

부유식 태양광-파력 복합발전 개념 및 원자력발전소 비상전원을 위한 응용

차경호*, 김정택

A Buoyant Combined Solar-Wave Power Generation and Its Application for Emergency Power Supply of Nuclear Power Plant

Kyungho Cha* and JungTaek Kim

Abstract

This paper presents a Combined solar-wave Power Generation (CPG) concept that the CPG unit is maintained as buoyant at the level of sea water and it is also supported by a submerged tunnel, with the aim of supplying emergency electric power during the station blackout events of nuclear power plants. The CPG concept has been motivated from the 2011 Fukushima-Daiichi Accidents due to the loss of both offsite AC power and emergency diesel power caused by natural hazards such as earthquake and tsunami. The CPG is conceptualized by applying different types and different sites for emergency power generation, in order to reduce common cause failures of emergency power suppliers due to natural hazards. Thus, the CPG can provide a new mean for supplying emergency electric power during station blackout events of nuclear power plants. For this application, the CPG requirements are described with a typical configuration at the ocean side of a submerged tunnel.

Key words

Combined Solar-Wave Power Generation(태양광-파력 복합발전), Buoyant(부체), Hukushima-Daiichi Accident(후쿠시마-다이지 사고), Submerged Intake and Discharge Tunnel(온배수 해저터널), Nuclear Power Plant(원자력발전소), Station Blackout(발전소 정전), Emergency Power Supply(비상전원)

(접수일 2011. 11. 27, 수정일 2011. 12. 27, 게재확정일 2011. 12. 27)

* 한국원자력연구원(KAERI)

■ E-mail : khcha@kaeri.re.kr ■ Tel : (042)868-8731 ■ Fax : (042)868-9816

Nomenclature

AAC : alternative alternating current

COTS : commercial-off-the-shelf

CPG : combined solar-wave power generation

PV : photovoltaic

SPG : solar power generation

WPG : wave power generation

1. 서론

정부의 녹색성장 정책에 따라 신재생에너지(renewable energy)에 의한 전력생산과 스마트그리드 기술이 함께 발전되고 있다. 본 논문은 해양 신재생에너지에 의한 부유식 태양광-파력 복합발전(이하, 부유식 복합발전) 개념을 제안하고, 원자력발전소(이하, 원전)의 전원상실 시 비상전력에의 응용을 위한 접근방법 및 요건을 고찰하였다.

원전과 같은 산업시설은 지진과 같은 자연재해의 위협에도 안전성을 확보하여야 중요 자산, 인명, 그리고 자연환경이 보호받을 수 있기 때문에 자연재해에 대한 설계기준을 적용하여 설계한다. 즉, 자연재해가 발생하는 경우에는 원자로가 안전하게 정지되고 냉각되도록 설계된다. 그러나 설계기준을 초과하는 자연재해에 의해 원전의 소외 교류전력(offsite AC power)이 상실되는 경우에는 원전 내에 설치된 비상발전기(주로 디젤발전기를 사용)를 기동하여 대략 10분 이내에 1MW 정도의 정격 교류전력이 공급된다. 2011년 3월에 발생한 후쿠시마-다이찌 원전사고는 설계기준 이상의 지진에 의한 소외 교류전력 상실과 지진에 의한 쓰나미가 비상디젤발전기의 공통원인고장(common cause failure)을 유발함으로써 발전소 정전(station blackout)에 연이은 중대사고로 전개된 것으로 널리 알려졌다.

원전의 안전성 확보를 위한 다양한 접근방법 중 심층방어(defense-in-depth), 다양성(diversity) 및 다중성을 설계에 적극적으로 활용하여 왔다. 전력공급시스템을 예로 들면, 소외 교류전력이 상실되는 경우에는 비상디젤발전기를 기동하여 발전소에 전력을 공급하고, 비상디젤발전기의 기능상실인 경우에는 이동형 비상발전기를 통해 전력을 공급할 수가 있다. 이러한 비상전력에 대한 다양성을 제공할 수 있음에도 불구하고 자연재해로 인한 소외 교류전력 및 비상전원의 공통원인고장을 배제하기 위한 다양성 확보의 필요성을 후쿠시마-다이찌 원전사고가 교훈으로 시사한다.

