

슈퍼캐패시터와 가변속 엔진발전기를 이용한 독립형 전원 시스템

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

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

School of Electric Engineering and Computer Science, Seoul National University

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 improves dynamic characteristics under sudden load change, and power quality, fuel consumption, and pollutants can be reduced 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.

1. 서론

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 간단하나, 엔진의 출력에 비해 발전 출력이 적은 영역에서 효율이 급격히 떨어지게 되며, 이에 따라 연비가 나빠지고 및 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 가변하므로써, 경부하 시 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. 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, 그리고 단상 전력을 포함하는 3상

불균형 전원 공급을 위한 3상 4선 시스템의 모의 실험 결과를 제시함으로써 새로운 개념의 가변속 엔진 발전 시스템을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 엔진의 운전 특성

일반적인 디젤 엔진은 그림1과 같이 속도에 따른 기계적 출력에 대하여 연비지도(Specific Fuel Consumption Map)를 가지게 된다. 이로부터, 같은 기계적 출력을 얻더라도 엔진의 운전 속도에 따라 연료 소비가 다를 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.

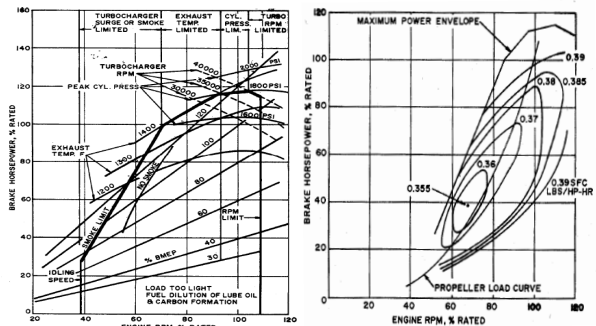


그림 1 엔진 운전 특성 곡선

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 2의 우측 그림을 통해보면 출력에 대한 운전 가능한 속도는 여러 경우가 존재하나 연료를 효율적으로 사용할 수 있는 운전점은 특정 속도로 정해짐을 알 수 있다.

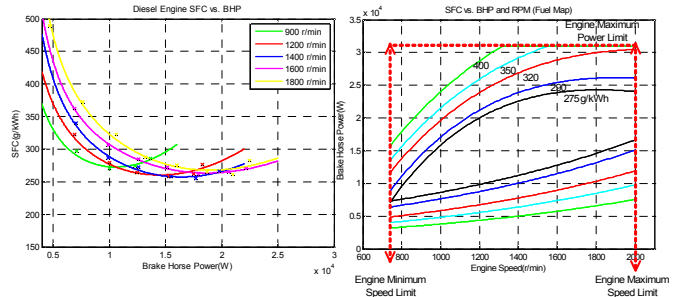


그림 2. 출력 과 연료 소비량 실험 결과

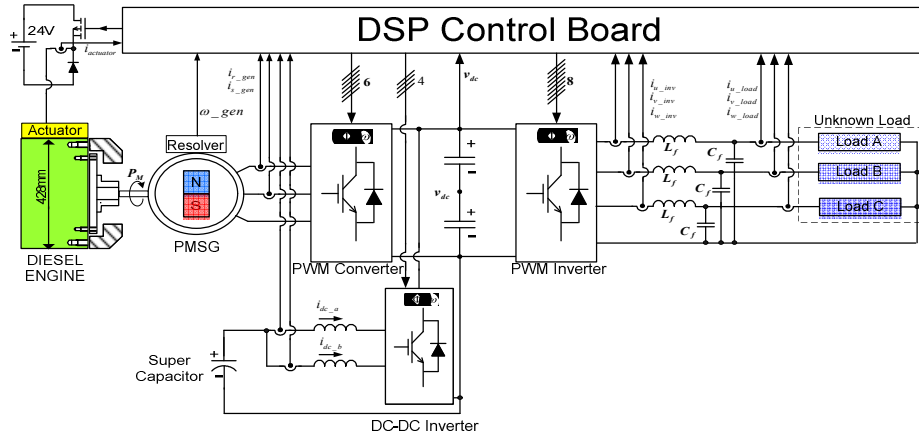


그림 3 전체 시스템의 구성도

만약 2kw의 출력을 1시간 동안 내기 위해 1800r/min 일 정속도로 운전하는 것에 비해 900r/min의 속도로 2kW, 1시간 동안 운전하게 되면 $700\text{g/kWh} \times 1\text{h} \times 2\text{kW} = 1400\text{g} = 1.4\text{kg}$ 을 사용하게 되어 1800r/min에서 보다 30%이상의 기름 절감효과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 기존의 일정속도로 운전하는 발전기보다 훨씬 효율적인 운전이 가능할 것이라 예상할 수 있다.

