

디젤발전기 원동기의 운전특성 시뮬레이션

최 순 만* · 오 진 석**

Simulation of Operation Performance for DG Prime Mover

S. M. Choi · J. S. Oh

Key words : Diesel Generator(디젤발전기), Simulation(모의 운전), Governor(가버너), Compensation(보상)

Abstract

The prime mover performance of on-board Diesel Generator is well characterized by the variation of frequency and the load sharing on parallel running under electric load change. This study is aimed to configure the modeling for performance simulation regarding to DG operation which could be interested for education purpose or system analysis.

The modeling had been made on the base of modules such as governor, prime mover of diesel engine and generator with electric load system, which were then intergrated for total simulation performance.

One real model system has been introduced for deciding relating parameters and for the comparison of resulting performance in simulation. The responses from the modelling were confirmed in single and paralell operation, the results of which showed resonable accordance with the real system.

1. 서 론

근래들어 선박운항 관련 분야에도 컴퓨터시스템을 활용한 교육방식이 활발히 도입되고 있으며 디젤발전기의 운전실습용으로 여러 규모의 시뮬레이터들이 이용되고 있는 것도 예외 하나로 들 수 있다¹⁾.

발전기에서 전력부하 외란은 원동기축에 토크 및 회전속도의 변화를 일으키고 그 응답특성은 발전기의 질에 큰 영향을 미치는 요소이다. 발전기 운전과 관련하여 원동기에 나타나는 이들 동작특성은 배전반의 주파수계와 전력계만으로도 용이하게 관측되므로 운전 시뮬레이션은 운전자가 배전반에서 경험하게 되는 여러 상황을 기초로 구성

* 한국해기연수원 (원고접수일 : 96년 6월 25일)

** 한국해양대학교

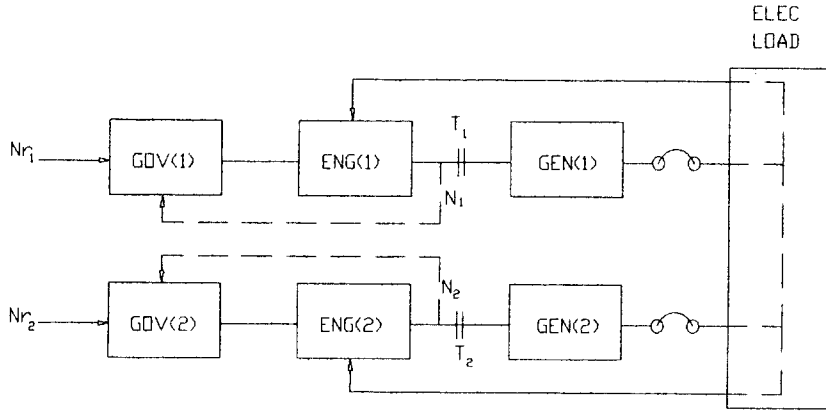


Fig. 1 Block Diagram of System Configuration

하는 것이 보다 실제적이다. 본 논문에서는 실무적 기능을 보완하고 교육 및 해석용으로 도움이 될 수 있는 DG 발전기 운전시뮬레이터를 구축하기 위한 기초연구의 하나로서 먼저 원동기측 운전특성을 모델링으로 구성해 보기로 한다.

DG 시스템은 작동모듈별로 구분하는 경우 Fig. 1 과 같이 GOV(1)과 GOV(2)의 가버너, ENG(1)과 ENG(2)의 원동기, GEN(1)과 GEN(2)의 발전기 및 전력부하계(ELEC. LOAD)들의 조합구성으로 나타낼 수 있으며 각 단위 DG 시스템의 동력계통은 전력부하와의 변환매개로 작용하는 발전기에 의해 서로 영향을 미치는 결합관계를 갖는다.

여기에서 N_{r1} , N_{r2} , T_1 , T_2 , N_1 , N_2 는 각각 1, 2호 발전기의 설정 rpm, 원동기 축토크 및 원동기 rpm 을 나타낸다.

시뮬레이션은 디젤발전기의 속도변동률, 부하분담특성 등 일반적인 시운전상의 관심 항목에 대해 나타내었으며 가버너의 모델링에서는 시간 보상 및 스피드드롭 등이 기본적인 조정 파라미터가 되도록 구성하였다²⁾. 발전기 병렬중 부하로 인해 원동기에 전달되는 토크와 부하분담 특성은 발전기간의 위상차각에 의해 모델링하였으며 비선형특성은 실선의 시운전 성적표를 기초로 함수형태의 계수를 구하여 처리하였다. 시뮬레이션은 기기 및 기능별로 분산하여 이산형의 단위모듈들로 모델링한 후 이들을 서로 결합하여 전체적인 동작이 구현되도록 하였으며 관련 파라미터의 여러 조정

조건에서 나타나는 응답결과를 통하여 실운전 시스템과의 근사특성을 확인하도록 한다.

2. 시스템 모델링

2.1 가버너

발전기 원동기 취부용 유압식 가버너는 정상특성을 정하는 속도변동률 조정(Speed Droop)기구와 과도특성을 정하는 보상조정(Compensation)기구를 필요로 한다. 속도변동률 조정기능은 출력신호의 일정률을 입력에 부궤환시키는 강성복원기구에 의해 얻어지고 보상조정은 대궤포트와 버퍼로 구성되는 탄성복원기구를 통하여 이루어지며 이들 기구가 갖는 기능을 중심으로 블록다이어그램을 나타내면 Fig. 2와 같아진다²⁾. 여기에서 $N_r(s)$, $N(s)$, $U(s)$ 는 각각 설정rpm신호와 측정rpm신호 및 연료분사펌프 랙크위치에 대한 라플라스 변환을 나타낸다.

Fig. 2에서 보상기능은 출력을 미분하여 부궤환시키는 방식으로 나타나며 K_3 , T_2 는 각각 보상이득과 보상시간에 대응하는 조정파라미터로 작용하고 스피드드롭은 계수 K_4 에 의해 조정된다. Fig. 2로부터 모듈 단위별 시뮬레이션 신호처리에 용이하도록 가버너의 실제적인 입력신호를 오차신호인 $N_r(s) - N(s)$ 로 나타내면 입출력 관계식은 식(1)과 같아진다.