따라서 본 논문에서는 원전의 정전사건에 대비한 전원의 다양성을 제공하기 위한 하나의 접근방법으로 부유식 복합발전 개념 및 그 장치구조를 제안하고, 원전 비상전원에의 응용을 위해 고찰하였다. 제2장에서는 부유식 복합발전 개념 및 그 장치구조에 대하여 기술하였으며, 제3장에서는 자연재해로부터 비상전원의 공통원인고장을 배제하기 위한 비상전원으로서 부유식 복합발전장치의 응용방법 및 그 요건을 기술

하였다. 마지막으로, 제4장에 결론을 기술하였다.

2. 부유식 복합발전 개념 및 그 장치

본 장에서는 태양광 모듈의 이용성 향상을 위한 복합발전 개념⁽⁵⁾을 원전 온배수를 위한 해저터널과 같은 설비를 이용하고 해양 환경에 적합하게 개선한 부유식 복합발전 개념 및 그 장치에 관하여 기술한다.

이러한 부유식 복합발전은 태양전지 모듈을 이용하고 해수에 부유할 수 있도록 구성되는 태양광발전 장치와, 해수가 태양광발전 장치의 통로를 이동함으로써 태양전지에서 발생하는 열을 냉각할 뿐 아니라 그 통로에 발전기를 배치하여 파력발전이 동시에 가능한 개념이다. Fig. 1은 이러한 부유식 복합발전 개념에 따른 단위장치의 구조를 나타낸다.

태양전지 모듈은 부유식 복합발전 단위장치의 밀폐공간에 태양광선과 수직으로 배치하고, 파력발전기 일체는 부유식 복합발전 단위장치의 일부를 통해 해수가 이동하는 통로에 배치한다. 부유를 위한 밀폐공간의 상부에는 태양광선이 투과할 수 있도록 투명유리 등으로 방수가 가능하도록 설치한다. 또한 밀폐공간의 온도상승에 의한 PV 효과의 저하를 방지하기 위해 온도센서를 이용하여 대기 순환에 의한 냉각 기능을 갖도록 형성한다.

한편, 태양전지 모듈이 태양광선에 항상 수직으로 위치하여 파랑에 의한 부유식 복합발전 모듈의 상하좌우 운동에도 태양전지의 PV 효과가 최대화되도록 지지대를 구조화한다.

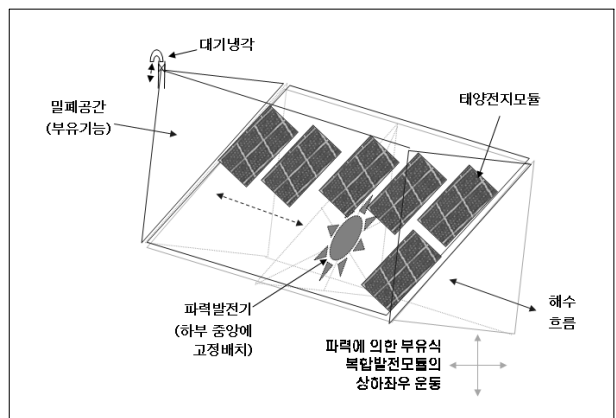


Fig. 1 부유식 복합발전 단위장치의 개념구조

2.1 부유식 태양광발전

태양광발전은 Fig. 1의 부유식 복합발전 단위장치를 방수가 가능한 원형 또는 타원형 판에 고정배치하고, 해수면에서 부유가 가능하도록 하나의 부유식 복합발전 모듈을 구성한다.

이러한 부유식 복합발전 모듈은 파랑이 없거나 약한 경우에는 해수면에 부유할 수 있으나, 만약 파랑의 높이(파고)가 크게 발생하는 경우에는 기계적 스트레스에 의해 태양전지 모듈의 성능저하⁽³⁾ 및 부유식 복합발전 모듈의 거동(상하좌우 이동)에 따라 해수를 투과하는 태양광선의 PV 효과를 고려하여야 한다. 부유식 복합발전 모듈의 상하좌우 운동을 허용하는 이유로는 태양광선이 없는 시간에는 부유식 복합발전 모듈의 구성요소를 파력발전에 이용하는 동시에 해일 등에 의한 강한 파력이나 부력으로부터 파손을 방지하기 위함이다. Fig. 2는 Fig. 1의 부유식 복합발전 단위장치를 이용한 부유식 복합발전 모듈의 개념구조를 나타낸다.

