

슬라이딩 모드 제어를 이용한 디젤엔진-발전기의 가변속 제어

최익찬, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Variable Speed Operation of Diesel Engine-Generator based on Sliding Mode Control

Ik Chan Choi and Dong Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문에서는 슬라이딩모드 제어이론을 이용한 디젤엔진 발전기의 가변속 제어기법을 제시한다. 부하의 변동에 대해 최적효율 운전점으로 동작시키기 위해 가변속이 필요하며 이를 위해 슬라이딩모드 속도제어기를 설계한다. 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 검증한다.

1. 서론

최근 마이크로그리드의 주요 에너지 공급원이나 비상 발전기 용도로 디젤 엔진 발전기의 사용이 증가하고 있다. 이러한 디젤엔진 발전기는 정속도 운전시 경부하에서 효율이 좋지 않아 이를 회피하기 위해 가변속 운전을 한다.

엔진의 속도제어에 일반적으로 선형 제어기를 사용하는데 비선형 시스템인 디젤 엔진의 안정적인 속도제어를 위해서는 동작점마다 안정도 판별을 통해 제어기 이득을 구해야 하는 번거로움이 있다. 또한, 외란이 인가될 경우 성능이 저하되는 단점이 있다.

본 연구에서는 엔진 발전기의 속도제어를 위해 4차의 모델을 구하고, 슬라이딩 모드이론을 적용하여 제어기를 설계한다. 제안하는 엔진의 속도제어 기법을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 디젤 엔진 실험 데이터

2.1 엔진 모델링

그림 1은 [1]에 제시된 26 [kW]의 엔진 특성을 보간법을 이용하여 3 [kW]로 축소한 엔진 특성을 나타낸다. X축은 조속기 전류, Y축은 엔진 속도, Z축은 엔진 토크를 나타낸다. 커브피팅 기법을 이용하면 엔진의 토크를 조속기 전류와 엔진 속도의 함수로 다음과 같은 4차 다항식으로 표현할 수 있다.

$$T_m = h_1(i)\omega^4 + h_2(i)\omega^3 + h_3(i)\omega^2 + h_4(i)\omega + h_5(i) \quad (1)$$

여기서, T_m 는 엔진 토크, h_i 는 조속기 전류에 대한 함수($i=1\sim 6$), ω 는 엔진 속도를 나타낸다.

2.2 최적 운전점

디젤엔진의 운전시 최적의 연료효율을 얻기 위해, 그림 2에 보이는 엔진의 최적운전점에 대한 정보가 필요하다. 최적운전 속도는 엔진의 출력에 따라 변화하며, SFC(specific fuel consumption) 맵을 이용하여 엔진의 최적운전점을 구할 수 있

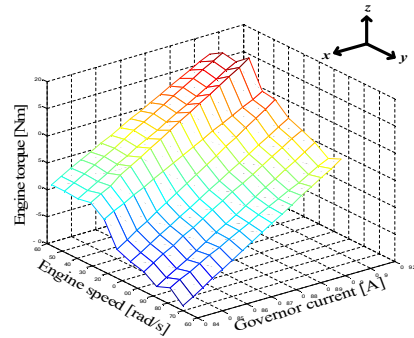


그림 1 디젤 엔진 특성

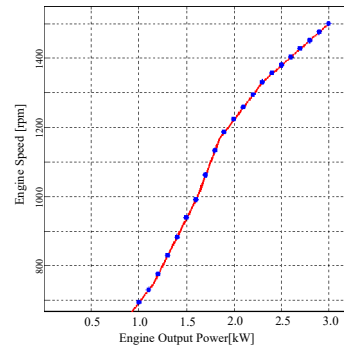


그림 2 디젤 엔진 최적 운전점

다.^[1]

3. 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드 제어는 비선형 제어 방법 중 하나로, 모델링 오차와 외란에 강인한 제어 특성을 가진다.^[2]

3.1 변수 설정

우선, 속도제어를 위한 변수를 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{cases} x_1 = \omega^{ref} - \omega \\ x_2 = \int_0^t x_1 dt \end{cases} \quad (2)$$

여기서, x_1 는 속도의 오차, x_2 는 속도 오차의 적분이다.

다음, 슬라이딩 평면을 식 (2)와 같이 선정한다.

$$s = c_1 x_1^2 + c_2 x_1 + c_3 x_2 \quad (3)$$

여기서, c_1, c_2, c_3 는 양수이다.

초기 위치에서 슬라이딩 평면으로 이동하기 위한 도달조건을 다음과 같이 선정한다.

$$\dot{s} = -\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) - ks \quad (4)$$

여기서, ϵ , k 는 양수이며, α 는 0과 1사이의 값이다. $\text{sgn}(s)$ 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ -1 & (s < 0) \end{cases} \quad (5)$$

3.2 슬라이딩 모드 제어 입력

엔진의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum_{n=1}^5 (h_{n2} \omega^{n-1}) + i \sum_{n=1}^5 (h_{n1} \omega^{n-1}) - T_L \quad (6)$$

여기서, J 는 엔진 관성 모멘트, T_L 은 부하 토크를 나타낸다.

