

회전축의 정밀 토크 발생용 직류 발전기 제어장치의 설계 및 성능평가에 관한 연구

김 갑 순*, 강 대 임*, 안 병 덕*

Design and Performance Evaluation of DC Generator Control System for Controlling Torque of Rotating Shaft

G. S. Kim*, D. I. Kang*, B. D. Ahn*

ABSTRACT

A DC generator control system was designed to control the torque of a rotating shaft precisely. The control system is composed of a strain gage type torque cell, a torque cell amplifier, a computer, a D/A converter, a error detector, a DC voltage amplifier and a resistor. The response test under unit step input and the dynamic stability test for the designed control system were carried out. It was confirmed that the settling time from the response test is about 4 s and the error from the dynamic stability test is less than 0.06% of rated output of torque cell. The designed control system may be used to control a DC generator which may be used to apply torque to a rotating shaft.

Key words : DC Generator(직류 발전기), Error Detector(오차 검출기), Dynamic Stability Test(동적 안정도 시험), Settling Time(정착시간), Closed Loop System(폐루프 제어계)

NOMENCLATURE

R_c :resistance of integrator	e_i :input voltage
C_c :condenser of integrator	e_o :output voltage
K_d :factor of DC voltage amplifier	ζ :damping ratio
R_g :resistance of DC generator	ω_n :underdamped natural frequency
L_g :inductance of DC generator	ω_d :damped natural frequency
K_g :factor of DC generator	R_b :resistance of amplifier
	C_b :condenser of amplifier
	R_a :resistance of amplifier

* 한국표준과학연구원 역학연구부

$K_a(R_b/R_a)$: amplifying ratio of amplifier
 K_t : factor of torque cell

1. 서 론

회전축의 토크는 모터, 엔진, 펌프 등의 성능평가, 정밀 토크셀의 설계 및 토크셀의 회전특성시험을 위하여 산업체에서 빈번히 측정된다. 회전축의 토크를 정밀하게 측정하기 위해서는 토크 발생장치가 필요하다. 토크 발생장치^[1,2,3]는 축을 회전시키는 구동장치와 회전축에 부하를 작용시키는 부하장치 그리고 축에 발생된 토크를 측정하기 위해 구동장치와 부하장치 사이에 설치되는 토크셀로 구성된다. 토크 발생장치의 정밀정확도는 토크셀과 부하장치의 성능에 따라 크게 좌우된다. 토크셀은 기계적인 변형률을 전기적인 신호로 변환하여 주는 스트레인 게이지식 토크셀이 주로 사용되고 있다. 부하장치에는 기계적인 힘을 이용하여 회전축에 부하를 작용시키는 기계장치와 유압장치, 축 주위에 감겨져 있는 코일에 여자전류를 변화시켜 회전축에 부하를 작용시키는 직류 발전기 등이 있다. 기계장치나 유압장치를 이용한 부하장치는 낮은 정밀도의 토크 측정을 필요로 하는 토크 발생장치에 사용되며, 직류 발전기는 높은 정밀도의 토크 측정을 필요로 하는 토크 발생장치에 사용된다. 직류 발전기가 토크 발생장치의 부하장치로 사용되기 위해서는 설정 토크값에 상응하는 직류 전압을 사용된 직류 발전기를 구동시킬 수 있도록 증폭시켜야 하며, 설정값과 회전축에 발생된 토크값이 허용된 범위 내에서 자동으로 제어되는 폐루프 제어계 (closed loop

system)로 설계된 직류 발전기 제어장치가 필요하다. 이때 폐루프 제어계^[4,5,6,7]는 최대 오버슈트(maximum overshoot), 지연시간(delay time), 상승시간(rise time), 정착시간(setting time)등을 고려하여 설계하여야만한다.

본 연구에서는 회전하고 있는 축에 토크를 정밀하게 발생시키기 위해서 2.2 kW(3 HP) 용량의 직류 발전기를 제어할 수 있는 직류 발전기 제어장치를 설계 및 제작하였으며, 이 장치의 특성을 확인하기 위해서 단위 계단입력에 대한 응답시험과 동적 안정도 시험을 실시하여 정밀도를 평가하였다.

