

# 울트라 캐패시터 에너지 저장장치를 적용한 함정 전기추진 시스템의 효용성 증대 연구

김소연<sup>1</sup>, 설승기<sup>†</sup>

## A Study on the Improving Effectiveness of Shipboard Electric Propulsion System with Ultra-capacitor Energy Storage Devices

So-Yeon Kim<sup>1</sup>, and Seung-Ki Sul<sup>†</sup>

**Abstract** - Recently, integrated electric propulsion system has been vigorously adopted into naval vessels. To enhance effectiveness and efficiency of power management in these propulsion systems, this paper investigates necessity of energy storage devices and their operation strategies. By introducing the energy storage devices, engine can operate at higher efficiency point and accordingly costs for fuel and maintenance are significantly reduced. In addition, transient performance can also be improved with support of the devices and it leads to stable operation of shipboard power bus. To validate the proposal of this paper, computer simulation has been conducted with real load data of existing electric propulsion system.

**Keywords** : Shipboard Electric Propulsion System, Energy Storage Device, System Redundancy, Gensets

### 1. 서 론

일반적인 함정 추진기관의 선정은 순항속력(또는 경제속력)과 최대속력에서 요구되는 소요마력을 공급할 수 있도록 저속엔진과 고속엔진을 결합하는 방식으로 구성된다(그림 1(a)). 중·고속의 추진엔진은 감속기어를 거쳐 프로펠러에 추진마력을 전달한다. 순항속력 이하의 매우 낮은 함 속력을 유지하거나 후진 운항을 위해서는 추진엔진의 최저 회전수가 제한되므로, 가변피치 프로펠러를 적용하여 피치(pitch) 조절을 해야 한다. 이러한 기계적 추진방식은 복잡한 기계장치를 필요로 할뿐만 아니라, 응답시간도 수 십 초에 이른다.

최근 국내의 해군함정의 추진방식 설계 경향은 그림 1(b)와 같은 전기추진 시스템으로 구성되고 있다<sup>[1]</sup>. 통합 전기추진 시스템은 함정 운항특성에 맞추어 최적 효율을 가지는 발전시스템을 설치, 운용함으로써 기존 시스

템에 비해 연비절감 효과가 매우 뛰어나다. 전기추진 시스템이 가지는 주요 장점은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

- 엔진 설치대수 감소(연료 및 유지보수 비용 절감)
- 추진 전동기의 빠른 제어특성으로 함 조정성능 향상
- 엔진 배치의 융통성 향상으로 함 공간 활용성 증대 및 선형 최적화 가능
- 기계식 추진 시스템보다 저속에서 엔진 부하율 증대

그러나 기존의 저전압 전력계통에 비해 대용량 추진 전동기 부하를 가지는 전기추진 함정은 전력계통 안정도(stability) 및 데드쉽(dead ship) 발생에 더욱 취약할 수 있으므로, 전기추진 시스템 설계 시 전력공급의 신뢰성(reliability)이나 전력품질(power quality) 요건이 최대한 보장되도록 해야 한다.

본 논문에서는 전기추진 시스템의 엔진-발전기 부하율을 향상시킴으로써 연비를 더욱 개선시키고, 고출력 펄스 부하와 같은 순간적인 부하변동이나 엔진 과부하시에도 전력계통을 안정적으로 유지할 수 있는 에너지 저장장치의 적용 필요성과 그 효용성을 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다. 2장에서는 에너지 저장장치의 적용 필요성과 가능성에 대한 기술동향을 기술하고, 3장에서는 시뮬레이션 대상 함정의 추진 특성을 포함하는 전력시스템 모델링 방법에 대해 설명하며, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 에너지 저장장치의 효용성에 대해 분석한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

Paper number : TKPE-2012-17-2-4

ISSN : 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding Author : sulsk@plaza.snu.ac.kr, Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University  
Tel : +82-2-880-7991 Fax : +82-2-883-0827

