

# 피드포워드 제어를 사용한 동기발전기의 과도특성 개선

## Improvement of Transient Performance of Synchronous Generator using Feedforward Controller

안 영 주\*  
(Young-Joo An)

**Abstract** - A brush-less type synchronous generator driven by an internal-combustion engine is used for emergency electric source. These types of generators have to maintain a certain range of output voltage even under the sudden load change conditions such as full load application and removal. This paper describes a method for suppressing the output voltage of a synchronous generator that operates excessively when the load fluctuates. The method used in this paper is a feedforward control method in which the main voltage control consists of a feedback loop using a typical PID controller and the load current is detected as a disturbance element and compensated directly. A feedforward system is constructed in which the load current is regarded as disturbance, and the appropriate feedforward controller configuration and parameters are found through simulation. Finally, it can be seen through the experiment that the feedforward control is performed properly. It can be seen that the generator terminal voltage is recovered to the steady state in a short period of time as compared with the existing PID control method even when the entire load of the generator is changed.

**Key Words** : Synchronous generator, PID control, Feedforward control

### 1. 서 론

내연기관으로 구동되는 동기발전기는 예비용 및 비상용 전원공급원으로 주로 사용되고 있다. 안정된 전원을 공급하기 위하여 동기발전기에는 출력전압을 조정하는 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator)가 적용되고 있으며, 자동전압조정기는 동기발전기의 보조계자 여자전류를 조정하여 주계자 권선에 가해지는 전압을 제어하고, 제어된 주계자 전압에 의해 주계자 전류의 크기에 따라 동기발전기의 발전전압을 일정하게 유지하는 역할을 한다.

기존의 자동전압조정기는 대부분 단순한 PID 제어방법을 적용하고 있고, 사이리스트를 사용한 위상제어 정류방식이며, 신뢰성이 높고 가격이 저렴하기 때문에 많이 사용되고 있지만 빠른 제어응답을 기대하기 어려워 정격부하가 투입 및 차단되는 부하 급변의 경우 상당한 시간 동안 발전기 출력전압에 과도한 변동을 초래하고, 병렬운전과 같은 타 시스템과의 연계가 곤란한 단점을 가지고 있다[1-3].

기존의 방법은 부하 변동에 따라 발전기의 출력전압이 과도하게 변할 뿐만 아니라 지속시간도 긴 특성이 있다. 발전기의 출력전압은 발전기를 구동하는 원동기의 속도변화와 자동전압조정기의 특성에 따라 변동폭이 서로 다르며, 주어진 원동기에 대해서 가능한 한 자동전압조정기의 기능만으로 이들 전압 변동 폭 및 지속시간을 최소화하는 기능이 요

구된다.

피드포워드 제어는 오래전부터 다양한 분야에 적용되어오고 있다[4-9]. 피드포워드 제어는 단일루프 PID 제어 성능을 향상시키기 위해 추가 정보로서 플랜트에 인가되는 외란 입력의 측정을 사용한다. 이러한 외란 입력은 제어량이 설정점을 벗어나기 전에 조작변수들을 조정할 수 있는 기회를 갖고 있다. 또한 피드포워드 제어기는 제어를 위해 제어량을 사용하지 않는 방법이며, 일반적인 피드백 시스템과 결합하여 피드백의 중요한 기능은 그대로 유지한 채 필요한 과도 성능을 개선하는 것이다.

본 연구에서는 원래의 PID제어기를 갖는 자동전압조정기에 피드포워드 제어를 추가하여 발전기 출력전압의 과도 특성을 개선하는 것이다. 기존의 방식으로는 최대 부하변동 조건에서 출력전압의 변동이 정격전압의 약 15% 까지 이르고 지속시간이 길기 때문에 부하 운전에서 나쁜 영향을 초래할 수 있으나, 제안한 방식은 이보다 개선된 결과를 얻는 것이 기대된다. 기존의 아날로그 PID제어방식에 부하전류를 외란으로 간주하고, 이를 입력으로 하는 피드포워드 제어방법을 제시한다. 이 방법은 기존 방식을 변화시키지 않고 추가로 피드포워드 제어를 적용함으로써 출력전압의 안정을 기함과 동시에 간단한 제어방법으로 과도 특성을 개선하는 것이다.

