

전력계통 안정도 향상을 위한 Output Feedback PID 조속기 제어

정원식*, 문형준*, 정치훈*, 문영현*
연세대*

Output Feedback PID based Governor Control for Power System Stabilization

Won-Sik Jung*, Hyung-Jun Moon*, Chi-Hoon Jung*, Young-Hyun Moon*
Yonsei University*

Abstract - 본 논문에서는 전력계통의 동요시 넓은 범위의 안정영역을 확보하고 발전기의 댐핑을 향상시킬 수 있는 새로운 조속기 제어를 제안한다. 전력계통의 안정도는 대부분 고장기간 동안 발전기에 축적된 잉여 운동에너지에 크게 영향을 받기 때문에 이러한 잉여에너지에 대한 효과적인 제어는 조속기를 통해 이루어 질 수 있으며, 전력계통 안정도를 향상시킬 수 있는 가장 직접적인 방법이다. 제안된 Output Feedback 제어기는 모든 주파수 조절상수(R)에 대해 넓은 범위의 안정성을 보장하고, 미분기를 대신할 수 있도록 발전기 동요방정식을 적용한다.

분에 위치시킴으로써, PID의 각 제어기 계수에 대한 비율을 일정하게 정해지고, 궤환 루프의 PID 제어는 속도 조절계수 R에 의해 동시에 이루어진다. 수정된 PID 제어기는 미분계환 이득상수와 적분계환 이득상수를 일정한 값 이내로 선택한다면 모든 크기의 주파수 조절상수 R에 대하여 절대적인 안정성을 보장할 수 있다.

1. 서 론

전력계통에서는 크고 작은 외란이 발생하는데 규모가 큰 외란이 발생할 경우 발전과 부하간의 심각한 불균형을 초래하여 주파수 불안정화를 초래하고, 최악의 경우에는 대규모 정전으로 이어질 수 있는 심각한 사태가 발생하게 된다. 전력계통에 발생한 장기 동요, 지역간 동요 그리고 저주파수 동요를 안정화시키는 문제는 주로 잉여 운동 에너지에 관련된 것으로 이 에너지는 고장기간 동안에 발전기에 쌓인 에너지이다. 따라서 잉여에너지에 대한 효과적인 제어는 계통 안정화를 달성할 수 있는 가장 직접적인 방법이 될 수 있다. 대표적인 방법으로는 스팀밸브제어가 있다. 스팀밸브의 위치제함과 궤환 이득상수의 제어 범위제한과 같은 부하 주파수 제어계의 근본 문제점을 극복할 수 있는 조속기 제어를 이용한다면 Q-V 제어루프에 비해 상대적으로 빠른 응답을 얻을 수 있다. 그러나 지금까지 계통 안정화를 위해 조속기 제어를 활용하려는 시도가 별로 없었다. 이것은 기존의 모든 조속기 제어기들은 주파수 궤환 이득상수를 증가시키면 부하 주파수 루프에 불안정을 초래한다는 문제점을 안고 있기 때문이다. 주파수 궤환 이득상수의 제어 범위는 매우 제한적이며 통상 5%로 설정되어 있다. 또한 고주파 잡음은 미분기가 쓰이는 PID 또는 PI 제어기에서 증폭되어 시스템에 악영향을 주어 주파수 조절은 더욱 힘들어지고 광범위하고 오래 지속되는 동요가 발생하게 된다. 본 논문에서는 넓은 범위의 안정 영역을 확보하고 잡음에 상관없이 효과적으로 시스템을 제어할 수 있는 새로운 조속기 제어를 제안하고자 한다.

2.2. Output Feedback PID 기반 조속기 제어기

미분신호의 입력에 있어 노이즈에 취약한 PID 제어의 단점을 보완하기 위하여 주파수 조절상수의 변화에도 넓은 영역의 안정성을 가지는 동시에 Output Feedback을 이용하여 미분신호를 만들어냄으로써 stabilizer 기능을 갖는 조속기 제어회로를 적용한다. <그림 1>의 수정된 PID 제어기에 대한 주파수 제어시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\Delta \dot{X}_{GV} = \frac{1}{T_H} \left\{ -\Delta X_{GV} - \frac{1}{R} \left(\Delta \omega + K_D \dot{\Delta \omega} + K_I \int \Delta \omega dt \right) \right\} \quad (1)$$

with $X_{GV}^{min} \leq X_{GV} \leq X_{GV}^{max}$

식 (1)의 $K_D \dot{\Delta \omega}$ 의 미분신호가 잡음으로 인해 증폭되어 시스템에 악영향을 미치는 것을 막기 위해 발전기 동요방정식 (2)를 이용하여 미분신호 $\dot{\Delta \omega}$ 를 구현하고자 한다.

$$\frac{M}{w_0} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{D}{w_0} \frac{d \theta}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

단, M : 관성정수[W·sec] D : 계동계수[W]
Pm : 기계적 입력[W] Pe : 전기적 출력[W]
W0 : 정격 각속도[rad/sec]