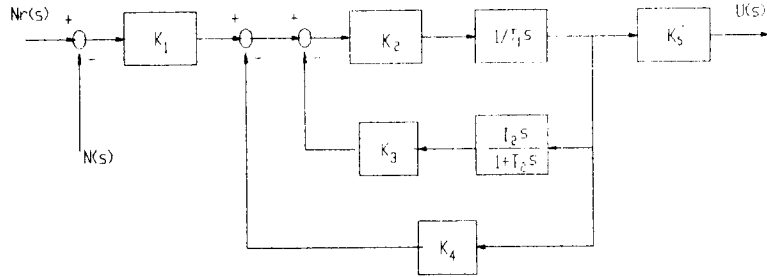


Fig. 2 Block Diagram of governor for DG

$$U(s) = \frac{\frac{K_1 K_2 K_5}{T_1} (s + \frac{1}{T_2})}{s^2 + (\frac{1}{T_2} + \frac{K_2 K_3}{T_1} + \frac{K_2 K_4}{T_1})s + \frac{K_2 K_4}{T_1 T_2}} [N_r(s) - N(s)] \quad (1)$$

또한 상태변수를 다음과 같이 정의하고

$$x_{g1} = u \quad x_{g2} = \dot{u} = \dot{x}_{g1} \quad (2)$$

랙크의 위치 u를 출력으로 하면 상태방정식과 출력식은 식(3)과 같다.

$$\dot{x}_g = A_g x_g + B_g (n_r - n) \quad (3a)$$

$$u = C_g x_g \quad (3b)$$

여기서

$$A_g = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_2 K_4}{T_1 T_2} & -\frac{T_1 + K_2 K_3 T_2 + K_2 K_4 T_2}{T_1 T_2} \end{pmatrix}$$

$$B_g = (0, 0, 1)^T$$

$$C_g = \left(\frac{K_1 K_2 K_5}{T_1 T_2}, \frac{K_1 K_2 K_5}{T_1} \right)$$

이고 이것의 이산형은 식(4)가 된다.

$$x_g(k+1) = G_g x_g(k) + H_g [n_r(k) - n(k)] \quad (4a)$$

$$u(k) = \left(\frac{K_1 K_2 K_5}{T_1 T_2}, \frac{K_1 K_2 K_5}{T_1} \right) x_g(k) \quad (4b)$$

여기서 $G_g = e^{A_g \tau}$, $H_g = (G_g - I)A_g^{-1}B_g$ 이고 τ 는 샘플링시간을 나타낸다.

2.2 원동기

디젤기관은 연료분사펌프 랙크위치를 입력으로 하고 기관의 회전속도를 출력으로 하는 시스템으로서 연소계통과 회전계통의 두 부분으로 크게 나타낼 수 있다^{3,7)}. 연소계통은 랙크위치에 의한 연료분사와 연소과정을 거쳐 토크를 출력시키는 부분이며 입출력간에는 실린더마다 분사 및 착화되는 과정을 거치기까지 일정시간의 지연이 따른다. 발전기의 경우 직결되는 디젤기관은 적어도 720rpm 이상의 고속이고 데드타임은 회전 속도와 실린더수에 반비례하여 작아지므로 연소계통은 1차지연에 근사한 것으로 취급이 가능하다. 또한 회전계통 역시 토크를 입력으로 하고 회전속도를 출력으로 하면 식(5)의 일반 관계식으로 나타낼 수 있으므로 식(6)의 1차 지연 계통으로 표현된다.

$$\dot{n} = -\frac{f_e + f_g}{J_e + J_g} n + \frac{30}{\pi} \frac{1}{J_e + J_g} t_q \quad (5)$$

여기서 n , f_e , f_g , t_q , J_e , J_g 는 회전각속도[rpm], 기관축계 마찰계수[Nm.sec/rad], 발전기 회전축 마찰계수[Nm.sec/rad], 구동토크[kNm], 기관축 회전 관성모우멘트[Nm.sec²/rad], 발전기축 회전 관성모우멘트[Nm.sec²/rad]를 각각 나타낸다.

$$\Omega(s) = \frac{1}{f_e + f_g} \frac{1}{1 + \frac{J_e + J_g}{f_e + f_g} s} T_q(s) \quad (6)$$

따라서 원동기의 모델링은 Fig. 3과 같아지고 부하의란 d는 전력부하 변동에 의한 부하토크의 변화를 나타낸다. K_c , T_c 와 K_r , T_r 은 각각 연소계통과 회전계통의 정상이득과 시정수이고 부하에 따른

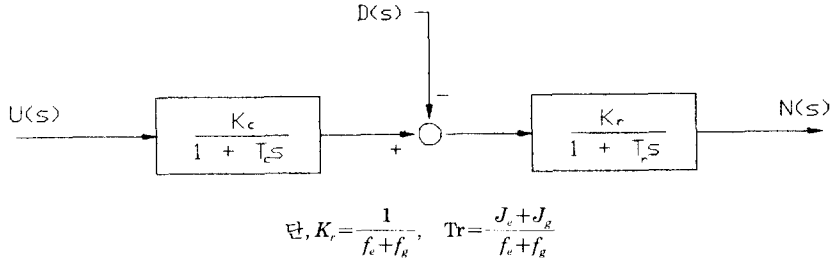


Fig. 3 Block Diagram of Diesel Engine

비선형 특성은 모델기관의 제원으로부터 시뮬레이션시점 $T = k\tau$ 의 상태에서 정해지는 정상이득값으로 표현하도록 한다.

