

적용 FTCS의 설계

이 기 상 • 박 진 호 *
 단국 대학교 전기공학과

A Design of Adaptive Fault Tolerant Control System

Lee Kee Sang • Park Jin Ho *

Dept. of Electrical Eng., Dankook University

Abstract - In this paper, a new FTCS with the ability to perform original control objective without considerable loss of control performance in the face of any fault is proposed.

The FTCS is composed of two interacting units, Adaptive Controller Unit and Fault Detection/Classification, where ACU performs primary control objective with basic process information(I/O) and environmental information fed by FDU and where FDU detect and classify faults and make decision on remedial action by the use of information provided by ACU.

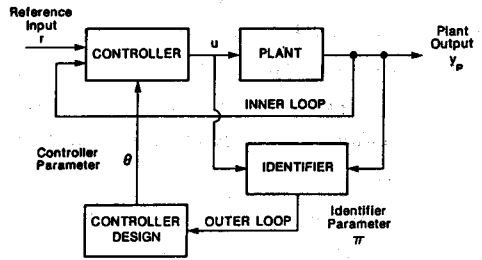


그림 1. 적응 제어계(PID)의 블록선도

각 요소는 다음과 같다.

프로세스 모델은

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + w(k) \quad (1)$$

여기서

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m} \quad (3)$$

($b_0 \neq 0$)

$y(k)$: 출력, $u(k)$: 제어입력, $w(k)$: 백색잡음

프로세스 파라미터의 추정에는 일반적으로 많이 사용되는 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘이며 식(1)을 regression model로 표현하면

$$y(k) = \phi^T(k)\theta(k) + n(k) \quad (4)$$

$$\phi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-d), \dots, u(k-d-m)] \quad (5)$$

$$\theta(k) = [a_1(k), \dots, a_n(k), b_0(k), \dots, b_m(k)] \quad (6)$$

이때 $\theta(k)$ 의 추정을 위한 RLS알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k)\phi(k) \cdot [y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (7.1)$$

$$P(k) = \{P(k-1) - R(k)P(k-1)\phi(k) \cdot \phi^T(k)P(k-1)\} / \lambda \quad (7.2)$$

$$R(k) = 1 / \{\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)\} \quad (7.3)$$

$\hat{\theta}(k)$ 는 $\theta(k)$ 의 추정치, $P(k)$ 는 공분산행렬, λ 는 망각지수이다.

본 논문에서의 제어기로는 간접 극배치형 ST-PID를 사용하였으며 제어입력은 다음과 같다[4].

1. 서론

적용제어기법은 80년대들어 미지시변시스템에 적용되어 컴퓨터 기술의 발달과 함께 많은 연구와 발전을 거듭했다. 하지만 이 기법은 여러 가정의 만족하에서만 결정된다. 이는 실제응용시 지켜지기 어려운것으로 최근의 연구들은 이러한 문제점을 극복하기위한 강인한 적응제어기 개발이 주요한 문제로 부각되었다.

이 분야의 연구들은 STC 실현상의 문제를 다룬 Wintemark, 부하와 DC성분처리문제를 다룬 C.C. Hang, 안정도판별에 의해 지연시간의 변화를 검출하는 Liu와 Gertler등을 비롯하여 부분적 해결책만을 제시한 다수의 연구가 있다[1][2][3].

그러나 이들 기존연구의 문제점은 특정한 이상(고장)만을 가정하고 그에 따른 처리방안만을 제시하였기때문에 실제응용시 가장 중요한 이상(고장)의 원인을 검출하고 분석하는 능력을 갖지 못한다. 또한 제어계통의 안정 및 신뢰성에 직접적인 영향을 주는 센서고장을 검출,보상하는 연구가 매우 미흡하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 기존연구들의 단점들을 보완하기위해 적응제어계에서 일어날 수 있는 변발고장(이상) 및 지명적 고장으로 분류되는 출력센서의 고장, 프로세스 파라미터의 급격한 변화, 측정불가능한 부하의 투입과 지연시간의 변화를 조기에 검출, 식별할 수 있는 고장검출 유니트(FDU: Fault Detection Unit)와 고장의 발생에도 불구하고 설정된 제어목적을 효과적으로 달성할 수 있는 FTCS를 제안하고자 한다.

