

**Questions and answers on a wind energy course based on report KD 35,
“Rotor design and matching for horizontal axis wind turbines”,
in English and in Dutch**

**Vragen en antwoorden over een windenergie cursus gebaseerd op rapport KD 35,
“Rotor design and matching for horizontal axis wind turbines”,
in het Engels en in het Nederlands**

ing. A. Kragten

May 2004
mei 2004

KD 196

It is allowed to copy this report for private use.
Het is toegestaan om dit rapport te kopiëren voor privé gebruik.

Engineering office Kragten Design
Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
The Netherlands
telephone: +31 413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl

| | |
|--|-----|
| Contains | pg. |
| 1 Questions Rotor design course | 3 |
| 2 Answers to questions Rotor design course | 6 |

Inhoud

| | |
|--|----|
| 3 Vragen cursus Rotor design | 8 |
| 4 Antwoorden op vragen cursus Rotor design | 11 |

1 Questions Rotor design course

Chapter 1

- 1 A windmill rotor generates a torque $Q = 50 \text{ Nm}$ at an angular velocity $\Omega = 30 \text{ rad/s}$. What is the generated electrical power P_{el} if the transmission efficiency is 96 % and if the generator efficiency is 75 %?
- 2 A windmill rotor with a diameter of 10 metre has a tip speed of 40 m/s. What is the angular velocity Ω ?

Chapter 2

- 3 Why is it that the VIRYA-2.2 windmill generates at a certain wind speed less power in Lhasa in Tibet than at the test field in Sint-Oedenrode?
- 4 How much power is available in wind, flowing through a circular area with a radius of 2 metre, placed at sea level if the temperature is 20° C and the wind speed is 6 m/s?

Chapter 3

- 5 A wing, provided with a G623 aerofoil with a chord of 34.5 cm and a width of 150 cm is placed in a wind tunnel. The wind speed is 10 m/s and the angle of attack is 6° (see for characteristics of G623 aerofoil page 37).
 - 5a How high is the Reynolds value?
 - 5b How large is the lift force ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, tip losses are neglected)?
 - 5c How large is the drag force?

Chapter 4

- 6 A windmill has a 4 meter diameter rotor which is connected directly to the generator shaft. How large is the electrical power at a wind speed of 7 m/s if: $C_p = 0.4$, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ and $\eta_{gen} = 0.65$?
- 7 What is the optimal torque coefficient of a rotor with a maximal C_p of 0.42 at a tip speed ratio of 7?
- 8 Derive formula 4.5 from formula 4.4, 4.3, 1.5 and 1.1.
- 9 Derive formula 4.10 from formula 4.9 and formula 2.5.
- 10 How large is the thrust force F_t on a rotor perpendicular to the wind, with a diameter of 5 metre at a wind speed of 35 m/s if: $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ and $C_t = 0.7$?
- 11 How large is C_p for a rotor with an infinite number of blades for $C_d/C_l = 0$ and $\lambda_{opt} = 1.5$?
- 12 How large is C_p for a rotor with 4 blades for $C_d/C_l = 0$ and $\lambda_{opt} = 1.5$?
- 13 How large is $C_{p,th}$ for a rotor with 3 blades and a C_d/C_l ratio of 0.03 and $\lambda_{opt} = 5$?
- 14 How large is $C_{p,th}$ for a rotor with 3 blades and a C_d/C_l ratio of 0.1 and $\lambda_{opt} = 5$?
- 15 How large is $C_{p,th}$ for a rotor with 8 blades and a C_d/C_l ratio of 0.03 and $\lambda_{opt} = 5$?

Chapter 5

- 16 A rotor with a diameter of 5 metre has a λ_d of 6. What is λ_{rd} for $r = 1.25$ m?
- 17 What is ϕ for $\lambda_{rd} = 1$ using formula 5.9 and using formula 5.3?
- 18 What is ϕ for $\lambda_{rd} = 8$ using formula 5.9 and using formula 5.3?
- 19 A rotor with a diameter of 5 metre has a λ_d of 6 and three blades with a constant chord of 250 mm. What is R_{er} for $r = 1.25$ m at a wind speed of 5 m/s?
- 20 Study example no. 1 Chapter 5.4.1. Check the formulas 5.14, 5.15 and 5.16. Check the calculated values for station A en D from table 5.2. Calculate the theoretical values first and then the values after linearisation.
- 21 Study example no. 2 Chapter 5.4.2. Check the formulas 5.18 and 5.19. Check the calculated values for station E en F from table 5.3. Calculate the theoretical values first and then the values after linearisation. Why a value for C_{1lin} is found for station E and not for station F?
- 22 What is the minimal C_d/C_l ratio for the G623 aerofoil for a Reynolds value of 1.2×10^5 ? Read this value from figure 5.9.
- 23 Between which angles of attack has the G623 aerofoil for a Reynolds value of 4.2×10^5 a C_d/C_l ratio smaller than 0.05? Read the values from figure 5.9 and 5.8.
- 24 A G623 aerofoil has a chord of 300 mm.
- 24a How thick is the aerofoil at a distance of 90 mm from the leading edge?
- 24b How thick is the aerofoil at a distance of 210 mm from the leading edge?
- 24c How thick is the aerofoil at 5 % of the chord from the leading edge?

