

슈퍼캐패시터와 가변속 엔진발전기를 이용한 독립형 전원 시스템

李濬煥[†], 李承桓*, 薛承基**

An Isolated Power System Based on Variable Speed Engine Generator with Super-capacitor

Joon-Hwan Lee, Seung-Hwan Lee and Seung-Ki Sul

요 약

독립형 전원시스템에서 엔진을 이용한 발전시스템은 지금까지 에너지의 효율적인 측면보다는 설치 단가 및 신뢰성이 중요한 이슈가 되어왔으나, 최근 들어 신뢰성과 함께 에너지의 효율적 사용, 대기 환경 개선 및 발전 전력 품질 등이 점차 중요시 되어가고 있다. 가변속 엔진 발전 시스템의 경우 출력 전력에 대응하여 엔진 속도를 가변함으로써, 경부하시 획기적인 효율 개선이 가능하다. 또한 부하 전압, 주파수는 출력 인버터에 의해 제어 되므로, 그 응답 속도가 빨라 고 품질의 전력을 전원에 공급할 수 있다. 특히 급격한 부하 증가 시 엔진 출력이 늘어나는 시간 동안 부족한 전력을 슈퍼캐패시터로부터 공급받음으로써, 부하 급증 시에도 안정된 전력 공급이 가능하다.

본 논문에서는 소형 디젤 엔진과 슈퍼캐패시터를 이용한 가변속 엔진 발전 시스템의 개념을 설명하고, 가변속 운전의 필요성, 고정 운전속 대비 연비 절감 및 3상 4선식 인버터를 사용한 고품질의 전력 공급 등의 타당성을 모의 실험과 실험을 통하여 검증하도록 한다.

ABSTRACT

The variable speed engine generator set is interested for an isolated power system due to reduced fuel consumption and less emission. However, because of sluggish dynamic behavior of the internal combustion engine the power quality would be degraded during the sudden load power surge, where the power required by the load is not available by the engine due to the reduced engine speed. An isolated power system based on variable speed engine with a super-capacitor bank can improve dynamic characteristics under such a sudden load change, and power quality, fuel consumption, and pollutants can be improved remarkably. Also, it is verified by the computer simulation that the inverter of 3phase-4leg is compatible to the isolated power system with unbalanced load. In this paper, the feasibility of the system has been verified based on a 26kw commercial diesel engine system.

Key Words : Super-Capacitor, Diesel Engine, 3phase-4leg Inverter, Power Control

1. 서 론

독립형 전원시스템에서 엔진을 이용한 발전시스템은 지금까지 에너지의 효율적인 측면보다는 설치 단가 및 신뢰성이 중요한 이슈가 되어왔으나, 최근 들어 신뢰성과 함께 에너지의 효율적 사용, 대기 환경 개선 및 발전 전력 품질 등이 점차 중요시 되어가고 있다. 이는 기존의 일정 속도(Constant Speed)로 회전하는 엔진 시스템에 근거한 발전기의 경우 그 구조는 간단하

[†]교신저자 : 정회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 박사과정

E-mail : micro3m@eepel.snu.ac.kr

*학생회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 석사과정

**정회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 교수

접수일자 : 2007. 12. 18 1차 심사 : 2008. 1. 4

심사완료 : 2008. 2. 22

나, 엔진의 출력에 비해 발전 출력이 적은 영역에서 효율이 급격히 떨어지게 되며, 이에 따라 연비가 나빠지며 단위 출력당 오염도가 증가한다. 또한 상용 전력 계통과 연결 되지 않고 단독으로(Isolated) 운전 되는 엔진-발전기의 경우 급격한 부하 변동에 대해 조속기(Governor)와 전압 조정기(AVR)의 느린 응답으로 인하여 출력 주파수, 전압 등이 변동하는 전력 품질 저하의 문제가 발생하여, 최근 늘어나고 있는 정밀 전자 장비의 오동작을 초래하고 있다.

가변속 엔진 발전 시스템의 경우 출력 전력에 대응하여 엔진 속도를 가변 함으로써, 경 부하 시 획기적인 효율 개선이 가능하다. 또한 부하 전압, 주파수는 출력 인버터에 의해 제어 되므로, 그 응답 속도가 빨라 고품질의 전력을 전원에 공급할 수 있다. 특히 급격한 부하 증가 시 엔진 출력이 늘어나는 시간 동안 부족한 전력을 슈퍼캐패시터로부터 공급받음으로써, 부하 급증 시에도 안정된 전력 공급이 가능하다. 또한 정격 출력 상태에서, 부하에 연결된 전동기의 기동 등으로 인해 초래 되는 순간적인 과부하에 대하여 슈퍼캐패시터의 에너지를 이용함으로써 엔진 발전기의 용량을 정격 부하에 대해 과도하게 설정하지 않더라도 순간 과부하에 대해 충분한 내량을 가질 수 있다.

본 논문에서는 소형 디젤 엔진과 슈퍼캐패시터를 이용한 가변속 엔진 발전 시스템의 개념을 설명하고 가변속 운전의 필요성, 고정 운전속 대비 연비 절감 및 3상 4선식 인버터를 사용한 고품질의 전력 공급 등의 타당성을 모의실험과 실험을 통하여 검증하도록 한다.

2. 본 론

2.1 엔진의 운전 특성

일반적인 디젤 엔진은 그림1과 같이 속도에 따른 기계적 출력과 이에 따른 연비지도(Specific Fuel Consumption Map)를 가지게 된다. 이로부터, 같은 기계적 출력을 얻더라도 엔진의 운전 속도에 따라 연료 소비가 다름을 알 수 있다. 따라서 같은 기계적 출력을 얻더라도 연비가 최소가 되는 점에서 운전하는 것이 주어진 출력 조건에서 단위 연료당 최대의 출력을 얻는 것임을 알 수 있다. 따라서 엔진의 속도를 가변하여 운전영역내의 최대 효율 점에서 운전하는 것은 엔진의 연료 소비 및 오염 물질 배출을 줄일 수 있는 좋은 방법이라 할 수 있다.

