2003년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2003.11.13~15)

발전기에 적용된 전력계통안정화장치(PSS)의 사례 분석

이상성* 이선영** 이영진** 정우덕** 장광수** 박종근** 문승일** 강상희***
*기초전력공학공동연구소 **서울대 ***명지대

Case Analysis of Power System Stabilizer applied on Generator

S. S. Lee* S. Y. Li** Y. J. Lee** W. D. Chung** G. S. Jang** J. K. Park** S. I. Moon** S. H. Kang***
*EESRI **Seoul National University ***Myongji University

Abstract - 본 연구에서는 발전기에 적용된 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer)의 적용사례를 분석한다. 전력계통안정화장치에 적용된 알고리즘은 Lead-Lag 제어기가 있고, 현대 제어이론에 바탕을 둔 LQR, LQG, H∞, 슬라이딩모드 제어기, 비선형궤환제어기가 있다. 그 외에 퍼지제어기, 뉴럴 제어기, 진화연산 제어기등이 있다. 이중에 전력계통안정화장치의 제어알고리즘에 대하여 대표적인 사례를 파악하고져 한다.

1. 서 론

발전기를 포함한 전력계통은 외란(사고나 선로 차단등)으로 인하여 저주파진동을 당면하게 된다. 이 진동은 지속하거나, 만일 적절한 제동을 이용할 수 없다면, 발전기는 심하게 흔들리거나 탈조하게 되며, 그 즉시 계통은 분리되어야 한다. 계통의 제동을 개선하기 위하여, 발전기는 여자기의 보조적으로 안정화 신호를 제공하는 전력계통안정화장치(PSSs)를 갖추어야 한다.

전력계통 내 발전기의 여자기 입력에 보조신호로서 주입하여 제동효과를 주는 PSS에 적용된 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다.

첫 번째로 고전적 전력계통안정화장치, 즉 Lead-Lag Compensator이고, 속도 입력, 주파수 입력, 전력 입력 안정화장치가 있다. 이는 F. P. deMello and C. Concordia에 의해 많은 연구가 이루어졌다[1]. 이는 보조입력 신호를 활용하는 안정화장치의 일반적인 주파수 응답 특성을 논하며, 튜닝 측면과 성능 발휘를 좌우하는 기본적인 개념도 같이 다룬다. 각기 다른 구조의 현대 제어 기법의 잠재력에도 불구하고, 전력회사들은 여전히 전통적인 진상-지상(lead-lag) PSS 구조를 여전히 선호해 왔었다. 이 고전적 안정화장치를 아직도 선호하는 것은 제어 지령시 전통적인 안정화장치의 파라미터 조정(tuning)의 편리함 때문일 것이다[1,2].

두 번째로 최근에 현대 제어 이론에 바탕을 둔 몇 가지 접근방법은 PSS 설계 문제에 적용되었다. 이는 최적제어, 적응제어, 가변구조제어, 가중치제어를 포함하고 있다. 이 제어기들은 전력 계통의 전체 다이나믹스를 잘 알고 있어야 한다. 이는 제어 파라미터의 적절한 선정이 계통의 동요 시 만족한 성능과 밀접한 관계가 있다는 것을 보여주는 것이다.

세 번째로 어느 정도 정확한 모델을 알 수 없더라도 제어가 가능한 뉴럴이나 퍼지제어기가 있다.

네 번째로 세 번째 경우와 다소 유사한 진화 알고리즘(GA)이 있으며, 이외에 타부 탐색 알고리즘, 시뮬레이터 어니얼링과 같은 휴리스틱 탐색 알고리즘도 PSS 설계의 문제에 적용되었다. 그 결과는 희망적이었고 최적 PSS 설계를 위한 알고리즘의 잠재성을 확인하였다. 다른 최적화 기법과는 달리, GA는 각기 다른 잠재적인 해를 나타내는 일련의 집단으로 작용하는 집단 탐색 알고리즘이다. 그러므로, GA는 탐색 능력을 개선할 수 있는 암시적인 병행진화를 가지고 있으며, 복잡한 최적화 문제에 적용될 경우에 더욱 빠르게 찾을 수 있다. 불행하게도, 최근의 연구는 GA 성능에 약간의 결점이 발견되었다. 이런 효율의 퇴보는 아주 epistatic 목적함수(즉, 최적화되는 파라미터가 매우 상호연관되어 있는)의 응용에서 뚜렷하게 나타났다. 또한, GA의 조숙한 수렴은 성능을 퇴화시킬 수 있으며, 탐색능력을 감소시킬 수 있다[3].

