

확장된 PI 제어를 이용한 전력계통 안정도 향상에 관한 연구

김현성^{*} 민경일^{*} 류현수^{**} 문영현^{*}
연세대학교 전기전자공학부^{*}, 전력거래소^{**}

Extended Integral based Governor Control for Power System Stabilization

Hyun-Sung Kim^{*}, Kyoung-Il Min^{*}, Heon-Su Ryu^{**}, Young-Hyun Moon^{*}
Yonsei University^{*}, Korea Power Exchange^{**}

Abstract - 본 논문에서는 댐핑이 고려된 전력계통에서 동요시 안정도를 향상시킬 수 있는 확장된 PI제어를 이용한 조속기 제어를 제안하였다. 전력계통에서의 동요는 대부분 고장기간 동안에 발전기에 저장된 과잉운동에너지에 의해 발생한다. 계통이 안정하도록 하기 위해서 과잉에너지를 효과적으로 다루려면 보통 직접법을 사용된다. 과잉에너지를 제어하기 위한 직접적인 방법으로는 LFC(Load Frequency Control)의 제한이 활용된다. 확장된 PI제어 방식이 적용된 제어기는 지역내에서와 지역사이에서의 동요를 감쇄시키기 위한 조속기에 적용될 수 있다. 또한 제안된 제어기는 조속기에 스텝밸브 제한 조건이나 발전을 제약조건(Generation Rate Constraint; GRC)과 같은 특이점이 존재할 때에도 우수한 성능을 보여주었다. 시뮬레이션은 두지역의 다기계통에서 부하를 변화시켜가며 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 제안된 PI제어기를 기존의 PI 제어기와 비교하여 매우 향상된 성능을 보여주었다.

1. 서 론

현대의 전력계통은 그 규모가 커지고 복잡해짐에 따라 1990년대 중반에 경험했던 것처럼 광역정전으로 이어지면서 장기간, 지역간 그리고 저주파에서와 같은 다양한 동요에서 계통을 효과적으로 안정화시키는 것에 많은 관심이 모아지고 있다. 전력계통의 안정도는 대부분 고장시 발전기 내에 저장되는 과잉 운동에너지와 밀접한 관련이 있다. 이것을 효과적으로 제어하여 계통을 안정시키기 위해서는 보통 직접법이 사용되는데 가장 많이 쓰이는 방법으로는 스텝밸브제어가 있다. 스텝밸브 위치제한과 제한 이득상수의 제어 범위제한과 같은 부하 주파수 제어의 근본 문제점을 극복할 수 있는 조속기 제어를 이용한다면 고압 터빈의 기계적 출력을 대략 0.7~1.07 pu의 범위 내에서 제어할 수 있다. 더구나 부하 주파수 제어 루프는 Q-V 제어 루프에 비해 상대적으로 빠른 응답을 얻을 수 있다. 기존 PI 제어기의 특징은 과거로부터 누적되어온 편차를 플랜트로 제한시킴으로써 정상상태의 편차를 0으로 만드는 것이다. 그러나 시스템이 이미 정상상태에 도달한 후에도 과거로부터 누적된 에러는 현재상태에 계속해서 영향을 미치게 된다. 이런 불필요한 누적 에러의 효과를 제거하기 위해 망각소자를 도입하였다. 망각소자의 형태는 여러 가지가 있지만, 지수형 감쇠함수를 선택하였다. 이 경우 감쇠함수의 감쇠인자 λ가 존재하여 확장적분 제어는 convolution 적분 형태로 표현된다. 확장적분 제어의 제어 성능은 감쇠인자에 크게 의존한다. 확장적분 제어기가 최적 제어 또는 최적 제어가 가깝게 동작하기 위해서는 시스템 동적 특성에 따라 감쇠인자가 빠르게 변화되어야 한다. 확장적분 제어기는 큰 외란에 대해서 만족할 만한 제어 성능을 보이며, 스텝밸브 위치제한, 밸브 속도제한, 그리고 GRC와 같은 비선형성을 고려한 시스템에 대해서도 유효한 제어 성능을 발휘하였다.

2. 본 론

2.1 확장 적분제어 방식(확장된 PI 제어)

일반적으로 PI 제어기는 출력 신호의 에러와 그 에러의 적분값을 합하여 플랜트로 제한시킨다. 그림 2.1에서 보인 바와 같이, 일반적인 PI 제어기는 비례부분(K)과 적분부분(H(S)=K_I/s)으로 구성되어 있다.