Chapter 6

- 25 Derive formula 6.1 and formula 6.3.
- 26 Why Q_{start} is less than $Q_{rot th}$?
- 27 Why it is relatively simple to derive a formula for C_q if the rotor is stopped and very difficult if the rotor rotates with a slow value of λ (the determination of C_q for low values of λ is given in rapport KD 97)?
- 28 Determine the $C_p-\lambda$ en $C_q-\lambda$ curves for a rotor for which it is given that $C_{p max} = 0.4$ for $\lambda_{opt} = 5$ and that $C_{q start} = 0.01$. Compare the result in retrospect with the $C_p-\lambda$ and $C_q-\lambda$ curves of the VIRYA-3.3 windmill.

Chapter 7

- 29 Sometimes it is thought that the forces on a yawing rotor are proportional to the area projected perpendicular to the wind direction (this is an ellipse shaped area). Why this is not correct?
- 30 The rotor shaft of a Frisian Tjasker windmill is making an angle of about 30 degrees with the horizon because the shaft is coupled directly to an Archimedean screw. With what factor is the power reduced compared to the power of the same rotor with an horizontal shaft?
- 31 A windmill has a safety system which turns the head out of the wind. With what factor is the thrust force reduced if the rotor is turned 70 degrees out of the wind.
- 32 Check the values for λ_δ , $C_{q\delta}$ and $C_{p\delta}$ from table 7.1 for $\delta = 30^\circ$.

Chapter 8

- 33 Derive formula 8.1 from formula 4.1 and formula 4.8.
- 34 A rotor with $R = R_1$ and $\lambda = \lambda_1$ has a certain optimal P-n curve. Derive the formula for λ_2 for a rotor with the same C_p with $R = R_2$ for which the new rotor has the same optimal P-n curve.
- 35 Why the transmission efficiency η_{tr} for a certain rpm is lower for low powers than for high powers?
- 36 Why we find optimal matching between rotor and generator if the optimal P-n curve of the rotor intersects the P-n curve of the generator at wind speeds of about 4 and 8 m/s?
- 37 What is the advantage of the P-n system of co-ordinates above the Q-n system of co-ordinates?
- 38 When the Q-n system of co-ordinates is still preferred?
- 39 Which formula is used to derive formula 8.6?
- 40 Which formula is required to calculate $C_{q\ start}$ from formula 8.6?
- 41 The units W, kW, kWh en kWh/year are often used wrongly by journalists. The units W and kW are power. The unit kWh is work and the unit kWh/year is power again. How much W is 1 kWh/year?
- 42 The estimated δ -V curve of the VIRYA-3.3 windmill is given in figure 8.2. It is supposed that the ideal curve $\delta = \arccos V_{rated}/V$ is followed for wind speeds higher than 11 m/s. What does this mean for the speed component $V\cos\delta$ perpendicular to the rotor plane for wind speeds higher than 11 m/s (see also figure 7.1).
- 43 Which point in figure 8.2 corresponds with the theoretical V_{rated} ?
- 44 Prove that $V_{rated} = 9.5263$ m/s for the theoretical V_{rated} .
- 45 Which wind speed in figure 8.2 corresponds with the real V_{rated} ?
- 46 Check the values for n en P from table 8.1 for $V = 4$ m/s
- 47 Check the values for n_δ en P_δ from table 8.1 for $V = 11$ m/s
- 48 Derive the P_{el} -V curve for the VIRYA-3.3 windmill from figure 8.3. Check the result in retrospect by comparing the curve found, with figure 8.4.
- 49 The P_{el} -V curve of a small windmill was determined by the manufacturer by measuring the mill in front of an open wind tunnel. A user of the mill wants to check the P_{el} -V curve in the field and does so using 10 minutes average wind speeds. Which method will give the highest curve?
- 50 Why it is unfavourable if a windmill has a $V_{cut\ in}$ which is lower than V_{start} ?