다섯 번째로 Particle swarm optimization(PSO)라 불리는 새로운 진화 연산법이 최근에 제시되었고 도입되었다. 이 기법은 군집-인식 인간의 역할에 있어 군집 조류학의 원리와 진화 연산을 결합한 것이다. PSO는 고기의 떼(schooling)와 조류의 무리(flocking)와 같은 조직체의 행위에서 동기가 유발되었다. 일반적으로, PSO는 간단한 개념, 구현하기 쉬움과 계산상 효율성으로 특정지을 수 있다. 다른 휴리스틱 기법과는 달리, PSO는 전역 또는 지역 탐색 기능을 개선하기 위하여 유연하고 잘 조화된 구조를 가지고 있다[4].

여섯 번째로 상태 궤환 선형화의 미분 기하학 기법은 전력 시스템 제어를 목적으로 연구되어 왔다. 주요 개념은 비선형 시스템 방정식의 좌표변환을 수행하여 플랜트내의 비선형성이 전체적으로나 또는 부분적으로 사라지도록 새로운 좌표에서 "새로운" 제어입력을 정의하는 것이다. 이런 수식화로 특정 운전점에 대한 부분 Jacobian 선형화보다도 전력계통의 실제적 운전점에서 적합한 선형화를 얻을 수 있다. 궤환 선형화 제어(FBLC)는 두 가지방식으로 전력계통에 적용되어 왔다. 입력-상태 FBLC에서, 시스템 상태는 새로운 제어입력과 새로운 상태(출력은 비선형 함수로 그대로 유지한다)의 선형함수로 된다. 입력-출력 FBLC는 출력이 새로운 제어입력의 선형함수가 되도록 공식화한다[5,6].

2. 전력계통안정화장치(PSS)에 적용된 알고리즘

2.1 고전적 전력계통안정화장치

이 절에서 3가지 고전적 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer), 즉 속도 입력 안정화장치를 먼저 논하고, 주파수와 전력 입력 안정화장치에 관하여 논한다. 보조 입력 신호를 활용하는 안정화장치의 일반적인 주파수 응답 특성을 논하며, 튜닝 측면과 성능 발휘를 좌우하는 기본적인 개념도 같이 다룬다.

(1) 속도 입력 안정화장치

축 속도를 입력받는 전력계통 안정화장치는 GEP(s)의 지연을 보상하여 속도 변화와 위상이 같은 토오크 성분을 만들어내어 회전자 진동의 제동을 증가시켜야 한다.

$$\text{Ideal PSS}_{w}(s) = D_{PSS}/GEP(s) \quad (1)$$

여기서, D_{PSS}는 안정화장치에 요구되는 제동의 기여도를 뜻한다. 이러한 안정화장치의 특성은 실용적이지 못하다. 왜냐하면 GEP(s)의 지연을 완벽하게 보상하기 위해서는 높은 주파수, 높은 이득과 연계된 순수한 미분(differentiation)이 필요하기 때문이다. 실용적인 속도 안정화장치는 지상/진상 단계를 활용하여 관심 주파수 대

역에 대해 GEP(s)의 위상 지연을 보상해야 한다. 이득은 높은 주파수에서 얻음으로써 노이즈의 타격을 줄이고 비틀림 상호작용을 최소화하며, 결과적으로 저주파 통과(low-pass) 및 대역소거필터(band-reject filter)가 필요하게 된다. 세정(washout) 단계가 포함되어 시스템 주파수가 바뀜에 따라 정상상태 전압 치우침을 방지한다.

