

MW급 해상풍력발전기 나셀의 상태 감시를 위한 전력선 통신 성능 분석

† 손경락 · 김경화* · 김현식** · 정성욱*** · 남승윤****

† 한국해양대학교 전자전기정보공학부, *한국해양대학교 대학원, ** (주) 매트론

Performance Analysis of the Powerline Communication for Condition Monitoring System of an MW Class Offshore Wind Turbine's Nacelle

† Kyung-Rak Sohn · Kyoung-Hwa Kim* · Seong-Uk Jeong** · Seung-Yun Nam** · Hyun-Sik Kim**

† Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

* Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

** Mattron Corporation, Changwon-si, Kyungnam, 630-724, Korea

요약 : 본 연구는 해상풍력발전기에 추가적인 통신전용선로를 확보하지 않고도 자체 전력선을 이용하여 나셀의 상태를 감시할 수 있는 시스템을 구현하는 것을 목표로 한다. MW 급 해상풍력발전기의 내부 전력선을 훼손하지 않고도 통신선로를 확보하기 위하여 유도성 결합기 기반 비접촉식 무배선 통신시스템을 제안하고 성능시험 결과를 보고한다. 페라이트 복합물질을 이용하여 최대 500 A의 고 전류에도 동작할 수 있는 전력선 통신용 유도성 결합기를 개발하였으며 제주도 풍력단지에서 실증시험을 진행하였다. iperf를 이용한 통신성능시험에서 풍력발전기 나셀부와 하단 기저부의 전력변환기간 100 m 길이의 전력선으로 최소 15 Mbps 이상의 통신 속도를 안정적으로 확보할 수 있음을 보였다. 이를 바탕으로 1 주일간의 연속적인 통신상태 시험을 수행하였으며 평균 20 Mbps의 데이터 전송률을 확인하였다. 시험기간 동안 단 한번의 통신 불량도 발생하지 않았다. 다음으로 나셀 내부 온도 분포와 변화를 측정하기 위하여 적외선 카메라를 설치하였다. 카메라에서 획득한 실시간 열화상 이미지가 오류 없이 성공적으로 전송됨을 확인하였다.

핵심용어 : 전력선 통신, 유도성 결합기, 해상풍력발전기, 나셀, 상태 감시 시스템

Abstract : The goal of this study is to implement a communication system that can monitor the status of the nacelle using the power cable itself without the dedicated communication lines such as an UTP cable and optical fiber for the offshore wind turbine . An inductive coupling powerline communication system for a MW class offshore wind turbine was proposed and its communication performance was demonstrated. The inductive couplers was designed for operation at up to 500 A using a ferrite composite materials. Field test was carried out on the wind farms of Jeju island. Using the iperf communication test program, we have obtained more than 15 Mbps data transmission rate through the 100 m power cable that was installed between the nacelle and the bottom of the power converter. In the data transmission stability test for a week, there was no failure ever. The minimum transmission rate was 15 Mbps and the average data rate was about 20 Mbps. Next, we have installed an infrared camera inside the nacelle in order to measure the temperature distribution and variation of the nacelle. The real-time thermal image taken by the camera was successfully sent to the monitoring system without error.

Key words : Powerline communication, Inductive coupling unit, Offshore wind turbine, Nacelle, Condition monitoring system

1. 서론

해상풍력발전은 풍력발전기가 수상에 존재하는 것으로 넓은 부지 확보가 가능하고 민원이 적어 풍력단지의 대형화가 가능하며, 바람의 품질이나 풍속이 양호하여 풍력발전기의 안전성과 효율성 측면에서도 육상보다 유리하다. 육상풍력에 비하여 설치와 운전 및 유지에 어려움이 있지만 설비의 대형화로 인해 지금은 점차 해상풍력으로 이동하는 추세로, 향후에는 해

상풍력분야가 주축이 될 것으로 전망된다. 우리나라의 경우 해상풍력은 초기단계 수준이지만 전북 부안 위도와 전남 영광 안마도부근 해상 및 제주도에서 해상풍력발전단지 건설과 실증을 위한 작업이 진행 중이다. 최근 한전의 발표 자료에 따르면 해상풍력 시장의 경우 UK Round III가 시작되는 2014년 이후 본격적으로 성장하여 2020년까지 연평균 성장률은 32%에 이를 것으로 전망했다(Journal of the Electric World, 2014).

