

## 풍력 터빈의 요 시스템 설계

이 현주<sup>1)</sup>, 최 원호<sup>2)</sup>, 안 경민<sup>3)</sup>

### Design of Yaw System of Wind Turbine

Hyun Joo Lee, Won Ho Choi, Kyoung Min Ahn

**Key words** : Wind turbine(풍력발전 시스템), Yaw system(요 시스템), Yaw bearing(요 베어링), Yaw drive(요 드라이브), Yaw brake(요 브레이크), Yaw moment(요 모멘트)

**Abstract** : Using yaw system, Wind turbine can face the wind to make it's electricity generating maximum and to make it's fatigue load minimum. So, in wind turbine design process, selecting optimum yaw system is very important work. In this paper, the yaw moments on yaw bearing, yaw drive and yaw brake were calculated. and From the result, the duty cycle was obtained. At last, using this duty cycle, optimum yaw system is selected.

#### Nomenclature

- V : wind speed, m/s
- D : rotor diameter, m
- Yf = Tooth shape factor
- $Y\varepsilon$  = Load reduction factor
- F = Tooth force
- b = Tooth width
- m = Module,
- ofl = Tooth yield stress
- Sf = Safety factor
- FxR - Rotor와 nacelle에 작용하는 횡방향 힘
- FyR - Rotor의 thrust
- FzR - 로터 무게
- MxR - 로터의 tilting moment
- MyR - 로터의 driving torque
- MzR - 로터의 요 모멘트
- Fn - 너셀의 무게
- yN - 너셀의 무게중심까지의 수평거리
- yR - 너셀의 무게중심까지의 수평거리
- zN - 너셀의 무게중심까지의 수직거리
- zR - 너셀의 무게중심까지의 수직거리

#### subscrip

GL : Germanischer Lloyd

#### 1. 서론

대체 에너지로 활발히 상용화 되고 있는 풍력 발전 시스템은 예측하기 어려운 다양한 환경 조건 하에서 운전되며, 20년 이상의 신뢰성이 보장되어야 하는 기기이다.

따라서 풍력발전 시스템의 설계 단계에서부터 각 구성요소에 미치는 하중과 구성요소들의 상호 작용을 수치화하고, 이를 바탕으로 한 피로해석을 수행하여 설계에 반영함으로써 시스템의 신뢰성을 확보하는 작업이 개발과정에 반드시 포함되어야 한다.

풍력 터빈을 구성하는 여러 요소들 중에서 요(Yaw) 시스템은 풍력발전 시스템의 로터(rotor)와 너셀(nacelle)을 바람이 불어오는 방향으로 향하게 하여 풍력발전 시스템의 효율을 최대가 되게 하

- 
- 1) (주) 효성 중공업연구소  
E-mail : brocken@hyosung.com  
Tel : (02)707-4364 Fax : (02)707-4399
  - 2) (주) 효성 중공업연구소  
E-mail : choiwh@hyosung.com  
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4399
  - 3) (주) 효성 중공업연구소  
E-mail : autovan@hyosung.com  
Tel : (02)707-4370 Fax : (02)707-4399

고, 풍력발전 시스템 전체에 작용하는 피로 하중을 감소시키는 역할을 한다.

바람의 방향과 주축이 일치하지 않는 요 오차가 발생할 경우, 풍력 발전기의 출력이 감소됨은 물론 비정상적인 하중에 의해 풍력 발전기의 수명을 단축시킬 수 있다. 풍력 터빈의 회전 날개가 바람에 수직하게 향하지 않으면 풍력터빈에는 요 오차가 발생된다. 요 오차가 발생했다는 것은 바람에 포함된 에너지의 일부가 풍력 터빈의 회전면을 그냥 통과한다는 것을 의미한다. 풍력 터빈이 바람으로부터 받을 수 있는 에너지의 양은 요 오차의 cosine값에 비례한다.

