IR 카메라 기반의 풍력발전용 고장검출 시스템 개발

Development of IR Camera based Fault Detection System for Wind Turbine Generator

김세윤* · 김성호**†

Se-Yoon Kim* and Sung-Ho Kim**†

*군산대학교 전자정보공학부, **군산대학교 제어로봇공학과

*School of Electronic & Information Engineering, Kunsan National Univ.

**† Department of Control & Robotics Engineering, Kunsan National Univ.

요 약

최근 풍력발전은 전 세계적으로 전기의 생산을 위해 사용되는 신재생 에너지원 중 가장 빨리 성장하고 있는 분야이다. 일반적으로 풍력발전 시스템은 설치 후 약 20년 동안 사용될 수 있도록 설계되며 따라서 장기간 운전할 경우, 풍력 발전기에서의 고장은 필연적으로 발생하게 된다. 특히 풍력발전 시스템의 너셀 내부에는 로터샤프트, 기어박스 및 발전기 등이 설치되며 이들 요소의 정상적인 동작을 보장하기 위한 각종 냉각 시스템이 설치된다. 만일 이들 냉각 시스템에 고장이 발생된다면 전체 풍력발전시스템의 정상적인 동작을 보장하는 것이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 풍력발전 시스템 너셀 내부에 설치되는 각종 냉각장치의 고장을 미연에 방지할 수 있게 하는 IR 카메라 기반의 풍력발전용 고장검출 시스템을 제안하고 실제 시스템의 구현을 통해 제안된 기법의 유용성을 확인하고자 한다.

키워드 : 풍력발전기, 냉각 시스템, IR 카메라, 고장검출 시스템

Abstract

Wind energy is currently the fastest growing source of renewable energy used for electrical generation around the world. Generally, wind turbine systems are designed to be operated for twenty years long, Therefore, various faults in the wind turbine system inevitably occur during their long term period of operation. Especially, rotor shaft, gear-box and generator are installed inside of nacelle, furthermore, some cooling systems for normal operation of these devices are also required. If these cooling systems have failed in their operation, it is impossible for the entire system to be operated normally. In this work, IR(Infra Red) camera based fault detection system for the preventive detection of various cooling systems faults is proposed. To verify the applicability of the proposed system, physical implementation is embodied and various experiments are carried out.

Key Words : Wind power generator, Cooling System, IR(Infra Red) camera, Fault detection system

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 친환경적인 대체 에너지

접수일자: 2012년 10월 12일

심사(수정)일자: 2012년 10월 19일

게재확정일자 : 2012년 12월 4일

† Corresponding author

본 논문은 본 학회 2012년도 추계 학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구 결과임.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지원으로 풍력발전이 주목을 받고 있다. 독일, 네덜란드 및 덴마크를 중심으로 서유럽 여러 나라에서는 1970년대부터 풍력발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수 MW급 풍력발전 시스템을 상용화하기에 이르렀다. 국내에서도 다수의 연구기관을 중심으로 풍력발전 시스템의 국산화 연구개발이 활발히 진행되고 있으며 또한 정부 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내의 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다[1].

일반적으로 풍력 발전 시스템에는 블레이드, 메인샤프트, 기어박스, 발전기, 전력변환기, 변압기 등이 포함되며 또한 이들 장치의 과열방지를 위한 다양한 형태의 냉각 시스템이 사용되고 있다. 이들 냉각장치의 오동작 및 고장은 풍력발전 시스템에 치명적인 고장을 초래하여 전체 시스템의 고장으로 파급될 수 있다.

현재 냉각장치 등과 관련된 온도의 모니터링은 다수의 온도센서를 장착하여 SCADA 시스템을 이용하여 실시간

으로 모니터링을 수행하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 기존 풍력발전기의 냉각 시스템과 관련된 핵심부품(브레이킹 패드, 베어링 냉각 시스템, 발전기 냉각 시스템 등)의 지속적인 온도 모니터링을 가능케 하는 IR(Infra Red) 카메라기반의 풍력발전용 고장검출 시스템을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 풍력발전시스템의 구성 요소 및 이들 요소의 고장발생에 대해 기술하고자 하며 3장에서는 기존 온도센서와 병행으로 운전되면서 냉각과 관련된 특정 부위의 고장을 효율적으로 검출하기 위한 팬/틸트가 장착된 IR 카메라 기반의 고장 검출 시스템의 전체 구성에 대해 기술하고자 한다. 또한 4장에서는 본 연구에서 개발된 시스템의 실제 적용에 대해 기술하며 5장에서는 결론을 기술하고자 한다.