$$PSS_e(s) = K_s \frac{T_w s}{(1+T_w s)} \frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_2)(1+sT_4)} FILTS(s) \quad (2)$$

(2) 주파수 입력 안정화장치

교류 모선 주파수를 안정화장치 입력으로 사용하게 되면 튜닝 절차와 성능 특성이 속도 입력 안정화장치에서의 그것과 다소 다르게 된다. 주된 차이점은, 회전자 진동에 대한 주파수 신호의 민감도가 외부 송전 시스템이 약해질수록 증가하게 되는 것인데, 이는 약한 송전 시스템에서 안정화장치 출력부터 전기적 토오크까지의 이득이 감소하는 것을 상쇄하는 경향이 있다.

$$S_F(s) = \partial f / \partial \bar{\omega}_G \quad (3)$$

$$S_F(s) \cong X_e / [X_e + X_{GEN}(s)] \quad (4)$$

이 근사값은 수동 제어에서만 유효한데, 왜냐하면, 전압 조절기를 통해 속도에서 입력 신호로 가는 또 다른 경로가 존재하기 때문이다. 이 효과는 전압 조절기를 가지는 발전기의 유효 내부 임피던스를 계산하여 반영시킬 수 있다. 일반적인 전압 조절기 이득의 경우 기계의 유효 임피던스는 안정화장치의 도입에 관해 관심 대상이 되는 주파수 영역에서의 차과도(sub-transient) 리액턴스와 거의 일치한다.

또한, 주파수 신호는 발전기 내의 설비 사이의 것처럼 각각의 설비에 국한된 상황보다는 넓은 범위나 발전기 사이의 진동의 상황에 더 민감하다. 이렇게 되는 것은, 각 설비 사이의 교류 모선의 주파수는 후자의 상황의 경우 노드(node)에 가까워서, 설비들이 일관되게 진동하는 상황에 크게 반응을 하기 때문이다. 그 결과, 발전기 사이나 넓은 지역 사이의 진동 상황에 대해 속도 입력보다 더욱 큰 제동의 기여를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

(3) 전력 입력 안정화장치

가속도를 전력계통 안정화장치의 입력 신호로 활용하는 것이다. 기계력 변동의 효과를 제거하거나 최소화하는 것의 실용적인 어려움은 기계력 변동을 거의 바로 잡을 수 있게 심하게 걸러진(heavily filtered) 속도 신호를 활용함으로써 극복된 것으로 보인다.

전력에 대한 입력 신호 민감성 계수는 다음과 같다.

$$S_p(s) = \frac{\partial P_e}{\partial \bar{\omega}_G} = \frac{\partial (T_e \bar{\omega}_G)}{\partial \bar{\omega}_G} \approx \frac{\partial T_e}{\partial \bar{\omega}_G} + P_{e0}$$

$$= \frac{\omega_b K_{1e}(s)}{s} + P_{e0} = \frac{\omega_b K_{1e}(s)}{s}(1 + s/\omega_{p0}) \quad (5)$$

여기서, T_e, P_e, $\bar{\omega}_G$ 는 모두 일정한 기저의 단위이다. 270°의 위상 지연은 전력 신호를 역으로 취하고 안정화장치의 총 기여도와 GEP(s)가 적분 특성에 의해 90°의 위상 지연이 발생하도록 안정화장치를 설계함으로써 얻을 수 있다. 이 기준에 따라, 이상적인 전력 안정화장치는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Ideal } PSS_P(s) = -\frac{D_{PSS}}{sGEP(s)} \quad (6)$$

