

Lösung

Aufgaben zum Lehrpfad Wasserkraft

energieakademie  toggenburg

ein teilprojekt von «energietal toggenburg»

- Turbinentypen**
- Potenzialabschätzung (Einphasig)**
- Potenzialabschätzung (Drehstrom)**
- Netzbetrieb / Synchronisation**

energieakademie toggenburg
Daniel Wittenwiler

Turbinentypen

Auf dem Lehrpfad Wasserkraft hat es an jedem Standort jeweils eine Informationstafel zur Kaplan-, Pelton- oder Francis-Turbine. Mit deren Hilfe die folgenden Fragen beantwortet werden können.

Aufgabe 1 / Turbinenwahl

Welche Turbinen könnten für ein Kraftwerk am Wasserfall des mittleren Standortes mit einer Höhendifferenz von 6 m und einem Abfluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ verwendet werden?

- X Kaplan
- Pelton
- X Francis

Aufgabe 2 / Überdruckturbinen

2a) Erkläre den Begriff „Überdruckturbine“.

Bei einer Überdruckturbine muss der Wasserdruck nach dem Turbinieren nicht auf Umgebungsdruck, Luftdruck abgesunken sein. Das Wasser kann noch immer unter einem gewissen Druck stehen.

2b) Nenne zwei Anwendungen, bei denen nur Überdruckturbinen verwendet werden können.

- *Trinkwasserkraftwerke. Wenn Trinkwasser aus grosser höhe ins Tal geführt wird, steht es unter hohem Druck. Ein Teil dieses Druckes muss abgebaut werden. Dies kann mittels Druckreduzierventil oder besser mit einer Turbine geschehen. Nach dem Turbinieren muss das Wasser aber noch immer den geforderten Leitungsdruck aufweisen*
- *Pumpspeicherkraftwerk. Bei Überdruckturbinen ist das Turbinengehäuse komplett geflutet. Diese Turbinen können somit auch reversibel zum pumpen verwendet werden.*
- *Kohäsionsschutz. Da das Wasser an der Turbine unter höherem Druck steht, ist die Gefahr der Blasenbildung auf den Turbinenschaufeln geringer. Somit kann die Kohäsion verringert und die Lebensdauer der Turbine erhöht werden. (Kohäsion wird auf den Plakaten nicht beschrieben)*

2c) Welche Turbinen zählen zu den Überdruckturbinen?

- X Kaplan
- Pelton
- X Francis

Aufgabe 5 / Pumpspeicherkraftwerk

Welche Turbinen können auch als Pumpen eingesetzt werden und eignen sich somit für einen reversiblen Betrieb in einem Pumpspeicherkraftwerk?

Grundsätzlich können Kaplan- und Francis-Turbinen als Pumpen eingesetzt werden. Da die Kaplan-turbine aber nur bei geringer Höhendifferenz eingesetzt wird müssten riesige Seen für die Speicherung grosser Energien angelegt werden. Man verwendet deshalb Francis-Turbinen und pumpt damit nicht soviel Wasser, dafür in sehr grosse Höhen und kann dadurch grosse Energiemengen speichern.

Potenzialabschätzung (Einphasig)

Am mittleren Standort des Lehrpfades Wasser hat es in der Thur einen Wasserfall. Dieser bietet die Möglichkeit für den Bau eines Wasserkraftwerkes. Für dieses Fallbeispiel wollen wir ein paar grundlegende Berechnungen durchführen.

Aufgabe 1 / Hydraulische Leistung

Wie gross ist die effektive hydraulische Leistung des Wasserfalls?

Hydraulische Leistung = Höhendifferenz · Vollumenstrom · Dichte · Erdbeschleunigung

$$P_{Hyd} = h \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot g = 6 \text{ m} \cdot 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = \mathbf{588.6 \text{ kW}} \quad \left[1 \text{ W} \triangleq 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} \right]$$

Aufgabe 2 / Abgabeleistung Generator

Berechne die Leistung, welche der Generator abgibt.