2 Answers to questions Rotor design course

- 1 $P_{el} = 0.96 * 0.75 * 50 * 30 = 1080 \text{ W}$
- 2 $\Omega = \lambda * V / R = V_{tip} / R = 40 / 5 = 8 \text{ rad/s}$
- 3 Because of the great height of Lhasa, the air density ρ is a lot lower.
- 4 $P = \frac{1}{2} * 1.2 * 6^3 * \pi * 2^2 = 1628.6 \text{ W}$
- 5a $R_e = 10 * 0.345 / 15 * 10^{-6} = 2.3 * 10^5 \text{ (-)}$
- 5b $L = C_l * \frac{1}{2} \rho W^2 * c * b = 1.02 * \frac{1}{2} * 1.2 * 10^2 * 0.345 * 1.5 = 31.67 \text{ N}$
- 5c $D = C_d * \frac{1}{2} \rho W^2 * c * b = 0.03 * \frac{1}{2} * 1.2 * 10^2 * 0.345 * 1.5 = 0.93 \text{ N}$
- 6 $P_{el} = 0.4 * 1 * 0.65 * \frac{1}{2} * 1.2 * 7^3 * \pi * 2^2 = 672.4 \text{ W}$
- 7 $C_{q \text{ opt}} = C_{p \text{ max}} / \lambda_{\text{opt}} = 0.42 / 7 = 0.06$
- 8 Formula 1.1 gives $\Omega = P / Q$. Substitution of Ω in formula 1.5 gives formula 4.4. Substitution of P from formula 4.1 and Q from formula 4.3 in formula 4.4 gives:

$$C_p * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3$$

$$\lambda = \frac{C_p * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3}{C_q * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3} \text{ This gives } \lambda = C_p / C_q \text{ or } C_p = C_q * \lambda.$$
- 9 $P_{\text{max}} = P_{A1} - P_{A2}$. Formula 4.9 gives that $A_1 = 2/3 A_r$ and $A_2 = 2A_r$. According to Betz the wind speed at $A_1 = V$ and at $A_2 = 1/3 V$. This gives that $P_{A1} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r$ and that $P_{A2} = \frac{1}{2} \rho (1/3V)^3 * 2 A_r$. Substitution of these values in the formula for P_{max} gives $P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r - \frac{1}{2} \rho (1/3V)^3 * 2 A_r$. This gives $P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r - \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/27 A_r$. This gives $P_{\text{max}} = 16/27 * \frac{1}{2} \rho V^3 * A_r$.
- 10 $F_t = 0.7 * \frac{1}{2} * 1.2 * 35^2 * \pi * 2.5^2 = 10102 \text{ N}$
- 11 $C_p = 0.481$
- 12 $C_p = 0.42$
- 13 $C_{p \text{ th}} = 0.45$
- 14 $C_{p \text{ th}} = 0.26$
- 15 $C_{p \text{ th}} = 0.47$
- 16 $\lambda_{rd} = 6 * 1.25 / 2.5 = 3$
- 17 $\phi = 33.69^\circ$ calculated with formula 5.9 en $\phi = 30^\circ$ calculated with formula 5.3.
- 18 $\phi = 4.764^\circ$ calculated with formula 5.9 en $\phi = 4.750^\circ$ calculated with formula 5.3.
- 19 Formula 5.1 and $\lambda_d = 6$ and $R = 2.5 \text{ m}$ gives $\lambda_{rd} = 3$.
 $R_{e,r} = 0.667 * 10^5 * 5 * 0.25 * \pi (3^2 + 4/9) = 2.56 * 10^5 \text{ (-)}$
- 20 -
- 21 - For station F after linearisation it is found that $\alpha_{lin} = 24.8^\circ$. The $C_l - \alpha$ curve for the Gö623 is only given up to 18° and therefore the value of C_l for $\alpha = 24.8^\circ$ can not be read.
- 22 $C_d / C_{l \text{ min}} = 0.034$
- 23 In between $\alpha = -3^\circ$ and $\alpha = 11^\circ$
- 24a $3 * 12 = 36 \text{ mm}$
- 24b $3 * 7.35 = 22.05 \text{ mm}$
- 24c $3 * (7.9 - 0.9) = 21 \text{ mm}$
- 25 $A_r = \pi R^2$. Area between hart rotor and blade root $= \pi (R - k)^2 = \pi (R^2 - 2Rk + k^2)$. So the area A_k swept by the blade length k is given by:
 $A_k = \pi R^2 - \pi (R^2 - 2Rk + k^2) = \pi (2Rk - k^2)$. Because $C_{p \text{ th}}$ decreases proportional to the ratio A_k / A_r we find for $C_{p \text{ max}}$ that $C_{p \text{ max}} = C_{p \text{ th}} * (2Rk - k^2) / R^2$ (formula 6.3).
- 26 Because at the blade root, but specially at the blade tip air flows from the pressure side to the under-pressure side of the aerofoil and therefore the lift is reduced. Because of this effect the starting torque is in practice only about 75 % of $Q_{rot \text{ th}}$.

