

풍력발전용 증속기 개발 기술 소개

Introduction of Development techniques of Step-up Gearbox for Wind Turbine

이근호 · 박영준 · 송진섭
G. H. Lee and Y. J. Park and J. S. Song

1. 서 론

풍력발전기는 대형화, 육상에서 해상으로 개발되고 있는 추세이다 이는 육상에서의 고르지 못한 풍속과 대형화의 한계로 인해 해상으로 진출하여 발전효율을 높이고자 하기 위함이다. Fig 1.1에 따르면 2010년 이후로 해상풍력발전기의 보급이 늘어남을 볼 수 있다. 풍력발전기는 그 설치 장소의 유지보수가 용의하지 못한 장소에 설치되는 것이 일반적이며 특히 해상용의 경우 유지, 보수 작업 여건이 더 좋지 못하고 높은 비용이 요구되므로 점으로 인하여 고 신뢰성을 요구하고 있다. 풍력발전기의 핵심 요소인 증속기의 경우 신뢰성에 대한 중요도가 더 높다고 알려져 있다. 이는 풍력발전기의 주요 고장 부품의 통계에서 볼 때 전기시스템은 22% 유압시스템은 12% 증속기는 5% 정도로 발생빈도에서는 3번째 순위이나, 발생 심각도를 보면 증속기가 첫째이다. 증속기의 경우 고장 빈도도 작지 않고 고장 발생 시 심각도가 높아 신뢰성이 가장 높게 요구된다. 이는 풍력발전용 증속기 개발에서 기본적으로 고려되어야 하는 점이 신뢰성이 됨을 의미하는 것이고 증속기의 경우 각 기술별 특성에 이를 반영하고 있음을 알 수 있다.

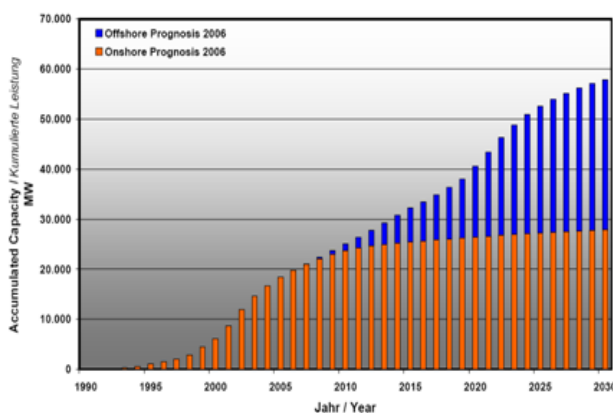


Fig 1.1 풍력발전기 설치 통계

2. 풍력발전용 증속기 특징

충력발전용 증속기는 속도가 12~40 rpm의 저회전, 30 500 ton-m의 고토크를 갖는 입력동력을 속도가 1,000~1,800 rpm으로 증속하여 고회전하며 300~1500 Kgf.m의 저토크의 출력동력으로 변환하는 역할을 한다. Fig2.1은 상기에서 언급된 풍력발전용 증속기 특징을 정리하여 보여주는 개념도이다. 이때 입력동력은 풍력에 의하여 날개가 회전하면서 얻게 되는 동력임으로 날개에 영향을 주는 바람의 변동성 및 타워 등 외부 구조물에 의한 영향을 받는 특성을 갖게 된다. 일반적인 산업용 기어박스의 경우는 토크에 해당하는 1DOF 모멘트 성분이 주로 작용하나, 풍력발전용 증속기는 토크성분 외에 날개의 변위에 따른 힘과 모멘트 성분이 크게 작용한다. 따라서 6DOF 모션에 따른 힘과 모멘트성분이 모두 작용한다. 이는 날개의 회전에 따른 동적 거동(Dynamic Motion) 특성이 증속기에 영향을 크게 준다. 그리고 증속기 개발에서 소형화와 경량화가 또한 요구되는데 이는 풍력발전기의 무게를 줄이는 것이 경제적 측면에서 요구됨으로 나셀의 무게를 줄이는 것과 부피를 최적화하는 것에 따라 요구되는 것이다.