2. 직류 발전기의 제어시스템 설계

2.1 제어시스템의 요소설계

본 논문에서 설계한 직류 발전기 제어시스템은 토크 셀, 토크셀 증폭기, 컴퓨터, D/A변환기, 오차 검출기, 직류 전압 증폭기 및 저항기를 이용하여 입출력전압 신호가 자동으로 비교되어 오차를 검출하는 폐루프 제어 계로 구성되었으며 그것을 Fig. 1에 나타내고 있다. 컴퓨터를 사용하여 설정 토크값에 상응하는 직류 전압 신호를 오차 검출기에 입력하고, 입력된 직류 전압신호는 직류 발전기에서 회전하고 있는 축에 부하를 작용시킬 수 있도록 증폭되며, 증폭된 직류 전압은 직류 발전기를 구동하여 회전축에 부하를 작용시킨다. 이때 직류 발전기에 직렬로 연결된 토크셀이 축에 발생된 토크를 감지하여 측정 토크값에 상응하는 직류 전압을 증폭기에 보내고, 증폭된 신호는 오차 검출기에 보내어져 컴퓨터에 의해서 설정된 토크값과 비교되어 두 값이 허용범위 이내로 같아질 때까지 자동으로 제어된다. 그리고 발전기에서 발생하는 전기는 저항기(resistor)에 의해 열로 소모되도록 하였다.

직류 발전기 제어장치를 구성하는 오차 검출기, 직류 전압 증폭기, 직류 발전기, 토크셀 출력전압 증폭기의

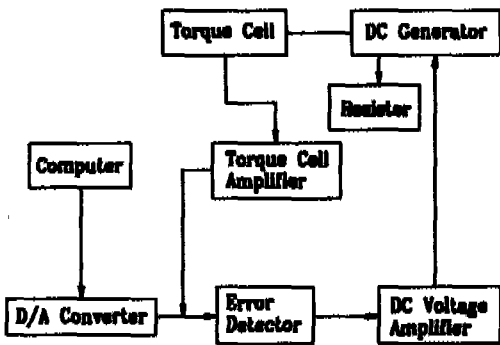


Fig. 1 Block diagram of the DC generator control system

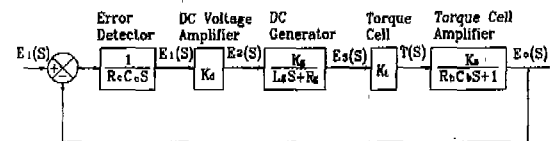


Fig. 2 Block diagram of the DC generator control system with closed loop

요소상수를 결정하는데 필요한 전달함수식을 유도하기 위하여 Fig. 2와 같이 제어장치의 블록선도를 구성하였다. K_a 를 R_b/R_a 라 하고, 직류 발전기의 자회로의 인덕턴스는 매우 작은 값이므로 L_g 를 무시하면 직류 발전기 제어장치의 전달함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G(S) = \frac{K_a K_g K_t K_o}{R_c C_c R_g S (R_b C_b S + 1)} = \frac{K}{S(K_e S + 1)} \quad (1)$$

여기서 K 는 $K_a K_g K_t K_o / R_c C_c R_g$ 이며 K_e 는 $R_b C_b$ 이다. 식(1)로부터 직류 발전기 제어시스템의 폐루프 제어계의 전달함수 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{E_o(S)}{E_i(S)} = \frac{K/K_e}{S^2 + (1/K_e)S + K/K_e} \quad (2)$$

여기에서 K/K_e 를 ω_n^2 이라 하고 $1/K_e$ 를 $2\zeta\omega_n$ 이라 하면 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{E_o(S)}{E_i(S)} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (3)$$

$E_i(S)$ 가 단위계단입력일 때 식(3)의 출력전압 $E_o(S)$ 는 다음과 같이 된다.

$$E_o(S) = \frac{\omega_n^2}{S(S + \zeta\omega_n + j\omega_d)(S + \zeta\omega_n + j\omega_d)} \quad (4)$$

