

다리우스 풍력터빈의 부하변동에 따른 속도제어

오 철 수

경북대학교 공과대학 전자전기공학부

Speed Control of Darrieus Wind Turbine for Load-variation

Chul Soo Oh

School of Electronic and Electric Engineering, Kyungpook N. University

요 약

다리우스 풍력터빈의 속도설정을 터빈이 만드는 토크와 발전기가 요구하는 토크의 평형을 통해 찾아 낼 수 있음을 검토하였다. 풍속에 따른 속도-토크곡선에서 일정풍속곡선과 일정출력곡선이 만나는 점이 터빈의 동작점으로 되며 이는 안정 및 불안정이 될 수도 있다. 풍속과 출력이 각각 변할 때 이 동작점이 어떻게 이동되는가 하는 점을 제시하였다. 또한 터빈의 속도에 관한 제어 블록선도를 제시하여 그 출력변화에 따른 속도변화의 전달함수를 알아내고 이의 형태는 1차 시지연 함수로 유도된다.

Abstract—This paper is dealing with speed control of Darrieus Wind Turbine, which can be evaluated from its torque equation. The operating point of Darrieus Wind Turbine can be found from speed-torque curve, which is either stable or unstable. The migration of operating point, due to variation of wind speed and generating power, is shown in the speed-torque diagram. Furthermore, the block diagram governing the turbine speed is presented, which turns out to be a first order time delay function.

1. 서 론

풍력에너지를 전기에너지로 변환하는 장치를 풍력터빈(Wind Turbine)이라 하는데, 터빈의 축이 바람방향에 수직인 수직축 풍력터빈과 터빈의 축이 바람방향과 수평인 수평축 풍력터빈의 두 가지로 대별된다¹⁾.

다리우스 터빈은 수직축풍차의 일종으로, 바람에 대한 날개의 양력 및 항력이 전회전각에 걸쳐 날개의 접선방향성분으로 분해된 힘이 만들어지며, 결과적으로 축에 회전, 즉 토크를 얻는 풍차이다. 이는 수평축 프로펠러형과 형을 달리하는 것으로 수평축풍차에 소요되는 pitch control, yaw control 등의 장치가 다리우스에서는 요구되지 않고 발전기 장치 등이 지상에 놓이는 장점이 있고 구조적 안정성이 있는 풍차이다²⁾.

다리우스 터빈의 정적속도를 산정하는 것과 이의 속도상승을 얼마나 허용할 것인가하는 것이 설계상 매우 중요한 과정이고, 이에 따라 구조적 강도, 축의 강도 등이 결정되는 중요한 파라메타이다. 이와 관련된 연구와

부하변동으로 인한 속도특성을 경북 영일만 대보면에 세운 20 kW 시험용 풍력발전장치에 기준하여 고찰하여 보도록 하겠다.

2. 풍력터빈의 속도특성 및 블록선도

2-1. 다리우스 풍력터빈의 토크 기본식

다리우스 풍력터빈의 대표적인 형상이 Troposkien type인데, 이 구조의 장점은 날개가 굽힘하중(Bending Load)을 받지 않고 오직 순수한 인장력(Tension)만을 받게 되는 구조상의 특징이 있다¹⁾. 따라서 이 구조가 주로 사용되고 있는데 대보면에 설치된 풍력터빈도 이런 형태로 되어 있고 그 열개가 Fig. 1과 같다.

다리우스 풍력터빈의 출력 P는 날개를 맞는 회전면적 A, 풍속 v 및 출력계수 Cp 등에 따라 결정되고 그 식은 다음과 같다²⁾.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda) A v^3 \quad (1)$$

주속비(Tip Speed Ratio) λ 는 식 (2)와 같이 정의된다. 출력계수 $C_p(\lambda)$ 는 날개단면의 형상에 의해 결정되며 주속비 λ 의 함수로 나타나며, 대보면에 설치된 풍력터빈의 날개단면 SNLA-0018에 대한 이의 값은 표 1과 같다.^{1,3)}

$$\lambda = \frac{r\omega}{v} \tag{2}$$

토크 T는 $P=\omega T$ 및 (2)식과 (1)식으로부터 다음과 같이 유도된다²⁾.