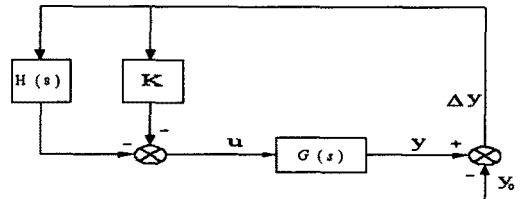


그림 2.1 일반적인 PI 제어기의 블록선도

PI 제어기는 상태변수의 에러를 완벽하게 0으로 줄인다. 그러나 몇몇 제어문제에서 PI제어기는 다른 제어 목적을 수행하는데 방해요인으로 작용할 때가 있다. 과거의 불필요한 정보가 담긴 신호가 플랜트로 입력됨으로, 이 신호의 적분값은 플랜트가 정상상태에 도달하는데 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 불필요한 신호를 제거하기 위하여 확장 적분제어를 개발한다. 확장적분 제어는 convolution 적분 개념을 도입하여, 일반 PI의 적분부분(H(S)=K_I/s)을 convolution 적분으로 대체한다. 확장적분제어에서 사용할 convolution 적분형태를 다음과 같은 지수형 감쇠 함수로 선택한다.

$$h(t) = e^{-\lambda t} u(t) \tag{2.1}$$

여기서 주목할 것은 확장적분 제어는 망각소자를 사용하여 과거 에러의 누적을 제거한다는 점이다. 본 연구에서는 망각소자를 (2.1)과 같은 지수형 감쇠함수로 선택하였다. 감쇠함수에서 감쇠인자 λ를 도입하여 다음과 같은 확장적분 제한 루프를 형성한다

$$\int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} \Delta f(t) d\tau, \quad \text{주파수} \quad \text{도메인} \quad \frac{1}{(s+\lambda)}$$

(2.2)

표 2.1 전달함수와 그래프

분전달함수	Convolution 적분	Conventional PI
H(s)	$\frac{1}{(s+\lambda)}$	$\frac{1}{s}$
그래프		

식 (2.2)는 시간이 충분히 흐르면 플랜트로 변환되는 여러의 적분치가 점차 줄어들게 됨을 의미하며, 곧 확장 적분제어의 기본 개념이다. 표 2.1에 convolution 적분과 기존의 PI 제어 방식을 비교하여 나타내었다. 확장 적분제어가 부하 주파수에 쓰일 때 또 다른 하나의 특징이 존재한다. 기존 PI 제어방식은 정상상태의 주파수 편차를 0으로 만든다는 것은 잘 알려져 있다. 즉 PI 제어기는 주파수 편차를 0으로 만들기 위해 다음과 같은 제어 신호를 만든다.

$$\delta_i = \int_0^t \Delta f_i dt + \delta_{i0} \quad (2.3)$$

여기서 주목할 점은 주파수 편차 적분을 위한 초기 시간을 모든 발전기에 대해 동일하게 설정하기가 힘들다는 것이다. 다시 말하면, 식 (2.3)의 δ_{i0} 를 모든 발전기에서 동일하도록 결정하기가 힘들다. 이러한 이유 때문에 모든 발전기에 PI 제어기를 채택하지 않는다. 실제로 어느 하나의 발전기만 PI 제어기에 의해 제어되고 나머지 발전기는 비례제어에 의해 제어된다. 그러나 확장 적분 제어기는 똑같은 초기시간을 필요로 하지 않으므로 어느 발전기나 동시에 적용될 수 있다. 그렇게 되면 비례제어가 되는 발전기에 비해 확장 적분 제어가 되는 발전기가 훨씬 우수한 제어성능을 나타낸다. 식 (2.2)를 보면 알 수 있듯이 확장 적분 제어의 성능은 감쇠인자 λ 에 크게 의존한다. 감쇠인자는 계관 신호의 편차정도에 비례하여 그 값이 달라져야 한다. 큰 동요가 제한되면 큰 감쇠인자를 선택하여 예러가 빨리 소거되도록 하고, 작은 동요에 대하여 작은 감쇠인자를 선택하여 천천히 소거되도록 한다. 부하는 끊임없이 변하고, 조속기에는 GRC와 같은 비선형 특성이 존재하기 때문에 분석적 도구를 이용하여 시간 변화 특성을 갖는 감쇠인자를 결정하는 데 본 연구에서는 시행착오법으로 직접 수치를 넣어가며 최적의 조건을 찾았다. 시스템 동적 특성에 대한 지표로서 편차수준을 도입한다. 편차 수준은 주파수 편차, 주파수 변화율, 발전량, 외란의 함수로서 다음과 같이 구한다.