2.2 전력 제어기

그림3과 4는 전체 시스템의 구성 및 블록도를 나타내며 직류단(DC link)전압은 약 600V로 고정하였다. 전력 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(governor)
- 필요 전력 공급을 제어하기 위한 전력제어기.

필요 출력을 공급하기 위하여 엔진 발전기에서 공급하는 에너지는 기계적인 응답으로 수 초의 시스템 응답을 갖게 되며 이러한 응답 특성은 일정 DC전압을 유지할 수 없게 되어 결국 출력 전압의 왜곡등과 같은 전력품질에 문제를 발생시키게 된다. 슈퍼캐패시터를 이용하면 엔진의 가/감속시간 동안 전력의 불일치를 해소할 수 있어, 엔진을 항상 최대 효율 운전 속도에서 구동시킬 수 있다.

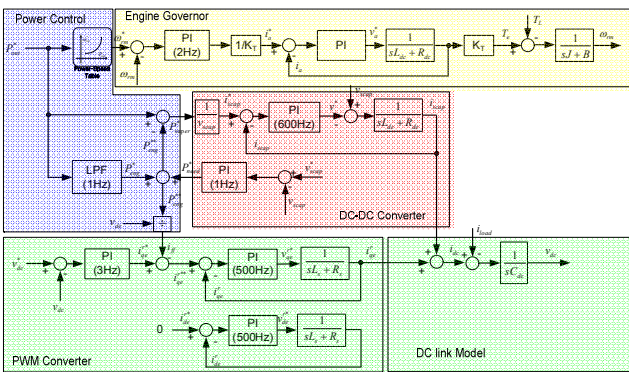


그림 4 전체 시스템의 블록도

그림 5는 전력제어기를 통한 순간 부하시(P_{out}^*)의 엔진의 출력(P_{eng})과 슈퍼캐패시터의 출력(P_{sup}) 그리고 슈퍼캐패시터의 전압(V_{scap}), 직류단 전압(V_{dc})으로 순간 부하 인가 시, 엔진의 속도가 부하 양에 따른 최적 운전속도로 변경되는 동안, 슈퍼캐패시터에서 출력을 공급하게 된다. 그림 6은 모의 실험결과를 나타내고 있다.