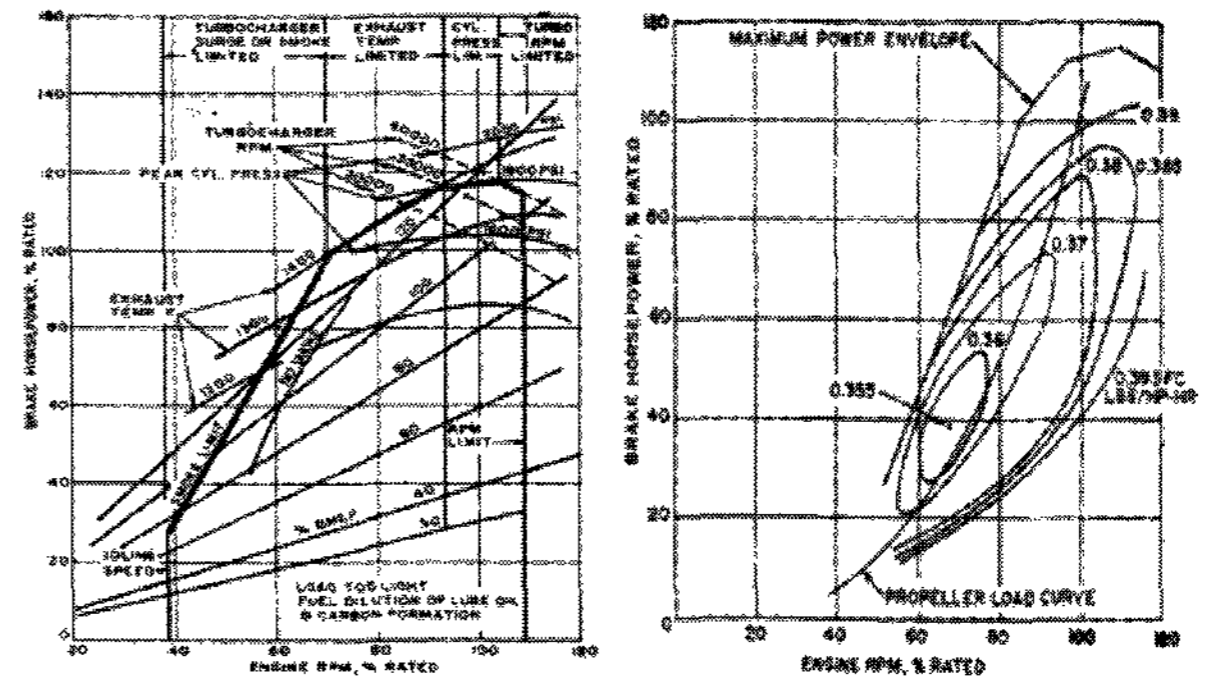


그림 1 엔진 운전 특성 곡선 및 연비 지도
Fig. 1 Engine Characteristics and Specific Fuel Consumption Map

그림2는 기계적 출력대비 본 논문에서 사용한 엔진의 연료 소비량을 실측한 데이터며, 특정 출력을 내는데 있어서, 최대 효율을 가지는 속도가 존재한다는 것을 알 수 있다.

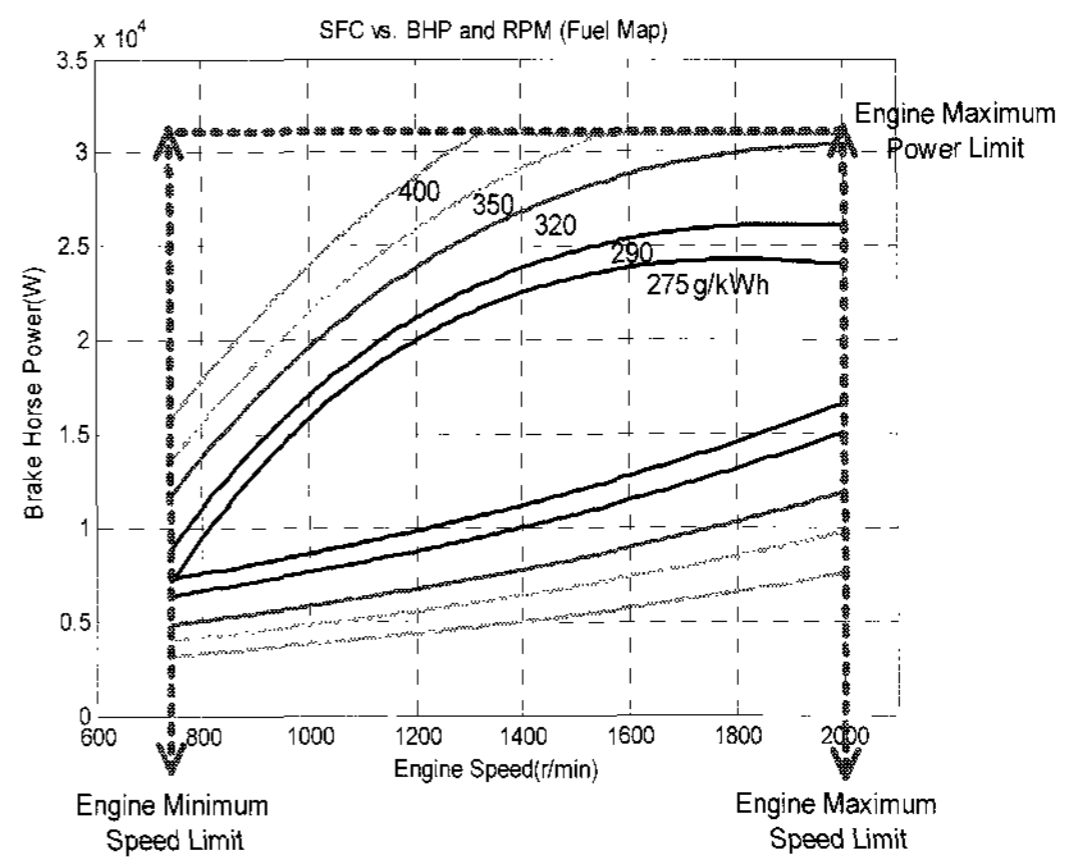


그림 2 연료 소비, 출력, 엔진 속도
Fig. 2 SFC, Power, and Engine Speed

동일 출력에 대한 운전 가능한 속도는 여러 경우가 가능하나 연료를 효율적으로 사용할 수 있는 운전 점은 특정 속도로 정해짐을 알 수 있다. 만약 10kw의 출력을 1시간 동안 내기 위한 운전속도는 1200, 1400, 1750, 2000 r/min이 가능하나 시간당 연료의 소비량은 각각 3.437, 3.625, 4.0, 4.375리터로써 최대 21%이상의 연료 소모량의 차이가 발생하게 된다. 따라서 기존의 일정속도로 운전하는 발전기보다 가변속 운전을 통하여 훨씬 효율적인 운전이 가능할 것이라는 예상을 할 수 있게 된다.