27 Because the torque for a stopped rotor is only determined by the lift L . As soon as the rotor rotates, ϕ becomes smaller than 90° . Therefore the drag force D gets a component $D\cos\phi$ working opposite the direction of rotation (see figure 4.4).

28 -

29 The projected rotor area is proportional to $\cos\delta$. However F_t decreases with $\cos^2\delta$ because the component of the wind speed perpendicular to the rotor plane decreases with $\cos\delta$. This results in a much faster decrease of F_t than on the basis of the projected rotor area.

30 With a factor $\cos^3 30^\circ = 0.650$.

31 With a factor $\cos^2 70^\circ = 0.117$.

32 -

33 Formula 4.8 can be written as $V = \pi * n * R / 30 * \lambda$. Substitution of V in formula 4.1 gives:

$$P = \frac{C_p * \frac{1}{2}\rho (\pi * n * R)^3 * \pi R^2}{(30 * \lambda)^3} = \frac{\pi^4 * \rho * C_p * R^5 * n^3}{54000 * \lambda^3} \quad (\text{formula 8.1})$$

34 The P - n curves are the same if the factor to which n^3 is multiplied is the same. This means that:

$$\frac{R_1^5}{\lambda_1^3} = \frac{R_2^5}{\lambda_2^3} \quad \text{This gives } \lambda_2 = \lambda_1 (R_2/R_1)^{5/3}$$

35 Because there is a certain loss torque at that rpm because of friction on the sealings and because of hydrodynamic losses due to pressing the oil in between the teeth. As the effective torque is larger this loss torque will be relatively smaller and therefore the efficiency increases.

36 Because in this case the points of intersection for the other wind speeds will lay very close to the top of the P - n curves and therefore C_p will be almost the same as $C_{p \max}$.

37 In the P - n co-ordinate system it is possible to draw the P_{el} - n curve of the generator.

38 If the starting behaviour is observed. At very low rpm the power is almost zero but the torque will have a certain value.

39 From formula 4.3.

40 Formula 6.12.

41 $1 \text{ kWh/year} = 1000 \text{ Wh/year} = 1000 / (365 * 24) \text{ Wh/hour} = 0.114 \text{ W}$.

42 That this component is constant for wind speeds higher than 11 m/s.

43 The point of intersection of the ideal curve with the x-axis.

44 The point $V = 11 \text{ m/s}$, $\delta = 30^\circ$ is laying on the ideal curve. The formula of the ideal curve can also be written as: $V_{\text{rated}} = V\cos\delta$. This gives

$$V_{\text{rated}} = 11 * \cos 30^\circ = 9.5263 \text{ m/s}.$$

45 The wind speed $V = 11 \text{ m/s}$ belonging to $\delta = 30^\circ$, because the axial component of the wind speed is only constant for wind speeds higher than 11 m/s. Therefore the maximum power is available at this wind speed and at higher wind speeds.

46 -

47 -

48 -

49 The one at the basis of 10 minutes average wind speeds.

50 Because the rotor doesn't start from stand still if $V_{\text{cut in}}$ is reached. Therefore no power is generated if this is possible. The rotor will turn only at $V_{\text{cut in}}$ if it had started because of an earlier higher wind speed. This results in so called hysteresis-effects.

3 Vragen cursus Rotor design

Hoofdstuk 1

- 1 Door een windmolenrotor wordt bij een hoeksnelheid Ω van 30 rad/s een koppel Q van 50 Nm opgewekt. Hoe groot is het opgewekte elektrische vermogen P_{el} als het transmissierendement 96 % en het generatorrendement 75 % is?
- 2 Een windmolenrotor met een diameter van 10 meter heeft een tipsnelheid van 40 m/s. Hoe groot is de hoeksnelheid Ω ?

Hoofdstuk 2

- 3 Waarom levert de VIRYA-2.2 windmolen bij een bepaalde windsnelheid in Lhasa in Tibet minder vermogen dan op het testveld in Sint-Oedenrode?
- 4 Hoeveel vermogen zit er in de wind die stroomt door een op zeeniveau geplaatst cirkelvormig oppervlak met een straal van 2 meter als de temperatuur 20°C en de windsnelheid 6 m/s is?

Hoofdstuk 3

- 5 Een vleugel voorzien van een G623 profiel met een koorde van 34,5 cm en een breedte van 150 cm wordt in een windtunnel aangestroomd met een windsnelheid van 10 m/s onder een hoek van 6° (zie voor gegevens G623 profiel blz. 37).
- 5a Hoe hoog is de Reynoldswaarde?
- 5b Hoe groot is de liftkracht ($\rho = 1,2\text{ kg/m}^3$, tipverliezen worden verwaarloosd)?
- 5c Hoe groot is de weerstandskracht?

