

# 소수의 전자소자를 사용한 간이형 AVR의 시작에 관한 연구

박재생\* · 안병원\*\* · 이성근\*\*\* · 김윤식\*\*\*\*

The study on tentative-production of AVR using simple electronic devices

*Jae-Saeng Park · Byong-Won Ahn · Sung-Kun Lee · Yoon-Sik Kim*

## 〈目 次〉

Abstract	3. 실험 및 고찰
기호설명	4. 결 론
1. 서 론	참고문헌
2. 본 론	

## Abstract

To maintain terminal voltage of a generator at constant value automatic voltage regulator(AVR) is used by adjusting field current of a generator. In almost all industrial field, self-exciting type generator is usually adopted. So in this paper, the field of our discussion lies on shunt type AVR mainly adopted in self-exciting type generator which shunt field current to regulate terminal voltage. As shunt device here, transistor or thyristor is used, and also PID control algorithm is applied in this type of AVR. Even in minute voltage variation it can work satisfactorily both in voltage recovery and its quick response, because of sophisticated control circuit. But, in this paper we set up a very simple AVR composed of a small number of electronic devices based on transistor shunt circuit and detection circuit of voltage deviation to realize the need for low cost and easiness of AVR handling. Shunt device is installed parall to field current circuit to regulate exciting current by by-passing the current and deviation voltage detection circuit detects the voltage deviation between ouput and reference voltage of generator to control shunt circuit current. Although proposed AVR circuit in this paper is not so effective as PID control circuit type AVR, set up AVR circuit can be composed with a remarkably small number of electronic devices. With this study, followings are pointed out.

\* 해사고등학교  
\*\* 한국해양대학교 대학원  
\*\*\* 충남전문대학  
\*\*\*\* 한국해양대학교

1. It is confirmed that test set-up AVR can be used in industrial field.
2. Very low cost AVR can be made up using Tr., OP Amp. and voltage regulator.
3. It can be said that simplicity and easiness are realized in maintenance and handling with this AVR for trial set up and power consumption was considerably reduced.

### 기 호 설 명

$I_G$	: Load current of generator[A]
$I_P$	: Proportional exciting current ofr terminal voltage[A]
$I_C$	: Proportional exciting current for load current[A]
$I_{TR}$	: Current of shunt circuit[A]
$V_{REF}$	: Input voltage of reference terminal(3) of OP AMP[V]
$V_V$	: Input voltage of comparison terminal(2) of OP AMP[V]
$V_G$	: Terminal voltage of generator[V]
$V_O$	: Induced voltage of generator[V]
$R_{TR}$	: Resistance of shunt circuit[ $\Omega$ ]
$R_F$	: Equivalent resistance of field[ $\Omega$ ]
$R_M$	: Main resistance of field circuit[ $\Omega$ ]
$\alpha$	: Duty ratio of transistor
$\phi$	: Phase difference between $I_M$ and $\vec{V}$
$\alpha$	: Winding ratio
CCC	: Compensator for circulating current

### 1. 서 론

발전기의 自動電壓調整器(Automatic Voltage Regulator, 이하 AVR이라 함)는 여자전류를 조정하여 발전기 출력전압을 항상 일정하게 유지시키는 장치이다. 물론 일반 상용전원을 일정 전압으로 조정하는 장치도 AVR이라 불리며 현재 활발한 연구가 진행되고 있으나 본 논문은 발전기용 자동전압조정기에 관한 내용이다. 원래 자여자식 교류발전기는 기본 여자회로의 설치만으로 어느 정도의 정전압을 유지할 수 있으나 원동기의 속도변화, 자기포화, 온도변화에 의한 각 부의 저항치 변화 등의 원인에 의해 전압이 변동되며 좀더 정밀한 전압유지를 위해 AVR이 설치된다. 현재 자력식 교류발전기에 많이 채용되는 AVR은 다이리스터(Thyristor) 분류형이다. 다이리스터 분류형이란 계자전류의 일부를 분류시켜 출력전압을 조정하는 형태로서 분류를 담당하는 소자로 다이리스터가 사용된다. 최근에는 트랜지스터(Transistor)가 대용량화 됨에 따라 다이리스터 대신에

