

전압 이중 검출법에 의한 독립형 엔진-발전기 시스템 응답특성 개선

論 文
57-7-11

Dynamic Response Improvement of Stand Alone Engine-Generator System using Double Voltage Detection Method

李 東 熙* · 安 珍 雨†
(Dong-Hee Lee · Jin-Woo Ahn)

Abstract - In this paper, peak detector of generator's output voltage and variable gain controller are introduced for a fast dynamic response. The conventional r.m.s. signal detected has inherent time delay, and the dynamic response of generator using conventional PID controller has some problem in sudden load change. In this paper, the peak detector and signal selector with variable gain controller is used to overcome this problem. The main controller can check the voltage state from the peak detector. When a sudden load change, the over-voltage and under-voltage signal from peak detector change the controller's gain and exciter's current reference. The proposed scheme can improve the dynamic response, which is verified from experimental test of 200kW diesel engine-generator.

Key Words : Engine Generator, AVR, PID,

1. 서 론

엔진 발전기는 선박용 전력생산 및 비상용 발전기로 많이 사용되고 있다. 최근에는 전력계통에 연결이 어려운 낙도 지역에서 엔진 발전기를 이용한 자체 전력 생산 시스템이 적용되고 있고, 외국의 경우에는 대형 육상 플랜트 발전 설비로 전력을 공급하기 어려운 산간지역 등에서 엔진-발전기 운전 시스템이 적용되고 있다. 이러한 엔진 발전기 운전 시스템의 제어 특성은 엔진 제어를 위한 조속기와 발전기 전압을 제어하는 AVR(Automatic Voltage Regulator)에 의해 결정된다. 따라서 무한 모션 시스템과 달리 부하에 따라 출력전압의 가변이 심하고, 주파수 변동의 문제가 발생한다. 이러한 전력의 불안정성은 전기장치의 오동작을 일으킬 수 있다. 특히, 선박의 경우와 같이 무한 모션이 연결되지 못하는 단독 운전 시스템의 경우, 엔진 발전기는 시스템의 전 전력을 안정적으로 공급해야 하며 부하의 급변에 대해서도 안정적인 응답특성을 가져야 한다.

발전기의 전압 제어를 위한 AVR은 SCR을 사용하는 아날로그 제어 방식에서 최근에는 마이크로 프로세서 등을 활용한 PWM 제어 구조로 발전하고 있다[1-3]. 이는, 디지털 방식의 제어기가 다양한 발전기에 적용하기 용이하며, droop 제어 및 병렬 제어와 같은 복잡한 계통 제어에 적합하기 때문이다[4-8]. 이러한 디지털 방식의 AVR 제어기는 일반적으로 산업계에 널리 알려진 PID 제어기가 많이 적용되고 있다.

이는 제어 이득의 설정에 따라 다양한 발전기에 적용이 가능하며, 사용자에게 널리 익숙해진 방식이기 때문이다 [9-10]. 발전제어 시스템에서 발전기 출력전압의 검출은 r.m.s. 전압을 입력하게 되는데, r.m.s. 검출 신호는 실제 발전기 순시전압 출력에 대하여 시간 지연을 가지게 된다. 이러한 시간 지연의 문제로 인하여 AVR 제어기의 제어 이득을 크게 설정하기 어렵고, 또한 실제 발전기의 응답특성은 부하의 급변에 대하여 낮은 응답성을 가지게 된다. 육상용 발전 시스템에서는 d-q 변환에 의한 순시적인 r.m.s. 검출이 용이하지만, 엔진-발전기 시스템에서는 구조적으로 부하에 따라, 발전기의 주파수가 가변적이고 순시적인 주파수 검출을 위한 별도의 장치를 부착하기가 어렵기 때문이다. 따라서, 엔진-발전기 제어 시스템의 전압 제어 응답성은 AVR의 제어 이득의 선정과 발전기의 시상수에 매우 의존적으로 된다.

본 논문에서는 엔진-발전기 구조에서 전압 검출을 위한 r.m.s. 검출 지연에 따른 발전기 전압 제어의 응답성을 개선하기 위하여, 일반적인 AVR의 PID 제어기와 피크전압 검출부 및 제어 이득 변환기를 적용하여, 급격한 부하 변동에 따른 빠른 응답성을 가지는 제어 구조를 제안하였다.

제안된 제어 방식에서는 부하의 급격한 변동은 설계된 피크 전압 검출부에서 검출하고, 검출된 신호에 따라 제어기의 제어이득을 변동시키며, 오버슈트를 방지하기 위한 스위치 제어 방식을 적용하고 있다. 따라서 순시적인 신호의 검출은 피크 전압 검출부에서 이루어지며, 실제 전압은 안정적인 r.m.s. 검출부의 신호로 제어를 수행하여, 기존의 PID 제어 방식에 비하여 안정적이고 빠른 응답특성을 구현할 수 있다. 제안된 방식은 실제 선박용 200kW급 디젤엔진 발전기에 대한 실험을 통하여 운전성능을 검증하였다.

