

엔진-발전기 시스템 모델링 및 제어특성에 관한 실험적 연구

송승호^{*1)} · 정세종¹⁾ · 오정훈¹⁾ · 함윤영²⁾ · 최용각³⁾ · 이광희³⁾

전북대학교 전자정보공학부¹⁾ · 우석대학교 자동차공학과²⁾ · 현대자동차³⁾

An Experimental Study upon Modeling and Control of Coupled Engine and Generator System

Seung-ho Song^{*1)} · Sejong Jeong¹⁾ · Jeonghun Oh¹⁾ · Yunyoung Ham²⁾ · Yongkak Choi³⁾ · Kwanghee Lee³⁾

¹⁾Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Woosuk University, Chonbuk 565-701, Korea

³⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Changduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi-do 445-850, Korea

(Received 28 March 2003 / Accepted 31 July 2003)

Abstract : Modeling of engine-generator system and its control responses are investigated using high performance generator controller. The nonlinear engine is modeled using mean torque production model based on experimental engine map. In case of diesel engine, the amount of injected fuel is decided by engine controller depending on the APS(Acceleration Position Sensor) value. An electromechanical generator model contains electrical circuits and moment of inertia. The generator controller maximizes the performance of generator using decoupling and linearized current feedback control. The generator control system consists of 3-phase IGBT inverter and controller board based on 32 bit floating point DSP. Field oriented control algorithm with digital current feedback control at 10kHz sampling enabled high performance torque and speed control of induction machine. Not only the steady state but also the transient state responses can be evaluated through a batch test of the engine generator system. Developed engine and generator modeling and control can be utilized in various applications such as Series Hybrid Electric Vehicle(SHEV), engine-generator for emergency, and other hybrid generation systems.

Key words : Series hybrid electric vehicle(SHEV : 직렬형 하이브리드 자동차), Diesel engine modeling(디젤 엔진 모델링), Induction generator modeling(유도 발전기 모델링)

1. 서론

하이브리드 전기자동차(HEV)는 연료를 사용하여 동력을 얻는 엔진과 전기로 구동시키는 전기모터를 효율적으로 조합해서 동작시키는 시스템으로, 배출가스 저감, 연비향상, 기존 내연기관차량과 동등한 주행거리, 부가적 충전 및 기반시설이 불필요한 장점들이 있다. HEV 동력시스템은 직렬방식과

병렬방식이 있는데, 직렬방식의 HEV에서는 전동기만에 의해 차량주행이 이루어지며, 이에 필요한 전기에너지는 엔진-발전기, 배터리 시스템에 의해 제공된다. 엔진-발전기 유닛은 엔진을 제어하는 ECU, 발전기를 제어하는 GCU와 함께 보조동력장치(APU)라 하며 차량에 필요한 요구동력에 따라 전기에너지를 발생시키는 기능을 하고, 고효율로 작동하도록 속도와 토크를 제어하는 것이 중요하다. 직렬형 HEV에서 기존의 보조동력장치는 효율은 높지

*To whom correspondence should be addressed.
songsh@moak.chonbuk.ac.kr

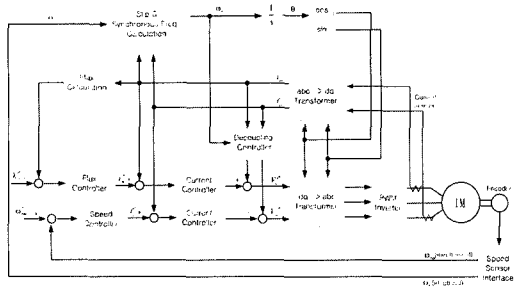


Fig. 3 Field oriented control algorithm of induction machine

존재하도록 제어하는 것이다. 회전자 자속이 d-축에 만 있다고 가정하면 유도기 토크는 식 (2)과 같이 표현된다. 여기서 토크분 전류, i_{qs}^e 의 (-) 값은 발전 모드를 의미한다. 회전자 자속, λ_{dr}^e 이 일정하다면, 토크는 i_{qs}^e 와 비례하게 된다. 동기주파수, ω_e 의 계산은 전류로부터 슬립을 계산함으로써 식 (3)으로부터 얻어진다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (2)$$

$$\omega_e - \omega_r = \omega_{sl} = -\frac{r_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} = -\frac{r_r}{L_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \quad (3)$$