Hoofdstuk 4

- 6 Hoe groot is het elektrische vermogen van een windmolen met een direct op de generatoras gekoppelde rotor met een diameter van 4 meter bij een windsnelheid van 7 m/s als geldt: $C_p = 0,4$, $\rho = 1,2\text{ kg/m}^3$ en $\eta_{gen} = 0,65$?
- 7 Wat is de optimale koppelcoëfficiënt van een rotor met een maximale C_p van 0,42 bij een snelheid van 7?
- 8 Leidt formule 4.5 af uit formule 4.4, 4.3, 1.5 en 1.1.
- 9 Leidt formule 4.10 af uit formule 4.9 en formule 2.5.
- 10 Hoe hoog is de axiale kracht F_t op een recht aangestroomde rotor met een diameter van 5 meter bij een windsnelheid van 35 m/s als geldt dat $\rho = 1,2\text{ kg/m}^3$ en $C_t = 0,7$?
- 11 Hoe groot is de C_p voor een rotor met een oneindig aantal bladen voor $C_d/C_l = 0$ en $\lambda_{opt} = 1,5$?
- 12 Hoe groot is de C_p voor een rotor met 4 bladen voor $C_d/C_l = 0$ en $\lambda_{opt} = 1,5$?
- 13 Hoe groot is de $C_{p,th}$ voor een rotor met 3 bladen en een C_d/C_l verhouding van 0,03 en een $\lambda_{opt} = 5$?
- 14 Hoe groot is de $C_{p,th}$ voor een rotor met 3 bladen en een C_d/C_l verhouding van 0,1 en een $\lambda_{opt} = 5$?
- 15 Hoe groot is de $C_{p,th}$ voor een rotor met 8 bladen en een C_d/C_l verhouding van 0,03 en een $\lambda_{opt} = 5$?

Hoofdstuk 5

- 16 Een rotor met een diameter van 5 meter heeft een λ_d van 6. Hoe groot is λ_{rd} voor $r = 1,25$ m?
- 17 Hoe groot is ϕ voor $\lambda_{rd} = 1$ berekend m.b.v. formule 5.9 en m.b.v. formule 5.3?
- 18 Hoe groot is ϕ voor $\lambda_{rd} = 8$ berekend m.b.v. formule 5.9 en m.b.v. formule 5.3?
- 19 Een rotor met een diameter van 5 meter heeft een λ_d van 6 en drie bladen met een constante koorde van 250 mm. Hoe groot is R_{e_r} voor $r = 1,25$ m bij een windsnelheid van 5 m/s?
- 20 Bestudeer voorbeeld no. 1 hoofdstuk 5.4.1. Controleer de formules 5.14, 5.15 en 5.16. Controleer de berekende waarden voor station A en D uit tabel 5.2. Bereken eerst de theoretische waarden en daarna de waarden na lineairisatie.
- 21 Bestudeer voorbeeld no. 2 hoofdstuk 5.4.2. Controleer de formules 5.18 en 5.19. Controleer de berekende waarden voor station E en F uit tabel 5.3. Bereken eerst de theoretische waarden en daarna de waarden na lineairisatie. Waarom wordt voor $C_{1\text{ lin}}$ wel een waarde gevonden voor station E en niet voor station F?
- 22 Hoe hoog is de minimale C_d/C_1 verhouding voor het Gö623 profiel voor een Reynoldswaarde van $1,2 \times 10^5$? Lees deze waarde af uit figuur 5.9.
- 23 Tussen welke aanstroomhoeken heeft het profiel Gö623 voor een Reynoldswaarde van $4,2 \times 10^5$ een C_d/C_1 verhouding kleiner dan 0,05? Lees de waarden af uit figuur 5.9 en 5.8.
- 24 Een Gö623 profiel heeft een koorde van 300 mm.
- 24a Hoe dik is het profiel op een afstand van 90 mm vanaf de neus?
- 24b Hoe dik is het profiel op een afstand van 210 mm vanaf de neus?
- 24c Hoe dik is het profiel op 5 % van de koorde vanaf de neus?