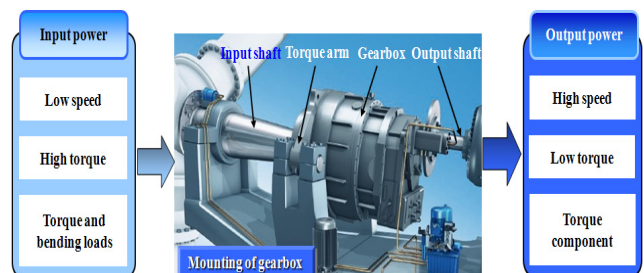


Fig. 2.1 풍력발전용 증속기 특징 개요

또한 풍력발전기가 20년 이상의 긴 수명을 요구함에 따라 신뢰성을 확보하는 것에 대한 입증이 필

요하다. 그리고 증속기는 개발 시 높은 효율을 가지고 있고 저소음의 특성이 갖는 것이 요구된다. 상기와 같은 특성과 요구에 따라 풍력발전용 증속기는 일반적인 설계, 해석 및 제작 기술과 함께 수명 확보가 깊이 연관된 시험 및 평가기술, 신뢰성을 확보하기 위한 원천 유지보수 기술은 성능 고장 조기 검 증기술이 요구되어 진다.

3. 개발 기술

3.1 설계 및 해석 기술

풍력발전용 증속기는 소형화, 경량화를 위하여 유성기어트레인을 일반적으로 적용하고 있다. 유성기어트레인은 소형, 경량화에 장점이 있는 반면 하중을 적절한 분배하여 담당하는 유성축의 하중분배 (Load sharing)를 일정하지 않을 때 설계 수명에 비하여 짧은 시간에 손상 및 파손이 발생하게 된다. Fig 3.1은 유성기어트레인에서 선기어와 유성기어 중축이 변위를 나타낸 것이다. 붉은색으로 나타낸 선기어의 중심 궤적이나 푸른색의 유성기어 중심궤적은 일정범위의 변위를 갖게 됨을 보여준다. 따라서 선기어와 유성기어의 궤적이 가장 먼 거리로 움직일 때는 각 유성기어에서 일정한 하중 분포를 갖지 못하고 일부 유성기어에 하중이 집중되는 현상이 발생할 수 있는데 이와 같은 경우 기어나 베어링 표면에 부하증가로 손상 및 파손의 원이 되고는 이는 수명의 감소로 이어질 수 있다.

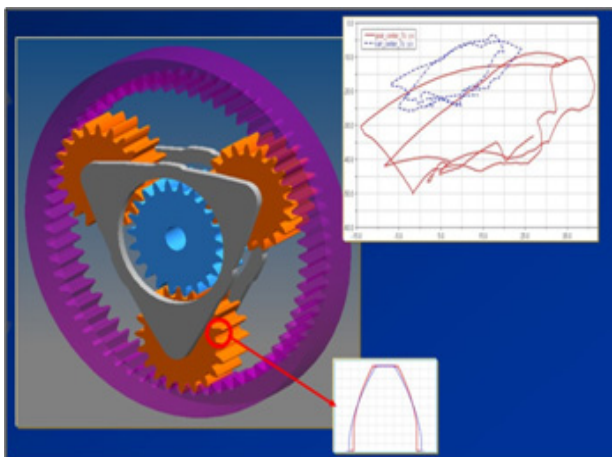
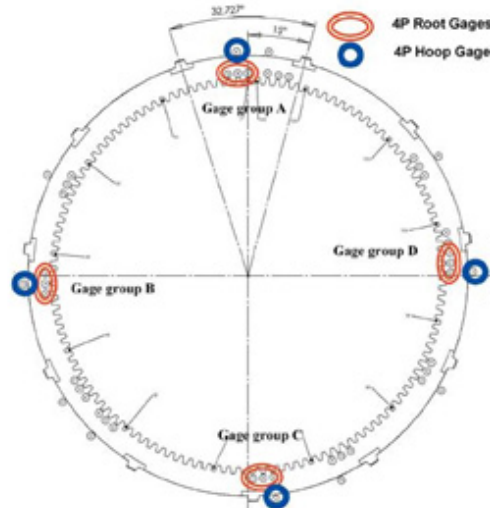


