

# Drop 방식의 디지털 AVR을 이용한 1MVA급 선박용 동기발전기 제어

(1MVA synchronous generator control for vessel used for digital AVR of drop method)

유동환\*, 황춘환, 박상훈, 유재성, 이상석, 원충연

(Dong-Hwan Yoo\*, Chun-Hwan Hwang, Sang-Hoon Park, Jae-Sung Yoo, Sang-Suk Lee, Chung-Yuen Won)

## Abstract

The output voltage of a synchronous generator is regulated constantly by field current control of excitation system. Synchronous generator exciter has two type, first one is Drop control type by thyristor and second one is exciter current control type through power output by PWM control. Control method of the second one prevails, but when the power devices have a breakdown, output voltage of the generator rises rapidly. This exciter must have a protection circuit and system is complicated, so reliability is poor. Excitation control type which is drop control type control only 10% of the power, so it can be improved precision.

When a trouble come to the controller, output voltage of a generator don't rise excessively and the voltage rise about 10%, so it has a excellent reliability. This paper prove stability of the digital AVR.

## 1. 서론

선박용으로 사용되는 동기발전기의 안정적인 전력의 공급은 엔진이나 발전기의 제어장치 성능에 의존한다.

선박에 사용하는 전기장치 및 발전기의 전압조정기는 육상용에 비하여 파도에 의한 진동 및 해수의 염분에 의한 부식 등 환경적으로 악조건에 있으며, 제품의 신뢰성이 높아야 한다.

국내의 선박용 동기발전기는 현재까지 아날로그 제품을 수입하여 70%이상 사용하고 있는 실정이다.

따라서 국내산업의 발전을 도모하고 선박용 동기발전기의 전압조정기를 연구개발 할 필요성이 있다.

종래의 발전기 여자제어장치의 구조는 사이리스터를 사용하여 위상제어를 하거나 소형인 경우 간단한 OP-Amp회로를 이용하여 PWM 제어를 행하는 경우가 대부분이다.

그러나 현재는 부하 추종성, 고품질의 전력공급에 따른 속응성 그리고 신뢰성 있는 제어시스템의 필요성에 따라 디지털 방식으로 전환되고 있다. 이에 따른 소프트웨어 기술 또한 발달함에 따라서 최적의 제어 알고리즘을 개발하는 추세이다.

동기발전기용 여자장치는 독일의 SIEMENS의 경우 사이리스터에 의한 Drop제어 방식을 선택하고 있고, 나머지 회사들은 여자전원을 PWM제어에 의하여 전원을 출력하여 여자전류를 제어하는 방식을 채택하고 있다.

여자전원의 PWM제어는 여자전원을 별도로 입력받아

전파정류 후 콘덴서를 평활하여 이 전원으로 발전기와 여자전류를 제어하는 방법으로 일반적인 인버터 제어와 유사하다. 그러므로 일반적으로 보편화 되어 있는 제어 방법으로서 동기 발전기의 여자전류제어에 많이 사용되고 있다. 그러나 PWM출력에 관련된 전력용 소자가 파손 되는 경우 발전기 출력전압이 급격히 상승하여 부하에 연결된 전기장치가 고압으로 인하여 고장날수 있는 단점이 있다. 이와 같은 여자장치는 앞서 말한 문제점을 해결하기 위한 보호회로를 추가적으로 설치하여야 하므로 경비의 증가뿐 아니라 시스템이 복잡하게 되어 신뢰성이 떨어진다. 이와 같은 이유로 Drop 제어방식에 비하여 적합하지 못하다. Drop 제어 방식은 전원용 리액터와 전력용 CT를 가지고 정격출력의 110% 전원이 공급되도록 주변장치를 설계한다. 여자기용 제어기는 10%의 전원용량만을 Drop제어하게 된다.

고장 등으로 인한 제어기에 문제가 발생되어도 발전기 출력전압이 PWM 방식처럼 과도하게 상승하지 않고 10% 정도의 전압만이 상승하게 되어 신뢰성 측면에서 상당히 우수하다.

최근에 IT기술의 발달로 인하여 On-line 또는 네트워크로 시스템을 원격제어를 할 수 있는 장점이 있어 시스템의 디지털화 추세가 급속히 진행되고 있다.