Fig. 3으로부터 출력 $N(s)$ 는 식(7)과 같이 된다.

$$N(s) = \frac{\frac{K_c K_r}{T_c T_r} U(s) - \left(\frac{K_r}{T_r} s + \frac{K_r}{T_c T_r} \right) D(s)}{s^2 + \frac{T_c + T_r}{T_c T_r} s + \frac{1}{T_c T_r}} \quad (7)$$

앞의 가버너 경우와 같은 형태의 식으로 모듈화하기로 하면 식(7)에 대응하는 차분방정식은 $I(s)$ 와 $D(s)$ 가 개별적으로 작용하는 경우를 합성하여 나타내는 것이 가능하다. x_1, x_d 를 각각 랙크입력신호와 외란신호가 작용할 때의 상태 벡터로 놓고 식(4a)에 대응하는 계수행렬을 각각 G_b, G_d 및 H_b, H_d 라 하면 식(7)의 차분방정식과 출력식은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$x_1(k+1) = G_b x_1(k) + H_b u(k) \quad (8a)$$

$$x_d(k+1) = G_d x_d(k) + H_d d(k) \quad (8b)$$

$$n(k) = \begin{pmatrix} \frac{K_c K_r}{T_c T_r} & 0 \end{pmatrix} x_1(k) + \begin{pmatrix} \frac{K_r}{T_c T_r} & \frac{K_r}{T_r} \end{pmatrix} x_d(k) \quad (8c)$$

2.3 발전기

발전기 단독운전시에 부하변동으로 나타나는 원동기축의 토크변동은 현재의 부하크기만으로 정해질 수 있으나 병렬운전의 경우는 발전기간의 유효회류에 의한 영향을 별도로 고려해야 한다. 병렬시 발전기간의 유효회류 특성은 기전력의 위상차 δ 에 의해 발생되며 위상차 δ 는 구동축의 회전각 차이가 된다.

따라서 유효회류에 의한 전력분을 원동기축에 귀환시키기 위한 모델링은 병렬 발전기 대수가 2대인 경우 Fig. 4의 블록다이어그램으로 나타낼 수 있으며 원동기축의 각속도를 적분한 결과로 얻어지는 위상각 θ_1, θ_2 로부터 위상차 δ 를 구하도록 한다.

ACB1과 ACB2는 각 발전기의 주차단기이고 m 은 투입된 주차단기의 개수이다. p_1, p_2 는 각 원동기축에 외란으로 영향을 미치게 되는 각 발전기의 부하분담전력크기이며 발전기 유효회류 특성은 함수 $K_g(\delta, P_L)$ 으로 나타난다. 간략화를 위해 부하 P_L 에서 모터 등의 기동특성에 대한 모델링과 부하전류가 발전기 동기임피던스와 작용하여 축의 동

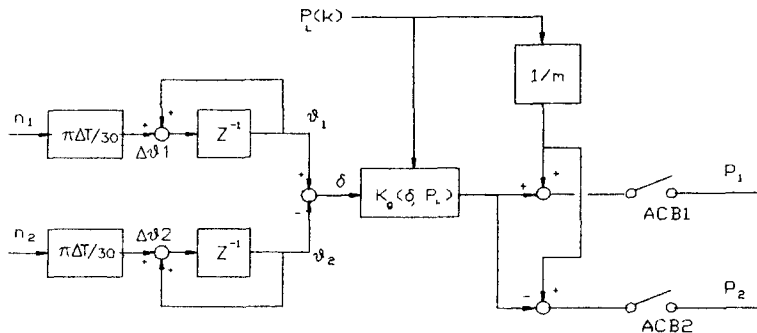


Fig. 4 Output Modeling of Generators running in parallel

력으로 나타나기까지의 과도특성에 대한 모델링은 생략되었다.

단독운전에서 ACB 투입은 임의시점에서 순시적으로 투입이 될 수 있으며 병렬 경우 나중에 투입하는 발전기는 과대한 충격을 피하기 위해 주파수와 위상을 일정한 범위이내로 조정한 후 동기투입을 하도록 한다.

3. 시뮬레이션

3.1 모델대상

시뮬레이션 모델대상이 된 발전기시스템의 기관 및 발전기 주요제원은 다음과 같으며 가정한 총합관성모멘트는 원동기와 발전기축의 합을 나타낸다⁴⁾.

4 cycle 8 cyl 225(Bore)×300(Length)

정격출력 : 1380 PS

정격속도 : 720 RPM

발전기정격 : 450 V 1250 KVA 60 Hz

정격전류 : 1604 A

전기자저항(직축) r_d : 1.23% (0.0034Ω)/Phase

동기리액턴스(직축) x_d : 150.5% (0.2438Ω)/

Phase

총합관성모멘트($J=J_e+J_g$) : 900 Nm.sec²/rad

모델발전기 원동기의 시운전 성적표로부터 주요 데이터를 나타내면 표(1)과 같으며 부하변화에 대한 분사펌프 랙크위치는 기동전체에 대한 평균치로 나타낸 값이다.

3.2 시뮬레이션방식

운전시뮬레이션에서 각 입출력신호는 실제 장

치와 대응하여 부위별 비교가 용이해야 한다. 이를 위해 발전기시스템은 가버너, 원동기 및 발전기의 단위로 독립된 모델링이 이루어졌으며 전체가 연동되는 실시간 시뮬레이션 동작을 나타내기 위해 다시 이들 모듈들을 이산 시스템 형태에서 결합하도록 한다. 각 단위모듈의 출력신호는 식(9)의 관계에 의해 선형연속계의 전달함수 $G(s)$ 로부터 샘플링 시간간격에 해당하는 제로홀드 지연동안의 스텝응답인 펄스전달함수를 구하여 나타낼 수 있으며 동일한 출력결과는 차분방정식의 이산시스템으로 구성하는 것이 가능하다^{5),6)}.

$$F_k(z) = Z\left[L^{-1}\left\{\frac{1}{s}(1-e^{-sT_k})G(s)\right\}\right] = \frac{(z-1)}{z} Z\left[\frac{G(s)}{s}\right] \quad (9)$$

단, Z는 켄트변환 연산자이다.

발전기 두 대의 시스템인 경우 가버너와 엔진 및 전기계를 결합하는 전체 블록다이아그램은 Fig. 5와 같이 나타난다. ω 와 ΔT 는 각각 발전기의 각속도와 샘플링시간을 나타내며 숫자로 된 첨자는 발전기 번호를 구분하기 위한 것이다.

