

〈論 文〉

# 유압구동식 선박용 축발전장치의 정속제어

정용길\* · 이일영\*\* · 양주호\*\*

(1993년 2월 20일 접수)

## Constant Speed Control of Shaft Generating System Driven by Hydrostatic Transmission for Ship Use

Y. G. Jung, I. Y. Lee and J. H. Yang

**Key Words :** Shaft Generating System(축 발전장치), Hydrostatic Transmission(유압 전동장치), Hydraulic Motor Speed Control(유압모터 속도제어), Robust Servo Control(로버스트 서보 제어), Digital servo control algorithm(디지털 서보제어 설계법).

### Abstract

This study suggests a new type shaft generating system driven by hydrostatic transmission suitable for small size vessels. Since the shaft generating system is affected ceaselessly by disturbances such as speed variation in pump driving speed and variation in external load, a robust servo control must be implemented to obtain stable electric power with constant frequency. Thus, in this study, a digital robust servo control algorithm is applied to the controller design. By the experiment and the numerical computation, the frequency variation characteristics of the generating system under various disturbances are investigated. Conclusively, it is said that the shaft generating system proposed in this study shows excellent control performances.

### 기 호 설 명

- $A_c$  : 유압모터 제어용 피스톤의 단면적
- $B_p$  : 유압모터 제어용 피스톤의 점성계수
- $e(k)$  : 오차함수
- $F$  : 피드백 이득
- $H$  : 발전기 발생전원 주파수
- $i_s$  : 비례전자 감압밸브의 입력 전류
- $K_a$  : 비례전자 감압밸브의 증폭기 이득
- $K_d$  : PID 제어기의 미분이득
- $K_i$  : PID 제어기의 적분이득
- $K_l$  : 비례전자 감압밸브의 슬레노이드 이득
- $K_m$  : 유압 모터의 이득
- $K_p$  : PID 제어기의 비례이득
- $K_s$  : 유압모터 제어용 피스톤의 스프링 상수

- $m(k)$  : 서보 보상기의 상태변수
- $M_p$  : 유압모터 제어용 피스톤부의 총 환산 질량
- $R_c$  : 비례 전자 감압밸브의 출구 압력
- $P_{sv}$  : 비례 전자 감압밸브 공급 압력
- $P_p$  : 주 유압 펌프 구동용 전동기 회전수
- $s$  : Laplace 연산자
- $T$  : 샘플링 주기
- $T_m$  : 유압 모터의 시정수
- $u(k)$  : 제어 입력
- $v_o$  : F-V 변환기의 출력 전압
- $v_s$  : 비례 전자 감압밸브용 증폭기 입력 전압
- $x(k)$  : 플랜트의 상태변수
- $\hat{x}(k)$  : 관측기로부터 관측된 플랜트의 상태변수
- $x_p$  : 유압모터 제어용 피스톤의 변위
- $y(k)$  : 시스템의 출력
- $y_r(k)$  : 목표입력

\*정회원, 통영수산전문대학 기계과

\*\*정회원, 부산수산대학교 기관공학과

- $z(k)$  : 관측기 상태변수
- $\delta(k)$  : 외란
- $\omega_m$  : 유압 모터의 각속도

## 1. 서 론

선박내의 발전장치로는 독립된 디젤기관으로 구동되는 발전장치를 사용하는 것이 일반적이지만, 근래에는 에너지 절약과 관리, 보수의 편의를 목적으로 축발전(shaft generation)시스템이 연구, 개발되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 축발전 시스템에서는 선박의 주기관으로부터 발전기 구동 동력을 얻는 관계로 선박의 항진 속도에 따라 발전기 구동축 회전 속도가 시시각각 변하게 된다. 따라서 축발전 시스템에서는 일정 주파수의 교류전력을 얻기 위하여 어떤 특별한 장치를 필요로 하며, 현재 실용화되고 있는 대표적인 것으로는 유성 치차 방식과 사이리스터-인버터 방식이 있다. 이들 가운데서 유성 치차 방식은 장치가 복잡하고, 사이리스터-인버터 방식은 고주파 대책이 필요하며, 양자가 모두 고가인 장비여서 주로 대형 선박에서 채용되고 있으며, 현재까지 중·소형 선박에서 사용하기에 적합한 축발전 시스템은 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비교적 가격이 저렴하고, 설치 공간이 적으면서도 양질의 교류전력을 얻을 수 있어 중·소형 선박에서 사용하기에 적합한 축발전 시스템으로, 마이크로컴퓨터에 의하여 제어되는 유압 구동식 축발전 시스템을 제안하고자 한다.

본 연구에서 제안하는 축발전 시스템의 유압회로는 고정 용량형 유압 펌프와 가변 용량형 유압 모터로 구성되는 일반적인 HST(hydrostatic transmission)회로<sup>(3)</sup>이며, 주기관 구동의 유압 펌프에서 송출하는 압력유가 유압 모터에 작용하여 모터축에 직결된 발전기를 구동하게 된다. 따라서 주기관 회전수 변동이나 발전기 부하 변동시 가변용량형 유압 모터의 행정 용량을 제어함으로써 유압 모터에 직결된 교류 발전기로부터 항상 일정 주파수의 전력을 얻을 수 있다. 가변 용량형 유압 모터의 행정 용량을 제어하는 서보 기구는 고가인 서보밸브 대신에 가격이 저렴한 비례 전자 감압밸브를 사용한다. 또한 본 축발전 시스템의 제어 알고리즘으로는 시스템의 파라미터 변동 및 외란에 강인한 연속 시간 최적 로버스트 서보제의 설계법<sup>(4)</sup>을 이산 시간

계로 확장한 디지털 서보 제어 설계법을 적용한다.