Hoofdstuk 6

- 25 Leid formule 6.1 en formule 6.3 af.
- 26 Waarom is Q_{start} lager dan $Q_{\text{rot th}}$?
- 27 Waarom is het relatief simpel om een formule voor C_q af te leiden als de rotor stil staat en heel lastig als de rotor draait bij een lage waarde van λ (de bepaling van C_q voor lage waarden van λ wordt gegeven in rapport KD 97)?
- 28 Bepaal de C_p - λ en C_q - λ kromme voor een rotor waarvan bekend is dat $C_{p\text{ max}} = 0,4$ voor $\lambda_{\text{opt}} = 5$ en dat $C_{q\text{ start}} = 0,01$. Vergelijk het resultaat achteraf met de C_p - λ en C_q - λ kromme van de VIRYA-3.3 windmolen.

Hoofdstuk 7

- 29 Soms wordt gedacht dat de krachten op een scheef aangestroomde rotor evenredig zijn met het geprojecteerde rotoroppervlak haaks op de windrichting (dit is een ellipsvormig oppervlak). Waarom is dit niet juist?
- 30 De rotoras van een Friese Tjasker windmolen maakt een hoek van ongeveer 30 graden met de horizon omdat de rotoras rechtstreeks gekoppeld is aan een vijzel. Met welke factor wordt het vermogen hierdoor lager t.o.v. dezelfde rotor met een horizontale as?
- 31 Een windmolen wordt beveiligd door de rotor uit de wind te draaien. Met welke factor neemt de axiale kracht af als de rotor 70 graden uit de wind gedraaid wordt?
- 32 Controleer de waarden voor λ_δ , $C_{q\delta}$ en $C_{p\delta}$ uit tabel 7.1 voor $\delta = 30^\circ$.

Hoofdstuk 8

- 33 Leid formule 8.1 af uit formule 4.1 en formule 4.8.
- 34 Een rotor met $R = R_1$ en $\lambda = \lambda_1$ heeft een bepaalde optimale P-n kromme. Leid voor een rotor met dezelfde C_p met $R = R_2$ de formule voor λ_2 af zodat de nieuwe rotor dezelfde optimale P-n kromme heeft.
- 35 Waarom is het transmissierendement η_{tr} voor een tandwielkast voor een bepaald toerental bij lage vermogens lager dan bij hoge vermogens?
- 36 Waarom vinden we optimale matching tussen rotor en generator als de optimale P-n kromme van de rotor de P-n kromme van de generator snijdt bij windsnelheden van ongeveer 4 en 8 m/s?
- 37 Wat is het voordeel van het P-n assenstelsel boven het Q-n assenstelsel?
- 38 Wanneer wordt toch de voorkeur gegeven aan het Q-n assenstelsel?
- 39 Uit welke formule wordt formule 8.6 afgeleid?
- 40 Welke formule is nodig om $C_{q\ start}$ uit formule 8.6 te berekenen?
- 41 De eenheden W, kW, kWuur en kWuur/jaar worden door journalisten vaak foutief gebruikt. De eenheden W en kW zijn vermogen. De eenheid kWuur is arbeid en de eenheid kWuur/jaar is weer vermogen. Hoeveel W is 1 kWuur/jaar?
- 42 De geschatte δ -V kromme van de VIRYA-3.3 windmolen wordt gegeven in figuur 8.2. Aangenomen wordt dat de ideale kromme $\delta = \arccos V_{rated}/V$ gevolgd wordt voor windsnelheden hoger dan 11 m/s. Wat betekent dit voor de snelheidscomponent $V\cos\delta$ haaks op het rotorvlak voor windsnelheden hoger dan 11 m/s (zie ook figuur 7.1).
- 43 Welk punt in figuur 8.2 komt overeen met de theoretische V_{rated} ?
- 44 Bewijs dat voor de theoretische V_{rated} geldt dat $V_{rated} = 9,5263$ m/s.
- 45 Welke windsnelheid in figuur 8.2 komt overeen met de werkelijke V_{rated} ?
- 46 Controleer de waarden voor n en P uit tabel 8.1 voor $V = 4$ m/s
- 47 Controleer de waarden voor n_δ en P_δ uit tabel 8.1 voor $V = 11$ m/s
- 48 Leid de P_{el} -V kromme voor de VIRYA-3.3 windmolen af uit figuur 8.3. Controleer het resultaat achteraf door vergelijking van de gevonden kromme met figuur 8.4.
- 49 De P_{el} -V kromme van een kleine windmolen werd door de fabrikant bepaald door de molen door te meten voor een open windtunnel. Een gebruiker van de molen wil de P_{el} -V kromme in het veld controleren en doet dat op basis van 10-minutengemiddelde windsnelheden. Welke methode geeft de hoogste kromme?
- 50 Waarom is het ongunstig als van een windmolen $V_{cut\ in}$ lager ligt dan V_{start} ?