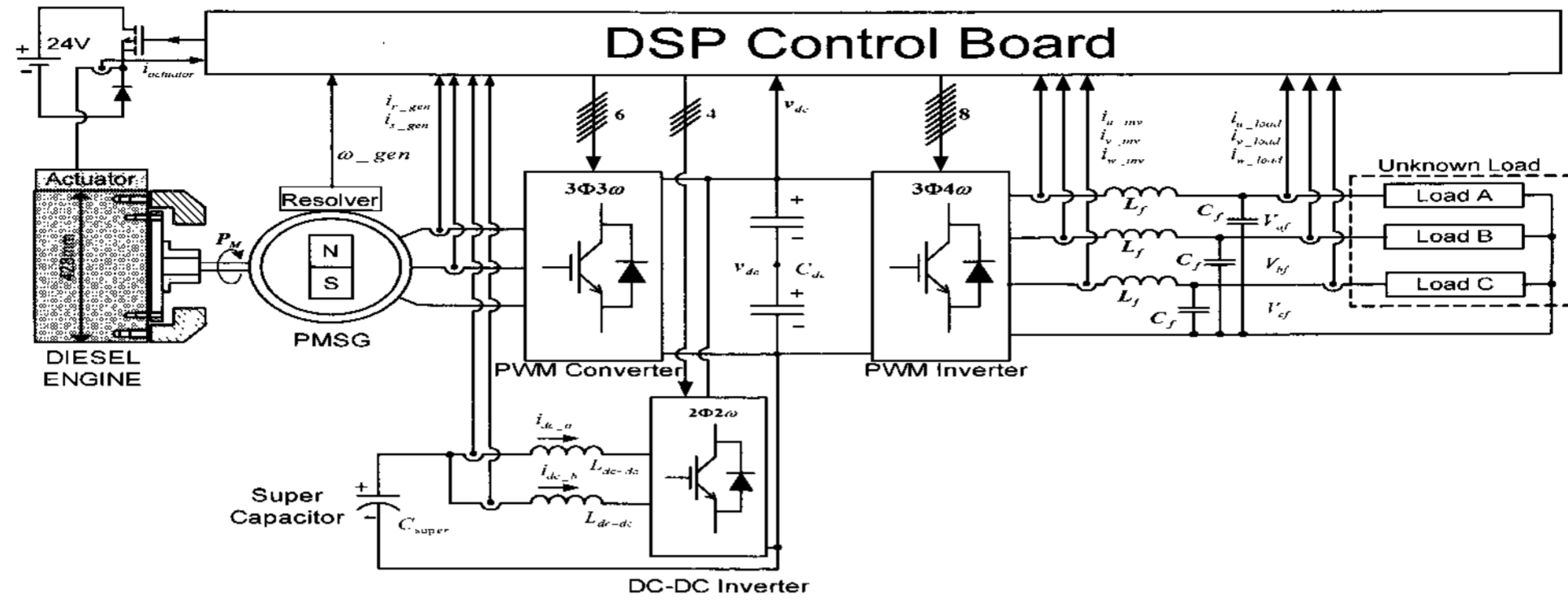


그림 3 전체 시스템 구성도
Fig. 3 A Block Diagram of Overall System

2.2 전체 제어기

그림 3은 전체 시스템의 구성 및 블록 도를 나타내며 직류(DC link)전압은 600V로 고정하였다. 전체 제어기의 블록은 그림 4와 같으며 이는 다음과 같이 구성된다.

- 일정 직류단 전압제어를 위한 PWM 컨버터
 - 순간 부하를 공급하기 위한 DC-DC 컨버터
 - 엔진의 속도를 제어하기 위한 전자식 조속기
 - 필요 전력 공급을 제어하기 위한 전력제어기
- 필요 출력을 공급하기 위하여 엔진 발전기에서 공급하는 에너지는 기계적인 응답으로 수초의 시스템 응답을 갖게 되며 이러한 응답 특성은 부하 급 변동 시 일정 DC전압을 유지할 수 없게 되어 결국 출력 전압의 왜곡등과 같은 전력품질에 문제를 발생시키게 된다.

이러한 엔진 응답의 과도 상태 동안 슈퍼캐패시터에 축적되어 있는 에너지를 순간적으로 공급함으로써 과도 상태 시에 안정적인 에너지 공급이 가능토록 하는 제어기를 그림 4에 나타내고 있다. 그림 4에서 전력 제어기는 부하의 필요 출력 인가 시 이에 따른 엔진의 최적 운전 속도를 결정하여 DC 액추에이터를 조절하여 운전하여 엔진 출력의 조절을 담당하며, 필터링 된 필요 출력(P_{eng}^*)과 슈퍼캐패시터의 에너지를 일정하게 유지하기 위한 출력(P_{need}^*)의 합을 필요 출력에서 차감하면 슈퍼캐패시터에서 과도 상태 시에 공급해야 하는 지령 출력(P_{super}^*)의 값을 얻을 수 있다. 엔진의 출력이 필요 출력을 공급할 수 있는 상태일 경우 슈퍼캐패시터의 출력 지령전력(P_{super}^*)은 0이 된다.