<sup>1</sup> Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University

Manuscript received Sep. 19, 2011; accepted Jan. 2, 2011

— 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 우수추진논문임

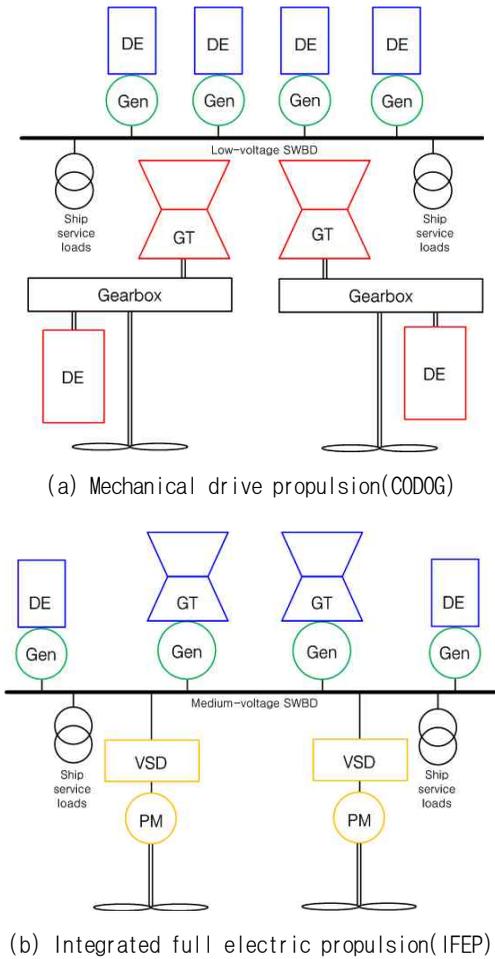


Fig. 1 Ship Propulsion System

## 2. 함정용 에너지 저장장치의 기술동향

수상함에 에너지 저장장치를 적용하려는 목적은 함내 설치 가능한 발전기 용량으로는 미래 무기체계와 같은 고 전력 펄스 부하의 소요전력을 충당할 수 없을 뿐만 아니라, 전투함과 같이 중요부하가 많은 함정은 전력 공급의 연속성이 최대한 보장되어야 하기 때문이다. 이외에도 에너지 저장장치는 발전기가 갑자기 탈락되는 경우 재투입되기 까지 예비 전원으로 동작하여 중요부하에 치명적인 영향을 최소화할 수 있다. 또한 함정운용 특성 상 데드쉽 상태를 피하기 위해 경부하 운항조건에서도 항상 2대의 발전기를 운용하고 있어 상대적으로 낮은 부하율로 운전되는데, 대용량 에너지 저장장치가 설치되어 있으면 한 대의 발전기로 높은 부하율에서 운전될 수 있어 연료소모량을 크게 감축할 수 있다. 이러한 단독 발전기 운전(single generator operation) 개념은 이미 선진해군을 중심으로 실선에 적용되고 있으며, 우리 함정도 연료 사용 절감을 위해 에너지 저장장치 기술과 운용 개념을 적극 도입해야 할 것이다. 함정용 대용량 에너지 저장장치 설치에 따른 주요 장점은 다음과 같다.<sup>[3]</sup>

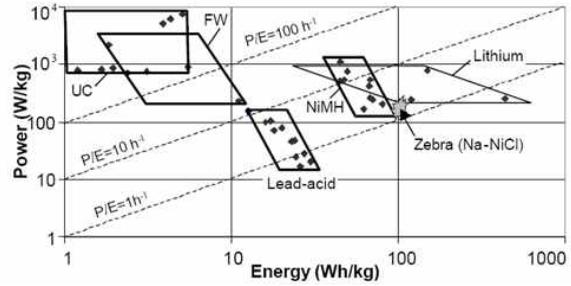


Fig. 2 Power-Energy characteristics of different storage technologies

Table 1 Comparison between FW and UC

	Flywheel <sup>[5]</sup>	UC <sup>[4]</sup> (2.8V, 3000F cell)
Power density (kW/kg)	0.58	8.64
Energy density (Wh/kg)	6.72	5.19
25kWh Installation Weights	about 3720kg +Aux. 50% ≈5580kg	about 4817kg +Aux. 50% ≈7225kg