4 Antwoorden op vragen cursus Rotor design

- 1 $P_{el} = 0,96 * 0,75 * 50 * 30 = 1080 \text{ W}$
- 2 $\Omega = \lambda * V / R = V_{tip} / R = 40 / 5 = 8 \text{ rad/s}$
- 3 Vanwege de grote hoogte van Lhasa is de luchtdichtheid ρ aanzienlijk lager
- 4 $P = \frac{1}{2} * 1,2 * 6^3 * \pi * 2^2 = 1628,6 \text{ W}$
- 5a $R_e = 10 * 0,345 / 15 * 10^{-6} = 2,3 * 10^5 \text{ (-)}$
- 5b $L = C_l * \frac{1}{2} \rho W^2 * c * b = 1,02 * \frac{1}{2} * 1,2 * 10^2 * 0,345 * 1,5 = 31,67 \text{ N}$
- 5c $D = C_d * \frac{1}{2} \rho W^2 * c * b = 0,03 * \frac{1}{2} * 1,2 * 10^2 * 0,345 * 1,5 = 0,93 \text{ N}$
- 6 $P_{el} = 0,4 * 1 * 0,65 * \frac{1}{2} * 1,2 * 7^3 * \pi * 2^2 = 672,4 \text{ W}$
- 7 $C_{q \text{ opt}} = C_{p \text{ max}} / \lambda_{\text{opt}} = 0,42 / 7 = 0,06$
- 8 Formule 1.1 geeft $\Omega = P / Q$. Substitutie van Ω in formule 1.5 geeft formule 4.4. Substitutie van P uit formule 4.1 en Q uit formule 4.3 in formule 4.4 geeft:

$$C_p * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3$$

$$\lambda = \frac{C_p * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3}{C_q * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^3} \quad \text{Dit geeft } \lambda = C_p / C_q \text{ of } C_p = C_q * \lambda.$$
- 9 $P_{\text{max}} = P_{A1} - P_{A2}$. Formule 4.9 geeft dat $A_1 = 2/3 A_r$ en $A_2 = 2A_r$. Volgens Betz is de windsnelheid t.p.v. $A_1 = V$ en t.p.v. $A_2 = 1/3 V$. Dit geeft dat $P_{A1} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r$ en dat $P_{A2} = \frac{1}{2} \rho (1/3 V)^3 * 2 A_r$. Substitutie van deze waarden in de formule voor P_{max} geeft $P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r - \frac{1}{2} \rho (1/3 V)^3 * 2 A_r$. Dit geeft $P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/3 A_r - \frac{1}{2} \rho V^3 * 2/27 A_r$. Dit geeft $P_{\text{max}} = 16/27 * \frac{1}{2} \rho V^3 * A_r$.
- 10 $F_t = 0,7 * \frac{1}{2} * 1,2 * 35^2 * \pi * 2,5^2 = 10102 \text{ N}$
- 11 $C_p = 0,481$
- 12 $C_p = 0,42$
- 13 $C_{p \text{ th}} = 0,45$
- 14 $C_{p \text{ th}} = 0,26$
- 15 $C_{p \text{ th}} = 0,47$
- 16 $\lambda_{rd} = 6 * 1,25 / 2,5 = 3$
- 17 $\phi = 33,69^\circ$ berekend met formule 5.9 en $\phi = 30^\circ$ berekend met formule 5.3.
- 18 $\phi = 4,764^\circ$ berekend met formule 5.9 en $\phi = 4,750^\circ$ berekend met formule 5.3.
- 19 Formule 5.1 en $\lambda_d = 6$ en $R = 2,5 \text{ m}$ geeft $\lambda_{rd} = 3$.
 $R_{e,r} = 0,667 * 10^5 * 5 * 0,25 * \pi (3^2 + 4/9) = 2,56 * 10^5 \text{ (-)}$
- 20 -
- 21 - Voor station F wordt na linearisatie een α_{lin} gevonden van $24,8^\circ$. De C_l - α kromme voor het G623 profiel loopt maar tot 18° en daarom kan de waarde van C_l voor $\alpha = 24,8^\circ$ niet afgelezen worden.
- 22 $C_d/C_{lmin} = 0,034$
- 23 Tussen $\alpha = -3^\circ$ en $\alpha = 11^\circ$
- 24a $3 * 12 = 36 \text{ mm}$
- 24b $3 * 7,35 = 22,05 \text{ mm}$
- 24c $3 * (7,9 - 0,9) = 21 \text{ mm}$
- 25 $A_r = \pi R^2$. Oppervlak tussen hart rotor en bladvoet $= \pi (R - k)^2 = \pi (R^2 - 2Rk + k^2)$. Dus het door de bladlengte k bestreken oppervlak A_k wordt gegeven door:
 $A_k = \pi R^2 - \pi (R^2 - 2Rk + k^2) = \pi (2Rk - k^2)$. Omdat $C_{p \text{ th}}$ afneemt met de verhouding A_k / A_r vinden we voor $C_{p \text{ max}}$ dat $C_{p \text{ max}} = C_{p \text{ th}} * (2Rk - k^2) / R^2$ (formule 6.3).
- 26 Omdat er aan de bladvoet maar vooral aan de bladtip een wervel ontstaat van lucht die van de overdruk naar de onderdrukzijde van het profiel stroomt. Hierdoor daalt de lift. In de praktijk blijkt het startkoppel hierdoor maar ongeveer 75 % te zijn van $Q_{rot \text{ th}}$.