부유식 복합발전의 태양전지 모듈은 강화유리 표면의 상용 제품을 전제로 하였으며, 플렉시블 PV 모듈을 이용한 부유식 태양광발전 장치도 고려될 수 있다.

한편, 부유식 복합발전 모듈이 파랑에 의한 상하좌우 운동으로 해수에 잠길 수 있다. 일반적으로 한반도 해역에서는 해수 깊이 -5m 이내에서 녹-백-적-청색광의 투과율이 대략 50~60% 수준으로 알려진다⁽⁴⁾. 따라서 부유식 복합발전 모듈의 상하좌우 운동을 해수 깊이 -5m 이내로 제한하여 부유식 복합발전 모듈을 구성한다. 태양전지 모듈에 의해 생산되는 전력은 인버터 및 축전지를 거쳐 발전소에 공급될 수 있다. 본 논문에서는 부유식 복합발전 모듈의 태양전지로부터 생산하는 직류 및 파력발전기로부터 생산되는 교류전력의 조절

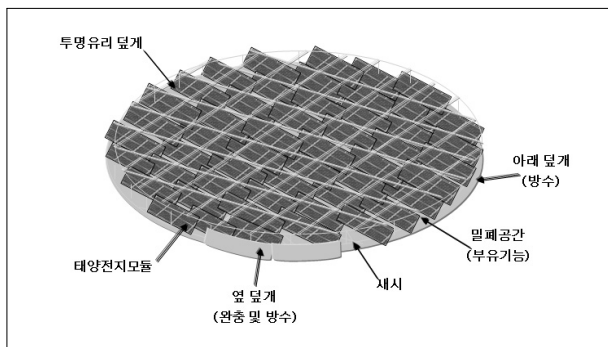


Fig. 2 부유식 복합발전 모듈의 개념구조

(regulation) 및 품질 등에 관해서는 추후 고려하며, 최대한 상용(COTS) 제품의 전력기기를 적용한다.

2.2 파력발전

파력발전은 대상 해역의 파랑에너지 밀도, 파랑특성 파악, 기존 전력망과의 연결, 그리고 지리적인 문제 및 해양환경에 미칠 영향 등을 고려해야 한다⁽⁸⁾.

파력발전은 Fig. 1과 같이 해수가 이동할 수 있는 통로의 중간 위치에 파력 발전기를 배치한다.(이 때, 가능한 양방향 해수의 흐름에도 발전이 가능한 발전기를 사용하면 파랑에 의한 운동에너지를 최대한 이용할 수 있다.) 실제 응용에서는 Fig. 2와 같이 부유식 복합발전 모듈을 구성하고, 요구 전력량에 따라 2개 이상의 부유식 복합발전 모듈을 서로 연결할 수 있도록 한다. 이러한 파력발전에 소요되는 기기 및 부품 또한 고품질의 상용제품을 적용한다.

3. 원전 비상전원에의 응용

3.1 응용 요건

원전의 모든 교류전원 상실은 스위치 야드를 통해 공급되는 소외 교류전력(offsite AC electric power) 상실 및 비상 디젤발전기의 기동실패로 인해 발생한다. 특히 자연재해로 인한 정전사고의 중요성은 2011년 3월에 발생한 후쿠시마-다이찌 원전사고에서 찾아볼 수 있다. 즉, 후쿠시마-다이찌 원전사고에서는 설계기준을 초과하는 쓰나미가 13대의 비상 디젤발전기 중 대부분이 기동에 실패하는 공통원인고장을 발생시킨 것으로 간주된다. 따라서 설계기준을 초과하는 자연재해로부터 정전사고를 예방하기 위해서는 다양성 비상전원을 최대한 제공하는 것이 적극적인 접근이 될 수 있다. 이러한 다양성 비상전원을 원전에 응용하기 위해서는 대체 교류전원에 대한 요건을 만족하여야 한다. 상용 원전의 대체 교류전원에 대한 주요 요건은 다음과 같다⁽⁹⁾.

- (1) 대체 교류전원은 비상디젤발전기와 공통원인고장(CCF)을 최소화할 수 있는 별도의 직류전원을 갖추어야 한다.
- (2) 비-안전등급의 대체 교류전원을 설치하는 경우에는

발전소 내의 안전등급 전력계통과 전기적, 물리적으로 격리되어야 한다.

