

태양광을 이용한 선박용 하이브리드 발전시스템 개발(Ⅱ)

A Study on the Development of Solar Hybrid Generating System for Ship

최한규^{†*}, 김희제^{**}, 이경준^{***}

Han-Kyu Choi^{†*}, Hee-Je Kim^{**}, Kyung-Jun Lee^{***}

요 약 문

본 연구는 태양광 발전시스템을 선박에 설치하고, 동 시스템과 연계한 선박 발전시스템에 대한 해상 실증 실험을 통하여 발전 시스템의 작동, 신뢰성과 선박 복원성능 및 경제성을 평가하고, 육상으로 송전하는 계통연계형 시스템에 대한 실험을 동시에 수행하였다. 독립형 발전시스템 선내 부하에 안정적인 전원 공급이 가능하고, 태양광 발전과 선내 발전시스템간의 하이브리드 운전이 안전하여 상용화에 문제가 없으며, 계통연계형 태양광 발전 수익모델 가능성을 확인하였다. 본 시스템 설치선박은 단기간 투자비용 회수가 가능하고, 경제성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 태양광 관련 설비에 대한 안전을 확보하기 위하여 안전기준(안)을 제시하였으며, 앞으로 다양한 용량의 발전시스템 선박에 적용이 가능할 것이다.

※ **핵심용어** : 결정질 태양전지, 솔라 컨트롤러, 계단파 인버터, 계통연계형 발전시스템, 오실로스코프 파형, 자가방전률, 고주파절연방식

1. 서 론

기후변화 협약 및 국제적으로 온실가스 배출량 감축을 위한 규제가 강화되는 추세에 따라 각 국에

서는 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발 및 보급을 위한 다양한 지원정책을 제도화 하여 지원하고 있다.

정부는 2030년까지 국가 에너지 효율을 획기적

* 선박안전기술공단 기술연구실

** 부산대학교 전기공학과 교수

*** 부산대학교 전기공학과 박사과정

† 논문주저자

으로 개선해 에너지 저소비 사회를 만들기 위해 화석연료의 비중을 줄이고 저탄소·청정에너지 비중을 확대하는 한편 그린에너지 산업을 적극 육성해 환경이 성장을 선도하는 녹색강국을 구현하는 정책 추진과 태양광 선박 보급을 위한 지원 방안을 마련 중이다.

화석연료를 대체할 수 있는 태양에너지를 이용한 친환경 선박 개발이 독일, 호주 등 국외에서 활발하게 진행되고 있으나, 국내에서는 선박에 직접 적용이 가능한 소용량 태양광 발전시스템의 연구 및 태양광 발전 시스템과 기존 발전기를 연계한 태양광 하이브리드 발전시스템에 대한 연구개발 사례는 미미한 실정이다.

현재까지 개발된 실리콘 태양광 발전기는 모듈의 무게 및 크기가 커서 설치 면적 등의 제약으로 인한 중소형 단동형 선박의 주동력으로 사용하기에는 실용성이 떨어지므로, 신조선뿐만 아니라 기존 선박의 구조적 변경 없이 태양광 발전시스템과 선박 발전기를 연계하여 선내 추진 이외의 동력으로 활용할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다.

또한 현재 한전전력 공급이 가능한 지역에서는 국내 태양광 보급의 97% 이상이 계통연계형이며, 이러한 구성 시스템을 이용하여 잉여전력 발생시에 한전으로 송전하고 있다. 이와 같이 선박에서 생산한 잉여전력의 부가가치 창출을 위한 한전으로 송전할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

태양전지의 대규모 소비처가 될 수 있는 선박 산업에서 시장 선점 효과와 선박에 사용되는 화석연료 에너지의 절감을 통해서 경제적 효과뿐만 아니라 배출가스 감축으로 인한 환경보호를 통하여 정부의 저탄소 녹색성장 정책에 부응할 수 있는 친환경 선박 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 태양광 발전시스템을 선박에 설치하고, 동 시스템과 연계한 선박 발전시스템에 대한 해상 실증 실험을 통하여 경제성, 발전 시스템의 작동 및 신뢰성과 선박 복원성능을 평가하고, 육상으로 송전하는 계통연계형 시스템에 대한 실험을 동시에 수행한 결과를 바탕으로 한 선박에 적합한 최적의 선박용 태양광 하이브리드 발전시스템 및 계통연계형 시스템 개발과 발전설비에 대한 최소한의 안전설치기준안을 제시하고자 한다.

2. 태양광 발전시스템 구성

2.1 태양전지 및 어레이 지지대

Table 1은 결정질 태양전지의 기계적인 특성(Mechanical Characteristics)을 나타낸 것으로 주요 내용으로는 무게 22kg이며, 길이, 폭, 두께는 각각 1460×980×50mm이다.

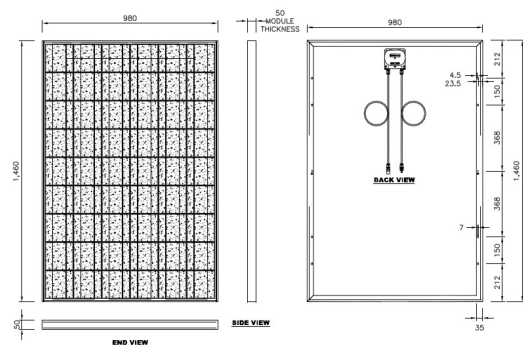


Fig. 1 200W급(결정질) 태양전지 규격

태양광 하이브리드 발전시스템을 실선에 설치한 200W급 결정질 태양전지에 대한 실제모습은

Table 1 결정질 태양전지의 기계적 특성

Dimensions	1460×980×50mm
Weight	22kg
SolarCells	54cells(156mm×156mm) in a 6×9 matrix connected in series
Output Cables	Cable with polarized weatherproof DC rated connectors:Cable length-1000mm(+ -)
Construction	Front : High-transmission 3.2mm low iron tempered glass; White back sheet Encapsulant; EVA
Frame	Anodized aluminum frame; Color: silver

Fig. 2와 같다.

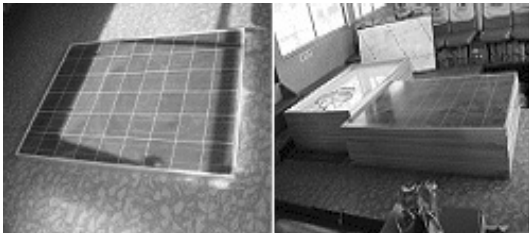


Fig. 2 200W급(결정질) 태양전지

어레이 지지대는 각파이프 40×40×2t, 50×30×1.5t를 기준 50A, 80A 파이프 위에 한 현에 8개, 양현에 16개 태양전지를 지지할 수 있도록 용접을 하고 끝부분은 M6 볼트-L25 SUS로 구성하였다.

2.2 전기설비

2.2.1 독립형 태양광 발전시스템 구성

일반적으로 태양전지의 구성은 Fig. 3과 같이

여러 개의 태양전지를 직·병렬로 연결해서 만든 태양전지 모듈을 사용한다. 모듈로 연결되면 태양전지의 효율은 약간 떨어져서 단결정 전지의 경우 15% 정도가 된다. 태양광 발전기는 이러한 모듈이 여러개 합쳐져서 이루어진다. 태양전지 모듈은 태양전지의 위아래를 투명한 합성수지로 싸고, 위에 유리판을 덮은 형태로 되어 있다.