$$\text{편차 수준} = \sqrt{k_1 \Delta \omega^2 + k_2 \omega'^2} \quad (2.4)$$

위 식에서 가중치 k_1, k_2 은 시스템 특성에 따라 달리 정한다. 추가로, 시스템 성능은 다음과 같은 성능 지표 함수를 이용하여 평가한다

$$PI = \int_{t_0}^{\infty} (a_1 \Delta \omega^2 + a_2 \Delta \delta^2) dt \quad (2.5)$$

(2.5)

where a_1, a_2 : weighting factors

(2.4) 편차수준과 식 (2.5) 성능지표를 기초로 하여 최적의 시스템 성능을 얻을 수 있는 감쇠인자와 계관 이득상수를 구해야 한다. 특히 감쇠인자는 편차수준 (2.4)을 여러 단계로 나누어 각 단계에 맞는 값이 선택되어야 한다. 확장 적분 제어가 조속기 제어에 적용된다면, 감쇠상수를 미리 결정한 후 시스템 동적 특성에 따라 실시간으로 적용할 수 있다. 표 2.2는 감쇠인자와 가중치의 한 예이다

표 2.2 감쇠인자의 각 단계별 값

편차 수준 d	감쇠인자 λ	가중치 k_1, k_2
Very large	0.5	시스템 특성에 맞게 결정해야 한다
Large	0.3	
Medium	0.2	
Small	0.1	
Very small	0.0	

2.2 확장 적분제어의 조속기 제어에 이용

본 절에서는 확장 적분제어 기반 조속기를 GRC가 고

려된 부하 주파수 제어에 적용한 사례를 제시하고자 한다. 전력 계통에서 유효 전력을 제어하는 목적은 계획된 시스템 주파수를 유지하고, 미리 결정된 범위 내에서 타이 라인간 전력 교환을 하고자 하는 것이다. 그림 2.2에 확장 적분 제어가 설치된 부하 주파수 시스템을 나타내었다.

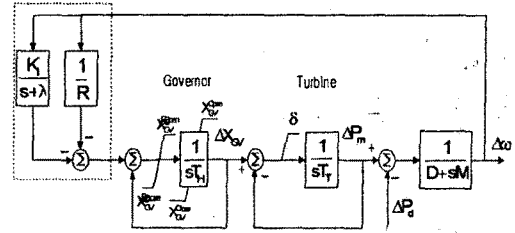


그림 2.2 확장 적분제어가 설치된 부하 주파수 제어계

대상 부하 주파수 제어에는 스팀 밸브 위치제한 ($X_{GV}^{open} \sim X_{GV}^{close}$)과 발전을 제약(GRC)을 고려하였다. 또한 과도한 밸브의 동작을 막기 위하여 스팀 밸브 속도 제한 ($\dot{X}_{GV}^{open} \sim \dot{X}_{GV}^{close}$)을 추가하였다. 이러한 제약 조건들은 부하 주파수 제어계를 비선형 시스템으로 만든다. GRC를 고려한 시스템은 그렇지 않은 시스템에 비하여 더 크고 더 지속되는 시스템 동요를 일으킨다는 사실은 이미 다른 연구를 통하여 알려져 있다. 보일러의 스팀이 점차 내려가서 더 이상 유지할 수 없을 때야 비로소 발전기 출력은 GRC에 의해 제약을 받게 된다. 발전이 줄어드는 경우에는 스팀 밸브를 닫는 경우이므로 GRC를 고려할 이유가 없다. 그러나 이전 연구에서는 발전량이 줄어드는 경우에도 GRC를 고려했다. 이것은 발전기 출력이 급속히 떨어지면 다시 회복하기 힘들기 때문이다.