† Corresponding author : 정희원, krsohn@kmou.ac.kr 051)410-4312

* 정희원, kim_kh@kmou.ac.kr 051)410-4939

** 정희원, hskim@mattron.kr 055)232-5941

*** 정희원, sujeong@mattron.kr 055)232-5941

**** 정희원, synam@mattron.kr 055)232-5941

풍력발전기의 증가는 다양한 유형의 사고들을 유발한다 (Caithness Windfarm Information Forum, 2016). 전 세계적으로 1995년 이후 5년 사이 연간 20회 정도의 사고사례가 보고되었지만 2007년 이후에는 연간 120회 이상, 2015년에는 150회 정도의 사고가 보고되었다. 가장 빈번한 사고는 블레이드 파손으로 2006년 이후 2015년까지 연평균 24회 정도 발생되었으며, 그 다음은 화재로 동일기간 연평균 18회 정도 발생한 것으로 보고되고 있다. 풍력발전기의 성장세를 감안하면 이러한 사고는 더욱 증가할 것으로 예측된다.

대형 풍력발전단지에는 각 풍력발전기별로 내부 컴포넌트들의 상태 감시 데이터 및 기상 등의 주위 환경 정보들을 측정하고 수집하여 전체 풍력발전단지를 실시간 모니터링하고 비상 제어할 수 있는 기능을 제공할 수 있는 백본망으로 광통신망이 구축되고 이를 기반으로 SCADA(Supervisory control and data acquisition) 시스템을 적용하는 추세이다(Kim, 2012). 또한 풍력터빈이 대형화되어 감에 따라 풍력터빈 구성 요소의 상태를 보다 면밀히 감시하고 이상 발생을 조기 진단함으로써 고장을 사전에 예방하고자 상태감시시스템(CMS: Condition Monitoring System)을 도입하고 있으며, 이는 풍력터빈의 신뢰성 및 경제성 향상을 도모할 수 있는 방안이 되고 있다(Park 2011). 이때 발전기 내부 통신 채널은 대부분 추가 설치된 광케이블에 의존하고 있으며, 일부에서는 무선센서 네트워크 적용방안들이 연구되고 있다(Johan, 2007). 그러나 해상환경 조건을 고려하면 광 모듈의 내구성과 고비용 문제를, 무선의 경우 철 구조물에 대한 통신장애와 통신거리 제약 문제를 해결해야 한다.

본 논문에서는 통신 선로가 확보되지 못하거나 또는 추가 확장이 필요한 기존의 풍력발전기에도 응용할 수 있는 비접촉식 유도성 결합기를 활용한 전력선 통신 시스템에 대한 연구 결과를 보고한다. 고전압 전력선에 대한 잡음 특성과 신호감쇠 특성이 분석되었으며, 제주도 풍력발전단지에 위치한 MW급 해상풍력발전기에 적용하여 통신 성능 시험을 진행하였다.

2. 시스템 구성

2.1 풍력발전기

본 연구에 활용한 풍력발전기 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 제주도 연안 해상에서 실제 운용중인 해상 풍력발전기를 대상으로 발전기 내부 배선에 대한 통신망 구축의 가능성을 시험하였다. 발전기의 최대 발전용량은 3 MW급이며 타워의 높이는 약 100 m 이다. 상태감시시스템을 갖춘 기존의 풍력발전기에는 광케이블이 통신전용선으로 전력선과 같이 포설되어 있으나, 구축비용이 높을 뿐만 아니라 기존 통신 설비 적용에 어려움이 발생할 수 있다. 그러나 전력선을 이용한 통신에서 추가적인 통신전용선로 구축이 필요 없는 비접촉식 방식을 사용하면 요구조건에 부합하는 통신 시스템의 이동과 교체가 수

월해진다. 또한 풍력발전기 대형화에도 통신을 위한 추가적인 요구사항이 발생하지 않아 바로 적용할 수 있다.