디지털 제어기로서는 시판되는 퍼스널 컴퓨터와 범용 인터페이스를 사용한다. 실험에서는 계단상의 목표입력 변화에 따른 시스템의 과도특성, 주기관을 모의하는 가변 속도 전동기의 회전수 변동과 발전기 부하 변동과 같은 외란 인가에 따른 시스템의 과도특성을 조사한다. 실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 비교 검토함으로써, 본 제어 방식의 유용성과 본 연구에서 제안하는 축발전 시스템의 제어 성능을 확인한다.

## 2. 유압구동식 발전장치의 해석

### 2.1 기초 방정식

본 연구에서 대상으로 하는 유압 구동식 발전장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 유압 시스템의 해석에서는, 전체 유압회로 내에서 공동현상이 일어나지 않으며, 유압 실린더 각실 내에서는 압력이 균일하고, 작동유체는 비압축성 유체로 간주한다.

비례 전자 감압밸브의 입력전류  $i_s$ 와 비례 전자 감압밸브의 출구압력  $P_c$ 와의 관계는 실험에 사용한 비례 전자 감압밸브의 응답이 시스템의 응답에 비하여 매우 빠른 점을 고려하여 다음식으로 표시한다.<sup>(5)</sup>

$$P_c = K_i i_s = K_i K_a v_s \tag{1}$$

유압 모터의 행정 용량 제어용 실린더의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다. 여기서 쿨롱 마찰항은 생략하였다.

$$M_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K_s x_p = A_c P_c \tag{2}$$

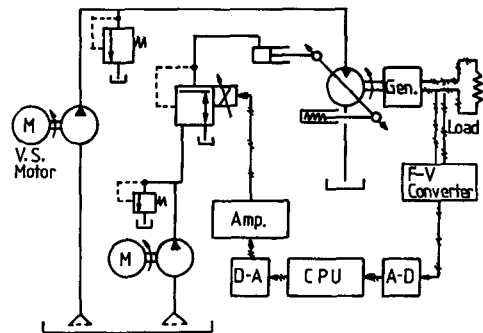


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

유압 모터 제어용 피스톤의 변위  $x_p$ 와 유압 모터의 각속도  $\omega_m$ 과의 관계는 유압 모터계 회전부의 관성과 유압 모터 회로의 특성 등에 의하여 결정되며, 다음과 같은 일차 지연요소로 근사화될 수 있다. (6)

$$T_m \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m = K_m x_p \quad (3)$$

유압 모터의 회전 각속도  $\omega_m$ 과 발전기 발전전원 주파수  $H$ 와의 관계는 4극 동기 발전기의 경우 다음식으로 표시된다.

$$H = \frac{1}{\pi} \omega_m \quad (4)$$

F-V 변환기의 이득은 주파수와 전압과의 관계가 다음식으로 되도록 조정하였다.

$$v_o = 0.1H \quad (5)$$

식(1), 식(2), 식(3), 식(4) 및 식(5)로부터 다음의 관계식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{M_p T_m}{K_m} \frac{d^3 v_o}{dt^3} + \frac{(M_p + B_p T_m)}{K_m} \frac{d^2 v_o}{dt^2} \\ + \frac{(B_p + K_s T_m)}{K_m} \frac{dv_o}{dt} + \frac{K_s}{K_m} v_o \\ = \frac{A_c K_t K_a}{10\pi} v_s \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2 유압구동식 발전장치의 전달함수 동정

식(6)으로부터 유압구동식 발전장치의 비례 전자 감압밸브용 증폭기 입력 전압  $v_s$ 와 F-V 변환기의 출력 전압  $v_o$  사이의 개회로 전달함수를 구하면 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{V_o(s)}{V_s(s)} \\ &= \frac{(A_c K_t K_a K_m) / (10\pi)}{M_p T_m s^3 + (M_p + B_p T_m) s^2 + (B_p + K_s T_m) s + K_s} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서  $s$ 는 라플라스 연산자이다. 유압구동식 발전장치 각부의 파라미터는 실측을 하여 구하기가 곤란하므로, 본 연구에서는 주파수 응답 실험결과를 사용한 전달함수 동정법(identification)<sup>(7)</sup>으로부터 식(7)의 계수를 구하기로 한다. 주파수 응답 실험에서 입력전압  $v_s$ 는 정현파를 인가하며, 그 진폭값은 정현파의 각속도가 0.1 rad/s에서 출력전압  $v_o$ 의 값이 정격전압 5V(발전기 발전전원 주파수 50 Hz에 해당)에서 정격전압의  $\pm 10\%$  변동폭으로 변동되도록 조정하였다. Fig. 2는 주파수 응답 실험

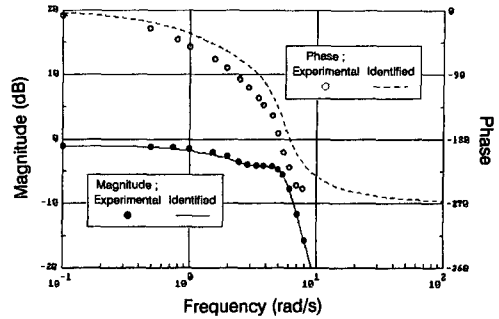


Fig. 2 Identified and measured frequency response of generating system driven by hydrostatic transmission