- o 발전기의 순간적인 과부하 또는 탈락 시, 예비 발전기 재투입되기까지 짧은 시간동안 중요부하에 비상전력 공급
- o 특정 운전 조건(정박, 묘박 등)에서 안정적인 발전기 단독 운전으로 연료사용 절감
- o 전력부하의 급격한 변동에 대한 전력지원으로 모션 전력품질 유지
- o 고 전력 펄스형태의 무기/장비에 소요 전력 공급
- o 함정 급정지 시 발생하는 회생 에너지 저장

함정용 에너지 저장장치에 적용 가능한 기술은 부하 전력의 특성과 설치 공간의 제약에 따라 다양하지만, 주로 배터리, 울트라 캐패시터, 플라이휠 장치 등이 고려되고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 에너지 저장장치 선정 시 전력밀도와 에너지밀도 특성이 고려되어야 한다. 본 논문에서 적용하려는 시스템 용량은 90초 이내의 시간동안 약 1MW를 공급할 수 있는 25kWh 용량의 에너지 저장장치를 고려해 보았다. 미 해군에서는 구축함에 적용하기 위한 에너지저장장치로 플라이휠(flywheel) 발전장치를 연구검토하고 있다. 플라이휠과 고속의 전동발전기 세트, 전력변환장치, 그리고 냉각장치, 유회장치, 제어장치 등이 하나의 모듈로 구성되며, 전력 요구조건에 따라 수 개의 모듈을 분산 설치하여 운용하는 개념이다. 그러나 플라이휠 기계장치는 다소 복잡하고, 진동이나 소음, 유지보수 측면에서 불리하다. 반면 캐패시터는 충·방전 속도가 매우 빠르고 전력밀도가 매우 우수하며, 유지보수 측면에서도 플라이휠 장치보다 훨씬 유리하다. 대용량 울트라 캐패시터 기술은 고

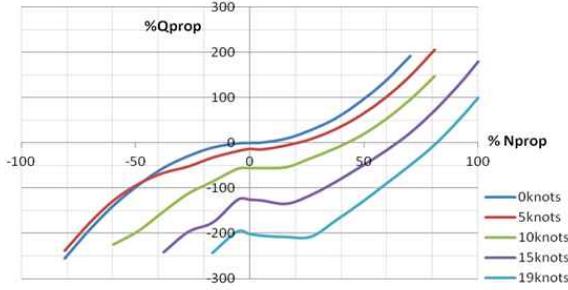


Fig. 3 Propeller Characteristics(Robinson Curve)

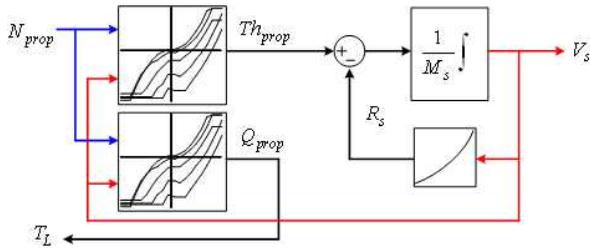


Fig. 4 Ship Propulsion Loads Modeling

속전철이나 하이브리드 자동차, 풍력이나 태양광 산업에 적용하기 위해 점차 개발되고 있으며<sup>[6][7]</sup>, 표 1에서 보듯이 상용 3000F 캐패시터 단위 셀(cell)로 25kWh 용량을 구성한다고 가정하였을 때 플라이휠 발전장치와도 대등할만한 에너지밀도를 가짐을 확인할 수 있다.

### 3. 전기추진 함정 모델링

전기추진 시스템의 성능을 시뮬레이션하기 위해서는, 함정 운항속도 제어 특성 그리고 발전기 전력제어 특성으로 간략하게 구성할 수 있다. 추진부하는 추진전동기의 동력에 의한 프로펠러 및 선체 동특성이 모델링되어

야 한다. 추진축 회전속도에 의한 프로펠러 추력 및 토크, 함정 속력 및 선체저항 특성은 축소모델 실험에 의해 함정 기본설계 단계에서 얻어지는 모형실험 값이다. 본 논문에서는 4600톤 급 진기추진 해양조사선의 프로펠러 및 선체저항 특성 자료를 적용하였다. 에너지 저장 장치의 필요성 및 설치 공간은 대형 전투함에 더 적합하게 적용될 수 있지만, 적용 가능성 검증을 위해 우선 본 함정을 기반으로 분석하였다.

