

하이브리드 전기 추진 시스템의 전력 제어에 관한 연구

오진석† · 조관준* · 함연재** · 배수영*** · 정성영****

† 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수, *,***,**** 한국해양대학교 대학원, ** 동현 씨스텍

A Study on Power control for Hybrid electric propulsion system

Jin-Seok Oh† · Kwan-Jun Jo* · Youn-Jae Ham** · Soo-Young Bae*** · Ji-Young Lee****

† Professor, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*,***,**** Graduate school, Division of Mechatronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

** D.H. systech Co, LTD, Busan 616-891, Korea

요약 : 본 논문은 하이브리드 전기 추진 시스템의 전력 제어에 관한 연구를 수행하였다. 하이브리드 전기 추진 시스템은 기본적으로 발전기와 축전지 전원을 이용하여 선박을 추진하는 시스템이다. 하이브리드 추진 시스템은 공급되는 전력을 최소화하기 위한 제어 알고리즘으로 동작한다. 본 논문에서는 하이브리드 전기 추진 시스템의 효율을 증가시키기 위한 축전지 충전 알고리즘을 제안한다. 실험을 통하여 제어 알고리즘이 하이브리드 전기 추진 시스템에서 정상적으로 동작하는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 전기추진, 연료저감, 전력제어, 어선추진, 비상 전력

Abstract : This paper presents the power control for the hybrid electric propulsion system. In this paper, the hybrid propulsion system consists of the generator and battery as power supply system in ship. The hybrid control system is designed with energy saving algorithm for decreasing the power consumption of power supply system. This paper suggests the method to increase efficiency of hybrid electric propulsion system by developing battery charging system. The performance of power control system is analyzed with the experiment equipment for hybrid propulsion system, and the results showed a good property

Key words : Electric propulsion, Reduce fuel consumption, Power management, Fishing boat propulsion, Emergency power

1. 서 론

최근 원유 가격이 사상 최고 수준으로 상승한 후 높게 유지되고 있다. 에너지경제연구원의 발표에 의하면 이러한 고유가 상황은 중장기적(2010년까지)으로 지속될 것으로 전망하고 있다. 유류 의존도가 높은 수산업의 특성상 유가 상승으로 인한 어업 비용이 증가되어 출어 포기 등 생산 활동의 직접적인 위축이 유발되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 방법이 제안되고 있다. 하나의 방법으로 대형 어선에서는 저질의 연료유를 가열하여 중질 연료유와 섞어서 사용하는 시스템을 사용하고 있다. 그러나 이러한 시스템은 설치용적이 커서 소형 어선에는 적용이 어려운 실정이다.(Ban et al., 1999; Abdel-Rahim and Quicoe 1996; Shida et al., 2003; Rawson, 1986).

어선의 운용은 정속 운전 모드의 비율이 낮고, 임의로 운전하게 되므로 프로펠러의 효율 향상을 통한 운항비 절감에는 한계

가 있다. 또한 디젤 엔진을 이용한 추진 체계는 저속으로 운항 시에 엔진 효율이 급감하여 연료 소비율이 증가하게 된다. 또한 어군 탐지 및 어업을 위한 조업을 위해 저속으로 운전하는 경우 엔진의 소음 등에 의한 조업의 방해 또한 문제점으로 인식되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전기 추진 시스템이 대안으로 제안되고 있다(Oh et al., 2008; Maffioh, 1994; The Journal of ship's., 2004; Jo et al., 2007).

발전기를 이용한 전기 추진 시스템은 추진 속도가 변화하더라도 발전기의 속도가 일정하기 때문에 디젤엔진에 의한 추진 시스템에 비하여 성능 저하가 작다. Fig. 1은 전기 추진 모형 선박의 속도에 따른 소비 전력을 나타낸 것이다.