각 모듈의 동작특성은 차분방정식의 형태로 결합되었으며 이산신호처리를 위한 클록시간 간격은 모든 모듈의 계수가 샘플링기간내에서 시불변의 선형시스템으로 취급이 가능하도록 충분히 짧은 시간으로 정한다.

3.3 계수의 결정

3.3.1 가버너

K_1 은 정격회전수의 역수인 $1/N_R$ 로 정하므로서 오프셋 입력신호를 정격회전수에 대한 비율로 나타내었다. 따라서 이 후의 K_2 , K_3 와 K_4 계수는 무

Table. 1 The results of Test Records for DG

	25%	50%	75%	100%	110%
기관출력(KW)	254	507	761	1015	1116
발전기출력(KW)	225	450	675	900	990
붓쉬프랙크(mm)	10.0	14.0	18.0	23.0	25.0
정지시 랙크위치	4.0mm				
랙크 최대한계치	25.5mm				

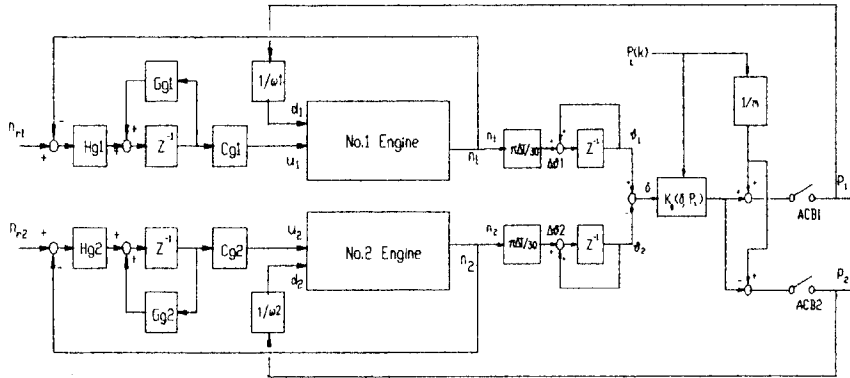


Fig. 5 Integration of Sub - Modules

차원으로 다룰 수 있으며 가버너 구동계인을 나타내는 K_2 는 10으로 가정한다. 출력의 관계설정에 필요한 유차원 계수는 K_5 에서 나타내었으며 가버너 출력은 K_5 에 의해 상한 및 하한값 이내의 일정 랙크위치로 전달되도록 한다. 식(1)로부터 정상상태에서의 가버너 출력은 K_1K_5/K_4 이고 스피드드롭 K_4 가 1인 상태에서 가버너에 주어진 rpm의 오프셋트가 정격회전수 만큼 작용한 경우 랙크변이량이 최대가 되도록 하면 유차원계수 K_5 는 식(10)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$K_5(\Delta n) = u_0 + \frac{u_{100} - u_0}{N_R} \Delta n \cdot u(\Delta n) u(N_R - \Delta n) \quad [mm] \quad (10)$$

여기서 $\Delta n [rpm]$, $u_0 [mm]$, $u_{100} [mm]$, $N_R [mm]$ 은 각각 회전수 오프셋트, 정지시 랙크위치, 최대 랙크위치, 정격분당회전수이고 함수 u 는 회전수의 유효범위를 나타내기 위한 단위함수이다.

시운전 성적표로부터 랙크범위는 4.0에서 25.5이므로 가동범위내에서 식(10)은 $4.0 + 0.033\Delta n$ 로 얻어진다. 또한 계수 T_1 은 파워피스톤 작동의 적분 시간을 나타내는 것으로 파워피스톤의 단면적을 유입량으로 나눈 값이 되며 여기서는 0.2 초의 값으로 가정한다.

3.3.2 원동기

1) 파라미터 K_c, T_c

연료분사펌프 랙크 위치와 토크 출력간의 정상 이득을 나타내는 계수 K_c 의 값은 부하에 따라 일정

하지 않으며 이같은 비선형특성을 위해 시운전 성적표의 결과로부터 함수형태의 계수를 구하여 처리하도록 한다. 먼저 랙크위치 u 에 대한 기관출력을 함수 $K_p(u)$ 라 하면 최소자승법에 의해 2차까지로 구해지는 $K_p(u)$ 는 식(11)과 같다.

$$K_p(u) = -508.9 + 83.458u - 0.741u^2 \quad [kW/mm] \quad (11)$$

식(11)로부터 $K_p(u)$ 가 제로가 되는 u_c 점은 6.5 mm 근방을 나타내고 랙크의 가동경계점이 된다. 따라서 $u < u_c$ 의 구간은 부동대역이므로 랙크는 정지에서의 지침과 마찬가지로인 4.0mm에서 일정하여 $K_p(u)$ 의 값은 제로이며 여기에서 정지시 랙크지점까지의 $4.0 < u < u_c$ 구간은 원동기 정지를 확실하게 하기 위한 포화대역에 해당한다.

일정 랙크 위치에서 $K_p(u)$ 은 회전수 n 에 대략 비례하며 이러한 가정하에 토크를 출력으로 하는 계수 K_c 는 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$K_c = \frac{30K_p(u)}{\pi n} \frac{n}{N_R} = \frac{30K_p(u)}{\pi N_R} \quad [kNm/mm] \quad (12)$$

따라서 K_c 는 랙크위치만의 함수인 식(13)이 된다.

$$K_c = \frac{-11.125 + 20.865u - 0.185u^2}{2\pi N_R} \quad [kNm/mm] \quad (13)$$

연소시스템의 시정수 T_c 는 발전기용 원동기와 같은 고속기관에서 그 값은 매우 작으며 또한 병렬시

조속기 맥동을 줄이기 위한 목적에서 발전기 원동기는 회전관성 GD^2 가 충분히 크게 설계되므로 회전계통의 시정수 T_r 에 비해 T_c 의 값은 상대적으로 극소하여 이것이 시뮬레이션 특성에 미치는 영향은 미미하다. T_c 는 기관회전수 n 에 반비례하고 4행정기관에서는 2배로 되므로 전체 실린더 개수의 1/2 연소에 소요되는 시간을 T_c 로 정하면 그 값은 식(14)가 된다.