2. 풍력발전 시스템의 기본 구성 및 고장검출 시스템의 필요성

2.1 풍력발전 시스템의 기본 구성 요소

풍력발전시스템은 크게 블레이드, 메인샤프트, 기어박스, 발전기, 전력변환기 및 변압기 등으로 그림 1과 같이 구성되며 이들 요소의 원활한 동작을 위한 각종 냉각 시스템이 사용되고 있다.

그림 1. 풍력발전 시스템의 전체 구성도

Fig. 1. Overall configuration of wind turbine system

2.2 풍력발전 시스템의 고장 발생 원인

풍력발전기의 각 요소별 고장원인으로는 그림 2와 같이 기어박스, 발전기, 메인베어링 및 블레이드 순으로 고장 발생 빈도가 높다.

현재 사용되고 있는 진동 센서 및 전류 센서 기반의 CMS(Condition Monitoring System)는 핵심 부품의 고장 진단에 효율적이다. 하지만 피치제어기, 요제어기, 발전기 및 변압기와 관련된 냉각 시스템의 고장 검출은 주로 온도 센서를 사용하고 있으며 만일 온도 센서의 고장 및 오작동으로 인해 냉각 시스템의 고장을 인식하지 못하게 된다면 풍력 발전기의 전소로 파급될 수 있기 때문에 이를 위한 보다 향상된 고장 진단 시스템의 도입이 요구된다[2].

그림 2. 풍력발전시스템의 고장발생 비율

Fig. 2. Fault occurrence rates of wind turbine system

3. IR 카메라 기반의 풍력발전용 고장검출 시스템

본 연구에서는 기존의 온도 센서와 병행 운전이 가능한 IR 카메라 기반의 풍력발전용 고장 검출 시스템을 제안하고자 하며 개발될 시스템의 전체 구성을 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3. IR 카메라 기반의 풍력발전용 고장검출 시스템

Fig. 3. IR camera based fault detection system for wind turbine system

상기 시스템에 대한 전체 동작은 다음과 같다.

풍력발전기 너셀 내부에 설치되는 “IR 카메라 및 팬/틸트 구동부”는 “원격제어 및 모니터링부”로부터 RS232 통신에 의해 제어되는 팬/틸트 모듈과 TCP/IP 통신으로 데이터를 주고 받는 IR 카메라로 구성된다. 또한 IR 카메라에는 렌즈의 초점조절을 위한 구동장치가 장착되어 있으며 이는 “원격제어 및 모니터링부”로부터 RS232 통신에 의해 제어된다. “원격제어 및 모니터링부”에는 IR 카메라로부터의 열화상 이미지가 입력되며 이를 기반으로 에지검출 및 템플릿 매칭 알고리즘이 탑재되어 있다.

3.1 IR 카메라를 위한 Hill climbing 기반의 자동 초점 조절 알고리즘

앞서 언급한 바와 같이 IR 카메라는 풍력발전 시스템의 너셀 내부에 설치되며 너셀 내부에 존재하는 다양한 열발생 장치, 즉, 브레이킹 패드, 증속기 오일 온도, 발전기 냉각수 온도 등의 측정을 위해 상하좌우 움직임을 가능케 하는 팬/틸트 시스템과 연동되어 운전된다. 따라서 한 지점에서 여러 곳에 분산 설치된 요소의 정확한 온도 측정을 위해서는 카메라 렌즈의 자동 초점 조절이 가능해야 한다.

열화상 카메라에서 나오는 영상은 적외선 파장을 이용한 것으로 대비값의 측정이 용이하지 않을 뿐만 아니라 풍력발전기의 너셀 내부에는 항상 빛이 존재하지 않기 때문에 자동 초점에 널리 사용되는 콘트라스트 검출과 위상차 검출을 그대로 사용하는 것은 불가능하다[3, 4]. 이에 본 연구에서는 IR 카메라의 자동 초점 조절을 위해 열화상 카메라로부터의 영상을 에지 영상으로 변환한 후, 이로부터 흰색 픽셀의 수를 최대화 하여 자동으로 초점을 추종할 수 있는 Hill climbing 알고리즘을 적용하고자 하였다. 사용된 Hill climbing 기법을 동작 알고리즘을 나타내면 그림 4, 5와 같다.