* 正 會 員 : 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 조교수

† 교신저자, 正 會 員 : 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

接受日字 : 2008年 3月 5日

最終完了 : 2008年 6月 10日

2. 디젤-엔진 발전기의 전압 제어

디젤-엔진 발전기는 육상 발전 및 송배전 시스템으로부터 전기가 공급되기 어려운 선박, 낙도 및 산악 지형이 많은 지역의 전원공급 장치로 널리 사용되고 있다. 특히, 선박의 경우 전원의 공급은 전적으로 엔진-발전기로부터 공급되며, 각종 제어장비, 통신장비 및 운항장비의 전원 공급을 위한 높은 품질의 전력을 요구한다. 일반적인 엔진-발전기의 경우 성능 및 신뢰성의 문제로 여자기를 가지는 브러쉬리스 발전기가 많이 사용되고 있다. 그림 1의 디젤-엔진 발전기 구조에서와 같이 브러쉬리스 발전기는 여자기의 계자 전류에 의한 여자기의 발전전압을 발전기 내부의 반도체 정류 다이오드를 통하여 다시 주발전기의 계자를 공급하는 방식으로 브러쉬를 통하여 직접 계자를 공급하는 방식에 비하여 신뢰성이 높고, 유지 보수에 용이한 장점이 있다. 그림 1은 일반적인 디젤-엔진 발전기의 전압 제어 구조를 나타내고 있다. 그림 1에서 여자기와 주발전기는 모두 발전기 내부에 장착되며, 발전기 외부의 3상 출력선에 연결된 PT(Potential Transformer) 및 CT(Current Transducer)로부터 발전기의 전압 및 전류를 검출하여 여자기의 계자 전류를 제어하게 된다.

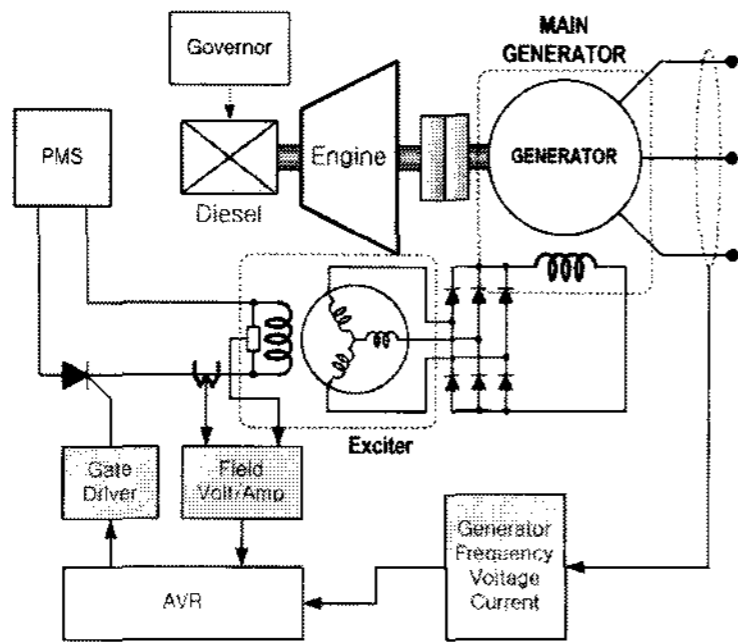


그림 1 일반적인 디젤-엔진 발전기 전압제어 구조
Fig. 1 Conventional diesel-engine generator system

그림 1에서 PMS(Power Management System)는 발전기 제어 시스템의 전원을 제어하는 장치로, 일반적으로 발전기의 출력단에 연결된 변압기 또는 외부 전원으로 AVR의 전력을 공급하게 된다. 이러한 발전 제어 시스템의 간략화된 블록도는 그림 2와 같다. 그림 2에서 AVR은 제어 이득과 시간 지연을 가지는 1차 지연요소로 모델링 되고, 여자기 및 발전기도 전기적 시정수에 의한 지연요소로 간략화 될 수 있다.

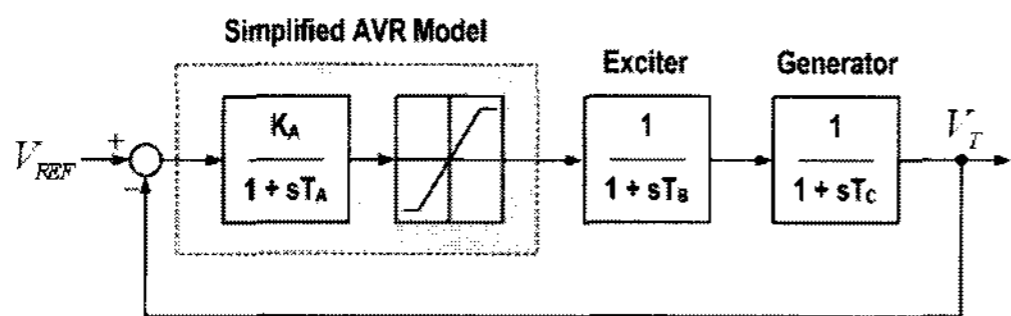


그림 2 간략화된 발전 제어 시스템 블록도
Fig. 2 Block diagram of simplified generator control system

그림 2에서 발전기의 출력전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{err} = V_{REF} - V_T \quad (1)$$

$$V_T = \left(\frac{K_A}{1+sT_A} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+sT_B} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+sT_C} \right) \cdot V_{err} \quad (2)$$

단, V_{err} : 오차전압, V_{REF} : 제어지령전압, V_T : 발전기의 출력전압, K_A : AVR제어이득, T_A : AVR 제어기의 시상수, T_B : 여자기의 전기적 시상수, T_C : 발전기의 전기적 시상수

발전기의 전압 제어를 위한 AVR은 최근에 SCR을 사용하는 아날로그 제어 방식에서 최근, 마이크로 프로세서 등을 활용한 PWM 제어 구조를 적용하고 있다. 이는, 디지털 방식의 제어기가 다양한 발전기에 적용하기 용이하며, droop 제어 및 병렬 제어와 같은 복잡한 계통 제어에 적합하기 때문이다. 그림 3은 PID 제어기를 적용한 발전기 제어 시스템 블록도를 나타내고 있다.