이러한 추세에 따르고 앞서 말한 부분의 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 Drop제어를 이용한 디지털 방식의 AVR(Automatic Voltage Regulator)을 적용 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 동기 발전기의 구성도

그림 1은 동기발전기의 구성도이며, 기계 계통은 토크가 발생하는 엔진부분과 주파수를 측정할 수 있는 주파수 측정장치, 정속도를 유지하기 위한 Governor로 구성되어 있다.

전기 계통은 유기기전력이 발생하는 Alternator 부분과 발생한 전압을 제어신호로 바꾸어주는 전압 측정장치, 정전압 등 각종 제어를 하는 AVR로 구성된다.

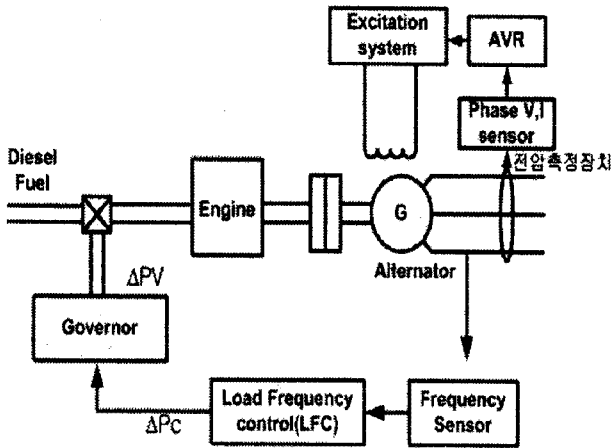


그림 2. 동기발전기의 구성도

Fig. 1. Block diagram of synchronous generator in generally

본 논문에서 실험에 적용된 동기발전기의 여자기 구성은 그림 2와 같다.

회전여자의 여자전류를 AVR이 제어하면 회전자에서 AC전압이 유기되고 이를 다이오드로 전파정류함으로써 작은 제어전류로 발전기의 전압을 제어하게 된다. 이러한 구성은 Brush가 필요 없는 간단한 구조로서 대부분의 디젤발전기가 이러한 방식의 여자시스템으로 설계된다.

그리고 발전기의 초기기동은 발전기의 잔류전압을 이용하여 기동하지만 잔류전압이 없는 경우는 외부 배터리 또는 외부전원에 의하여 고정자 권선을 한번 충전하여 잔류전압이 생기도록 한 후 기동을 하게 된다.

또한 부하단의 사고에 의하여 발전기 출력단이 단락된 경우 보호계전기가 동작하기 위한 시간동안 계속하여 고장전류를 흘려주기 위한 회로가 필요하다.

단락 시는 발전기 출력전압이 영으로 되어 AVR은 동작하지 못하므로 출력전류를 PCT를 통해 여자회로로 흐르도록 하는 CBS(Current Boosting System)가 필요하며 선박에 적용되는 발전기의 경우는 거의 모든 발전기가 이를 장착하게 된다. 본 논문에서는 CBS 기능을 기본으로 하도록 시스템을 구성하였다.

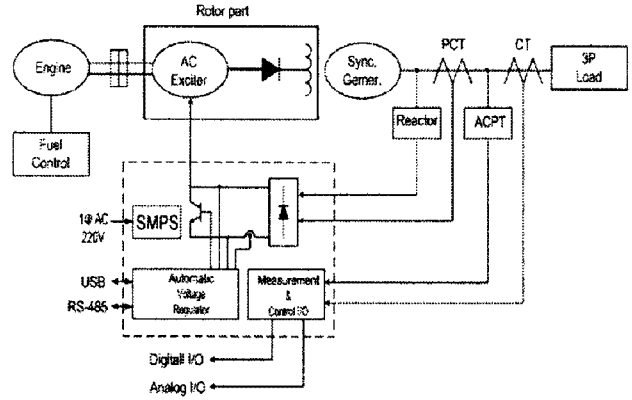


그림 2. Drop 방식의 AVR 구성도

Fig. 2. Block diagram of drop method in AVR

여자기 제어장치인 디지털 AVR의 전원 공급 장치에 전력용 반도체소자 MOSFET를 내장하여 여자전류를 제어하고 단일 장치로서 전체시스템을 구성토록 설계하였다. 그리고 정류다이오드, 제어기용 PCB, 외부 장치와 통신을 위한 인터페이스 회로를 포함하며 중앙처리 장치는 고성능의 One Chip DSP로 구성하였다.