Fig.1로부터 전기 추진 선박의 경우에도 일정 속도 이하(100rpm)에서는 전력 소모가 적은 것을 알 수 있다. 어선의 경우 조업 중에는 저속으로 운항하기 때문에 발전기를 써서 운항하는 것은 비효율적일 수 있다(Oh et al., 2008).

† 교신저자 : 오진석(정회원), ojs@hhu.ac.kr, 051)410-4283

* 정회원, whrhkswns@damu.net 051)410-4866

** 정회원, yjham63@chol.com 051)417-8086

*** 정회원, whateverz@nate.com 051)410-4866

**** 정회원, whswo85@nate.com 051)410-4866,

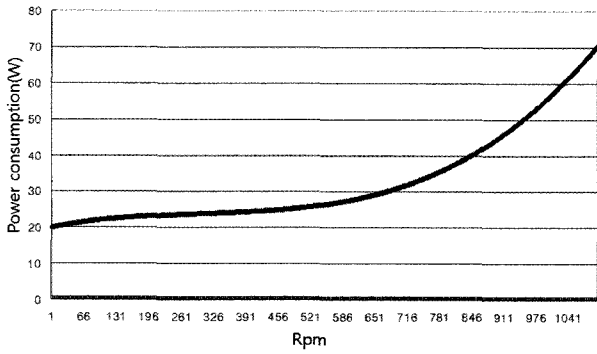


Fig. 1 Power consumption of electric propulsion

본 논문에서는 저속구간에서 축전지로 운항하고 고속 구간에서 발전기로 운항하는 하이브리드 형태의 전기 추진 시스템을 제안한다. 또한 하이브리드 전기 추진 시스템에서의 축전지 전원 관리 및 충전 방법을 연구하여 하이브리드 전기 추진 시스템의 전력 제어 시스템의 효율성을 높이고자 한다.

2. 하이브리드 추진 시스템

2.1 하이브리드 전력 제어 시스템

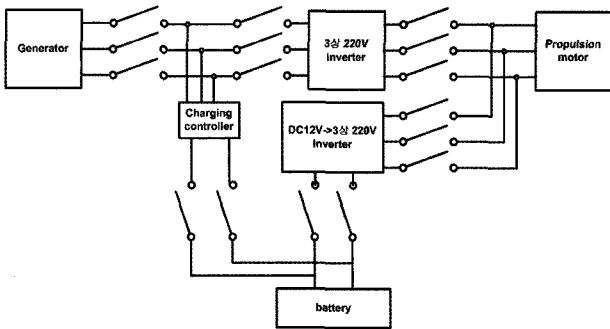


Fig. 2 Block diagram of hybrid power system

Fig. 2는 하이브리드 전기 추진 시스템의 시스템 계통도를 나타낸 것이다. 하이브리드 전기 추진 시스템은 일반적인 전기추진 시스템과 달리 전원으로 발전기와 축전지를 선택하여 사용할 수 있는 시스템이다.

어선의 경우 항구에서 조업 지점까지 운항 할 때에는 고속으로 이동해야 하지만 조업 지점에서는 저속으로 이동하면서 어군을 탐지하거나 어획작업을 수행한다. 그러므로 하이브리드 전기 추진 시스템은 항구에서 조업 지점까지는 일반적인 전기 추진 시스템으로 발전기 전력을 이용하여 이동하고 조업 지점에서는 축전지의 전원을 이용하여 저소음으로 이동하면서 추진할 수 있도록 구성하였다.

또한 발전기 전력을 사용하며 중·저속으로 운항할 때에는 발전기 전력을 축전지에 충전하도록 하여 발전기의 부하를 일정이상으로 유지하도록 하였다. 하이브리드 전기 추진 시스템은 축전지 전원을 이용하여 전기 추진 시스템의 제어성 및 저

소음성을 극대화 한다. 또한 발전기의 저부하 사용을 줄여 발전기의 운용에 따른 소비율을 낮추고 중속운전에서 충전을 통하여 발전기 부하를 일정하게 하도록 한다.