2.3 확장 적분제어의 전력계통에 적용 시뮬레이션 결과 및 고찰

확장 적분제어의 제어 성능을 평가하고자 전력계통의 부하주파수 제어에 적용하여 시모의 실험을 실시하였다. 대기 11모선 시스템에서 부하가 변화할 때 시스템 응답을 구하여 제어기의 성능을 검증하였다. 확장 적분제어를 화력발전기의 부하주파수 제어에 적용하여 테스트하였다. 외란 ΔP_D 의 크기를 200MW만큼 증가시켜 시뮬레이션을 실행하였다. 이 경우, 스팀 밸브가 위치 제한에 도달하여 위치제한 조건이 확장 적분 제어의 성능에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

그림 2.3에서 보는 바와 같이 이 시스템은 지역간모드와 지역모드가 모두 존재하는 시스템이다. 그림 2.2에서 본 바와 같이 조속기 시스템에 GRC와 스팀밸브 제한조건이 존재하는 모델을 사용하였다. 모든 시뮬레이션은 비선형 과도안정도 프로그램인 CYME package의 PSFA-STAB를 사용하였다. 시스템의 파라미터들과 스팀터빈의 제약 조건은 표 2.3의 값들을 적용하였다. 본 연구에서는 확장 적분제어 방식을 모든 발전기에 적용하였다. 또한 비교를 위하여 기존의 제어방식을 사용하는 시스템에는, 초기시간을 동일하게 할 수 없는 적분비례제어 방식의 특성으로 1번 발전기에만 적분비례(PI)제어 방식을 적용하고 나머지 발전기에는 비례(P)제어 방식을 적용한 시스템으로 시뮬레이션하였다.

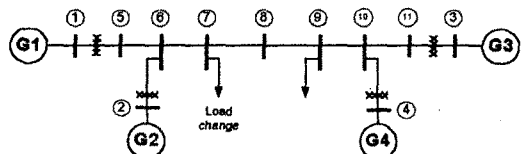
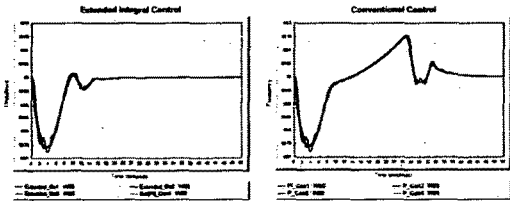


그림 2.3 4기 11모선 시스템

표 2.3 시스템 파라미터 및 스텝터빈 제약조건

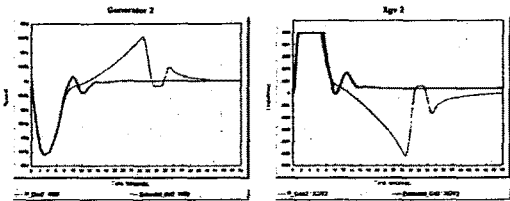
TH	0.1초	TB	10초
TT	0.3초	$\delta(\text{GRC})$	0.1pu/분
X_{GV}^{open}	1.2pu	$\bar{X}_{GV}^{\text{open}}$	0.4pu/초
X_{GV}^{close}	0.4pu	$\bar{X}_{GV}^{\text{close}}$	1.5pu/초

그림 2.4는 제안한 제어기와 기존의 제어기가 적용된 모든 발전기의 주파수 응답을 보여주고 있다. 이 때 모든 발전기에 GRC를 적용한 것이다. 기존의 제어방식과 비교해보면 제안한 제어방식이 작은 오버슈트를 보이면서 더욱 빠르게 수렴하여 효과적으로 시스템을 안정시키고 있음을 볼 수 있다. 2번 발전기에서의 f , P_m , X_{GV} 응답은 그림 2.5에 나타내었다. 이 때에도 스텝터빈 제약조건과 GRC같은 비선형 제약조건 하에서 얻어진 값들이다. 그림 2.5(a)에서 본 바와 같이 기존의 제어기는 시스템의 동요를 효과적으로 줄여주지 못하는 반면, 제안한 제어기는 주파수가 거의 15초만에 완벽하게 수렴됨을 볼 수 있다. 이것은 확장 적분제어는 시스템이 정상상태로 돌아오는 것을 방해하는 요소들을 줄여서 과거의 오차에 대한 적분값을 감소시키기 때문이다. 그림 2.5(b)는 제한된 스텝터빈 값을 보여주고 있다. 부하가 증가할 때, 밸브의 위치는 몇초간 상한선에서 운전됨을 볼 수 있다. 그림 2.5(c)는 0.1pu/min의 GRC에 따라 움직이는 기계적 출력을 볼 수 있다. 이로써 제안한 제어방식이 기존의 제어방식보다 시스템의 동요를 더 효과적으로 수렴시킴을 볼 수 있다.