여기서 $\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \Delta \dot{\omega}$, $\frac{d \theta}{dt} = \Delta \omega$, $\Delta \dot{\omega} = \frac{\pi f}{H} (-D \Delta \omega + P_m - P_e)$

단, M=2H 이므로 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

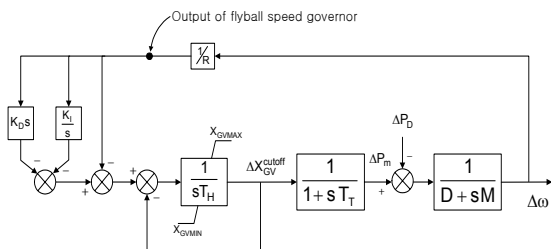
$$\Delta \dot{X}_{GV} = \frac{1}{T_H} \left\{ -\Delta X_{GV} - \frac{1}{R} \left(\Delta \omega + K_D \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e - D \Delta \omega) + K_I \int \Delta \omega dt \right) \right\} \quad (3)$$

수정된 PID의 상태방정식인 식 (1)은 식 (3)과 같이 바뀌게 된다. 위 식에서 Pm, Pe는 output으로 이를 feedback 시키면 각속도의 미분신호를 만들어낼 수 있다.

2. 본 론

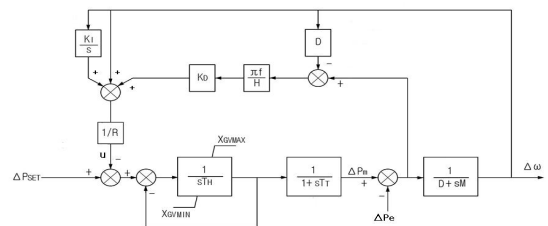
2.1 수정된 PID 조속기

기존 PID 제어기는 각 궤환 이득상수를 각각 개별적으로 조정하여 궤환 제어를 한다. 그러나 수정된 PID는 각각의 이득상수보다 이들 이득상수간의 비율에 더 많은 정보가 들어 있음에 착안하여 기존 PID 제어기의 이득상수가 비례적으로 변화도록 설계된 것이다.



<그림 1> 수정된 PID 제어기가 설치된 주파수 제어계

<그림 1>에서와 같이 속도 조절계수 R을 PID 제어기의 앞부



<그림 2> Output Feedback 제어기가 설치된 주파수 제어계

Output Feedback PID 제어기는 수정된 PID의 상태방정식과

같이 주파수 조절상수 R이 모든 퀘환이득상수 앞에 위치하면서 Swing Equation을 이용하여 미분신호를 구현하게 된다. <그림 2>에 Output Feedback PID 제어가 설치된 주파수 시스템을 나타내었다.

2.3 시뮬레이션 결과

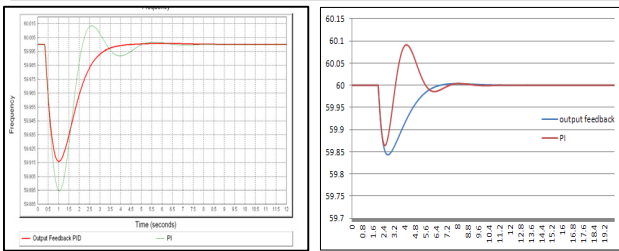
CYME 팩키지와 C 프로그래밍을 이용하여 1기 무한대 모션, 9모션 등 2가지 계통의 부하변화 및 주파수 응답을 통하여 제어기의 성능을 검증하였다.

2.3.1 1기 무한대 모션

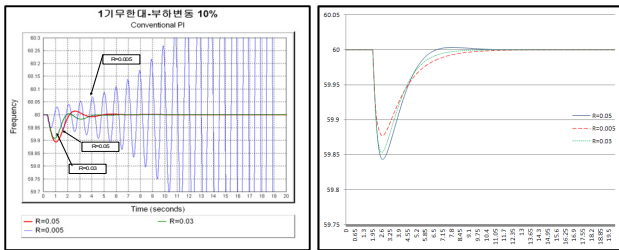
외란은 총 부하의 10%($P_D=5MW$) 적용하였다. <그림 3>은 그에 대한 주파수 응답으로 제안된 제어기가 기존 적분제한 제어기에 비해 계통을 효과적으로 안정시킴을 볼 수 있다.

<표 1> 제어기 이득상수

제안된 제어기		기존 제어기	
주파수 조절상수	5%	주파수 조절상수	5%
미분제한 이득상수	0.3	미분제한 이득상수	0.0
적분제한 이득상수	0.1	적분제한 이득상수	4



<그림 3> $P_D=10\%$ 외란에 대한 주파수 응답



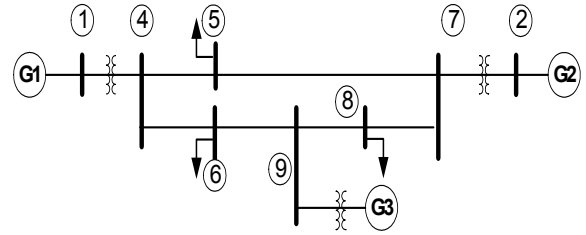
(a) PI (b) Output Feedback

<그림 4> R 변화에 대한 주파수 응답($P_D=10\%$ 외란)