제어가 용이한 트랜지스터를 사용한 AVR도 제작 가능하게 되었다.<sup>1)-7)</sup> 또한 이러한 AVR의 제어 시스템은 대부분, 정상편차가 없고 응답속도가 빠른 PID제어법이 채용된다. 본 논문은 소수(少數)의 전자소자를 사용한 간이형(簡易型) AVR의 시험제작에 관한 내용으로 시험제작한 AVR회로는 트랜지스터 분류형 AVR회로를 기본모델로 하였으며 분류회로와 편차전압검출회로로 구성되어 있다. 분류회로는 계자에 공급되는 전류를 분류시키기 위하여 계자회로와 병렬로 설치되는 회로이고, 편차전압검출회로는 발전기 출력전압과 목표전압의 편차를 검출하여 분류회로를 제어하는 회로이다. 본 AVR회로는 PID제어회로에 비해 많은 결점이 있으나 소수의 전자소자 만으로도 회로구성이 가능한 장점이 있다.<sup>8)-10)</sup> 본 연구에서는 이러한 장점에 연구목적을 두어, 먼저 대상 발전기를 선정하고 그 발전기에 적합한 AVR을 시험제작 하였다. 그리고 시험제작한 AVR을 발전기에 장착하고 제반 부하운전을 통하여 전압조정 성능을 실험한 결과 어느 정도의 실용성을 확인할 수 있었다. 계자전류의 조절 형태는 현재 주로 사용되고 있는 분류형으로 하였으며 분류를 담당하는 소자로는 제어가 용이한 전력 트랜지스터를 사용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 트랜지스터 분류형 여자조정장치의 이론적 고찰

아래 Fig. 1은 트랜지스터 분류형 여자조정장치의 결선도로서 리액터(X)와 변류기(CT)를 이용

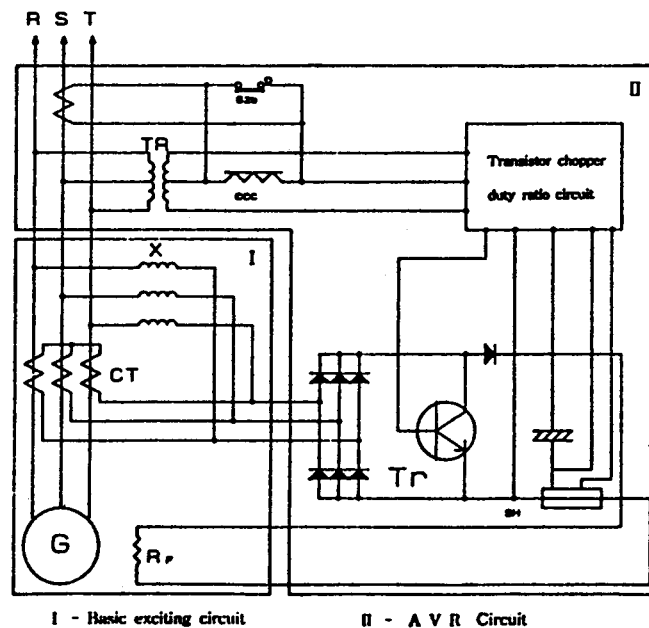


Fig. 1 Exciting control system of transistor shunt type

한 기본 여자회로와 트랜지스터 분류형 AVR회로로 구성되어 있다. 본 연구에서 시험제작한 AVR회로는 Fig. 2와 같은 트랜지스터 분류형 여자조정장치의 AVR회로를 기본 모델로 하여 PID 제어회로인 트랜지스터 통유율 제어회로를 편차전압분만을 검출하여 출력전압을 제어하는 회로로 변경한 것이다.

### 2.1.1. 기본 여자회로

Fig. 1의 결선도에서 기본 여자회로만을 등가회로로 나타내면 Fig. 2와 같이 된다 기본 여자회로는 자력식의 경우 AVR의 종류에 관계없이 동일한 회로구성으로 되어 있으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 무부하시에는 자신의 발생전압을 리액터(X)를 통해서 발전기의 단자전압에 비례하는 전류( $I_p$ )를 정류기를 거쳐 여자전류로 공급한다. 다음에 발전기에 부하가 걸려 모선에 부하전류가 흐르면 동기 임피던스의 강하가 발생하여 단자전압이 하강한다. 이것을 보상하기 위하여 모선에 변류기(CT)를 접속하여 변류기의 2차측에서 부하전류에 비례된 여자전류( $I_c'$ )를 빼내어 리액터(X)로 부터의 전류( $I_p$ )와 벡터적으로 합성시켜 부하의 크기, 역율에 관계없이 일정 단자전압을 유지하도록 한다.