$$T = \frac{1}{2} \rho A r^3 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \omega^2 \tag{3}$$

$$= \frac{1}{2} \rho A r^3 C_p'(\lambda) \omega^2$$

$$= tkq \cdot C_p'(\lambda) \omega^2 / 10^3 \quad [\text{kNm}]$$

$$tkq = \frac{1}{2} \rho A r^3 = 4.49 \times 10^3 \text{ kgm}^2$$

at $r = 4.6 \text{ m}, A = 75 \text{ m}^2, \rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$

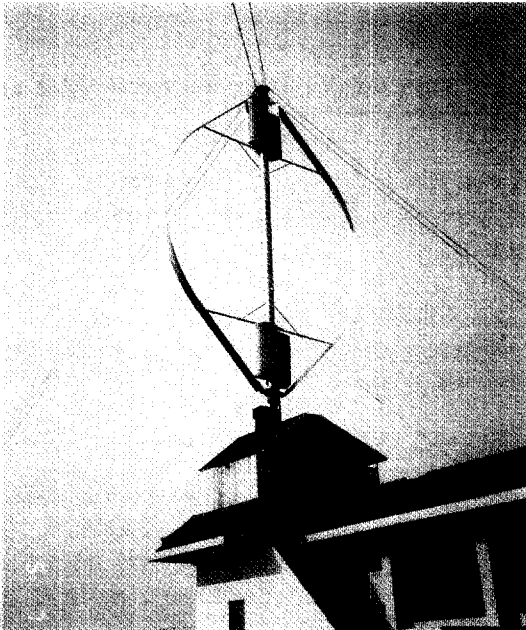


Fig. 1. General view of darrieus turbine.

$$C_p'(\lambda) = \frac{C_p}{\lambda^3} \times 10^3 \tag{4}$$

따라서 주어진 다리우스 터빈의 형상이 결정되면 토크계수 tkq 가 결정되고 (3)식의 토크 T는 $C_p'(\lambda)$, ω 만으로 결정된다. 이제 (4)식에 의한 $C_p'(\lambda)$ 의 값은 표 1과 같고, 이를 C 프로그램의 array 값으로 주고 주어진 풍속 $v=8 \text{ m/s}, v=10 \text{ m/s}$ 에서 그 값을 취하도록 하여, 터빈의 각속도 ω [1/s] 및 발전기 회전수 n [rpm]에 따른 풍속별 토크 tq_8, tq_{10} [$10^3 \text{ Nm} = \text{kNm}$] 및 출력 p_8, p_{10} [10 kW]을 나타내면 Fig. 2와 같다. 여기서 인덱스 8, 10은 각각 풍속 8 m/s, 10 m/s 때의 값이다.

2-2. 다리우스 풍력터빈의 출력곡선

위 그림에서 ω 에 대한 토크곡선을 풍속 6~14 m/s로 확대하면 Fig. 3과 같다. 곡선상의 plot 기호는 풍속 v 에 따라 구별하였는데, '6'은 $v=6 \text{ m/s}$, '8'은 $v=8 \text{ m/s}$, '10'은

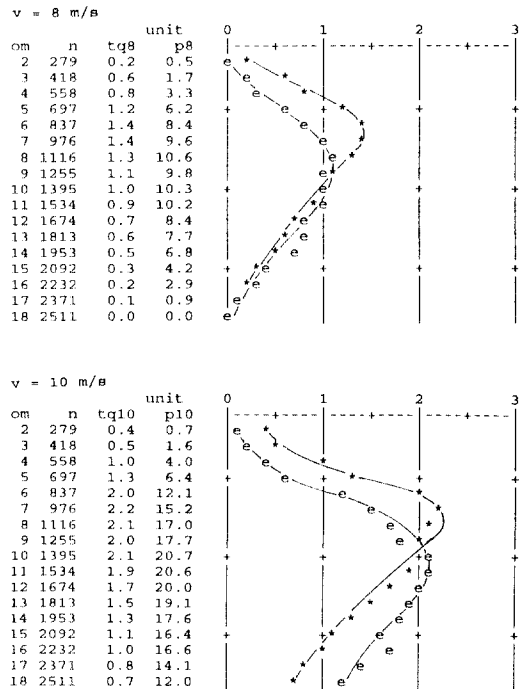


Fig. 2. Torque '*' [kNm] and power 'e' [10 kW] at wind speed 8 m/s, 10 m/s.