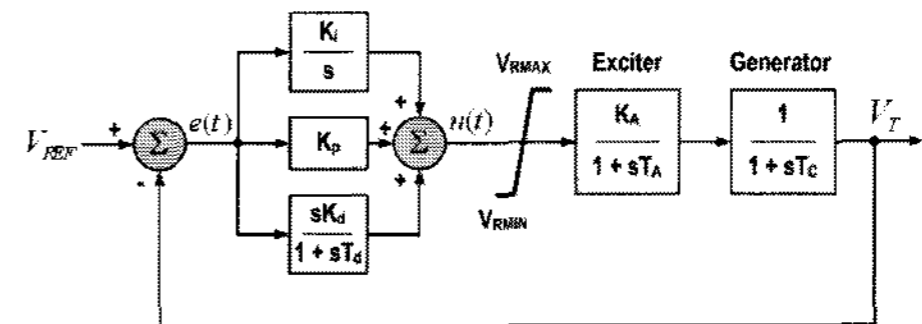


그림 3 PID 제어기로 구현된 발전기 AVR 시스템
Fig. 3 PID-AVR control system for generator system

발전기의 제어를 위한 AVR의 제어는 그림 3과 같이 일반 산업계에 널리 알려진 PID 제어기가 많이 적용되고 있다. 이는 제어 이득의 설정에 따라 다양한 발전기에 적용이 가능하며, 사용자에게 널리 익숙해진 방식이기 때문이다.

이러한 PID 제어기의 응답성은 제어이득에 따라 가변적이므로 발전기가 설치되기 전에 제어이득의 튜닝을 통하여 적합한 이득을 산정하게 된다. 발전제어 시스템에서 발전기 출력전압의 검출은 r.m.s. 전압을 입력하게 되는데, r.m.s. 검출 신호는 실제 발전기 순시전압 출력에 대하여 시간 지연을 가지게 된다. 이러한 시간 지연의 문제로 인하여 AVR 제어기의 제어 이득을 크게 설정하기 어렵고, 또한 실제 발전기의 응답특성은 부하의 급변에 대하여 낮은 응답성을 가지게 된다. 육상용 발전 시스템에서는 d-q 변환에 의한 순시적인 r.m.s. 검출이 용이하지만, 엔진-발전기 시스템에서는 구조적으로 부하에 따라, 발전기의 주파수가 가변적이고 순시적인 주파수 검출을 위한 별도의 장치를 부착하기가 어렵기 때문이다. 따라서, 엔진-발전기 제어 시스템의 전압 제어 응답성은 AVR의 제어 이득의 선정과 발전기의 시정수에 매우 의존적이다.

3. 제안된 제어구조

본 논문에서는 발전기 전압의 r.m.s. 검출 지연으로 인한 응답특성 문제를 개선하기 위하여 간단한 피크 검출부 및 가변이득 제어기 구조를 적용하였다.

그림 4와 5는 제안된 발전기-AVR 시스템의 블록도와 실제 동작에 대한 설명을 나타내고 있다. 그림 4의 제안된 시스템은 발전기 r.m.s. 검출 지연에 대한 응답 특성을 개선하기 위하여 r.m.s. 검출부 이외에 발전기 전압의 피크 검출부를 가진다. 피크 검출부는 발전기의 주파수에 따라, AC 발

전 전압의 피크치를 검출하는 부분으로 발전기의 응답에 대하여 지연없이 최대 크기를 검출 할 수 있다. 연속적인 제어에 대해서는 노이즈 및 고정된 R, C에 의해 동작하므로, 방전 부분에서는 피크 값보다 작은 값이 검출된다. 따라서 본 논문에서는 AD 컨버터로 연속적으로 피크 검출부의 전압을 검출하고, 발전기 주파수 검출에 의해 그 중에서 최대 값을 찾는 방법에 의해서 각 주기내에서의 전압 변동을 검출하도록 설계하였다.

그림 4에서 2개의 비교기는 피크 검출부에서 검출된 전압과 설정치를 비교하는 부분으로 VL_SET과 VH_SET은 각각 제어 지령인 V_{ref} 의 95% 및 105%로 설정되어 있다. 일반적인 선박의 발전기 응답은 80% 부하에 대해서 언더슈트가 15% 이하, 오버슈트가 20% 이하로 되어야 한다. 따라서 피크 검출부의 노이즈 및 검출 오류를 고려하여 설정값을 결정하였다. 그림 4의 비교기에서 피크 검출부가 VL_SET 보다 작아지거나 VH_SET 보다 커지는 경우에는 발전기에 급격한 부하가 변동 된 것으로 판단 할 수 있다. 따라서, 발전기에 급격한 부하의 인가에 의해 전압의 감소가 발생하게 되면, r.m.s. 검출부는 검출 지연에 의해 서서히 변동하게 되지만, 피크 검출부에서는 부하의 인가를 검출하게 된다. 검출된 /UVINT 신호에 의해 DSP에서는 AVR 제어기의 제어 이득을 크게 증가 시켜, 작은 오차에 대해서도 강인하게 동작하도록 제어 이득의 변환이 이루어 진다.