### 2. 피드포워드-피드백 제어

피드포워드 제어는 완전한 제어에 대한 가능성은 있지만, 몇 가지 본질적인 약점을 갖고 있다. 모든 가능한 외란의 확인과 이에 대한 직접적인 측정을 필요하기 때문에 전체 시

\* Corresponding Author : Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : anyj@pknu.ac.kr

접수일자 : 2018년 2월 14일

최종완료 : 2018년 2월 26일

시스템에 대해서 가능하지 않는 것도 있다. 또한 시스템의 매개변수 변화에 대해 영향을 확인할 수 없기 때문에 이러한 것들이 피드포워드 제어기에 의해 보상될 수 없다는 것이다. 피드포워드 제어는 시스템에 잘 맞는 모델이 필요하기 때문에 대부분의 시스템에 대해서 가능하지 못하다는 점도 존재한다.

반면 피드백 제어는 이러한 결점에 대해 둔감하지만, 여러 가지 시스템에 대해 부족한 성능을 갖고 있어 바람직한 과도특성을 얻을 수 없는 문제가 초래된다. 결합된 피드포워드-피드백 제어계는 피드포워드의 우수한 성능과 피드백의 불확실성과 부정확성에 대한 둔감도를 갖게 된다. 실제로 피드포워드 제어의 단점에 기인한 편차를 피드백 제어가 교정하는 역할을 한다.

그림 1은 피드포워드-피드백 제어계의 일반적인 구조를 나타낸 것이다[10-12]. 본 시스템에 적용할 경우 입력전압 설정은 일정하게 유지되므로 입력의 변화분에 대해서만 피드포워드 제어량을 전달하기 때문에 전달함수,  $G_{sp}$  블록으로는 신호전달이 없으므로 그림 2와 같은 구조로 구성한다. 이러한 구성은 기존의 PID 제어를 적용한 피드백 제어시스템에 외란을 피드포워드 제어기를 통해 제어하게 되므로 쉽게 적용이 가능하다.

피드백 제어기는 출력과 설정 값을 검출 및 비교하여 동작한다. 출력과 설정 값의 차이인 오차는 플랜트에 인가되는 제어 신호를 결정하는 피드백 제어기의 입력으로 사용된다. 피드백 제어기만을 사용할 경우, 급격한 외란이 발생할 때에는 출력이 빠르게 응답하지 못하는 속응성뿐만 아니라 경험적으로 잔류 오차가 지속되는 점이 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 기존의 제어루프는 그대로 둔 채 측정 가능한 외란 신호를 이용하여 원래의 시스템이 갖는 문제인 속응성과 잔류오차를 제거할 수 있는 피드포워드 제어기를 적용한다.

브러시리스 동기발전기에 있어서 출력전압의 변동은 발전

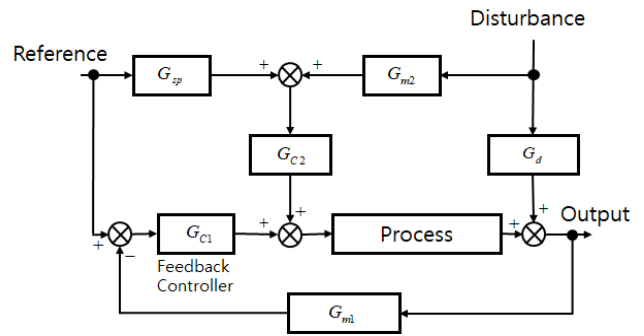


그림 1 피드포워드-피드백 제어 시스템 블록도  
Fig. 1 Feedforward-feedback control system block diagram.

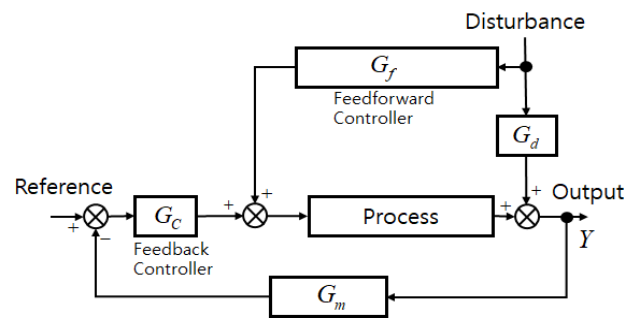


그림 2 수정된 피드포워드 제어 시스템의 블록도  
Fig. 2 Block diagram for modified feedforward control system.