태양전지에서는 항상 직류전기가 생산되고, 배터리에도 직류전기가 저장된다. 그러나 선박내에서 사용하는 조명기구나 항해 장비, 음향기기는 교류전기에 맞도록 제작되었기 때문에 태양전기를 이들 설비에 사용하기 위해서는 직류를 교류로 바꾸어 주어야 한다. 이 장치를 변환기(inverter)라 부르는데, 독립형의 경우도 대부분 이 장치를 설치한다. 변환기는 태양광 발전시스템의 심장이라고 불릴 정도로 중요한 장치이다. 이 장치에서 태양전지의 전기를 받아서 전달해 주는 일을 제대로 해주지 못하면 전기가 아무리 많이 생산되어도 소용이 없기 때문이다.

이러한 일반적인 태양광 발전시스템에서 태양전지, 배터리, 전력조절 장치 부분만 선박 전기시스템에 결합하여 사용이 가능하다.

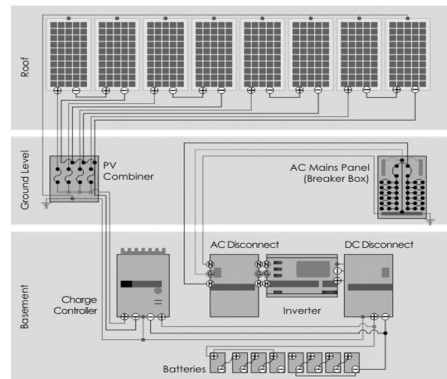


Fig. 3 태양광 발전시스템 기본 구성

2.2.2 태양 전지 및 솔라 컨트롤러

독립형 태양광 발전 시스템에서 사람의 두뇌에 비유할 수 있는 솔라 컨트롤러는 앞서 설명한 시스템에서 전력조절장치에 해당한다.

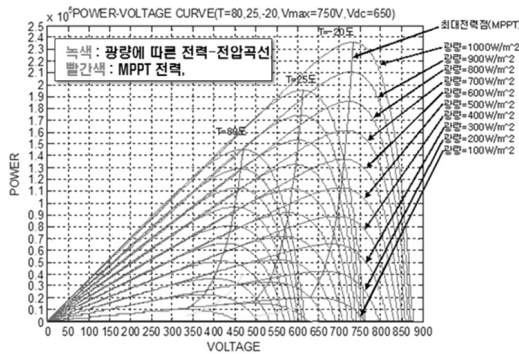


Fig. 4 태양전지 특성 곡선

태양전지의 전기적 사양에 정격전류와 정격전압은 최대전력점(Maximum Power Point, MPP)에 존재하며, 최대 전력점은 Fig. 5와 같이 크게 광량과 온도에 따라 변한다.

그러나 대부분의 실제 상황에서는 태양광의 세기가 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 보다 약한 $200\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $500\text{W}/\text{m}^2$ 의 세기이며 셀의 온도는 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 정도 이고 조사광의 각도가 모듈에 수직이 되지 못한다. 선박의 경우도 항로가 수시로 변하며, 롤링과 피칭에 따른 영향 때문이다.

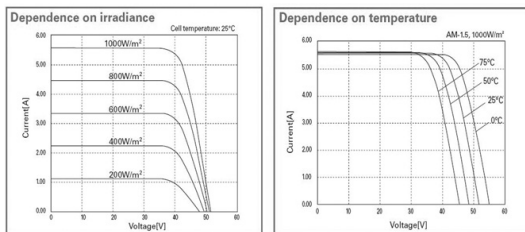


Fig. 5 태양전지의 광량 및 온도 특성

태양전지는 실험선박의 좌현과 우현에 각각 1.6kW 씩 나누어, 총 3.2kW 가 되게 설치하였다. 한 현의 태양전지 배열은 200W 태양전지 8개를 4직렬 2병렬로 구성하여 1.6kW 가 되게 하였으며, 개방전압 132.8V , 단락전류 16.18A 가 된다.

솔라 컨트롤러는 1.6kW 급 태양전지에 적합한 Morning Star社의 TS-MPPT-60 모델을 선정하여 사용하였으며, 컨트롤러 TS-MPPT-60의 전기적 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 솔라 컨트롤러 전기적 사양

Electrical	TS-MPPT-45	TS-MPPT-60
Nominal System Voltage	12, 24, 36, or 48 Volts dc	
Maximum Battery Current	45 Amps	60 Amps
Maximum Solar Input Voltage	150 Volts dc	
Battery Operating Voltage Range	8 - 72 Volts dc	
Nominal Maximum Input Power:		
12 Volt	600 Watts	800 Watts
24 Volt	1200 Watts	1600 Watts
48 Volt	2400 Watts	3200 Watts
Voltage Accuracy	12 / 24 V: $\leq 0.1\% \pm 50\text{ mV}$ 48 V: $\leq 0.1\% \pm 100\text{ mV}$	
Self consumption (tare loss)	1.3 - 2.7 Watts	
Transient Surge Protection	4500 Watts / port	

전기적 사양에서 최대 입력 태양전지 전압(Maximum Solar Input Voltage)이 150V 이므로 충분한 여유가 있으며, 배터리 전압이 24V 일때 정격 1.6kW 이므로 적합한 모델이라고 할 수 있다.

선박용 독립형 시스템 설계시 태양전지의 개방 전압, 단락전류, 최대 전력에 맞는 솔라 컨트롤러를 선정하여야 하며, 해당 제품의 매뉴얼을 참고하여 충분한 여유를 두고 선택하여야 한다.

2.2.3 태양광 배터리

태양광 배터리는 일조 시간동안 발전된 태양 에너지를 배터리에 충전시킨 후 필요시 전력을 공급하는 용도로 사용된다.

본 연구를 수행하기 위한 태양광 배터리는 12V

/ 100AH 제품 16개를 직·병렬 연결하여 구성을 하였으며, 배터리의 기본적인 특성 평가 항목은 아래와 같다.

1) 충전 용량(Charge Capacity)

배터리가 제공할 수 있는 전하량은 가장 중요한 항목이라 할 수 있다. 단위는 쿨롱(Coulomb)으로 표시되며 1초 동안 1A의 전류가 흘렀을 때의 전하량으로 정의된다. 하지만 이 단위는 배터리에 사용되기에는 매우 작아서 Ah(Amp-hour)가 사용되며 한 시간 동안 1A가 흘렀을 때의 전하량을 의미한다. 즉 배터리의 용량이 100Ah라면, 1A를 100시간 동안 제공하거나, 20A를 5시간 동안, 또는 이론적으로는 100A를 1시간 동안 제공할 수 있는 전하량을 의미하게 된다.

2) 에너지밀도(Energy Density)

에너지 밀도는 단위 부피당 전력량으로 정의되며 같은 전력량, 즉 에너지를 내기 위한 소형화의 척도라고도 말할 수 있다. Wh(전력량)은 Ah(전하량)과 V(전압)의 곱으로 계산된다.

3) 비에너지(Specific Energy)

단위 질량당 전력량으로 정의되어 Wh/Kg의 단위를 갖는다. 이는 같은 에너지를 내기 위한 경량화 척도의 의미를 갖는다. 전력량을 kg으로 나누어 계산한다.