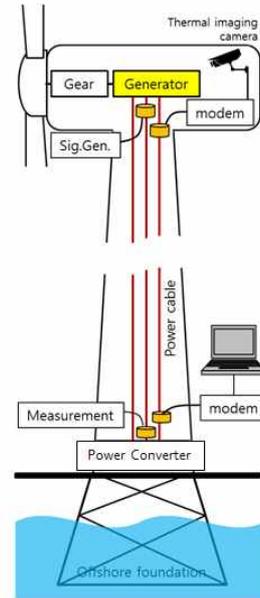


Fig. 1 Basic configuration of proposed power-line communication network in offshore wind turbine

2.2 전력선

풍력발전기의 상단 나셀부와 하단 기저부의 변압기간에 연결된 전력선은 독일의 nexans사에서 공급한 것으로 Fig. 2와 같다. 전력선의 중심에 꼬여진 구리도체로 된 단일코어가 위치하고 있고 전도저항은 0.375Ω/km이며 정격전압은 12/20 kV 이다. 단일코어 주위는 차례로 반도체 화합물 절연층, 가교 폴리에틸렌 절연층, 반도체 화합물 절연층, 구리 와이어 및 구리 테이프, 분리 테이프, 그리고 폴리에틸렌 피복으로 구성되어 있다. 전력선의 최소 외직경은 31mm 이며 단면적은 95mm² 이다.



Fig. 2 Single-core cross-linked polyethylene power cable

2.3 유도성 결합기

풍력발전기 내부 전력선을 이용하여 통신시스템을 구축하기 위해서는 신호 결합 장치가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 링형 자심재료가 통신선로를 감싸는 구조의 전자기 유도성 결합원리를 이용한 비접촉식 장치를 사용하였다. 접촉식 결합장치인 용량성 결합기는 전력선에 물리적인 변형이 필

요하므로 적용에 제한적이다.

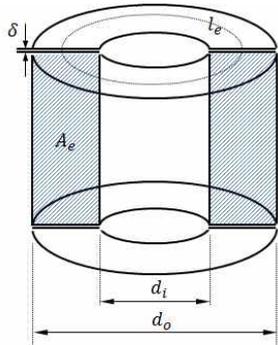


Fig. 3 Single-core cross-linked polyethylene power cable

결합기의 크기는 페라이트 코어의 인덕턴스와 도선에 흐르는 전류 i 에 의해 결정된다[Binkofski, 2005]. 코어의 단면적은 $A_e = (d_o - d_i)h/2$ 이며, 코어의 유효길이는 $l_e = \pi(d_o + d_i)/2$ 로 주어진다. 코어의 유효체적은 $V_e = A_e l_e$ 이다. 원형 페라이트가 둘로 쪼개져 δ 만큼의 간극을 가지는 구조이므로 간격사이로 자속손실이 발생하여 유효 투자율 μ_e 는 식 (1)로 나타난다.

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu_0 \mu_r} + \frac{2\delta}{l_e}} \quad (1)$$

식 (1)로부터 유효투자율 μ_e 가 코어간격 δ 의 함수로 나타나므로 자속밀도 포화전류를 높일 수 있음을 알 수 있다.