제어기는 크게 여자전류 및 전압, 발전기 출력 전압 및 전류, Drop 전류를 센싱하는 아날로그 회로와 주파수를 검출하는 Zero-crossing 회로로 구성하였다. 제어기에 전원을 공급하는 SMPS 회로는 발전기 전압이 확립될 때 저전압에서도 안정적으로 동작할 수 있도록 저전압 특성이 우수해야 한다.

발전기 무부하 전압을 제어하기 위해 출력단에 병렬로 리액터를 연결하여 무부하 전압에 해당하는 여자전류를 공급한다. 리액터 및 주변 장치는 무부하시 정격전압이 출력되는 여자전류의 110% ~ 130%가 되도록 설계한다. 부하 시 여자전류는 전력용 CT에 의하여 부하전류에 비례하여 공급되므로 여자기 출력 구조가 간단하다.

### 2.2 Drop 제어방식

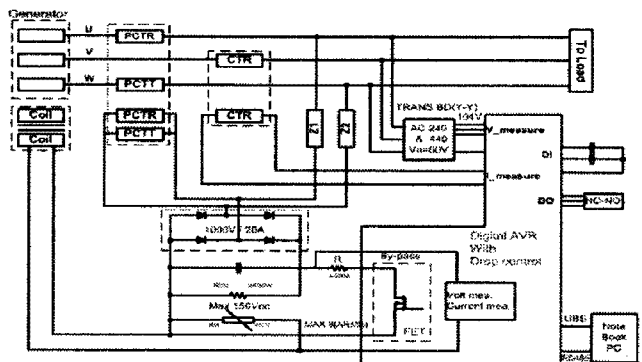


그림 3. 디지털 AVR 시스템 구성도

Fig. 3. Block diagram of digital AVR system

여자기용 제어기는 10%의 전원용량만을 Drop 제어하게 되므로 제어의 정밀도를 향상 시킬 수 있다.

고장 등으로 인한 제어기에 문제가 발생되어도 발전기 출력전압이 PWM 방식처럼 과도하게 상승하지 않고 10% 정도의 전압만이 상승하게 되어 신뢰성 측면에서는 상당히 우수하다.

하지만 이 방식의 단점은 리액터를 구성해야 하는 불편함과 발전기 특성에 따라 리액터 및 전력용 CT를 설계해야 한다는 단점이 있다.

이 구성은 그림 3과 같고 전력용 반도체소자 MOSFET, 정류다이오드, 제어기용 PCB, 인터페이스 회로로 구성 된다.

### 2.3 제어기의 구성

제어기는 시스템에서 핵심적인 역할을 담당하고 있으며 DSP 및 주변회로, Analog 센서신호를 검출하기 위한 Analog 신호 처리부, Digital 입력 및 출력을 제어하는 Digital 신호 처리부, 사용자와의 인터페이스를 위한 오퍼레이터부 등으로 구성되어 있다.

첫째로 Analog 신호처리부는 3상 출력 전압 입력부, 모션 전압 검출부, 발전기 여자 전류 및 전압 검출부, V상 전류 검출부 등이 있다.

그림 3에서 3상 입력 전압 입력부는 U, V, W 상의 3상 전압은 차동증폭기에 의해 절연(약 1MΩ의 절연저항 값을 갖고 있다.) 입력되어 2상의 선간전압으로 변환 된다.

그리고 2상의 선간전압( $V_{UV}, V_{WV}$ )을 이용하여 나머지 한상의 선간전압( $V_{WU}$ )도 만들게 되며, 이 값들은 출력 전압 제어를 위해 Digital 값으로 변환되어 DSP에 입력된다.