회전자의 쇠교자속(flux linkage)의 위치는 엔코더에서 측정된 실제 전동기 속도, ω_r 과 식(3)에서 계산된 슬립식을 더한 후 적분하여 식 (4)와 같이 구한다.

$$\theta_e = \int_0^t (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad (4)$$

3. 엔진-발전기 시스템의 제어

3.1 실험장치 구성

엔진-발전기 시스템은 1.5L 디젤엔진과 정격 출력 30kW인 유도 발전기가 직접 연결된 시스템이다. 시스템의 구성은 Fig. 4와 같다. 교류/직류 변환을 위해 37kW 용량의 CRPWM IGBT 인버터가 사용되었으며, 그 제어원은 Table 1과 같다. 제어기는 여러 개의 I/O 채널을 갖는 DSP33 보드로 구성되며, 제어원은 Table 2와 같다. 실험에 사용된 양방향 DC 전원공급기는 발전기에서 생산된 전력을 3상 전원측으로 회생하는 역할을 수행하며 그 내부는 70kW급 IGBT

인버터로 구성되어 있다. 발전기 속도를 감지하기 위해서 256 PPR 엔코더를 사용하였다. 발전기 제어 시스템은 ECU에 가속페달센서(APS) reference 신호를, 인버터에 게이팅 신호를 각각 출력한다. 엔진-발전기 테스트 베드와 발전기 제어 시스템 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

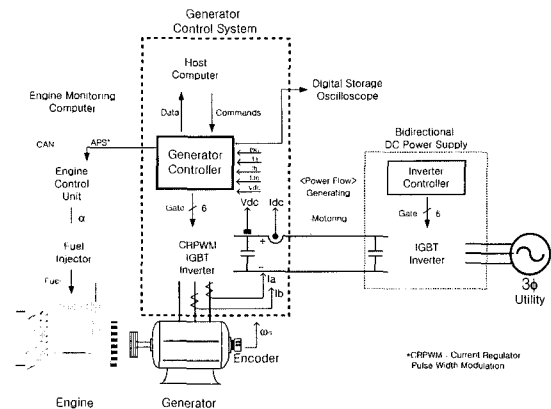
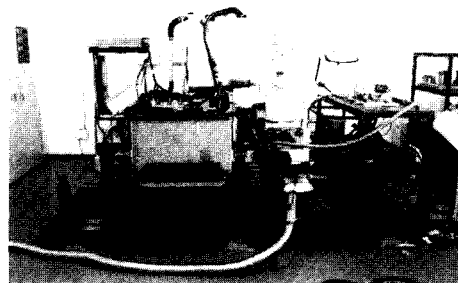
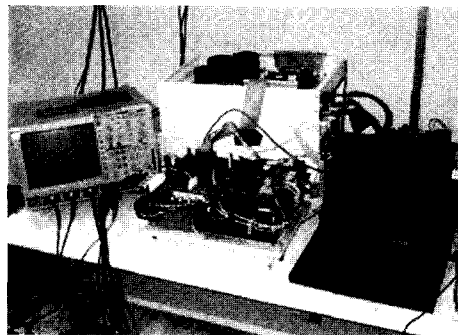


Fig. 4 Test bed and schematic of engine-generator control system



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Picture of engine-generator test bed, (b) Picture of generator control system

Table 1 Inverter specification⁸⁾

Model name	ITPS037-4
Power	37kW
Switching freq.	IGBT 5kHz
Max. dc voltage	780V
Max. ac voltage	484Vrms
Sensors	Hall effect CT 3EA DC voltage sensor 1EA
Protection function	Arm short protection Soft turn off Fuse open protection Fault output latch