페라이트 코어 내부에 저장되는 자기에너지는 식 (2)와 같다.

$$W = V_e \int_0^B H dB = \frac{1}{2} V_e \frac{B^2}{\mu_0 \mu_e} \quad (2)$$

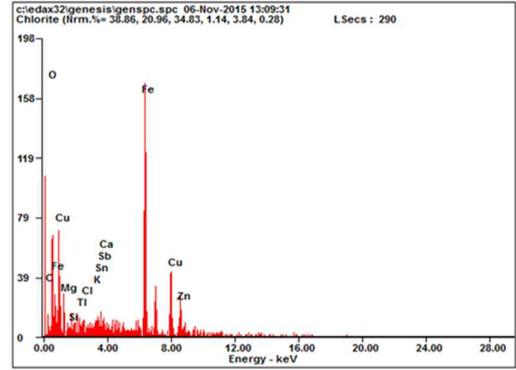
만약 코어중심에 전류 i 가 흐르는 전력선이 있다면 이때 자기에너지는 $W = Li^2/2$ 이므로 식 (2)로부터 코어의 체적을 구할 수 있으며 식 (3)으로 주어진다.

$$V_e = \frac{\mu_0 \mu_e L i^2}{B^2} \quad (3)$$

본 연구에서는 페라이트 자심재료로 500A의 대전류에도 유도성 결합기로서 동작할 수 있는 장치를 설계하였으며, 외형의 크기는 $45 \times 93 \times 83$ (mm³)으로 Fig. 4(a)와 같다. 제작에 사용된 자심재료의 성분을 분석한 스펙트럼 특성은 Fig. 4 (b)와 같다. 페라이트 코어의 주성분은 Fe 36.16 wt%, Cu 16.10 wt%, Zn 13.78 wt%, Mg 3.22 wt% 등으로 합성되었다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Prototype of inductive coupling unit and (b) energy dispersive spectral analysis of the core material

제작된 유도성 신호결합장치의 삽입손실은 Fig. 5와 같이 저주파영역으로 갈수록 매우 크게 나타나지만 2-30 MHz 에서는 -5 ± 2 dB를 보인다. 이로부터 광대역 전력선 통신 주파수 영역에서 동작할 수 있는 비접촉식 결합기로 동작할 수 있음을 알 수 있다.

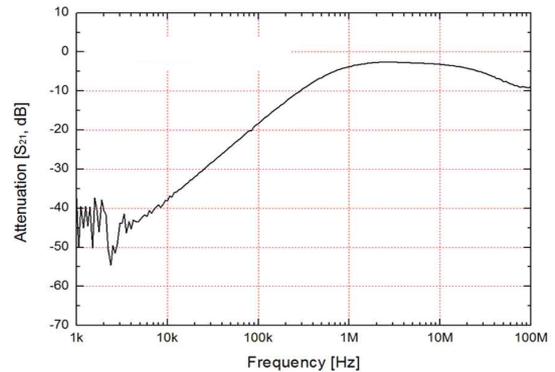


Fig. 5 Attenuation of inductive coupler unit

결합기 코어사이의 간극 δ 가 커지면 식 (1)과 같이 유효투자율이 낮아져서 자속밀도 포화전류를 높일 수 있지만, 간격사이로 자속밀도가 빠져나감에 따라 삽입손실이 증가하게 된다. Fig. 6은 다양한 간극에 대하여 측정된 결합기의 삽입손실을 보여준다. 고주파영역보다 저주파영역에서 δ 의존성이 많음을 알 수 있다. 만약 전력선의 고전류로 인하여 통신장애가

발생할 경우 통신 속도와 공기간극 δ 간 적절한 타협이 필요하다. 실험실 환경에서 전력선 전류 300A 조건에서는 δ 가 500 μm 일 경우 1 Mbps 통신 속도를 보였지만 δ 가 4000 μm 가 되면 2 Mbps로 통신 속도가 개선되었다. 또한 500 A에서 δ 가 500 μm 일 경우 통신이 불가능했지만 6000 μm 가 되면 0.5 Mbps로 통신이 가능하였다.