또한 발전기의 여자 전류 제어 및 여자 전압 관측을 위하여 여자 전류와 전압을 연산 증폭기를 통하여 입력한다. 여자 전압은 구형파의 형태를 갖춘 PWM 출력이므로 이의 관측을 위해 평활 회로를 이용하여 DC로 변환한 후 A/D 변환장치로 입력하는 발전기 여자 전류 및 전압 검출부 회로가 구성되어 있다.

출력 전류 중 V상의 전류는 CT를 이용하여 검출한 후 이 전류를 입력하는 단상 전류 검출부가 있다.

이 전류 검출부는 역률을 계산 하거나 무효전력을 측정하는 용도로 사용된다.

그 외에도, 외부 Analog 제어 지령 입력을 위해 전기적으로 절연되어 입력이 가능한 Analog 제어 지령 입력부, 3상 전압 평균치 계산을 위한 3상 전압

정류 회로 및 과전압 검출부 등이 있다.

두 번째로 Digital 신호 처리부는 그림 4와 같은 블록도로 표현할 수 있다. 외부에서 입력되거나 외부로 출력되는 Digital 신호를 처리하기 위한 Digital 신호 처리부는 절연된 24V 전원을 사용 하였다.

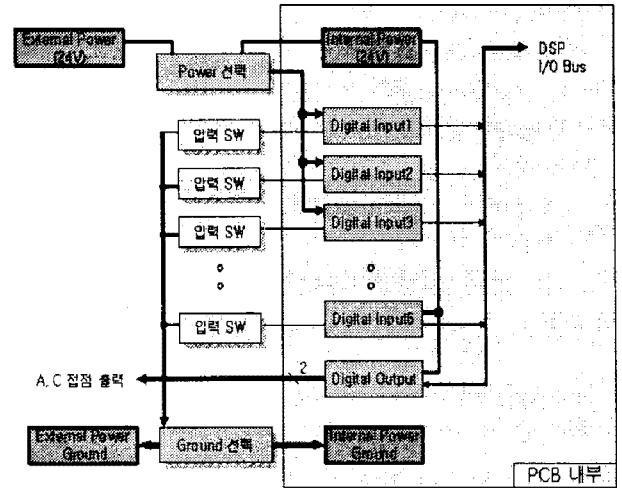


그림 4. Digital 신호 처리부 구성도  
Fig 4. Block diagram of digital signal transaction

### 2.4 제어 알고리즘

동기 발전기의 여자제어 기능은 기본적으로 전압 제어와 전류제어이며 이 제어기는 PID제어기로 구성하여 발전기의 파라메타에 따른 최적의 상태로 튜닝하게 했으며 따라 적용 가능한 각 기능에 대해서 알고리즘을 선별 적용하도록 설계하였다. PID 방식으로 구현된 AVR제어 구조에서  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 비례, 적분 및 미분 제어이득을 나타 내고 있으며, 여자기의 출력전압은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta V_E = V_{REF} - V_C + V_S \quad (1)$$

$$V_R = \Delta V_E \times \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{sT_D}{1+sT_D} \right) \times \left( \frac{K_A}{1+sT_A} \right) \quad (2)$$

단,  $T_D$ : 1차 지연함수의 시정수

$K_A, T_A$ : 여자기의 증폭이득과 시정수

전체 제어 시스템 구성은 그림 5와 같으며 그림에서 알 수 있듯이 제어기 구성은 전류, 전압 제어용 PID제어기가 내부 루프로 있고 다른 제어기능들은 전압, 전류제어기의 기준전압 Point에서 합산 되도록 하는 외부 루프로 구성된다.