기를 구동하는 원동기의 속도가 일정하다고 가정할 경우 부하의 급격한 변화에 기인한다. 외란요소인 부하 변화는 발전기 전류로 검출이 가능하므로 피드포워드 제어 시스템에 적용하는 외란은 부하전류를 사용한다.

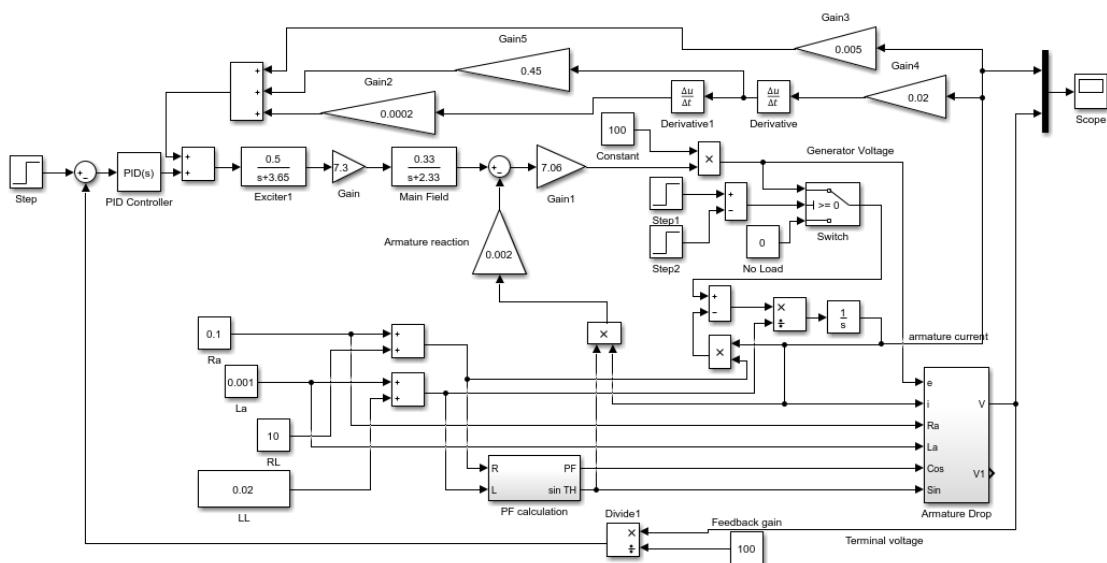


그림 3 피드포워드 제어 루프를 갖는 simulink 구성도  
Fig. 3 Simulink block scheme with feedforward control loop.

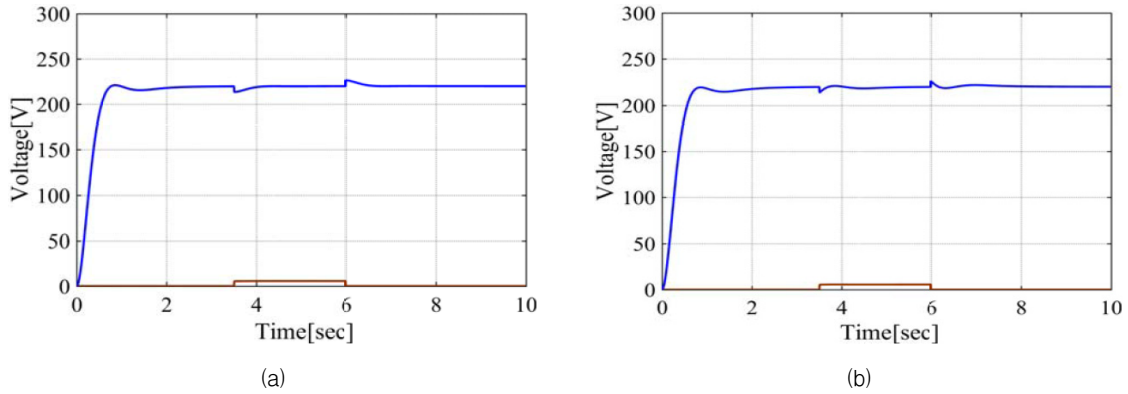


그림 4 경부하 시의 출력전압 (a) 피드포워드 루프가 없는 경우 (b) 피드포워드 루프가 있는 경우  
 Fig. 4 Output voltage with light load. (a) without feedforward loop (b) with feedforward loop