요 오차로 인해 출력의 변화만 생긴다면 요 제어는 회전 날개에 입력되는 바람의 양을 제어하는 뛰어난 방법이 될 수 있지만, 회전날개의 바람이 불어오는 쪽 면에는 날개의 나머지 부분보다 더 큰 힘(bending torque)이 작용하기 때문에 풍력터빈에 불규칙적인 부하를 가하게 된다. 다시 말하면 회전 날개는 역풍형이나 순풍형이나에 상관없이 스스로 바람이 불어오는 쪽으로 향하려고 하는 경향이 있기 때문에 바람이 불어오는 방향을 향해 있지 않은 회전 날개는 매번 회전 할 때마다 그 위치에 따라서 앞, 뒤로 굽어지게 된다. 그러므로 회전 날개가 바람이 불어오는 방향을 향해 있지 않고 요 오차가 발생한 채로 운전되는 풍력터빈은 바람을 정면으로 받는 풍력 터빈에 비해서 더 큰 피로하중을 받게 되며, 이는 풍력 터빈의 수명을 단축시키는 직접적인 원인이 된다.

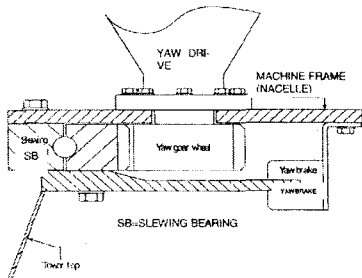


그림 1. Components of Yaw System

따라서 운전 중 발생할 수 있는 모든 하중 조건에 대하여 풍력발전 시스템의 너셀을 바람의 방향에 일치시킬 수 있도록 요 시스템의 용량을 설계해야 한다.

본 논문에서는 풍력발전 시스템을 설계함에 있어, Germanischer Lloyd의 2003년 규정에 따라 Bladed for Windows를 사용하여 750kW급 기어 타입 풍력 터빈 시스템의 동역학적 시뮬레이션을 통해 외력을 계산한 후, 전체 하중 조건을 분석하

여 요 시스템에 작용하는 극한 하중과 피로 하중을 도출하여 요 시스템의 최적 용량을 설계 하였다.

## 2. 요 시스템 구성 기기

### 2-1. 요 베어링(Yaw bearing)

요 베어링은 고정된 타워와 회전하는 너셀을 연결하고 지지하는 역할을 한다. 따라서 로터를 통해 너셀에 작용하는 바람의 힘을 타워로 전달하는 주요 경로가 된다. 풍력터빈에는 rolling bearing과 slide plate bearing이 모두 사용되고 있다.

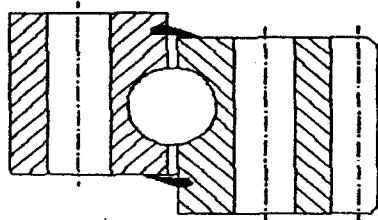


그림 2 Example of Yaw Bearing : Four point ball bearing

### 2-2. 요 드라이브(Yaw drive)

요 드라이브는 요잉을 수행하기 위한 동력 시스템을 총칭한다. 요잉의 속도가 너무 빠를 경우 로터에 의해 발행하는 gyro force가 풍력터빈에 악영향을 준다. Passive yaw system의 경우 이를 방지하기 위해 damping을 yaw system에 추가하며, Active yaw system의 경우에는 gyro effect를 최소화 할 수 있도록 일반적으로 15/R(°/sec)이하의 속력과 450/R<sup>2</sup>(°/sec<sup>2</sup>) 이하의 가속도를 갖는다. 따라서 이런 낮은 속도를 얻기 위해 요 모터는 감속기에 연결되어 있다.

요 드라이브용 모터는 크게 전기 모터와 유압 모터로 나눌 수 있다. 일반적으로 660kW 이상의 대형 풍력 발전 시스템에서는 전기 모터를 사용하여 요 위치를 제어 한다.

요 드라이브는 일반적으로 너셀에 장착되며 이는 타워의 상층 부에 설치된 요 베어링과 연결된다. 요 베어링에는 기어가공이 되어 있어 외부의 갑작스런 변화에 대응하고, 정밀한 요잉이 가능하게 해준다.

