

에너지 저장장치를 활용한 전기 추진 선박의 가변속 엔진 발전기 속도 리플 저감 제어

손영광, 최세화, 설승기
서울대학교 전기정보공학부 전력전자센터 (SPEC)

Engine Speed Ripple Reduction of Variable-Speed Drive DC Shipboard Based on Energy Storage System

Young Kwang Son, Sehwa Choe, and Seung Ki Sul
Seoul National University Power Electronic Center (SPEC)

ABSTRACT

전기추진선박의 엔진발전기를 부하에 따라 가변속 운전하면 일정속도로 운전하는 것보다 연료를 절약할 수 있다. 내연 기관 엔진은 저속 운전 시 속도 리플로 인하여 운전이 불안정해 지므로 저속 운전에 한계가 있다. 또 발전기 조속기의 느린 응답으로 속도 리플이 발생하기도 한다. 본 논문에서는 배터리 에너지 저장 장치를 이용하여, 과도 상태에서의 속도 리플을 감소시키는 제어 방식을 제안하여 가변속 엔진의 운전 범위를 넓히고자 한다.

1. 서론

일반적인 전기 추진 선박은 엔진 발전기(Engine generator set)에 의해 발전된 전력이 추진 부하 및 기타 부하에 공급된다. 엔진 발전기의 연비는 발전량과 엔진 발전기 속도에 따라 달라지므로, 엔진의 SFC(Specific Fuel Consumption) 지도(map)에 따라 연료 효율이 최적화되는 속도에서 운전 하는 가변속 발전 방식이 기존의 일정속도 운전보다 높은 효율을 보인다. 경부하 운전시 가변속 발전 방식은 일정속도 발전 방식보다 에너지 효율이 30% 가량 높다고 알려져 있다.^[1]

특히 전기추진선박과 같은 독립형 전원 시스템은 급격한 부하의 변동, 속도 지령의 변화 등의 요인으로 인한 시스템 외란에 의하여 유의미한 수준의 속도 리플이 발생한다. 이는 독립형 전원시스템의 발전기에 대하여 단일 부하가 차지하는 비중이 큰 특성으로부터 기인한다.

엔진 발전기에서 발생하는 속도 리플의 원인은 일반적으로 두 가지가 있다. 하나는 ‘흡입 압축 폭발 배기’로 이어지는 엔진의 4행정 사이클에 의해 발생하는 토크 리플이고, 다른 하나는 엔진 조속기(Governor)의 느린 동특성으로 인한 속도제어기의 진동적 응답이다. 전자는 비교적 높은 주파수(수십 Hz), 후자는 낮은 주파수(수 Hz)의 속도 리플을 발생시킨다.^[2] 이러한 속도 리플로 인하여 특정 속도 이하에서는 엔진의 안정적인 운전이 보장되지 않는다. 따라서 엔진 효율 운전을 위한 가변속 운전의 범위를 넓히기 위해서는 엔진의 속도 리플을 저감하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 조속기의 느린 동특성으로 인한 저주파수의 엔진 속도 리플을 저감하기 위해 배터리를 활용하는 제어 방식을 제안한다. 조속기가 반응할 수 없는 주파수 대역에서 배터리를 활용하여 엔진을 보다 안정적으로 제어하여, 엔진의 속도 변동량을 저감한다.

2. 본론

2.1 가변속 전기추진선박 시스템

2.1.1 전기추진선박 시스템 모델링

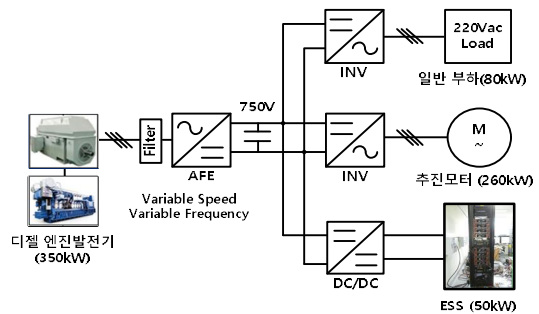


그림 1 가변속 전기추진선박 시스템

그림 1은 가변속 전기추진선박 시스템을 나타낸다. 엔진 발전기의 가변속 속도 지령은 SFC 지도를 참고하여 결정한다. 엔진 속도 제어는 조속기를 통해 대역폭이 1Hz인 1차 저역 통과 필터로 구현되었다. 엔진 최저운전속도는 1000r/min이다.