2. 기본 적응제어계

기본 적응제어계의 구조는 그림1에 보인바와 같이 간접방식에 의한 ST-PID제어기를 채택하였다.

$$U(k) = S^{-1}(q^{-1}[\alpha Y_{ref}(k) - M(q^{-1})y(k)]) \quad (8)$$

$$M(q^{-1}) = \alpha + R(q^{-1}) \quad (9)$$

또한 제어기 파라미터 α , $R(q^{-1})$, $S(q^{-1})$ 는 극점 배치방정식

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})[\alpha + R(q^{-1})] = C(q^{-1}) \quad (10)$$

에서 결정되고 $C(q^{-1})$ 은 ST-PID를 포함한 전제어계의 전달함수에 부가 하려는 극점을 근으로 갖는 Monic 다항식이다.

3. 고장의 영향과 검출, 시별을 위한 FDU의 설계

3.1 센서 고장의 검출과 식별

측정장치는 계통의 감시를 위한 고품신호의 제공수단이므로 고장발생의 경우 운전자의 오조작의 전제어계 성능을 악화시키는 주요원인이 됨으로 신속한 검출이 필요하다. 측정장치 고장과 프로세스 고장간의 식별을 위해 DSS(Dual Sensor System) 방식을 채택하였으며 제안된 고장검출식별 유니트는 그림2와 같다.

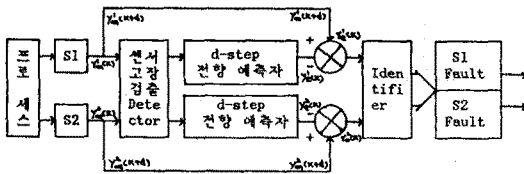


그림 2. 센서 고장의 검출, 식별유니트

이 구조에서 센서 고장의 검출은 두 센서 출력의 차 $(Y_1(k) - Y_2(k))$ 에 대한 임계치 검사에 의해 즉각적으로 수행되며 고장센서의 식별은 센서당 한계치 사용된 d-step 전향 예측자의 예측치 $Y_e(k)$ 와 측정치 $Y_m(k)$ 의 $r_i(k) = |Y_m(k) - Y_e(k)|$ ($i=1, 2$)의 비교 또는 임계치 검사에 의해 이루어진다. 여기에 사용된 d-step 전향 예측자의 알고리즘은 다음과 같다[5].

$$Y_e(k+d) = \alpha e(q^{-1})Y(k) + \beta e(q^{-1})U(k) \quad (11)$$

$$\alpha e(q^{-1}) = G(q^{-1}) \quad (12)$$

$$\beta e(q^{-1}) = F(q^{-1})B(q^{-1}) \quad (13)$$

이고 $G(q^{-1})$, $F(q^{-1})$ 은 다음방정식을 만족하는 유일한 다항식이다.

$$1 = F(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) \quad (14)$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{d-1}q^{-d+1} \quad (15)$$

$$G(q^{-1}) = g_0 + g_1q^{-1} + \dots + g_{n-1}q^{-n+1} \quad (16)$$

3.2 프로세스 고장의 검출, 식별

프로세스 고장은(부하 및 파라미터 변화, 지연시간의 변화등) 기준 입력의 추적에 불가능함을 물론 구동 입력의 한계 등 실질적 제약이 있는 상황에서 제어능력을 상실하게 된다.

프로세스 고장은 이미 언급한 두 센서에 대응하는 전향예측자의 출력과 실측출력간의 편차 $|Y_m(k) - Y_e(k)|$, ($i=1, 2$)가 모두 임계치를 초과하고 두 값이 거의 일치하는가를 검사함으로써 검출되며 이것은 본 연구에서 채택한 DSS구조의 특징 중 하나이다.