여기서 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 이다. 폐루프 제어계의 시간 변화에 따른 출력을 나타내는 식을 구하기 위하여 식(4)를 라플라스 역변환하면 다음과 같은 식이 된다.

$$e_o(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}) \quad (t \geq 0) \quad (5)$$

2차 시스템의 특성은 단위계단입력에 대한 출력응답으로 평가되며, 대표적인 평가함수는 최대 오버슈트(maximum overshoot), 지연시간(delay time), 상승시간(rise time), 정착시간(settling time)이다.^[6] 본 연구에서는 정확한 회전 토크를 측정하기 위해서 설정 토크값이 입력된 후 빠른 시간내에 안정된 출력값이 요구되므로 정착시간을 고려하여 직류발전기 제어장치를 설계하였다.

정착시간은 응답이 최종치의 규정된 범위 이내로 들

어와 그 범위내에서 머무르는데 필요한 시간을 말하며, 보통 2% 혹은 5% 범주를 선택^[6]한다. 본 연구에서는 설계 및 제작한 직류 발전기 제어장치에서는 정확도를 높이기 위하여 2% 이내의 범주를 택하였으며, 범주범위가 2%일 때 정착시간은 $t_s = 4T$ 이다. 식(5)의 일부분의 $(1 \pm e^{-\zeta\omega_n t} / \sqrt{1 - \zeta^2})$ 곡선은 과도응답곡선의 포락선이며, 그 시정수는 $T = 1/\zeta\omega_n$ 이다. 따라서 범주범위가 2%일때 정착시간을 나타내는 식은 다음과 같이 된다.

$$t_s = 4/\zeta\omega_n \quad (6)$$

직류 발전기 제어장치를 설계하기 위하여 필요한 요소들의 값을 다음과 같이 결정하였다. 직류 발전기 제어장치의 감쇠비 ζ 는 감쇠비 ζ 에 대한 2차 시스템의 계단응답표^[6]로 부터 입력된 설정 토크값이 안정하고 신속하게 출력될 수 있도록 0.65로 선정하였다. 제어장치의 정착시간은 시스템의 설계가 용이하고 설정 토크값이 입력된 후 빠른 시간안에 출력값이 안정되도록 4초로 하였다. 이들 조건과 식(2) 및 식(6)으로 부터 ω_n , K_e , K 를 차례로 구하면 각각 1.532, 0.5, 1.174가 된다. 따라서 본 연구에서는 $K = 1.174$ 의 조건이 만족되도록 적분기 상수 $R_c C_c$ 는 0.02, 직류 전압 증폭기 상수 K_a 는 1, 직류 발전기의 저항 R_g 는 1000 Ω , 직류 발전기 상수 K_g 는 0.587, 증폭기의 증폭률 K_a 는 100이 되도록 제어시스템을 설계하였다.

2.2. 제어시스템 회로설계

앞절에서 결정한 요소들의 상수를 가지고 제어시스템을 구성하는 인가전압 증폭기(excitation amplifier), 토크셀 출력전압 증폭기(torque cell amplifier), 오차 검출기(error detector) 및 직류 전압 증폭기(DC voltage amplifier)를 다음과 같이 설계하였다.