표 1 엔진 발전기 및 시스템 파라미터

J_{Genset}	2.8 [kg m ²]	f_{gvr_cc}	1 [Hz]
W_{rated}	1800 [r/min]	F_{sw}	5 [kHz]
W_{min}	1000 [r/min]	C_{dc}	9900 [uF]

2.1.2. 기존 속도 제어의 성능

계통 연계형 컨버터(Active Front End, AFE)는 DC 계통의 전압을 제어하며 조속기는 PID 제어기로 구성되었다. 이러한 기존 시스템의 시뮬레이션 결과는 그림 2 와 같다. 속도지령 변화와 부하 변동에 따라 엔진 발전기의 속도가 진동적으로 흔들리는 것을 확인할 수 있는데, 이는 조속기의 느린 응답성에 의한 결과다. 일정속도 운전 방식의 수MW 이하 독립형 전원 시스템에서도 부하 변동에 따라 정격속도 2%를 초과하는 속도 리플이 발생할 수 있다.^[3]

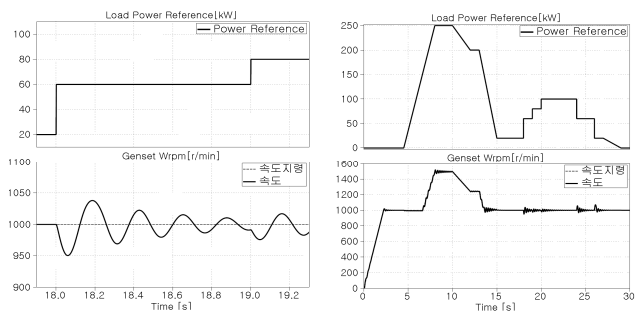


그림 2 기존 제어 시스템의 속도 제어 성능

2.2. 제안하는 속도 리플 저감 제어기의 구조

2.2.1 배터리 전류 제어기

엔진발전기의 속도 리플을 저감하기 위한 배터리의 출력 전력을 제어하는 제어기의 구조는 그림 3과 같다. 배터리는 충방전 시에 손실이 발생하므로 일반적인 운전 중에는 배터리를 사용하지 않고 엔진이 부하 전력을 모두 공급한다. 하지만 급격한 부하 변동 및 외란 등에 의하여 엔진이 감당할 수 없는 속도 리플이 발생하는 경우에 배터리를 통한 속도 보상 제어를 수행하도록 배터리 전류 제어기를 구성하였다.

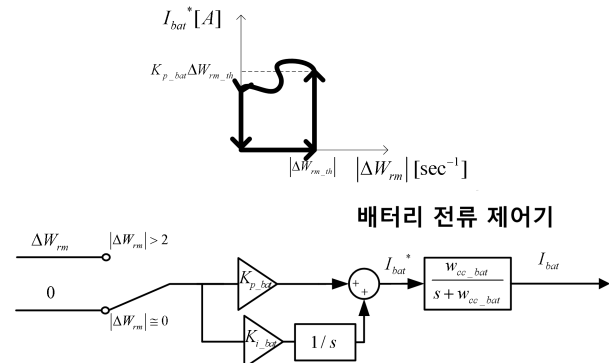


그림 3 제안된 배터리 전류 제어기의 구조

2.2.2 전압 제어기 전향 보상

배터리를 통한 전력 보상은 AFE 컨버터의 전압 제어에 영향을 미치므로, AFE 컨버터의 전압 제어기에 배터리를 통해 충·방전되는 전력 또한 전향 보상하면 직류단 전압이 보다 안정적으로 제어될 수 있다. 따라서 그림 4와 같이 배터리의 출력을 전향 보상하도록 전압제어기를 구성하였다.^[4]