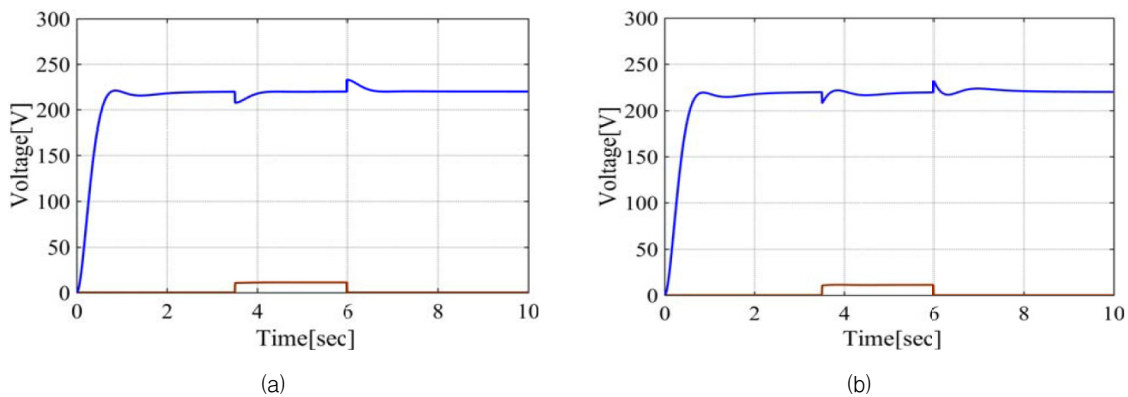


그림 5 중간부하 시의 출력전압 (a) 피드포워드 루프가 없는 경우 (b) 피드포워드 루프가 있는 경우  
 Fig. 5 Output voltage with middle load. (a) without feedforward loop (b) with feedforward loop

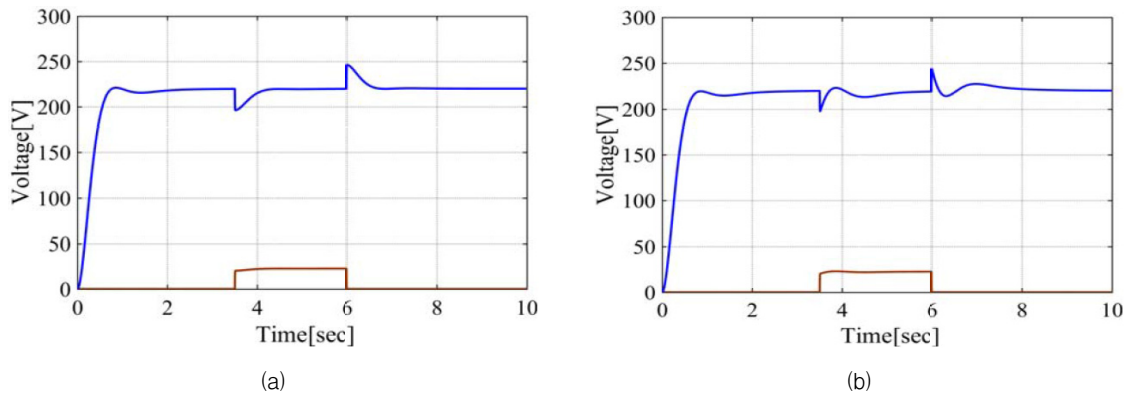


그림 6 정격부하 시의 출력전압 (a) 피드포워드 루프가 없는 경우 (b) 피드포워드 루프가 있는 경우  
 Fig. 6 Output voltage with rated load. (a) without feedforward loop (b) with feedforward loop

### 3. 시뮬레이션 결과

피드포워드 제어기의 구성은 기본적으로 입력이나 외란의 변화분에 동작하도록 입력의 미분값과 곱미분값을 사용한다 [9]. 또한 PID제어기만을 사용하는 기존의 제어시스템에서 부하가 인가되었을 동안 지속적으로 나타나는 전압감소분을 보상하기 위하여 피드포워드 제어기에 비례요소를 추가한다. 이를 고려한 MATLAB/Simulink 구성을 그림 3에 나타낸다.