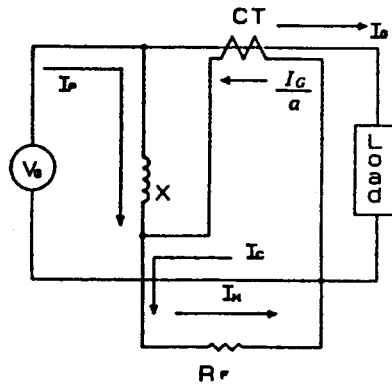


Fig. 2 Equivalent circuit

Fig. 2의 등가회로에서 보는바와 같이

$$I_p = \frac{V_G}{R_F + jX}, \quad I_c = \frac{I_L}{a} \cdot \frac{jX}{R_F + jX} \quad (1)$$

$$I_M = \frac{V_G + jX \frac{I_L}{a}}{R_F + jX} = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_F/X)^2}} \cdot e^{j\theta} \cdot \left( \frac{V_G}{jX} + \frac{I_L}{a} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\vec{V} = \left( \frac{V_G}{jX} + \frac{I_G}{a} \right)$ 라 하면,

$I_M$ 과  $\vec{V}$ 의 위상차  $\phi = \tan^{-1} \frac{R_F}{X}$ 가 된다.

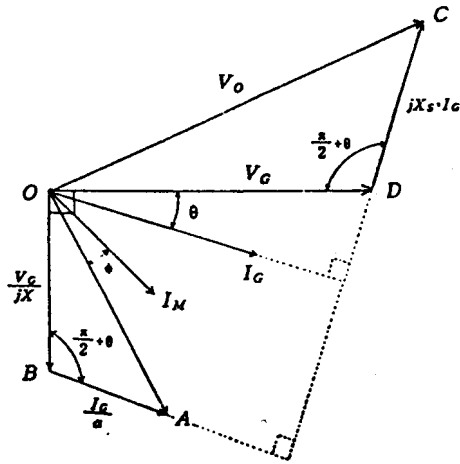


Fig. 3 Phasor diagram

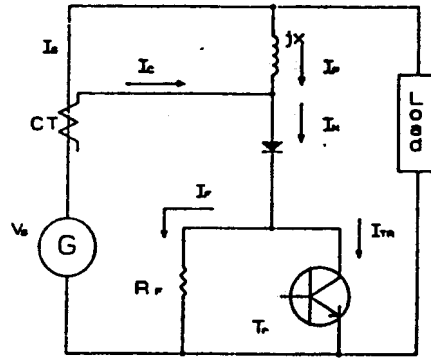


Fig. 4 Equivalent circuit

이 관계를 위상도로 표시하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 부하전류에 관계없이 일정한 단자전압을 얻기 위해서는 Fig. 3상의 두 삼각형( $\triangle OBA$ 와  $\triangle ODC$ ) 닮은꼴이 되어야 하므로 아래의 (3)식이 성립하여야 한다.

$$\frac{I_G \cdot X_s}{V_G} = \frac{I_G/a}{V_G/X}, \quad X_s = \frac{X}{a} \quad (3)$$

그러므로 위의 (3)식이 성립하도록 리액터(X)의 값을 선정하면 이론상으로 일정 단자전압이 유지되며 실제의 발전기에서는 정격전압보다 10%~20% 정도 높게 무부하전압이 발생되도록 조절된다.

### 2.1.2. 트랜지스터 분류회로

변류기와 리액터를 이용한 기본 여자회로 만으로는 전기자 철심의 자기포화, 누설 리액턴스, 계자저항의 온도변화 등의 영향에 의해 정밀한 전압유지가 어렵기 때문에 계자회로에 분류회로를 설치하여 미리 분류전류를 통하게 해놓고 전압변동에 따라 이 분류전류를 조절하는 회로로서 Fig. 1의 결선도를 간단한 등가회로로 표시하면 Fig. 4와 같이 되고 계자전류  $I_r$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_f = |I_f + I_c| (1 - \alpha) = \left| \frac{V_G}{jX} + \frac{I_G}{a} \right| (1 - \alpha) \quad (4)$$

따라서 트랜지스터 쇼퍼(chopper)에서 제어되는 통유율에  $\alpha$  의해서 계자전류  $I_f$ 가 제어되고 발전기 출력전압이 제어된다.