반대로, 부하가 급격하게 제거되어 발전기의 전압이 상승하게 되면, /OVINT 신호에 의해 여자기의 제어 전류 지령을 0으로 급격하게 감소시킨다. 특히, 오버슈트에 대해서 강한 동작을 설정하게 되는 것은 여자기의 특성상 여자 전류가 0으로 감소하는 동안에 대해서도 발전기의 전압은 부하의 제거에 의한 전압상승이 이루어지고 이에 대하여 오버슈트가 20%를 넘어갈 수 있기 때문이다.

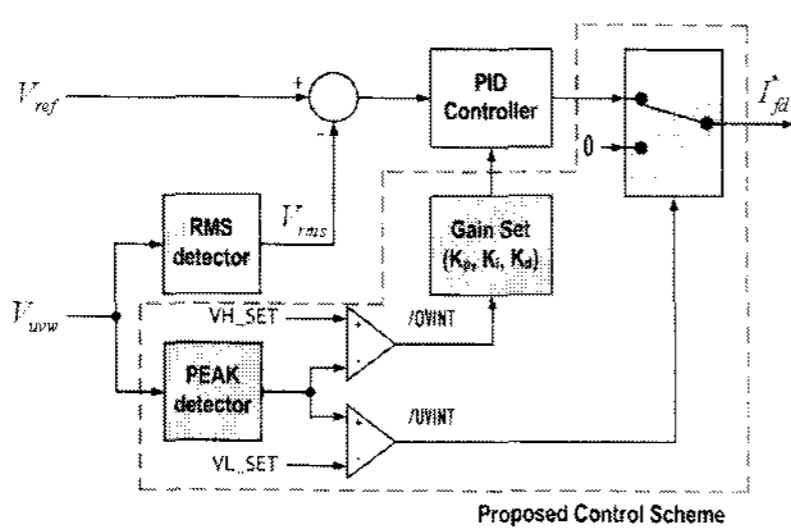


그림 4 제안된 발전기 AVR 시스템
Fig. 4 Proposed AVR control system for generator system

그림 5는 제안된 방식에서의 발전기 전압과 r.m.s. 검출 지연 및 피크 검출부에서의 /UVINT 검출에 대한 동작을 나타내고 있다.

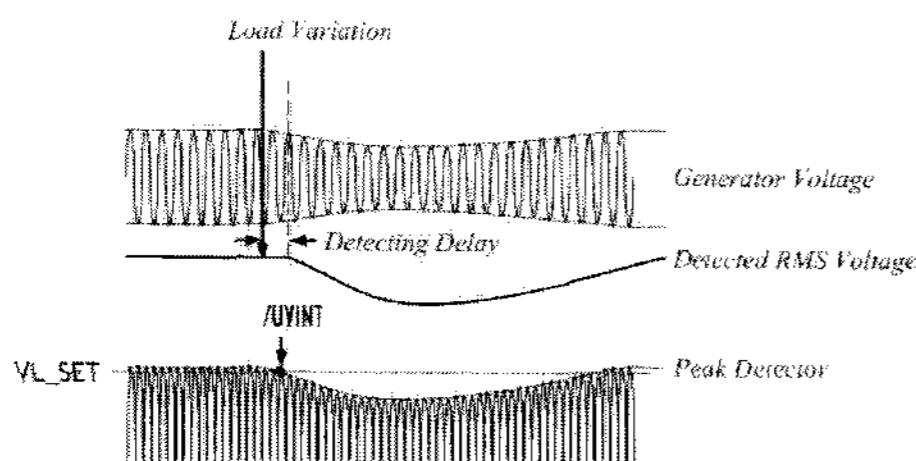


그림 5 제안된 방식의 동작
Fig. 5 Operation of the proposed control scheme

그림 6은 제안된 방식을 적용한 선박용 발전기 시스템의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. 발전기는 그림 1에서 설명된 바와 같이 디젤 엔진에 의해 구동되고, 발전기의 계자는 여자기의 발전에 의해 동작하게 된다. AVR은 여자기의 계자 전류를 제어하기 위한 IGBT 구동에 의한 PWM 제어에 의해 동작된다. 그림 6의 CCS는 전류제어기(Current Control System)으로 여자기의 계자 전류를 제어하는 부분이다.