#### 3.1 함정 추진부하 특성 모델링

함정 추진속력( $V_s$ )은 프로펠러에 의해 발생하는 추력( $Th_{prop}$ )과 선체 저항( $R_s$ )의 차이에 의해 가속 또는 감속되므로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Th_{prop} - R_s = M_s \frac{dV_s}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $M_s$ 는 함정의 배수톤수이다.

선체 저항은 바람이나 조류에 의한 외부환경을 무시하면 식 (2)와 같이 함 속력의 제곱에 비례하는 함수로 표현되며, 함정 기본설계 단계에서 축소모델 실험에 의해 계측되어 진다.

$$R_s = f(V_s^2) \quad (2)$$

프로펠러의 추력( $Th_{prop}$ )과 토크( $Q_{prop}$ ) 특성도 축소모델 실험을 수행하여 측정값을 통해 얻어야 한다.(그림 3) 프로펠러의 추력과 토크는 식 (3)(4)와 같이 프로펠러의 회전속도( $n_{prop}$ )와 함 속력( $V_s$ )의 함수로 표현된다.

$$Th_{prop} = f(n_{prop}, V_s) \quad (3)$$

$$Q_{prop} = f(n_{prop}, V_s) \quad (4)$$

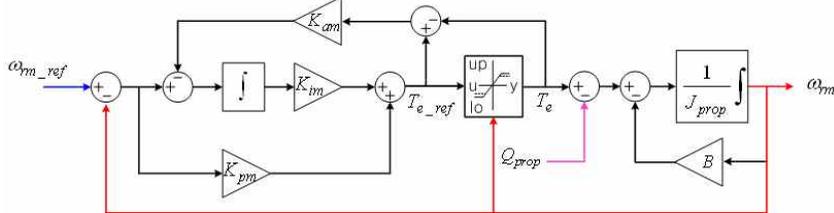


Fig. 5 Propulsion Motor Speed Control

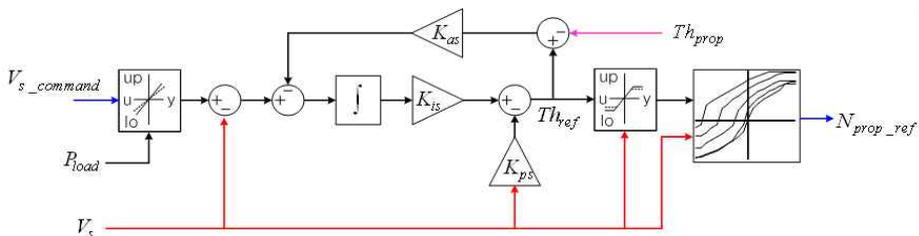


Fig. 6 Ship Speed Control

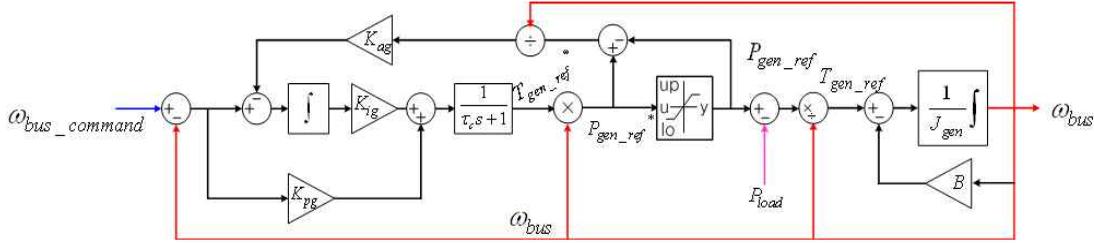


Fig. 7 Generator Frequency Control

그림 4에 추진부하 모델링 전체 구조를 도시하였다. 추진전동기에 의해 프로펠러의 회전속도가 결정되며, 참조표(lookup table) 출력인 프로펠러 추력과 토크에 의해 함정 추진속력의 동특성이 변화되도록 모델링하였다.