결과를 보드(bode) 선도로 표시한 것이다. 그림에서 ● 표시 및 ○ 표시는 각각 실험적으로 얻은 진폭비(magnitude)와 위상각(phase)을 나타낸다. 식(2), 식(3)으로부터 유압구동식 발전장치는 1차계와 2차계로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 실험적으로 얻은 진폭비로부터 점근선을 추정하여 1차계 및 2차계의 절점 주파수(corner frequency)를 구하면 2 rad/s 및 5.6 rad/s이다. 최저 주파수에서의 시스템 이득은 0.89로, 2차계의 감쇠계수값은 0.3으로 결정할 수 있다. 따라서 유압구동식 발전장치의 개루프 전달함수는 다음과 같이 표시된다.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{55.8208}{s^3 + 5.36s^2 + 38.08s + 62.72} \quad (8)$$

Fig. 2에서 실선 및 점선은 각각 식(8)로부터 계산한 진폭비 및 위상각 곡선을 나타낸다.

식(8)로부터 유압구동식 발전장치의 이산 시간계 상태방정식과 출력 방정식은 샘플링 주기  $T$ 를 3.8 ms로 하면 다음과 같이 표시된다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (9a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (9b)$$

여기서

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0.0038 & 0 \\ -0.00045 & 0.9997 & 0.0038 \\ -0.2359 & -0.1436 & 0.9796 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = [0 \ 0.0004 \ 0.21]^T$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

$x(k)$ ,  $u(k)$ ,  $y(k)$ 는 각기  $k$  샘플링 시점에서의 상태변수, 입력변수, 출력변수이다.

### 3. 제어기 설계

본 논문에서 대상으로 하는 유압구동식 발전장치의 제어기는 디지털 서보제어 설계법을 이용하여 구성한다. 3.1절에서는 디지털 서보제어 설계 알고리즘을 나타내며, 3.2절에서는 관측기의 구성에 대하여 설명하고, 3.3절에서는 디지털 서보제어 설계법과 비교할 목적으로 채용한 PID 제어설계법을 나타낸다.

#### 3.1 디지털 서보제어 설계법

디지털 서보 제어 설계법으로는 김 등이 제안한 연속시간 서보계의 설계법<sup>(4)</sup>을 이산 시간계에 확장하는 방법을 사용한다. 먼저 연속시간 시스템은 외란이 다음과 같은 형태로 주어지는 일반적인 경우를 생각한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \delta, \quad x \in R^n, \quad u \in R^m \quad (10a)$$

$$P(q) = \frac{1}{T^r} q^r + \frac{(-1)^1 (r - \alpha_{r-1} T)}{T^r} q^{r-1} + \frac{(-1)^2 (r - (r-1)\alpha_{r-2} T + \alpha_{r-2} T^2)}{T^r} q^{r-2} + \dots + \frac{(-1)^r (1 + (-1)^1 \alpha_{r-1} T + (-1)^2 \alpha_{r-2} T^2 + \dots + (-1)^r \alpha_0 T^r)}{T^r}$$

$$= \frac{1}{T^r} q^r + \frac{\beta_{r-1}}{T^r} q^{(r-1)} + \frac{\beta_{r-2}}{T^r} q^{(r-2)} + \dots + \frac{\beta_1}{T^r} q + \frac{\beta_0}{T^r} \quad (14)$$

식(10)으로 표시되는 연속시간 시스템을 샘플링 주기  $T$ 로 샘플한 이산시간 시스템은 다음과 같다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) + \delta(k), \quad x \in R^n, \quad u \in R^m \quad (15a)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad y \in R^p \quad (15b)$$

식(11)과 식(12)에 대응하는 외란  $\delta(k)$ 와 목표 입력  $y_r(k)$ 는 다음과 같다.

$$P_d(q) \delta(k) = 0 \quad (16)$$

$$P_y(q) y_r(k) = 0 \quad (17)$$

식(16)과 식(17)에서  $P_d(q), P_y(q)$ 의 최소공배 다항식  $P(q)$ 는 식(14)로 표현된다.

오차함수는 다음과 같이 정의한다.

$$e(k) = y(k) - y_r(k), \quad e \in R^p \quad (18)$$

식(15b)와 식(17)을 이용하여 식(14)의 다항식을 식(18)에 작용시켜 정리하면 다음과 같다.

$$e(k+r) = -\beta_0 e(k) - \beta_1 e(k+1) - \dots$$

$$y = Cx, \quad y \in R^p \quad (10b)$$

여기서, 외란  $\delta$ 와 목표입력  $y_r$ 은 각각 다음과 같은 동차 미분방정식으로 표현된다고 한다.

$$P_d(D) \delta = 0 \quad (11)$$

$$P_y(D) y_r = 0 \quad (12)$$

단,  $D$ 는 미분연산자  $D = d/dt$ 를 의미한다.