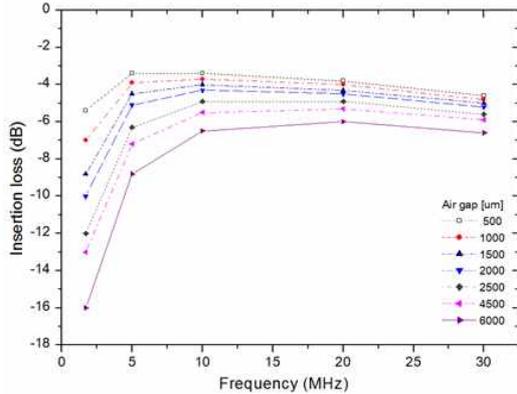


Fig. 6 Insertion loss with air gap δ

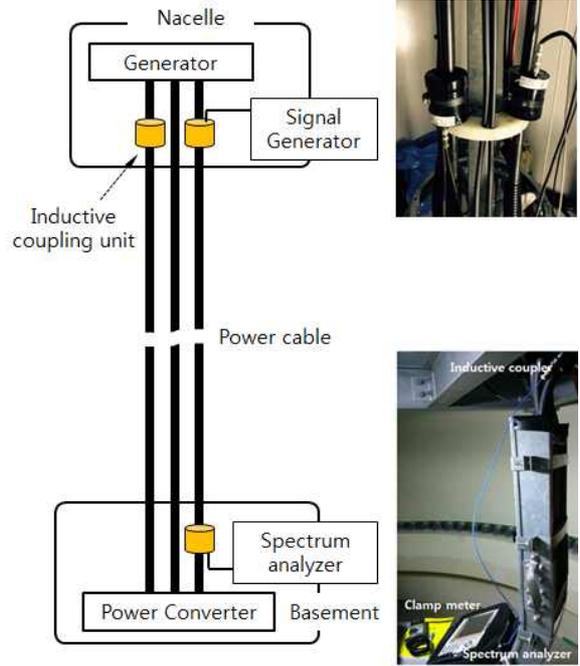


Fig. 7 Transmission loss test. The inductive coupling units are assembled on the power cables

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전송선로 및 결합기에 의한 손실

Fig. 7은 전송선로의 손실을 측정하기 위한 풍력발전기 내부 전력선에 비접촉식 결합기를 장착한 실험구성도이다. 본 실험에 사용한 해상풍력발전기는 나셀과 하단 전력변환기 간 3상 3선식으로 3개의 전력선 구조를 가지고 있다. 제작된 유도성 결합기는 나셀부 발전기 출력단의 전력선과 기저부 전력선에 동일한 결합기를 체결하였다. 신호 발생기를 이용하여 0 dBm의 정현파 신호를 상단 나셀부의 결합기에 인가하였으며, RF 스펙트럼 분석기는 하단 기저부의 결합기에 설치하여 출력파형과 피크 전력을 측정하였다.

Fig. 8은 입력 주파수별 전송선로 손실을 포함한 시스템의 전체손실을 측정된 결과이다. 전력선 통신 대역폭 영역에서 최대 35 dB의 손실이 발생하였다. Fig. 5에서 결합기의 평균 삽입손실은 -5 dB이므로 상단과 하단에 각각 체결된 두 개의 결합기에 의한 손실은 -10 dB 이다. 그러므로 통신 주파수 영역에서 전송선로의 신호 손실은 최소 2.5 dB/m 정도임을 알 수 있다. 이때 신호 대 잡음비 또한 15 dB 정도로 측정되었다. 측정된 3 dB 대역폭은 ~20 MHz 이므로, 샤논-하틀리 법칙 (Shannon-Hartley Law)에 따라 채널의 최대 전송용량은 100Mbps로 계산된다[Olivier, 2014].