Table 2 Generator controller board specification⁹⁾

CPU	TMS320VC33 (32bit floating point DSP)
Memory	SRAM : 1MByte Flash : 2MByte
A/D	12/14 bit 8CH
D/A	12bit 4CH
I/O	Digital input : 10CH isolated Digital output : 11CH isolated
Encoder interface	A, B, Z 2set Max 50kHz +5~24V
Gate pulse	Space vector PWM 2set

3.2 무부하 모터링 시험

유도기 자체는 엔진과 연결되지 않은 상태에서 발전기 제어 시스템에 의해 모터로써 구동될 수 있다. 무부하 모터링 시험을 통해 가감속 주행조건에서 유도기 관련 파라미터와 센서, 그리고 PWM 회로의 특성에 대한 보다 정확한 조정 및 벡터제어 성능을 시험할 수 있다.

3.2.1 전압/주파수 비(V/F ratio) 일정 시험

전압 지령값을 임의대로 설정하여 PWM을 발생하고 전류와 속도를 관찰하였다. Fig. 6은 상전압 피크값 108 V, 주파수 120 Hz, 회전속도 2400 rpm 조건에서 시험한 결과이다. 위에서부터 상전압 기준값, 상전류 샘플링 값, 전동기 회전속도, 상전류 실제값을 나타낸다. Fig. 6(a)의 점선 영역은 Fig. 6(b)에 확대하여 나타내었다. 상전압 기준값과 상전류값은 90°위상차를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, 전압벡터와 전류벡터가 직각을 이루고 있으므로 무부하 상태임을 의미한다. 상전류 피드백 값은 안정적이며 거의 정현파 형태를 나타내고 있다. 또한 전류 3주기당 한 주기씩 속도 리플이 나타나고 있으며 피

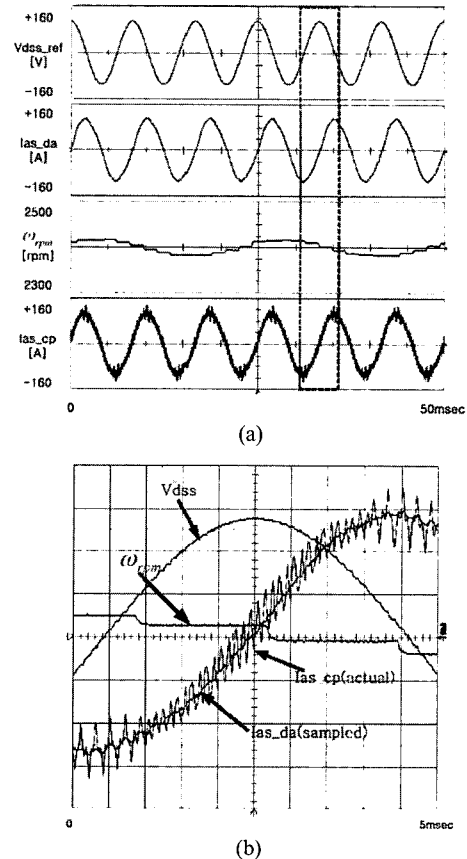


Fig. 6 Generator variables during constant V/F mode without load. (a) Phase voltage ref. sampled phase current, measured speed, and actual phase current. (b) enlarged graph of (a) with same y-axis scale in single grid

크값은 약 20 rpm에 이른다.

이러한 속도오차는 벡터제어시 전원 주파수 계산에 악영향을 미칠 수 있으며 속도 피드백 제어시 속도제어계에 특정 주파수 리플을 인가하여 발전기 토크가 맥동하는 원인이 된다.