축전지 충전 시스템은 벅 컨버터를 이용하여 충전전력량을 제어할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 벅 컨버터(buck converter) 회로를 나타낸 것이다.

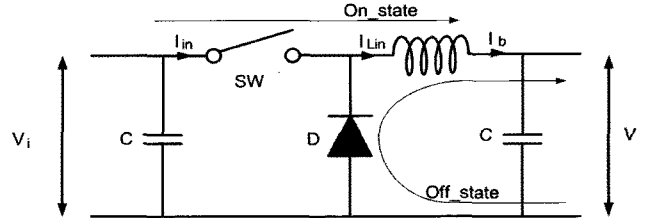


Fig. 3 Block diagram of the buck converter

벅 컨버터는 스위치 SW가 도통되면(on-state) 입력전압에 의해 코일에 에너지가 축적된다. 이때 다이오드 D는 차단상태가 된다. 스위치 SW가 오프 상태(off-state)에서는 코일에 축적된 에너지가 다이오드 D와 도통회로를 구성하면서 출력 측에 에너지를 전달한다. 벅 컨버터의 입출력 전압 관계식은 식(1)과 같다.

$$V_b = V_i \frac{T_{on}}{T} = \int_0^T v(t) dt = \alpha V_i \quad (1)$$

벅 컨버터 On-State 일 때 회로 방정식은 식(2)와 식(3)과 같다. 이때 T_{on} 은 on-state 시간이고, T는 전체 스위칭 시간, V_i 는 입력 전압 값다. v 는 스위칭에 의해 변화하는 출력 전압이고, α 는 시비율을 나타내고 V_b 는 벅컨버터 출력 전압 값이다.

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = V_i - V_b - R_L i_{L_m} \quad (2)$$

$$\frac{dV_b}{dt} = -\frac{1}{RC_b} V_b + \frac{1}{C_b} i_{L_m} \quad (3)$$

여기서 식 L_m 은 코일의 인덕턴스 값이고, R_L 은 코일의 저항, i_{L_m} 은 코일에 흐르는 전류이고, C_b 는 벅컨버터 출력 단 쪽의 콘덴서의 용량을 나타낸 것이다. 그리고 Off-state 상태에서 회로 방정식은 식(4) 및 식(5)로 표현할 수 있다.

$$L \frac{di_{L_m}}{dt} = -R_L i_{L_m} - v_b \quad (4)$$

$$\frac{dV_b}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{L_m} - \frac{1}{RC} V_b \quad (5)$$

수식에서 벅 컨버터는 on/off시간의 비율에 따라 출력되는 전압이 변화하게 된다.[8] 축전지 전압과 벅 컨버터의 출력 전압의 차이에 따라 충전되는 전력량이 변화하게 된다. 이를 수식으로 나타내면 식(6)과 같다(Jo et al., 2007).

$$P_c = V_{bat} \times \left(\frac{V_b - V_{bat}}{R} \right) \quad (6)$$

여기서, P_c 는 충전 전력, V_{bat} 는 축전지 전압, V_b 는 벅 컨버터 출력 전압, R 은 축전지 내부 저항 및 도선 저항을 나타낸다.

2.2 하이브리드 전력 제어 알고리즘

하이브리드 전력 제어 시스템의 제어 알고리즘에서 가장 중요한 점은 전력 변환 및 전동기 속도 제어 시스템이다. Fig. 4는 전력 제어와 속도제어 알고리즘의 관계를 나타낸 것이다.

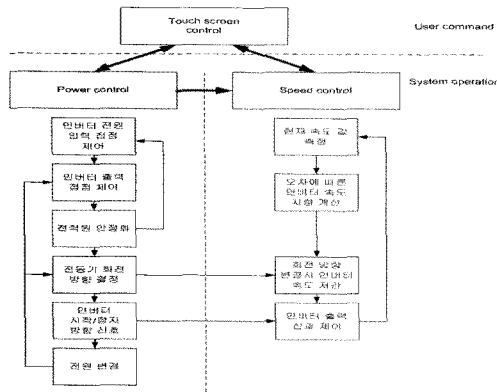


Fig. 4 Block diagram of power & speed control algorithm

사용자의 속도 명령, 운전 방향(정역회전), 전력원 변경 명령을 터치스크린으로 인식하여 시스템 내부의 전력제어 알고리즘과 속도제어 알고리즘으로 사용자의 정보를 전달한다.