요 베어링에 가공되는 기어의 강도는 DIN 3990, Part3에 따라 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\sigma_F = \frac{F}{b \cdot m} \cdot Y_j \cdot Y_\epsilon \leq \frac{\sigma_{F1}}{S_F}$$

### 2-3. 요 브레이크

너셀을 고정하기 위해 사용하는 요 브레이크는 일반적으로 유압 캘리퍼와 브레이크 디스크를 이용한다. 요 브레이크는 최대 요 모멘트를 견딜 수 있도록 안전율(S=1.15)을 적용하여 설계한다. 또한 먼지나 부식, 기름등의 이물질에 대한 적절한 대책도 마련되어야 한다.

### 2-4. Cable Twist Counter

풍력 터빈의 발전기에서 생산된 전류는 전선을 통해 송전된다. 따라서 만일 풍력 터빈이 긴 시간동안 일정방향으로 계속해서 yawing한다면 전선은 점점 꼬이게 될 것이다. 이를 방지하기 위해서 풍력터빈에는 제어기에 꼬인 전선을 풀 시기를 알려줄 cable twist counter가 장착되어 있다.

때때로 풍력 터빈의 상부가 꼬인 전선을 풀기 위하여 마치 고장 난 것처럼 같은 방향으로 5~6번 회전하는 것을 볼 수 있다.



그림 3 Cable Twister Counter

### 2-5. 요 Mechanism

요 mechanism의 성능은 yawing시의 최대 각속도( $\omega_k$ )와 풍력터빈의 수명동안 요 system이 작동한 시간의 비율로 나타낼 수 있다. 만일 요의 작동시간이 명확하지 않을 때에는 DS472의 규격에 따라 풍력터빈이 작동하는 기간의 10%로 가정한다.

너셀과 로터에 의해 요 시스템에 작용하는 정하중은 요베어링에 축하중으로 작용한다.

따라서 요 베어링에 작용하는 정하중에 따른 tilt moment(Mtilt), 요 모멘트(Myaw), radial force(Fr), axial force(Fa)는 다음과 같이 계산되어진다.

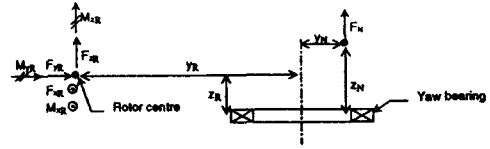


그림 4 Loads acting on the rotor and the yaw bearing

$$M_{yaw} = M_{zR} + F_{zR} \cdot y_R + M_{brake} + M_{friction}$$

$$M_{tilt} = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

이때

$$M_1 = M_{yR} + F_{zR}z_R$$

$$M_2 = M_{zR} - F_{zR}y_R - F_{yR}z_R + F_{N}y_N$$

$$F_r = \sqrt{(F_{yR}^2 + F_{zR}^2)}$$

$$F_a = F_{zR} + F_N$$

위 식에서 확인할 수 있듯이 요 모멘트는 요 오차와 풍속에 의해 결정된다. 또한 요 모멘트의 방향은 요 에러의 방향에 따른 로터의 회전 방향에 의해 결정된다.

요 드라이브나 요 브레이크를 설계하는 기준이 되는 요 모멘트의 최대값은 풍속과 요 오차가 최대일 때 나타난다. 요 모멘트는 블레이드의 개수와 로터의 회전수의 곱을 주기로 진동하는 특징이 있다.

## 3. 요 시스템 설계

GL 2003 규정에 따라 하중 해석 프로그램인 Bladed를 이용하여 각 구성기기별 설계 하중을 구한 결과는 다음과 같다.

### 3.1 요 베어링 설계 하중

풍력발전 시스템의 설계 수명은 20년이며, GL 규정에서는 요 시스템의 운전 시간을 시스템 설계 수명의 10%로 정의하고 있다. 또한 바람 방향의 변동으로 인한 요 베어링과 요 드라이브 피니언 사이의 채터링(Chattering)을 방지하기 위해 브레이크 캘리퍼 중 일부를 이용하여 상시 마찰력을 제공할 경우 요 베어링에 작용하는 요모멘트의 Duty cycle은 그림 5와 같이 구할 수 있다.