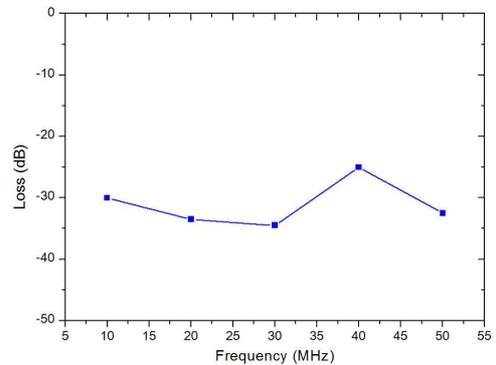


Fig. 8 Total signal attenuation

3.2 잡음 특성

Fig. 9는 선로의 잡음특성을 분석하기 위하여 측정된 스펙트럼이다. 통신이 개시되기 전 측정된 배경잡음은 Fig. 9 (a)와 같다. 여기서 1 MHz 이하 저주파영역에서의 잡음은 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이것은 발전기 내부의 전력망에 연결된 다양한 기기들에 의한 저주파 영역 잡음원이 많음을 보여준다. 한편 광대역 전력선 통신 영역인 2-30 MHz에서는 잡음 스펙트럼의 크기가 -55 dB 이하로 상대적으로 낮았다. 모뎀 연결 후 통신수행중에 측정된 스펙트럼은 Fig. 9 (b)와 같다. 배경잡음이 상대적으로 높게 나타났던 1 MHz 이하 주파수영역에서 신호결합은 비교적 낮은 반면, 통신 대역폭 영역에서는 상대적으로 높은 전력결합을 보인다.

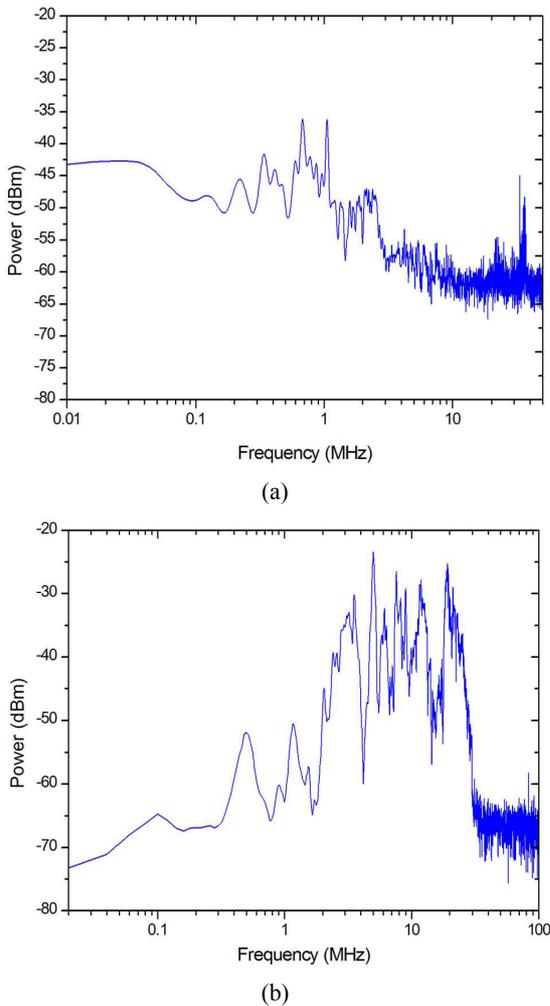


Fig. 9 Measured amplitude spectrum. (a) background noise and (b) spectral transmission while data transfer

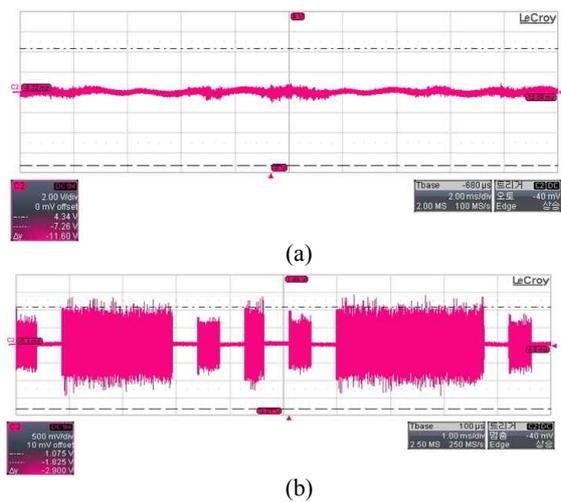


Fig. 10 Captured waveform. (a) background noise and (b) transmission signal

이것은 Fig. 5에서 보여준 유도성 결합기의 삽입손실이 저주파 영역에서 크게 나타남에 따라 배경잡음의 영향이 상당부분 차단되었음을 보여준다. 그러므로 유도성 결합기를 이용한 비접촉식 전력선 통신이 풍력발전기 내부 통신수단으로 적합함을 알 수 있다.