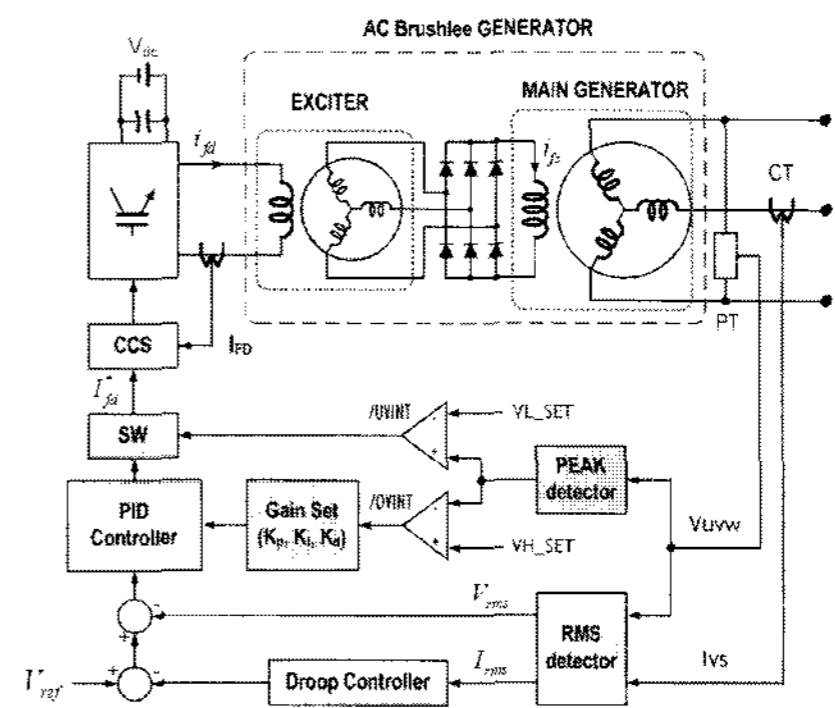


그림 6 제안된 전체 제어 시스템
Fig. 6 Proposed generator control scheme

발전기의 전압과 전류는 발전기 출력단에 설치된 PT 및 CT에 의해 검출되며, 전압은 U-W 상에 의해, 전류는 V상 전류를 검출하도록 설치되어 있다. Droop 제어기는 부하의 위상에 따라 병렬 운전에 대한 특성을 결정하기 위한 제어기이다. 또한 설계된 디지털 AVR의 기동은 발전기의 잔류 전압에 의한 피드백 루프에 의해 기동되어야 하므로, 자기동(Self-starting) 회로가 AVR의 제어 전원을 확립하는 동안 발전기의 동작을 결정하도록 설계 되었다.

4. 실험 결과

제안된 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 3상 380V, 200kW 디젤 엔진 발전기에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 발전기는 중소형 선박용 비상발전기로 설계 되었으며, 발전기의 여자기 계자 저항은 16.5[Ω]이고, 최대 출력 전압은 45[V]로 설계되어 있다.

그림 7은 본 논문에 적용된 디지털-AVR과 실험 환경을 나타내고 있다. 발전기의 실험은 정격 저항부하와 인덕턴스 부하에 대하여 수행되었다. 디지털 AVR의 제어기는 TI(Texas Instrument)사의 TMS320F2811-100MHz를 사용하였으며, 발전기와 모션의 전압 및 전류는 Analog Device사의 AD637과 2차 Sallen Key 필터를 사용하여 검출하도록 설계되었다. 피크 전압 검출부는 정밀 정류회로와 DSP에 내장된 고속 AD 컨버터를 사용하여 순시적으로 검출하고 있으며, DSP의 CAP에 연결된 전압 주파수 검출부와 동기하여 AD 변환된 값 중에서 최대 값을 찾도록 프로그램 되었다. 여자기 계자의 최대 전류는 15A로 설계되어 있으며, IXYS사의 FID60-060D(600V, 65A)로 구성하였다. AVR 제어기의 자기동 회로는 트랜지스터에 의한 초기 기동전류 제어 방식으로 구성되어 있으며, 정지상태 기동 및 병렬 운전에서의 전전압 기동에 대해 안정적으로 동작하도록 병렬회

로 구성하였다. 제어기와 모니터링 장치와의 통신은 CAN 방식과 RS-232 방식에 의해 구현하도록 하였다. 전압 검출은 110/220/380/450V에 대하여 아날로그 스위치를 통하여 하드웨어의 변경없이 검출 가능하도록 설계하였으며, CBS(Current Boosting System)은 SCR 모듈과 전압 제어기로 구성되었다.