Table 1. $C_p(\lambda), C_p'(\lambda)$ of SNLA-0018.

λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_p	0.02	0.10	0.30	0.40	0.43	0.42	0.37	0.28	0.16	0.016
C_p'	20	12.5	11.1	6.25	3.44	1.94	1.08	0.55	0.22	0.02

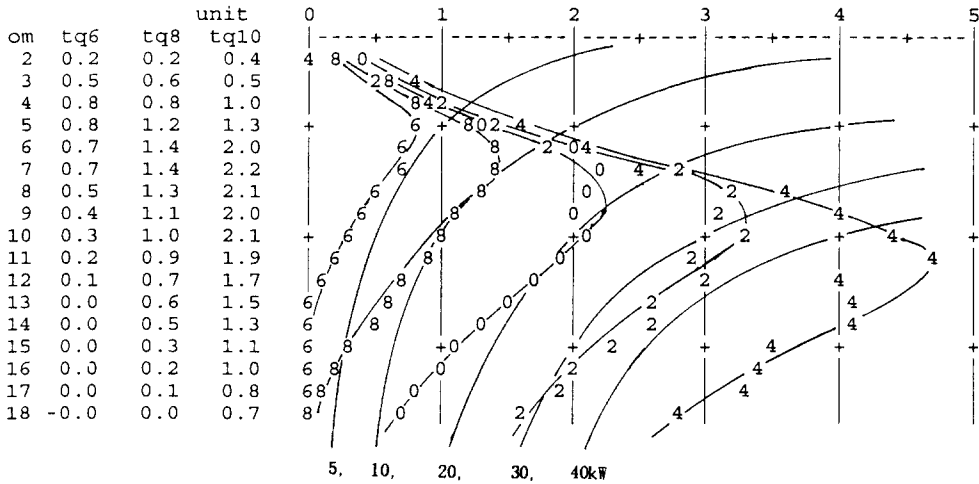


Fig. 3. Blade torque curve and const. Power curve for wind speed $v=6\sim 14$ m/s.

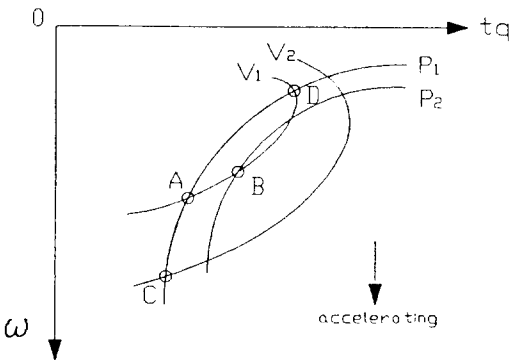


Fig. 4. The migration of operating point.

$v=10$ m/s, '2'는 $v=12$ m/s, '4'는 $v=14$ m/s로 나타내었음에 유의하여야 할 것이다. 이 그래프에서 풍력터빈의 속도가 결정되는 동작점을 구하기 위해 일정출력 $P=\omega T=const.$, 즉 5, 10, 20, 30, 40 kW의 곡선을 삽입하였다. 발전기에서 일정출력이 만들어진다면 위 일정부하곡선을 따라 터빈은 움직여야 할 것이고 이와 만나는 점에서 터빈의 속도가 동작점으로 결정될 것이다.

2-3. 다리우스 풍력터빈의 속도특성

다리우스 풍력터빈의 속도동작점을 알아보기 위해 Fig. 3의 일부분을 Fig. 4와 같이 확대하여 도식하였다. 일정 v 곡선과 일정 P 곡선이 만나는 점 A가 터빈속도의 동작점이다. 이 두 곡선이 만나는 점은 A이외에 D도 있으나 D는 불안정이고 A는 안정으로 볼 수 있다. 풍속이 v_1 으로 고정이고 발전기출력이 P_2 로 증가 되었을때 동작점 A는 B로 움직이며 터빈은 감속이 되고 이때 B는 안

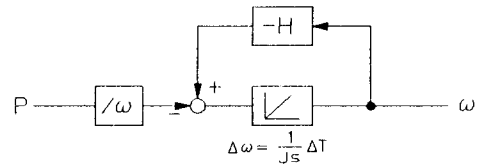


Fig. 5. Block diagram of darrieus turbine speed as input of power demand.