3.2 함정 추진속도 제어 특성 모델링

추진전동기 제어 방식은 함 운항 목적에 따라 속도제어, 토크제어, 전력제어 방식이 사용될 수 있으나, 본 논문에서는 속도제어 방식으로 구현하였다(그림 5). PI 제어기의 출력인 토크지령은 정격속도 이하에서 120%, 정격속도 이상에서는 100%로 제한하였고, 안티 와인드업 제어기를 추가하였다. 제어기의 이득(gain)과 제 상수는 부록에 전체적으로 표기하였다. 함정은 추진 관성이 매우 큰 시스템이므로, 속도제어기의 제어대역폭은 1Hz로 설정하였다.

다음으로 추진전동기의 속도지령( $\omega_{rm-ref}$ ) 생성 방법은, 함정 속도지령( $V_s-command$ )을 입력으로 하고 추력지령( $Th_{ref}$ )을 출력으로 가지는 IP 제어기로 구성하였다. IP 제어기의 제어대역폭은 0.1Hz로 설정하였다. 생성된 추력지령은 로빈슨 자료를 역 변환한 참조표를 이용하여 프로펠러 속도지령( $n_{prop-ref}$ )을 찾는 방식으로 구성하였다(그림 6). 일반적으로 함 속력은 함교(조타실) 또는 기관제어실에서 조종간(power control lever)에 의해 추진기관의 출력을 조정한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 함 속도 제어기로 구성하였으며, 함 속도지령의 변화율이나 추력지령의 물리적 한계를 반영하여 함정 운항속도 제어 특성을 모델링하였다.

3.3 발전기 전력 제어 특성 모델링

3.2절에서 모델링한 추진부하 특성은 전기추진 시스템 발전기 계통의 전력부하로 동작하게 된다. 일반적인 함정 발전기 계통은 60Hz 고정 주파수로 운용되고 있으므로, 전체 발전기 계통을 PI 속도제어 시스템으로 등가 변환하여 모델링할 수 있다(그림 7). 발전기 엔진의 동특성은 토크 축적(Build-up) 시정수( $\tau_c$ )를 반영하여 식 (5)와 같이 간단한 1차 시지연 함수로 표현하였다<sup>[8]</sup>.

$$T_{gen} = \frac{1}{1 + \tau_c s} \tag{5}$$

속도제어기 이득은 전체 폐루프 전달함수가 삼중근을 가지도록 선정하였으며, 식 (6)(7)과 같이 적용하였다.

$$K_{pg} = \frac{J_{gen}}{3\tau_c} \tag{6}$$

$$K_{ig} = \frac{J_{gen}}{27\tau_c^2} \tag{7}$$

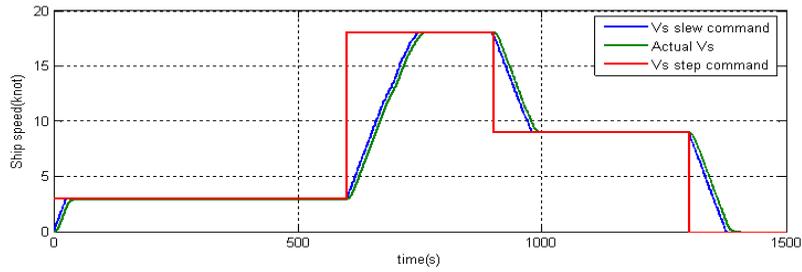
여기서,  $J_{gen}$ 은 발전기 전체 등가 관성이다. 실제 발전기 시스템에서는 900r/min으로 회전하는 대용량 발전기(LDG)와 1800r/min으로 회전하는 소용량 발전기(SDG)가 병렬로 구성이 되나, 60Hz 고정 주파수 시스템으로 변환하였으므로 발전기 전체 관성도 식 (8)과 같이 변환시켜 주어야 한다.

$$J_{gen} = J_{LDG} \left( \frac{15Hz}{60Hz} \right)^2 + J_{SDG} \left( \frac{30Hz}{60Hz} \right)^2 \tag{8}$$