$$T_c = 30/n \quad [\text{sec}] \quad (14)$$

2) 파라미터 K_r, T_r

회전계통의 각 계수는 식(5)로부터 축 회전 마찰 계수가 관련되며 회전 마찰계수 f_s 는 축계 전체의 회전손실로부터 구해진다. 회전손실은 원동기축 마찰마력과 발전기축 손실의 합에서 전기자전류에 의한 동손 부분을 제외시켜 나타낼 수 있으며 대략 그 크기는 부하에 관계없이 일정하므로 무부하시의 기관출력을 회전손실의 크기로 대신하는 것이 가능하다. 그러나 모델 발전기의 시운전 성적표로부터 무부하시의 기관출력이 구해지지 않으므로 여기서는 부하에 대한 연료분사펌프 랙크의 지침 특성으로부터 간접적으로 얻도록 한다. 시운전 결과에서 최소화승법에 의한 랙크 지침함수 $u(p)$ 는 부하를 $P(\text{kW})$ 라 할 때 $6.731 + 0.012P$ 로 나타나며 이로부터의 무부하시 랙크지침 u_0 을 식(11)에 대입하면 무부하시 출력 P_0 는 식(15)의 값이 된다.

$$P_0 = K_p(u_0) = 19.3 \quad [\text{kW}] \quad (15)$$

식(5)의 마찰계수 합 f_s 를 무부하 손실로 나타내면 식(16)의 관계가 된다.

$$f_s = \frac{3600}{4\pi^2 n^2} P_0 \quad [\text{Nm.sec/rad}] \quad (16)$$

여기에서 n : 분당회전수 [rpm],

P_0 : 무부하시 기관출력 [W]이다.

n 이 720rpm일 때 식(14)과 식(15)로부터 마찰계수는 20.23 [Nms/rad]이 되며 이로부터 K_r 와 T_r 은 각각 식(5)에 의해 1/27.5 [rad/Nm.sec]와 43.6 [sec]의 값으로 구해진다.

3.3.3 발전기

$K_g(\delta, P_L)$ 은 축회전 위상차와 부하전력을 입력으로 하여 병렬중 기관축에 케환되는 동력크기를 출력시키는 함수형 변환계수이다. 리액턴스 성분이 대부분인 발전기의 동기임피던스에서 저항분을 무시하면 병렬중 유효회류에 의해 원동기에 영향을 미치는 동력은 기전력간의 위상차 및 동기리액턴스로서 간단히 나타낼 수 있다. 병렬중인 발전기 두 대의 발생 기전력 E_1, E_2 가 E 의 크기로 값이 서로 같고 위상차가 δ 일 때 이들의 페이저 다이어그램은 Fig. 6과 같아지며 I_s 는 유효회류를 일으키는 구동전압으로 작용한다.

m 대의 발전기가 병렬운전중이고 전체 부하전력이 P_L 인 경우 한 발전기에 나타나는 부하전력 P_k 는 임의 발전기간의 기전력 위상차가 δ_{jk} 일 때 유효회류에 의해 인가되는 전력분이 더해져서 식(17)의 관계가 되며 병렬발전기가 두 대이고 P_L 을 저항성부하로 가정하면 식(17)은 선간전압 V 에 의한 식(18)로 나타낼 수 있다.

$$P_k = \frac{P_L}{m} + \sum_{j=1}^m \frac{3E^2}{2Z_s} \sin \delta_{jk} \quad [\text{W}] \quad (17)$$

$$P_k = \frac{P_L}{m} + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_s P_L^2}{V^2} + \frac{V^2}{Z_s} \right) \sin \delta \quad [\text{W}] \quad (18)$$

여기서 Z_s, E, V, m 는 동기임피던스, 상기전력, 선간전압, 병렬투입된 ACB의 개수를 각각 나타내

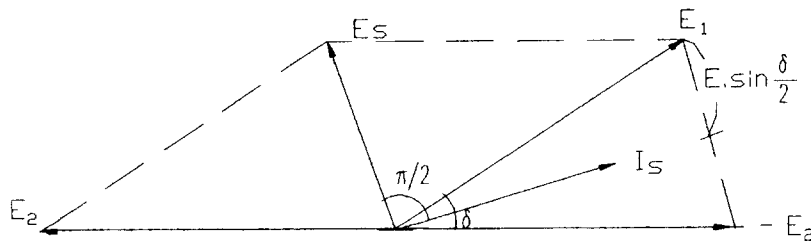


Fig. 6 Phasor Diagram in parallel with different phase angle

며 단독운전의 경우 δ 는 0으로 계산한다. 따라서 식(18)에 발전기 동기리액턴스 Z_s 와 전압을 대입하면 식(19)의 관계를 얻는다.

$$K_g(\delta, P_L) = (415.3 + 0.6P_L^2) \sin\delta \quad [\text{KW/rad}] \quad (19)$$

4. 결과와 분석

4.1 응답시뮬레이션

4.1.1 시동 및 속도변동에 대한 응답

시동은 기관에 가장 큰 스텝입력을 가하는 경우로서 시뮬레이션에서의 응답은 Fig. 7과 같이 나타난다. 시동시 주어진 설정 회전수는 520rpm이고 압축 시동공기나 부우스터에 의한 영향은 고려되지 않았으며 각각 가버너의 보상시간이 0.8sec, 1.5sec, 15.5sec인 상태에서의 결과이다.

보상시간 T_2 와 보상크기 조정계수 K_3 에 따라 시동응답은 큰 차이를 보이며 K_3 가 일정하에 T_2 를

감소하여 가면 오버슈트는 커지고 맥동적인 상태로 된다. T_2 가 0.8초인 때 응답특성은 과도한 초기 오버슈트와 이것에 의해 축적된 회전관성 에너지로 인해 연료가 차단된 이후에도 회전수의 완만한 감쇠로 나타나며 감쇠 경사각은 약 $-0.04N_r/\text{sec}$ 로서 회전계통의 시정수 T_f 에 의해 정해진다.

