



화력발전 효율향상 및 안정운전을 위한 제어시스템 튜닝기술 개발 현황



김 문 수
한국중부발전(주) 선임전문원

1. 개 황

대용량 석탄화력 발전분야에서는 고효율, 환경친화, 설비의 신뢰성 및 설비의 안정적인 운전을 만족시키기

위해 꾸준히 기술개발을 수행하고 있다. 국내 대용량 석탄 연소 발전소는 1983년도에 준공된 '아임계압 드럼형 발전소' 인 삼천포 1호기를 시작으로 6기가 준공되었다. 초임계압 대용량 석탄연소 발전소는 1993년도에 준공된

국내 최초 '초임계압 석탄화력 발전소' 인 보령화력 3호기를 표준모델로 하여 총 38기가 건설되어 운영되고 있다. 최근에는 초초임계압 발전방식인 1000MW급 발전방식에 대한 연구가 완료된 상태이며, 조만간 국내에 건설될 것으로 예상하고 있다.

또한, 튜닝기술을 자립하여 제어로직 최적화, 프로세스 최적 튜닝으로 열 피로에 의한 설비수명 단축예방, 열소비율 저감에 의한 효율개선 등을 달성할 필요성도 있다. 수입 연료비가 급등한 2008년부터 발전사는 다음과 같은 분야에서의 개선을 통하여 원가절감을 이룩하는 것이 절대적으로 필요하며, 본 과제를 수행하여 현안을 해결할 수 있다.