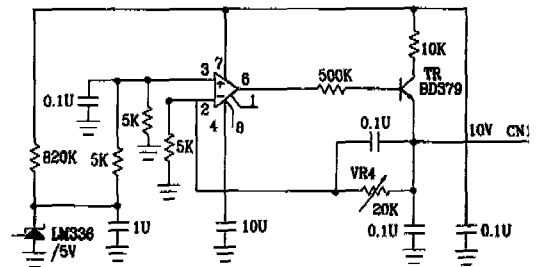


Fig. 3 Circuit of excitation amplifier

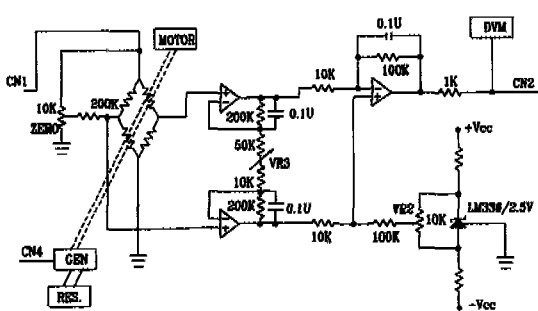


Fig. 4 Circuit of torque cell amplifier

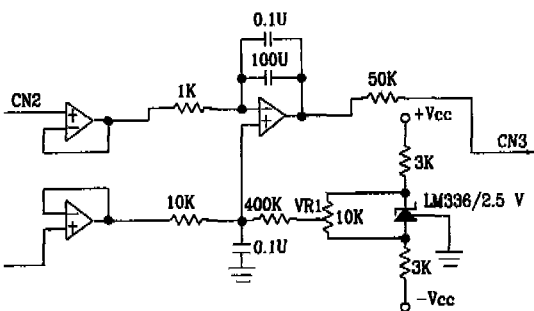


Fig. 5 Circuit of error detector

인가전압 증폭기는 토크셀에 인가되는 브리지 입력 전압과 증폭기(op-amplifier)의 구동에 필요한 기준전압을 공급하기 위하여 사용되며 그것은 Fig. 3과 같이 5V 전압 발생용 LM336/5 V 정류기, 증폭기, BD379 TR, 저항 등으로 구성되어 있다. LM336/5 V 정류기에 의해 발생하는 직류 전압 5 V는 2배로 증폭되어 10 V의 직류 전압이 CN2 전선을 통하여 토크셀에 인가되며, 이 전압은 가변저항기 UR4에 의해 조절되도록 하였다.

토크셀 출력전압 증폭기는 토크셀로부터 감지되는 출력신호가 매우 작기 때문에 그것을 증폭하기 위하여 사용되며 그것의 회로도 는 Fig. 4와 같다. 토크셀 출력 전압 증폭기는 토크셀, 증폭기 LM336/2.5 V, 저항등을 이용하여 2단 증폭하는 차등증폭기로 구성하였으며, CN1 전선을 통하여 10 V의 전압이 토크셀에 인가되도록 하였다. 토크셀로부터 감지되는 출력신호는 가변 저항기 UR3를 이용하여 4~20배 증폭되고, 다시 10배 증폭되어 출력장치(DVM)로 출력됨과 동시에 설정 토크값과 상응하는 직류 전압신호와 비교하기 위하여 CN2 전선을 통하여 검출기로 보내어진다. 토크셀 출

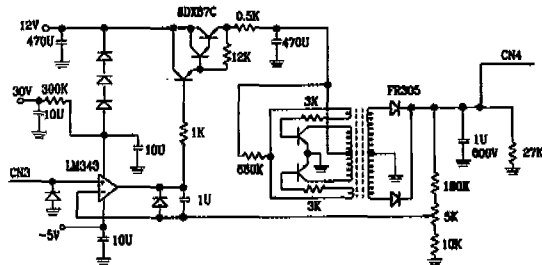


Fig. 6 Circuit of DC voltage amplifier

력전압 증폭기의 영점조정은 LM336/2.5 V와 가변저항기 UR2를 사용하여 이루어진다.

오차 검출기는 설정 토크값에 상응하는 직류 전압신호와 토크셀로부터 감지되는 측정토크값에 상응하는 직류 전압신호를 비교하여 오차를 검출하며 비례적분기 회로로 설계되었고 회로도 는 Fig. 5와 같다. 오차 검출기는 저항, 콘덴서, LM336/2.5 V, 버퍼등으로 구성되었다. 여기에서 버퍼는 토크셀 증폭기, 컴퓨터 등에 상호 악영향을 미치지 않도록 하기 위하여 삽입되었다. 오차 검출기는 설정 토크값에 상응하는 직류 전압신호와 CN2 전선에 의해 입력되는 측정 토크값에 상응하는 직류 전압신호를 비교하여 오차를 검출하고 검출된 전압 신호는 CN3 전선을 통하여 직류 전압 증폭기로 인가된다. 영점조정을 LM336/2.5 V와 가변저항기 VR1을 이용하여 한다.