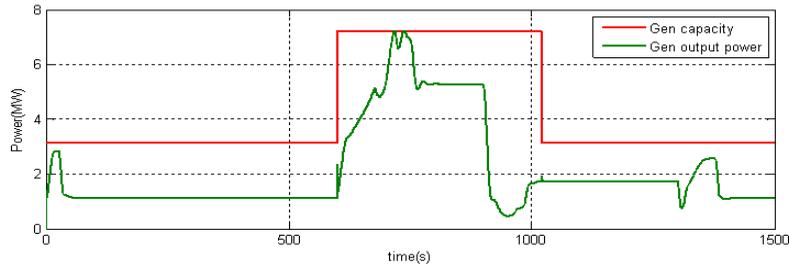
속도 제어기의 출력인 발전기 토크지령은 속도 정보를 다시 곱하여, 발전기 전력용량(generator power capacity)으로 제한하였다. 발전기 운용전략에 따라 투입되는 발전기 정격 출력에 의해 속도제어기 출력이 제한되어짐을 의미한다. 발전기가 공급하는 전력( $P_{gen-ref}$ )과 부하전력( $P_{load}$ )의 차이를 다시 속도 정도로 나누면 모션 주파수( $\omega_{bus}$ )의 변화율이 된다. 제어기의 기타 상수는 부록에 전체적으로 표기하였다.

4. 시뮬레이션 및 효율성 분석

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 이용하여 수행하였으며, 모델 함정의 현재 전기추진 시스템 구조와 에너지 저장장치를 적용한 시스템의 구조를 그림 8에 도시하였다. 그림 9(a)는 함정 속도지령을 정지→3knots→18knots→9knots→정지 순서로 인가하였을 때의 실제 함 속도변화를 나타낸다. 함정은 출항과 동시에 거주편의 및 장비 운용을 위한 전력(ship service loads)이 필요하므로 약 1MW의 기본부하(base load)를 반영하였다. 그림 9(b)에서 볼 수 있듯이, 가속 시의 순간적인 과부하를 피하기 위해서는 발전기 용량을 충분하게 투입하

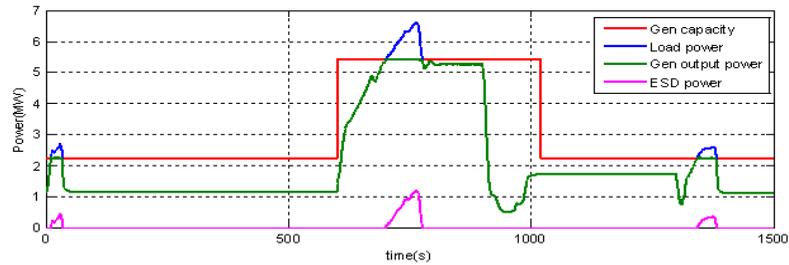


(a) Ship Speed Change by Speed Command

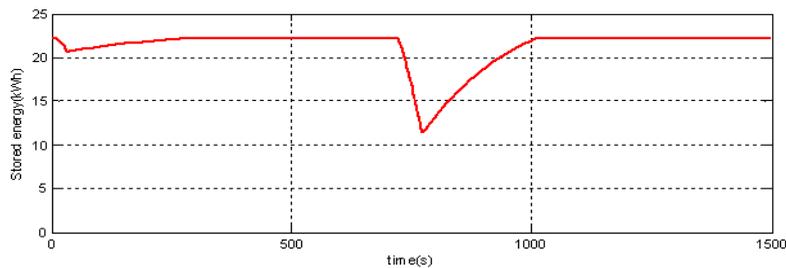


(b) Generator capacity and output power change

Fig. 9 Generator output power according to the ship speed



(a) Generator capacity and output power with ESD



(b) State of charge

Fig. 10 Simulation results of the proposed system

거나 가속을 가능한 천천히 실행하여야한다. 그러나 이러한 순간적인 과부하 특성을 모두 충족하도록 발전기 용량을 선정한다면, 정상상태에서의 부하율은 더욱 낮아질 수밖에 없다. 또한 전기추진 함정은 정지 시에도 전동기 역회전을 하여 훨씬 빨리 정지할 수 있으므로, 충분한 발전기 전력이 계속 공급되어야 한다. 한편, 그림 8(b)과 같이 25kWh 용량의 에너지 저장장치를 설치한

경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 10(a)에 도시하였다. 최고속력으로 가속하기 위해서 에너지 저장장치가 없는 시스템에서는 최대 8MW(90% 부하율까지 허용 시 7.2MW)의 발전기를 투입해야 하나, 에너지 저장장치가 있는 경우 7MW(90% 부하율 적용 시 6.3MW) 발전기 용량으로도 충분하다. 정상상태에서의 부하율을 약 95% 까지 허용할 수 있는 운항 조건에서는 그림 10(b)에서