## 2. 2. 시험제작 AVR 회로설계

### 2. 2. 1. 회로 모델링

본 AVR의 회로구성은 PID제어인 트랜지스터 쇼퍼 통유율 제어회로와는 달리 발전기 출력전압과 목표전압을 비교하여 분류 트랜지스터를 제어하는 회로로서 편차전압검출회로, 분류회로만으로 구성되며 이를 계통도로 나타내면 Fig. 5와 같다.

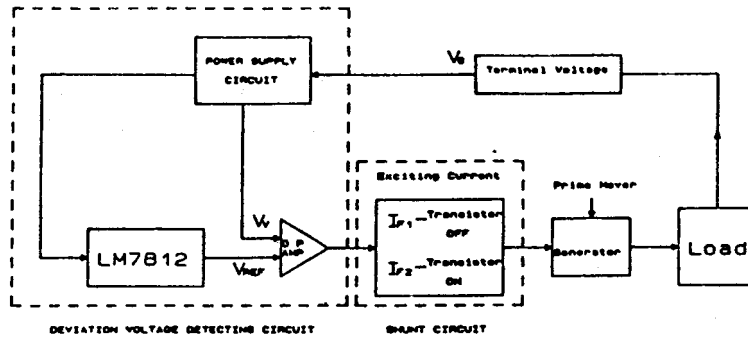


Fig. 5 Schematic diagram of tentative production AVR

Fig. 5에서와 같이, 편차전압검출회로는 발전기 출력전압을 목표치와 비교하여 그 결과에 따라 분류회로를 ON-OFF 제어한다.

분류회로에서는 편차전압검출회로의 제어에 의해 계자전류의 일부를 분류(트랜지스터 on) 또는 분류 차단(트랜지스터 off)시켜 출력전압을 조정한다.

계자전류의 분류비( $\frac{I_{F1} - I_{F2}}{I_{F1}} \cdot 100[\%]$ )는 분류트랜지스터의 on-off 주파수에 영향을 미치며 일정 범위 내에서 분류저항으로 조절 가능하나, 본 연구에서는 분류비를 20% 로 하여 설계하였다.

### 2. 2. 2. 분류회로의 설계

#### (1) 무부하포화곡선의 측정

AVR 설계시 가장 기본적인 DATA가 되는 무부하포화곡선(No load saturation curve)은 발전기를 정격회전수로 운전하면서 외부 전원장치로 부터 계자를 여자시킬 때 계자전류와 단자전압의 관

계를 곡선으로 나타낸 것이며, Fig. 6은 본 연구의 AVR회로 설계대상으로 사용된 발전기의 무부하포화곡선으로 잔류자기에 의한 출력전압은 약 13[V], 자기포화점은 155[V], 0.80[A] 부근으로 측정되었고 목표전압인 110[V]에서 계자전류는 약 0.34[A]로 나타났다.

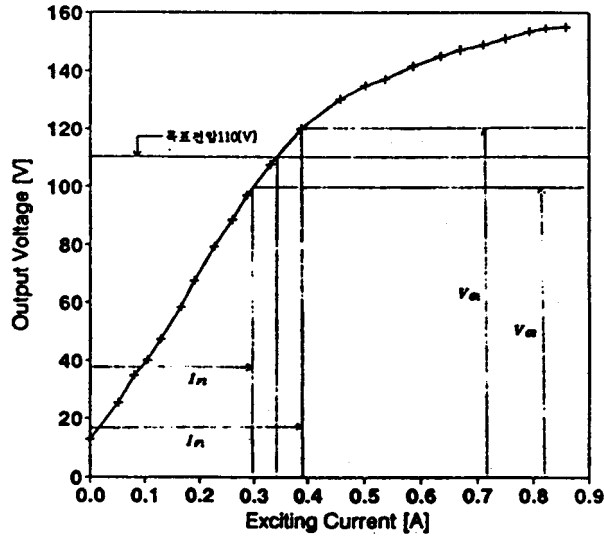


Fig. 6 No load saturation curve

(2) 분류회로

분류회로는 분류 트랜지스터와 분류저항을 사용하여 Fig. 7과 같이 간단하게 구성하였다. Fig. 6의 무부하포화곡선에서와 같이 계자전류의 크기는 목표전압을 중심으로 트랜지스터가 OFF시에는  $I_{F1}$ , ON시에는  $I_{F2}$ 로 변하고 발전기 출력전압은 트랜지스터의 통유율에 따라  $E_{G1}$ 과  $E_{G2}$ 사이에서 안정된다.