3.2.2 속도제어 성능

Fig. 7은 무부하 상태에서 속도 스텝 응답을 나타낸 것이다. 토크분 전류 I_{qse} 가 변화하는 동안 여자분 전류 I_{dse} 가 일정함을 볼 수 있으며 가속구간에서 약 0.2초 후에 400rpm에서 2000 rpm으로 속도가 증가하고 정상상태오차 없이 가속이 끝나며 잘 제어되고 있으나 고속 영역에서 약간의 리플이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 리플 주파수는 기계가

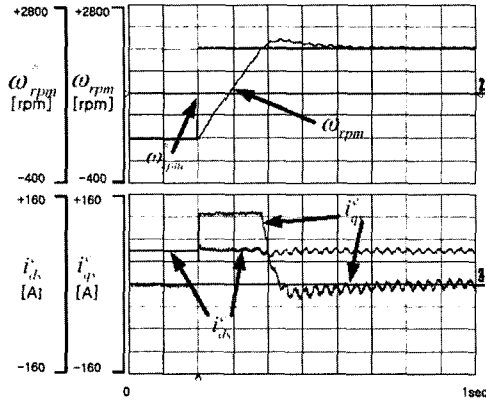


Fig. 7 Speed step response of induction machine with decoupling torque (i_{qs}^e) and flux (i_{ds}^e) control

한번 회전마다 나타나는 리플이다.

3.3 엔진-발전기 시스템의 제어

3.3.1 발전기 제어 전략

APU 발전기 제어는 transient 동력계의 부하 제어와 동일하다. Fig. 8은 엔진-발전기 결합 부하 시험을 위한 제어 블록도이다. APU 제어기에서 엔진 제어를 위한 가속페달센서 지령값과 발전기 속도 또는 토크 지령값을 출력하는 구조로 되어 있다. 제어 모드에는 발전기(부하)를 속도 일정 모드 또는 토크 일정 모드로 운전할 수 있도록 제어 모드 선택 스위치가 S/W적으로 준비되어 있으며 제어 전략에 따라 가감속시에는 속도모드로 정상운전시에는 토크 모드(파워 모드)로 동작한다.

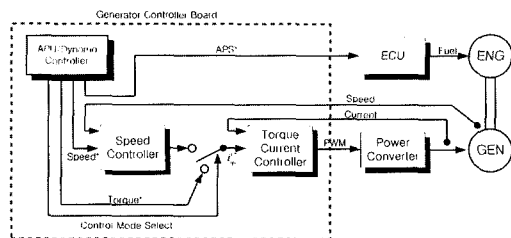


Fig. 8 Generator control strategy

3.3.2 발전기의 토크 제어 모드 작동

Fig. 9는 일정 속도 발전기 토크 제어 모드로 들어간 상태에서 토크분 전류 i_{qs}^e 를 0으로 전환한 후 속도가 증가하여 2750 rpm이 되면 다시 발전하여 토크

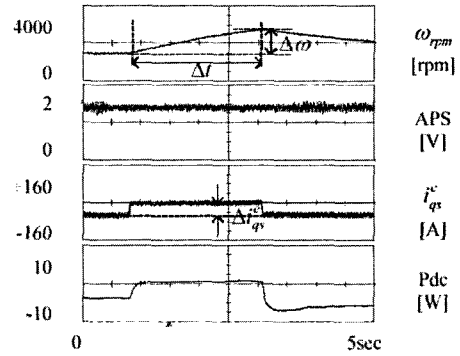


Fig. 9 Response of engine-generator system during step removal of the generator load torque using decoupled torque control mode

제어 모드로 들어가는 알고리즘으로 발전기 토크 스텝 응답을 볼 수 있다. 가속페달신호(APS)가 1.6V로 일정하고, 토크전류(-)는 발전을 의미)가 2.2초 동안 갑자기 제거되었을 때 시스템의 속도는 선형적으로 증가한다. 토크 제어 모드 작동을 통해, 엔진 토크가 일정하게 유지되는 경우 시스템 관성을 계산할 수 있다. 위 실험을 통하여 얻어낸 파형에서 시스템의 관성 모멘트는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$J_{total} = K \Delta i_{qs}^e \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \quad (4)$$

여기서 $\Delta \omega = 1500 \text{ rpm}$, $\Delta t = 2.3 \text{ sec}$, $i_{qs}^e = 50 \text{ A}$ 이고, K는 식 (1)에서의 토크 상수이다.

