

하이브리드 전기추진 선박의 에너지 저장장치 운용방안 연구

김소연, 설승기

Seoul National University

130-307, Daehak-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-744, KOREA

Abstract

본 논문에서는 직렬형 하이브리드 전기추진 시스템을 탑재한 선박에서 엔진 연료절감 및 동적 운항성능 개선을 위한 에너지 저장장치의 도입 필요성과 운용 방안을 제안하였다. 수MW급 전기추진 선박을 대상 모델로 하여 엔진-발전기 시스템의 전력사용 패턴을 분석하였고, 제안한 시스템의 효율성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

전기추진 선박(Electric Propulsion Ship)은 육상의 하이브리드 전기차와 마찬가지로 친환경성과 경제성을 이유로 크루즈선이나 연안운반선, 쇄빙선과 같이 운항특성이 비교적 다양한 특수선박을 중심으로 적용되어 왔으며, 최근 온실가스 감축에 대한 국제적 규제가 더욱 강화되면서 이러한 추세는 해양 운송수단에서도 점차 가속화되고 있다. 전기추진 시스템은 병렬형 또는 직렬형 하이브리드로 구성될 수 있는데, 전자는 저속엔진-발전기 시스템과 고속엔진 시스템이 병렬로 연결되어 저속모드에서는 전동에 의해 추진을 하고, 고속모드에서는 엔진 축이 직결되어 기계적으로 구동하는 방식(Combined Diesel-electric and/or Gas-turbine Propulsion)이다. 이 방식은 높은 기어비가 요구되어 시스템이 복잡하고 중량이 커지므로 고속 군함과 같은 일부 선박에만 국한되어 적용되고 있으며, 대부분의 전기추진 선박은 수MW급부터 수십MW급에 이르기까지 직렬형 하이브리드(Diesel-electric Propulsion) 방식을 적용하여 추진부하 동력과 일반부하 전력을 모두 공유하는 통합전력시스템(Integrated Power System)으로 구성된다(그림 1). 발전 시스템은 일반적으로 엔진-발전기가 선박 소요전력에 따라 3대 이상 설치되어 고전압의 주 모선에 링형(Ring) 또는 방사형(Radial) 구조로 연결되어 있으며 60Hz 교류전력으로 동기화되어 운용된다. 전력부하 시스템은 추진부하(Propulsion load)와 일반부하(Ship-service load)로 구분할 수 있는데, 선박의 추진력은 속력의 3승에 비례하므로 선박의 운항특성에 따라 추진부하의 소요전력 변동은 매우 두드러지는 반면, 일반부하의 소요전력은 특정 장비를 운용하는 시간 동안만 높은 전력이 요구된다. 본 논문에서는 수MW급 직렬형 하이브리드 전기추진 선박을 대상으로 전력사용 패턴을 개괄적으로 살펴보고, 에너지 저장장치를 적용하여 얻을 수 있는 유용성과 운용방안을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안된 시스템은 선박의 가속 구간에서만 요구되는 순간 최대전력을 에너지 저장장치가 보조함으로써, 발전기 부하율을 높일 수 있어 결과적으로 엔진-발전기 용량을 줄이고 운전효율을 개선시킬 수 있다. 또한 수MW의 펄스 부하를 운용할 수 있고, 선박 감속 시 회생에너지를 저장할 수 있어 빠르고 안정적인 시스템 성능을 보장할 수 있다.

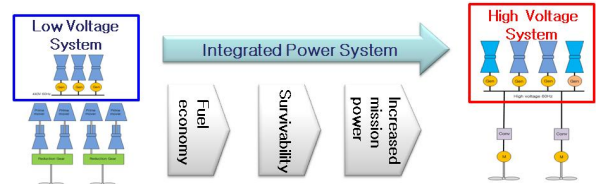


그림 1. 전기추진 선박의 통합전력시스템 운용 개념

2. 본론

2.1 직렬형 하이브리드 전기추진 시스템 구성

2.1.1 선박 전력부하 및 동특성 모델링

먼저 선박의 추진부하(P_{prop})를 모델링하기 위해서는 프로펠러 추진기의 회전속도(N_{prop})와 선박 속력(V_s)에 의해 결정되는 프로펠러 토크(Q_{prop})와 추력(Th_{prop})을 산출해야 하며, 이는 일반적으로 로빈슨 곡선(Robinson curve)에 의해 프로펠러 고유 값으로 주어진다(그림 2). 프로펠러 축(Shaft)에 전달된 추진동력(P_{prop})과 실제 선박의 추력으로 변환된 유효동력(P_{effect})은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 일반적으로 60~70%의 추진효율을 갖는다.