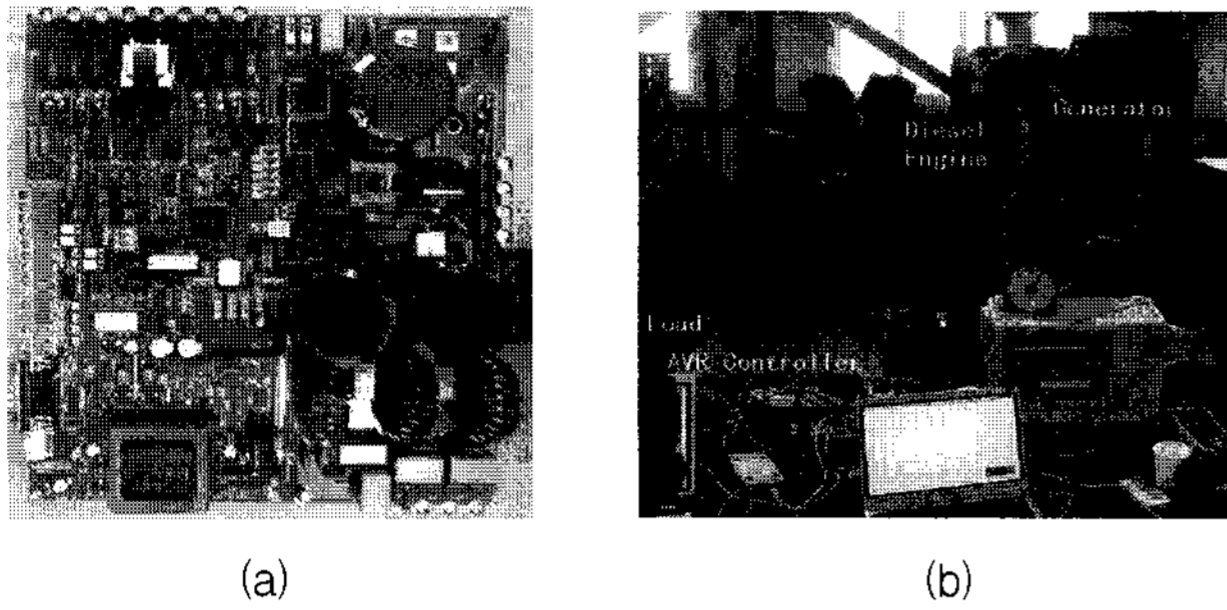


그림 7 설계된 AVR 제어기 및 실험 환경
 (a) 설계된 AVR 제어기 (b) 실험 환경
 Fig. 7 AVR controller and experimental configuration
 (a) AVR controller (b) Experimental set-up

그림 8은 100% 부하 인가와 부하 제거 상태에서의 PID 제어기와 제안된 방식의 제어 구조에서의 응답특성을 나타내고 있다. 실험 결과에서 각각 여자기의 계자 전류는 r.m.s. 검출 전압과 발전기 출력단자 전압 및 부하 전류의 파형을 도시하고 있다. 그림 8(a)의 일반적인 PID 제어기에서 부하의 인가와 제거 상태에서 언더슈트와 오버슈트는 점선으로 표기된 설정 전압의 90%와 110% 보다 크게 변동하고, 특히 오버슈트는 약 24%까지 증가하는 것을 보이고 있다. 제안된 제어 구조의 경우 그림 8(b)와 같이 언더슈트 및 오버슈트가 크게 감소하고 있으며, 제어 이득의 변화에 따라 PID 제어기 보다 빠른 응답성을 나타내고 있다. 실험 결과에서 언더슈트는 11%, 오버슈트는 12% 이내로 안정적인 제어가 이루어지고 있음을 보인다.

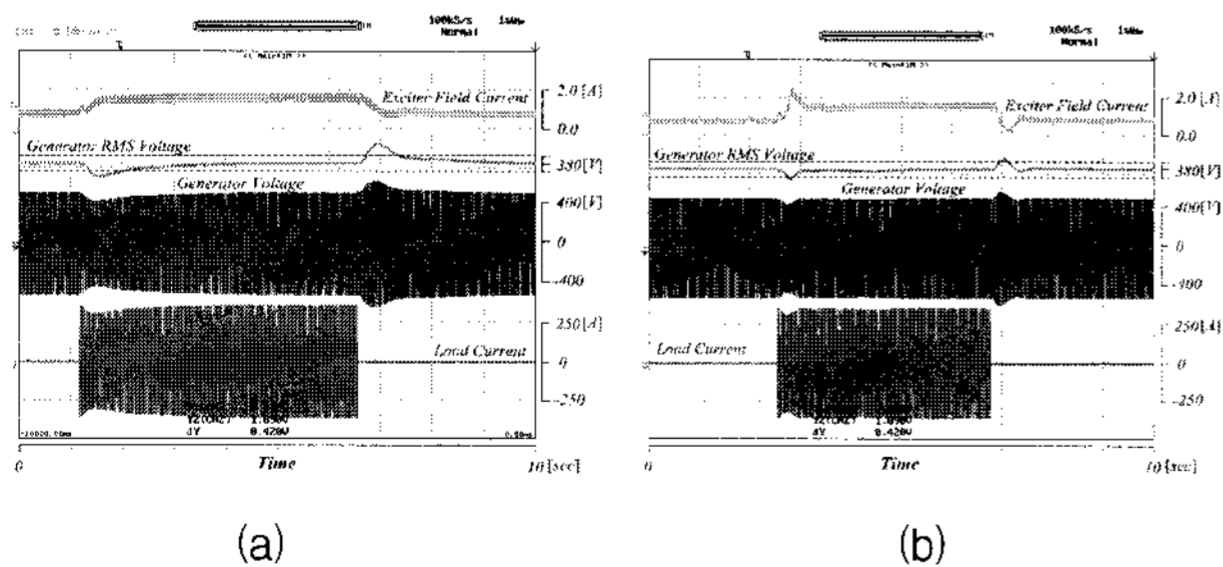


그림 8 전부하 인가 및 제거 상태에서의 응답특성 비교
 (a) 기존 PID 제어방식 (b) 제안된 제어방식
 Fig. 8 Dynamic response when full load change
 (a) conventional PID (b) Proposed controller