3.3.3 발전기의 속도 제어 모드 작동

속도 기준값과 가속페달신호 값(APS)을 임의의 값으로 주고 정상상태에서 발전기의 속도, 토크 및 상전류를 관찰하였다. Fig. 10은 2000 rpm, APS가 1.6V 조건에서 속도 모드 제어 응답을 나타낸다. 발전기 속도를 조정할 때, 토크 전류 리플이 엔진 사이클의 폭발주기 특성에 의해 발생되는데, 그 주파수는 엔진회전수 주파수와 실린더 수의 곱과 일치한다. 발전기의 속도 모드 제어 작동 동안 동적 응답성을 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11은 일정한 APS(1.4 V)동안 발전기 속도 지령값을 2400 rpm에서 2500 rpm으로 스텝 인가할 경우로서, 속도 제어가 비교적 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 일정한 속도(2400 rpm)동안 APS를 1.2 V에서 1.8V로 바꿀 경우 스텝 응답을 나타낸다.

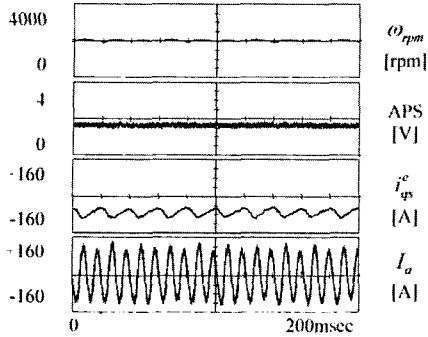


Fig. 10 Steady state of speed control mode during constant APS at 2000 rpm

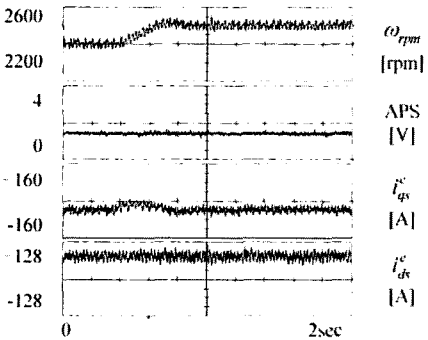


Fig. 11 Generator speed step response

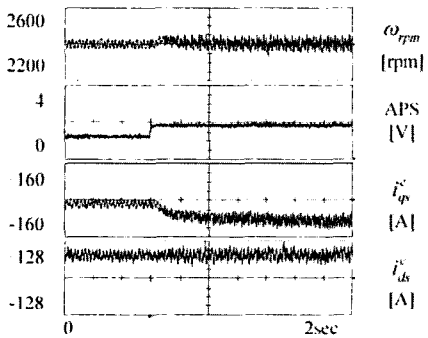
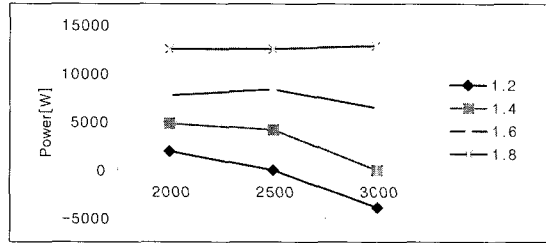
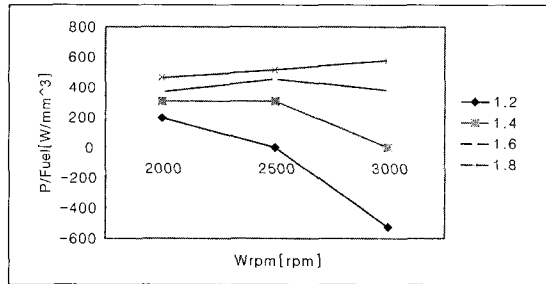