4) 파워 밀도(Power Density)

파워 밀도는 단위 부피당 전력으로 정의되며, 같은 전력을 내기 위한 소형화의 척도이다. 통상적으로 방전 에너지의 반이 전기 에너지, 나머지 반이

열에너지의 형태를 띠는 경우를 계산하여 표시한다.

5) 비파워(Specific Power)

단위 질량당 전력으로 정의되며, 같은 전력을 내기 위한 경량화 정도의 의미를 갖는다.

6) 수명(Cycle Life)

2차 전지는 충·방전이 계속됨에 따라 용량이 감소한다. 일반적으로 수명은 배터리 용량이 초기 용량의 60%로 감소할 때까지의 충·방전 회수로 정의한다.

7) 정격전류(Rated Current)

배터리의 종류에 따라 고전류 충·방전 특성에 대해 각기 강점과 약점을 보이게 된다. 고전류 충·방전 성능 비교를 위하여 배터리에서는 C-rate 개념을 사용한다. C-rate은 배터리의 에너지를 1시간 만에 모두 방전하도록 흐르는 전류 크기로 정의된다.

8) 작동온도 구간(Operating Temperature Range)

배터리는 근본적으로 온도가 상승할수록 용량은 증대되지만, cycle life는 급격히 떨어진다. 20°C에서의 용량을 100%로 가정할 때, 저온에서 몇 %의 용량이 방전되는가를 검사하여 배터리의 온도에 대한 적응력을 평가한다. 저온 특성이 나쁘다고 저온에서 배터리가 작동되지 않는다는 의미는 아니다. -20°C에서 상온의 50% 용량을 방전한다고 하면, 상온에서 7.2Ah의 용량을 방전하던 배터리가 -20°C에서는 3.6Ah만 방전한다는 의미이다.

9) 자가방전률(Self-Discharge)

배터리는 내부에 화학물질을 다량 함유하고 있기 때문에 단지 방지만 하고 있어도 화학반응에 의해 용량이 감소한다. 이런 현상을 자가방전(self-discharge)이라고 한다. 자가방전에는 Retention Capacity와 Recovered Capacity, 두 개의 평가 항목이 있다. Retention Capacity(Capacity Retention)는 45°C에서 배터리를 한달 간 방치 하였을 때, 한달 후 어느 정도의 용량이 없어지고 남아있는가를 표시하는 항목이다. 자가방전 된 배터리를 재충전하여 다시 방전했을 때 전체 용량의 얼마가 방전되는가를 나타내는 것이 Recovered Capacity이다. 일부 배터리에서는 자가방전으로 전압이 0V 가까이 되면 Recovery가 안되는 경우도 있다. 또한 자가방전은 1차 전지에서도 문제가 되는데, 전지는 창고에 보관되어있는 기간에 비해 하여 용량이 감소하므로 장기 보관 시 냉동창고에 보관해야 하며, 여의치 않을 경우싼 가격에 처분해야 한다. 온도가 높을수록 자가방전 속도가 급격히 증가하므로, 열대지방에서나 여름에는 세심한 주의를 기울여야 한다.

10) 충·방전 방법

파워 밀도가 매우 큰 초고용량 커패시터의 경우 C-rate의 크기에 크게 구애받지 않고 충·방전을 할 수 있으므로 충전 시 과충전에 대한 사항만 주의 하면 된다. 하지만 배터리의 경우 일반적으로 과충전, 과방전에 대해 주의를 기울여야 하며, 방전 시 저장된 에너지량을 최대한 사용하며 충전 시 최대한 많은 에너지량을 저장하기 위해 가능한 한 작은 C-rate로 충·방전이 이뤄지도록 유지할 필요가 있다.

배터리는 그 내부 화학적 성분 및 구조의 차이로

인해 종류에 따라 충전 방법과 과충전에 대한 내성이 각각 다르다. 납배터리와 Ni-MH의 경우 과충전에 대한 내성이 매우 큰 편으로 과충전이 되더라도 괜찮은 반면, Li 계열 배터리는 과충전 되는 전류가 열손실의 형태로 소모되어 Thermal runaway 현상을 야기, 결국 폭발 등을 일으키게 되므로 매우 주의해야 한다. 또한 Li 계열 배터리는 과방전되는 경우에도 내부 화학구조의 손상으로 재사용이 거의 불가능한 상태에 이르게 되므로 SOC를 일정 범위 안에서 유지하도록 노력해야 한다.

납배터리는 Fig. 6과 같이 정전류(CC : Constant) 충전 후 정전압(CV : Constant Voltage) 충전의 2단계 충전을 통해 완전 충전이 되도록 한다. 완전 충전을 검출하여 충전을 중지시키기 위한 방법은 일반적으로 일정 전압 검출 방식(Absolute Voltage Termination)이 쓰인다. 또한 시간제한 방식(Timed Termination), 온도 제한 방식(Over and Under Temperature Termination) 과전압 제한 방식(Over or Under Voltage) 등의 방법이 배터리 특성을 파괴하지 않도록 하는 충전 중지 시점 판단 방법으로 사용된다.

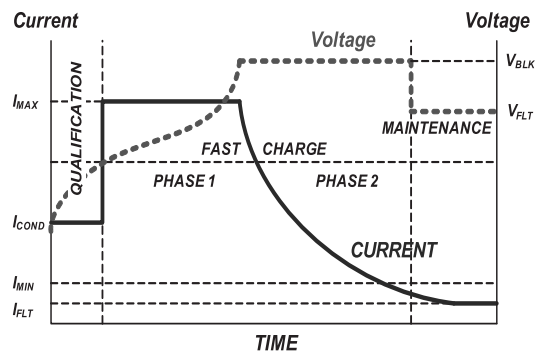


Fig. 6 납 배터리의 충전 그래프

11) 태양광 배터리의 특징

일반형 배터리와 달리 태양광 배터리는 충·방전 cycle 특성이 강화되어 수명이 긴 특징을 가진다.

과제에서는 아트라스BX社의 SB1000(12V / 100AH) 제품을 사용하였다. 전기적, 기계적 특징은 Fig. 8, Table 3과 같다.

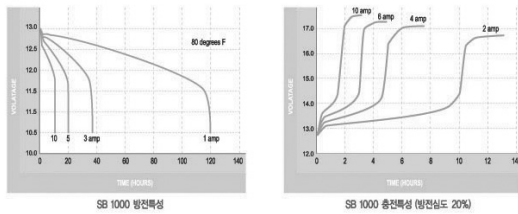


Fig. 7 태양광 배터리의 충·방전 특성



Fig. 8 태양광 배터리의 구조 및 특징

Table 3 태양광 배터리의 제원

전압 (V)	MODEL	용량(AH)		외형치수(mm)			중량 (Kg)
		20HR	25AMP	길이(L)	넓이(W)	높이(H)	
12V	SB 1000	100	186	330	171	217	25.6
	SB 2000	200	414	509	274	218	54.7

2.2.4 독립형 인버터

Fig. 9는 지금까지의 독립형 태양광 발전 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

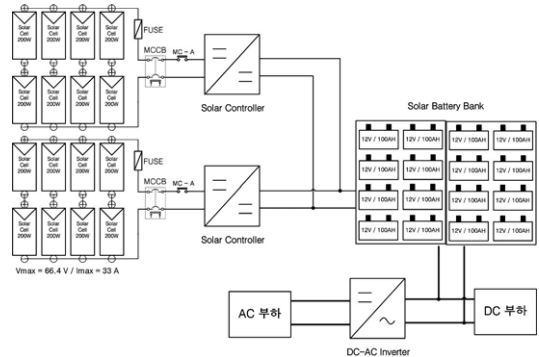


Fig. 9 독립형 태양광 발전 시스템 개략도

앞서 설명한 태양전지, 솔라 컨트롤러, 배터리는 모두 태양 에너지를 전기 에너지로 변환하여 사용할 수 있게 준비를 한 단계라고 한다면, 실제 부하에 전기 에너지를 공급하기 위한 부분이 독립형 인버터라고 할 수 있겠다. 기본적으로 선박 내부의 부하는 DC 부하와 AC 부하가 있다. 그중에 DC 부하는 별도의 전력 변환 장치 없이 태양광 배터리에서 병렬로 공급을 받을 수가 있다. 하지만 220AC 부하의 경우에는 배터리의 24 DC 전원을 220 AC 전원으로 변환하는 전력 변환 장치가 필수라고 하겠다.

