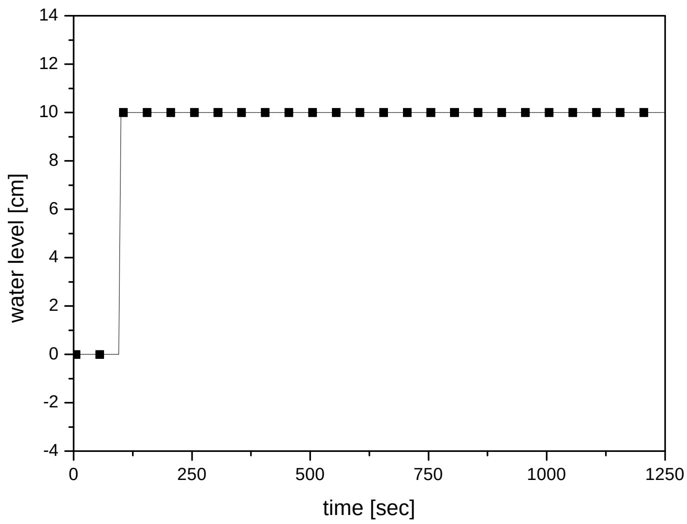


Fig. 2. A program of water level response for optimizing control algorithms and parameters.

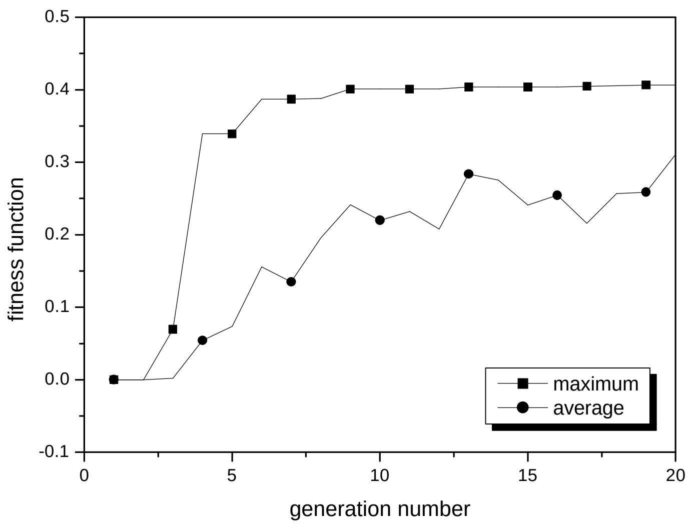
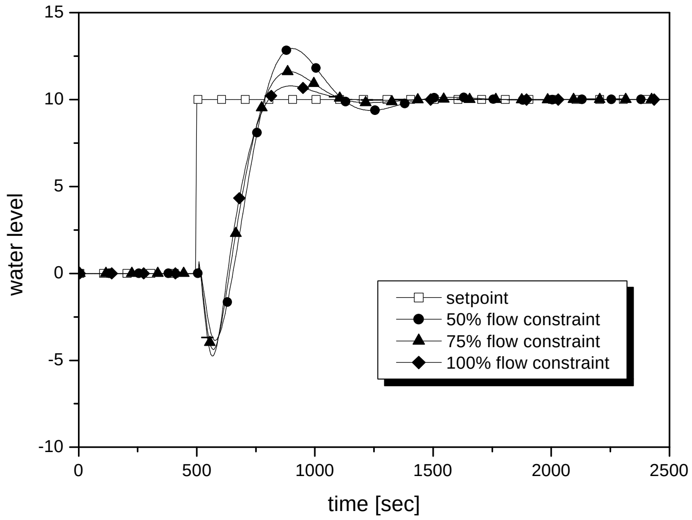
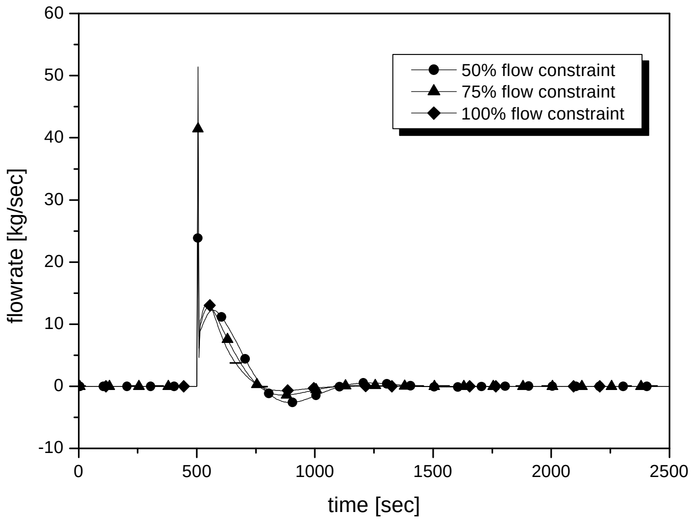


Fig. 3. Fitness function according to generation number.