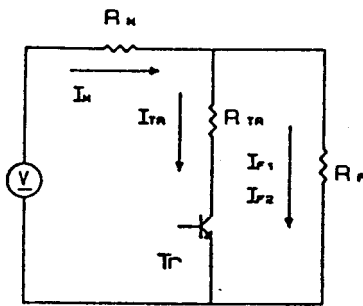


Fig. 7 Shunt circuit

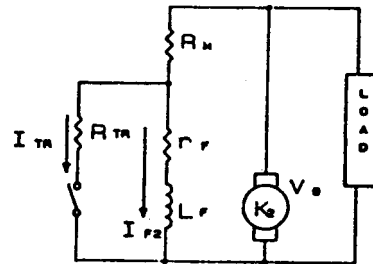


Fig. 8 Equivalent circuit

이때의 과도현상은 Fig. 8의 등가회로에서와 같이 아래의 회로방정식으로 해석된다.

$$I_{F2} \cdot r_F + L_F \cdot \frac{dI_{F2}}{dt} = I_{TR} \cdot R_{TR} \quad (5)$$

$$(I_{F2} + I_{TR}) \cdot R_M + I_{F2} \cdot r_F + L_F \cdot \frac{dI_{F2}}{dt} = E_G \quad (6)$$

그러나 회로설계를 위해 트랜지스터가 ON시와 OFF시 Fig. 7을 참고로 아래와 같은 근사식에 의해  $R_M$ 과  $R_{TR}$ 의 근사값을 구하였다.

먼저 트랜지스터가 OFF되었을 때를 생각하면 Kirchhoff's law에 의해,

$$V \approx I_M \cdot R_M + I_{F1} \cdot R_F \quad (7)$$

$$R_M \approx \frac{V - I_{F1} \cdot R_F}{I_M} \quad (8)$$

여기서  $V \approx 22.5[V]$ ,  $I_{F1} \approx I_M \approx 0.38[A]$ ,  $R_F \approx 26[\Omega]$ 을 대입하면,

$$R_M \approx \frac{22.5 - 0.38 \cdot 26}{0.38} \approx 33[\Omega] \text{이 된다.}$$

다음으로  $R_{TR}$ 의 값을 구하기 위해서는 트랜지스터가 ON되었을 때를 생각하여야 하며 그때의 회로방정식은,

$$R_F \cdot I_{F2} \approx I_{TR} \cdot R_{TR} \quad (9)$$

$$R_M \cdot I_M + I_{F2} \cdot R_F \approx 3V \quad (10)$$

$$I_M \approx I_{F2} + I_{TR} \quad (11)$$

여기서  $V \approx 22.5[V]$ ,  $I_{F2} \approx 0.3[A]$ ,  $R_F \approx 26[\Omega]$ ,  $R_M \approx 33[\Omega]$ 을 대입하여 방정식을 풀면,  $R_{TR} \approx 52[\Omega]$ 이 된다.

### 2.2.3 편차전압검출회로의 설계<sup>11), 12)</sup>

편차전압검출회로는 제어회로의 전원공급을 위해 변압기(Transformer)와 브리지 다이오드(Bridge Diode)로 구성된 전원공급회로, 출력전압에 관계없이 연산증폭기에 일정한 기준전압을 공급하기 위한 전압조정기(Voltage regulator)와 기준전압과 출력전압을 비교하여 분류 트랜지스터 구동신호를 발생하는 연산증폭기(OP Amp)로 구성된 비교회로로 되어 있으며 회로도도 Fig. 9와 같다.

전압조정기와 연산증폭기로 구성된 비교회로는 목표전압과 발전기 출력전압을 비교하여 분류



트랜지스터 구동신호를 발생한다.