인버터는 선박내 AC 부하중에서 3.2kW급 태양광 발전시스템에서 충당할 수 있는 부하들을 선정하였다. 50인치급 TV, 선풍기, 조명, CCTV, LCD 모니터, 노래방 기기, 앰프, 스피커 등으로 이루어져 있었다.

대부분의 전원은 일정하지만 여객선의 경우 노래방 기기 및 앰프 때문에 전체 순간 피크 부하가 6~7kW까지의 치솟는 문제가 있었다. 따라서 순간 피크 부하시에 독립형 인버터가 꺼지지 않고 원활한 동작을 할 수 있도록 순간 피크 부하에서 30% 정도 여유를 가지는 상용제품에 적합한 10kW급 독립형

인버터를 설치하였다.

독립형 태양광 인버터의 종류는 크게 두 가지로 나뉜다. AC 출력 전압의 파형 모양에 따라 유사 계단파 인버터와 순수정현파 인버터로 나뉜다.



Fig. 10 유사 계단파 및 순수 정현파

일반 가정에서 사용하는 전기 파형은 한국 전력 계통에서 공급되므로 순수 정현파이다. AC 출력 파형이 정현파에 가까울수록 힘도 좋고 사용하는 전기 제품에 노이즈가 없다. 하지만 순수 정현파에 가까운 유사 계단파형이 가격이 저렴하고 노이즈도 많이 없는 편이라 많이 사용된다. 정밀 측정장치의 경우에는 순수 정현파가 필요하지만, 선내 AC 부하는 유사 계단파 인버터로도 동작하는데 문제가 없으므로 본 연구에서는 유사 계단파 9500W급 독립형 인버터를 사용하였으며, 제원은 다음과 같다.

Table 4 유사 계단파 인버터 제원

	입력 전압	출력 전압	최대 출력	정격	무부하 전류	외관규격	무게
DP-9 5024 BK	DC 24V	AC 220V	9500 W	6000 W	460m A	214×216× 540(579)	14.0kg

1) 특 징

- 프로그램에 의한 소프트 스타트

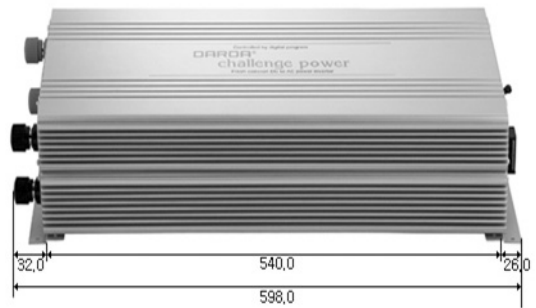
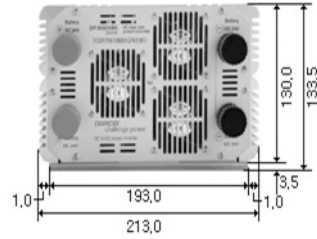


Fig. 11 유사 계단파 인버터

- 원천기술(특허)프로그램/드라이브에 의한 디지털 회로구성
- 프로그램/드라이브에 의한 입력/출력 내열 환경 제어
- 일반제품보다 열효율 13%~19% 향상
- 무 부하 동작전류 50% 감소 절전효과

2) 기 능

- 프로그램 센스에 의한 입력전류 자동 차단 장치 기능
- 프로그램에 의한 출력제한 자동 제어장치 기능
- 프로그램에 의한 on/off 펄스(써지)자동 제어 기능
- 과열온도/과부하(입력/출력) 자동 제어기능
- 저전압/고전압 제어기능, 배터리 보호 재가동 제어기능
- 입력/출력쇼트 보호기능, 자동송풍(fan)기능

- 3) 사용기기
- 산업용특수차량, 모터/펌프(3.5마력) 콤퓨레샤(3.5마력), 함마드릴, 발전기대체
 - 용접기(170A 4kW-5kW), 수은등(600W 정도), 단상 전공청소기(2kW-3kW)
 - 경량호이스트, 건설현장정원, 냉난방기, 기타 전기전자제품

2.3 계통형 발전시스템 구성

계통연계형 태양광발전 설비의 기본 구성은 Fig. 12, Fig. 13과 같다.

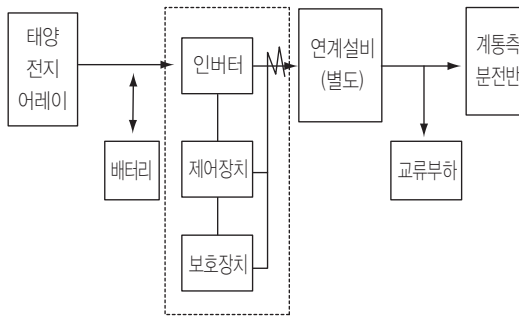


Fig. 12 연계설비와 컨트롤러가 분리된 경우

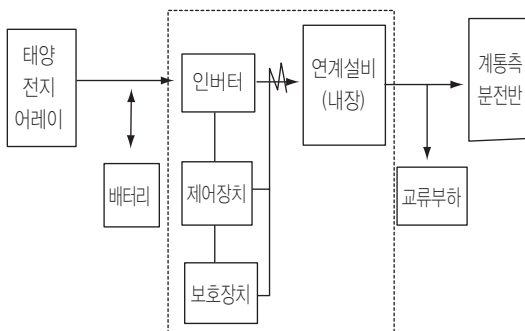


Fig. 13 연계설비가 컨트롤러에 포함된 경우

태양광 발전설비의 제어기(Power Conditioner 라고도 함)는 크게 직류를 교류로 변환하는 인버

터와, 이 인버터와 계통과의 인터페이스에 필요한 연계설비로 구성된다. 인버터는 태양전지어레이에서 발전된 직류전력을 교류전력으로 변환하는 장치이며, 연계설비는 계통연계 보호장치(보호계전장치, 차단기, 개폐기)+ 변압기+측정설비+보상장치(필터, 역률보상장치 등) 등으로 구성되어 인버터와 계통과의 병렬운전을 안전하게 수행하게 한다. 배터리의 유무는 태양광발전장치가 계통정전 시에 자립운전을 수행할 것인가 아닌가의 여부에 따라 결정되어진다.