Fig. 12 Engine APS step response

Fig. 13은 APS를 1.2, 1.4, 1.6, 1.8V로 가변하면서, 속도와 APS에 따른 발전량과 발전효율(Power/Fuel)의 변화를 나타낸 것으로 여기서 발전량이 음수인 경우는 발전기가 모터링함을 의미한다. 따라서 발전기가 2500 rpm 이상에서 운전될 경우 APS는 최소 1.2 V 보다 커야 함을 알 수 있다. 시험 영역에서는 APS 값이 클수록 발전효율이 높음을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 13 (a) Generated power and (b) Power efficiency at various speeds according to the APS

4. 결론

본 연구에서는, 직렬형 HEV에 적용되는 디젤엔진과 발전기가 결합된 보조동력장치의 성능 시험을 위한 실험장치를 구성하여, 무부하 모터링 시험 및 엔진-발전기 부하시험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제한된 엔진-발전기 유닛의 모델링과 제어 알고리즘은 정속 및 가감속 조건에서 발전기의 토크 및 속도 제어를 잘 수행하며, 또한 시스템의 고효율 작동조건을 찾는 데 유용하게 사용될 수 있다.
- 2) 발전기의 토크모드 제어에 의해 시스템의 관성모멘트와 같은 시스템 파라미터들을 계산할 수 있다.

제한된 방법은 발전기 속도제어 특성 최적화 및 효율적인 직렬형 HEV의 제어전략 개발에 활용될 수 있다.

References

1) S. Mourad, E. Eijnden, D. Foster, R. Helden, M. Rondel, P. Schmal, "How to Simultaneously Achieve Low Emissions and High

- Efficiency in a Hybrid Powertrain," EVS 18 Berlin, 2001.
- 2) L. M. Tolbert, W. A. Peterson, M. B. Scudiere, C. P. White, T. J. Theiss, J. B. Andriulli, C. W. Ayers, G. Farquharson, G. W. Ott, L. E. Seiber, "Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set," Industry Applications Conference, 2001. Thirty-sixth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2001 IEEE, Vol.12, pp.1763-1768, Vol.3, 2001.
 - 3) M. Nomura, M. Suzuki, M. Hori, "Decoupling Torque Control System for Automotive Engine Tester," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36 Issue.2, pp.467-474, March-April, 2000.
 - 4) G. R. Babbitt, R. L. R. Bonomo, J. J. Moskwa, "Design of an Integrated Control and Data Acquisition System for a High-Bandwidth, Hydrostatic, Transient Engine Dynamometer," Proceedings of the American Control Conference, Vol.2, pp.1157-1161, 1997.
 - 5) J. Zhang, Q. Lu, "Study on the Engine Dynamic Test Bed," Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference, Vol.1 pp.406-409, 1999 (IVEC '99).
 - 6) D. Yanakiev, "Adaptive Control of Diesel Engine-Dynamometer Systems," Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.2, 1998.
 - 7) B. J. Bunker, M. A. Franchek, "Robust Multivariable Control of an Engine-Dynamometer System," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.5, Issue.2, pp.189-199, March 1997.
 - 8) Intech. FA, Technical Reference Manual for Inverter ITPS 037-4, 2001.
 - 9) M.-S. Kwak, Y.-C. Son, S.-K. Sul, "Development of Generator Board for Hybrid Electric Vehicle," Conf. Record of Summer Meeting of Korean Institute of Electrical Engineers, pp.1185-1187, 2001.
 - 10) S.-H. Song, S.-J. Jeong, Y.-Y. Ham, "Modeling and Control of Coupled Engine and Generator System," EVS 19 Busan, 2002.
 - 11) J.-W. Lee, H.-D. Lee, S.-H. Song, "A Control Algorithm for Highly Efficient Operation of Auxiliary Power Unit in Series Hybrid Electric Bus," EVS19 Busan, 2002.
 - 12) D. H. Kim, Y. J. Park, "Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrain and Development of Simulation Program," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.122-129, 2000.