일단 프로세스 고장이 검출되면 고장원인을 식별을 해야 하는데 이들 고장시 제어출력의 초기증상들은 초기 수 십 샘플시 동안 매우 유사하여 규명하기 어렵다.

본 연구에서는 파라미터 벡터를 수정하여 RLS 알고리즘의 추정결과를 분석함으로써 그 원인을 규명토록 하였다.

3.2.1 부하 변화와 파라미터 변화

위 두 원인의 식별은 파라미터 벡터에 부하변수를 추가하여 RLS를 구동하고 부하변수의 추정치 $C(k)$ 에 대한 임계치 검사에 의해 두 원인을 식별했으며 대경은 파라미터 변화의 경우 $C(k)$ 가 과도기간에 두 개 주 작은 값을 가진다는 사실에 있다. 이상원인의 식별논리는 다음과 같다.

$$|C(k)| \geq \text{Thc}(C(k) \text{에 대한 임계치})$$

부하 변화
파라미터 변화

3.2.2 지연시간의 변화

위에서 파라미터 변화가 출력변동의 원인임이 밝혀지면 다음 단계는 그 원인이 지연시간의 변화에 기인한 것인지 그 외적인 요인에 기인한 것인지 식별해야 한다. 그러나 지연시간의 변화를 잘못게 판정할 경우 지연시간의 불일치를 유발하여 제어계 안정성도 해할 수 있으므로 본 연구에서는 지연시간 추정기법을 도입하여 매 스텝마다(프로세스 검출이후) 지연시간변화를 감시하는 제책하였다.

지연시간 추정기법으로는 다중예측자 기법과 입력다항식 $B(q^{-1})$ 의 차수를 예상 최대 지연시간까지 확장하고 RLS를 구동하는 방법들을 수 있으나 전자는 지연시간의 모든 파라미터 값이 정확하다는 가정하에서만 전개된 관계로 고장식별에는 사용할 수 없다[6][7]. 따라서 본절에서는 후자를 택하였으며 이 경우 RLS내의 추정벡터와 파라미터 벡터는 다음과 같이 변경된다.

$$\phi(k) = [-Y(k), \dots, -Y(k-n), U(k), \dots, U(k-d-m), 1] \quad (18)$$

$$\Theta(k) = [a_1(k), \dots, a_n(k), b_0(k), \dots, b_{(m+d)\max}(k), c(k)] \quad (19)$$

지연시간변화의 검출은 파라미터 벡터와 측정벡터를 식(18)(19)로 변경한 상태에서 RLS를 구동하여 $b_0(k), \dots, b_{(m+d)\max}(k)$ 중 영으로 감소 또는 영에서 증가하는 선행계수의 존재여부를 검사함으로써 수행되며 이때 변화된 지연시간값은 입력계수 중 미리 설정된 임계치 이하의 값을 갖는 선행계수의 수와 일치한다.

3.2.3 보상

센서 고장의 보상은 우선 두 센서 중 고장센서의 출력에 이용치 않거나 고장센서를 제거, 교환함으로써 해결되며 복원시 동안의 임무는 단일센서에 의존한다.

프로세스 고장의 보상은 일차적 보상과 이차적 보상으로 구분된다.

일차적 보상은 신속한 고장식별을 위해 추정 알고리즘의 수렴특성을 빠르게 하여 고장 발생 직후 정확한 파라미터 추정치를 제공하기 위한 것으로 여러 기법 중 공분산조정이 가장 적절한 것으로 판단된다.

이차적 보상은 식별이후에 시행하며 여기에는 부하 변화로 인한 제어부성의 보상 및 변화된 지연시간의 추정치를 제어기 파라미터 결정에 도입하는 것등이 포함된다.

기본제어기로서 MVC(Minimum Variance Controller) 등을 사용할 경우에는 부하변화, 지연시간변화등에 대응하기 위한 별도의 고려를 해야하나 본 연구에서는 ST-PID를 기본제어기로 채택했기 때문에 공분산 조정만으로 파라미터 변화와 부하변동을 처리함과 동시에 정확한 Setpoint 추적까지 달성할 수 있었다.