- (3) 정전사고 이후 10분 이내에 안전등급 모선에 정격전력을 공급할 수 있도록 설계되어야 한다.
- (4) 대체 교류전원은 정전동안 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있는 충분한 용량(최소한 1500 kW 이상)을 갖추어야 한다.
- (5) 주기점검 및 시험을 통해 운전성과 신뢰성(0.95 이상의 신뢰도)을 갖도록 설계되어야 한다.
- (6) 대체 교류전원의 설치는 비-안전등급 대체 교류전원을 발전소 내의 비-안전등급 전력공급계통에 접속, 발전소 내의 다중 안전등급 모선 사이에 안전등급 비상 디젤발전기를 설치하고 SBO가 발생하면 2개의 모선 중 어느 하나에 전력을 공급, 그리고 원전 인근의 타 발전소(원자력, 수력, 또는 화력발전소 등)로부터 전력을 공급받는 방법 등이 가능하다.

해양 복합발전에 의한 대체 교류전력의 공급은 (6)의 3가지 방법 중 타 발전소로부터 전력을 공급하는 접속방법으로 안전등급 모선의 입력 측에 안전등급 차단기를 설치하여 전기적으로 격리되도록 한다.

대체 교류전원으로 해양 신재생에너지에 의한 발전방식을 이용하는 경우에는 원전 취·배수 지역, 방파제 및 방호벽의 해양지역 또는 발전소 인근 해양이 그 부지로 고려될 수가 있다. 해양 신재생에너지에 의한 부유식 복합발전을 대체 교류전원으로 응용하려는 목적은 (6)의 3가지 대체 교류전원 모두가 원전과 같은 육지에 설치되기 때문에 후쿠시마-다이찌 원전사고와 같이 자연재해로 인한 전원의 공통원인고장에 따른 정전사고의 발생확률을 최소화할 수 있기 때문이다. 따라서 기존 대체 교류전력의 생산방식과 다른 해양 신재생에너지에 의한 발전방식을 채택하고, 그리고 지진/화재/홍수 등 자연재해로부터의 영향이 육지와 다른 해양환경을 부유식 복합발전 부지(site)로 활용함으로써 정전사고의 발생확률을 최소화할 수 있다.

3.2 배치 예

해수를 냉각수로 이용하는 원전은 온배수를 위한 해저터널을 이용하는 방식이 많이 사용되어 왔다. 국내에서는 고리 원

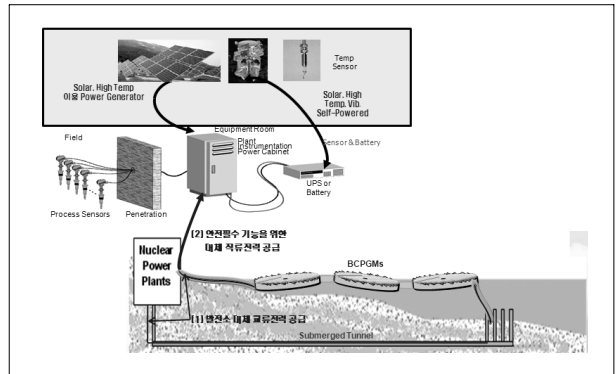


Fig. 3 해저터널의 해양 측에 부유식 복합발전 모듈의 배치 예

전에서 이러한 해저터널을 최초로 설치하여 운용하여 왔다. 해저터널은 약 -10 ~ -40m 깊이에 매설되고 해양으로 연결되기 때문에, 부유식 복합발전 모듈을 해저터널에 고정할 수 있다. 이러한 해저터널에 고정하는 부유식 복합발전 모듈은 발전소 전력계통과 가까운 거리에 위치하기 때문에 발전소 내 전력계통과 접속을 위한 전력케이블을 해저터널 내부에도 설치 가능한 장점이 있다. 부유식 복합발전 모듈을 대체 비상전원으로 활용하기 위해 Fig. 3과 같이 배치할 수 있다.

3.3 기타

부유식 복합발전 모듈을 원전의 대체 교류전원으로 활용하기 위해서는 이동체(vehicles or movable objects)에 의한 파손, 기후조건에 가변적인 발전량 등 문제점 해결을 위한 더 많은 노력과 실험적 평가가 수반되어야 한다. 특히, 설계기준을 초과하는 자연재해(지진, 해일/쓰나미 등)에 대한 부유식 복합발전 모듈의 기능 및 성능이 유효한 실험적 평가를 통해 입증되어야 한다.