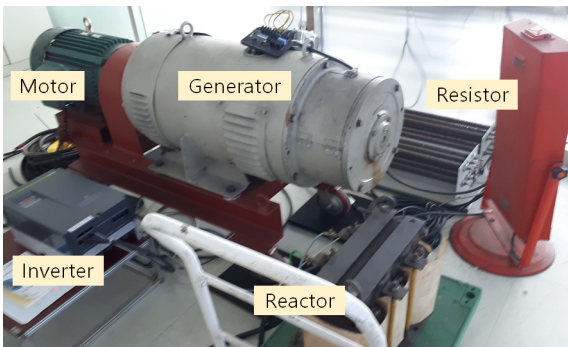
그림 4, 그림 5 및 그림 6은 각각 경부하, 중간부하 및 정격부하일 경우에 피드포워드 제어루프가 없는 경우(a)와 있는 경우(b)에 대하여 시뮬레이션을 행한 결과이다. 상측의 그래프는 발전기의 단자전압, 하측 그래프는 부하전류를 나타낸다. 각각 부하는 기동 후 3.5[s]에서 인가되며, 6[s]에서 제거된다.

경부하인 경우에는 차이가 확실히 구분되지 않지만, 중간부하와 정격부하인 경우에는 발전기 출력전압 변동에 차이

를 보이고 있다. 피드포워드 제어 루프를 적용한 경우가 적용하지 않은 경우에 비하여 빠른 응답속도를 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 시스템 구성 및 실험 결과

그림 7은 실험장치를 나타내고 있다. 발전기는 인버터로 구동되는 3상유도전동기에 직접 결합되어있다. 동기발전기의 정격은 3상 4극 380[V], 10[KW]이다. 부하저항은 열선저항기를 사용하고, 일반적인 뒤진 역률부하를 구성하기 위해 저항과 직렬로 인덕터를 연결한다. 부하는 3상 Y-결선 평형부하이다. 피드포워드 제어기는 제어기의 유연성을 높이기 위하여 디지털 제어방식을 적용하고, 마이크로프로세서를 사용한 실시간제어기로 구성한다. 자동전압조정기의 제어기는 Labview 프로그램을 사용하여 구성하고, NI사의 sbRIO-9636 보드로 구현하였다.



(a)

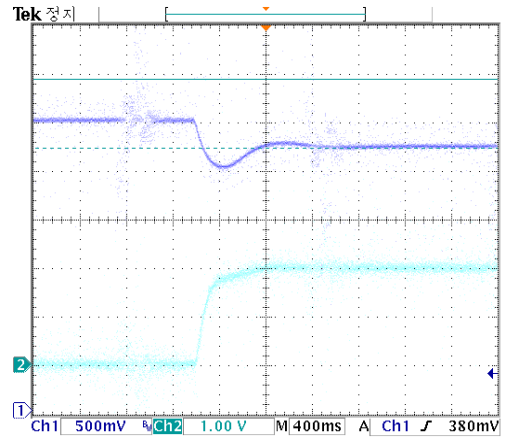


(b)

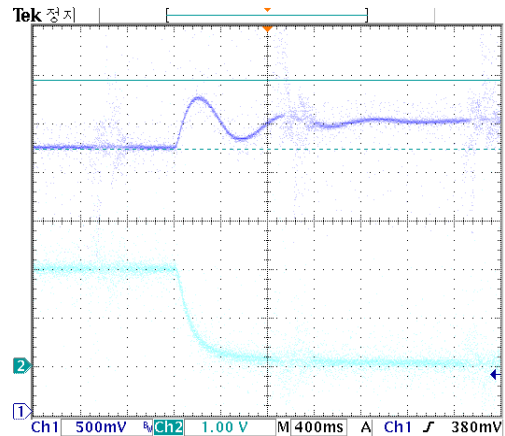
그림 7 실험 장치 (a) 전동기-발전기 (b) 자동전압조정기  
Fig. 7 Experimental setup (a) motor-generator (b) A.V.R.