식(11)과 식(12)에서  $P_d(D), P_y(D)$ 의 최소공배 다항식  $P(D)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$P(D) = l. c. m(P_d(D), P_y(D)) = D^r + \alpha_{r-1} D^{r-1} + \dots + \alpha_1 D + \alpha_0 \quad (13)$$

연속시간 서보계 설계법에서는 식(13)의  $P(D)$ 를 시스템 방정식에 작용시켜 제어 알고리즘을 유도하고 있다. 본 연구에서는 디지털 서보 제어 알고리즘을 유도하기 위하여 식(13)  $P(D)$ 를 샘플링 주기  $T$ 로써 이산화하면 식(14)와 같이 된다. 여기서  $q$ 는  $qf(k) = f(k+1)$ 를 의미하는 추이연산자(shift operator)이다.

$$-\beta_{r-1} e[k + (r-1)] + T^r C P(q) x(k) \quad (19)$$

식(19)를 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$w(k+1) = Nw(k) + LP(q)x(k) \quad (20)$$

$$w(k) = [e^T(k) e^T(k+1) \dots e^T[k + (r-1)]]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & I_p & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I_p & \dots & 0 \\ & & \vdots & & \\ -\beta_0 I_p & -\beta_1 I_p & \dots & \dots & -\beta_{r-1} I_p \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ T^r C \end{bmatrix}$$

식(15a)에  $P(q)$ 를 작용시켜 식(16)을 이용하면, 다음과 같이 표시된다.

$$P(q)x(k+1) = \Phi P(q)x(k) + \Gamma P(q)u(k) \quad (21)$$

식(20)과 식(21)을 이용하여 확대계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$x_e(k+1) = \Phi_e x_e(k) + \Gamma_e v(k) \quad (22a)$$

$$e(k) = C_e x_e(k) \quad (22b)$$

단,  $x_e(k) = [P(q)x^T(k)w^T(k)]^T$ ,  $v(k) = P(q)u(k)$

$$\Phi_e = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ L & N \end{bmatrix}, \Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}, C_e = [0 \ I_p \ 0 \ \dots \ 0]$$

식(22a)에서  $v(k)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$v(k) = P(q)u(k) = [F_1 F_2]x_e(k) \quad (23)$$

식(23)의 양변에  $(P(q))^{-1}$ 를 작용시키면

$$u(k) = [F_1 F_2](P(q))^{-1}[P(q)x^T(k)w^T(k)]^T \quad (24)$$

로 되고, 새로운 상태변수  $m(k)$ 를 다음과 같이 정의하면

$$m(k) = (P(q))^{-1}w(k) \quad (25)$$

식(24)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u(k) = [F_1 F_2][x^T(k)m^T(k)]^T \quad (26)$$

식(25)의 관계를 이용하여 식(20)을 표현하면 다음과 같다.

$$m(k+1) = Nm(k) + T^r \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_p \end{bmatrix} e(k) \quad (27)$$

단,  $I_p$ 는  $p$ 차원의 단위행렬을 의미하고, 식(26)과 식(27)은 각각 서보계 제어입력 및 서보 보상기로 주어진다.

### 3.2 관측기의 설계

3.1절의 설계법은 시스템의 상태변수가 모두 측정 가능한 경우에 한하여 적용할 수 있다. 그러나 본 제어대상에서 측정 가능한 상태변수는 하나 뿐이므로, 나머지 상태변수들을 추정하기 위한 관측기의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 상태변수를 관측하는 관측기로서 최소차원 관측기를 사용한다. 식(9)로 표시되는 시스템에 대하여 최소차원 관측기를 구성하면 다음식으로 표시된다.<sup>(8,9)</sup>

$$z(k+1) = \hat{\Phi}z(k) + \hat{\Gamma}y(k) + \hat{\Lambda}u(k) \quad (28a)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{C}z(k) + \hat{D}y(k) \quad (28b)$$

식(9), 식(26) 및 식(28)을 사용하여 유압구동식 발전장치를 피드백 제어하는 과정이 Fig. 3에 도시되어 있다.

### 3.3 PID 제어 설계법

본 논문에서 사용한 PID 제어기의 차분방정식은 식(29)와 같다. 제어기의 파라미터는 Ziegler and Nichols의 스텝 응답법을 이용하여 구하고, 이를 실험적으로 미세조정(fine tuning)하여 얻었다.

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (29)$$

여기서,  $K_1 = K_p + \frac{T \cdot K_i}{2} + \frac{K_d}{T}$ ,

$$K_2 = -K_p + \frac{T \cdot K_i}{2} - \frac{2K_d}{T}, K_3 = \frac{K_d}{T}$$

$$K_p = 0.4515, K_i = 1.2718, K_d = 0.01,$$

$$T = 0.0038$$

## 4. 시뮬레이션 및 실험

### 4.1 제어 파라미터의 선정 및 시뮬레이션

Fig. 3에 나타낸 제어계를 완성하기 위해서는 최적 피드백 이득과 관측기에 관련된 모든 파라미터를 결정해야 한다. 식(22)로 표시되는 확대계의 파라미터는 외란  $\delta(k)$ 와 목표입력  $y_r(k)$ 가 스텝상으로 작용한다고 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi_e = \begin{bmatrix} 1 & 0.0038 & 0 & 0 \\ -0.00045 & 0.9997 & 0.0038 & 0 \\ -0.2359 & -0.1436 & 0.9796 & 0 \\ 0.0038 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_e = [0 \ 0.0004 \ 0.21 \ 0]^T$$

$$C_e = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (30)$$

식(23)으로 표시되는 최적 제어 입력은 평가함수

$$J_e = \sum_{k=0}^{\infty} (x_e^T(k)Q_1 x_e(k) + v^T(k)R_1 v(k)),$$

$$Q_1 > 0, R_1 > 0 \quad (31)$$

를 최소로 하는 것으로서, 상태 피드백 이득행렬

$$F = (R_1 + \Gamma_e^T S \Gamma_e)^{-1} \Gamma_e^T S \Phi_e \quad (32)$$

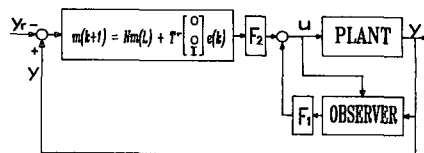


Fig. 3 Block diagram of digital servo control system

이며, 행렬  $S$ 는 리카티 방정식

$$S = Q_1 + \Phi_e^T S \Phi_e - \Phi_e^T S \Gamma_e (R_1 + \Gamma_e^T S \Gamma_e)^{-1} \Gamma_e^T S \Phi_e \quad (33)$$