$$P_{super}^* = P_{out}^* - \{LPF(P_{out}^*) + P_{need}^*\} \tag{1}$$

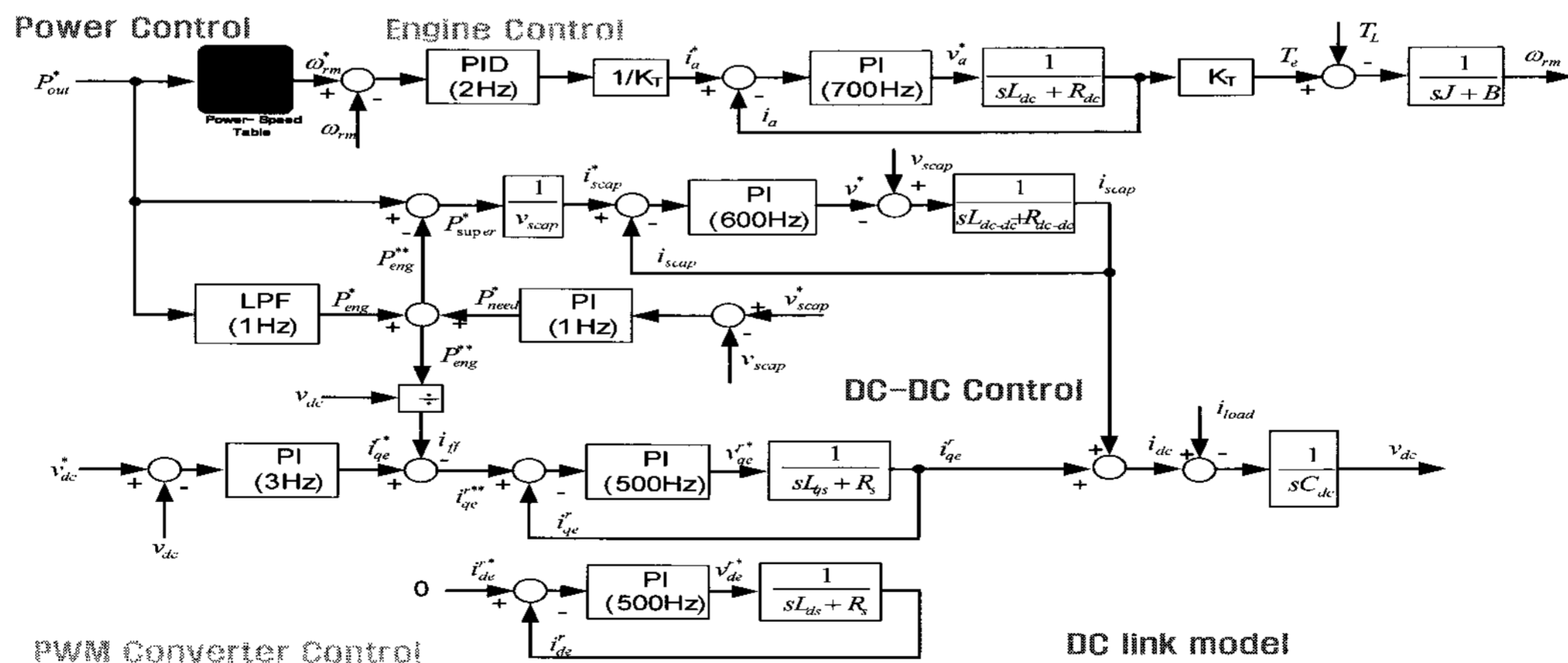


그림 4 전체 제어기 블록도
Fig. 4 A Block Diagram of Overall Control System

그림 5는 전력제어기를 통한 순간 부하시(P_{out}^*)의 엔진의 출력(P_{eng})과 슈퍼캐패시터의 출력(P_{super}) 그리고 슈퍼캐패시터의 전압(V_{scap})으로, 순간 부하 인가 시 엔진의 속도가 부하 양에 따른 최적 운전속도로 변경되는 동안의 각각의 출력을 나타낸다. 엔진의 출력이 부족한 경우 슈퍼캐패시터가 엔진 출력의 부족분을 보상하여 고품질의 전력을 지속적으로 부하에 공급할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 모의 실험결과를 나타내고 있다. 실험에 사용된 슈퍼캐패시터는 개당 350F 130개(개당 2.6V)를 직렬 연결하여 사용하였다.