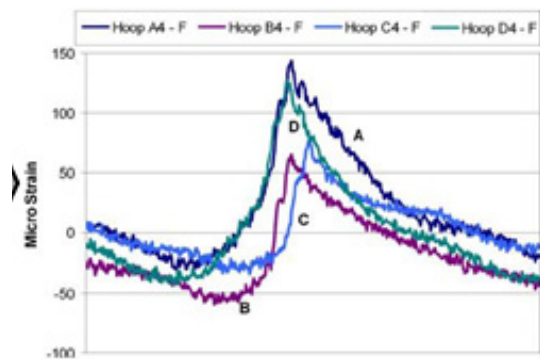
Fig 3.1 동특성에 따른 유성기어 중심축 변위 특성

Fig 3.2는 실험적 방법을 활용을 통하여 하중분배 특성을 확인한 것이다. 4개의 유성기어를 갖는 유성기어트레인의 링기어에 이뿌리 및 림 부분에 스트

레인게이지를 3.2.a와 같이 부착하여 부하에 따른 하중변화를 측정하였다. 그 결과 3.2.b와 같이 각 위치에서 유사한 하중 패턴을 보여주고 있으나 위치 A에서 가장 큰 하중이 걸리고 위치 B지점에 가장 작은 하중이 걸리는 것을 볼 수 있다. 이는 유성기어트레인에서 일정한 하중분배가 이루어지지 않음을 보여주는 사례이다.



3.2.a. 링기어의 스트레인게이지 부착 위치



3.2.b. 링기어 각 위치에서 측정값

Fig 3.2 유성기어 분포하중 변화 특성

따라서 유성기어트레인에서 기어의 수명 및 강도 향상을 위하여 하중분배가 일정치 못한 부분은 하중분배를 일정하게 하는 노력의 일환으로 동역학적 해석을 통한 물림 위상차(mesh phasing)에 대한 방법이 제시되고 있다. 위상차 기법은 설계 시 기어 이수의 조정을 통한 방법과 유성기어의 조립 위치의 조정 방법을 통하여 기어이치면의 접촉 위상을 조정하는 방법이다. Fig 3.3에서 왼쪽의 유성기어트레인 유성기어 조립시 같은 비율의 공간상에서

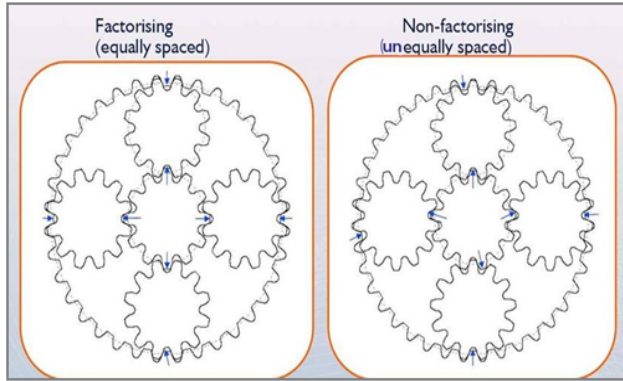


Fig 3.3 Phasing 적용 유성기어 비교

조립을 한 것이고 오른쪽 유성기어트레인은 기어이수의 조정과 조립위치의 조정을 통하여 유성기어가 비대칭적으로 조립이 된 것이다. 이 경우 기어가 접촉하는 위상의 차이가 발생하여 소음 및 진동 특성의 향상하고 전달오차(Transmission Error)의 최소화되는 결과를 얻을 수 있다. 그러나 어느 정도 위상차를 가는 것이 가장 최적인가를 결정하는 것은 동력학적 해석 등을 통하여 검증을 하여야 한다. 위상차를 잘못 주는 경우 위상차를 주지 않는 것보다 나쁜 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 유성기어트레인이 하중분배는 일정하게 하는 것도 중요하지만, 변동 및 이상 부하가 발생하는 경우 기어의 치면 접촉을 치폭면에서 균일하게 가져가는 것은 매우 중요한 이슈이다. 이 경우 하중분배가 일절하지 못하면 치면의 접촉은 더 좋지 않아 치면 일부에 집중하중으로 발생하게 되고 이는 기어파손의 주요 원인 중에 하나이다. 따라서 부하 변동에 따른 치면의 하중분포를 일정하게 하는 기술로서 유연핀(Flexible Pin) 적용 기술이 있다.