을 만족하는 정정(positive definite)해이다. 여기서 가중행렬  $Q_1$ ,  $R_1$ 의 값은

$$Q_1 = \text{dia}[13.3 \quad 0.0001 \quad 0.008 \quad 41] \\ R_1 = [1] \quad (34)$$

을 사용하였으며, 그 결과 얻어진 최적 피드백 이득은 다음과 같다.

$$F_1 = [-4.8061, -0.9666, -0.1316] \\ F_2 = [-6.31345] \quad (35)$$

따라서 유압구동식 발전장치에 인가되는 최적 제어 입력은 식(26)으로부터 구해진다.

관측기의 파라미터는 극배치법으로 구하였으며, 본 논문에서 사용한 관측기의 극과 파라미터는 다음과 같다.

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0.98117, & 0 \\ 0.98117, & 0 \end{bmatrix} \\ \hat{\Phi} = \begin{bmatrix} 0.9825 & 0.00373 \\ -0.00047 & 0.9798 \end{bmatrix}, \quad \hat{\Gamma} = \begin{bmatrix} -0.2203 \\ 0.52183 \end{bmatrix}, \\ \hat{A} = \begin{bmatrix} 0.0004 \\ 0.21 \end{bmatrix}, \quad \hat{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 4.5327 \\ -37.6876 \end{bmatrix}$$

유압구동식 발전장치에 대한 컴퓨터 시뮬레이션에는 제어대상의 상태방정식과 출력방정식으로 식(9), 제어입력은 식(26)을, 피드백 이득은 식(35)를 사용하였으며, 관측기로는 식(28)을 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 본 제어 시스템의 목표 입력에 대한 추종성을 확인하기 위하여 제어대상에 계단상의 입력이 인가되었을 때의 과도 특성을 검토한다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 뉴턴법에 의하여 수치적분을 수행하였으며 샘플링 시간은 3.8 ms로 하였다. 계단상의 입력에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과는 실험 결과와 함께 도시하였다.

#### 4.2 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 구성은 Fig. 1에 나타나 있다. 유압 동력원으로 사용한 주 유압 펌프는 고정 용량형 사축식 피스톤 펌프로서 최대 행정용량은 27.5 cm<sup>3</sup>/rev이며, 교류 발전기 구동용

유압 모터는 가변 용량형 사판식 피스톤 모터로서 행정용량은 0~25 cm<sup>3</sup>/rev이다. 교류 발전기는 100 V, 50 Hz, 4극으로 정격 출력은 1 kW이며, 교류 발전기 부하로서는 백열 전등을 사용한다. 유압 모터 용량 제어용 유압원으로는 유량이 15 l/min인 베인펌프를 사용한다. 제어용 유압원으로부터의 압력유는 비례 전자 감압밸브로 공급되며, 공급압력  $P_{sv}$ 는 4.9 MPa로 설정한다. 비례 전자 감압밸브는 감압밸브용 증폭기로부터 입력되는 전류 신호에 비례한 압력을 발생하며, 이 압력은 가변용량형 사판식 피스톤 모터의 행정용량 제어용 유압 실린더에 작용하여 피스톤 모터의 회전수를 제어한다.

비례 전자 감압밸브는 Uchida사의 3DREP6이고, 정격 유량은 4.9 MPa에서 15 l/min이다. 제어기로는 80286 마이크로프로세서를 내장한 퍼스널 컴퓨터를 사용하며, 연속계 신호와 이산계 신호를 연결시켜 주는 A/D 및 D/A변환기는 12비트의 분해능을 갖는 Advantech사의 PCL-812를 사용한다. 시스템의 출력인 교류 발전기 전원 주파수는 F-V 변환기로서 주파수를 전압으로 변환하여 퍼스널 컴퓨터에서 측정한다.

실시간 제어는 알고리즘의 계산, A/D 및 D/A 변환시간 등을 고려하여 3.8 ms의 단위로 행하여 지도록 한다. 제어 알고리즘의 프로그램에는 Quick Basic언어를 사용한다.

## 5. 결과 및 고찰

본 논문에서 대상으로 하는 유압구동식 교류 발전장치의 목표 입력은 발생 전원의 주파수이고, 의

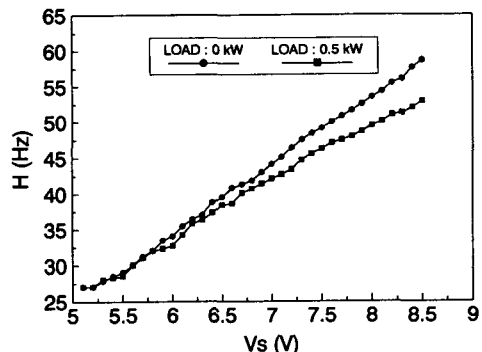


Fig. 4 Relation between input voltage of the pressure reducing valve and frequency of the generating system