전력을 속도의 도함수로 간주했을 때에도 동일한 결과를 얻을 수 있음에 주목한다. 낮은 주파수에서는 GEP(s)의 낮은 위상 지연을 보상하기 위해 지연이 추가되어야 하고, 높은 주파수에서는 GEP(s)와 안정화장치의 2차 지연을 보상하기 위해 안정화장치가 위상 진전을 추가해야 한다. 낮은 주파수에서 지연을, 높은 주파수에서 진전을 키우는 것은 실용적이지 못하다. 왜냐하면, 전력 시스템이 높은 주파수에서는 노이즈 신호가 있고, 낮은 주파수에서는 기계력의 변화처럼 (안정화장치를 위한 순수한 가속도 신호를 제공할 수 있도록 완벽하게 보상되지 않을 경우) 잠재적으로 과도하게 높은 전압 치우침(offset)이 발생할 수 있기 때문이다. 저 주파수 이득은, 속도 입력 안정화장치의 세정(washout) 단계에 해당하는 완전한 적분을 하기보다는 시간 상수를 도입하여 감소시킨다. 작은 진전/지연 단계와 높은 주파수에서의 지연의 혼합을 통해, 가장 높은 부분적 상황의 주파수 부근에 적당한 위상을 유지하면서 주파수에 따른 바람직한 이득 감소를 얻을 수 있다.

2.2 진화 알고리즘을 적용한 안정화장치

유전자 알고리즘은 광범위한 탐색 기술로서 자연계의 적자생존과 유전을 모방하여 최적의 해를 찾는 고도의 방법을 제공한다. 최근 논문에서는 GA를 적용하여 PSS의 파라메타를 튜닝하는 기법이 제시되고 있다. GA 기반 최적화 기법은 rule-based PSS의 파라메타를 튜닝하기 위해 논문에서 이용되었다. 강인성(robustness), 보다 적은 계산량, 구현의 용이 등과 같은 rue-based PSS의 이점은 그대로 유지하였다. GA의 도입함으로써 모든 PSS 파라메타를 동시에 최적으로 튜닝하고, 서로 다른 PSS 사이에서 상호 작용이 가능하게 된다. 이는 GA에 기반하여 계통에서 모든 PSS를 동시에 튜닝하는 방법을 보다 향상시켰다. GA는 계통의 모든 고유치를 안정화 범위(stable domain) 영역 내에 유지시킨다. GA를 사용하여 고정 구조(fixed structure)의 고전적 PSS를 튜닝하는 기법이 논문에서 제시되었다. 이 방법은 목적 함수에 따른 spectrum damping ratio의 합을 최대화시켰고, 이렇게 하여 얻어진 PSS는 강인하게 된다. 최근의 작업에서 우리는 Lead-Lag PSS와 derivative PSS 튜닝하기 위해 기존의 integral of squared error(ISE)에 기반한 방법에 GA search을 적용하는 것을 제안하였다. 이 방법은 가능한 해의 모집단 범위 내에서 각각의 개체의 우수한 정도를 결정하기 위해, 유전자 알고리즘이 탐색할 수 있는 체계 내에서 기존의 Lyapunov 안정성과 파라메타 최적 지수를 통합하였다. 모집단 안의 개별 개체가 갖는 행동은, 문제를 역동적으로 모델링한 목적함수를 통해 진화되었고, 적절한 값을 도출할 수 있었다. 그 후 선택된 개체는 다음 세대를 얻기 위해 유전자 operator를 이용하여 변화시켰다. 이 방법은 따라서 강인적이고, 동시 다발적으로 튜닝되고, 광범위하게 최적화된 PSS 파라메타를 세팅함과 동시에 고전적 최적화 방법의 장점을 유지하는 데에 성공적이었다.

2.3 Particle Swarm Optimization(PSO) 기법을 적용한 전력계통안정화장치

진화 알고리즘과 유사하게, PSO 기법은 개개로 반응하는 입자(particle)의 집단을 사용하여 탐색을 수행한다. 각 입자는 인접한 문제의 후보 해를 나타낸다. PSO 시스템에서, 입자는 비교적 변하지 않는 위치가 마주칠 때까지 또는 계산상 한계가 초과될 때까지 다차원 탐색 공간의 주위를 선회하면서 위치를 변화한다.

사회과학 문헌에, PSO 시스템은 군생하는 모델(social model)과 인식 모델(cognitive model)을 조합한다. 군생하는 요소는 개인이 자신의 경험을 무시하고 주위의 개인들의 성공적인 신조에 따라 그들의 행동을 조절한다는 것을 암시한다. 반면, 인식 요소는 개인들을 고립된 개체로서 취급한다. 입자는 이 모델을 사용하여 위치를 변화시킨다. PSO 기법은 다음과 같은 단계로 설명할 수 있다.