Fig. 8은 속도 설정치를 520rpm에서 720rpm으로 스텝형태로 가한 경우의 응답이며 스피드드롭 조정계수 K_4 가 0.05이고 보상계수 K_3 가 0.65로 고정된 상태에서 보상시간을 각각 달리하여 나타낸 것이다.

보상정도에 따라 결과는 시동응답에서와 같은 경향을 보이며 T_2 가 0.05초로 매우 작게 주어진 때의 맥동은 보다 심한 상태로 나타나고 있다.

4.1.2 부하변화에 대한 응답

부하변동의 외란에 대한 속도응답은 Fig. 9와 같으며 계수 K_3 에 의해 보상크기를 각각 달리하였을 때의 과도특성을 보인다.

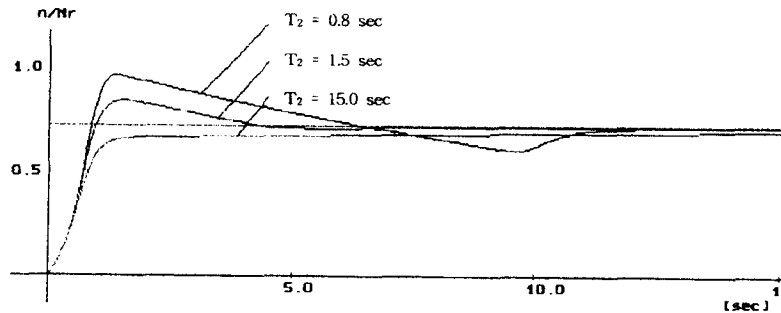


Fig. 7 Response Results of Engine Starting($K_3=0.65$, $K_4=0.05$)

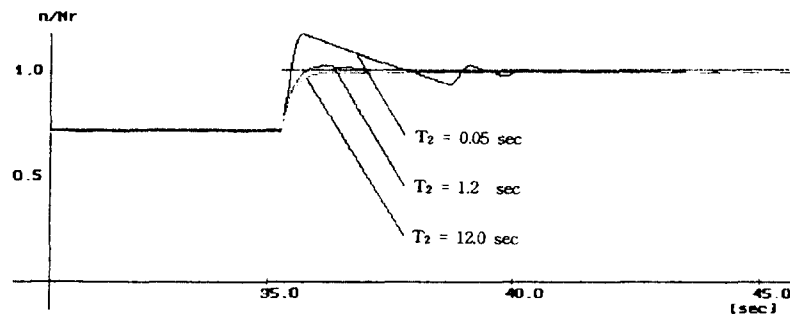


Fig. 8 Responses at change of speed setting($K_3=0.65$)

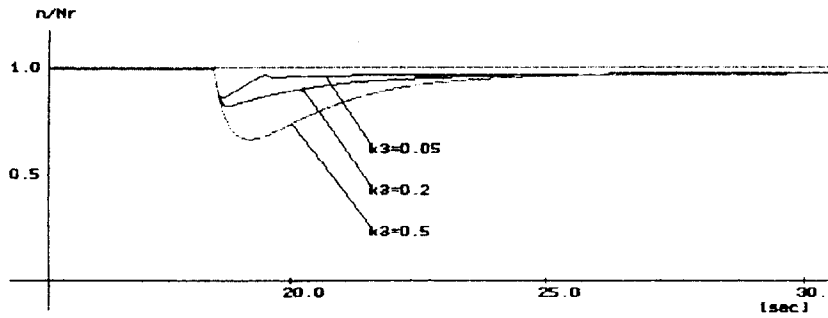


Fig. 9 Response Results at load change and variable speed droop($K_1=0.06, T_2=2.0$ sec)

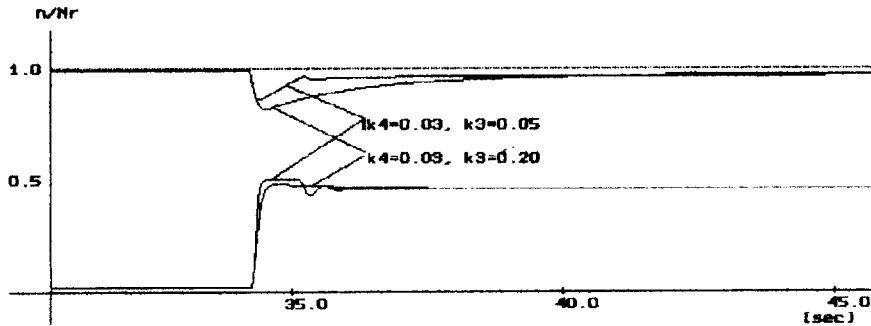


Fig. 10 Responses of rpm and torque at step load increase(at $T_2=2.0$ sec)

보상이 큰 경우 외란에 대한 과도적인 속도변동은 심하여 초기 rpm 감소가 크게 나타나고 있으며 이후 정상상태에서는 K_1 가 같으므로 서로 동일한 rpm으로 일치되어 가고 있음을 보인다. Fig. 10은 무부하 상태에서 부하가 인가된 경우를 원동기축의 토크와 함께 나타낸 것이다.

가버너 K_3 에 의해 보상정도에 차이를 두고 이외의 조정은 모두 동일한 조건에서 나타낸 결과이며 두 발전기의 rpm과 토크 응답으로부터 속응성과 맥동상태가 잘 비교된다.

4.1.3 병렬투입특성

1호발전기가 이미 운전되고 있는 상태에서 2호발전기가 병렬투입되게 하고 일정한 조건에서의 비교를 위해 ACB는 양 발전기의 주파수와 위상 차이가 각각 0.5Hz와 -5° 로 될 때 자동투입 되도록 한다. Fig. 11은 병렬투입 전후의 각 원동기 회전수와 토크를 나타낸다.