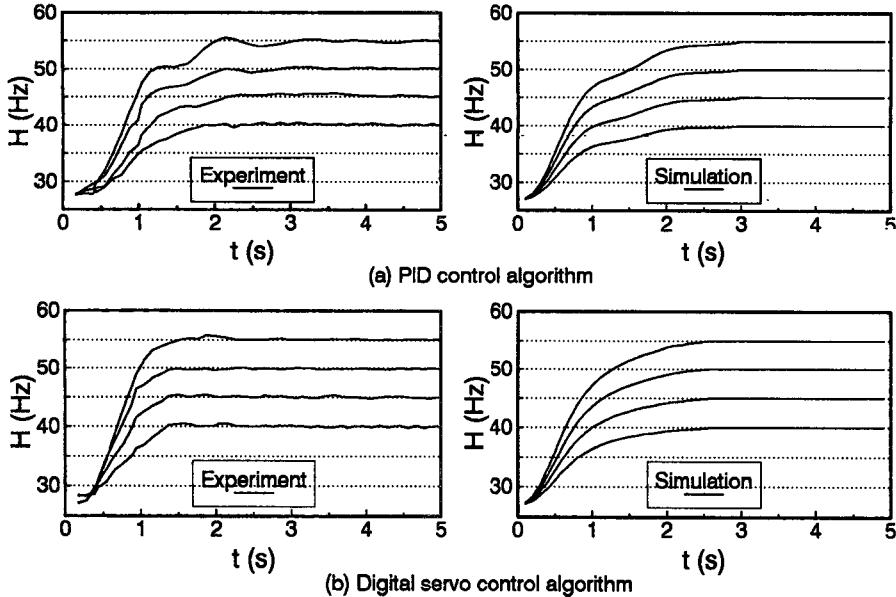


Fig. 5 Step response of the system with the controller based on the PID control and digital servo control algorithm (load : 0 kW)

란은 주 유압 펌프 구동용 전동기의 회전수 변동과 교류 발전기의 부하변동이다. 과도응답 실험시의 주 유압 펌프 구동용 전동기 회전수  $R_p$ 는 1000 rpm으로 설정하였으며, 이 때 교류 발전기의 발생전원 주파수는 27 Hz이며, 이는 제어동작 수행이 없는 상태에서의 발생전원 주파수 초기값이다.

Fig. 4에는 유압 구동식 발전장치의 운전조건에 따른 비선형성의 정도를 확인할 목적으로 비례전자감압밸브의 입력전압  $v_s$ 와 교류 발전기의 발생전원 주파수  $H$ 에 관한 정특성 실험을 수행하여 그 결과를 나타내었다. 그림에서 발전기 발생전원 부하가 증가함에 따라 다소 비선형적 특성이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5에는 유압구동식 발전장치의 목표 입력을 초기값인 27 Hz로부터 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz 및 55 Hz로 계단상으로 변화시켰을 경우의 발전기 발생전원 주파수  $H$ 의 과도응답을 나타내었다. 그림에서 (a)는 PID 제어 알고리즘을 사용한 경우이며, (b)는 디지털 서보 제어 알고리즘을 사용한 경우이다. 시뮬레이션 결과는 여러가지 목표 입력값에 대하여 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 목표 입력 50 Hz에서 시스템의 출력은 (a), (b) 모두 오버슈트없이 주어진 목표 입력에 매우 잘 추종함을 알 수 있으며, 정정시간은 (a)

의 경우가 약 2초, (b)의 경우가 약 1.37초로서 디지털 서보제어 알고리즘을 사용한 경우가 PID 제어 알고리즘을 사용한 경우보다 정정시간이 짧음을 알 수 있다.

Fig. 6에는 제어 알고리즘으로 디지털 서보 제어

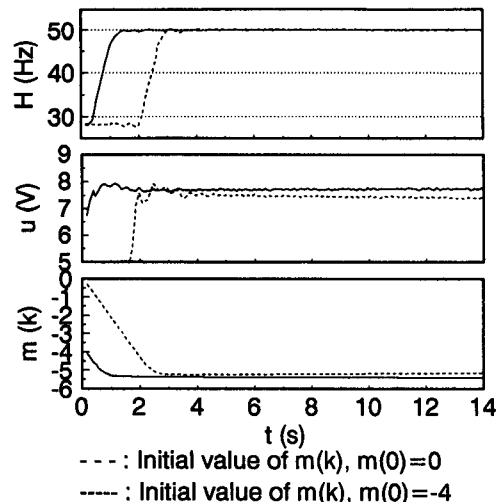


Fig. 6 Step response of the system by variation of initial value of servo compensator,  $m(k)$  (load : 0 kW)