2.4 계통형 인버터

인버터는 직류를 교류로 변환하여 계통과 병렬운전을 수행하는데 필요한 주파수, 전압, 전류, 위상, 유효전력, 무효전력, 기동정지, 동기, 출력의 품질(전압변동, 고조파)의 제어기능을 기본적으로 갖추어야 한다. 이들의 기능을 실현하기 위한 인버터의 종류는, 전류(commutation)방식에 따라 자여식과 타여식, 직류회로의 전원특성에 따라 전압형과 전류형, 출력의 제어방식에 따라 전압제어형과 전류제어형, 부하측(연계계통)과의 절연방식에 따라 상용주파절연방식, 고주파절연방식, 트랜스리스방식(무변압기)으로 분류된다.

전압제어형의 경우는 제어대상이 출력측 전압의 크기와 위상으로 되어 있어, 과전류 또는 고장전류의 억제에는 불리하나 자립운전이 가능하므로, 설치수용가가 UPS기능의 자립운전현을 요구할 경우에 유리하다. 한편, 전류제어형의 경우는 제어대상이 전류의 크기와 위상으로 되어 있어, 과전류 또는 고장전류의 억제에 유리하나 수용가의 부하만을 감당하여 자립운전하는 경우에는 불리하다.

상용주파절연방식의 경우, PWM인버터를 이용해서 상용주파교류를 만들어 공급하고, 상용주파의 변압기를 이용해서 절연과 전압변환을 수행하도록 되어 있다. 내뇌성 및 노이즈컷트특성이 우수하지만, 중량과 부피가 크다는 단점이 있다. 고주파절연방식의 경우는 소형경량으로 되는 장점이 있지만, 회로가 복잡하게 구성되는 단점이 있다. 트랜스리스 방식은 소형경량과 저가격에 장점이 있고, 또한 신뢰성도 높지만 상용전원과 비절연의 상태로 되어 있어 직류전류유출에 대한 검출기능을 갖추어야 한다.

3. 태양광 발전시스템 설치

3.1 폴리카보네이트 설치

태양전지는 바람 등 외력에 어떠한 경우에도 견뎌야 하기 때문에 지지대를 튼튼하게 용접 구조로 설치하여야 하는데 현재 사용하는 AWNING은 천막 종류로 용접을 할 수 없기 때문에 태양전지를 설치하기가 용이하지 않다. 따라서 천막을 대신할 수 있는 새로운 소재인 폴리카보네이트를 선정하였으며, 폴리카보네이트의 장점은 첫째 판유리의 250, 아크릴의 30배 이상의 강도이다. 둘째, 폴리카보네이트는 표면에 특수코팅 처리를 하여 어떠한 기후변화에도 잘 견디는 등 내 기후변화성에 강하다. 셋째, 폴리카보네이트는 판유리보다 열관율이 낮기 때문에 열효율성이 높다. 넷째, 폴리카보네이트는 자연스럽게 휘 수 있어 다양한 형태와 용도로 사용할 수 있으며 비중이 유리의 1/2 이하이므로 구조물 설치비가 절약될 뿐 아니라 다루기가 쉽다. 다섯째, 폴리카보네이트는 가시광선 투과율이 높아 판유리 같이 투시성이 우수하다.



Fig. 14 폴리카보네이트 설치 및 완성

3.2 태양전지 지지대 등 설치

태양전지는 폴리카보네이트 설치 공사 이후 설계 도대로 40×40×2.0t 각 파이프를 원래 AWNING 지지 원형 파이프에 지지대를 설치하고 태양전지를 15도로 위쪽방향으로 설치하여 선수부에서 선미 방향으로 한 현에 8개를 양현에 16개를 차례대로 시공을 하였으며, Fig. 15는 태양광 설치 완성된 모습이다.



Fig. 15 태양전지 설치 완공 모습

3.2 태양전지 결선

모듈 인출선에서 배선을 하는 경우에 지지할 수 있는 자재를 설치하고 케이블이 이완되지 않도록 고정한다. 좌현, 우현 각각 1.6kW씩 설치하여서 각 그룹은 4직렬·2병렬로 결선을 한다. 최종적으로 좌현과 우현의 출력 단자에서 보면 개방전압(Voc)은 132.8V 단락 전류(Isc)는 16.18A가 된다.

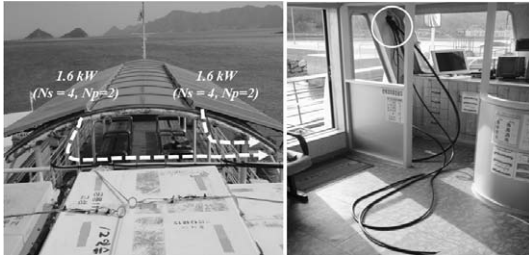


Fig. 16 태양전지 결선 출력 및 설치 시공

3.3 솔라 컨트롤러 설치

3.2kW 태양전지를 두 그룹으로 나누어 1.6kW에 해당하는 적합한 사양을 가지는 솔라 컨트롤러를 채택하였고, 솔라 컨트롤러 설치 시에는 방열판 및 팬에 의해서 배출되는 열이 잘 배출될 수 있도록 최소한의 간격을 요구하고 있다. 하이브리드 통합 제어반에 부착 시 이 사항을 고려하여야 정격 운전에서도 큰 문제없이 동작이 가능하다고 할 수 있다. 실제 설치된 솔라 컨트롤러는 Fig. 17과 같다.



Fig. 17 설치된 솔라 컨트롤러 부

3.4 태양광 배터리

배터리는 12V/100AH 제품 16개를 2직렬 8병렬로 연결하여 설치를 하였다. 배터리 한 개의 무게는 25.6kg으로 16개의 무게는 약 400kg 정도 된다. 기존 선박의 복원성에 영향을 크게 미치지 않고,

통풍이 잘 되는 곳에 설치를 하는데에 주안점을 두었다. 또한 탑승객의 손이 미치지 않는 곳에 설치를 하여야 했다. 따라서 선박의 하부 선수 쪽에 빈 공간이 있어서 그 곳에 설치를 하였다.



Fig. 18 설치된 태양광 배터리 뱅크

3.5 통합배전반

설계도에 맞추어 실제 제작한 통합제어반은 다음과 같다. 운전 모드 전환을 위한 차단기 및 전자점촉기 이외에 태양광 발전을 위한 솔라 컨트롤러와 같은 전력 변환 장치가 설치되어 있다.



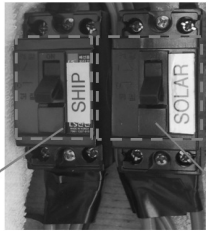
Fig. 19 하이브리드 통합 제어반(1)

3.6 인터락

인터락 부분은 태양광 배터리 뱅크와 선내의 기본 배터리 간의 인터락, 태양광 인버터 AC 출력과 디젤 발전기 AC 출력간에 인터락이 있다.

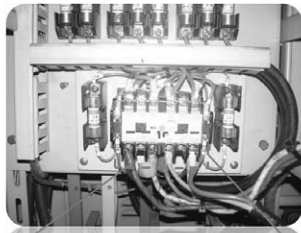
태양광 독립형 운전 모드일 때에는 DC 부하는

태양광 전용 배터리로부터 전원 공급을 받으며, 디젤 발전기를 통해 전원 공급을 할 때에 선내의 DC 부하는 기존 선내 배터리로부터 전원 공급을 받도록 구분하여 차단기를 설치하였다.