그림 9는 제안된 AVR 제어기의 초기 자기동 시험 및 발전기 정지 상태의 V/Hz 특성 시험 결과를 보이고 있다. 그림 9(a)의 초기 자기동은 발전기의 잔류 자속에 의한

전압 4[V]에 대하여 기동이 이루어지며, r.m.s. 전압의 검출에서 초기 스파이크 성분은 제어기의 SMPS(Switch Mode Power Supply) 전원이 확립되기 이전의 신호에 대한 결과이다. SMPS 전원이 확립된 이후에 안정적인 초기 기동이 되고 있다. 그림 9(b)는 1Hz 당 20V의 전압 감쇄에 대한 V/Hz 특성 시험 곡선으로 SMPS 전원이 완전히 소호되는 점선 부근까지 일정한 V/Hz 특성으로 제어되고 있음을 보이고 있다.

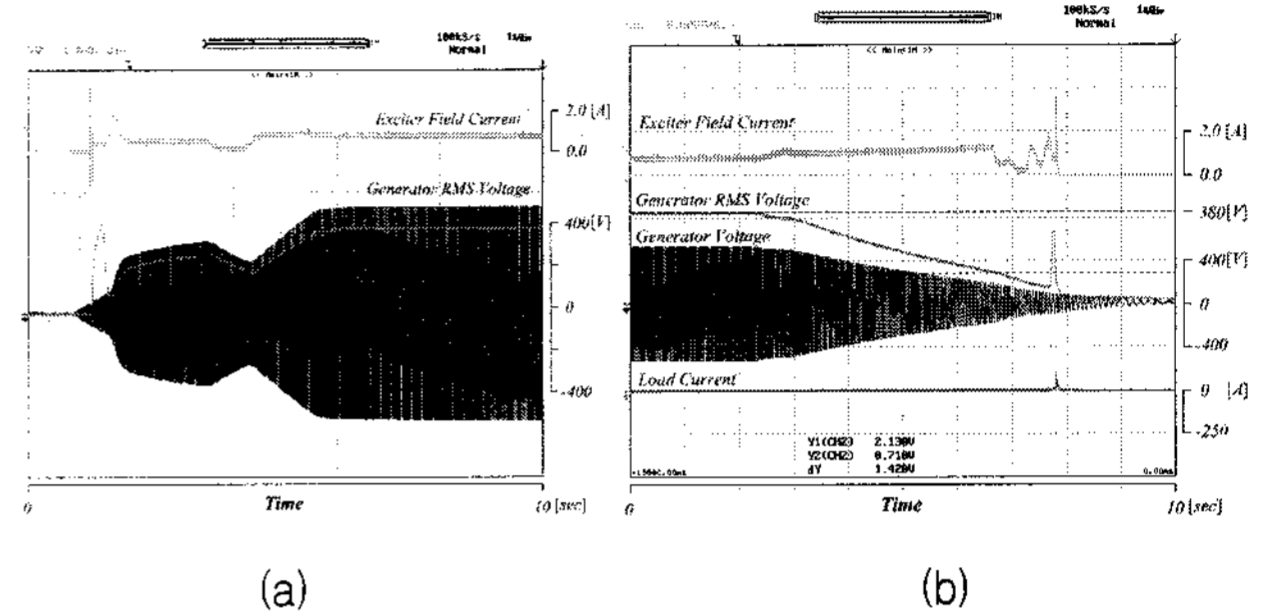


그림 9 초기 기동 특성 및 V/Hz 특성 시험
 (a) 초기 자기동 시험 결과
 (b) 발전기 정지 상태의 V/Hz 특성 시험
 Fig. 9 Experimental results of self-starting and V/Hz response
 (a) Self starting (b) V/Hz response

그림 10은 인덕턴스 부하의 인가 및 제거에 대한 응답특성과 droop 10% 설정에 대한 droop 제어특성을 보이고 있다. 그림 10(a)의 인덕턴스 부하의 인가 및 제거에 대해서도 안정적인 전압 제어 특성을 나타내고 있으며, droop 10% 설정에 대한 발전기의 전압도 부하 전류의 크기와 역률에 따라 안정적으로 제어되고 있음을 보이고 있다.