27 Omdat bij stilstand het koppel alleen bepaald wordt door de lift L. Zodra de rotor draait wordt ϕ kleiner dan 90° waardoor de weerstand D een component $D\cos\phi$ krijgt die tegen de draairichting van het blad in werkt (zie figuur 4.4).

28 -

29 Het geprojecteerde rotoroppervlak is evenredig met $\cos\delta$. F_t neemt echter af met $\cos^2\delta$ omdat de snelheidscomponent haaks op het rotorvlak afneemt met $\cos\delta$. Dit resulteert in een veel sterkere afname van F_t dan op basis van het geprojecteerde rotoroppervlak.

30 Met een factor $\cos^3 30^\circ = 0,650$.

31 Met een factor $\cos^2 70^\circ = 0,117$.

32 -

33 Formule 4.8 kan geschreven worden als $V = \pi * n * R / 30 * \lambda$. Substitutie van V in formule 4.1 geeft:

$$P = \frac{C_p * \frac{1}{2}\rho (\pi * n * R)^3 * \pi R^2}{(30 * \lambda)^3} = \frac{\pi^4 * \rho * C_p * R^5 * n^3}{54000 * \lambda^3} \quad (\text{formule 8.1})$$

34 De P-n krommen zijn gelijk als de term waarmee n^3 vermenigvuldigd wordt gelijk is. Dit houdt in dat:

$$\frac{R_1^5}{\lambda_1^3} = \frac{R_2^5}{\lambda_2^3} \quad \text{Dit geeft } \lambda_2 = \lambda_1 (R_2/R_1)^{5/3}$$

35 Omdat er bij dat toerental een bepaald verlieskoppel is t.g.v. wrijvingsverliezen in de oliekeerringen en t.g.v. hydrodynamische verliezen van de olie tussen de tanden. Naarmate een groter nuttig koppel wordt doorgegeven wordt dit verlieskoppel relatief steeds kleiner waardoor het rendement toeneemt.

36 Omdat de snijpunten voor de overige windsnelheden dan zeer dicht bij de top van de P-n krommen van de rotor liggen waardoor de C_p nagenoeg gelijk is aan $C_{p \max}$.

37 In het P-n assenstelsel kan ook de P_{el} -n kromme van de generator ingetekend worden.

38 Wanneer het startgedrag bekeken wordt. Bij hele lage toerentallen wordt het rotorvermogen bijna nul terwijl er wel een redelijk rotorkoppel aanwezig is.

39 Uit formule 4.3.

40 Formule 6.12.

41 $1 \text{ kWuur/jaar} = 1000 \text{ Wuur/jaar} = 1000 / (365 * 24) \text{ Wuur/uur} = 0,114 \text{ W}$.

42 Dat deze constant is voor windsnelheden hoger dan 11 m/s.

43 Het snijpunt van de ideale kromme met de x-as.

44 Het punt $V = 11 \text{ m/s}$, $\delta = 30^\circ$ ligt op de ideale kromme. De formule van de ideale kromme kan ook geschreven worden als $V_{\text{rated}} = V\cos\delta$. Dit geeft $V_{\text{rated}} = 11 * \cos 30^\circ = 9,5263 \text{ m/s}$.

45 De windsnelheid $V = 11 \text{ m/s}$ die hoort bij $\delta = 30^\circ$ omdat bij pas boven deze windsnelheid de axiale component van de windsnelheid constant blijft. Daardoor wordt het maximum vermogen pas bij deze windsnelheid bereikt.

46 -

47 -

48 -

49 Die op basis van 10-minutengemiddelde windsnelheden.

50 Omdat de rotor dan vanuit stilstand nog niet start als $V_{\text{cut in}}$ bereikt wordt. Hierdoor wordt geen vermogen opgewekt als dat wel mogelijk is. De rotor draait alleen bij $V_{\text{cut in}}$ als hij vanwege een eerdere hogere windsnelheid al is aangelopen. Dit resulteert in zogenaamde hysteresis-effecten.