설계법을 적용할 경우 식(27)로 표시되는 서보 보상기  $m(k)$ 의 초기값이 주파수  $H$ 의 과도응답에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험 결과를 나타내었다. 이 실험에서 시스템의 출력  $H$ 의 초기값은 27 Hz이다. 본 시스템의 특성상 제어입력  $u(k)$ 에 대응하는 유압모터 사판 조작용 실린더 추력이 이 실린더에 작용하는 반력 스프링의 초기 가압력보다 커야만 사판을 움직여서 시스템의 출력  $H$ 를 변화시킬 수 있기 때문에 시스템의 출력변화를 위한  $u(k)$ 의 하한치가 존재한다.  $u(k)$ 의 값은 식(26)으로부터  $m(k)$ 의 값에 의해 결정되기 때문에  $m(k)$ 의 초기값은  $u(k)$ 에 영향을 미친다. 그림에서 점선은  $m(k)$ 의 초기값을 0으로 설정한 경우로서, 제어동작 수행시  $m(k)$ 의 값이 0으로부터 부의 방향으로 변화하여  $m(k)$  값이 -4 부근에 이르는 시점까지 시스템의 출력  $H$ 는 변화가 없다. 이는  $u(k)$ 의 값이 하한치 (5V) 이하이기 때문이다.  $m(k)$ 의 값이 -4부터  $u(k)$  값이 하한치 이상이 되어 시스템의 출력  $H$ 는 목표 입력에 추종한다. 따라서  $m(k)$ 가 -4 부근까지 변화하는데 소요되는 시간 (약 2초) 동안 시스템의 출력이 지연됨을 알 수 있다. 그림에서 실선은  $u(k)$  값이 하한치 (5V)가 되도록 하는  $m(k)$  값을 미리 식(26)으로부터 역산으로 구하여 그 값을  $m(k)$ 의 초기값으로 사용한 경우의 실험결과이며, 이 경우 시스템의 출력  $H$ 는 주어진 목표입력에 매우 신속히 추종함을 알 수 있다.

Fig. 7에는 비례 전자 감압밸브의 공급압력  $P_{sv}$ 를 변화시켰을 경우의 발전기 발생전원 주파수  $H$ 의 과도응답을 나타내었다. 그림에서  $P_{sv}$ 가 1.96 MPa 이상에서는  $H$ 는 주어진 목표 입력에 잘 추종함을 알 수 있으며,  $P_{sv}$ 가 1.27~1.47 MPa의 범위에서는 최대 1.18 Hz의 오버슈트가 나타난다. 이는 비례 전자 감압밸브의 공급압력이 높지 못함으로 감압밸브의 출구압력이 민첩하게 제어되지 못하기 때문이다.  $P_{sv}$ 가 1.08 MPa 이하에서는 감압밸브의 출구압력이 낮아 유압 모터 사판 조작용 실린더 반력 스프링의 가압력을 이기지 못하여, 시스템의 출력  $H$ 는 주어진 목표 입력에 도달하지 못함을 알 수 있다. 즉, 본 유압구동식 발전장치에서는 비례 전자 감압밸브의 공급압력이 주파수 목표치에 대응하는 최소 공급압력보다 클 경우에는 공급압력의 크기에 관계없이 안정된 제어성능을 발휘함을 확인하였다.

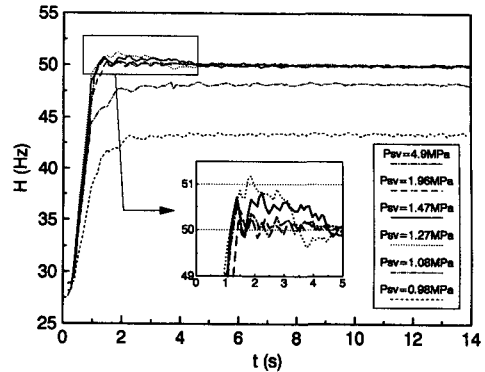


Fig. 7 Step response of the system by variation of supply pressure of electromagnetic proportional pressure reducing valve (load : 0 kW)

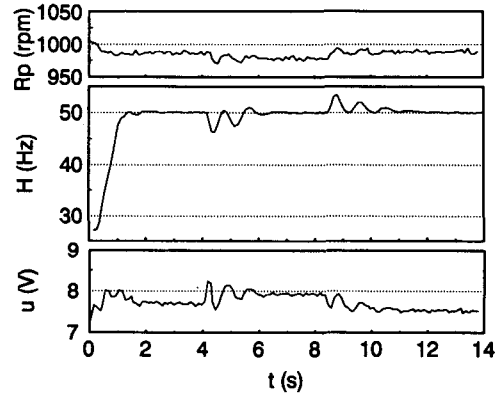


Fig. 8 Response of the system by step-wise load variation (load : from 0 to 0.5 kW, from 0.5 to 0 kW)

Fig. 8에는 유압구동식 발전장치의 목표 입력을 초기값인 27 Hz로부터 50 Hz로 계단상으로 변화시킨 후 교류 발전기에 저항 부하를 인가 및 제거한 경우의 발전기 발생전원 주파수  $H$ 의 과도응답과 그 때의 주 유압 펌프 구동용 전동기 회전수  $R_p$ 의 변동을 도시한 것이다. 부하는 무부하 상태에서 정격 부하의 50%에 해당하는 0.5 kW를 계단상으로 인가한 후 다시 인가된 부하를 제거하였으며, 제어 알고리즘은 디지털 서보 제어 설계법을 적용하였다. 그림에서 발전기에 부하를 인가 혹은 제거한 경우의 과도적인 주파수 변동은 각각 목표치로부터  $-3.7$  Hz,  $+3.36$  Hz이고, 정정 시간은 약 1.7초이다. 이 때  $R_p$ 는 최대 20 rpm 정도의 변동폭으로 불규칙하게 변동되며, 이는 주 유압 펌프의 송출 유량을 불규칙하게 변동시켜 유압 모터의 회



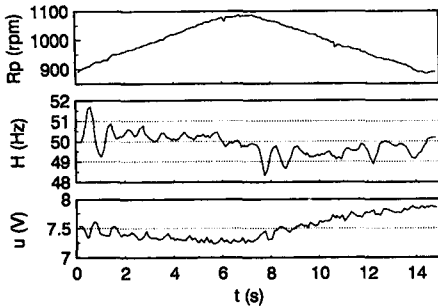


Fig. 9 Response of the system by ramp type variation of the V.S. motor speed (load : 0 kW)

