

# 전기식 조속기를 이용한 디젤 엔진 발전기의 속도 제어

이승환, 이준환, 설승기  
서울대학교 공과대학 전기 컴퓨터 공학부

## Speed Control of a Diesel Engine Generator by a Electric Governor

Seung-Hwan Lee, Joon-Hwan Lee, Seung-Ki Sul  
School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University, Seoul, Korea.

### ABSTRACT

본 논문에서는 실험적으로 구한 엔진 토크 참조 표를 이용하여 엔진의 비선형 모델을 구하고 이를 각각의 운전 점에 대해 선형화한 엔진 모델을 제시하였다. 이러한 선형화된 엔진 모델을 이용하여, 전기식 조속기를 사용한 디젤 엔진의 속도 제어에 있어 발생하는 안정성 문제를 해석하였다. 제시한 디젤 엔진 모델을 이용하여 속도제어기의 비례, 적분 미분 이득을 설정하고 이 값을 바탕으로 모의실험 및 실험을 통하여 제시한 모델의 타당성을 검증 하였다.

Keywords - 디젤 엔진, 속도 제어, 전기식 조속기, 엔진 모델

### 1. 서론

디젤 엔진은 그 자체의 우수한 효율 특성으로 인해 독립형 분산 전원 시스템의 원동기로 가장 많이 사용된다. 기존의 디젤 엔진 발전기 시스템에서는 크랭크축과 동기 되어 움직이는 기계식 혹은 유압식 조속기를 이용하여 엔진을 일정한 속도로 운전하였다. 하지만 입력 전류의 크기에 따라 연료의 양을 제어하는 전기식 조속기의 간단한 구조와 우수한 제어 성능으로 인해, 이러한 전기식 조속기를 이용한 디젤 엔진의 속도 제어에 관련한 연구 역시 활발히 진행되고 있다.

디젤 엔진의 속도 제어와 관련하여 비례, 적분, 미분(PID) 형태의 제어기가 일반적으로 가장 많이 사용되고 있으나 엔진의 비선형적인 출력 토크 특성과 큰 시간 지연 요소로 인하여 엔진 속도 제어에 관한 이론적인 접근이 어렵고 실험적인 튜닝을 통하여 그 이득을 설정하는 경우가 대부분이었다. 따라서 기존의 디젤 엔진 속도 제어에 관한 연구는  $H_{\infty}$  controller[1], gain scheduling[2], fuzzy algorithm[3] 등에서처럼 엔진의 비선형적인 토크 특성을 무시하고 경험적으로 속도 제어기의 이득을 설정하거나 제어 법칙(Rule based algorithm)에 의존하여, 체계적인 이득 설정에 어려움이 있었다.

본 논문에서는 분산 전원 시스템을 위한 26kW의 디젤 엔진 발전기용 엔진을 이용하여 엔진의 비선형적인 토크 특성을 전기식 조속기의 전류와 엔진 속도에 대한 참조표의 형태로 구하였다. 이를 바탕으로 엔진의 운전 점에 대해 선형화한 디젤 엔진 모델을 제안하였고 이 모델을 바탕으로 PID 속도 제어기의 이득에 따른 안정도를 분석하였다. 제안한 엔진 모델 및 안정도 분석의 유효성을 실험을 통하여 검증하였다.

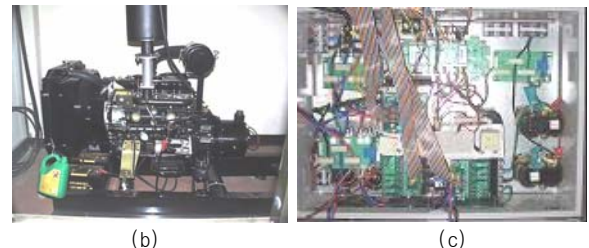
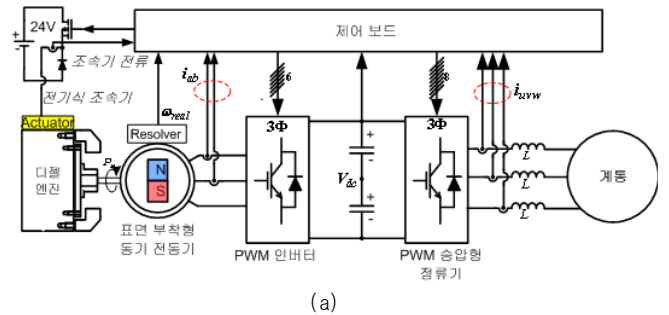