그림 4. Hill-Climbing 알고리즘의 동작
Fig. 4. Operation of Hill climbing algorithm

그림 5. 기울기 변화에 따라 최대값을 찾는 과정
Fig. 5. Searching process for maximum point according to the variation of gradient

Hill-Climbing 알고리즘은 특정 지점에서 구한 기울기를 이용하여 이동을 계속 하게 되면 궁극적으로 정상에 도달할

수 있다는 원리에 기반한다. 이에 본 연구에서는 IR 카메라의 자동 초점 조절을 위해 식(1)에서와 같이 에지화된 영상으로부터 현재의 흰색 픽셀수와 이전 스텝의 흰색 픽셀수의 차이를 이용하여 구해진 기울기를 사용하고자 하였다.

$$\nabla(t) = \frac{\text{white_pixel}(t-1) - \text{white_pixel}(t)}{T_{on}(t-1)} \quad (1)$$

식(1)의 $\nabla(t)$ 은 시각 t 에서의 흰색 픽셀 수의 변화율을 의미하며 분모의 $T_{on}(t-1)$ 은 시각 $t-1$ 에서 t 까지의 렌즈의 이동 시간(turn-on)을 의미한다.

식(1)로부터 구해진 변화율을 기반으로 다음번 렌즈의 이동거리($T_{on}(t)$)는 식(2)와 같이 변화율에 반비례하여 결정된다.

$$T_{on}(t) = \alpha^* \frac{1}{\nabla(t)} \quad (2)$$

여기서, $T_{on}(t)$ 은 렌즈 회전을 위한 on-time을 의미하며 α 는 비례상수이다. 본 연구에서 사용된 Hill climbing 기법에 의한 자동 초점조절 알고리즘의 플로우차트를 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6. Hill climbing기법에 의한 자동초점조절 알고리즘
Fig. 6. Automatic focusing algorithm based on Hill climbing algorithm

3.2 물체 인식을 위한 템플릿 매칭 알고리즘

템플릿 매칭은 그림이나 영상에서 저장된 이미지(템플릿)를 찾아내는 방법으로 표1에서와 같이 OpenCV(Open Computer Vision)에서 제공하는 템플릿 매칭 함수가 존재하며 본 연구에서는 상관계수 매칭기법을 사용하였다.

표 1. OpenCV에서 제공하는 템플릿매칭 함수
Table 1. Template matching function provided by OpenCV

CV_TM_SQDIFF	제공차 매칭
CV_TM_SQDIFF_NORMED	제공차 매칭 정규화
CV_TM_CCORR	상관관계 매칭
CV_TM_CCORR_NORMED	상관관계 매칭 정규화
CV_TM_CCOEFF	상관계수 매칭
CV_TM_CCOEFF_NORMED	상관계수 매칭 정규화

상관관계 매칭기법은 IR 카메라에서 촬영된 영상을 에지 영상으로 변환한 후, 변환된 에지 영상으로부터 찾고자 하는 템플릿을 왼쪽에서 오른쪽으로, 위에서 아래로 한 픽셀씩 이동하면서 템플릿과의 유사성을 계산하게 된다.

3.3 IR 카메라용 팬/틸트 시스템

너셀 내부의 여러 위치에 설치된 다양한 냉각장치의 효율적인 온도 모니터링을 위해 IR 카메라는 주기적으로 측정 위치가 변경되어야 하며 이를 위해 본 연구에서는 그림 7과 같은 팬/틸트를 사용하였다.

그림 7. 팬/틸트 모듈
Fig. 7. Pan/tilt module

그림 7의 팬/틸트 모듈은 좌·우, 상·하 이동이 가능하며 이는 제어 신호와 해당 릴레이에 인가되는 구동 시간(on-time)에 의해 제어된다. 또한 IR 카메라의 렌즈에 장착된 초점 조절을 위한 DC 전동기의 위치도 해당 릴레이에 인가되는 구동 시간에 의해 조절된다. 본 연구에서는 팬/틸트의 위치 및 IR 카메라의 위치 제어를 위한 제어 보드를 개발하였으며 이에 대한 회로도를 나타내면 그림 8과 같다.