전력제어 알고리즘은 인버터를 제어하여 전동기의 회전 방향과 전력원의 변경 등의 동작을 수행한다. 전력원 변경 또는 회전 방향 전환 동작에서 속도 제어 알고리즘에 영향을 주어 전동기를 정지한 후 전원 변경 또는 회전 방향 변경을 수행하도록 구성하였다. 속도제어 알고리즘은 사용자의 명령과 전력제어 명령을 받아 전동기의 속도를 목표치에 맞도록 유지하는 동작을 수행하며, 부하가 변하더라도 전동기의 속도는 일정하게 유지될 수 있도록 구성하였다.

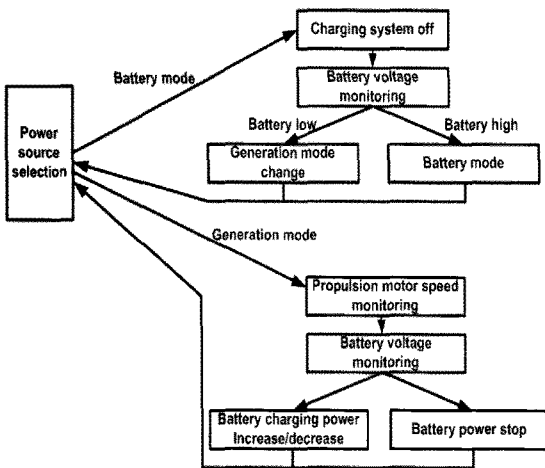


Fig. 5 Battery charging algorithm

Fig. 5는 축전지의 충전 알고리즘을 나타낸 것이다. 충전 알고리즘은 선박의 운항 상태에 따라 축전지 충전을 결정하게 된다. 축전지의 충전은 발전기를 전원으로 사용하는 상황에서 이루어진다.

발전기로 운전하는 경우에는 축전지 전압이 13.5V이하로 충전되어 있지 않은 경우에만 충전 동작을 수행한다. 이때 충전 전력량은 발전기의 부하가 80% 되도록 하며 최대 정격 전류량을 제한하도록 한다. 즉 추진 전동기가 80% 이상으로 운전하는 상황에서는 축전지를 충전하지 않고 추진 전동기가 80% 이하로 운전하는 경우에만 발전기의 일부 전력을 축전지로 충전하게 한다.

축전지로 운전하는 경우에는 충전 시스템을 정지하여 역전으로 축전지의 전력이 제어회로를 통하여 다시 축전지로 도는 무효순환전력을 차단한다. 이후 축전지의 전원을 계속 점검하여 11.5V 이하가 될 경우 발전기 모드로 변환하는 동작을 수행한다. 발전기 모드에서 축전지 전원 모드로 운전하려 할 경우 축전지 전원은 반드시 12V 이상이 되도록 하여 시스템의 안정성을 확보한다.

3. 시스템 실험

3.1 실험 시스템 구성

실험 시스템은 실제 하이브리드 전력 시스템을 축소된 형태로 제어 알고리즘을 실험할 수 있도록 구성하였다. 전력 변환 동작과 이때 제어 알고리즘에서의 속도제어 동작을 중점적으로 실험할 수 있도록 구성하였다. 또한 축전지 충전 알고리즘을 시험하기 위하여 추진 전동기 속도에 따른 축전지 충전량의 변화량을 실험하였다.