정이다. 이제 풍속이 v_2 로 증가되고 출력이 P_1 로 고정일 때 동작점 A는 C로 이동되고 터빈은 가속되고, C 또한 안정이다.

2-4. 터빈속도 제어 블록선도

풍력터빈의 속도제어에 관한 기본식은 다음과 같은 토크 평형식이다.

$$T_{Blade} - T_{Gen} = J\dot{\omega} \tag{5}$$

J 는 터빈 축에서 본 종합 관성모멘트이고, T_{Blade} 는 Fig. 3에서 負性 速度 區間, 즉 속도가 증가하면 토크가 감소하는 구간, 의 값을 취하므로 ω 에 대한 계환요소는 속도에 대한 토크의 이득 H 를 도입하여 아래 (6)과 같고 전향요소 T_{Gen} 은 (7)과 같다.

$$T_{Blade} = -H\omega \tag{6}$$

$$T_{Gen} = \frac{P}{\omega} \tag{7}$$

블록선도는 Fig. 5와 같다

위 블록선도에서 종합 전달함수 $\frac{\omega}{P}$ 는 다음과 같이

Table 2. Calculation of time constant and gain of total transfer function $\frac{\omega}{P}$.

동작점1	$\omega=8$, $v=6$ m/s, $\tau=43$ s, $G=1.25$ 1/kNm
동작점2	$\omega=10$, $v=8$ m/s, $\tau=35$ s, $G=0.8$ 1/kNm
동작점3	$\omega=12$, $v=10$ m/s, $\tau=22$ s, $G=0.42$ 1/kNm

계산된다⁹⁾.

$$\frac{\omega}{P} = -\frac{1}{\omega H} \frac{1}{1 + \frac{J}{H} s} = -G \frac{1}{1 + \tau s} \quad (8)$$

이 식에서 종합전달함수 $\frac{\omega}{P}$ 는 이득 $G = \frac{1}{\omega H}$ 와 시간 상수 $\tau(\tau=J/H)$ 를 가진 1차 시지연 함수로 나타난다. 이 종합전달함수가 안정이 되기 위해서 H를 負性속도 구간에서 취하여야만 하며, H를 正性속도 구간에서 취하면 종합전달함수가 불안정권으로 밀려남을 알 수 있겠고, 그 이유는 분모 s의 근이 양의 값이 되기 때문이다. H를 Fig. 3에서 아래의 세 동작점에서 각각 취해보면 다음과 같다.

- 동작점 1; $\omega=8$ 1/s, $v=6$ m/s, $H=0.1$ kNms
- 동작점 2; $\omega=10$ 1/s, $v=8$ m/s, $H=0.13$ kNms
- 동작점 3; $\omega=12$ 1/s, $v=10$ m/s, $H=0.2$ kNms

윗절에서 구할 J를 여기에 도입하여 위 각 동작점에서의 시정수 상수 및 이득은 다음과 같이 계산된다.

종합적으로 고찰하며 수치적인 예를 들면, 출력이 0.1 pu 증가할 때 ω 는 0.08 pu 감소지향하되, 그 도달시간 $\Delta t=3.5$ s이다⁹⁾.

2-5. 풍력 터빈 세트의 관성모멘트 측정

풍력터빈 세트는 감속기 및 발전기 세트가 같이 연결되어 있기 때문에 계산으로 알아내기보다 자연감속실험으로서 구함이 합리적이라 생각된다. 기동 모터는 8극, 7.5 kW, 870 rpm(slip 3.3%), 정격전류 21 A, 220/380 V의 농형모터를 사용하였고, 기동이 완료된 때 속도는 880 rpm, 터빈에 전달하는 토크 0.6 kNm를 측정하였다. 이 토크는 $\omega=6.3$ 1/s 때의 터빈 손실토크로 총당된다라고 보고, 임의의 ω 에서의 손실토크는 기동손실토크 및 회전손실토크의 합으로 간략화하면 다음의 식 (9)와 같다⁹⁾.

$$T_{\text{loss}} = a + b \omega \quad (9)$$

여기서 a는 기동 손실토크, b는 마찰 손실계수이고, 이들 값은 $a=0.15$ kNm, $b=0.071$ kNm/s로 측정하였고, ω 의 자연감속실험의 결과는 Fig. 6과 같고, 여기서 e함