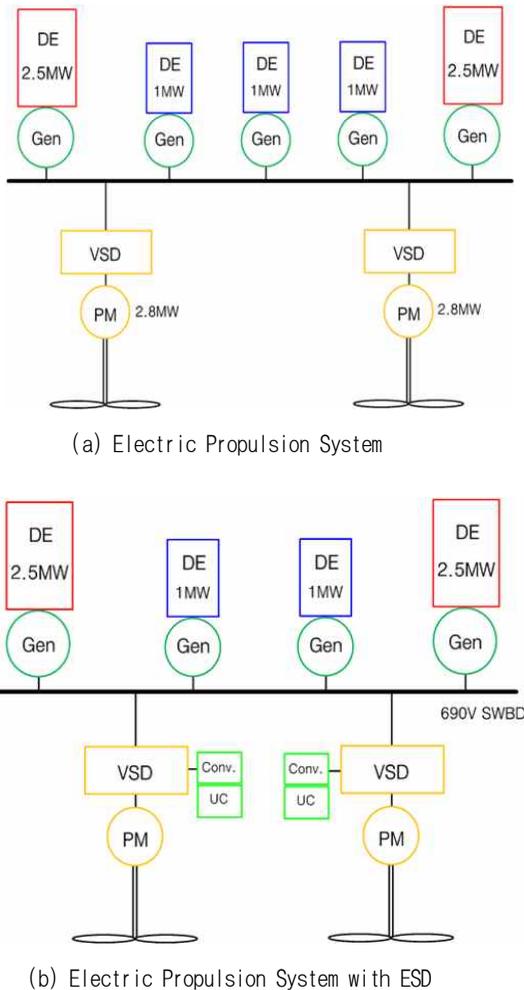


Fig. 8 Proposed system with Energy Storage Device

보듯이, 총 6MW 발전기로도 가능하다. 이러한 높은 부하율은 발전기 연비(Specific Fuel Consumption)를 향상시키고, 발전기 운용 대수를 줄일 수 있어 유지보수 비용을 절감하는 효과를 기대할 수 있다. 그림 10(b)는 울트라 캐패시터에 충전된 에너지(State of Charge) 변화를 나타내며, 일반적인 충방전 에너지 운용범위인 25~90% 내에서 유지되고 있다.

시뮬레이션 결과를 통해 현재 전기추진 시스템에 25kWh의 대용량 에너지 저장장치를 설치할 경우 효율성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- o 가속 또는 정지 시 순간적인 최대전력(peak power)은 에너지 저장장치가 공급함으로써 정상상태에서의 발전기 부하율 향상 및 기존 시스템 대비 발전기 설치 운용 수 감소 가능
- o 발전기 투입 지연(1~2분) 사고가 발생해도 전력계통을 안정적으로 유지 가능
- o 안전한 운항조건에서는 발전기 단독운전을 가능하게 하여 부하율을 향상시킬 수 있으며, 정박 또는 묘박 중 발전기 단독운전 시 기존 시스템 대비 연료소모량

대폭 개선 가능

이러한 연비 개선 효과는 함정의 항속거리를 크게 증가시키거나 유류 저장 탱크의 용적을 줄일 수 있는 가능성을 제공하며, 에너지 저장장치의 빠른 응답성은 발전기 엔진 시스템과 부하 시스템 간에 에너지 완충작용을 하여 함정의 운항 및 작전성능을 크게 개선하는 효과를 기대할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 함정에서 발전기 단독운전을 가능하게 하고 엔진 설치 수 감소 및 부하율 향상으로 연비를 대폭 개선할 수 있는 대용량 에너지 저장장치의 적용 필요성 및 그 효율성을 제시하였다. 모델 함정의 경우 25kWh 용량의 에너지 저장장치 증량은 부가 장치를 포함하여 약 7톤이며, 함정 좌·우현 추진시스템 직류단(DC link)에 나누어 설치할 수 있다. 현재 1MW급 디젤 발전기의 외함(enclosure)을 포함한 기계 중량만 약 4~5톤임을 감안 할 때, 에너지 저장장치의 설치로 인한 연료절감 및 성능 개선 효과는 그 필요성에 대한 타당성을 제공한다.