전수, 즉 H의 제어에 나쁜 영향을 미친다. 이 실험 결과로부터 스텝상의 부하 변동과 이에 따른 주 유압 펌프 구동용 전동기 회전수 변화와 같은 외란의 작용에도 불구하고 매우 강인한 제어가 수행됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 주파수 목표치를 50 Hz로 하여 제어 수행중에 시스템에 가해지는 외란으로서, 주 유압 펌프 회전수  $R_p$ 를 그림에서와 같이 900 rpm으로부터 1080 rpm까지 직선적으로 증감시킨 경우의 발전기 발생전원 주파수 H의 응답을 나타내었다. 이 때의 회전수 변동율은 실제 선박에서의 회전수 변동율을 감안하여 실제 경우보다 빠른 변동율로 결정하였다. 그림에서 주파수 변동이 가장 급격한 시점은 펌프 회전수를 나타내는 직선의 변곡점 부근이며, 이 때 과도적인 주파수 변동폭은 약 1.7 Hz로 나타났다. 즉, 본 시스템에서 비교적 급격한 변동율을 갖는 구동용 전동기 회전수의 연속적인 변동하에서도 H는 주어진 목표 입력에 잘 추종함을 알 수 있다.

선박용 발전장치의 성능기준<sup>(10)</sup>에는 「교류 발전기 부하 변동에 따른 전원 주파수의 순간 변화가 정격 주파수의 10%이내이고, 5초이내에 정격 주파수의 1%이내로 유지되어야 한다」라고 규정되어 있다. 이상의 Fig. 8, Fig. 9의 결과로부터 발전장치에 인가되는 여러가지 외란하에서도 유압구동식 발전장치의 전원 주파수 순간 변화 및 정정시간이 위의 선박용 발전장치의 성능기준을 충분히 만족시킴을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 중·소형선박에서 사용하기에 적

합한 축 발전장치로서 유압구동식 발전장치를 제안하였다. 이 장치의 주파수 제어에 디지털 서보 제어 설계법을 적용하였으며, 마이크로컴퓨터를 이용하여 디지털 제어계를 실현하였다. 본 연구의 실험 및 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제어계의 설계에는 디지털 서보 제어 설계법을 적용하였으며, PID 제어설계법과 비교한 결과 시스템의 출력은 주어진 목표 입력에 매우 잘 추종하면서도 정정시간이 짧음을 확인하였다.

(2) 본 시스템에서는 시스템의 출력을 변화시킬 수 있는 제어입력 하한치가 존재하며, 이 제어 입력값은 서보 보상기  $m(k)$ 의 초기값에 영향을 받으므로,  $m(k)$ 의 초기값을 미리 구하여 사용함으로써 시스템의 출력은 주어진 목표입력에 거의 시간지연 없이 신속히 추종시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 본 유압구동식 발전장치에서는 비례 전자 감압밸브의 공급압력이 주파수 목표치에 대응하는 최소 공급압력보다 클 경우에는 공급압력의 크기에 관계없이 안정된 제어성능을 발휘함을 확인하였다.

(4) 본 연구에서 제안하는 유압구동식 발전장치는 스텝상의 발전기 부하변동, 유압 펌프 구동용 전동기의 급격한 회전수 변동과 같은 외란 하에서도 선박용 발전장치의 성능기준을 충분히 만족시키는 강인한 제어성능을 발휘함을 확인하였다.

본 연구에서 얻어진 성과를 실제 선박의 축 발전 시스템에 적용할 때는 퍼스널 컴퓨터를 온보드(On-board) 컴퓨터로 대치함으로써 제어성능은 본 연구에서와 동등하면서도 보다 가격이 저렴하고 내구성이 있는 축 발전시스템이 완성될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- (1) 朴進吉, 河注植, 1986, “에너지절약 선박의 발전시스템,” 한국박용기관학회지, 제10권 제2호, pp. 110~119.
- (2) 小田建一, 1985, “中形漁船における主機驅動發電の經濟性,” 日本舶用機關學會誌, 第20卷, 10號, pp. 734~739.
- (3) 日本油空壓學會, 1989, “新版 油空壓便覽,” 才-ム社, 日本, pp. 279~289.
- (4) 김상봉, 오세준, 정용길, 김환성, 1991, “서보

- 계 설계에 대한 쌍선형 변환법의 응용 및 카트의 위치제어, ” 대한전기학회논문집, 제40권, 3호, pp. 290~298.
- (5) Uchida Hydraulics Co., 1991, “User’s Manual for Proportional Pressure Reducing Valve 3 DREP-6,” Uchida Hydraulics Co., Tokyo, pp. 1~10.
- (6) Ernest E. Lewis and Hansjoerg Stern, 1962, “Design of Hydraulic Control System,” McGRAW-HILL Book Company, Inc., New York, pp. 194~196.
- (7) A. F. D’Souza, 1988, “Design of Control Systems,” Prentice-Hall Int. Inc., New Jersey, pp. 179~184.
- (8) Luenberger, D.G., 1971, “An Introduction to Observer,” IEEE Trans. Automatic control, AC-16, pp. 596~602.
- (9) Gopinath, B., 1971, “On The Control of Linear Multiple Input-Output Systems,” Bell Syst. Tech. J., 50, pp. 1063~1081.
- (10) 한국선급, 1985, “선급 및 강선규칙,” 5편, 6장, 202조, 한국선급, 서울, p. 599.