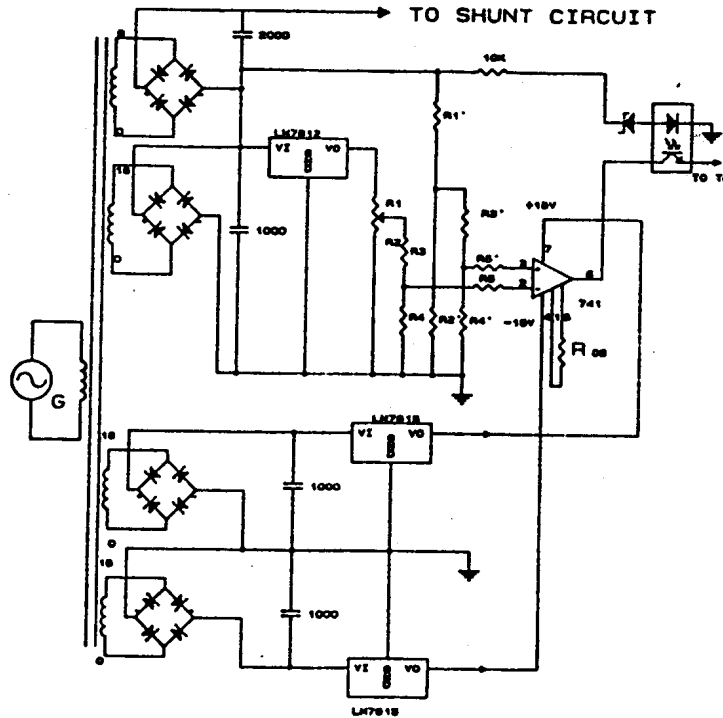


Fig. 9 Detecting circuit of deviation voltage

Fig. 9에서 보는 바와 같이 연산증폭기의 두개 입력단자(2,3)중 기준 입력단자(3)에는 전압조정기와 저항을 거쳐 강하된 비교용의 기준전압( $V_{REF}$ )을 가하고 다른쪽·단자(2)에는 발전기의 출력전압( $V_V$ )을 저항을 거쳐 공급한다.

만약  $V_V$ 가  $V_{REF}$  보다 크면 연산증폭기가 정(正)으로 포화되어 분류 트랜지스터를 ON시키고  $V_V$ 가  $V_{REF}$ 보다 작으면 부(負)로 포화되어 OFF시킨다. Fig. 10에서와 같이 연산증폭기의 두 입력단자에 가해지는 전압( $V_{REF}$ ,  $V_V$ )은 발전기 출력전압이 목표치인 110[V]를 유지한다고 할 때 다음과 같은 회로 방정식에 의해 계산될 수 있다.

$$V_{REF} \approx \frac{12 \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (12)$$

$$V_V \approx \frac{14.4 \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (13)$$

본 설계에서는 연산증폭기의 정격과 전기적 특성을 고려하여  $V_{REF} \approx V_V \approx 0.9[V]$  정도가 되게 각

저항값을 결정 하였으며 ( $R_1 + R_2$ )는 기준전압( $V_{REF}$ )의 값을 변화시켜 발전기 출력전압을 조정할 수 있도록 하기 위하여  $50[k\Omega]$ 의 가변저항을 사용하였다.

연산증폭기의 1,5번 단자간에 연결된 저항  $R_{os}$ 는 연산증폭기의 정상편차 조절용 저항으로서  $V_V$  단자를 개방한 다음 +, - 양 입력 단자간을 쇼트(short)하고 출력전압이 거의 제로가 될 때의 저항값이나 본 회로에 사용된 연산증폭기에서는 조정되지 않았다.

연산증폭기 출력단에 설치된 회로는 목표전압이 확립되기 전의 영역에서 수mv의 입력 편차전압에 의해 발생하는 연산증폭기의 출력에 대한 분류 트랜지스터의 오(誤)동작을 방지하기 위하여 발전기 출력전압이 제너다이오드(IN4697)의 항복전압 이상이 될 때까지 회로를 차단하여 전압을 확립시켜 주는 보호회로의 역할을 한다.

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1. 실험장치의 구성

시험제작한 AVR의 전압조정성능을 실험하기 위한 실험장치의 구성은 발전기의 구동은 유도전동기로 하며 회전력은 벨트를 통해서 전달된다. 부하변동에 따른 발전기의 회전수 변화를 측정할 수 있도록 하기 위하여 발전기 축단에 Tacho-Generator를 부착하였다.

#### 3.2. 실험방법 및 결과

##### 3.2.1. 실험방법

실험은 시험제작된 AVR을 발전기에 장착한 후 각각의 부하상태에서 출력전압 및 발전기의 속도 변화상태, 분류 트랜지스터의 동작상태, 부하전류의 변화상태를 측정하였으며 부하는 저항부하를 사용하였고 아래와 같은 방법으로 실험을 실시하였다.