4. 적응에

본장에서는 제어반 고장검출, 식별시스템 및 이를 포함한 FTCS의 성능을 입증하기 위하여 다음과 같은 프로세스를 선정하여 프로세스에 각 고장이 발생했을 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실행하고 그 결과를 검토했으며 검출대상 고장은 증감장치고장, 부하변화, 파라미터변화, 지연시간의 변화로 선정했다.

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.5353q^{-1} + 0.5866q^{-2} \quad \text{--- (11.1)}$$

$$B(q^{-1}) = 0.02797 + 0.02341q^{-1} \quad \text{--- (11.2)}$$

시뮬레이션에는 실질적 문제를 최대한 고려하기 위해 입력 최대최소한계를 ± 30 으로 설정하였으며 지연시간의 초기 예측치를 정확하며 지연시간 변화는 초기 예측치를 중심으로 ± 1 만큼 변화한다고 가정하였다. 또한 부하변화는 계단형으로 설정하였다.

모든 경우에 기본적인 제어목적은 시변인 set point의 추적이다. 따라서 FTCS의 성능 평가는 특정고장 발생에도 불구하고 원래의 제어목적인 set point 추적을 어느정도 빠른 시간내에 정확히 수행하는가에 달려 있다.

그림 5.a는 센서 고장 발생시 FTCS의 특성을 나타낸 것이며 검출시스템을 도입하지 않은 경우의 특성을 나타낸 그림 5.b에 대응된다. 센서고장은 $k=100$ 에서 발생시켰으며 크기는 1로 가정했다. 고장을 검출할 수 있는 정보인 $|Y_k - Y_{k-1}|$ 에 대응하는 임계치는 0.5로 설정하였다. 고장의 검출, 식별 및 고장센서 출력의 제어는 5스텝 이전에 즉각적으로 이루어졌으며 따라서 제어계 성능의 감퇴는 거의 없었다. 본 연구에서는 제어반 센서고장검출방식은 미지시불변의 경우에서는 대응방식을 취하지 않고도 단일 센서의 자기진단을 수행하는 능력을 갖는다.

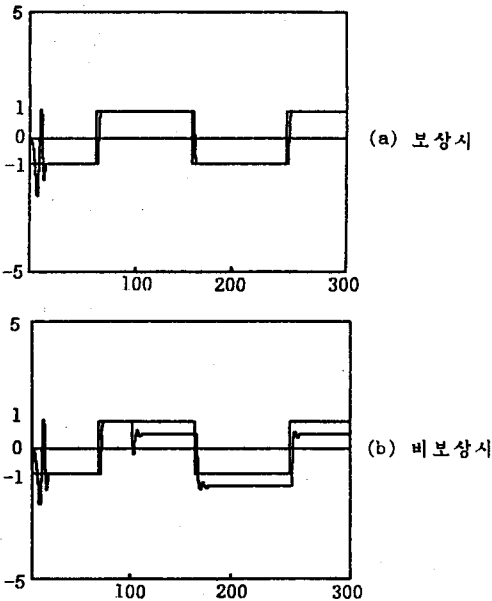


그림 5. 센서고장시 제어계응답

그림 6.a는 부하, 변화시 ST-FTCS의 특성이며 검출시스템을 도입하지 않은 경우의 특성을 나타낸 그림 6.b에 대응된다. 두 그림은 모두 $k=100$ 에서 크기 0.3인 부하가 부입된 경우로서 프로세스고장은 2~3스텝이내에 검출되고 고장이 부하변화라는 식별은 10스텝이내에 실행되었으며 이때 고장 판정을 위한 임계치는 0.1로 설정했다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 비보상시 제어계는 제어목적(set point 추적)을 달성하지 못하는 반면 FTCS는 검출, 식별 이후 즉각 제어성능이 회복되며 동시에 부하의 추정치도 제공한다. 주의할 점은 이 제어계가 PID 형태를 가짐으로 해서 원래 부하변화에 강한 특성을 가짐에도 불구하고 실질적인 입력의 한계로 인한 특이점 이상의 부하변화 발생시 처리능력은 제한을 받게 된다는 점이다. 이 경우에는 수동제어로의 전환 또는 운전자에 의한 후속조치가 가능하도록 경고장치를 구동시켜야 한다.