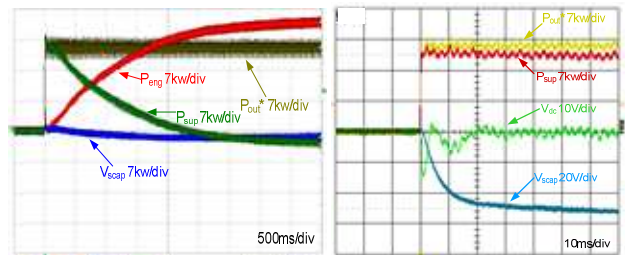


그림 5. 전력 제어기 실험 결과

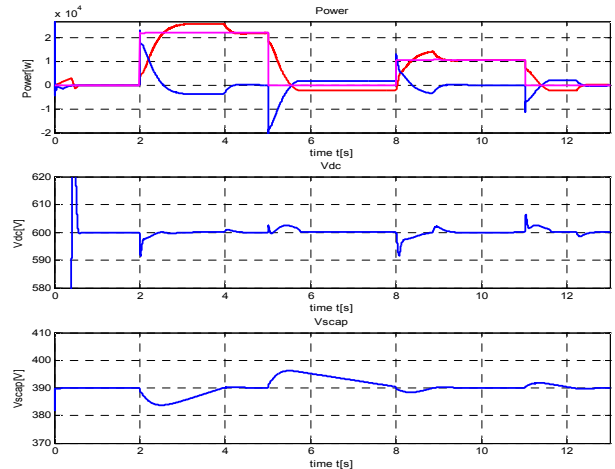


그림 6. 전력 제어기 모의 실험 결과

2.3 3상 4레그 인버터

그림 3와 같은 4개의 레그(Leg)로 구성된 인버터는 3개의 선간 출력전압을 독립적으로 합성할 수 있으며, 부하의 중성점 경로로 별도의 레그를 사용하므로 단상 부하를 포함하는 불균형 삼상 부하에 의한 영상분 전류를 흡수 할 수 있다. 또한, 전압변조능력(V_{dc})이 커지며, 불평형(Unbalanced) 3상 부하에 평형 3상 전압을 공급하는 전력 시스템으로 유용하게 이용할 수 있다^[5]. 3상 4레그 인버터는 3상 교류 부하 시스템이 주요 적용 분야 이므로 각 상 전압을 정지 좌표 계에서 독립적으로 제어 하는 것이 시스템 해석에 유리한 장점이 있다. 인버터의 순시 출력 전압 V_{inv} 는 부하 진동 억제기 (V_{damp})와 부하 외란 제거기($V_{disturb}$)를 통하여 정지좌표 계의 상 전압으로 제어한다^[6].

- 부하 진동 억제기(V_{damp}): LC필터에 의해 발생되는 부하 전압 진동을 억제하며 블록도는 다음과 같다.

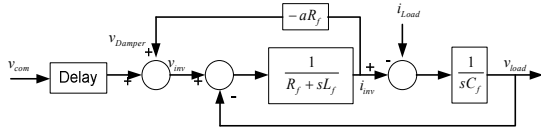


그림 5. 부하 진동 억제 블록도
진동 억제기(V_{damp})의 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_{Damp} = K_{Damp} \cdot i_{inv} = -aR_f \cdot i_{inv} \quad (2.1)$$

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

$$\frac{V_{load}}{V_{inv}} = \frac{1/L_f C_f}{s^2 + s(R_f + aR_f)/L_f + 1/L_f C_f} = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_c \omega_f s + \omega_f^2} \quad (2.2)$$

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 억제기에서의 전압강하와 필터 인덕터에서의 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.

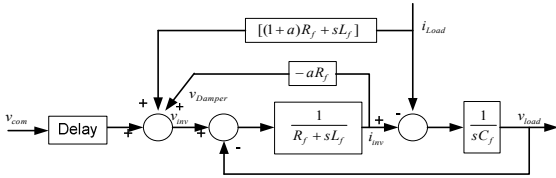


그림 6. 부하 외란 억제 블록도

$$V_{Disturb} = ((1+a)R_f + sL_f) \cdot i_{Load} \quad (2.3)$$

그림 7과 8은 인버터 출력단의 상 전압 및 R-L 평형 부하 시 모의 실험 및 실험 결과이며, 순간적으로 인가된 부하에 대해 출력 상전압의 왜곡이 저감되는 것을 알 수 있다.

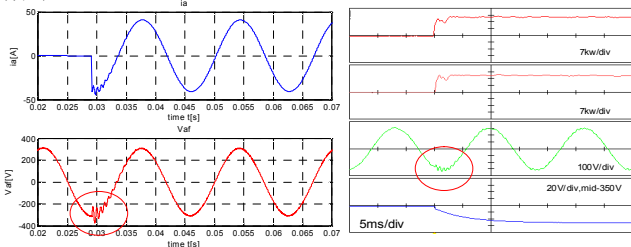


그림 7. 제어를 사용하지 않은 경우

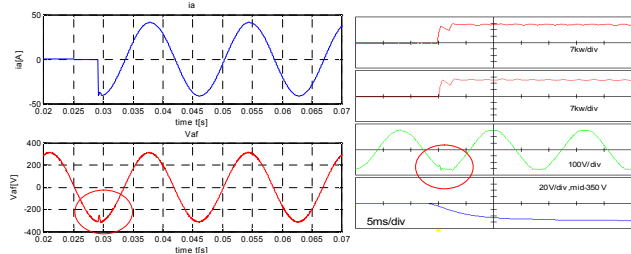


그림 8. 제어를 사용한 경우($\alpha=10$)

그림 9는 제어를 사용하여 3상 Vas상에 다이오드 정류기를 이용한 비선형 부하가 연결 되었을 경우 3상 R-L부하로 약 9kw를 인가한 때의 모의 실험과 실험 결과를 나타내며 3상 불 평형 비선형 부하에서도 상 전압의 왜곡이 적은 것을 확인 할 수 있다.