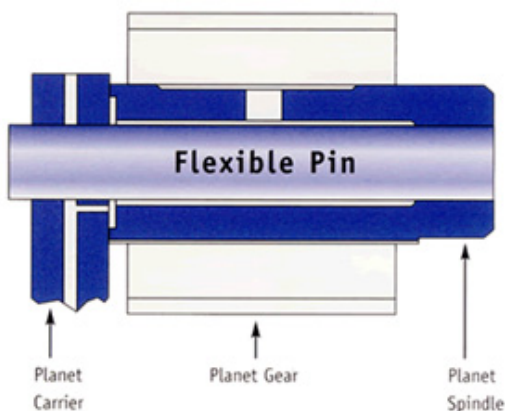


Fig 3.4 유성축 유연핀(Flexible pin)

Fig3.4와 같은 모양의 유연핀을 유성기어트레인의 유성기어축에 적용하는 경우 유성기어 축 변형 시 기어의 접촉(Contact)을 좋게 하여 접촉하중 분포를 균일하게 함으로 기어수명을 연장할 수 있다.

또한 풍력발전용 증속기의 기어트레인에 손상 및 파손에 영향을 많이 주는 것으로 알려진 이상 및 과부하에 대한 대책으로 Fig 3.5와 같은 유체커플링을 활용한 부하저감 장치가 제안되고 있다. 유체커플링은 강체에 비하여 유연성을 가지고 있으므로 그 특성을 활용하여 이상 및 과부하가 입력 시 유체커플링에서 순간 부하의 증가를 저감하여 기어트레인의 손상과 파손을 방지하게 된다. 그리고 이 장치는 그림과 같이 유체커플링에 동력이 순환되는 유성기어트레인을 추가하여 증속기의 출력 속도를 원하는 RPM으로 제어할 수 있는 속도 조절 기능을 갖도록 할 수 있다. 증속기의 출력속도를 일정하게 제어할 수 있으면, 제너레이터 및 인버터의 기능을 단순화할 수 있으므로 풍력발전기 시스템 설계 관점에서 장점으로 작용한다.

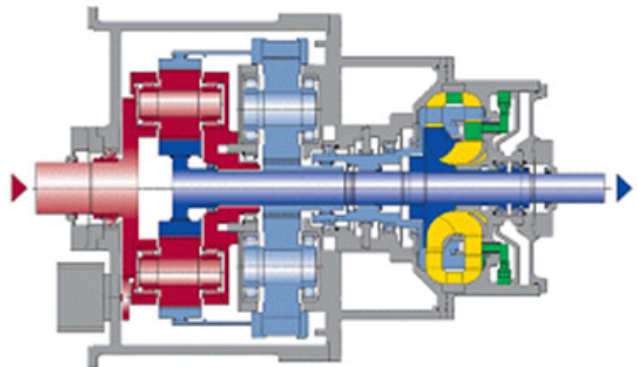


Fig 3.5 유체커플링을 이용한 부하저감 장치

3.3 시험 및 평가 기술

풍력발전용 증속기의 개발에서 개발된 시제품 증속기에 대한 시험/평가는 매우 중요하다. 특히 산업용 기어박스에 비하여 긴 수명은 20년 이상의 성능과 수명을 요구하는 풍력발전용 증속기의 경우 이를 입증하는 것은 상용화에 필수적이다. 그러나 풍력발전용 부품의 경우 시험장비는 그 용량이 MW 단위이므로 장비의 규모가 매우 크고 비용이 많이 드는 어려움이 있다. 또한 풍력발전용 증속기가 가지고 있는 특성을 반영한 시험/평가를 하기위하여 일반적인 기어박스에 대한 시험/평가 장비에 추가 시험설비를 설치하여 특성을 반영한 시험평가를