한편, 부유식 복합발전 모듈은 정전사고 발생시 원자로의 안전-필수 기능을 위한 디지털 기기 및 센서의 직류전원으로 발전소 건물의 옥상 설치를 통해 1kW 정도의 비상 직류전원⁽⁷⁾의 대체 전원으로 Fig. 2의 (2)와 같이 고려할 수 있다. 이러한 응용은 건물의 옥상에 설치되는 태양광발전시스템이 자연재해나 고장으로 인한 기능상실에 대처하기 위함이다.

4. 결론

본 논문에서는 신재생에너지에 의한 전력생산의 기술발전

에 편승하여, 해양 부유식 태양광-파력 복합발전 개념 및 그 모듈을 제안하고 원자력발전소 정전사고에 대비한 대체 교류 전원으로 응용을 개념단계 수준에서 고찰하였다. 이러한 부유식 태양광-파력 복합발전 방식은 부유식 태양광 발전장치의 구성요소를 파력발전을 위해 동시에 이용하는 장점을 제공하고, 또한 원자력발전소의 기존 비상전원과 서로 다른 발전방식 및 자연재해로부터 영향 또한 서로 다른 다양성을 제공함으로써 비상전원의 공통원인고장을 최소화할 수 있다. 그러나 이동체의 충돌에 의한 파손, 기후조건에 가변적인 발전량 등 문제점 해결을 위해 더 많은 노력이 요구된다. 한편, 부유식 태양광-파력 복합발전과 열전소자를 이용한 저온발전과의 연계, 설계기준을 초과하는 지진해일(쓰나미)의 파고를 설계기준 이하로 제한하기 위한 부유식 태양광-파력 복합발전 모듈의 응용, 그리고 화력발전소 응용 등이 관련연구로 예상된다.

References

- [1] Lim, H. J., et al., 2007, "Analysis of World's PV Visions 2030", J. of KSPE, Vol. 3, No. 1, pp. 5-12.
- [2] 진주석 외, 2009, "태양광발전 시스템 효율향상을 위한 셀 표면 냉각에 관한 연구", 한국신·재생에너지학회 2009년도 춘계 학술대회논문집 pp. 183-186.
- [3] Cha, K. H., et al. 2008, "A Concept of a Combined Power Generation Unit", Conf. of KSNRE, Busan, Korea.
- [4] 공지현 외, 2010, "기계적 스트레스에 의한 태양전지모듈의 전기적 특성변화", 신재생에너지학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 38-45.
- [5] Yang, Yong-Rhim, 1982, "Optical Properties of Sea Water in the Southern Sea of Korea", Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 18(2), pp. 63-69.
- [6] 류황진, 홍기용, 신승호, 김상호, 2009, "파랑 조건에 따른 파력발전장치의 가동률과 발전량 산정에 대한 연구", 한국신·재생에너지학회 2009년도 춘계 학술대회논문집, pp. 615-619.
- [7] 오성현 외, 1993, "원전 완전전원상실 사고에 대한 전력계통 특성평가", URL=http://img.kisti.re.kr/originalView/originalView.jsp?url=/soc_img/society//kiee/DHJGAD/1993/y1993m07a/DHJGAD_1993_y1993m07a_140.pdf.
- [8] 한국원자력연구원, 2011, "필수안전기능 지속성 유지를 위한 상태진단에측운전 기술개발", 원자력연구개발사업 I-NERI 한·미 국제공동연구 개발협약서.
- [9] Nuclear Emergency Response Headquarters of Japan, 2011, "Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report)".

차 경 호



1982년 경북대학교 전자공학과 공학사
1985년 한국과학기술원 전산학과 공학석사

현재 한국원자력연구원 책임연구원
(E-mail : khcha@kaeri.re.kr)

김 정 택



1984년 한양대학교 원자력공학과 공학사
1986년 한양대학교 원자력공학과 공학석사
2004년 충남대학교 전자공학과 박사과정 수료

현재 한국원자력연구원 계측제어인간공학연구부 책임연구원
(E-mail : jtkim@kaeri.re.kr)