1) 하이브리드 전력 제어 시스템

Fig. 6은 하이브리드 전력제어 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 하이브리드 전력제어 시스템은 제어부와 동작부로 나누어진다. 동작부는 추진 전동기와 차단기 인버터로 구성된다. 두 개의 전원으로 발전기를 대신한 상용전원(220V 3상)과 축전지(12V)를 사용하였다. 각 전력제어를 위해 인버터 입출력 단에 차단기를 설치하였다. 상용전원(발전기)을 사용할 경우에는 축전지 측의 인버터 입력 및 출력 전원을 제거한 상태에서 상용전원 쪽의 인버터를 인가하여 추진 전동기를 구동한다. 축전지 전원을 사용할 경우에는 축전지 전원을 단상 정현파 인버터를 통하여(DC12V→AC220V) 승압한 후 이를 단상 입력 3상 출력의 특수 인버터에 인가하여 추진 전동기를 제어한다.

각 차단기는 연결되는 전원을 차단기 구동전원으로 사용하도록 하여, 상용전원이 인가되지 않을 경우에 제어기에서의 오동작이 발생하여 차단기의 신호가 연결되더라도 차단될 수 있도록 구성하였다.

제어부는 중앙 제어기, 인버터 제어 모듈 및 차단기 제어 모듈로 구성되어 있다. 하이브리드 전력제어 시스템은 중앙제어

기의 신호(TTL level)를 인버터 제어 모듈을 통하여 인버터에 알맞은 점접 신호 또는 0-5V의 선형적인 신호로 변화하는 동작을 수행한다. 차단기 제어 모듈은 동작부의 차단기와 중앙제어기를 절연한다. 차단기는 AC 220V의 전원으로 동작하고 중앙제어기는 저전압(DC 0-5V)으로 동작하기 때문에 절연하지 않을 경우 중앙제어기의 소손을 발생시킬 수 있다. 이를 위해 릴레이와 포토커플러를 이용하여 절연회로를 구성하였다. 제어부와 동작부는 전기적으로 절연되도록 하였다.

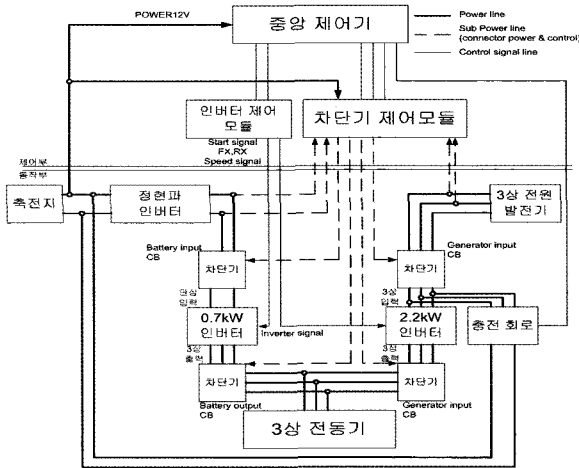


Fig. 6 Hybrid power control system

2) 축전지 충전 제어 시스템

축전지 충전 제어 시스템은 축전지로 충전 전압 및 전류량을 측정하면서 중앙제어기에서의 명령에 따라 충전되는 전력량을 조절하는 시스템이다. 충전되는 전력량을 조절하기 위하여 벽 컨버터 형태의 제어기를 구성하였다. Fig. 7은 충전 제어 시스템의 구조를 나타낸 것이다