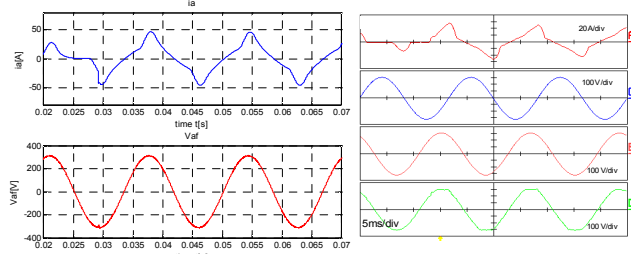


그림 9. 단상 불평형 부하를 인가한 경우

3. 결론

일정속도로 운전하는 독립형 전원시스템의 경우 경부하시 연비효율이 급격히 저하되고 단위 출력당 오염도가 커진다. 이에 반해, 가변속 엔진발전기 경우 주어진 출력 조건에서 연비가 최소가 되는 점에서 엔진의 속도를 가변하여 운전하므로써, 엔진의 연료 효율을 획기적으로 개선하고 동시에 오염 물질 배출도 크게 줄일 수 있다.

이러한 가변속 엔진 발전 시스템에서 슈퍼캐패시터를 부가하여 순간적인 과부하 시 슈퍼캐패시터를 통해 축적된 에너지를 부하에 공급함으로써 엔진의 느린 동적 특성을 보상하여 고품질 및 안정적인 전원공급이 가능한 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었으며, 특히, 3상 4레그 인버터를 이용하여 전압변조능력이 커지게 되고, 중성점을 제어 함으로써 부하의 불평형에 따른 상전압 불평형을 배제 할 수 있게 되어, 각 상의 전압이 독립적으로 제어될 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

표 1-1 시스템 제정수

P_{max}	22.19[kw]	θ_{max}	18143 [r/min]	$f_{c,com}$	8 [kHz]	L_f	250 [mH]
R_f	0.047 [Ω]	J_e	0.005112 [kgm ²]	$f_{c,dist}$	16 [kHz]	C_f	50 [μF]
L_{di}	1.4 [mH]	$T_{c,max}$	117 [Nm]	$f_{c,ps}$	16 [kHz]	R_f	02 [Ω]
L_{fp}	1.4 [mH]	E_{phase}	261 [V]	$f_{c,ms}$	60 [kHz]	$P_{max,inv}$	22 [kw]
P	12	K_t	0.2290 [V/radSec]	$V_{max,inv}$	220 [Vrms]		

Reference

- [1] Leon M.Tolbert, William A. Peterson, et al., "Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set", IEEE IAS 2001 Annual Meeting, Volume 3, 30 Sept.-4 Oct. 2001 Page(s):1763 - 1768 vol.3
- [2] Jan Leuchter, Pavol Bauer, et al., "Dynamic Behavior Identification of Electrical Gen-Set", International Power Electronics and Motion Control Conference, Aug. 2006 Page(s):1528 - 1535
- [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
- [4] Lech M. Grzesiak, Jacek G. Tomasik, "Autonomous Power Generating System with Multi-Level Converter", IECON 2006 Annual Conference, Nov. 2006 Page(s):2815 - 2820.
- [5] 김장환, "멀티레그 멀티레벨 전압형 인버터를 위한 전압 변조 기법의 일반화에 대한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, Aug.2006.
- [6] 김효성, 이상준, 설승기, "동적전압 보상의 과도특성을 개선하기 위한 디지털방식의 전향제어기 설계", 전력전자학회논문지, 제 9 권, 제 3 호, pp275-283, Jan.2003.