직류 전압 증폭기는 직류 발전기를 구동시키기 위하여 CN3 전선을 통하여 입력되는 직류 전압 신호를 안정하게 증폭시켜 발전기에 입력시키기 위한 것으로서 회로도 는 Fig. 6과 같다. 직류 전압 증폭기는 다이오드, 정밀저항, 콘덴서, LM343 증폭기, 트랜스퍼머(transformer) 및 FR305로 구성되었으며, 설정된 토크값에 상응하는 직류 전압신화에 따라 입력되는 전압을 0~200 V로 증폭시킬 수 있다. 직류 전압 증폭기에 입력되는 전압은 LM343 증폭기에 의해 증폭되고 트랜스퍼머를 통해 유도되며 FR305에 의해 정류된다.

3. 실험

3-1. 실험장치

본 연구에서 설계 및 제작한 직류 발전기 제어장치의 정확도를 평가하기 위해서 Fig. 7과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 직류 모터, 토크셀, 직류 발전

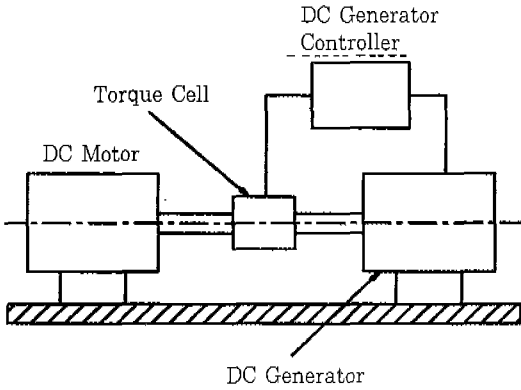


Fig. 7 Equipment for accuracy evaluation of DC generator control system

기, 직류 발전기 제어장치로 구성되어 있다. 직류 모터는 모터와 발전기 사이를 일직선상으로 조립되어 있는 축을 회전시키는 구동부의 역할을 하고, 그것의 사양은 회전속도 1250 rpm에서 최대용량이 2.2 kW(3 Hp)이며 12.5 N·m의 최대 토크를 발생시킬 수 있는 것이다. 직류 발전기는 여자전류를 변화시켜서 회전하고 있는 축에 부하를 가할 수 있으며, 1250 rpm에서 최대 토크가 12.5 N·m, 발전기 내부저항 $R_g=1000\Omega$ 발전기 상수 $K_g=0.587$ 이 되도록 국내 전문업체에 의뢰하여 제작하였다.

직류 발전기 제어시스템은 앞 절에서 계산된 값 및 설계도들을 토대로 제작하였다. 회전하고 있는 축의 토크를 측정하기 위하여 설치된 토크셀은 회전축에서 발생할 수 있는 굽힘 모멘트의 영향을 가능한 줄이기 위하여 특별히 설계되었으며^[6] 입·출력신호는 상용되는 슬립링/브러시를 사용하여 전송하였다. 제작된 토크셀의 특성을 시험한 결과 비직선성오차가 0.03% R.O. (rated output), 재현도오차가 0.03% R.O.로 나타나 본 연구에서 구성하고자 하는 제어시스템의 토크 감지용으로서 충분한 성능을 가지고 있다.

실험장치 작동은 직류 모터를 이용하여 토크셀이 설치된 축을 일정한 회전수로 회전시키고, 직류 발전기 제어장치를 이용하여 설정한 토크값에 상응하는 직류 전압신호를 직류발전기에 걸어주고 축에 발생된 측정 토크값에 상응한 직류 전압신호를 받으면서 설정된 토크가 모터와 발전기 사이에 설치된 축에 작용되도록 제어함으로써 이루어 진다.

3-2 실험방법

직류 발전기 제어장치의 정확도를 평가하기 위하여 축이 회전하고 있는 상태에서 단위계단입력(unit step input)에 대한 응답시험과 동적 안정도(rotating stability)시험을 실시하였다.