그림 8은 기존의 피드백 제어만을 적용한 경우 발전기의 전압과 전류이다. 상부측 그래프는 발전기의 단자전압, 하부측 그래프는 부하전류이며, 정격부하를 인가 및 제거한 때의 발전기 출력전압 변동을 나타내고 있다. 발전기 단자전압은 380[V]이다. 부하인가 시의 단자전압은 최저 약 57[V]까지 감소하며(약 15% 감소), 정상상태까지의 회복시간은 약 600[ms] 정도이다. 또한 부하 인가 시에는 부하에 대한 영향으로 단자전압이 정격전압에 비해 약 30[V]까지 감소하여 정격전압을 회복하지 못하는 것으로 확인된다. 부하 제거 시에는 정격전압에서 약 38[V] 범위까지(약 10% 증가) 증가하

며, 정상상태까지의 회복시간은 약 1200[ms] 정도까지 이르게 됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 8 정격부하를 인가한 때 피드포워드 제어루프가 없는 경우의 출력전압 (a) 정격부하를 인가한 경우 (b) 정격부하를 차단한 경우

Fig. 8 Output voltage without feedforward control loop when the rated load is applied.

(a) When the rated load is applied

(b) When the rated load is tripped

그림 9는 기존의 PID 피드백 제어시스템에 피드포워드 제어 루프를 추가한 경우의 전압과 전류파형을 나타내고 있다. 정격부하를 인가할 경우 순간적인 전압강하는 정격전압의 약 10% 정도인 38[V]이며, 과도기간 지속시간이 약 300[ms] 정도이다. 피드포워드 제어루프를 추가한 방식이 기존의 방식에 비해 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

정격부하를 차단한 경우에는 전압 상승이 정격전압의 약 13[%] 정도인 50[V] 상승하며, 최대 전압 상승은 기존방식에 비해 높지만 이는 부하 인가시의 단자전압이 약 30[V] 정도 높기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 그러나 정상상태로의 회복시간은 약 600[ms] 정도로 크게 개선됨을 알 수 있다. 부하차단 시에 초기 전압 상승은 발전기 계자회

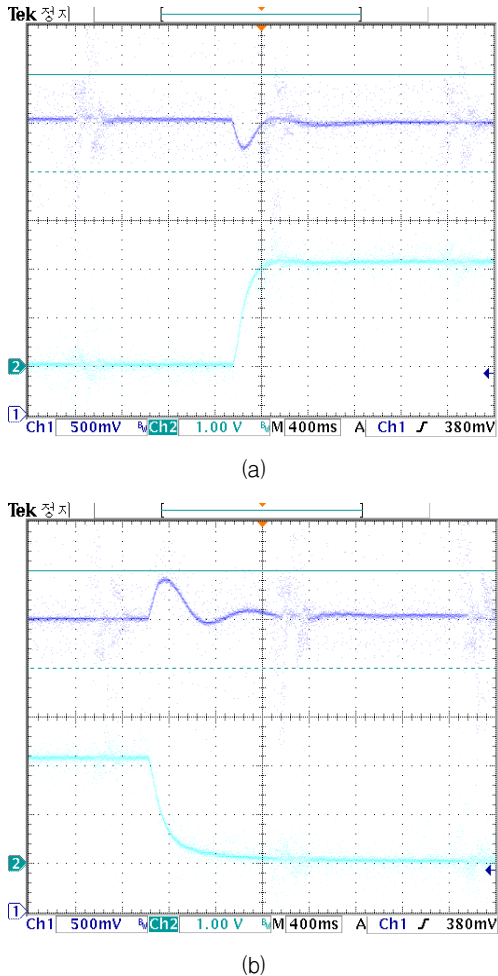


그림 9 정격부하를 인가한 때 피드포워드 제어루프가 있는 경우의 출력전압 (a) 정격부하를 인가한 경우 (b) 정격부하를 차단한 경우

Fig. 9 Output voltage with feedforward control loop when the rated load is applied.  
(a) When the rated load is applied  
(b) When the rated load is tripped

로의 큰 전기적 시정수로 인하여 계자회로에 충전된 에너지가 크기 때문에 제어기만으로는 억제하기 어려운 문제임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 브러시리스형 동기발전기에 있어서 부하의 급격한 변동에 대한 출력전압의 빠른 회복을 위해 기존의 PID를 적용한 피드백 제어 시스템에 피드포워드 제어 루프를 추가한 피드백-피드포워드 시스템을 제안하였다. 피드백 제어 시스템만으로 발전기 출력전압을 적절히 제어하지만 부하 급변에 의한 출력전압의 빠른 감쇄와 상승은 시스템에 연결된 부하장치에 나쁜 영향을 초래한다. 또한 출력전압이 변동하는 과도시간 길게 되는 경향을 보이고 있다.