그림 8. 팬/틸트 및 렌즈 제어 모듈 회로도
Fig. 8. Circuit diagram for control of pan/tilt and lens

4. 시스템 구현 및 실험

4.1 IR 카메라 기반의 풍력발전 고장검출 시스템

본 연구에서 제안된 IR 카메라기반의 풍력발전용 고장검출 시스템의 실제 구성을 나타내면 그림 9와 같다.

그림 9. 팬/틸트 및 IR 카메라
Fig. 9. Pan/Tilt and IR camera

본 연구에서 사용된 IR 카메라의 사양을 나타내면 표2와 같다.

표 2. IR 카메라와 팬/틸트의 사양
Table 2. Specification of IR camera and pan/tilt

IR카메라	팬/틸트
해상도 : 384x288 pixels	회전각도 : Pan(355°), Tilt(±60°)
온도측정범위: -20°C~650°C	적재중량 : 최대 4.5Kg
운전전압 : DC 12V	운전전압 : AC 24V

4.2 IR 카메라를 위한 자동 초점 조절 알고리즘 실험

본 연구를 진행하기위해 IR카메라의 영상을 받아오고 렌즈포커스조절 및 팬/틸트의 제어와 템플릿매칭, Hill Climbing 알고리즘, DB 온도 저장을 하기위해 개발한 프로그램은 그림 10과 같다.

그림 10. 프로그램 메인 화면
Fig. 10. Program main page

본 프로그램은 팬/틸트와 렌즈의 포커스를 제어하기 위한 RS232 통신과 IR카메라 영상을 취득하기위한 TCP/IP로 구성된 “통신연결부”, IR카메라 이미지와 에지영상변환, 템플릿 매칭이 동작하는 “템플릿매칭부”, Hill-Climbing 알

고리즘을 이용한 자동초점제어를 하는 "Hill-Climbing 알고리즘부", 템플릿매칭에서 지정된 ROI 영역의 IR영상에서 취득되는 온도값을 저장하기 위한 "데이터베이스 저장부"로 구성되어 있다.

IR 카메라로부터의 그레이 영상과 에지 검출된 영상을 기반으로 자동 초점 조절이 수행되는 화면을 나타내면 그림 11과 같다.

그림 11. 자동 초점 조절 알고리즘 동작 화면

Fig. 11. Operational screen of automatic focusing algorithm

그림 11(a)와 같이 초기의 에지 영상은 초점이 맞지 않기 때문에 그림 11(b)와 같이 흰색 픽셀의 수가 적게 나타나게 된다. 이때 Hill-Climbing 알고리즘에 의해 자동 초점이 조절이 되며 최종적으로 그림 11(c) 및 그림 11(d)와 같은 선명한 영상이 얻어짐을 알 수 있다.

4.3 템플릿 매칭 알고리즘

그림 12(a)는 초점이 조절된 IR 영상이며 그림 12(b)는 이의 에지화된 영상이고 그림 12(c)는 에지화된 영상에서 설정된 템플릿을 찾는 화면이다.

그림 12. 템플릿 매칭 알고리즘 동작 화면

Fig. 12. Operational screen of template matching algorithm

만일 팬/틸트의 이동으로 인해 IR 카메라로부터의 영상에 변화가 생기면 설정된 템플릿의 상관계수가 낮아져 그림

13과 같이 템플릿의 인식이 불가능하게 된다. 설정된 템플릿의 인식이 10초 이상 되지 않을 경우, 다음의 템플릿에 대한 매칭이 수행되어 해당 템플릿에 대한 상관계수를 지속적으로 탐색하게 된다.

그림 13. 변화된 영상에 대해 템플릿 매칭이 실패한 경우
Fig. 13. Failure of template matching in case of varied image

그림 14는 그림 13에서와 같이 템플릿의 인식이 중단된 상태에서 10초간 상관계수의 값이 0.9 이상이 되지 않을 경우 순차적으로 다음 템플릿과의 상관계수를 구하는 과정을 나타낸다.