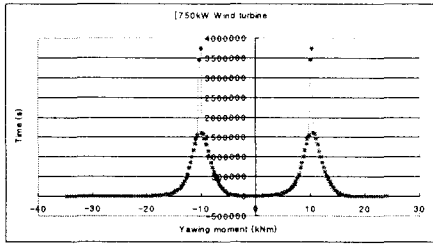


그림 5 Yaw bearing duty cycle

### 3.2 요 드라이브 설계 하중

요 드라이브의 경우, GL 2003규정에 따라 설계 하중을 도출하고, 그에 적합한 용량의 전기 모터나 유압 모터를 선정하는 것에 있어서는 요 베어링의 선정 과정과 같다. 그러나 요 드라이브의 경우, 모든 설계 하중에 대해 이겨낼 수 있는 수준의 설계 용량을 선정하는 것이 아니라, 전체 설계 하중의 3σ 구간을 견딜 수 있도록 모터 용량을 선정하였다. 이는 최대 용량을 결정하는 순간적인 Peak의 경우, 전체 운전 시간 중에 발생하는 비율이 극히 일부일 뿐만 아니라, Peak 하중으로 인한 순간적인 하중이나, Slip이 발생하더라도, 요 시스템이 파손되거나 전체 시스템의 운전에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다. 다음 그림 6은 요 드라이브의 설계 하중을 도출하기 위해 Bladed를 이용하여 구한 요 모멘트 그래프이다.

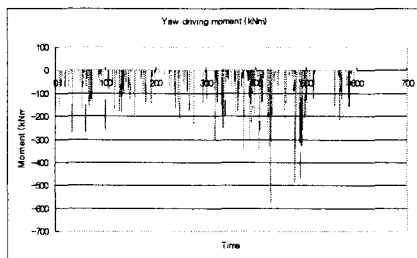


그림 6 Yaw moment graph

이때 발생하는 모멘트를 분석하면, 평균 0.065kNm이며, 표준 편차는 17.09kNm이다. 이에 따라 3σ 구간을 구하면 아래와 같다.

$$0.065-3*17.09 < X < 0.065+3*17.09$$

$$= -51.2(\text{kNm}) < X < +51.3(\text{kNm})$$

#### 3.2.1 요 브레이크

요 베어링에 작용하는 요 모멘트를 분석하여 요 브레이크의 용량을 선정하였다. 아래 그래프는 각 하중 조건별 요 모멘트를 나타내고 있으며, 요 브레이크의 경우 모든 하중 조건에 대해서 너셀

을 고정시킬 수 있도록 브레이크 용량을 선정하여야 한다. 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 최대 필요 브레이크 토크는 약 1700kNm이다.

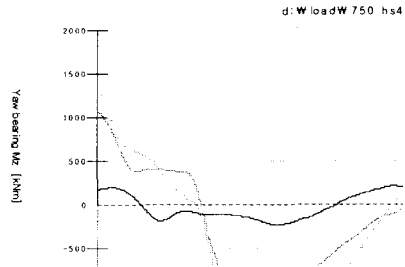


그림 7 Yaw brake moment

## 4. 결론

풍력발전 시스템의 인증 기관인 Germanischer Lloyd의 2003년 규정에 따라 설계 하중을 도출하고, 이를 분석하여 요 시스템의 용량을 설계하였다. 이를 통해 시스템에 필요한 요 시스템의 용량을 최적화 하여 시스템의 경제성을 높일 수 있었다.

### 후기

본 연구는 2005~2006년도 산업자원부의 대체 청정에너지 및 자원 기술 개발 사업인 “750kW급 풍력발전 시스템 실증연구” 사업의 일환으로 수행된 연구결과와 일부이다.

## References

- [1]Hau, 2000, "Windturbines," Springer
- [2]DNV/Risø "Guidelines for Design of Wind Turbines," DNV/Risø
- [3]Robert Harrison, 1998, "Large Wind Turbines -Design and Economics," John wiley&sons, David A. Spera, "Wind Turbine Technology," ASME
- [4]Germanischer Lloyd, 1999, "Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems",
- [5]Lahmeyer International, 2000, "Wind Energy Technology - Technology, Market, Costs, Perspectives"
- [6]Robert C. Juninall, 1983, "Fundamentals of Machine Component Design", University of Michigan Press.