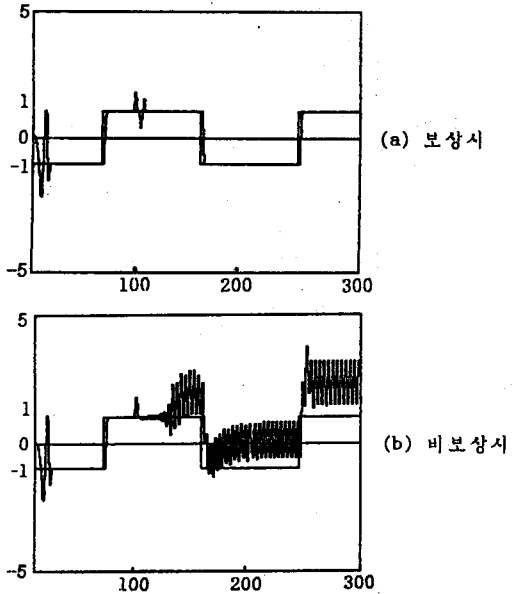
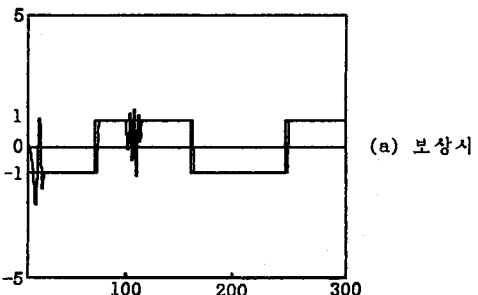


그림 6. 부하변화시 제어계응답

그림 7.a는 계통 파라미터 변환시 FTCS의 특성이며 비보상계의 특성을 나타낸 그림 7.b에 대응한다. 부입된 고장은 $k=100$ 에서부터 $a_1 = -1.5353$ 에서 $a_1 = -1.0$ 으로의 계단형태의 파라미터 변화이다. 고장의 검출, 식별 및 보상은 즉각적으로 이루어졌다.



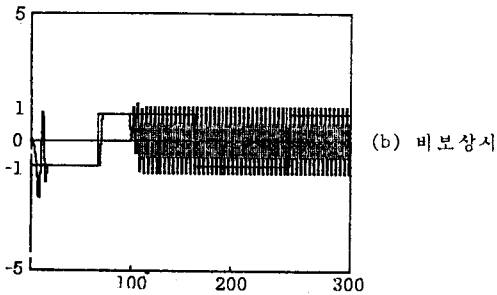


그림 7. 프로세스파라미터 변화시 제어계응답

임계치 검사(또는 Trend check)에 의해 수행되었다. 이때 임계치는 각각 0.005로 선정했다.

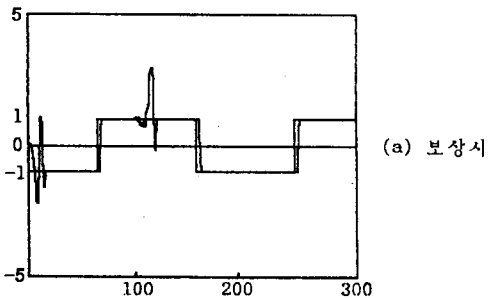
5. 결론

본 연구에서는 산업, 공정제어분야의 핵심과제인 제어계의 안전성, 신뢰성 확보대책의 일환으로서 미지시변인 시스템에서 일어날 수 있는 빈발고장을 검출, 식별할 수 있는 고장검출식별유니트와 그를 포함한 FTCS를 제안하였으며 이는 기존의 특정 가정하에 전개된 각각의 보상 알고리즘들의 문제점을 보완한 것으로서 기타 발생가능고장에 대한 검출, 보상대책들을 점진적으로 부가하거나 인공지능에 근거한 전문가 시스템을 도입한다면 적응제어기의 적용범위 확장은 물론 대형 산업프로세스 및 미지계통의 제어 및 감시에 매우 효과적으로 사용될 것으로 기대된다.