기존 선내 배터리 (24VDC) ↔ 태양광 배터리 (24VDC)

Fig. 20 DC BUS 인터락



디젤 발전기의 출력 220VAC ↔ 태양광 발전 시스템의 출력 220VAC

Fig. 21 AC BUS 인터락

3.7 통합시스템

지금 까지 구축된 하이브리드 시스템은 아래의 Fig. 22와 같이 기존 선박에 설치하였다.



Fig. 22 태양광 하이브리드 선박

4. 선박 및 발전시스템 안전성 평가

4.1 선박 복원성능

「선박안전법」 제28조(복원성유지)에 의거 선박 소유자는 국토해양부장관이 정하는 선박복원성 기준에 따라 복원성을 유지하여야 하며, 「선박안전법시행규칙」 제31조(검사의 준비 및 서류 제출의 완화)제9항에 의거 별표 10-라-2) 선박의 주요 치수의 변경 없이 선박용물건의 증설·탑재·철거 등으로 경하중량 및 중심의 위치에 영향을 미치는 개조를 하는 경우에는 경하중량 및 무게 중심 위치(LCG 및 VCG)의 변화를 정확하게 계산한 경하중량산정표에서 경하중량의 증·감량이 기존 경하중량의 2.0퍼센트 또는 2톤 중 큰 값 미만이거나, LCG의 차이가 1.0퍼센트 LBP 미만인 경우에는 [별표 10] 제12호에 따른 복원성 실험에 관한 준비를 생략할 수 있다.

본선의 LIGHT WEIGHT 변경량은 1.154톤 증가로 약 1.38% 증가, K.G 변화량 0.033미터 상승, L.C.G 변경량은 0.029미터 선수 방향으로 이동으로 KG가 상승된 경우로써 경하중량 변경량이 0.5% 이상 2.0% 미만이므로 경하중량산정 이후 복원성 자료 재심사하여 복원성에는 이상이 없는 것으로 나타났다.

4.2 하이브리드 시스템

태양광 하이브리드 발전시스템은 독립형 및 계통 연계형 태양광 발전 시스템이 기존의 디젤 발전기 시스템과 결합된 부분으로서 결합되는 부분은 DC BUS(배터리)과 AC BUS(AC 출력)로 크게 나뉜다.

DC BUS의 경우에는 태양광 전용 배터리 뱅크와 기존 선내의 배터리를 차단기 또는 가역 전자 접촉기를 사용하여 인터락이 되도록 하여야 한다. 즉, 디젤 발전기 운전 모드의 경우에는 선내의 DC 부하는 기존 선내 배터리에서 전원 공급을 받게 된다.

다음으로 AC BUS의 경우에는 가역 전자 접촉기를 통해 태양광 독립형 인버터 AC 출력과 디젤 발전기의 AC 출력을 AC 부하로 전원 공급을 한다. 가역 전자 접촉기는 AC 출력이 먼저 발생하는 전원에 먼저 Switch ON이 되므로 나중에 실수로 운전 모드가 겹치게 되더라도 먼저 ON이 되어 있는 부분에서 출력이 나가게 되므로 전원 충돌로 인한 사고를 미연에 방지할 수 있다.

5. 태양광 발전시스템 해상실험 및 결과

5.1 독립형 발전시스템

5.1.1 정박시

태양광 하이브리드 선박 설치 완료 후 해상 운전을 하기 전에 정박시에 선내의 부하를 커놓고 독립형 발전 시스템의 동작을 검증하였다. 처음에는 통합 제어반의 운전 모드 스위치가 모두 OFF 되어

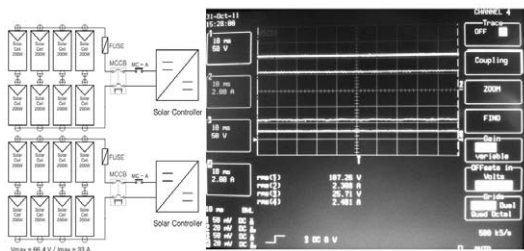


Fig. 23 태양광 어레이 좌우현 전압 및 전류

있으며, 통합 제어반에서 독립형 운전 모드를 ON 한 후 실험 파형을 측정하였다.

Fig. 23과 같이 총 4채널로 이루어져 있다. 위에서부터 차례대로 CH1~CH4 이다. CH1은 태양전지 좌현 전압, CH2는 태양전지 좌현 출력 전류, CH3는 배터리 전압, CH4는 배터리 전류이다. 선박의 AWNING 부분에 태양전지가 지붕형으로 설치되어 있으므로, 태양전지의 출력이 좌·우가 다를 것으로 예상된다. 하지만 앞서 솔라 컨트롤러가 각각 MPP(최대전력지점)를 추종하므로 크게 문제가 되지 않는다. 오실로스코프 파형에서 태양전지 좌현 전압은 107.26V, 전류는 2.38A로서 출력 전력은 약 255W 정도이다. 배터리의 경우에 전압은 25.7V로서 솔라 컨트롤러가 배터리에 충전을 할 때 전압이다. 출력 전류는 배터리에서 부하로 가는 전류로서 2.4A 정도이다. 측정시에 부하에 소요된 전력만큼만 공급되기 때문에 태양전지로 부터의 전력보다 작게 공급되고 있음을 보여주고 있다.

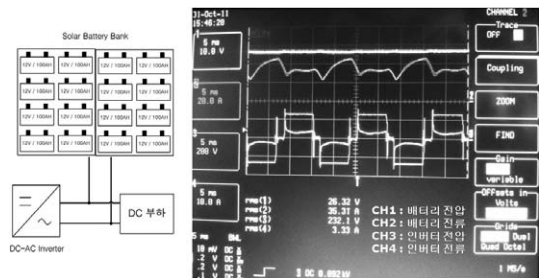


Fig. 24 태양광 배터리와 독립형 인버터의 출력 전압 및 전류

Fig. 24의 오실로스코프 파형에서 위에서부터 차례대로 CH1~CH4이다. CH1은 배터리 전압, CH2는 배터리 전류, CH3는 인버터 전압, CH4는 인버터 전류이다. 배터리 전압과 전류는 앞서본

파형과 같이 부하에 독립형 인버터에 전원 공급이 되고 있다. 배터리 전류의 변화는 독립형 인버터의 스위칭에 따라 60Hz 주기로 변하고 있음을 보여 주고 있다. 앞서 설명했듯이 인버터 전압의 파형은 유사 계단파이며, AC 부하에 전원을 공급하는데 크게 문제가 없음을 보여주고 있다. 전류 파형 또한 사인 파형이 아닌 유사 계단파로서 부하에 전원이 공급됨을 보이고 있다. 이때 부하에 공급되는 전력은 약 773W이다.

5.1.2 운항시

태양광 하이브리드 선박의 실효성을 검증하기 위하여 참여 연구원이 탑승하여 약간 흐린 날씨 였으나 태양광 발전에는 문제가 없어 선내 부하를 걸고 해상 운항시 하이브리드 발전 동작시험을 하였다.