Fig. 10은 디지털 오실로스코프로 측정된 파형이다. Fig. 10 (a)는 전력선에 인가된 신호가 없을 때 시간영역에서 나타난 배경잡음을 보여준다. 500 kHz 부근 저주파 영역의 신호 간섭이 많음을 알 수 있다. 그러나 데이터가 전송되면 잡음레벨은 신호레벨에 비해 매우 낮아서 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 Fig. 10 (b)의 측정결과에서 확인할 수 있다.

3.3 전력선통신 성능

해상풍력발전기 내부 전력선의 선로 특성 분석 결과를 바탕으로 통신 성능을 조사하기 위하여 TCP/IP 통신 네트워크 속도 측정용 프로그램인 iperf로 데이터 전송률을 측정하였다. 풍력발전기가 발전중단 상태에서는 (전류 0A) 45 Mbps, 발전중일 때 10A의 전류가 흐르는 상태에서 통신 속도는 평균 25 Mbps 로 측정되었다.

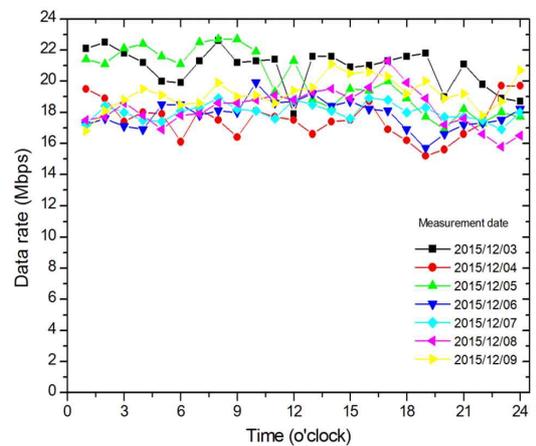
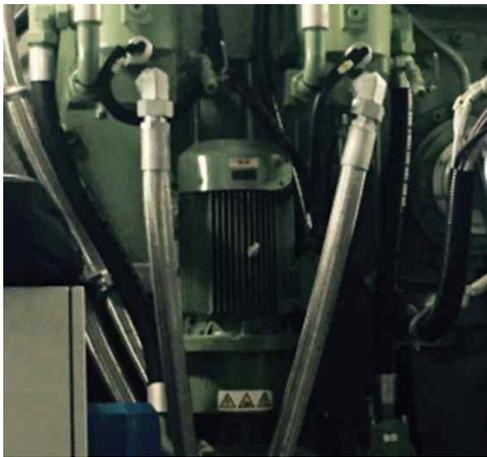