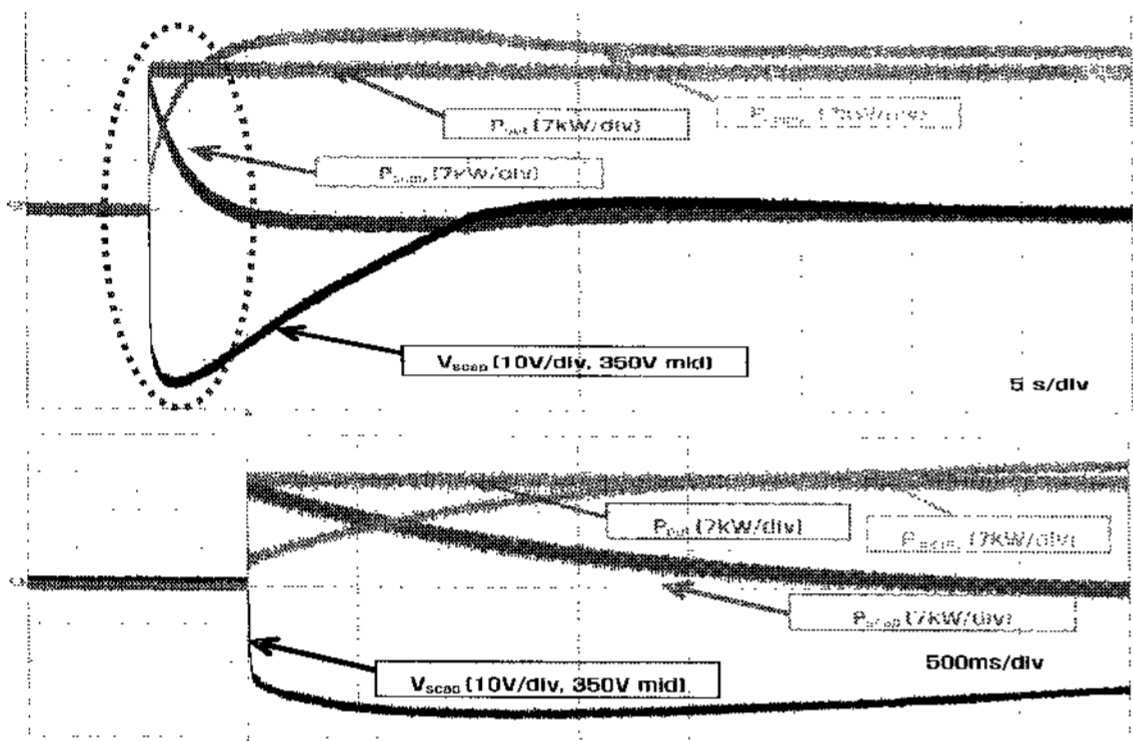


그림 5 전력 제어기 실험 결과(하: 확대파형)
Fig. 5 Experimental Result of Power Control

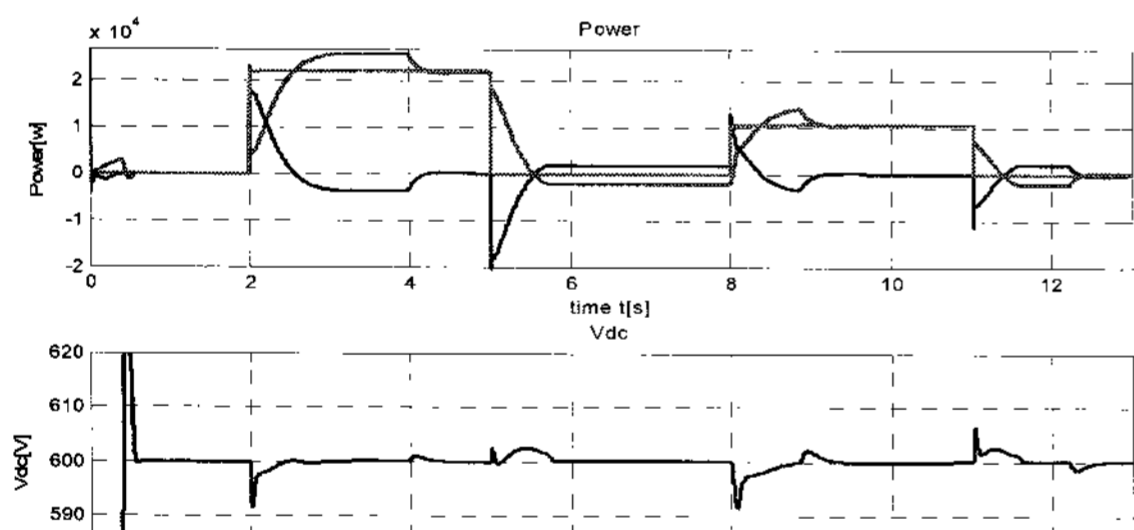


그림 6 전력 제어기 모의실험 결과
Fig. 6 Simulation Result of Power Control

2.3 3상 4레그 인버터

그림 3과 같은 4개의 레그(Leg)로 구성된 인버터는 3개의 선간 출력전압을 독립적으로 합성할 수 있으며, 부하의 중성점 경로로 별도의 레그를 사용하므로 단상 부하를 포함하는 불균형 3상 부하에 의한 영상분 전류를 흡수할 수 있다. 또한, 전압변조능력(V_{dc})이 커지며, 불평형(Unbalanced) 3상 부하에 평형 3상 전압을 공급하는 전력 시스템으로 유용하게 이용될 수 있다^[5]. 3상 4레그 인버터는 3상 교류 부하 시스템이 주요 적용 분야 이므로 각 상 전압을 정지 좌표계에서 독립적

으로 제어 하는 것이 시스템 해석에 유리한 장점이 있다. 인버터의 순시 출력 전압 V_{inv} 는 부하진동억제기(V_{damp})와 부하 외란 제거기($V_{disturb}$)를 통하여 정지좌표계의 상 전압으로 제어한다^[6]. 이때 V_{com} 은 단상 등가 회로로 구성된 인버터의 출력 지령을 나타낸다.

- 부하 진동 억제기(V_{damp}): LC필터에 의해 발생하는 부하 전압 진동을 억제하며 블록 도는 다음과 같다.

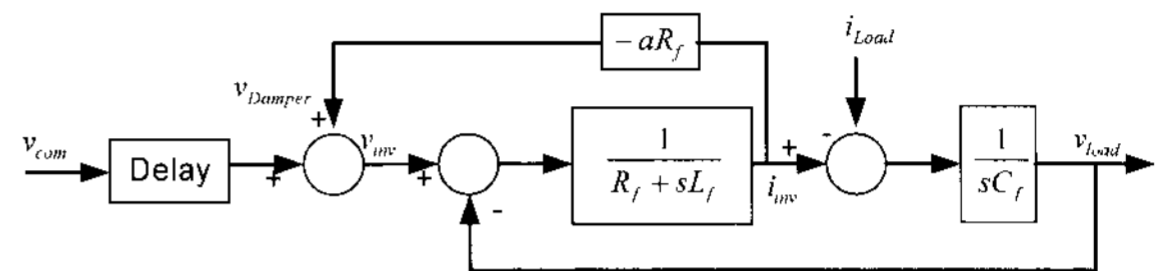


그림 7 부하 진동 억제 제어기
Fig. 7 Control of load variation

진동 억제기(V_{damp})의 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_{Damp} = K_{Damper} \cdot i_{inv} = -aR_f \cdot i_{inv} \quad (2)$$

이상적인 진동억제기는 $-aR_f$ 의 저항이 필터 인덕터와 직렬로 결합된 것처럼 동작한다. 이를 포함한 LC필터의 댐핑(damping)계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V_{load}}{V_{inv}} = \frac{1/L_f C_f}{s^2 + s(R_f + aR_f)/L_f + 1/L_f C_f} = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_c \omega_f s + \omega_f^2} \quad (3)$$

여기서, $\zeta_c = \frac{(R_f + aR_f)}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}$, $\omega_f = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$ 가 된다.

- 부하 외란 제거기($V_{disturb}$):진동 억제기 에서의 전압강하와 필터 인덕터 에서의 전압강하로 인해 전압강하가 발생하게 되며, 이로 인해 부하단 전압이 지령전압의 출력을 따라가지 못하게 되며, 전압 왜곡이 발생하게 되며 이를 보상하기 위한 외란 보상전압은 다음과 같다.