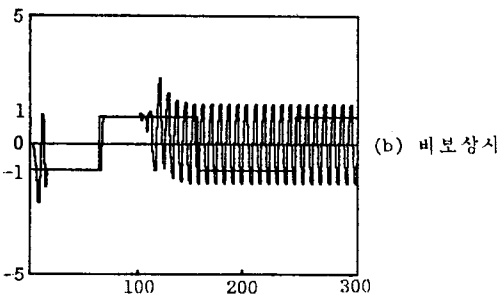
REFERENCE

1. Bjorn Wittenmark and Karl Johan Astrom, "Practical Issues in the Implementation of Self-tuning Control", *Automatica*, Vol. 20, No. 5, 1984., pp. 595-605
2. C.C. Hang, K.W. Lim and T.T. Tay, "On Practical Implementations of Adaptive Control", *Learning and Adaptive Control*, Plenum Press, NewYork, 1986.
3. K. Liu, J. Gertler, "A Supervisory(expert) Adaptive Control Scheme", *IFAC, Con 87* 1987.
4. R. Ortega and R. Kelly, "PID Self Tuners : Some Theoretical and Practical Aspects", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. IE-31, No. 4, November 1984.
5. G.C. Goodwin and K.S. Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Prentice Hall Inc., 1984.
6. Kim young chol et al., "Adaptive Control for Discrete Process with Time Varying Delay", *Trans. KIEE*, Vol. 35, No. 11, November, 1986.
7. H. Kurz and W. Goedecke, "Digital Parameter-Adaptive Control of Processes with Unknown Dead time", *Automatica*, Vol. 17, No.1, 1981, pp245-252.

그림 8.a와 8.b는 지연시간 변화시 보상계 및 비보상계의 특성을 나타낸 것이다. 지연시간의 변화는 전술한 바와같이 전 제어계의 불안정을 초래하는 요인이 되며 그렇지 않은 경우라 하더라도 그림 8.b에 보인바와 같이 제어목적의 달성은 불가능하다. 그러나 지연시간의 변화가 잘못 검출, 추정된 경우에도 동일한 정도의 제어성능감퇴를 초래하므로 매우 정확한 검출 및 추정이 요구된다. 본 연구에서 사용한 입력 다항식 계수확장기법을 예제에 적용한 결과 지연시간 발생후 10스텝이내에 확실히 식별되며 식별과 동시에 추정이 완료되고 이 값은 다음 스텝의 제어기 파라미터 계산에 투입되므로 전 제어계는 지연시간 수평후 신속히 정상 상태에 원래의 제어 목적을 충실히 수행한다.



(a) 보상시



(b) 비보상시

그림 8. 지연시간 변화시 제어계응답

본 예제에서는 지연시간(Time Delay:TD) 초기치는 2이며 $k=100$ 에서 3으로 변하는것으로 가정하였으며 $B(q^{-1})$ 다항식의 계수는 TD를 고려하여 $[b_0 b_1 b_2 b_3 b_4]$ 로 설정했다. 초기 지연시간이 2일때 $[b_0 b_1]$ 이 10^{-2} 이하의 값으로 되어 TD=2임을 알 수 있고 다시 $K=100$ 이후 수 스텝이내에 $|b_3|$ 값은 급속히 증가하고 $[b_0 b_1 b_2]$ 만이 10^{-2} 이하의 값이 되어 TD=3임을 알 수 있다. 따라서 이 방법 적용시 지연시간변화 이후 지연시간값을 추정하기까지의 소요시간은 일반적으로 20스텝이내이며 지연시간의 추정은 입력계수중 선행 세계의 계수 $[b_0 b_1 b_2]$ 에 대한