단위계단입력에 대한 응답시험은 설계 및 제작된 직류 발전기 제어장치를 이용하여 회전 토크를 측정할 때 설정된 토크 값에 상응하는 직류 전압을 컴퓨터를 이용하여 발생장치에 입력한 후 안정된 토크가 발생될 때까지의 시간과 측정 토크의 안정도를 평가하기 위하여 실시되었다. 단위입력계단에 대한 응답시험은 다음과 같이 하였다. 모터를 이용하여 토크셀이 설치되어 있는 축을 회전수 800 rpm으로 회전시키고 컴퓨터를 이용하여 설정 토크값 0.5 N·m에 상응하는 직류 전압 200 mV를 직류 발전기 제어장치에 단위계단입력하여서 회전축에 토크를 발생시킨다. 토크셀에 감지된 측정 토크는 컴퓨터와 A/D 변환기를 이용하여 1초에 200개의 측정 토크값을 검출하였다.

동적 안정도 시험은 회전상태에서 장시간 토크를 측정하기 위해서는 일정한 설정 토크값에 상응하는 입력 전압에 대한 출력전압이 일정한지를 평가하기 위해서 실시되었다. 동적 안정도 시험은 축이 회전하고 있는 상태에서 직류 모터와 직류 발전기 제어장치를 이용하여 직류 모터와 발전기 사이에 설치된 축에 본 연구에서 개발된 장치가 발생시킬 수 있는 최대 토크인 4.5 N·m의 토크를 발생시키고, 각종 토크셀의 회전특성시험이 가능한지를 알아보기 위하여 2시간동안 10분 간격으로 출력변화를 측정하였다. 4.5 N·m의 토크값과 상응한 직류 전압은 1800 mV이며, 이것은 토크 교정검사 때 직류 발전기 제어장치의 가변저항기를 조절하여 맞춘다. 교정검사란 토크표준기를 이용하여 토크셀에 실효토크를 가하고 토크셀로부터 출력되는 토크값에 상응하는 직류 전압신호를 출력장치에 수치로 나타내게 하는 실험이다.

4. 결과 및 고찰

시간변화에 따라 단위입력계단에 대한 응답시험 결과 검출한 측정 토크값과 범주범위가 2%일 때 정착시간을 기준으로 제어장치를 설계한 토크 출력식(10)에 의한 이론 토크값을 Fig. 8에 나타내었다. 상승시간 구간에

서는 이론값과 출력값이 약간의 오차를 보이고 있으나 다른 구간에서는 잘 일치함을 보이고 있다. 상승시간 구간에서의 오차는 컴퓨터에 의해 설정 토크값에 상응하는 입력전압이 설계 및 제작된 각종 회로에 의해 증폭되는 과정에서 지연과 직류 발전기에 의해 회전축에 부하가 작용되는 과정에서 지연으로 발생된 것으로 생각된다. 상승구간에서의 오차를 줄이기 위해서는 오차검출을 위하여 사용된 비례적분기 회로를 비례적분미분기 회로로 구성해야 될 것으로 생각된다. 최대 오버슈트까지 도달시간을 구하는 식은 $t_p = \pi/\omega_d$ 이며, 최대 오버슈트까지 도달하는 시간오차는 0.1초로 매우 작은 오차를 보이고 있다. 컴퓨터에 의해 직류 발전기 제어장치에 설정 토크값을 입력한 후 측정 출력값이 예정된 시간안에 출력되는지의 오차를 나타내는 정착시간오차는 0.2초로 매우 작은 값을 나타내고 있다. 직류 발전기 제어장치는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 설정 토크값에 상응하는 직류 전압을 입력한 후 4초이후에 안정된 토크값을 출력시키고 있음을 알 수 있다. 직류 발전기 제어장치에 실제 측정실험을 할 때 단위계단이 아닌 일차함수로 직류 전압을 입력시키므로 설정 토크값을 입력한 후 측정값이 안정하게 출력되기 시작한 시간은 본 실험에서 소요된 시간 4초보다 빨라진다. 따라서 본 연구에서 설계 및 제작한 직류 발전기 제어장치를 이용하여 회전 토크를 측정할 때 제어장치에 설정 토크값에 상응하는 직류 전압을 입력한 후 4초 이후에 토크를 측정하면 매우 안정되고 정밀한 값을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