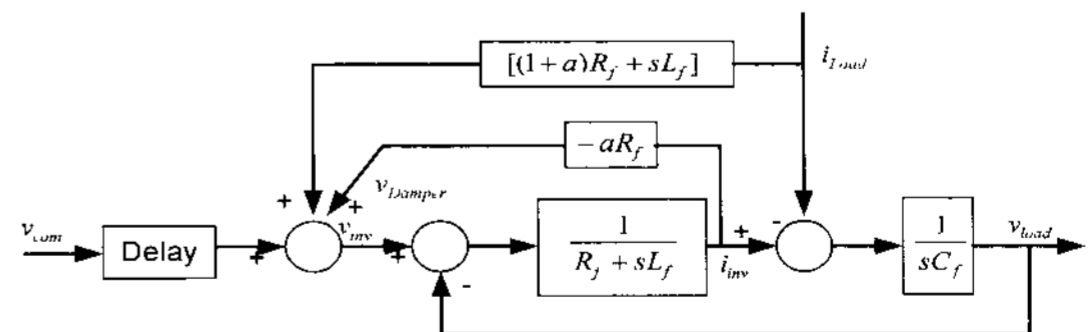


그림 8 부하 외란 억제 제어기
Fig. 8 Control of load disturbance

$$V_{Disturb} = ((1 + a)R_f + sL_f) \cdot i_{Load} \quad (4)$$

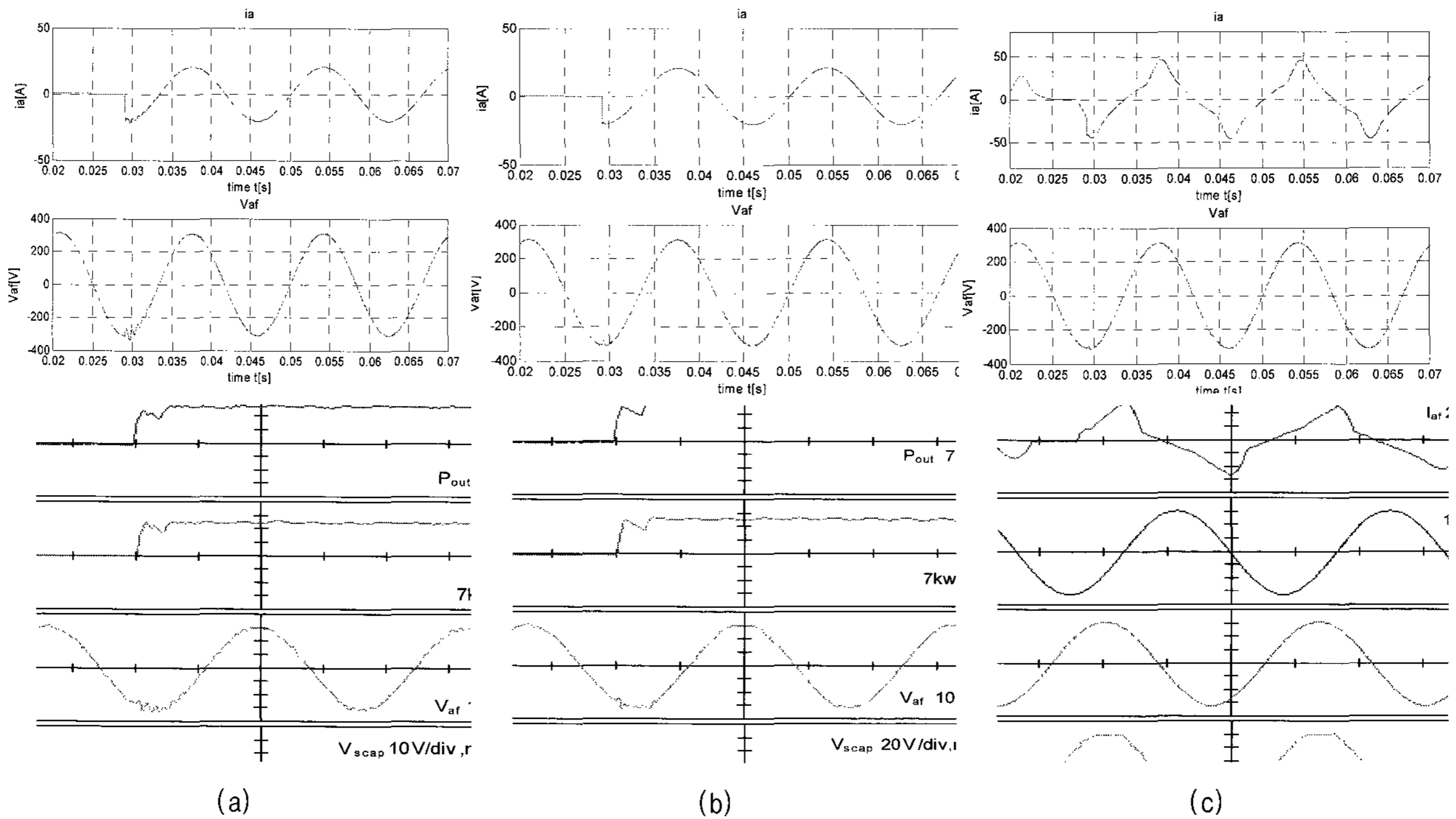


그림 9 (a) 제어를 사용하지 않은 경우 R-L 평형 부하(22kW)
 (b) 제어를 사용한 경우 R-L 평형 부하(22kW)
 (c) 제어를 사용한 경우 비선형(1kW) + R-L 평형 부하(9kW)

Fig. 9 (a) R-L Balanced Load(22kW) without controller
 (b) R-L Balanced Load(22kW) with controller
 (c) R-L Balanced Load(9kW) and Non-linear Load(1kW) with controller

그림 9의 (a)(b)는 약 20kW의 3상 R-L 평형 부하의 인가시, (c)는 단상 비선형 부하 및 3상 R-L 부하(약 9kW)를 연결한 것으로 인버터 출력단의 상전압 및 상전류를 나타낸 모의실험 및 실험 결과를 나타낸 것이다. 3상 불 평형 비선형 부하에서도 상 전압의 왜곡이 적은 것을 확인 할 수 있다.

적인 과부하 및 전압 변동을 최소화하기 위한 것이므로 본 논문에서 22kW와 11kW의 용량에 따른 연비를 측정하였다. 가변속 엔진 발전기의 전원의 용량을 11kW로 할 경우 그림 12와 같이 연간 25%이상의 연비를 저감할 수 있음을 확인 할 수 있고, 동일용량의 부하일 경우에도 약 12%이상의 연비 절감 효과를 얻을 수 있다.

2.4 연비 비교

슈퍼캐패시터와 가변속 엔진을 이용하여 독립형 전원 시스템의 구성시 기존의 고정속도 운전형 발전 시스템 대비 연비의 개선 효과를 알아보기 위해 그림 10과 같은 하루 동안 부하의 패턴을 사용하였다. 시간대별로 최대값이 다른 부하에 대한 연비 개선 효과를 확인하기 위한 것이다. 그림 11의 (a)는 22kW의 부하에 따른 고정속도 엔진 발전기(Constant Speed Diesel Engine)와 가변속 엔진 발전기(Variable Speed Diesel Engine)에 따른 연료 소비량 및 일간 사용량을 기준으로 한 연간 기름 값을 나타내고 있다. 그림 11의 (b)는 동일한 엔진에서 필요 부하의 양이 11kW인 경우를 나타내며, 실질적으로는 고정속 엔진 발전기의 용량은 평균적인 부하용량의 2배 이상을 선택하는데 이는 순간