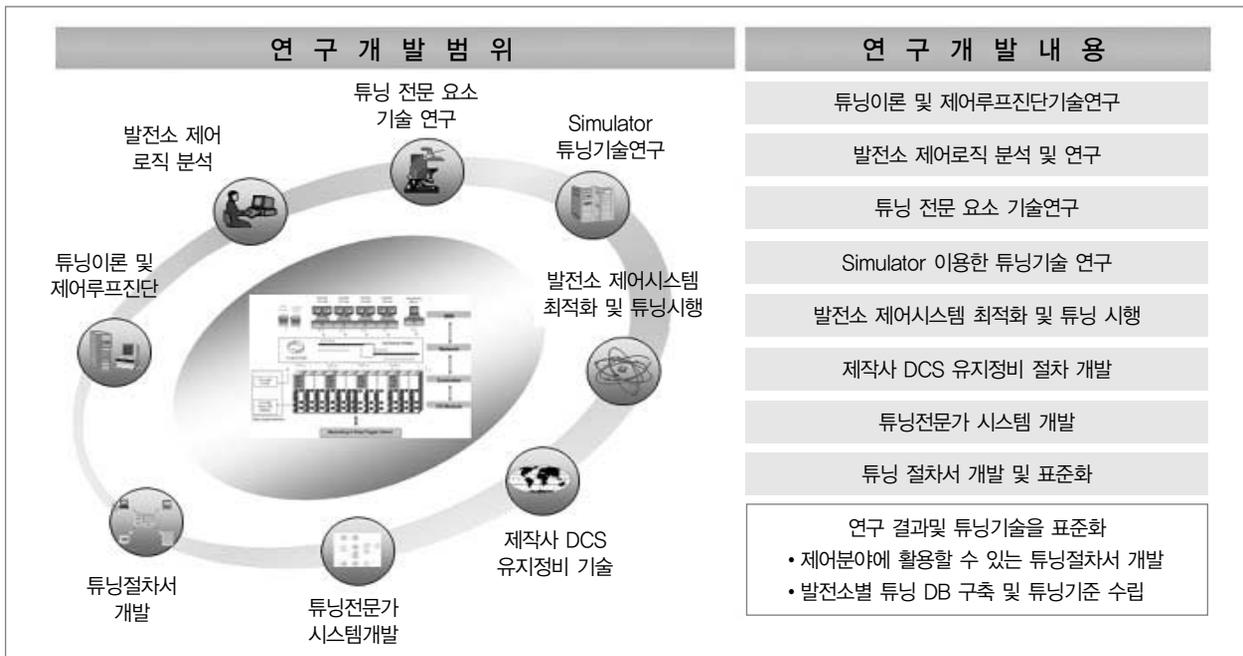
2. 현황

가. 튜닝 기술개발 필요성

발전소 제어시스템 튜닝은 1980년대 대용량 석탄화력 발전소부터 현재까지 외국 튜닝전문가가 전적으로 수행하고 있다. 발전소 제어시스템은 기술적 난이도가 높아 튜닝은 시운전 이후에 거의 이루어지지 않고 있으며, 국내 업체에는 튜닝전문 고급기술자가 양성되어 있지 않아 외국 기술자에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 튜닝 전문가 양성을 통해 핵심기술을 확보하고 기술을 체계화하여 외국 기술자에 대한 의존도를 낮춰 나가야 한다.

- 연료 열량자동보정 제어로직 개선 및 튜닝으로 저열량탄 연소를 통한 원가 절감
- CO 및 Un-burned Carbon 제어와 NOx 배출 저감을 위한 연소용 공기 제어
- 열효율 개선을 위한 연소 제어 튜닝
- 보일러 튜브 손상을 예방하기 위한 증기온도 제어 튜닝

국내 전력산업의 수요 증가에 따른 신규 발전소 건설과 노후화 발전소의 재가동을 위한 개조 공사 시 튜닝이



[그림 1] 제어시스템 튜닝기술 개발 로드맵

필요하며, 선진국에서 시행하고 있는 튜닝기술을 개발·적용하면 효율증가에 의한 연료비의 절감뿐만 아니라 환경보전에도 크게 도움이 될 것으로 기대된다.

나. 제어시스템 튜닝 및 PID 제어기

1) 제어시스템 튜닝

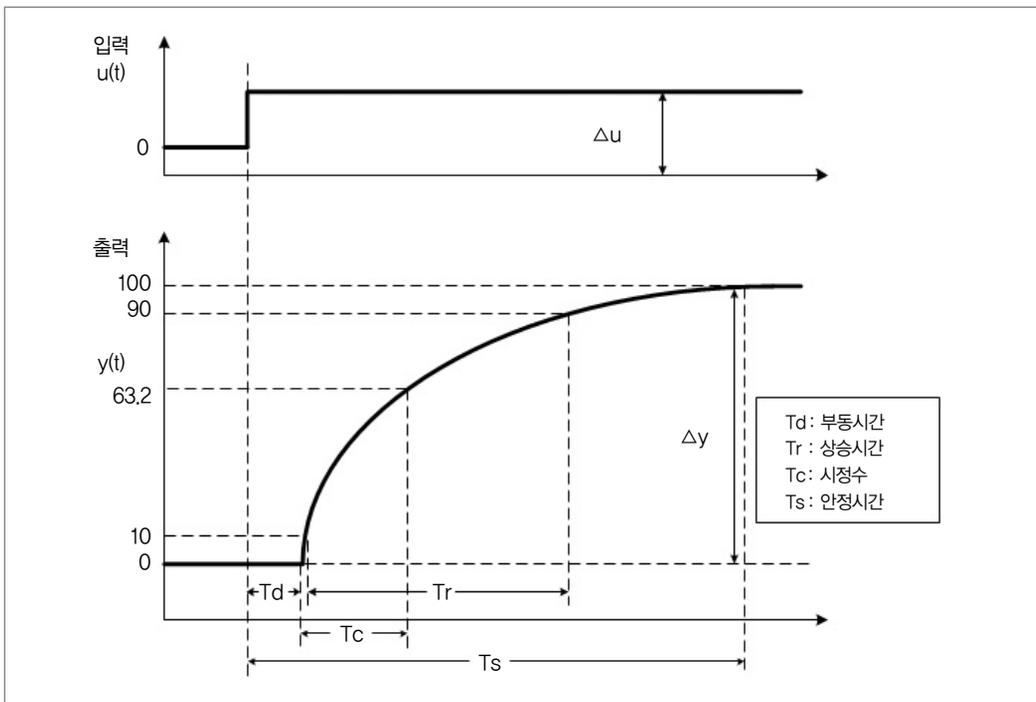
제어기 튜닝이란 사용자가 요구한대로 프로세스 응답을 만들기 위해 제어기 이득, 적분시간, 미분시간과 Feed-forward Program, Lead-lag Time, Linearization의 최적 변수(Parameter)를 조정하는 것으로 제어설비의 전반에 걸쳐 프로세스 응답을 최적으로 만드는 과정이다. 제어기 튜닝에 있어서 만나게 되는 첫 번째 문제는 양호한 제어란 무엇인지를 결정하는 것이며, 이것은 프로세스 특성마다 다르다. 어떤 경우에는 오버슈트가 없도록 시스템을 튜닝 하는 것이 중요하고, 다른 경우에는 느리고 안정된 응답곡선이 요구된다. 또 다른 경우에는 빠른