<그림 4>는 주파수 조절상수 R의 변화에 따른 주파수 응답을 보여준 것으로서 5%, 3%, 0.5%를 적용하였다. 제안된 PID 제어기의 경우 주파수 조절상수 R이 작아지더라도 안정된 제어를 하고 있음을 보여주고 있지만 기존 적분제한 제어기의 경우는 R이 작아질 때 어느 값 이상 작아지게 되면 오히려 전력계통을 효과적으로 제어하지 못하고 탈조하고 있음을 보여주고 있다. 이는 제안된 PID 제어기가 넓은 영역에서 안정된 제어가 가능한 수정된 PID를 기반으로 하였기 때문이며, 더욱이 미분기를 사용하지 않는 Output Feedback PID 제어기의 경우 잡음에 강하기 때문에 더욱 효율적인 제어가 가능하게 되는 것이다.

2.3.1 9모션 계통 적용

<그림 5>와 같은 WSCC9 9모션 계통도를 이용하여 부하의 증가를 통해 Output Feedback PID 제어 시스템에 의한 댐핑 개선효과가 계통에 어떻게 나타나는지 살펴보기 위해 외란을 총 부하의 10%($31.5MW / P_D=10\%$)로 설정하였으며, 모션 8번에서 발생하도록 하였다. <그림 6(a)>는 부하가 10% 증가할 때, 제안된 Output Feedback PID 제어기와 기존 PI 제어기의 주파수 응답을 나타낸 것이다. 외란이 8번 버스에서 발생하였기 때문에 탈조할 가능성이 제일 높은 3번 발전기의 주파수 응답을 비교했으며 제안된 제어기가 기존 PI 제어기 보다 외란 발생시 더 우수한 제어성능을 나타냄을 확인할 수 있다. 제안된 PID와 기존 PI 모두 약간의 oscillation이 발생하는 것을 볼 수 있지만 제안된 PID가 기존 PI에 비해 적음을 알 수 있다. <그림 6(b)>는 제안된 Output Feedback PID 제어기의 발전기 댐핑 향상효과를 확인하기 위해 발전기의 전기적 출력을 비교한 것으로 기존 PI 제어기는 발전기 댐핑을 효과적으로 제어하지 못해 전기적 출력이 일정하지 못하고 지속적으로 oscillation이 발생하는 것을 볼 수

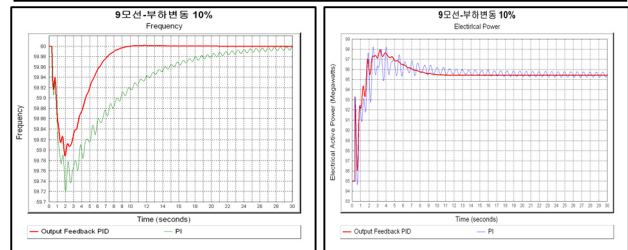


<그림 5> WSCC9 9모션 계통도

있다. 이에 비해 제안된 제어기의 경우 발전기의 시정수 및 계통 계수에 상관없이 발전기 댐핑을 향상시켜 oscillation이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

<표 2> 제어기 이득상수

제안된 제어기		기존 제어기	
주파수 조절상수	5%	주파수 조절상수	5%
미분제한 이득상수	0.3	미분제한 이득상수	0.0
적분제한 이득상수	0.4	적분제한 이득상수	3.0



(a) 주파수 응답

(b) 전기출력(P_E)

<그림 6> $P_D=10\%$ 외란에 대한 주파수 응답 및 전기출력

3. 결 론

스팀밸브를 이용하여 제어를 하게 되면 고장기간 동안에 축적된 잉여 운동에너지를 직접적으로 제어가 가능하여 보다 빠른 계통 안정화가 가능하게 된다. Output Feedback PID 제어기의 기본 개념은 첫째, 각각의 이득상수보다 이들 이득상수간의 비율에 더 많은 정보가 있음을 이용하여 제어기의 이득상수가 비례적으로 변하게 함으로서 모든 크기의 주파수 조절상수 R에 대하여 안정성을 보장하는 것이며, 둘째는 잡음의 증폭가능성이 있는 미분기를 대신하여 Swing Equation을 이용, 미분효과를 적용함으로써 기존 미분기의 역할을 대신하게 하는 것이다. 이렇게 제안된 Output Feedback PID 제어기는 다양한 종류의 시뮬레이션을 통해 모든 주파수 조절상수 R에 대하여 기존 PI 제어기에 비해 안정된 제어효과를 보여주었으며, 전력계통의 다양한 외란(부하변동, 3상 단락 등)에 대해서도 효과적인 제어가 가능함을 보였다. 이는 제안된 제어기가 설치된 조속기의 직접적인 제어를 통해 다양한 외란에 충분한 계통 안정화 효과를 나타낼 수 있는 것을 보여준다.

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전력산업 연구개발사업(과제번호 : 20091020100070)으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

[참고 문헌]

- [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] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994
- [4] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems", IEEE Trans. PWRS., Vol. 6, No.3, August, 1991, pp914-921