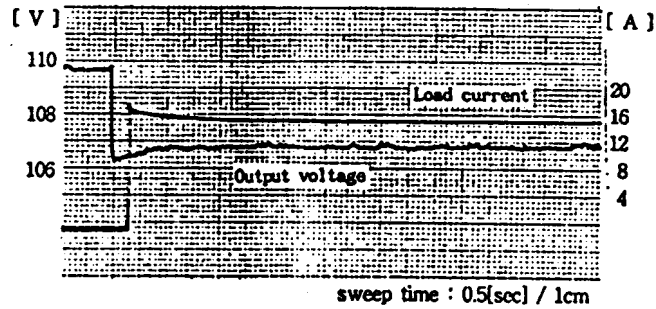
- (1) 무부하에서 운전상태
- (2) 무부하에서 50% 부하 투입 및 제거시의 운전상태
- (3) 무부하에서 100% 부하 투입 및 제거시의 운전상태

##### 3.2.2. 실험결과

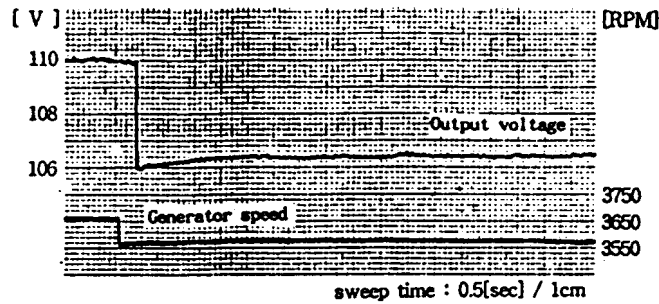
각 부하별 실험 Data를 종합하여 Table. 1에 나타내었다.

Table 1. Values of Experiment results

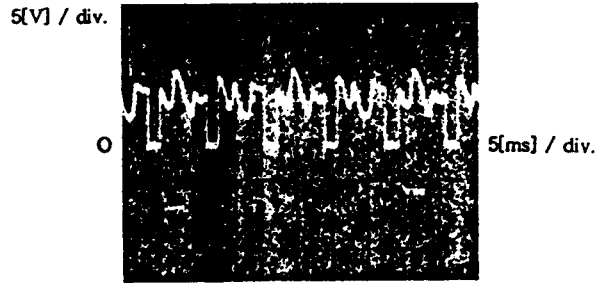
Item	Load	no-load	25% load (500 W)	50% load (1KW)	75% load (1.5KW)	full load (2KW)
Control range of output voltage[V]		82-146				
Current of AVR circuit[mA]		8-9				
Frequency of shunt transistor[hz]		about 120				
Duty ratio of transistor		0.655	0.627	0.500	0.364	0.205
Offset voltage of Gen.[V]		-	0.5	1.4	2.6	3.6
Load current[A]		-	2.9	7.8	12.4	15.9
Speed of Gen.[RPM]		3652	3634	3612	3591	3570
Frequency of output voltage [hz]		60.87	60.57	60.20	59.85	59.50



(a) Output voltage-Generator speed



(b) Output voltage-Load current



(c) C-E Voltage of full-load test

Fig. 10 The result of full-load test

### 3. 1. 고 찰

#### 3. 3. 1. 발전기 출력전압 조정상태

연산증폭기의  $V_{REF}$  단자 입력측에 설치된 가변저항( $100K\Omega$ ,  $R_1+R_2$ )의 조절에 의해 발전기 출력 전압을 제어할 수 있는 범위는  $82-146[V]$ 였으며 부하가 증가 될수록 제어범위는 약간씩 감소하였다. 부하 투입 순간의 전압강하는 부하의 크기에 비례하며 최대치는 전부하시의 약 3.7%(약 4.1 [V])로서 20초만에 약0.45%(약 0.5[V])정도가 회복되었고 그 이후에는 회복되지 않고 약3.3%(약 3.6[V]) 정도의 편차를 유지하면서 안정되었다. 이 현상은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 발전기의 속도변화와 관계되는 것으로서 구동 전동기에 공급되는 전원전압의 불안정과 구동전동기의 용량 부족에 의해 야기되는 전동기의 속도 offset의 영향이 크다고 생각된다.

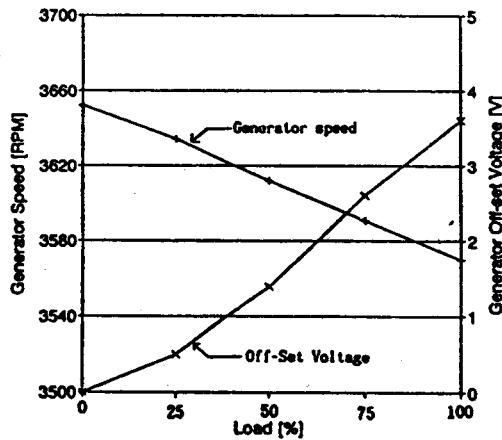


Fig. 11 Graph of generator speed and offset voltage for load change

시험제작한 AVR의 전압조정성능은 리플(ripple)전압이 약 0.9%(약 1[V]) 이내로서 대체로 우수하였다.