응답시간을 원하면서 어느 정도 크기의 진동과 오버슈트는 문제가 없는 루프도 있다. 결과적으로 각각의 특정 루프에 대한 어떤 제어가 양호한가에 대한 문제는 튜너(Tunner)가 결정해야 한다는 것이다.

2) 1차 모델

1차 공정 모델은 공정 제어에서 가장 많이 이용되어지며, 1차 모델에 기반하는 PID 튜닝 기법이 많이 존재한다. 1차 모델은 시상수, 공정 이득, 데드타임으로 구성되며, FOPDT(First Order Plus Dead Time) 모델이라 부른다. 입력을 $u(t)$, 출력을 $y(t)$, 입력 $u(t)$ 의 라플라스 변환을 $U(s)$, 출력 $y(t)$ 의 라플라스 변환을 $Y(s)$ 라 하면 1차 모델은 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며, 식 (1)에서 K 는 공정 이득, T_c 는 시상수, T_d 는 데드타임을 의미한다.

$$Y(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-T_d s} U(s) \quad (1)$$



[그림 2] FOPDT 모델의 개루프 스텝 응답 곡선

식 (1)로 표현되는 1차 공정 모델의 개루프 스텝 응답 곡선을 도식하면 그림 2와 같다.

그림 2에서 식 (1)에 나오는 파라미터 T_c 와 T_d 의 정의를 보여주고 있다. 그림 2에서의 공정 이득 K 는 정상 상태 이득으로 식 (2)와 같이 표현되어진다.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2)$$

3) PID 제어기

발전소에서 사용하고 있는 제어기는 대부분 PID 제어기이며, 온도 제어 루프를 제외하면 거의 PI 제어기가 이용되고 있다. DCS 제작사에 따라서 일부 SCO(State Controller with Observer)를 사용하는 제어 루프가 있지만, PID 제어기로만 제어가 가능하다고 해도 과언이 아니다.

PID 제어기는 이상적인 PID 제어기로 식 (3)과 같은 형태를 갖는다. 식 (3)에서 $u(t)$ 는 제어기 출력, $e(t)$ 는 에러, K_p 는 비례 이득, T_i 는 적분시간, T_d 는 미분 시간을 의미한다. 제어시스템 제작사에 따라서 비례 이득 대신 비례대

(Proportioanl Band), 적분 이득 등을 사용하는 경우도 있다.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

식 (3)의 PID 제어기는 비례항, 적분항, 미분항으로 표현되어지는데, 비례항은 모든 주파수 대역에서 에러 신호에 비례하는 제어 신호를 제공한다. 적분항은 적분기에 의해 저주파 보상으로 정상상태 오차를 줄여주며, 미분항은 미분기에 의해 고주파 보상으로 과도 응답을 개선시킨다. 세 항의 페루프 성능에 미치는 개별 효과를 요약하면 표 1과 같다. 표 1은 안정한 개루프 플랜트(즉, Self-Regulating 공정)에 한하여 첫 번째 튜닝 가이드로써 활용할 수 있다.