단계 1) (*Initialization*) : 시간은 $t=0$에서 시작하여 무작위 n개의 입자 $\{X_j(0), j=1,2,\ldots,n\}$를 생성한다.

단계 2) (*Time updating*) : 시간의 카운터 $t=t+1$을 갱신한다.

단계 3) (*Weight updating*) : 관성 가중치 $w(t)=aw(t-1)$을

갱신한다.

단계 4) (*Velocity updating*) : 전역 최선과 개개의 최선을 사용하여, k번째 차원의 j번째 입자 속도는 다음 식에 따라서 갱신된다.

$$v_{j,k}(t) = w(t)\, v_{j,k}(t-1) + c_1 r_1 (x^*_{j,k}(t-1) - x_{j,k}(t-1)) + c_2 r_2 (x^{**}_{j,k}(t-1) - x_{j,k}(t-1)) \quad (7)$$

여기서, c_1과 c_2는 양의 상수이다. 그리고 r_1과 r_2는 $[0,1]$의 일정하게 분포된 랜덤수이다.

단계 5) (*Position updating*) : 갱신된 속도에 바탕을 두고, 각 입자는 다음 식에 따라 그 위치를 변화시킨다.

$$x_{j,k}(t) = v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) \quad (8)$$

단계 6) (*Individual best updating*) : 각 입자는 갱신 위치에 따라 값이 구해진다. 만일 $J_j < J^*_j$, $j=1,2,\ldots,n$ 이라면, 개개의 최선치는 $X^*_j(t) = X_j(t)$와 $J^*_j = J_j$으로 갱신되고, 단계7로 간다. 그렇지 않으면, 단계7로 간다.

단계 7) (*Global best updating*) : J^*_j 중에서 최소값 $J_{\min}$을 찾는다. 만일 $J_{\min} < J^{**}$이라면, 전역의 최선치는 $X^{**}(t) = X_{\min}(t)$와 $J^{**} = J_{\min}$으로 갱신되고, 단계8로 간다. 그렇지 않으면, 단계8로 간다.

단계 8) (*Stopping criteria*) : 만일 중단 기준중의 하나가 만족되면, 정지한다. 그렇지 않으면, 단계2로 간다.

2.4 비선형화 기법을 적용한 전력계통안정화장치

다음 시스템은 affine 비선형 시스템의 부류에 속한다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \quad (9)$$

$$y = h(x) \quad (10)$$

여기서, f와 g는 smooth 함수이다. $x \in R^n$은 상태, $u \in R$은 입력, $y \in R$은 출력이다. 위 시스템의 상대 차수는 $u(v_f)$가 나타날 때까지 $y(v_t)$을 미분하여 얻을 수 있다. 이는 시스템의 *Lie* derivatives를 계산하여 얻을 수 있다.

$$L_f h = \nabla h \dot{x} = \frac{dh}{dx_1}\dot{x}_1 + \cdots + \frac{dh}{dx_5}\dot{x}_5 + \cdots + \cdots \frac{dh}{dx_7}\dot{x}_7 \quad (11)$$

v_f는 $\dot{x}_5(\dot{\lambda}_f)$에 대한 표현식임을 관측할 수 있다. 그러므로, 출력은 제어입력 v_f가 나타나기 전에 한 번 미분을 필요로 한다(즉., 상대 차수가 1이다). 이 시스템은 시스템의 실제적인 운전영역에 관하여 최소위상(*minimum phase*)이라는 것을 보여 주고 있다. 상대차수와 최소위상 성질로부터, 시스템에 제시된 추정 모델은 단일-입력 단일-출력의 상대차수가 1인 비선형 이산시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(k+1) = f[y(k),\ldots,y(k-n+1),u(k-1),\ldots,u(k-m)] + g[y(k),\ldots,y(k-n+1),u(k-1),\ldots,u(k-m)] \cdot u(k) \quad (12)$$