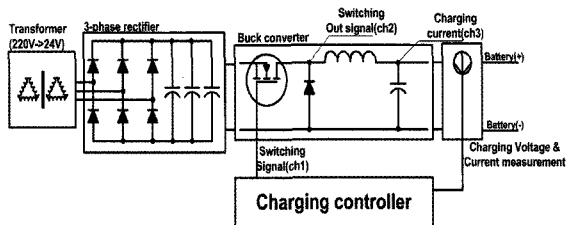


Fig. 7 Schematic diagram of battery charging system

구조는 상용전원을 변압기를 이용하여 24V로 감압한 후 3상 정류 회로로 평활하여 충전량에 따라 스위칭 duty를 변화시켜 충전량을 조절하도록 하였다. 충전 전류량은 hole sensor를 이용하여 측정하였다. 충전량은 전력제어 시스템의 중앙 제어기에서 명령을 받아서 동작하도록 구성하였다. 중앙 제어기에서 현재 전동기의 속도와 전원 모드를 충전 제어기에 보내주면 축전지의 전압과 충전전력을 측정하여 이를 종합하여 알고리즘에 따라 충전하도록 하였다. 이러한 방법을 통하여 중앙제어기의 시스템 부하를 줄이고자 하였다.

3.2 실험 결과

1) 하이브리드 전력제어 실험 결과

Fig. 8은 하이브리드 추진 시스템의 실험장치를 나타낸 것이다. 각 층은 추진 전동기, 인버터 시스템 및 차단기 주제어기 등으로 구성되어 있다. 실험결과는 두 전력원이 전환과 저부하 운전에서 고부하 운전으로 변화하는 과정에서의 인버터 지령 주파수와 전원 변경(3상 전원에서 축전지 전원으로 변경)을 시험하였다. 전원의 변경은 터치스크린으로 변경 명령을 내릴 때에 제어기의 제어신호를 나타낸다.

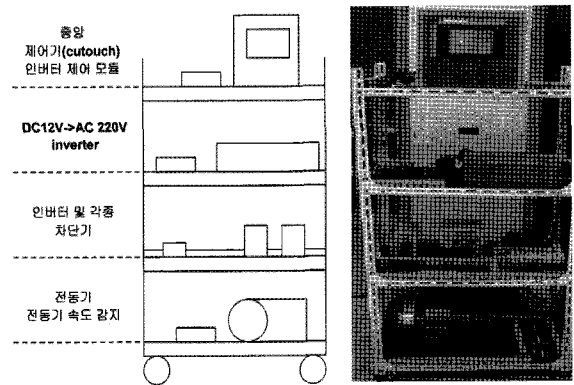


Fig. 8 Test equipment of hybrid propulsion power system simulator

Fig. 9는 전력원으로 축전지를 사용하다가 발전기로 변환하는 과정에서의 차단기(CB: Circuit breaker)의 신호를 나타낸 것이다. Fig. 10은 전력원 변환에 따른 차단기의 동작과 속도 제어 동작의 변화를 나타낸 것이다.

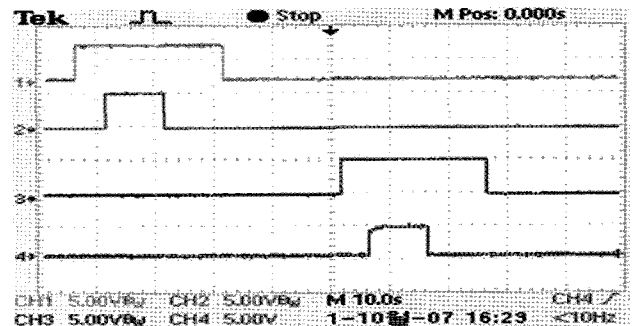


Fig. 9 The experimental waveforms of the inverter power control system(ch1 : battery inverter input CB, ch2 : battery inverter output CB, ch3 : generator inverter input CB, ch4 : generator inverter output CB)

전력원 변환 시에 추진 전동기를 정지시킨 후, 지연 시간을 두어 인버터의 기동 및 차단기의 안정적인 동작을 유도하였다. Fig. 10은 인버터의 출력을 0으로 하여 추진 전동기를 정지시킨 후 차단기를 제어하여 전력원을 변경하는 동작을 나타낸 것이다. 실험을 통하여 하이브리드 전력제어 시스템의 안정적인 동작을 확인할 수 있었다.