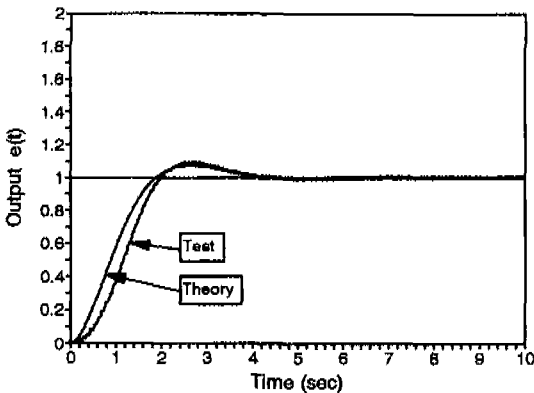


Fig 8 Response test result for unit step input of DC generator control system

Fig. 9에 동적 안정도 실험결과를 시간에 따라 나타내고 있다. 시험결과는 2시간 동안 시험한 전구간에서 측정오차가 ± 1 mV ($\pm 0.056\%$ R.O.) 이내로 변화하여 매우 안정된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 설계 및 제작한 직류 발전기 제어장치는 직류 발전기를 제어하여 회전축의 토크를 정밀하게 발생시키는 장치에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

직류 발전기를 제어하여 회전 토크를 발생시킬 수 있는 직류 발전기 제어장치를 설계 및 제작하였으며, 단위계산입력에 대한 응답시험과 동적안정도 시험을 실시하여 직류 발전기 제어장치의 정밀도를 평가하였다. 직류 발전기 제어시스템은 토크셀, 토크셀 증폭기, 컴퓨터, D/A 변환기, 오차 검출기, 직류전압 증폭기 및 저항기를 이용하여 입력전압신호가 자동으로 비교되어 오차를 검출하는 폐루프 제어계로 구성되어 있다. 단위계산 입력에 대한 응답시험결과, 설정 토크값에 도달하기 전까지의 이론값과 측정 토크값이 약간의 오차를 보이고 있으나 설정된 토크값을 입력한 후 4초 이내에 매우 안정된 측정 토크값이 출력되었다. 동적 안정도 시험결과, 시험한 전구간에서 측정오차가 ± 1 mV (0.056% R.O.) 이내로 변화하여 매우 안정된 거동을 보였다. 따라서 본 연구에서 설계 및 제작한 직류 발전기 제어장치는 회전축의 토크 정밀발생용 직류 발전기의 제어에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

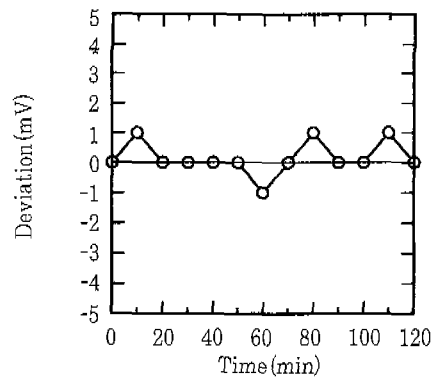


Fig. 9 Dynamic stability test result of DC generator control system

참고문헌

1. Graneek M, Wunch, H. L. and Nimmo, W. M, "Development of a Precision Dynamometer", NEL REPORT, No.168. pp.1-3, 1959
2. LEBOW, LEBOW Products Torque Sensor and Dynamometer catalog, LEBOW, No.250c, pp.6-32, 1980
3. Firth, D, "Electric Dynamometer Supported on Pneumatic Trunnions and having Hydraulic Measurement", MERL, No.23, pp.1~5, 1954
4. 邦市川彦, "制御系 設計法〔I〕", 計測 と 制御, Vol.23, No.6, pp.31~41, 昭和 59 年
5. 邦市川彦, "制御系 設計法〔II〕", 計測 と 制御, Vol.23, No.7, pp.54~62,
6. 邦市川彦, "制御系 設計法〔III〕", 計測 と 制御, Vol.23, No.8, pp.34~43,
7. 이태원, 최신IC 응용 핸드북, 기념사, pp.313~321.
8. 김도현, 시스템 제어공학, 문운당, pp.195-205
9. 김갑순, 권영하, "회전 토크 교정장치 개발에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol.17, No.10, pp.2646~2653, 1993