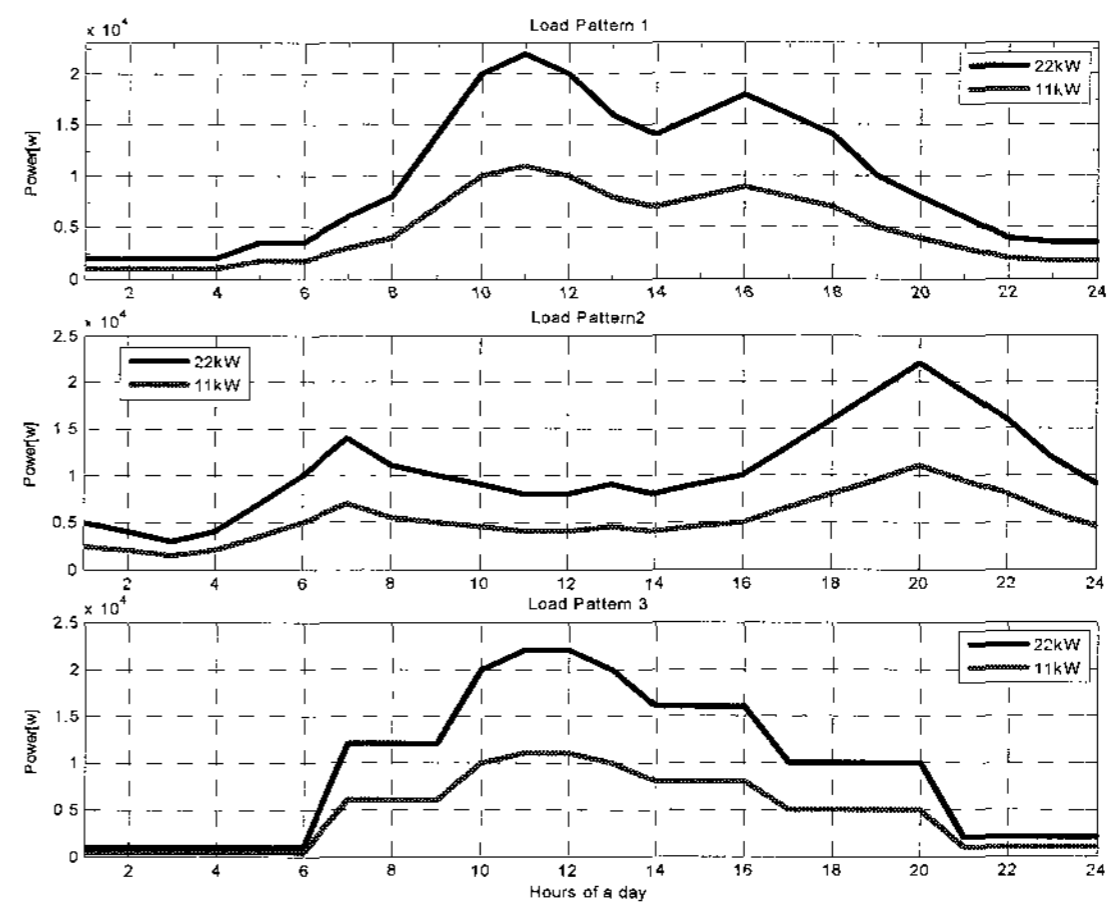
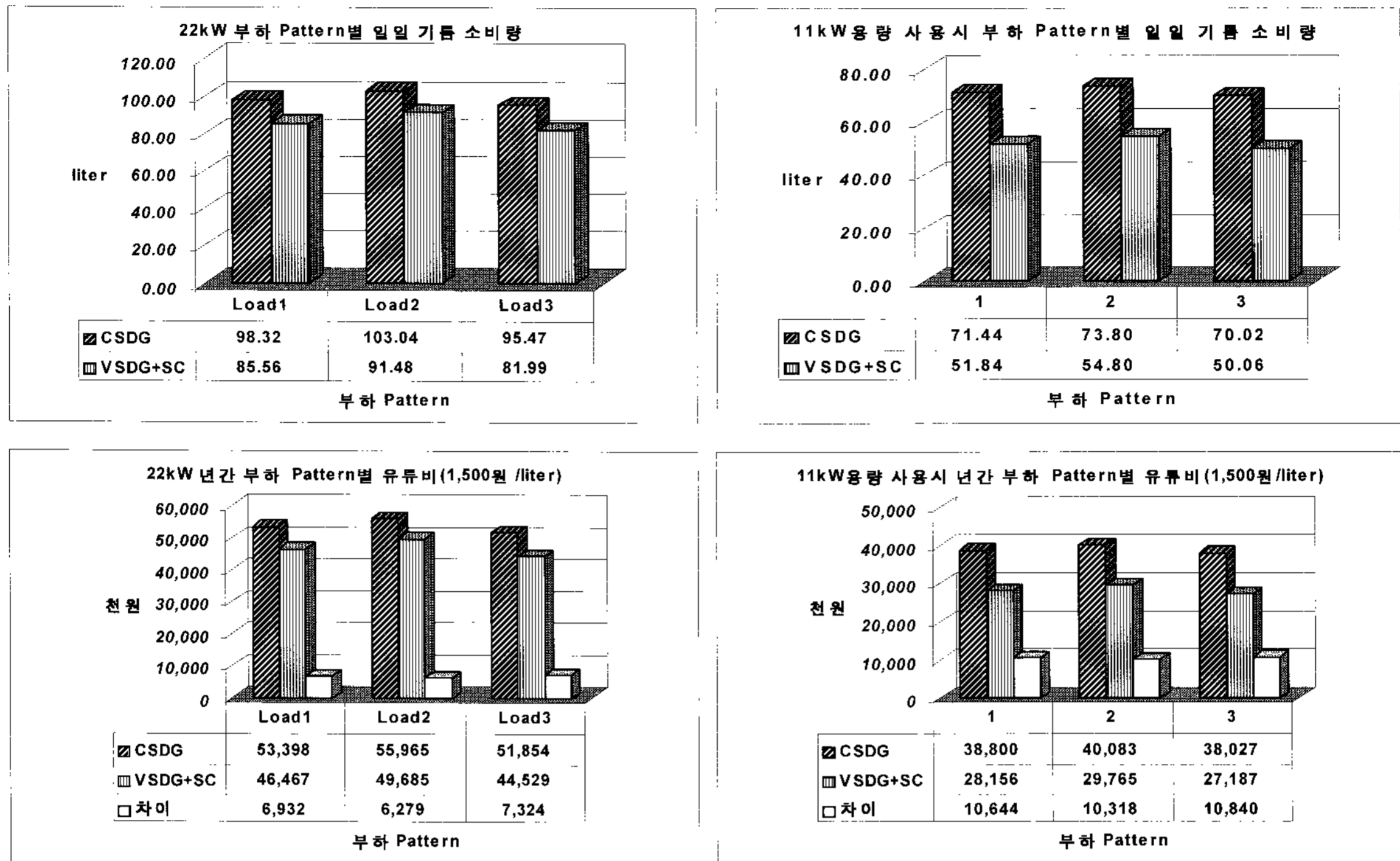