각 가버너 계수에서 두 번째 첨자 숫자는 해당

발전기의 넘버를 뜻하므로 Fig. 11에서 모든 계수는 서로 같게 조정된 것을 나타내고 있으며 병렬되기 전의 1호기 부하는 정격의 60%이다. Fig. 11에서 가버너의 보상조정은 적정한 상태임을 보이며 투입직후 회전수 응답은 약간의 맥동을 거친 후 동일한 값의 정상상태로 안정되고 있다. 가버너의 보상조정이 매우 작게 주어진 상태에서 병렬투입시 응답은 보다 맥동적이 되며 Fig. 12는 이 때의 경우를 나타낸다.

Fig. 11에 비해 맥동주기가 매우 짧고 안정되기까지의 맥동지속 시간이 보다 길게 나타난다. 같은 조건에서 가버너의 보상조정 상태를 더욱 작게 조정할 경우 응답은 Fig. 13과 같이 나타나며 발산형태의 맥동을 일으켜서 2호기는 역전력상황에 의해 동기투입이 실패되고 있음을 보인다.

4.1.4 부하분담특성

Fig. 14는 발전기 두 대가 병렬된 후 정격의 20% 부하씩 균일하게 분담 조정된 상태에서 새로운 부

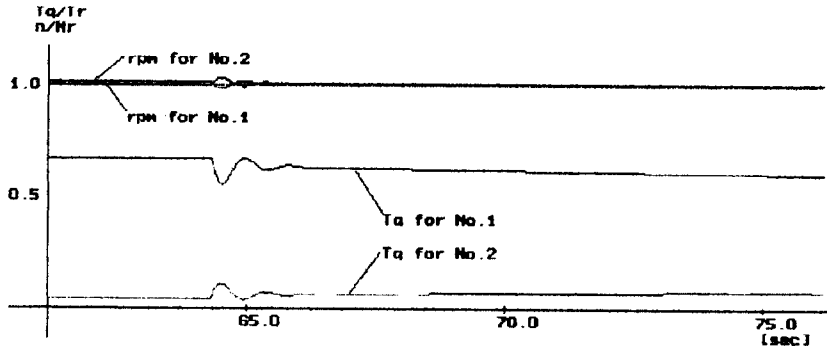


Fig. 11 Responses(1) at parallel connection of two G/Es($K_{s1}=0.4, K_{s2}=0.4, T_{21}=0.6, T_{22}=0.6, K_{41}=0.06, K_{42}=0.06$)

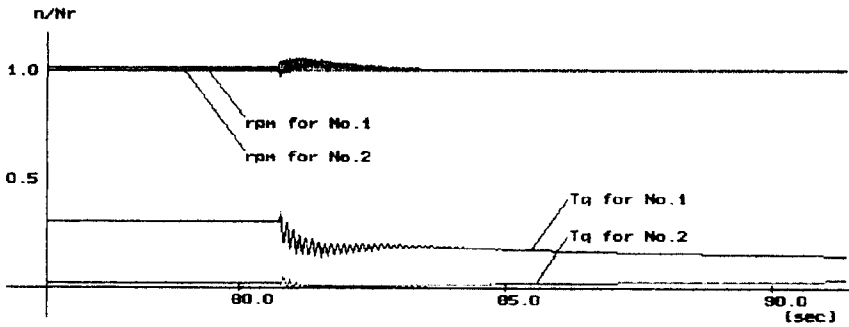


Fig. 12 Responses(2) at parallel connection of two G/Es($K_{s1}=0.4, K_{s2}=0.4, T_{21}=0.3, T_{22}=0.3, K_{41}=0.06, K_{42}=0.06$)

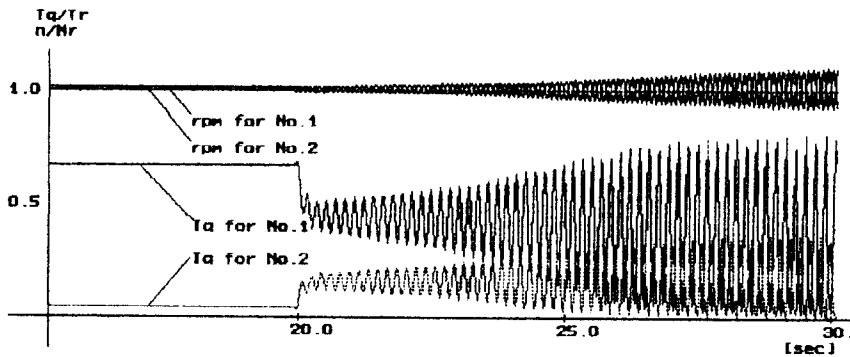


Fig. 13 Responses(3) at parallel connection of two G/Es($K_{s1}=0.2, K_{s2}=0.2, T_{21}=0.1, T_{22}=0.1, K_{41}=0.06, K_{42}=0.06$)

하 0.4Pr를 인가한 경우 나타난 결과이며 rpm과 부하전력에 대한 응답을 보인다. 가버너는 스피드 드롭 크기만 0.06과 0.08로 달리 조정되었으며 이외는 모두 동일하다. 부하분담의 응답은 초기의 과도적 맥동을 거친 후 정상상태에서는 일정한 비율의 차이로 안정되고 있으며 이 때의 분담비율은 K_{41} 과 K_{42} 의 비에 의해 정해지고 있음을 보인다.

같은 조정조건에서 단독운전 경우보다 속도 응답은 rpm감소가 적게 나타나며 과도초기에 근소한 속도차이와 맥동과정을 거친 후 동일 속도로 곧 안정되고 있다. Fig. 15는 가버너 보상조정을 보다 작게 한 상태에서 동일 형태의 부하를 인가한 경우이며 맥동주기가 작아지는 한편 과도시의 맥동크기는 매우 크게 나타난다.