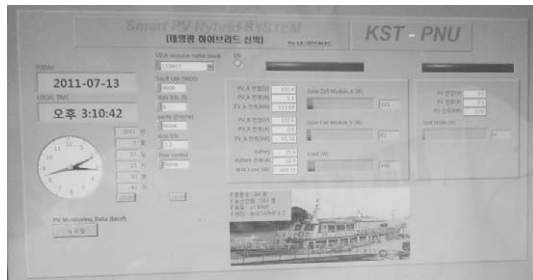


Fig. 25 운항 중 데이터

Fig. 25는 RS232 통신 케이블을 통해서 노트북 화면을 통해 발전량을 실시간으로 캡처 한 화면이다. 흐린 날씨여서 태양광 발전량이 170W 정도이며 부하로 가는 전력은 490W 임을 보여주고 있다. 발전량이 부하 전력보다 작지만 부하에 490W의 전력을 공급할 수 있는 것은 배터리에 기존에 저장 되어 있는 전력이 있기 때문이다. 12V/100Ah

배터리 16개가 완충되어 있다고 할 때, 시간당 2kW의 부하를 10시간 정도 공급할 수 있다.

5.2 계통연계형 발전시스템

본 연구에서 제안하는 계통연계형 발전 시스템은 선박이 운항을 마치고 정박을 했을 시에 연계하는 것을 의미한다. 통합 제어반에서 독립형 운전 모드를 OFF한 후 계통연계 운전 모드를 ON 하면 좌·우현의 태양광 어레이가 직렬 연결되며 계통 연계형 인버터의 입력 범위를 만족하게 된다. 계통연계형 인버터의 AC 출력단자는 연장성 케이블을 통해서 명사 유람선 사무실의 한전 계통에 연계된다. 실험 준비가 끝나면 계통연계인버터를 RUN 하게 되면 300초(5분) 대기후 연계를 시작한다.

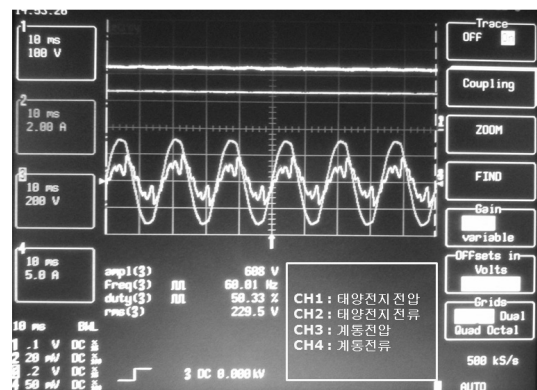


Fig. 26 계통연계 시험 파형

태양전지 출력 전압, 전류, 계통연계 인버터의 출력 전압·전류를 오실로스코프로 측정하였다. Fig. 26의 오실로스코프 파형에서 CH1은 태양전지 전압, CH2는 태양전지 전류, CH3는 계통 전압, CH4는 계통 전류이다. 태양전지의 출력 전압은

좌현과 우현의 모듈을 직렬로 연결하여 224Vdc로 상승하여 계통연계 인버터의 입력단에 공급된다. 계통연계 인버터 역시 독립형 태양광 발전의 솔라 컨트롤러와 같이 MPPT 기능을 기본적으로 가지고 있다. 즉, 태양전지에서 발생하는 최대 전력을 추종하여 발생하는 전력만큼 계통으로 송전하게 된다. CH3의 계통 전압은 일반적인 상용 전원(한전)으로서 229V에 주파수는 60.01Hz의 정현파이다. 발전 전력은 약 600W 정도가 발전되어 계통으로 송전되고 있다. 전류파형은 완전한 정현파가 아닌 고조파가 포함된 것을 보여주고 있다. 계통 연계 인버터가 정격전력의 출력이 아닌 저출력 상태의 현상이라고 볼 수 있다. 또한 명사 유람선의 비선형 부하(컴퓨터, 모니터, TV)등에 의한 영향이라고 볼 수 있다.

5.3 하이브리드 발전시스템

하이브리드 운전은 선내에 있는 20kW급 디젤 발전기와 인터락을 통하여 하이브리드 운전 작동을 점검하였다. 태양광 발전운전과 디젤 발전기 운전은 하이브리드 통합 제어반에서 조타실에서 조작하도록 하였다. 태양광 발전 운전시에는 하이브리드 통합 제어반에서 독립형 운전 모드를 통하여 선내에 부하를 공급하게 된다. 그리고 디젤 발전기는 작동하지 않는 상태가 된다. 독립형 운전 모드시에 발전기를 작동하더라도 인터락 기능에 의해서 전원 충돌은 일어나지 않는다. 날씨가 흐리거나 배터리가 저전압일 경우에는 먼저 하이브리드 제어반에서 독립 운전 모드를 OFF한다. 그리고 디젤 발전기를 ON 하여 부하에 다시 전원을 공급하게 된다.

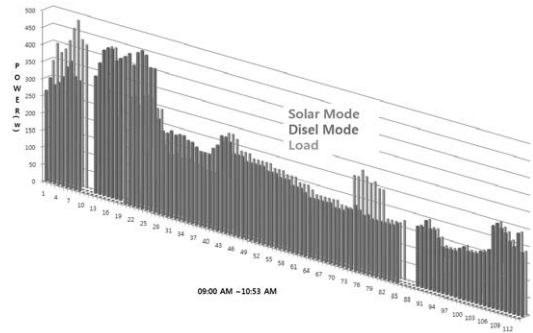


Fig. 27 하이브리드 운전 결과

6. 경제성 평가 및 안전기준안 마련

6.1 경제성 평가

Table 5 경제성 계산표

항 목	단가(원)	EA	금액(원)		
초기 투자 비용 (A)	태양전지 (200W)	660,000	16	10,560,000	
	콘트롤러(TS-60)	800,000	2	1,600,000	
	솔라배터리	100,000	16	1,600,000	
	독립형 인버터	1,000,000	1	1,000,000	
	계통형 인버터	1,600,000	1	1,600,000	
	판넬 제작비	3,000,000	1	3,000,000	
	시공비(지지대)	8,000,000	1	8,000,000	
	시공비(전기공사)	4,000,000	1	4,000,000	
			31,360,000		
사용 시간(연간)	시간당 기름 소비량	가격 (경유 LITER당)		투자비 회수 (년)	
여객선 유류대 (B)	900	21	1,700	32,130,000	0.98
	600	21	1,700	21,420,000	1.5
	300	21	1,700	10,710,000	2.9
디젤 발전기	한말 : 20 LITER / 한대 : 0.8 LITER				
	시간당 기름 소비량				
20kW	한말 한대 = 21 LITER				

태양광 하이브리드 선박의 경우에는 전기 요금 절감이 아닌 디젤 발전기에 사용되어지는 경우 사용량을 줄일 수 있는 효과가 있다. 현재 우리나라의 전기요금이 많이 낮게 책정되어 있는 현실로 볼 때, 태양광 하이브리드 선박에서는 그 만큼 투자 비용 회수기간이 육상에 비해서 짧다고 볼 수 있다. 간단하게 경제성을 분석한 결과는 Table 5와 같으며, Table 5에서와 같이 연간 600시간만 사용하여도 1년 반이면 투자비를 회수할 것으로 보이고, 육상에 비해서는 경제성이 더 높다.

6.2 태양광 설비 안전기준(안)

태양광 설비 안전기준안은 육상 태양광 관련 시공 기준 및 선박전기설비 관련 기준 등 다양한 기준과 태양광 설비 관련 업체 전문가를 초청하여 기준안 범위설정 시 의견 수렴을 거쳐 최소한의 태양광 발전시스템을 설치한 선박이 안전 확보를 위한 기준안을 마련하였다.