발전소에서 사용하고 있는 PID 제어기는 제어 시스템 제작사에 따라서 다른 형태의 제어기 형태를 가지고 있다. 500MW급 이상 석탄화력 발전소의 보일러 제어 시스템 현황을 나열하면 표 2와 같다.

[표 1] 비례항, 적분항, 미분항 튜닝의 페루프 응답 효과

페루프 응답	상승시간	오버슈트	정정시간	정상상태 오차	안정도
Increasing K_p	Decrease	Increase	Small Increase	Decrease	Degrade
Decreasing T_i	Small Decrease	Increase	Increase	Large Decrease	Degrade
Increasing T_d	Small Decrease	Decrease	Decrease	Minor Change	Improve

[표 2] 석탄화력 발전소 보일러 제어 시스템 적용 현황

제어시스템 제작사	제어시스템 모델	대상 발전소
ABB	INFI-90	삼천포 #1,2 당진 #1-4
	Procontrol-14	태안 #1-4
	SYMPHONY	태안 #5,6, 보령#5,6
EMERSON	OVATION	삼천포 #3,4 영흥 #1-4, 보령 #1,2
SIEMENS	TELEPERM-ME	삼천포 #5,6 하동 #1-6
	TELEPERM-XP	보령, 태안, 하동 #7,8, 당진 #5-8
SULZER	AV-6	보령 #3-4

[표 3] 석탄화력 발전소 보일러 제어 시스템 적용 현황

PID 알고리즘	제어시스템 제작사	비 고
$U(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_i} \right] \left[\frac{1 + T_d s}{1 + \alpha T_d s} \right] E(s)$	ABB(P-14, INFI-90)	Interacting
$U(s) = \left[K_{\beta} + \frac{1}{sT_{\beta}} + \frac{T_{\beta} s}{1 + \alpha_2 T_{\beta} s} \right] E(s)$	Emerson, Siemens ABB(INFI-90)	Ideal parallel non-interacting
$U(s) = K_{\beta} \left[1 + \frac{1}{sT_{\beta}} + T_{\beta} s \right] E(s)$	Sulzer, LS산전	Ideal non-Interacting

제작사별로 다른 제어기 형태와 다른 파라미터 형태 (K_p 또는 PB , T_i 또는 K_i , αT_d 또는 $T1$ 등)를 가진다고 하더라도, 표 2에 나열되어 있는 제어 시스템 PID 제어 알고리즘을 크게 3가지로 분류하여 전달함수로 표시하면 표 3과 같다.