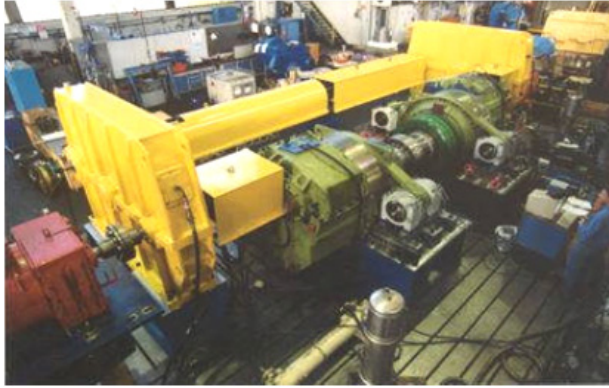


Fig 3.6 기계식 Back-to-Back 시험장치

진행한다. Fig 3.6의 산업용 기어박스의 내구성 시험에 일반적으로 사용되는 기계식(Mechanical Type) Back-to-Back 방식의 시험 장치이다. 이 시험 장치는 기어박스들을 Close- Loop방식으로 연결하여 토크를 내부에서 순환하는 방식이므로 제작비용이 상대적으로 저렴하고 운용비용이 적게 드는 장점이 있어 널리 사용되는 방식이다. 그러나 순간적인 부하의 변동이나 성능을 검증하기에는 구조적인 어려움이 있어 주로 내구시험용 장비로 활용된다. 순간적인 부하의 변동 및 성능을 검증하는 시험 장비로는 Fig 3.7과 같이 Dynamometer를 활용된다. Dynamo방식은 부하의 특성을 잘 반영하여 시험이 가능한 시험 장비이고 구조가 간단하지만, MW 단위의 시험장비 구성에는 매우 높은 비용이 요구된다.

Fig 3.8은 미국 신재생에너지연구소(NREL)의 증속기 시험장비의 개념도이다. NREL 장비는 2.5MW 용량을 가지고 있으며 풍력발전기의 증속기가 장착되는 방식과 동일하게 일정각도(0~6도)를 가지고



Fig 3.7 Dynamo식 시험장치

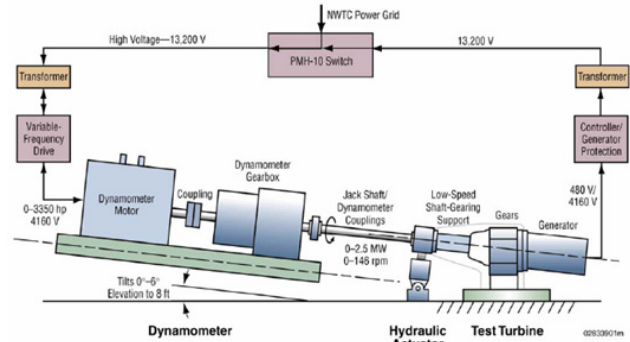


Fig 3.8 NREL 2DOF 부하재현 시험장비 개념

증속기 장착되도록 하였다. 또한 증속기 입력 저속축에 유압 엑츄에이터를 장착하여 증속기에 전달되는 토크 성분 외에 로터하중의 변동 특성 등을 전달하도록 한 것이 특징이다. NREL 시험장비는 풍력발전기에서 증속기에 작동되는 상태를 제한적인 실험실에서 최대한 재현하고자 하여 개발된 장비로 2DOF 이상 운동이 모사된다.

그러나 가급적 풍력발전기의 증속기에 작용하는 힘과 모멘트 성분을 모두 적용하여 실제 부하를 재현하여 시험을 하는 것이 필요하다. 따라서 Fig 3.9와 같은 실제 부하 재현 Dynamometer Type 시험장비 개념이 제안되었다. MTS사에서 제안된 시험장비 개념은 6DOF에 의한 힘과 모멘트를 5DOF 운동은 다수의 유압식 엑츄에이터를 이용하여 재현하고 토크성분인 모멘트 M_z 는 다이내모미터를 사용하여 부하를 재현하는 방식이다. 제안된 시험장비는 풍력발전용 증속기 설치되는 것을 고려하여 일정각도를 가지고 설치되도록 제안되었다. 제안된 시험장비의 개념은 덴마크 Vesta사 등에서 채택하여 실제 증속기 외에 풍력발전용 드라이브트레인 시험/평가에 활용되고 있다.