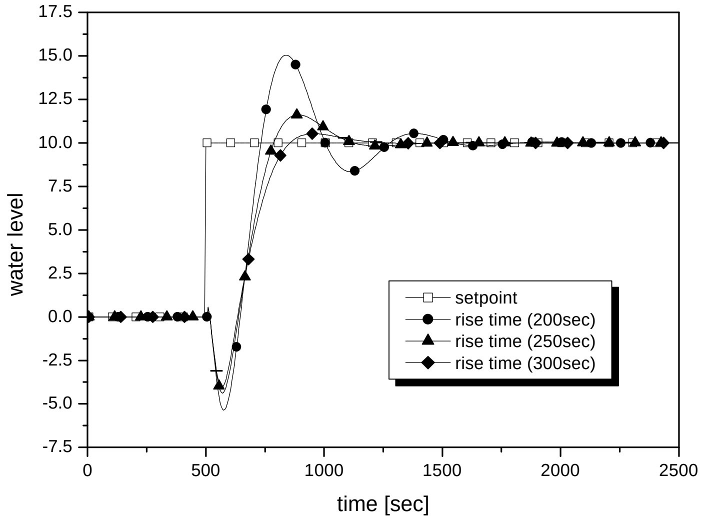


(a) water level

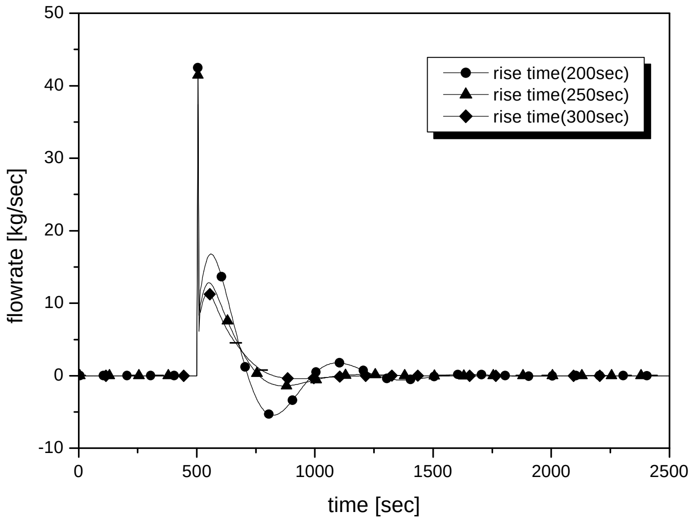


(b) feedwater flowrate

Fig. 4. Controller responses according to change of a flow constraint requirement.

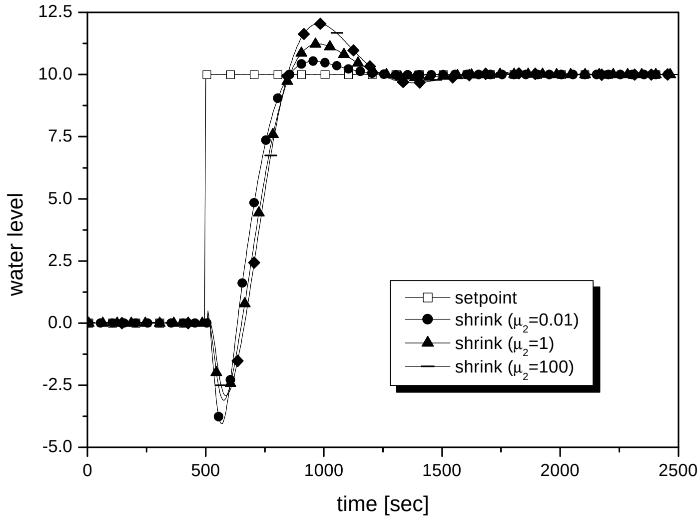


(a) water level

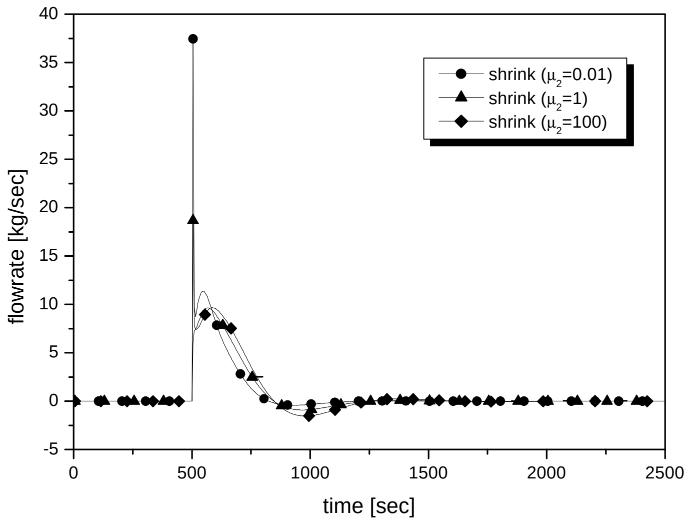


(b) flowrate

Fig. 5. Controller responses according to change of a rise time requirement.



(a) water level



(b) flowrate

Fig. 6. Controller responses according to change of a shrink-minimizing requirement.