여기서, y는 출력, u는 입력이다. 제안된 구성은 FBLC와 합성하기 위하여 발전기 모델의 신경망 추정기를 사용하였다. 이 경우에, 여자 제어기/안정화장치는 단순한 극점배치로 되어 있다. 기호를 단순화하기 위하여, 우리는 위의 수식의 괄호 안의 항을 없앨 것이다. 전력계통은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$y(k+1) = f[\cdot] + g[\cdot] \cdot u(k) \quad (13)$$

$$\hat{y}(k+1) = \hat{f}[\cdot] + \hat{g}[\cdot] \cdot u(k) \quad (14)$$

논의를 돕기 위하여, 위 시스템의 상태공간 형식을 다음과 같은 상태방정식으로 선택하여 구성할 수 있다.

$$z_{11}(k) = y(k-n+1)$$

$$z_{2m}(k) = u(k-1)$$

$$z = [\, z_1 \;\; z_2]^T = [\, z_{11} \ldots z_{1n} \mid z_{21} \ldots z_{2m}]^T$$

이는 다음과 같은 상태공간 모델로 될 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{11}(k+1) &= z_{12}(k) \\ &\vdots \\ z_{1n}(k) &= f[\, z(k)] + g[\, z(k)] \cdot u(k) = y[k+1] \\ z_{21}(k+1) &= z_{22}(k) \\ &\vdots \\ z_{2m}(k+1) &= u(k) \\ y(k) &= z_{1n}(k) \end{aligned} \quad (15)$$

만일 $r(k)$가 추적될 기준이라면, 발전기에 입력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u(k) = \frac{1}{g[\, z(k)]}[-f[\, z(k)] + r(k)] \quad (16)$$

이는 $r(k)$에서 시스템 출력으로 사상(mapping)이 선형이므로 비선형성을 감출 수 있다. FBLC 설계는 원하는 시스템 응답을 얻기 위하여 식(16)의 $r(k)$를 수정하여 근사적으로 예측할 수 있다. 최후에, 우리는 실제 제어입력 $\beta(k)$를 기준을 수정하는 궤환 선형화 시스템으로 정의한다.

3. 결 론

본 연구에서는 발전기에 적용된 전력계통안정화장치(PSS)의 적용사례를 살펴보았다. 현재 각 발전소에서 설치되어 사용되고 있는 PSS는 고전적 Lead-Lag 보상기 형식이다.

그 외 현대 제어이론에 바탕을 둔 LQR, LQG, H_∞, 슬라이딩모드 제어기, 비선형 제어기가 있고, 튜닝에 바탕을 둔 퍼지제어기, 뉴럴 제어기, 유전자 제어기 등이 현재 비선형성을 다루기 위한 연구가 계속되고 있다. 이런 형태의 제어기로는 전력계통의 고유 특성인 매우 심한 비선형성을 다루기는 다소 무리가 따르기 때문에 그다지 효과가 좋다고는 볼 수 없다.

이들 제어기는 각기 나름대로 장단점을 가지고 있으며, 아직은 모든 범위에서 만족할 만한 제어기가 없는 것 같다. 이런 비선형을 제어하기 위하여 계속연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] F. P. deMello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", *IEEE Trans.* Vol. PAS-88, April 1969, pp. 189-202.

[2] E. V. Larsen and D. A. Swann, "Appling power system stabilizers Part I: General concepts", *IEEE Trans.* Vol. PAS-100, June, 1981, pp. 3017-3033.

[3] A. Andreoiu and K. Bhattacharya, "Robust tuning of power system stabilizers using a Lyapunov method based genetic algorithm", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 17, No. 3, pp. 406-413, September. 2002.

[4] M. A. Abido, "Optimal design of power system stabilizer using particle swarm optimization", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 17, No. 3, pp. 406-413, September. 2002.

[5] Q. Lu and Y. Sun, "Nonlinear stabilizing control of multimachine systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 236-241, Feb. 1989.

[6] K. Fregene and D. Kennedy, "Stabilizing control of a high-order generator model by adaptive feedback linearization", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 18, pp. 149-156, Mar. 2003.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.