그림 1 실험 세트의 구성 (a) 전체 시스템 블록선도 (b) 디젤 엔진 (c) PWM 인버터 및 승압형 정류기 사진

Fig. 1 Experimental setup (a) Block diagram of overall system (b) Photo of diesel engine (c) Photo of PWM inverter and boost rectifier set

## 2. 디젤 엔진의 토크 특성

### 2.1 실험 세트의 구성

그림 1에 26kW 디젤 엔진의 운전 점에 따른 출력 토크를 구하기 위한 실험 세트의 구성을 나타내었다. PWM 인버터 및 표면 부착형 영구 자석 동기기를 이용하여 엔진의 속도를 제어 하였으며 강압형(Buck) 컨버터를 이용하여 전기식 조속기의 전류를 제어하였다. 동기 전동기가 속도 제어를 하고 있는 상태에서 조속기의 전류를 일정하게 제어하여 엔진이 폭발하도록 하면 동기 전동기는 속도 제어를 위해 발전 모드로 동작하게 되고 발전된 전력은 PWM 승압형 정류기를 통하여 전원 계통으로 공급된다. 엔진의 평균 출력 토크는, 엔진이 폭발을 시작하여 전동기가 발전 모드로 동작할 때 속도 제어를 위해 필요한 전동기의 동기 좌표계 q축 전류를 이용하여 구하였다.

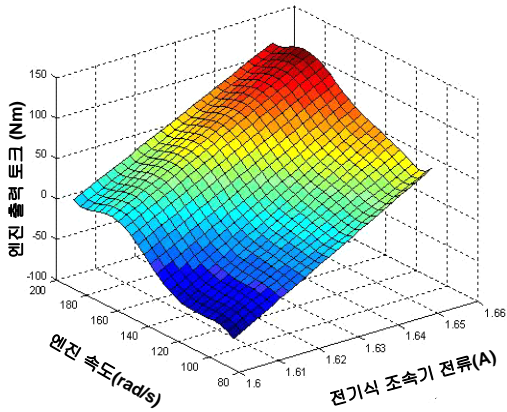


그림 2 조속기 전류와 엔진 속도에 따른 출력 토크 그래프  
Fig. 2 Electric governor current vs. Engine speed vs. Engine output torque

## 2.2 디젤 엔진의 출력 토크 맵

본 논문에서 디젤 엔진의 출력 토크 맵은 그림 2에서와 같이 실험을 통해 구한 엔진의 토크와 엔진 속도, 조속기 전류의 관계를 참조표의 형태로 나타낸 것을 의미한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 엔진 출력 토크는 전기식 조속기의 전류와 엔진의 속도에 관계된 함수이다.

## 3. 전기식 조속기를 이용한 엔진 속도 제어기

### 3.1 속도 제어를 포함한 전체 시스템

그림 3에 전기식 조속기를 이용한 디젤 엔진 속도 제어 시스템의 전체 블록 도를 나타냈다. 이와 같은 속도 제어 시스템을 이용하여 실제 디젤 엔진에 대해 속도 제어를 하는 경우 그림 4에서 보는 것과 같이 운전 점에 따라 속도 제어 안정성이 달라진다. 하지만 기존의 디젤 엔진 모델은 엔진의 비선형 토크 특성을 무시하여 이와 같이 운전 점에 따라 속도 제어 특성이 달라지는 현상을 설명할 수 없다.

### 3.2 디젤 엔진 비선형 토크의 선형화

디젤 엔진의 비선형적인 토크 특성을 바탕으로 속도 제어 시스템을 해석하기 위해 다음과 같은 과정을 통하여 비선형 토크를 선형화 하였다. 먼저 엔진의 출력 토크를 그림 2를 바탕으로 다음과 같이 조속기 전류와 엔진 속도의 함수로 표현할 수 있다.

$$T_e = T_e(i_{gov}, \omega_{rm}) \quad (1)$$

엔진 토크와 속도의 관계는 그림 5 (a)에 나타난 것처럼 비선형 관계에 있으며 이는 식 (2)와 같이 6차 다항식으로 근사할 수 있다.