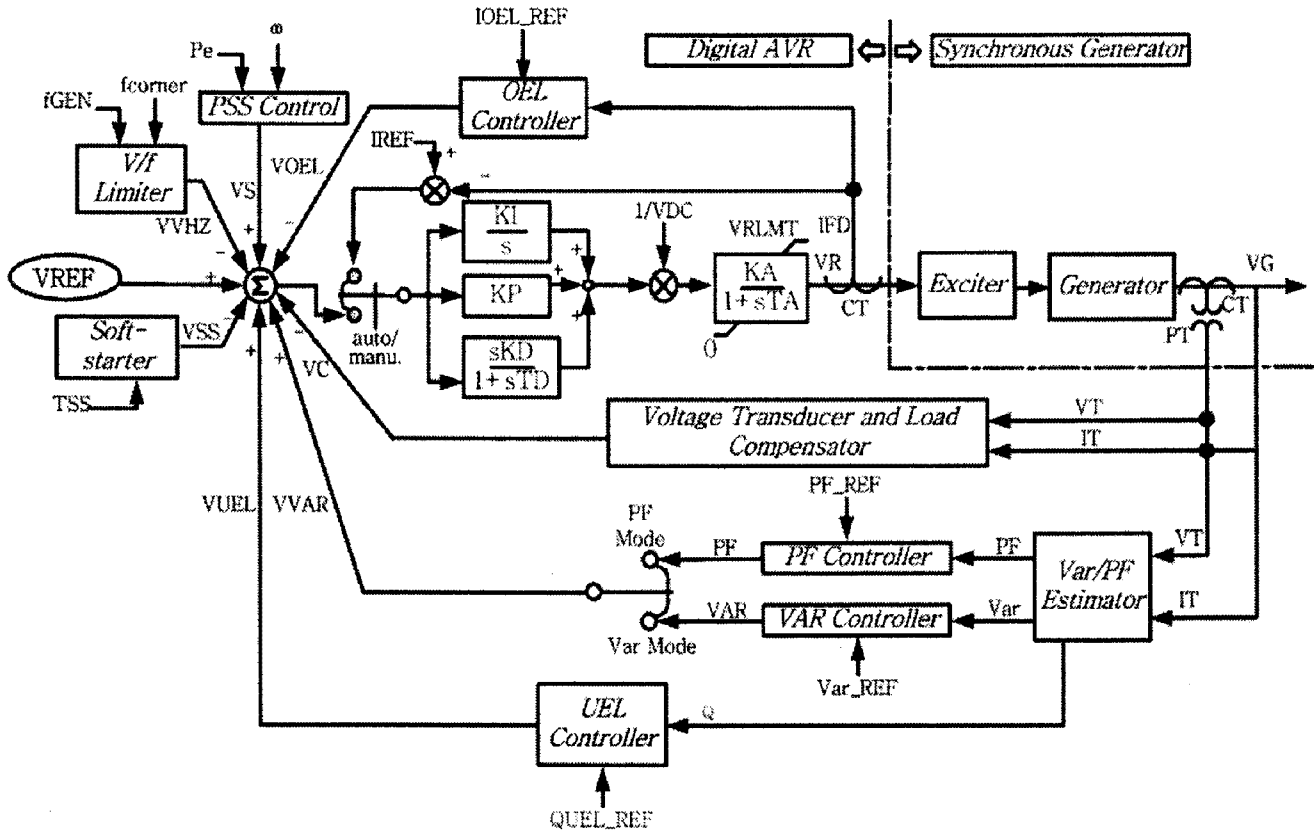


그림 5. 전체 AVR 제어블록도  
Fig 5. Overall AVR control block diagram

### 3. 실험 파형

#### 3-1. 전압강하 특성 실험

실험방법 : 기동 시 대략 40-45% 속도에서 전압 확립 후 정격속도에서 대략 4초가 지나 Over shoot 후 정상적인 전압제어를 실행한다.

전압강하 시 출력전압은 선형적으로 감소하며 대략 40-45%속도에서 약간의 전압변화를 갖고 다시 선형적으로 감소한다.

기동 및 정지 시 동일하게 40-45%의 속도에서 전압이 변동되는 현상은 시험설비의 특성이다.

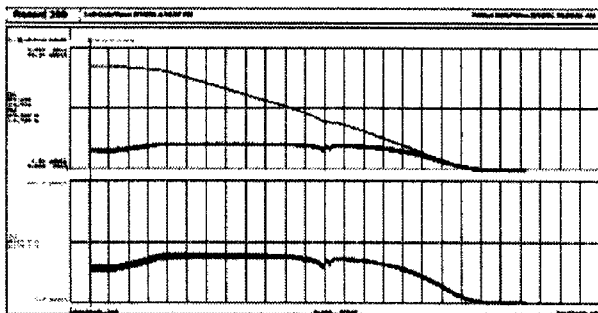


그림 6. 전압강하 특성 실험  
Fig 6. Experiment of the Voltage drop characteristic

#### 3-2. 부하급변 시 전압특성 실험

발전기를 정상 운전 상태에서 부하를 급격히 변동 시키면서 그때의 발전기 단자전압 및 전류를 측정하고 전압의 불안정 여부를 측정한다. 아래의 표 1은 실험 조건을 나타낸 것이다.