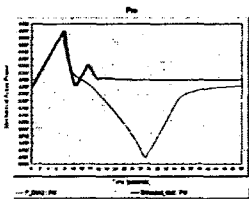


(a) 제안된 방법 (b) 기존의 방법

그림 2.4 확장 적분제어 방식과 기존제어 방식에서의 주파수 응답



(a) 주파수 (b) 스텝터빈위치 XGV



(c) 기계적 출력 Pm

그림 2.5 2번 발전기의 시스템 응답

3. 결 론

전력계통은 시스템의 동요가 과급될 경우 광역 정전으로 이어지는 위험을 지니고 있다. 보통 안정도는 고장기간 동안 발전기에 축적된 잉여 운동에너지에 크게 영향을 받는다. 따라서 전력계통 안정화를 향상시킬 수 있는 가장 직접적인 방법은 고장기간 동안 쌓인 잉여에너지에 대한 효과적인 제어이다. 이러한 제어를 구현하는 방법으로 스텝터빈은 과잉 운동에너지를 직접 제어할 수 있는 좋은 수단이 된다. 지금까지는 스텝터빈을 이용하여 과잉 운동 에너지를 직접 제어하기 위하여 PI제어가 많이 사용되었다. PI제어기가 가지는 수렴성이 뛰어나기 때문이다. 그러나 PI제어 동작 과정에서 과거 에러의 적분은 현재 정상 상태 동작점에 지속적으로 영향을 주게되고 이로 인해 다른 제어 목적에 방해요인으로 작용한다. 또한 기존의 PI 제어기는 스텝터빈 제한조건이나 발전을 제약조건(GRC)와 같은 특이점이 고려된 상황에서는 효과적인 제어를 하지 못하였다. 본 논문에서는 이러한 기존의 PI제어기의 문제점을 해결하기 위해 확장 적분제어에 기반을 둔 조속기 제어기를 개발하였다. 확장 적분제어의 기본 아이디어는 망각소자를 이용하여 과거로부터 누적된 오차의 효과를 제거하는 것이다. 본 실험에서는 지수형 감쇠함수를 가정하였고, 감쇠인자를 주파수 변화 편차에 비례적으로 변화시켰다. 확장된 적분제어 기반 조속기 제어기는 망각소자를 사용하여 과거로부터 누적된 오차의 효과를 제거할 수 있는 제어기이다. 이는 기존 PI제어기에서 발생하는 과도한 오버슈트를 줄여주고, 기존의 PI제어기에서 보다 시스템의 동요가 더욱더 빠르게 수렴하도록 해주었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y. H. Moon, et al., "Modified PID Load-Frequency Control with the Consideration of valve Position Limits", Proceedings of the IEEE PES 1999 Winter Meeting, Vol. 1, pp 701-706, Feb. 1999
- [2] Y. H. Moon, et al., "Improvement of System Damping by Using the Differential Feedback in the Load Frequency Control", Proceedings of the IEEE PES 1999 Winter Meeting, Vol. 1, pp 683-688, Feb. 1999
- [3] Y. H. Moon, et al., "Optimal Tracking Approach to Load Frequency Control in Power System", Proceedings of the IEEE PES 2000 Winter Meeting, Jan. 2000
- [4] Magdy E. Aboul-Ela, A.A. Sallam, James D. McCally, A.A. Fouad, "Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No.2, pp767-773, May 1996
- [5] F. Fatehi, J.R. Smith, D.A. Pierre, "Robust Power System Controller Design Based on Measured Models", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No.2, pp1963-1968, May, 1996
- [6] Xiaoqing Yang, Ali Feliachi, "Stabilization of Inter-Area Oscillation Modes Through Excitation Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.1, pp494-502, Feb,1994
- [7] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems", IEEE Trans. PWRs., Vol. 6, No.3, pp914-921, August, 1991
- [8] Y.-H. Moon, H.-S. Ryu, K.-Y. Jung and H.-W. Rhew, "Extended Integral Control for Load Frequency Control with the Consideration of Generation-Rate Constraints", Proceedings of the IEEE PES 2000 SM, Seattle USA, pp.1877-1882, July 2000
- [9] W.C. Chan, Y.Y. Hsu, "Automatic Generation Control of Interconnected Power Systems Using Variable-Structure Controllers", IEE Proc. Vol. 128, Part C, No.5, pp 269-279, Sep. 1981
- [10] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994