$$T_e = a_6 \omega_{rm}^6 + a_5 \omega_{rm}^5 + a_4 \omega_{rm}^4 + a_3 \omega_{rm}^3 + a_2 \omega_{rm}^2 + a_1 \omega_{rm} + a_0 \quad (2)$$

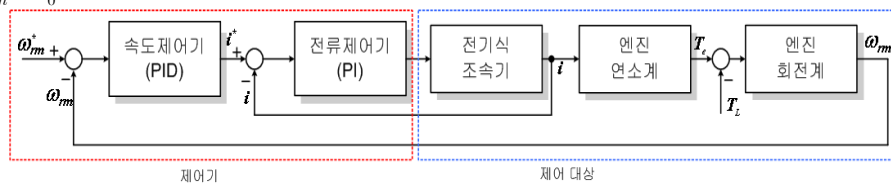


그림 3 전기식 조속기를 이용한 디젤 엔진의 속도 제어 블록 선도  
Fig. 3 Block diagram of diesel engine speed controller with electric governor

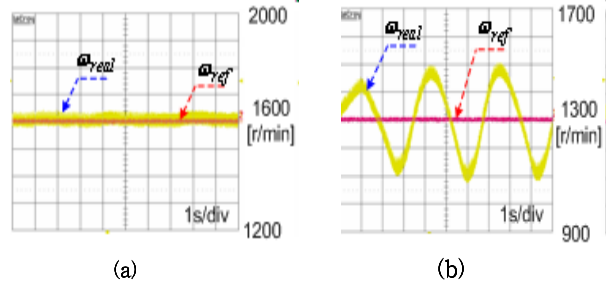


그림 4  $K_p = 1, K_i = 0.8, K_d = 0.08$ 인 경우 디젤 엔진의 속도 응답  
답 (a)  $\omega_{ref} = 1600$ r/min (b)  $\omega_{ref} = 1300$ r/min  
Fig. 4 Diesel engine speed response for  $K_p = 1, K_i = 0.8, K_d = 0.08$  (a)  $\omega_{ref} = 1600$ r/min (b)  $\omega_{ref} = 1300$ r/min

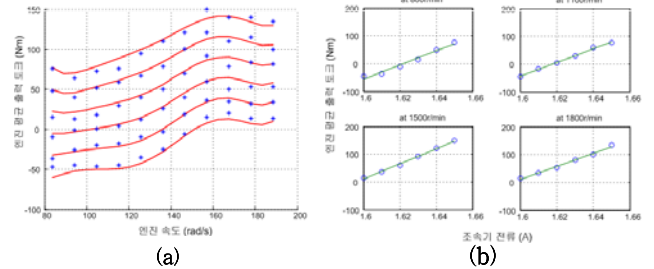


그림 5 디젤 엔진의 운전 조건에 따른 출력 토크 (a) 속도에 따른 토크 (b) 조속기 전류에 따른 토크  
Fig. 5 Diesel engine output torque according to operating condition (a) torque vs. engine speed (b) torque vs. governor current

식 (2)의 각 항의 계수는 조속기 전류에 따른 엔진 토크의 함수이며 그림 5 (b)에서와 같이 선형의 관계에 있다. 따라서 식 (2)는 다음 식 (3)과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$T_e = f_1(i_{gov})\omega_{rm}^6 + f_2(i_{gov})\omega_{rm}^5 + f_3(i_{gov})\omega_{rm}^4 + f_4(i_{gov})\omega_{rm}^3 + f_5(i_{gov})\omega_{rm}^2 + f_6(i_{gov})\omega_{rm} + f_7(i_{gov}) \quad (3)$$

이 때,

$$\begin{aligned} f_1(i_{gov}) &= p_{11}i_{gov} + p_{12}, & f_2(i_{gov}) &= p_{21}i_{gov} + p_{22}, \\ f_3(i_{gov}) &= p_{31}i_{gov} + p_{32}, & f_4(i_{gov}) &= p_{41}i_{gov} + p_{42}, \\ f_5(i_{gov}) &= p_{51}i_{gov} + p_{52}, & f_6(i_{gov}) &= p_{61}i_{gov} + p_{62}, \\ f_7(i_{gov}) &= p_{71}i_{gov} + p_{72} \end{aligned}$$

로 나타내어지며 조속기 전류에 대한 1차 다항식을 나타낸다.