### 3.3.2 분류 트랜지스터의 동작상태

분류 트랜지스터의 동작 주파수는 약 120[Hz]로 부하변화에 관계없이 항상 일정하며, 듀티비는 목표전압을 110[V]로 할 때 무부하시의 0.655에서 전부하시의 0.205로 부하변화에 반비례하여 변화함을 알 수 있다.

듀티비는 분류비와 관계되며 분류저항( $R_M$ )의 값으로 조정할 수 있다.

Fig. 12는 부하변화에 대한 트랜지스터의 듀티비와 발전기의 속도 사이의 관계를 보인다.

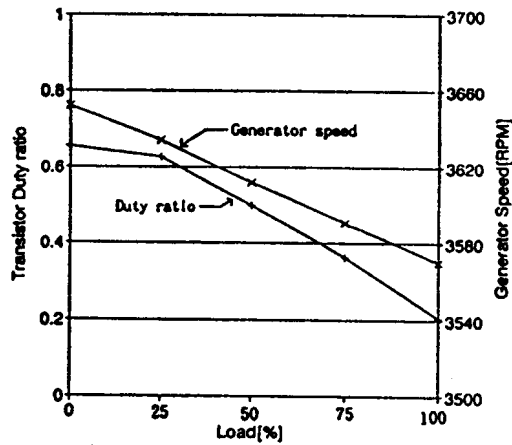


Fig. 12 Graph of duty ratio and generator speed for load change

## 4. 결 론

이상에서와 같이 간단한 전자소자를 사용한 AVR을 시험제작하여 발전기에 장착한 후 다양한 부하운전을 통해 전압조정 성능을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 간단한 전자소자 만으로 제작된 AVR임에도 전압조정성능이 양호하여 실용 가능성을 확인할 수 있었다.

둘째, AVR제작에 사용된 주요 전자소자는 트랜지스터, 연산증폭기, 전압조정기 등으로서 저렴한 가격의 AVR 제작이 가능하였다.

셋째, 회로가 간단하기 때문에 취급과 보수가 용이하며 제어회로의 전력소모도 기존의 AVR에 비해 현저하게 감소 하였다.

그러나 기동전류가 많이 요구되는 유도성부하 운전시에는 시험제작한 AVR의 속응성에 약간의

시간지연이 있었다. 이 문제는 분류비를 증가시킴으로서 일부 보상이 가능하리라 생각되며 이에 관한 문제는 다음 과제로 남기고자 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) 李成馥, 電氣工學解說(下), 太和出版社, 1983, pp. 252-285
- 2) Yukio TAKEDA, Design of Marine Electric Power System, 神戶商船大學 紀要 第2類 第24號, 1976, pp. 155-169
- 3) 盧彰注, 船用電子, 亞成出版社, 1985, p. 130-137, pp. 204-209
- 4) 武田幸南外 2人, Analysis of a Brushless AC Generator, 神戶商船大學 紀要 第2類 第30號, 1982, pp. 57-61
- 5) Vimal Singh S.K.Kak and Srinivasan Rangarajan, Automatic voltage regulation of D.C shunt Generators, IEEE Trans. Vol. IECI-20 No.2 May, 1973, pp. 58-59
- 6) 梁注鎬, 定電壓源으로서의 直流分捲發電機의 自動制御裝置에 關한 研究, 水大論文集, 1980
- 7) 尹智根, 브러시레스 交流發電機의 電壓制御特性에 關한 研究, 韓國海洋大學校 論文集, 1985
- 8) 河注植, 自動制御工學(5版), 太和出版社, 1989, pp. 331-361
- 9) 福岡佑治外 2人, 自動制御System, 電氣書院, 1973, pp. 309-333
- 10) 尾山純一外 7人, 自動調整, オ-ム社, 1965, pp. 118-137
- 11) Ralph J.Smith, Circuit, Devices and systems(Fourth edition), JOHN WILEY & SONS, 1973, pp. 444-455
- 12) Operational Amplifier circuit master, 嘉南社, 1988, pp. 75-92