표 1. 부하급변 시 전압 특성

Table 1. Voltage characteristic when a sudden change of the load

부하 급변	전압 변동	부하 급변	전압 변동	실험 파형	급변직후 불안정
0->40%	-6%	100->20%	+7%	그림 8	없음
0->50%	-7%	90->40%	+5%	그림 9	없음

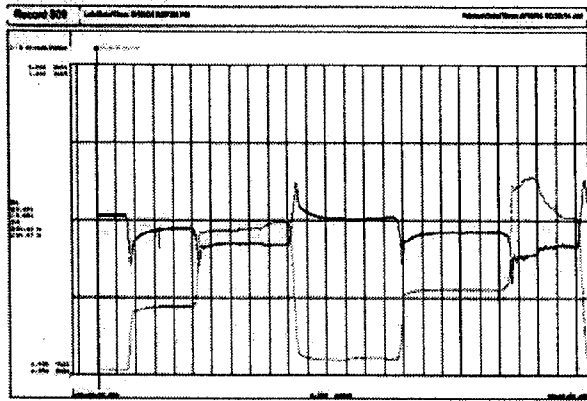


그림 7. 부하급변 실험 (0→40%, 100→20)

Fig 7. An experiment with a sudden change of the load (0→40%, 100→20)

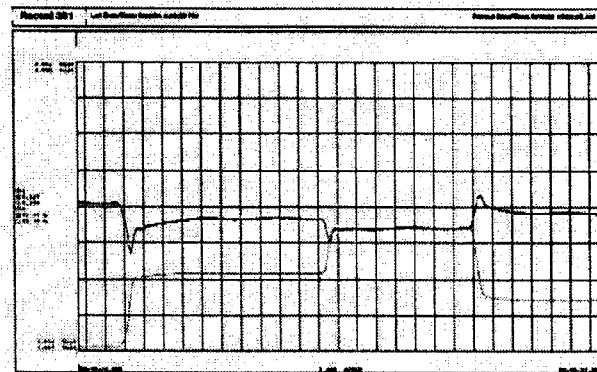


그림 8. 부하급변 실험 (0→50%, 90→40)

Fig 8. An experiment with a sudden change of the load (0→50%, 90→40)

#### 4. 결론

아날로그 AVR은 다양한 발전기 제어기능을 구현하는데 어려움이 있어 특별한 기능이 거의 없다. 본 논문의 Drop 방식의 자동전압조정기(AVR)는 DSP를 이용하여 제어가 S/W로 처리됨으로 제어 신뢰성이 높고 설정이 간편하다. 또한 본 논문에서 제시한 Drop방식은 하드웨어의 신뢰성이 다른 방식에 비하여 월등히 높기 때문에 선박 등 고신뢰성이 요구되는 분야에 사용될 수 있다.

#### 참고문헌

[1] Chung-Yuen Won, Jung-ho Ahn, " A trend of excitation system for synchronous generator and digital voltage control". The proceedings of the

korean institute of illumination and electrical installation engineers, 00.51-57, 2002.

[2] Min-Sung, Seo, "High Performance Control of Digital Excitation System for Synchronous Generator", 2002 Power Electronics Annual Conference, pp.763-765. 2002.

[3] Hong-Woo Rhew, Ick-Hun Lim, "New Generator Static Exciter with Boost function", IEEE, Conference in Electric Power Conversion, Mexico, 1996.

[4] R. C. Schaefer, "Applying Static Excitation System", IEEE Industry Application Magazine, Nov/Dec, 1998.

[5] Digital Excitation Task Force of the IEEE /PES Excitation Systems Subcommittee, "Computer Models for Representation of Digital-Based Excitation Systems", presented at the 1996 IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, Jan 21-25, 1996.