식 (3)은 비선형 토크의 참조 표를 하나의 식으로 나타낸 결과이며 이를 운전 점에 대해 선형화하기 위해 다음 식 (4)와 같이 조속기 전류와 엔진의 속도를 대신호 성분과 소신호 성분으로 분해하였다.

$$\begin{aligned} i_{gov} &= \bar{i} + \tilde{i}, & (\bar{i}, \bar{\omega}: \text{대신호 성분}, \tilde{i}, \tilde{\omega}: \text{소신호 성분}) \\ \omega_{rm} &= \bar{\omega} + \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4)$$

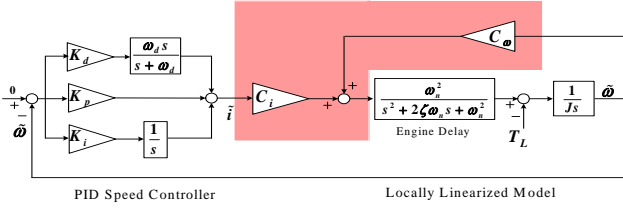


그림 6 선형화된 엔진 모델을 이용한 속도 제어 시스템  
Fig. 6 Speed controller with locally linearized model

식 (4)을 식 (3)에 대입한 후 2차 이상의 고차 소신호 성분을 제외하고 정리 하면 다음과 같이 식(5)와 같이 운전 점에서의 토크를 조속기 전류와 운전 속도에 대해 1차식의 관계로 표현할 수 있다.

$$T_e = C_i \tilde{i} + C_\omega \tilde{\omega} \quad (5)$$

이때

$$C_i = p_{11}\bar{\omega}^6 + p_{21}\bar{\omega}^5 + p_{31}\bar{\omega}^4 + p_{41}\bar{\omega}^3 + p_{51}\bar{\omega}^2 + p_{61}\bar{\omega} + p_{71}$$

$$C_\omega = 6\bar{\omega}^5(p_{11}i_{gov} + p_{12}) + 5\bar{\omega}^4(p_{21}i_{gov} + p_{22}) + 4\bar{\omega}^3(p_{31}i_{gov} + p_{32}) + 3\bar{\omega}^2(p_{41}i_{gov} + p_{42}) + 2\bar{\omega}(p_{51}i_{gov} + p_{52}) + (p_{61}i_{gov} + p_{62})$$

이다. 식 (5)를 이용하여 전체 엔진의 속도 제어시스템에 대한 블록선도를 나타내면 그림 6과 같다. 이때 전체 페루프 시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{z_2 s^2 + z_1 s + z_0}{p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0} \quad (6)$$

이때

$$z_2 = C_i \omega_n^2 (K_d \omega_d + K_p), \quad z_1 = C_i \omega_n^2 (K_p \omega_d + K_i), \quad z_0 = C_i \omega_n^2 K_i \omega_d,$$

$$p_5 = J, \quad p_4 = J(\omega_d + 2\zeta\omega_n), \quad p_3 = J\omega_n(2\zeta\omega_d + \omega_n),$$

$$p_2 = \omega_n^2 (J\omega_d - C_\omega + C_i K_d \omega_d + C_i K_p), \quad p_1 = \omega_n^2 (C_i K_p \omega_d - C_\omega \omega_d + C_i K_i),$$

$$p_0 = C_i \omega_n^2 K_i \omega_d$$

이다. 식 (6)을 이용하여 그림 4에 나타난 운전조건에 대해 pole-zero plot을 그려 보면 그림 7과 같다. 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 속도 지령이 1600r/min 인 경우 식 (6)의 극점이 모두 라플라스(Laplace) 평면상의 좌반 평면상에 위치 하지만 속도 지령이 1300r/min인 경우 극점이 우반 평면상에 위치하여 속도 제어가 불안정해지는 것을 알 수 있다. 따라서 디젤 엔진의 비선형 토크 특성을 포함하여 속도 제어 특성을 해석 하면 실제 실험에서 발생하는 운전 점에 따라 속도 제어 안정도가 달라지는 현상에 대한 해석이 가능 하다는 것을 보여준다. 제한한 선형화된 모델을 이용하여 근 궤적(Root locus) 등의 방법을 이용하여 속도 제어가 이득을 설정하면 각 운전 점에서의 안정한 이득을 설정할 수 있고 본 논문에서는  $K_p = 4, K_i = 0.8, K_d = 0.3$ 의 이득을 설정하여 다음 그림 8과 같이 전 운전 속도 영역에서 라플라스(Laplace) 평면상의 좌반 평면에 근들이 위치하게 할 수 있었으며, 이 이득 값을 이용하여 그림 9에서 볼 수 있는 것과 같이 실제 엔진의 속도 제어 실험을 통하여 선형화된 모델링의 유효성을 검증하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 디젤 엔진의 비선형적인 토크 특성을 실제 측정하여 참조표의 형태로 구하고 이를 각각의 운전 점에 대해 선형화하여 디젤 엔진의 속도 제어 시스템의 해석을 위한 모델을 제안하였다. 또한 제한한 선형화된 모델을 이용하여 디젤 엔진의 속도 제어에 있어서 발생하는 안정도 문제를 분석하고 PID 형태의 속도 제어가 이득을 선정하여 실제 실험을 통해 선정된 제어가 이득 및 모델의 유효성을 검증하였다.