본 논문에서는 4600톤 급 비전투함에 울트라 캐패시터 장치를 적용하는 구조에 대해 언급하였지만, 함정에 에너지 저장장치를 적용하는 방법은 함정별 전력부하의 특성 및 운용 개념에 따라 다르게 구현될 수 있다. 또한 대용량 에너지 저장장치도 기술적 적용 가능한 수준(Technology Readiness Level)에 따라 더 경제적이고 효율적인 방안이 적용될 수 있다. 중요한 것은, 함정의 연료절감 및 고출력 펄스부하 운영은 당연한 과제이므로 국내에서도 함정분야에 대한 대용량 에너지 저장장치 적용 기술에 대한 연구가 본격적으로 수행되어야 할 것이다.

### 부 록

$M_s$	4600 ton
$J_{prop}$	3075 kg·m <sup>2</sup>
$J_{MDG}$	322600 kg·m <sup>2</sup>
$J_{SDG}$	47100 kg·m <sup>2</sup>
$\tau_c$	0.02 s
$K_{pg}$	$J_{gen}/3/\tau_c$
$K_{ig}$	$J_{gen}/37/\tau_c^2$
$K_{ag}$	$1/K_{pg}$
$K_{ps}$	$M_s \times 2\pi \times (0.1Hz)$
$K_{is}$	$M_s \times (2\pi \times (0.1Hz))^2/5$
$K_{as}$	$1/K_{ps}$
$K_{pm}$	$J_{prop} \times 2\pi \times (1Hz)$
$K_{im}$	$J_{prop} \times (2\pi \times (1Hz))^2/5$
$K_{am}$	$1/K_{pm}$

## 참 고 문 헌

- [1] R O'Rourke, "Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use-Background for Congress", Congressional Research Service Report(CRS RL33360), available online at [[www.fas.org/sgp/crs/weapons/RL33360.pdf](http://www.fas.org/sgp/crs/weapons/RL33360.pdf)], 2006, Dec.
- [2] Captain S S Chitale, "Integrated Full Electric Propulsion", *IE(I) Journal*, Vol. 90, pp. 18-22, 2010.
- [3] Christopher Holsonback, Tyler Webb, Dr. Thomas Kiehne, Dr. Carolyn Conner Seepersad, "System-Level Modeling and Optimal Design of an All-Electric Ship Energy Storage Module", ASNE Electric Machine Technology Symposium, Philadelphia, PA, 2006, May.
- [4] LS Ultracapacitor Product Sped sheet, available at [<http://www.ultracapacitor.co.kr/ko/ultracapacitor/cell.html>]
- [5] Robert E. Hebner, John D. Herbst, and Angelo L. Gattozzi, "Pulsed Power Loads Support and Efficiency Improvement on Navy Ships", *Naval Engineer Journal*, Vol. 122, Issue 4, pp. 23~32, 2010, Dec.
- [6] J.H. Lee, S.H. Lee, S.K. Sul "An Isolated Power System Based on Variable Speed Engine Generator with Super-capacitor", *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol.13, No.2, pp. 244-251, 2008. 4.
- [7] H.J. Yoo, S.K. Sul, S.M. Kim, Y.H. Park, "Power Flow Control and Optimum Fuel Efficiency Control for a Serises Hybrid Electric Vehicle", *Power Electronics Annual Conference*, pp. 75~77, 2007. 11.
- [8] Roozbeh IZ, M. Blanke, "A ship propulsion system as a benchmark for fault-tolerant control", *Control Engineering Practice* 7, pp. 227-239, 1999.

**김소연(金素蓮)**

1980년 3월 7일생. 2003년 해군사관학교 전기공학과 졸업. 2007년 서울대 공대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2007년~2009년 해군사관학교 전임강사. 2010년~현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정.

**설승기(薛承基)**

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 일본 Yaskawa Electric Corp. 상임연구고문. 2008년~2011년 기초전력연구원 원장. 1991년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 2005년~2007년 서울대 공대 부학장. 당 학회 JPE Editor-in-Chief.