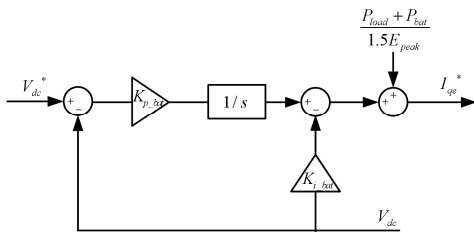


그림 4 전향 보상항을 수정한 IP 전압 제어기

2.2.3 모의 실험 결과

그림 5 (a)는 그림 2와 동일한 부하 프로파일에 대한 엔진발전기의 속도 응답이다. 기존의 제어시스템의 경우에는 40kW 계단 부하 변화가 발생하는 18초에서 약 50r/min 진폭의 진동적인 속도 리플이 발생하지만 제안된 시스템에서는 최대 10r/min의 진폭이 발생한 후 진동적인 응답 없이 속도가 지령에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 보다 급격한 부하 변동 혹은 시스템 오류 상황을 모의하기 위해 그림 5 (b), (c)에서는 80kW 계단 부하 지령에 대한 시스템의 응답을 살펴보았다. 기존의 제어시스템에서는 150r/min을 초과하는 속도 오차가 발생하지만, 제안된 제어시스템에서는 50r/min 미만의 속도 오차가 발생한다. 또한 전향 보상을 추가한 전압제어기를 사용함으로써 전압제어의 성능 또한 향상되었음을 확인할 수 있었다.

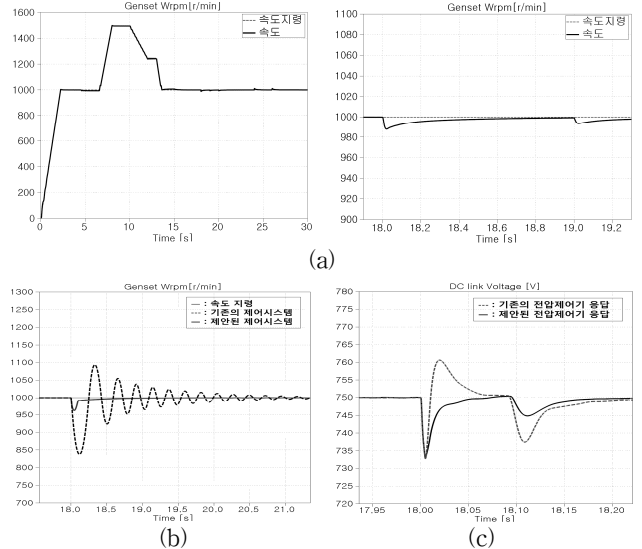


그림 5 (a) 제안된 제어 시스템의 속도 제어 성능 (b) 80kW 계단 부하 변동에 대한 엔진발전기 속도 변화 (c) 80kW 계단 부하 변동에 대한 전압 변화

제안된 제어기를 통해 시스템 사고 상황에서 속도 리플을 100r/min 가량 저감할 수 있다. 또한 디젤 엔진의 SFC 지도에 따르면 80kW 출력에서 엔진의 1kWh당 연료소모량은 1050r/min에서 396g, 1150r/min에서 423g이므로, 최저 운전 속도 지령을 100r/min 낮춘다면 경부하 정상운전 시 연료효율을 최대 6% 가량 개선시킬 것으로 기대된다.

3. 결론

기존 가변속 엔진 발전기의 속도제어는 동특성이 느린 조속기에 의해 이루어졌기 때문에 급격한 부하변동 혹은 외란에 의해 큰 속도 리플이 발생하였다. 본 논문에서는 속도 리플의 크기가 일정 크기 이상일 때 배터리를 활용하여 속도 리플을 저감하는 제어 방식을 제안하였다. 제안한 제어기의 성능은 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며, 속도 리플을 60% 이상 저감할 수 있었다. 이를 통하여 가변속 속도 제어 영역을 넓힌다면, 전기추진선박의 경부하 연료 효율을 개선할 것으로 기대된다.

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141010502260)

참고 문헌

- [1] J. H. Lee, S. H. Lee, and S. K. Sul, "Variable speed engine generator with supercapacitor: Isolated power generation system and fuel efficiency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 2130–2135, 2009.
- [2] S. Krishnamurthy, T. M. Jahns, and R. H. Lasseter, "The operation of diesel gensets in a CERTS microgrid," *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–8, 2008.
- [3] X. Feng, "Dynamic balancing for low inertia power systems," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2013.
- [4] 설승기, 전기기기제어론, 브레인코리아, 2002.