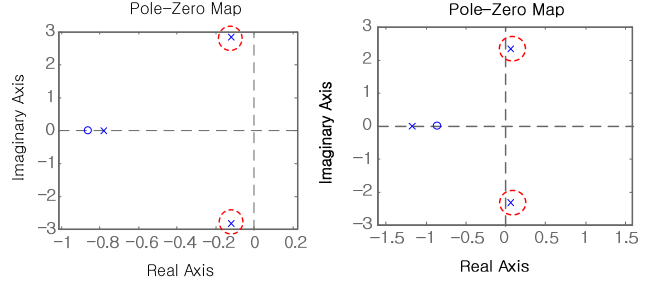


그림 7  $K_p = 1, K_i = 0.8, K_d = 0.08$  인 경우 식(6)의 극점 영점 배치도 (a)  $\omega_{ref} = 1600$ r/min (b)  $\omega_{ref} = 1300$ r/min

Fig. 7 Pole-zero plot of eq.(6) for  $K_p = 1, K_i = 0.8, K_d = 0.08$  (a)  $\omega_{ref} = 1600$ r/min (b)  $\omega_{ref} = 1300$ r/min

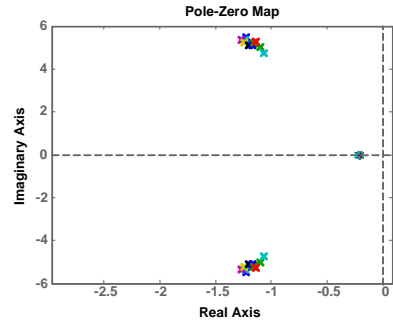


그림 8  $K_p = 4, K_i = 0.8, K_d = 0.3$  인 경우 공회전으로부터 정격 속도까지 속도 조건에 따른 식(6)의 극점 영점 배치도  
Fig. 8 Pole zero plot of eq.(6) for various speed condition and  $K_p = 4, K_i = 0.8, K_d = 0.3$

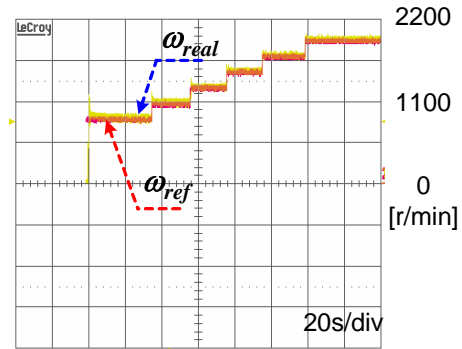


그림 9  $K_p = 4, K_i = 0.8, K_d = 0.3$  인 경우 전 운전 영역에서의 속도 응답 특성  
Fig. 9 Speed response of diesel engine for the whole operating range and  $K_p = 4, K_i = 0.8, K_d = 0.3$

#### 참고 문헌

- [1] Bo Kuang, Youyi Wang, and Yoke Lin Tan, "An H $\infty$  Controller Design for Diesel Engine Systems", Int'l Conf. on Power System Technology, vol 1, pp 61-66, Dec. 2000.
- [2] Jiang. J, "Optimal Gain Scheduling Controller for a Diesel Engine", IEEE Control Systems Magazine, vol. 14, pp.42-48, Aug.1994.
- [3] D.J. McGowan, D.J.Morrow, and M.McArdle, "A Digital PID Speed Controller for A Diesel Generating Set", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol.3, pp.1472-1477, Jul.2003.