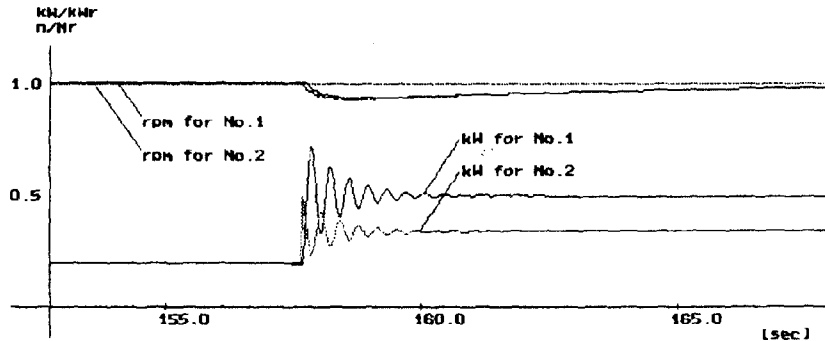


Fig. 14 Responses(1) at step load increase under parallel running($K_{31}=0.4, K_{32}=0.4, T_{21}=0.6, T_{22}=0.6, K_{41}=0.06, K_{42}=0.08$)

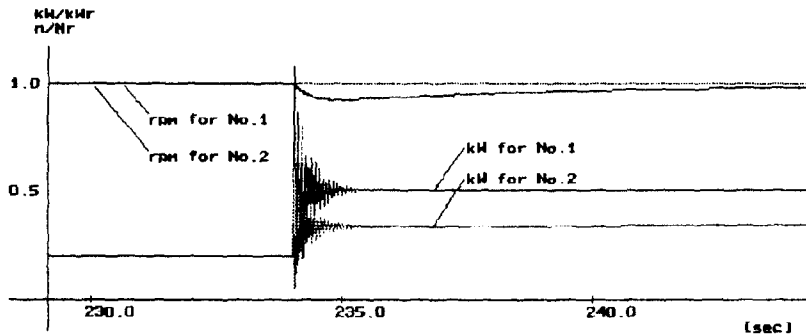


Fig. 15 Responses(2) at step load increase under parallel running($K_{31}=0.2, K_{32}=0.2, T_{21}=0.3, T_{22}=0.3, K_{41}=0.06, K_{42}=0.08$)

4.2 결과분석

가버너 모델링은 운전측면에서 관심되는 조정 기능을 위주로 구성하였고 시뮬레이션상의 속도 및 부하응답 결과에서도 각 기능별 파라미터 조정 에 따라 관련특성의 변화는 지배적으로 영향을 받는 것으로 나타난다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해 전체 시스템의 통합된 전달함수나 상태방정식을 구하는 번거로움이 없이 분산된 모듈들의 개별적인 모델링 구성 후 이들을 결합하는 방식에 의하여 안정적이고 실제적인 응답특성이 얻어질 수 있음을 확인하였다.

모델시스템의 기본제원과 시운전기록의 동적제원을 기초로 정하여진 원동기 모델링 계수들에 대하여 속도 및 부하분담 응답특성은 일관되고 실제적인 특성으로 재현되었으며 이로부터 각 계수의 설정은 적정한 것으로 판단된다. 또한 가버너와 원

동기의 비선형적인 특성은 관련 계수를 모델대상의 제원으로부터 함수형태로 구하고 모듈 입출력 신호를 유차원으로 나타내므로써 가버너와 원동기 각 단에서 시뮬레이션의 운전치는 실 시스템의 해당부위와 동일한 차원과 크기로 비교될 수 있었다.

한편, 병렬중 부하투입의 경우 맥동현상은 매우 심하게 나타났으며 그 원인으로는 발전기의 제동 권선 영향이 고려되지 않은 점과 또한 전기계 특성에 대한 모델링이 생략되어 부하투입에 의한 외란의 크기가 실제의 과도시 경우와 달리 기관에 완전한 스텝신호 형태로 인가되었기 때문으로 볼 수 있으며 또한 선간전압의 크기가 과도응답중에도 일정한 값으로 계산된 점들이 이유로 추정된다.

5. 결 론

시뮬레이션 대상 시스템의 규모가 크게 되면 다수의 입출력 신호가 관련되고 구현 기능도 다양하게 요구되므로 이러한 경우 전 시스템의 응답특성을 하나의 통합된 전달함수나 상태공간으로 나타내는 것은 적지 않은 어려움이 따를 뿐 아니라 안정성을 저하시킬 염려가 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 기능의 확장에 대비하여 기기 및 기능 중심의 분산된 모듈들을 개별적으로 구성한 후 결합시키는 방법에 의해 전체 시뮬레이션 동작을 구현하였으며 이것에 의한 응답결과는 안정적이고 실제적인 근사특성으로 나타났다.

발전기 단독운전에서 속도 및 토크 응답과 병렬 운전에서의 동기투입 및 부하분담 응답특성 모두에서 재현성은 양호한 결과를 얻을 수 있었으나 병렬시 부하외란에 대한 과도응답은 실제보다 초기 맥동 크기가 매우 크고 지속적인 특성으로 나타났다. 이러한 원인은 전기계에서의 모델링이 간소화되었고 부하외란의 크기가 전기계의 과도특성을 거치지 않고 직접 스텝신호 형태로 원동기에 인가되도록 한 점과 또한 발전기의 모델링에서 제동권선에 의한 영향이 생략되었기 때문으로 추정된다.

본 연구를 통하여 전기계와 원동기측과의 경계에서 작용되는 간섭요인들이 확인될 수 있었으며 전기계를 포함한 발전기 운전시뮬레이션의 전체적인 시스템구성은 차후의 과제로 남겨 두기로 한다.

참고문헌

- 1) NorControlSimulation, "Simulator DPS - 100 Technical Manual", 1990
- 2) Woodward Governor Company, "UG8 Dial Governor", Bulletin 03032B
- 3) J. A. Cook, A. K. Powell, "Modeling of an Internal Combustion Engine for Control Analysis", IEEE Cont.system magazine, Aug, 1988
- 4) SsangYong Heavy Industries Co., Ltd, "Shop Trial Test Record of Diesel Engine", Eng. No. SB8L23 - 1093
- 5) M. J. Grimble, "Simulation Fundamentals", Prentice Hall International
- 6) Katsuhiko Ogata, "Discrete Time Control System", Prentice hall International, Inc
- 7) 김병덕, 하주식, "디젤기관의 속도제어성능 개선에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제17권 제5호 (1993)