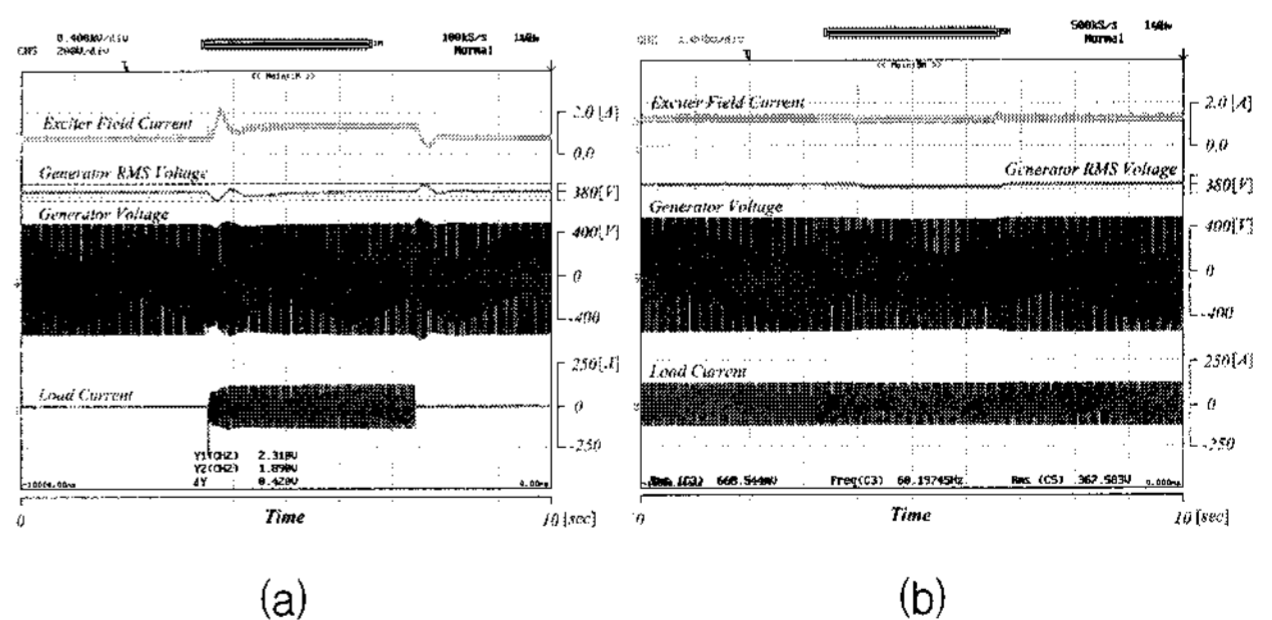


그림 10 인덕턴스 부하에 대한 응답 및 Droop 10% 상태에서의 실험 결과
 (a) 인덕턴스 부하에 대한 응답특성
 (b) 인덕턴스 부하에서의 Droop 특성
 Fig. 10 Experimental results of inductance load and droop control
 (a) Inductance load response
 (b) droop characteristics of inductance load

5. 결 론

본 논문에서는 엔진-발전기 구조에서 전압 검출을 위한 r.m.s. 검출 지연에 따른 발전기 전압 제어의 응답성을 개선하기 위하여, 일반적인 AVR의 PID 제어기와 피크전압 검출부 및 제어 이득 변환기를 적용하여, 급격한 부하 변동에 따른 빠른 응답성을 가지는 제어 구조를 제안하였다.

제안된 제어 방식에서, 부하의 급격한 변동은 설계된 피크 전압 검출부에서 검출하고, 검출된 신호에 따라 제어기의 제어이득을 변동시키며, 오버슈트를 방지하기 위한 스위치 제어 방식을 적용하고 있다.

제안된 방식으로 설계된 디지털 AVR 제어기는 선박용 200kW 발전기의 실부하 시험에서 동일한 제어기의 PID 제어 방식에 비해 개선된 응답특성을 나타내었으며, 초기 자기동 및 전부하 변동과 droop 특성시험, V/Hz 특성시험에서 모두 안정적인 응답특성을 보이고 있다.

감사의 글

본 연구는 2007년 경성대학교 공학기술연구소의 일부 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] An American National Standard IEEE Standard Definitions Excitation System for Synchronous Machines, pp. 8-14, 1986.
 [2] L. W. Matsch, J. D. Morgan, 'Electromagnetic and Electromagnetical Machines', John Wiley & Sons, pp. 214-215, 1987.
 [3] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2. pp. 614-626, May, 1989.
 [4] K. A. Riddle, "Renovation of a Paper Mill Steam Driven Turbine-generator", IEEE Pulp and Paper Technical Conference, Rome, GA, pp 87-95, 1995.
 [5] IEEE Guide for Specification for Excitation Systems, IEEE Std. 421. 4. 1990
 [6] Gao Feng, Qin Yihong, Xu Guoyu. "A Method for Automatic Design of Fuzzy Voltage Regulator". Automation of Electric Power Systems, 19(8) : 5-9. 1995
 [7] Tan Ximei, Zhou Shuangxi. "Analysis of New Fuzzy Logic Excitation Controller", Automation of Electric

Power Systems, 22(8) : 8-11. 1998

[8] J. H. Anderson. "The Control of Synchronous Machine Using Optimal Control Theory", Proceedings of IEEE Transactions on PAS. 59: 25-35, 1971
 [9] A. Godhwani, M. J. Basler, and T. W. Eberly, "Commissioning and Operational Experience with a Modern Digital Excitation System", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 13, pp. 183-187, June, 1998.
 [10] A. Godhwani and M. J. Basler, "Design, Test and Simulation Results of a Var/power Factor Controller Implemented in a Modern Digital Excitation System", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1998, San Diego, CA.

저 자 소 개



이 동 희 (李 東 熙)

1970년 11월 1일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기전자·메카트로닉스

공학부 조교수

Tel : 051-620-4693

E-mail : leedh@ks.ac.kr



안 진 우 (安 珍 雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수.

2006년 7월~2007년 8월 미국 버지니아텍 방문교수. 2006년 3월~현재 기초전력연구원 차세대전동기기술연구센터장. 현재 당 학회 B부문편집위원장. IEEE Senior Member. 1992년~현재 경성대 전기전자·메카트로닉스 공학부 교수.

Tel : 051-620-4773

E-mail : jwahn@ks.ac.kr