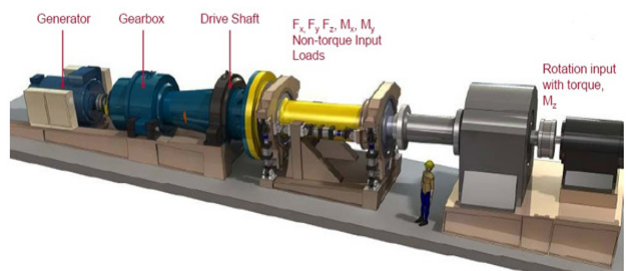


Fig 3.9 MTS 6DOF 부하재현 시험장비 개념

제안된 시험장비들은 풍력발전용 증속기의 신뢰성 향상을 위한 연구에 필수적으로 사용되는 장비

로 활용되고 있다. Fig 3.10은 미국에서 국가 전략적 연구로 진행 중인 풍력발전용 기어박스신뢰성연구(Gearbox Reliability Colaboratory)의 추진 개념이다. 증속기의 신뢰성을 전체적으로 확보하기 위하여 설계, 해석과 시험실의 시험평가, 풍력 발전단지의 실증연구 결과를 유기적 연동하여 신뢰성연구를 수행되고 있는 사례이다.

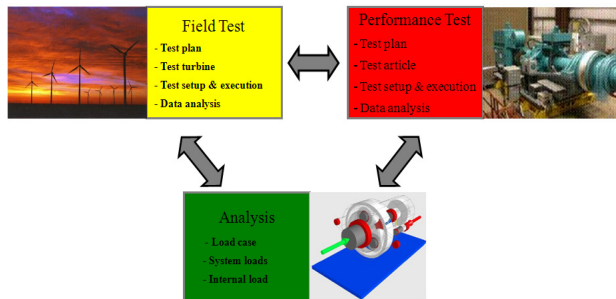


Fig 3.10 증속기 신뢰성 확보 연구 개념

4. 결 론

본 기고에서는 대형화 및 해상용 풍력발전기가 주로 개발되는 현실에서 증속기의 높은 신뢰성 요구 현상에 대하여 알아보았다. 또한 증속기가 가지고 있는 특성과 이에 대한 대처 기술에 대하여 논하였다.

풍력발전용 증속기는 소형화, 경량화를 위하여 사용되는 유성기어트레인을 하중분배(Load sharing) 특성 및 이를 대처하는 기술을 적용하여 설계 수명까지 손상 및 파손을 방지하기 위한 기술로 물림 위상차(mesh phasing)에 대한 방법, 유연핀(Flexible Pin) 적용 기술 및 유체커플링을 이용한 부하저감 기술을 소개하였다.

그리고 개발된 시제품 증속기에 대한 시험/평가로 매우 중요한 시험장비 기술에 대하여 기계식 Back-to-Back 시험장치, Dynamo식 시험장치, 2DOF 부하재현 시험장비, 6DOF 부하재현 시험장비 및 증속기 신뢰성 확보 연구에 대하여 간략하게 소개하였다.

참고문헌

1) Ayirash Singh, Ahmet Kahraman, and Haris

Ligata "Internal Gear Strains and Load Sharing in Planetary Transmission : Model and Experiments.", ASNIE J. Mech Des, July 2008, Vol 130/072602-1~102008,
 2) Romax Semina, Factorizing & Non Factorizing Planetary Gear Design
 3) Walt Musial, Brian McNiff, , "Wind Turbine Testing in the NREL Dynamometer Test Bed.", NREL, June 2000, NREL/CP-500-28411, 2000
 4) Wind Turbine Testing Solutions", MTS
 5) Francisco Oyaque, "Gearbox Reliability Collaborative Experimental Data Overview & Analysis.", NREL/PR-500-48176, 2010
 6) W. MUSIAL, S. Butterfield and B. McNiff, "Improving Wind Turbine Gearbox Reliability." NREL/CP-500-41548, 2007

[저자 소개]



이 근 호(책임저자)
 E-mail : ghlee762@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7161
 1961년 3월 15일생.
 1997년 University of Connecticut 기계공학과 박사. 동년 한국기계연구원 입사, 현재 풍력발전시스템 및 건설기계 동력전달장치분야 연구



박 영 준
 E-mail : yjpark77@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7994
 1976년 11월 6일생.
 2006년 서울대학교 농기계학과 전공 박사. 2006년 한국기계연구원 입사. 풍력발전동력전달장치 및 신뢰성평가 연구.



송 진 섭
 E-mail : jssong@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7442
 1971년 7월 18일생.
 2004년 펜스테이트 기계공학과 박사. 2010년 한국기계연구원 입사, 부유식 풍력발전시스템 동역학 해석 연구, 구조 및 동역학 분야 연구.