Fig. 11 Stability of data transmission for a week

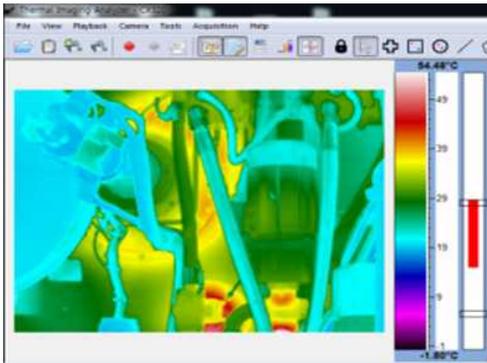
해상풍력발전기의 경우 유지보수를 위하여 항상 관리자가 상주해 있을 수는 없으며 육상의 풍력발전기보다 습도, 염분 등 환경이 열악하므로 장기간 통신이 안정적으로 유지될 수 있어야 한다. 특히 전력선의 경우 통신을 위한 전용선이 아니므로 발전 상태에 따른 선로의 조건은 통신 안전성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 2015년 12월 3일부터 12월 9일까지 일주일동안 매시간 마다 통신 속도를 자동으로 측정하여 결과를 저장할 수 있게 하였고, 그 결과를 정리하여 Fig. 11의 그래프에 제시하였다. 측정 기간 동안 통신 불량 없이 최소 15 Mbps 이상이 속도를 유지하였다. 일주일 동안의 평균 데이터 전송률은 20 Mbps 정도였으며 풍속에 따른 발전기의 발전 유무와 무관하게 안정적인 통신성능을 보임을 확인

하였다.

Fig. 12는 실시간 영상 신호 전송 및 열화상 이미지 모니터링 결과이다. Fig. 12 (a)와 같이 회전체가 있는 나셀 내부의 기어박스 주위를 촬영할 수 있도록 열화상 카메라를 설치하였고 유도성 결합기와 전력선을 통해 영상신호를 전송하였다. Fig. 12 (b)는 기저부에 설치된 모니터링 PC 화면에 나타난 전송영상이다. 열화상 이미지를 통해 관심영역의 각 부위별 온도 분포를 감시할 수 있으며 온도변화를 연속적으로 추적할 수 있다. 그러므로 풍력발전기 내부 전력선을 고속통신을 위한 통신선로로 활용할 수 있음을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 12 Real time thermal image transmission. (a) monitoring region at the nacelle, (b)real-time thermal image captured at monitoring PC.

4. 결 론

본 연구에서는 고전류 전력선에서도 전력선 통신이 가능한 비접촉식 유도성 신호결합기를 개발하였으며, 이를 제주도 해역에 설치된 3 MW급 해상풍력발전기의 내부 전력선 통신에 적용하였다. 개발된 결합기는 500A 전류 조건하에서도 코어의 간극 조절로 0.5 Mbps 이상의 통신 속도를 보였다. 풍력발전기 적용시험에서는 상단 나셀부와 하단 기저부간 100 m 길

이의 전력선으로 1 주일간의 연속통신 성능시험에서 평균 20 Mbps의 데이터 전송률을 확인하였다. 나셀 내부의 온도 변화를 관측하기 위한 열화상카메라의 실시간 영상도 오류 없이 전송이 가능하여 기존 풍력발전기 내부 통신 채널인 광섬유를 대체할 수 있는 유용한 통신 수단을 제공할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업과 한국산업기술진흥원의 지역주력산업육성사업 및 교육부의 산학협력선도대학 육성사업의 지원으로 수행된 연구결과물입니다.

References

- [1] Binkofski, J.(2005), "Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC couplers", International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, pp. 281-284.
- [2] Caithness Windfarm Information Forum (2016), Summary of Wind Turbine Accident data to 31 March 2016, <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/accidents.pdf>
- [3] Johan, R. and Lina, M. B.(2007), "Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997 - 2005", IEEE transactions on energy conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 167-173.
- [4] Journal of the Electric World(2014), Jeju offshore wind turbine, http://www.elec.or.kr/elec_journal/2014_4/9.pdf
- [5] Kim, D. W., Song, J. J. , Jung, N. J. and Choi, H. Y.(2012), "Design of SCADA System for a Large-Scale Offshore Wind Farm", Journal of Information Processing Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 161-170.
- [6] Olivier R. and José Carlos M.(2014), "On Shannon's Formula and Hartley's Rule: Beyond the Mathematical Coincidence", Entropy Vol. 16, pp. 4892-4910.
- [7] Park, J. Y., Kim, B. J., and Lee, J. K.(2011), "Development of Unmanned Remote Monitoring System for MW Class Wind Turbines", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 412-418.

Received 2 May 2016

Revised 28 June 2016

Accepted 28 June 2016