$$P_{prop} = Q_{prop} \cdot N_{prop} \quad (1)$$

$$P_{effect} = Th_{prop} \cdot V_s$$

프로펠러 추력은 선박저항(R_s)과 운항환경에 따른 외부저항(R_{ext})의 차이에 의해 선박 속력을 변화시키므로 식 (2)와 같이 선박 동특성을 모델링 할 수 있다.

$$Th_{prop} - R_s - R_{ext} = m_s \frac{dV_s}{dt} \quad (2)$$

여기서, m_s 는 선박의 톤수이며, V_s 는 선박 속도이다. 선박의 운항 중 운용하게 되는 일반부하(P_{ss})는 계절과 운항모드에 따라 다소 변하기는 하나, 추진부하에 비해 크게 변동하지 않으므로 본 논문에서는 1MW 고정된 용량으로 설정하였다. 그러나 특정 장비를 운용하는 경우 수MW의 펄스부하를 모델링에 추가할 수 있다.

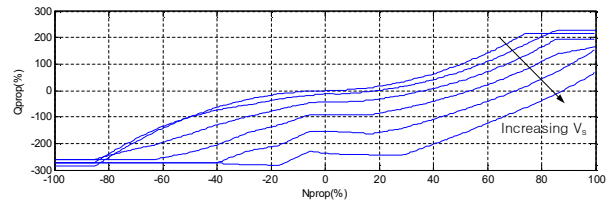


그림 2. 선박속도에 따른 프로펠러 회전속도와 토크의 상관관계

2.1.2 전력 제어(Power control) 구조 모델링

직렬형 하이브리드 전기추진 선박의 전력제어 구조(그림 3)는 소요전력에 따른 발전용량을 제어하기 위한 구조와 전력부하를 제어하기 위한 구조로 구분하여 구성할 수 있다. 엔진-발전기 시스템은 조속기(Governor)에 의한 PI 제어기와 엔진의 토크축적(Build-up) 시정수(τ_{gen})를 반영한 동특성, 그리고 시스템 관성(J_{gen})에 의한 동특성으로

모델링될 수 있다. 본 논문에서는 간략한 시스템 모델링을 위하여 발전기와 엔진을 60Hz 고정주파수(ω_e) 제어를 위한 속도제어 시스템으로 등가 변환하였으며, 전체 개루프 전달함수는 문헌[2]를 참고하여 식 (3)과 같이 모델링하였다.

$$\frac{\omega_e^*}{\omega_e} = \left(k_p + \frac{k_r}{\tau_i s} \right) \left(\frac{k_y}{\tau_c s + 1} \right) \left(\frac{1}{J_{gen} s} \right) \quad (3)$$

엔진 시정수(τ_{gen})는 원래 엔진 회전속도의 함수이나, 고정주파수 영역으로 환산하였으므로 상수로 가정할 수 있으며, 본 논문에서는 일반적인 발전기 특성을 고려하여 0.05초를 가정하였다[1]. 조속기의 PI 제어가 이득은 식 (4), (5)와 같이 선정하였다.

$$K_p = \frac{J_{eng}}{3\tau_c^2} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{k_r}{\tau_i} = \frac{J_{eng}}{27\tau_c^3} \quad (5)$$

속도제어기의 출력인 토크제한(Torque limit)은 발전용량 제한(Power limit)으로 환산하였으며, 실제적으로는 여러 대의 엔진-발전기 세트가 운용되므로, 필요한 전력 용량에 따라 적절히 운전되는 엔진-발전기 운용세트 조합에 따른 정격용량으로 제한된다. 특히 선주의 관행상 전체 발전용량이 발전기 정격용량의 45~85% 부하율로 운용된다고 가정하면, 부하율이 85%를 넘는 전력지령(P_{gen}^*)이 생성되는 경우 준비된 엔진-발전기 세트를 추가로 운용해야 하므로, 결과적으로 전체 엔진 발전기 세트는 통상 경부하에서 운용되는 모드가 되기 쉽다. 또한 선박의 급 가속 시 과부하를 피하기 위해 수 분(min)의 시지연을 가지고 엔진-발전기가 운용되고 있어 이로 인해 선박의 가속 특성이 제한된다. 만약 순간 최대출력 구간에서 에너지 저장장치의 도움을 받을 수 있다면 엔진용량의 증대 없이도 선박의 동특성을 향상시킬 수 있다.