그림 10 하루 동안 사용 부하 패턴
 Fig. 10 Load Patterns per a day



(a) 22kW 부하시

(b) 11kW 부하시

그림 11 연비 시험 결과

Fig. 11 Comparison of Fuel Consumption

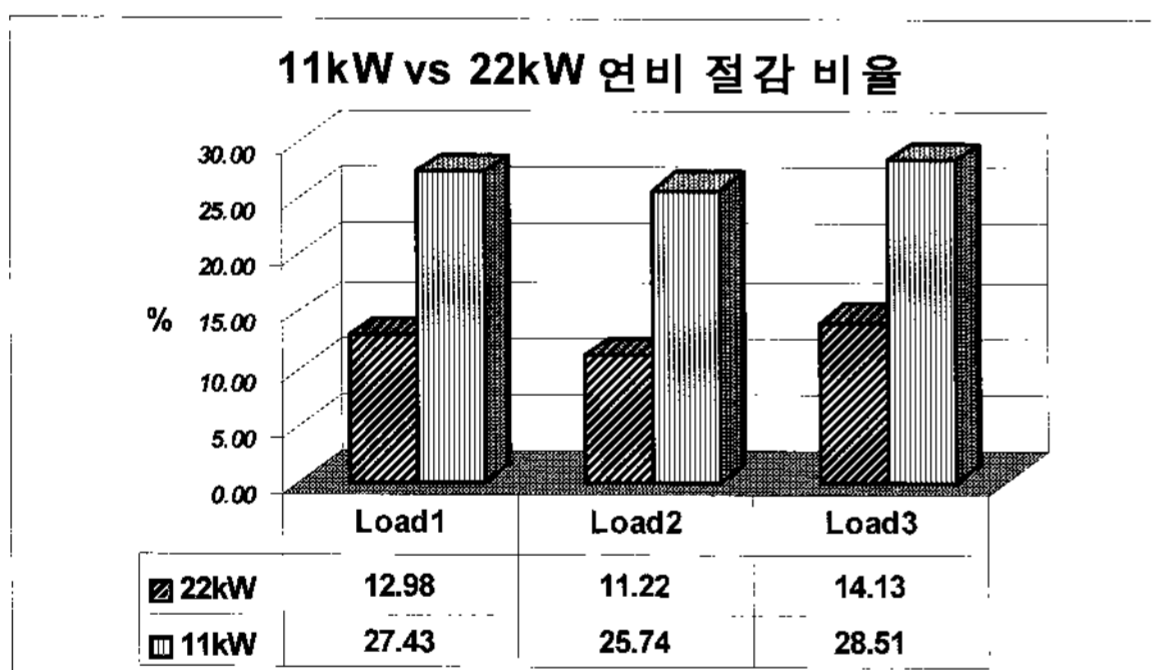


그림 12 22kW 및 11kW 연비 절감율

Fig. 12 Ration of Fuel Saving with Loads

3. 결 론

일정속도로 운전하는 독립형 전원시스템의 경우 경 부하시 연비효율이 급격히 저하되고 단위 출력당 오염 도가 커진다. 이에 반해, 가변속 엔진발전기 경우 주어 진 출력 조건에서 연비가 최소가 되는 점에서 엔진의 속도를 가변 하여 운전 하므로써, 엔진의 연료 효율을 획기적으로 개선하고 동시에 오염 물질 배출도 크게 줄일 수 있다. 이러한 가변속 엔진 발전 시스템에서 슈

퍼캐패시터를 부가하여 순간적인 과부하 시 슈퍼캐패 시터를 통해 축적된 에너지를 부하에 공급함으로써 엔 진의 느린 동적 특성을 보상하여 고품질 및 안정적인 전원공급이 가능한 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 확 인할 수 있었으며, 특히, 3상 4레그 인버터를 이용하여 전압변조능력이 커지게 되고, 중성점을 제어함으로써 부하의 불 평형에 따른 상전압 불 평형을 배제 할 수 있게 되어, 각 상의 전압이 독립적으로 제어될 수 있음 을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다. 또한 이를 부하별 패턴으로 연간 11kW 부하 시 연간 25%이상의 연비 절감 효과를 얻을 수 있음을 확인 하였다.

표 1 영구자석 동기 발전기 파라미터

Table 1 The Parameters of PMSG

P_{rated}	22.19 [kw]	ω_{base}	1814.3 [r/min]
R_s	0.047 [Ω]	J_m	0.005112 [Kgm ²]
L_{ds}	1.4 [mH]	T_{e_rated}	117 [Nm]
L_{qs}	1.4 [mH]	E_{phase}	261 [V]
P	12	K_e	0.2290 [V/rad/sec]

표 2 시스템 파라미터
Table 2 The Parameters of System

컨버터 f_s	8 [KHz]	필터 L_f	250 [μ H]
DC-DC f_s	16 [KHz]	필터 C_f	50 [μ F]
인버터 f_s	16 [KHz]	필터 R_f	0.2 [Ω]
출력주파수 f_{s_out}	60 [Hz]	출력전압 v_{com}	220 [V_{rms}]
L_{dc-dc}	1[mH]	C_{super}	2.7[F]
R_{dc-dc}	0.4 [Ω]	R_{dc}	7.7 [Ω]
L_{dc}	9[mH]	C_{dc}	800 [μ F]

참 고 문 헌

[1] Leon M.Tolbert, William A. Peterson, et al., "Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set", *IEEE IAS 2001 Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 1763-1768, 2001, Sep./Oct.

[2] Jan Leuchter, Pavol Bauer, et al., "Dynamic Behavior Identification of Electrical Gen-Set", *International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1528-1535, 2006, Aug.

[3] Michael J. Ryan, Robert D. Lorenz, "A "Power-Mapping" Variable-Speed Control Technique for a Constant-Frequency Conversion System powered by a IC Engine and PM Generator", *IEEE IAS 2000 Annual Meeting*, Rome, Italy, pp.2376-2382, 2000.

[4] Lech M. Grzesiak, Jacek G. Tomasik, "Autonomous Power Generating System with Multi-Level Converter", *IECON 2006 Annual Conference*, pp. 2815-2820, 2006, Nov.

[5] 김장환, "멀티레그 멀티레벨 전압형 인버터를 위한 전압 변조 기법의 일반화에 대한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 2006. 8.

[6] 김효성, 이상준, 설승기, "동적전압 보상기의 과도특성을 개선하기 위한 디지털방식의 전향제어기 설계", *전력전자학회 논문지*, 제9권, 제3호, pp. 275-283, 2003. 1.

저 자 소 개



이준환(李濬煥)

1973년 10월 28일생. 1999년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 삼성 전자 책임연구원. 2007년~현재 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정.



이승환(李承桓)

1980년 11월 16일생. 2004년 서울대 기계항공 공학부 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 석사과정.



설승기(薛承基)

1958년 5월 13일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기 공학부 졸업(공박). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 일본 Yaskawa Electric Corp. 연구소장. 1991년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 당 학회 평의원.