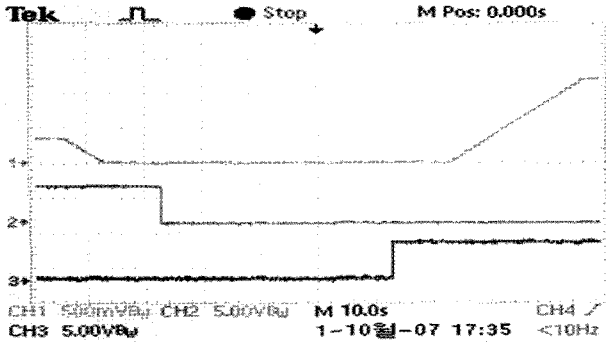


Fig. 10 The experimental waveforms of propulsion motor speed control(ch1 : inverter signal, ch2 : battery inverter output CB signal, ch3 : generator inverter output CB signal)

2) 축전지 충전 제어 시스템

Fig. 11은 축전지 충전 제어기를 나타낸 것이다. 3상 전원을 전파 정류 회로로 정류하여 박 컨버터를 통하여 충전량을 변화시키는 시스템이다. 충전 제어기의 경우에도 전력 부분과 제어 부분을 분리하였다. 스위칭 소자와 정류단은 전류가 흐르게 됨으로 발열을 고려하여 방열판에 부착하는 형태로 구성하였다.

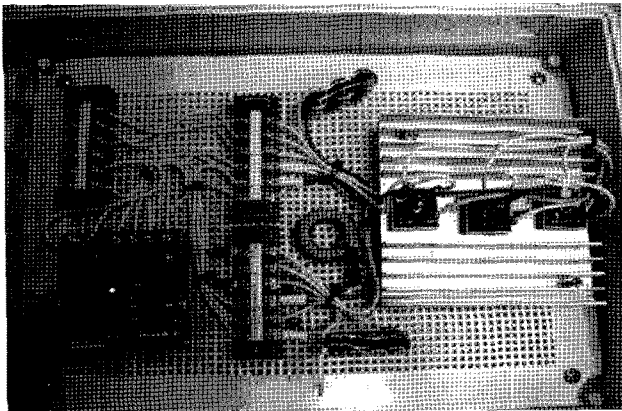
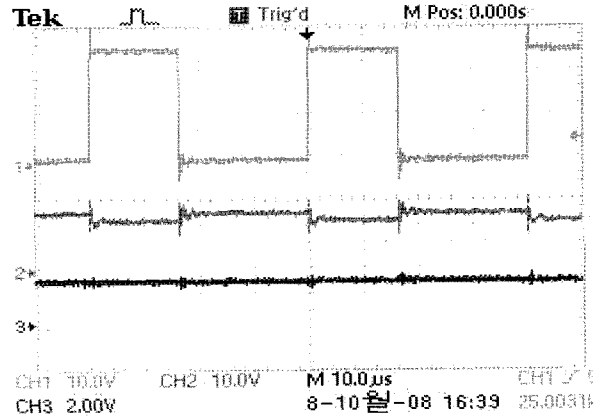


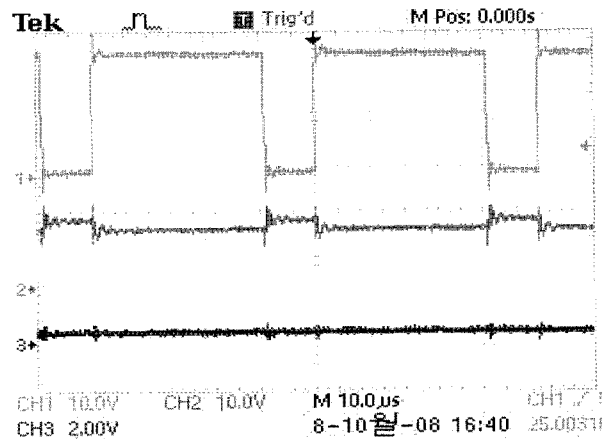
Fig. 11 Photograph of battery charging system

Fig. 12는 축전지 충전 제어기의 동작 파형을 나타낸 것이다. 측정 위치는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 12의 채널 1번은 스위칭 파형을 나타내며 채널 2번은 스위칭 후단 파형으로 박컨버터의 p채널에 의하여 역상으로 스위칭 된 것을 알 수 있다. off시에는 축전지 전압이 되고 on시에는 입력 전압으로 상승하는 것을 알 수 있다. 채널 3번은 충전 전류량을 나타낸다. 1V에 5A를 나타낸다. 전동기의 속도 변화에 따른 충전량의 변화를 볼 수 있다.