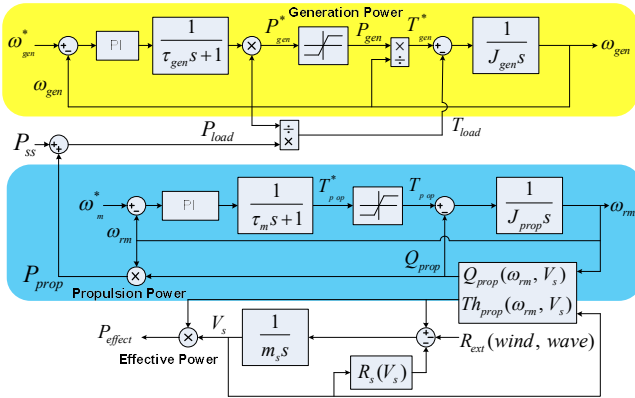


그림 3. 직렬형 하이브리드 전기추진 선박의 전력제어 구조

2.2 에너지 저장장치 운용 방안 제안

표 1은 약 8MW급 발전용량을 가진 직렬형 하이브리드 전기추진 선박에서 운항모드에 따른 부하율을 예상한 값이다. 엔진-발전기 세트는 대용량(MDG) 2대와 소용량(SDG) 3대가 설치된 경우로 가정하였다. %MCR은 선박이 정속구간에 도달하였을 때 장시간 동안 운용될 부하율로써 가속구간에서는 발전기 정격용량을 넘지 않도록 적절한 기율기로 속도를 증가시켜야 하며, 무리하게 가속하는 경우 시스템이 일시적으로 불안정해질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 에너지 저장장치의 효율성을 보이기 위해 가속구간 동안은 전력지령(P_{gen}^*)의 평균값만 취하여 발전기 용량을 선정한 후 발전기 전력을

내보내고, 그 차이(P_{es})는 에너지 저장장치에서 부담하도록 구현하였다(그림 4).

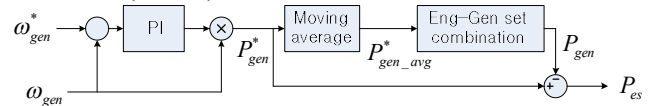


그림 4. 에너지 저장장치를 적용한 전력제어 구조

2.3 시뮬레이션 결과

그림 5는 프로펠러 속도 지령을 0-18-0(rad/s)로 인가한 경우이다. 에너지 저장장치를 사용하면 기존 시스템보다 약 60초 더 빨리 가속하여도 전력제한에 걸리지 않으면서 모델선박은 약 70m 더 전진하였으며, 선박 정지 시 회생에너지를 저장할 수 있음을 볼 수 있다. 약 100MJ 에너지 저장장치를 사용하였으므로, 부하율을 90%까지 사용하거나 발전기 엔진-발전기를 한 대 적게 운영하여도 안정적이다. 또한 전원 주파수 변동을 최소화하여 전력 품질을 높일 수 있다.

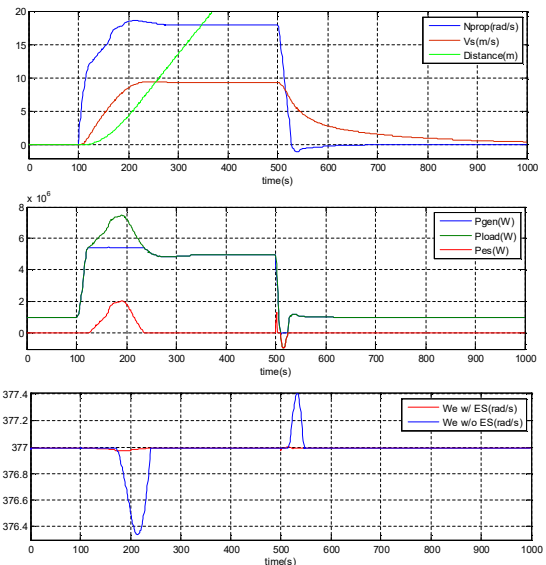


그림 5. 에너지 저장장치를 적용한 시뮬레이션 결과

구분	No.MDG		No.SDG		%MCR	
	w/o ES	w/ ES	w/o ES	w/ ES	w/o ES	w/ ES
Port or Anchor	0	0	2	1	(45%)	(90%)
Manoeuvring 1,2,3,(4)	0	0	2	2	(56%)	(56%)
Cruise 5,(6)	0	0	2	2	(58%)	(58%)
Cruise 7,8,9,(10)	0	0	3	2	(57%)	(85%)
Cruise 11,12,(13)	1	0	1	3	(71%)	(83%)
Cruise 14,(15)	2	2	0	0	(68%)	(68%)
Cruise 16	2	2	1	0	70%	80%
Cruise 17	2	2	2	1	67%	78%
Cruise 18	2	2	3	2	69%	79%

표 1. 운항모드 별 부하율 사용영역 비교

3. 결론

에너지 저장장치는 하이브리드 전기추진 선박에서 가속 시 일어날 수 있는 일시적인 전력제한 환경에서도 높은 부하율로 안정적인 시스템 운영을 보장할 수 있으며, 빠른 가속을 가능하게 하여 선박 운항특성을 개선할 수 있다.

참고문헌

[1] Roozbeh IZ, M. Blanke, "A ship propulsion system as a benchmark for fault-tolerant control", Control Engineering Practice 7, pp. 227-239, 1999