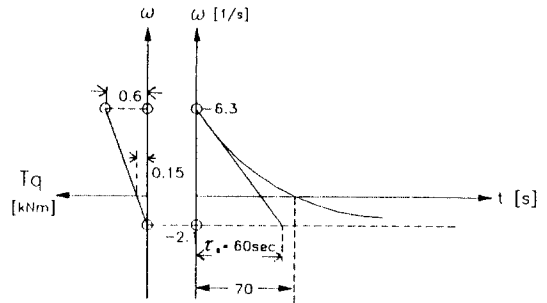


Fig. 6. Run-down test of wind turbine set.

수 시정수 τ_r 은 60 s로 측정하였다.

자연감속실험의 식은 다음 식 (10)으로 알려져 있는데⁹⁾,

$$\omega(t) = -\frac{a}{b} + (\omega_1 + \frac{a}{b})e^{-t/\tau} \quad (10)$$

여기에서 $J/b = \tau_r$ 로부터

$$J=4.3 \text{ kNms}^2=4300 \text{ kgm}^2$$

을 얻었다. 이는 풍력터빈의 축에 대한 관성모멘트이고, 발전기 축에 대한 관성모멘트 J_G 는 발전기 set자체의 관성모멘트와 증속기의 속도변환율 14.6을 감안하여 구하면

$$J_G = 20.2 \text{ kgm}^2$$

로 계산된다.

3. 결 론

다리우스 풍력터빈의 운전점속도가 설정되는 상황을 토크의 평형식을 통해 찾아낼 수 있었고, Fig. 3의 풍속에 따른 속도-토크곡선에서, 일정풍속곡선과 일정출력곡선이 만나는 점이 터빈의 동작점으로 되며, 이는 안정 및 불안정이 될 수도 있다. 또한 터빈의 속도에 관한 제어 블록선도를 제시하여 그 출력변화에 따른 속도변화의 전달함수를 알아내었다. 이 전달함수는 1차 시지연 함수로 정리되고, 동작점 2의 경우를 수치적으로 예를 들면, 출력이 0.1 pu 증가할 때 ω 는 0.08 pu로 감소지향하되, 그 도달시간 $\Delta t=3.4$ s로 계산된다.

사용기호

- A : 풍차 회전면적 [m²]
- a : 기동손실토크 [10³Nm=kNm]

b	: 마찰손실계수 [kNms]
C_p	: 풍차 출력계수 [-]
C_p'	: 변형된 풍차 출력계수 [-]
G	: 종합전달함수의 이득 [1/kNm]
J	: 터빈축에서 본 회전관성모멘트 [kgm^2]
H	: 속도에 대한 토크의 계환요소 [kNms]
n	: 풍차 회전수 [rpm]
P	: 발전기 출력 [kW]
r	: 풍차 최장반경 [m]
s	: 미분연산자 [1/s]
T	: 풍차 토크 [$10^3\text{Nm}=\text{kNm}$]
tkq	: 풍차 토크계수 [kgm^2]
v	: 풍속 [m/s]
λ	: 풍차 날개 주속비 [-]
ρ	: 공기의 밀도 [kg/m^3]
τ	: 시지연 함수의 시간상수 [s]
τ_r	: 자연감속실험의 감속시간 [s]
$\omega=\omega_m'$: 풍차 회전각속도 [1/s]
ω_1	: 자연감속실험의 초기속도 [1/s]

참고문헌

1. 유능수: 다리우스 풍력터빈의 성능예측에 대한 연구, 한국항공우주학회지, **20**(1), (1992. 3).
2. 오철수, 강창수, 권순홍: 동해안 지역에 적합한 풍력 발전시스템에 관한 조사, 전기학회지 **41**(10), 3-9 (1992, 10).
3. Dornier System GmbH, Windkraftanlage mit vertikaler Drehachse, (1984).
4. Siemens, Introduction to Electronic Control Engineering, Heyden & Son, (1982).
5. W. Leonhard: Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, (1985).
6. Raina, G, *et. al.*: Variable Speed Wind Energy Conversion using Synchronous Machine, IEEE Trans. on AES, **21**(1), Jan, (1985).
7. M.G. Simoes, *et. al.*: Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System, IEEE Trans. (1995).