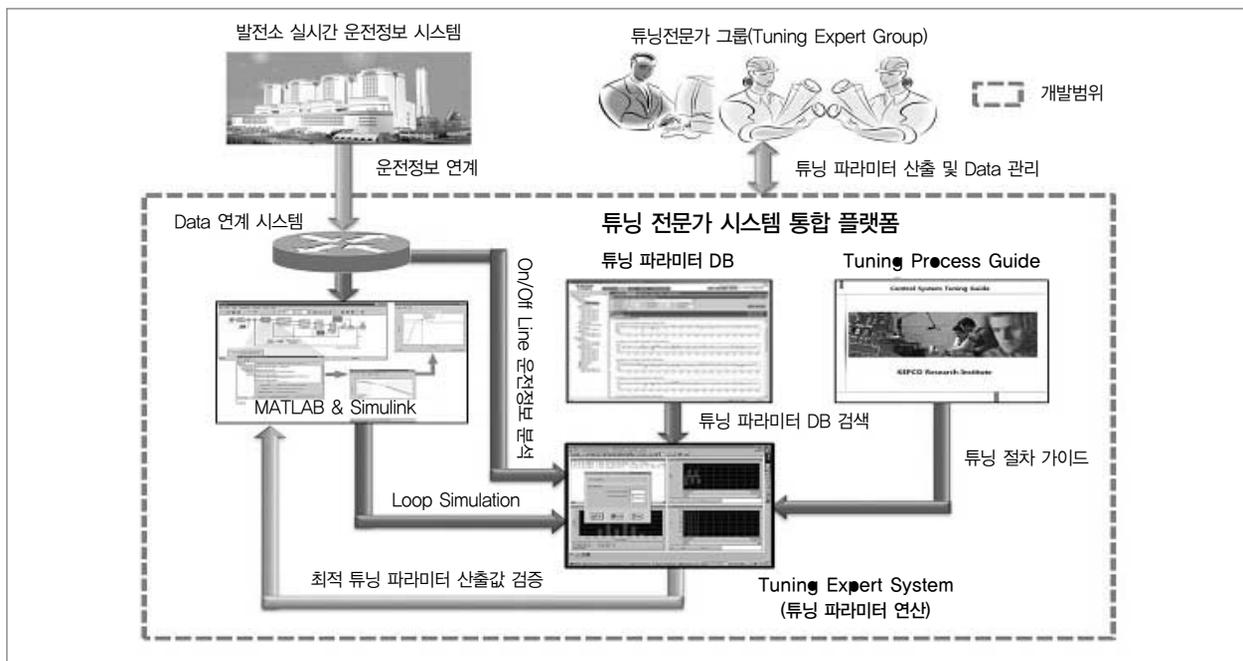
어렵다. 때문에 발전소 주요 루프별 최적 튜닝 파라미터를 산출할 수 있는 프로그램을 개발하고, 튜닝절차서 및 튜닝 파라미터 데이터베이스를 포함하는 전문가 시스템을 구축함으로써 튜닝 초보자도 전문가 시스템을 활용하여 제어기 튜닝을 수행할 수 있다. 개발이 완료되면 향후 발전소 튜닝 Process Guide로 활용될 것이다.

4) 튜닝 전문가 시스템 통합 플랫폼 개발

제어시스템 튜닝은 고도의 경험을 갖춘 전문가에 의해 수행되고 있지만 튜닝 절차와 기법에 대한 노하우 전수가

5) 발전소 자체 튜닝

튜닝과제 기간 중 해외 튜닝 전문가를 초청하여 튜닝



[그림 3] 튜닝전문가 시스템 통합 플랫폼 구성

기술 및 노하우에 대한 교육을 5개 발전사 계측제어 정비원을 대상으로 시행하였다. 또한, 삼천포화력 3호기, 보령화력 6호기 제어설비 개조 후 제어설비 튜닝 시 해외 전문가와 공동으로 튜닝을 수행하면서 방법 및 경험에 대한 전문기술도 습득하였다.

보령화력 5호기 개조공사 후 튜닝과 보령화력 1호기 복구공사 후 튜닝은 Air Balance Test, 정특성시험, 보일러 스텝시험, 동특성시험을 통해 자체적으로 수행하여 설비의 안정적인 운전과 설비 신뢰성을 확보하였다. 향후, 국내발전소 튜닝을 자체적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

3. 전망

국내 튜닝기술로 외국 기술자의 도움없이 원활한 제어 설비 튜닝과 효율적인 발전소 시운전 등 공기를 단축할 수 있다. 또한, 외국인 튜닝기술자 초청에 대한 외화절감 효과와 해외사업 진출을 통한 수익창출을 도모할 수 있고, 발전소 최적 튜닝을 수행하면 기존 발전소 효율을 0.1 ~ 0.5% 향상시킬 수 있는 것으로 연구 결과가 나타났다. 보일러의 안정적인 튜닝은 튜브 파열에 의한 발전정지를 적극적으로 예방할 수 있다. 이러한 튜닝을 통해 설비의 안정적인 운전과 설비 수명단축 예방에 의한 비용절감, 경제적으로 유리한 저 열량탄 사용을 통한 발전원가 저감 등의 효과까지 고려한다면 국내의 산업 경제적 측면에 미치는 영향은 매우 클 것으로 전망된다. KEA