6.2.1 태양전지판

- 1) 모듈 : 공인기관에서 인증한 태양전지 모듈을 사용
- 2) 설치용량 : 설계용량 103% 초과 불가
- 3) 방위각 : 그림자 영향 없고 정남향 현장 여건에 감안
- 4) 경사각 : 현장 여건에 따라 조정
- 5) 일사시간 : 일사시간 1일 5시간

6.2.2 지지대 및 부속 자재

- 1) 설치상태 : 바람, 적설하중 및 구조 하중 견딜 수 있게 설치

- 2) 지지대, 연결부, 기초 : 철판부위 용융아연도금, 방식처리
- 3) 체결용 볼트, 너트, 와셔 : 용융아연도금, 방식처리

6.2.3 전기배선 및 접속함

- 1) 연결전선 : 태양전지판 전선은 모듈전용선을 그 외 구역의 배선에 쓰이는 전선은 선박용 전선을 사용하여야 한다.
- 2) 커넥터(접속 배선함) : 태양전지판 결선 시에 접속 배선함 구멍에 맞추어 압착단자를 사용하여 견고하게 전선을 연결해야 하며, 접속 배선함 연결부위는 일체형 전용 커넥터를 사용한다.
- 3) 태양전지판의 배선 : 태양전지판 배선은 바람에 흔들림이 없도록 케이블 타이(Cable Tie) 등으로 단단히 고정하여야 하며 태양전지판의 출력배선은 군별·극성별로 확인할 수 있도록 표시하여야 한다.
- 4) 태양전지판 직, 병렬상태 : 태양전지 각 직렬군은 동일한 단락전류를 가진 모듈로 구성하여야 하며 1대의 인버터에 연결된 태양전지 직렬군이 2병렬 이상일 경우에는 각 직렬군의 출력 전압이 동일하게 형성되도록 배열하여야 한다.
- 5) 역전류방지다이오드 :
 - 가) 1대의 인버터에 연결된 태양전지 직렬군이 2병렬 이상일 경우에는 각 직렬군에 역전류 방지다이오드를 별도의 접속함에 설치하여야 하며, 접속함은 발생하는 열을 외부에 방출할 수 있도록 환기구 및 방열판 등을 갖추어야 한다.

나) 용량은 모듈단락전류의 2배 이상이어야 하며 현장에서 확인할 수 있도록 표시하여야 한다.

- 6) 접지공사 : 「선박전기설비기준」에 따라 접지공사를 하여야 한다.

6.2.4 인버터

- 1) 제품 : 공인기관의 인증제품을 설치하여야 한다. 해당용량이 없어 인증을 받지 않은 제품을 설치할 경우에는 효율시험 및 보호기능시험이 포함된 시험성적서를 제출하여야 한다.
- 2) 설치상태 : 옥내·옥외용을 구분하여 설치하여야 한다. 단, 옥내용을 옥외에 설치하는 경우는 5kW이상 용량일 경우에만 가능하며 이 경우 빗물 침투를 방지할 수 있도록 옥내에 준하는 수준으로 외함 등을 설치하여야 한다.
- 3) 설치용량 : 인버터의 설치용량은 설계용량 이상이어야 하고, 인버터에 연결된 모듈의 설치용량은 인버터의 설치용량 105%이내 이어야 한다. 단, 각 직렬군의 태양전지 개방전압은 인버터 입력전압 범위 안에 있어야 한다.
- 4) 표시사항 : 입력단(모듈출력) 전압, 전류, 전력과 출력단(인버터출력)의 전압, 전류, 전력, 역율, 주파수, 누적발전량, 최대출력량(peak)이 표시되어야 한다.

6.2.5 기타

- 1) 가동상태 : 인버터, 전력량계, 모니터링 설비가 정상작동을 하여야 한다.

7. 결 론

태양광 발전시스템을 선박에 설치하고, 동 시스템과 연계한 선박 발전시스템에 대한 해상 실증 실험을 통하여 경제성, 발전 시스템의 작동 및 신뢰성과 선박 복원성능을 평가하고, 육상으로 송전하는 계통연계형 시스템에 대한 실험을 동시에 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 선박의 복원성 등을 고려하여 3.2kW 태양광 하이브리드 발전시스템을 구축하였으며, 상용화에 문제가 없는 것으로 나타났다.
- 2) 태양전지의 설치 각도는 복원성능에 영향을 미치는 풍압면적을 고려하여 15도로 설치하였다.
- 3) 설치비용이 저렴하고, 안정된 구조로써 풍속이 강한 해상을 운항하는 선박에 유리한 고정식 어레이 방식으로 태양전지를 설치하였다.
- 4) 선박 운항시 태양광 발전시스템 선내 부하에 전원 공급 및 하이브리드 운전이 안정적이다.
- 5) 정박중 잉여전력을 계통 연계하여 송전시 안전성 검증을 거쳐 발전 사업 수익창출 모델로의 가능성을 확인하였다.
- 6) 실증실험을 통한 신뢰성 및 안전기준안 마련으로 신·재생에너지 설비 선박설치에 대한 정부지원 근거 확보
- 7) 향후 다양한 용량의 발전시스템 선박 적용이 가능하다.
- 8) 단기간에 초기투자비용 회수가 가능하다.
- 9) 선박용 태양광 발전시스템 보급 확대를 위하여 「신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준」 개정이 필요하다.
- 10) 태양전지판, 지지대, 전기배선, 인버터 등

태양광 설비에 대한 안전기준(안)을 마련하였다.

참 고 문헌

- (1) 에너지관리공단 에너지 자원기술개발(<http://racer.kemco.or.kr>)
- (2) 지식경제부, 신재생에너지센터(2008), “신재생 에너지백서 2008”
- (3) IEA-PVPS(2008), “TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS”
- (4) EPIA(2008), “Solar Generation V-2008”
- (5) 한화증권(2008), “신재생에너지 - 태양광 발전: Apollon의 축복, 그 세 번째 이야기”
- (6) 신재생에너지 태양광분야 기술 및 시장동향 분석 보고서(2007년 에너지관리공단, 지식경제부 태양광사업단)
- (7) 한국에너지기술연구원(2007), “태양전지 기술 현황”
- (8) 동부증권(2009) “태양광 산업(PhotoVoltaics)”
- (9) 경상북도(2009), “친환경에너지지원센터 설립 기본계획연구 최종보고서”
- (10) 대구광역시, 대구전략산업기획단(2008), “신재생 에너지부품소재산업 육성(태양전지 부문)”
- (11) 대구광역시, 경상북도(2009), “대경권 그린 에너지산업 프로젝트계획(태양광 부품소재 글로벌 경쟁력 강화사업)”
- (12) 산업자원부(2002), “제2차 국가에너지기본 계획(2002-2011년)”
- (13) 신재생에너지센터(2009), “신재생에너지란?”
- (14) Foster, Robert : Japan Photovoltaics Market Overview
- (15) 문대성 외(2008) : 마이크로그리드에서 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 Feeder Flow Mode 운영 기법
- (16) 황준원 외(2009) : 태양광발전과 연료전지의 하이브리드 시스템
- (17) 조관준 외(2009) : 태양광 및 풍력 하이브리드 발전 시스템에 관한 연구
- (18) 신재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침
- (19) 신에너지 및 재생에너지 개발 이용 보급 촉진법
- (20) 선박 전기설비기준(1) 유권종 외(2007) : 전문가시스템을 이용한 태양광 어레이의 최적 설치 각도에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집