실험을 통하여 추진 전동기의 속도에 따라 충전량이 변화 되는 것을 알 수 있다. 저속에서는 많은 양을 충전하고 속도가 올라가면 충전되는 전력량을 줄여 발전기 시스템에서 일정한 출력을 생산하도록 하였다.



(a) speed :40%



(b) speed : 60%

Fig. 12 The experimental waveforms of battery charging system(ch1:Switching, signal ch2 : charging voltage, ch3 : charging current)

4. 결 론

본 논문은 두 개의 전력원인 축전지와 발전기를 이용하여 선박의 운항 특성에 따라 전력원을 선택하는 하이브리드 전기 추진 시스템을 제안하였고, 이 시스템의 핵심 요소인 전력제어 시스템을 실험하였으며, 실험을 통해 실제 선박에서의 하이브리드 추진 시스템의 제어 가능성을 시험할 수 있었다. 또한 하이브리드 전기 추진 시스템의 추진 속도에 따른 충전 방법을 개발하고 소형 충전 제어 시스템을 시험하였다.

앞으로 실용화 연구를 통하여 실제 선박에 적용될 수 있는 추진 시스템의 개발을 기대한다.

후 기

본 연구는 중소기업 기술 혁신과제의 “연료저감을 위한 소형 어선용 하이브리드 전기 추진 시스템 개발”과 수중운동체 기술 특화 연구센터의 “선박용 대용량 고효율 전동기 성능 예측 및 해석 기법 연구”의 일부로 수행 되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- [1] Abdel-Rahim, N. M. and Quaicoe, J. E.(1996), "Analysis and Design of a Multiple Feedback Loop Control Strategy for Single-Phase Voltage-Source UPS Inverters," IEEE Trans.on Power Electron., Vol. 11, No. 4, pp. 532-541.
- [2] Ban, H. S Kwak, H. S., and Mok, and G. H.(1999), "Unbalance load current at operating in parallel of lead acid batteries connection condition", KIPE power electronics annual conference, pp.210-213.
- [3] Jo, K. J., Yoo, H. H., Gug, S. G., and Oh, J. S.(2007), "Design and analysis of power system for bouy" Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 31, No. 3, pp.229-233.
- [4] Maffioh, P., Comaretto, A., Pucmi, G., Ftacchua, M.(1994), "Alternative propulsion concepts for product carriers", Proceeding of the international conference on ship and marine research.
- [5] Oh, J. S., Jo, K. J., Park, C. H., Ham, Y. J, Kwak, J. H., and Lee, J. Y.(2008) "A study on the hybrid propulsion system for fishing boat", Journal of the korean Society of marine engineering, Vol. 35, No. 5, pp.677-683.
- [6] Rawson, K. J.(1986), "The Architecture of Maritime System", IEEE Proc. A Vol. 133, No. 6, pp. 333-337.
- [7] Shida, Y., Kanda, M., Ohta, K., Furuta, S., and Ishii, J.(2003), "Development of inverter and power capacitors for mild Hybrid Vehicle-toyota"crow", International journal of automotive technology, Vol. 4, No.1. pp.41-45.
- [8] The journal of ship's engineering marine propulsion & auxiliary machinery(2004), pp.22-24.

원고접수일 : 2008년 9월 2일

심사완료일 : 2008년 12월 18일

원고채택일 : 2008년 12월 24일