기존의 방법으로 제어할 경우 부하인가 시에는 전압강하가 정격전압의 15%, 과도기간 지속시간이 약 600[ms]이며, 부하

차단 시에는 전압 상승은 정격전압의 10%, 과도기간 지속시간이 1200[ms]로 나타난다. 부하차단 시, 전압 상승이 낮은 이유는 단자전압이 정격전압보다 낮은 원인에 기인한다.

발전기 부하전류를 외란신호로 다루어 이를 피드포워드 제어기에 적용함으로써 부하급변 시 전압의 변동 및 과도기간의 지속시간을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다. 실제 이 방법을 적용한 결과 부하인가 시에는 전압강하는 5% 포인트, 지속시간은 약 50%로 개선되고, 부하차단 시에는 전압상승에는 큰 차이를 보이지 않지만, 지속시간은 약 50% 정도로 개선된다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] Sang-Hoon Park, Jae-Sung Yu, Sang-Seuk Lee, and Chung-Yuen Won, "Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR," *International Conference on Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 417-421, 2009.
- [2] Dong-Hee Lee, Tae-Hyoung Kim, and Jin-Woo Ahn, "Control of digital AVR in stand alone generator for improved dynamic characteristics," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1978-1982, 2008.
- [3] Nirgudkar Saurabh S., and Sarode Uday B., "Implementation of Digital Automatic Voltage Regulator (AVR) for small laboratory alternator," *International Conference on Energy Systems and Applications*, pp. 338-341, 2015.
- [4] Min Chen and Jian Sun, "Feedforward Current Control of Boost Single-Phase PFC Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 2, pp. 338-345, March 2006.
- [5] Arne and Rudibert King, "Combined Feedback - Feedforward Control of Wind Turbines Using State-Constrained Model Predictive Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1117-1128, July 2013.
- [6] Annea Barkefors, Mikael Sternad and Lars-Johan Brännmark, "Design and Analysis of Linear Quadratic Gaussian Feedforward Controllers for Active Noise Control," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, vol. 22, no. 12, pp. 1777-1791, December 2014.
- [7] Allan Soon Chan Roong, Chong Shin-Horng and Mohamed Azmi B. Said, "Position Control of a Magnetic Levitation System via a PI-PD Control



- with Feedforward Compensation,” *Proceedings of the SICE Annual Conference*, pp. 73-79, September 2017.
- [8] Bing Cheng and Tod R. Tesch, “Torque Feedforward Control Technique for Permanent -Magnet Synchronous Motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, pp. 969-974, March 2010.
- [9] Michal Malek, Pavol Makys and Marek Stularjter, “Feedforward Control of Electrical Drives - Rules and Limits,” *Power Engineering and Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 35-42, March 2011.
- [10] Deshang Sha, Jiankun Zhang, Xiao Wang and Wenqi Yuan, “Dynamic Response Improvements of Parallel-Connected Bidirectional DC - DC Converters for Electrical Drive Powered by Low-Voltage Battery Employing Optimized Feedforward Control,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 7783-7793, October 2017.
- [11] Sergei Basovich and Shai Arogeti, “Feedforward Control of LTI System with Uncertainty and Disturbance,” *IEEE 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision*, November 2016.
- [12] Joke Pratilastiarso, Erik Tridianto, Hendrik Prasetya, Ratna Patmasari and Affan Romadhon, “Three Element Controls on Fuel Tank with Feedback - Feedforward Using Simulink,” *2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs 2017)*, pp. 124-128, October 2017.

## 저 자 소 개



### 안 영 주 (Young-Joo An)

1986년 부경대학교 전기공학과 졸업.  
1988년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년 3월 ~ 현재 부경대학교 공과대학 제어계측공학과 교수. 현 본 학회 정회원.