그림 14. 변화된 영상에서 지정된 템플릿을 찾는 화면
Fig. 14. Screen shots searching for designated template in case of varied image

4.4 실시간 모니터링 및 데이터 저장

풍력발전기의 고장유무를 판단하기 위해서 ROI(Region of Interest)의 온도를 주기적으로 모니터링하여야 한다. 이에 본 연구에서는 해당 ROI의 측정된 온도값을 5초마다 한번씩 데이터베이스에 저장하도록 하였다. 데이터베이스에 저장된 데이터는 MySQL을 이용하여 해당 ROI의 온도값을 1시간 단위로 다시 읽어서 평균을 내고 그 평균값과 현재 측정되고 있는 온도값의 오차가 2°C 이상 차이가 나게 되면 이상이 발생한 것으로 간주하고 경고 메시지를 발생하도록 하였다.

count	yy	mm	dd	hh	min	temp1
52	2012	9	25	21	5	26.59729
53	2012	9	25	21	5	26.502
54	2012	9	25	21	5	26.61911
55	2012	9	25	21	5	26.63358
56	2012	9	25	21	5	26.49441
57	2012	9	25	21	5	26.61816
58	2012	9	25	21	5	26.507
59	2012	9	25	21	5	26.63402
60	2012	9	25	21	5	26.61622
61	2012	9	25	21	5	26.48048
62	2012	9	25	21	5	26.6263
63	2012	9	25	21	5	26.48368
64	2012	9	25	21	5	26.47942
65	2012	9	25	21	5	26.59622

그림 15. 데이터베이스에 저장되는 ROI의 온도 정보
Fig. 15. Temperature information of ROI stored in Data base

5. 결 론

본 연구에서는 풍력발전시스템의 핵심 구성요소의 냉각과 관련된 시스템의 고장 검출을 위해 IR 카메라를 기반으로 하는 고장 검출 시스템을 제안하고 실제 구현을 통해 제안된 기법의 유용성을 확인하였다. 실험 결과 IR 카메라의 위치 변화에 따른 Hill-Climbing 기법에 의한 자동 초점 조절 및 에지영상으로부터의 템플릿 매칭 기법이 효과적으로 적용됨을 확인할 수 있었다. 또한 팬/틸트에 의해 영상의 위치가 변하여도 템플릿에 해당하는 영역에 대한 지속적인 온도의 모니터링이 가능함을 확인하였다.

References

- [1] S.D. Oh, "Current development trend of wind turbine system," *Journal of Fluid Machinery*, vol. 8, no. 3, pp. 65-72, 2005.
- [2] M. P. Papaalias, "Development and Demonstration of a Novel Integrated Condition Monitoring System for Wind Turbines," 2009.
- [3] C.S. Kim, B.H. Kwon and K.S. Kwak, "The Design and Implementation of the Adaptive Contrast Controller System," *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 5, no. 1, pp. 38-46, 2002.
- [4] K.H. Koh, J.G. Kuk, W.S. Choi and N.I. Cho, "Inter-channel similarity measure for autofocus on digital camera with divided aperture," *The Korean Society of Broadcast Engineering*, pp. 401-404, 2010.
- [5] Y. Amirat, M. Benbouzid, B. Bensaker, and R. Wamkeue, "Condition Monitoring and fault Diagnosis in Wind energy conversion Systems: A Review," in *Proc. 2007 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, vol. 2, pp. 1434-1439, 2007.
- [6] L. Barbara, J. Upton and J. Stone, *Photography*, Prentice Hall, 2007.
- [7] C.H. Park and Y.S. Cho, "Auto Focusing Algorithm for Optimization of Hill Climbing Curve," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 9, no. 1, pp. 545-548, 1996.
- [8] Y.M. Baek and J.Y. Choi, "Moving Object Detection in Pan-Tilt Camera using Image Alignment," *2008 CICS The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 260-261, 2008.

저 자 소 개

김 세 윤(Se-Yoon Kim)
 2008년 : 군산대학교 전자정보공학부 학사 졸업
 2011년~현재 : 군산대학교 대학원 전자정보공학부 석사과정
 E-mail : ksydiary@kunsan.ac.kr

김 성 호(Sung-Ho Kim)
 1984년 : 고려대학교 공과대학 학사졸업
 1986년 : 고려대학교 대학원 석사졸업
 1991년 : 고려대학교 대학원 박사졸업
 1988년~1990년 : 고려대 생산기술연구소 연구원
 1995년~1996년 : JAPAN HIROSHIMA UNIVERSITY POST-DOC
 1991년~현재 : 군산대학교 제어로봇공학과 교수
 E-mail : shkim@kunsan.ac.kr