먼저, 식 (3)의 슬라이딩 평면의 미분과 도달 법칙을 같게 두면,

$$\dot{s} = 2c_1 x_1 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_1 + c_3 x_1 = -\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) - ks \quad (7)$$

식 (7)을 속도의 미분항에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = -\frac{d\omega}{dt} = \frac{-\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) - ks - c_3 x_1}{(2c_1 x_1 + c_2)} \quad (8)$$

식 (6)을 식 (8)에 대입하면, 슬라이딩 모드 제어기의 출력인 조속기 전류는 식 (9)와 같이 도출된다.

$$i = \frac{J(\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) + ks + c_3 x_1)}{(2c_1 x_1 + c_2) \sum_{n=1}^5 h_{n1} \omega^{n-1}} + \frac{T_L}{\sum_{n=1}^5 h_{n1} \omega^{n-1}} - \frac{\sum_{n=1}^5 h_{n2} \omega^{n-1}}{\sum_{n=1}^5 h_{n1} \omega^{n-1}} \quad (9)$$

3.3 슬라이딩 평면 존재조건

다음과 같이 리아프노프 함수를 이용하여 슬라이딩 평면의 존재조건을 확인한다.

$$\begin{aligned} W &= s \cdot \dot{s} \\ &= s \cdot (-\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) - ks) \\ &= -\epsilon |s|^\alpha \|s\| - ks^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, k , ϵ 가 양의 값을 가질 경우, 식 (10)은 항상 음의 값을 가지므로 슬라이딩 평면 존재 조건이 만족된다.

4. 시뮬레이션 결과

디젤 엔진 발전기의 특성은 M G 세트에 의해 모의된다. 엔진 시뮬레이터로 토크제어 모드의 유도전동기가 사용되며 발전기는 영구자석형 동기가 사용된다. 용량은 3 [kW]이며, 정격속도는 1500 [rpm]이다. 성능 비교를 위해 적용된 PID제어기가 근래적을 이용하여 설계된다.^[1]

그림 3은 부하전력이 1.05 [kW]에서 1.4 [kW]로 소폭 증가될 경우, 엔진 속도 및 직류링크 전압 제어 특성을 보인다. SMC와 PID제어 두 경우에 속도제어 성능에 큰 차이가 없다. 그러나, 부하전력을 1.05 [kW]에서 2.45 [kW]로 크게 증가시킬 경우 SMC 제어기가 우수하다(그림 4). 비선형 시스템을 선형화하여 이득을 구한 PID제어의 경우 동작점 부근에서만 잘 동작함을 알 수 있다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 제어기 이득

제어기	파라미터
PID (k_p , k_i , k_d)	0.000245, 0.004, 0.0000015
슬라이딩 평면 (c_1 , c_2 , c_3)	0.01, 2.25, 40
도달 법칙 (ϵ , a , k)	2, 0.4, 207.5

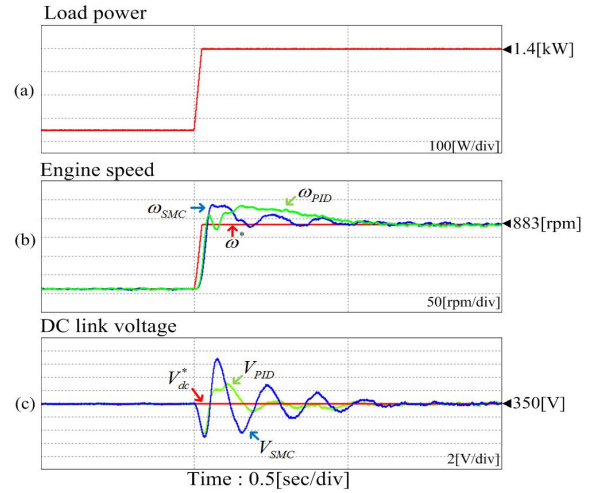


그림 3. 부하 변동이 작을 경우 (350W), 직류링크 전압 및 엔진 속도 제어 특성

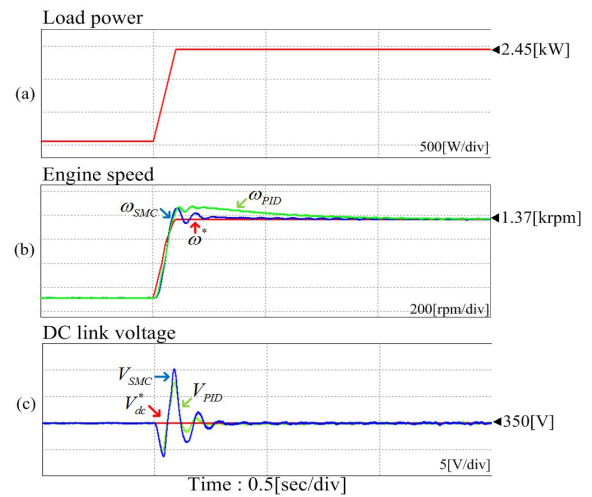


그림 4. 부하 변동이 큰 경우 (1.4kW), 직류링크 전압 및 엔진 속도 제어 특성

5. 결론

본 논문은 비선형성을 가지는 엔진 속도제어 시스템에 슬라이딩 이론을 적용한 제어 알고리즘을 제안하였다. PID제어기와 비교하여 슬라이딩 모드 제어를 적용한 경우, 속도 제어 응답성이 개선됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

이 논문은 2014년 정부(미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF 2014R1A2A1A11052748)

참고 문헌

- [1] S. H. Lee, "Design of speed controller for efficiency improvement of a diesel engine generator", M.A. thesis, Seoul National University, Seoul, 2008.
- [2] Y. Yuan, M. Zhang, Y. Chen and X. Mao, "Multi sliding surface control for the speed regulation system of ship diesel engines". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 0142331216649022.