Generatorleistung = Hydraulische Leistung · Turbinenwirkungsgrad · Generatorwirkungsgrad

$$P_{Gen} = P_{Hyd} \cdot \eta_{Turb} \cdot \eta_{Gen} = 588.6 \text{ kW} \cdot 0.85 \cdot 0.93 = \mathbf{465.3 \text{ kW}}$$

Aufgabe 3 / Strom und Durchmesser 400V

Ermittle den Strom der Verbindungsleitung von einem Einphasenwechselstromgenerator zum Transformator. Wie gross muss der Durchmesser dieses Leiters sein?

$$\text{Strom} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Spannung}}$$

$$I_{400V} = \frac{P_{Gen}}{U} = \frac{465.3 \text{ kW}}{400 \text{ V}} = 1'163 \text{ A}$$

$$\text{Querschnitt} = \frac{\text{Strom}}{\text{Stromdichte}}$$

$$A_{Leitung400V} = \frac{I_{400V}}{J} = \frac{1'163 \text{ A}}{2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 581.6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Durchmesser} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Querschnitt}}{\pi}}$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{Leitung400V}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{581.6 \text{ mm}^2}{\pi}} = \mathbf{27.2 \text{ mm}}$$

Aufgabe 4 / Leitungsverluste

Berechne die Verluste, die in einer 10 m langen 400 V Verbindungsleitung auftreten würden (2 Leiter).

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spezifischer Widerstand} \cdot \text{Länge}}{\text{Querschnitt}} \quad (\text{Leitungslänge} = 2 \cdot \text{Leiterlänge})$$

$$R_{Leitung400V} = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l}{A_{Leitung400V}} = \frac{0.0178 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 2 \cdot 10 \text{ m}}{581.6 \text{ mm}^2} = 612 \mu\Omega$$

$$\text{Verlustleistung} = \text{Strom}^2 \cdot \text{Widerstand}$$

$$P_{Verl400V} = I_{400V}^2 \cdot R_{Leitung400V} = (1'163 \text{ A})^2 \cdot 612 \mu\Omega = \mathbf{828.2 \text{ W}}$$

Dies ist ein Verlust von fast 2% auf einer sehr kurzen Leitung. Der Querschnitt müsste wohl noch grösser gewählt werden.

Aufgabe 5 / Abgabeleistung Transformator

Bestimme die Leistung, die der Transformator abgibt

Transformatorleistung = (Generatorleistung – Verlustleistung400V) · Transformatorwirkungsgrad

$$P_{Trans} = (P_{Gen} - P_{Verl400V}) \cdot \eta_{Trans} = (465.3 \text{ kW} - 0.828 \text{ kW}) \cdot 0.98 = \mathbf{455.2 \text{ kW}}$$

Aufgabe 6 / Leiterstrom und Durchmesser 20 kV

Bestimme den Strom der Leitung vom Transformator zur Hochspannungsfreileitung und berechne deren Querschnitt (Einphasenwechselstrom).

$$\text{Strom} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Spannung}}$$

$$I_{20kV} = \frac{P_{\text{Tran}}}{U} = \frac{455.2kW}{20kV} = 22.76A$$

$$\text{Querschnitt} = \frac{\text{Stromdichte}}{\text{Strom}}$$

$$A_{\text{Leitung}20kV} = \frac{I_{20kV}}{J} = \frac{22.76A}{\frac{2}{mm^2}} = 11.38mm^2$$

$$\text{Durchmesser} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Querschnitt}}{\pi}}$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{Leitung}20kV}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{11.38mm^2}{\pi}} = 3.806 \text{ mm}$$

Aufgabe 7 / Leitungsverluste

Berechne die Verluste, die in einer 500 m langen 20 kV Verbindungsleitung auftreten würden (2 Leiter).

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{SpezifischerWiderstand} \cdot \text{Länge}}{\text{Querschnitt}} \quad (\text{Leitungslänge} = 2 * \text{Leiterlänge})$$

$$R_{\text{Leitung}20kV} = \frac{\rho \cdot l}{A_{\text{Leitung}20kV}} = \frac{0.0178 \frac{\Omega mm^2}{m} \cdot 2 \cdot 500 \text{ m}}{11.38mm^2} = 1.564\Omega$$

$$\text{Verlustleistung}20kV = \text{Strom}^2 \cdot \text{Widerstand}$$

$$P_{\text{Verl}20kV} = I_{20kV}^2 \cdot R_{\text{Leitung}20kV} = (22.76A)^2 \cdot 1.564\Omega = 810.2W$$

Die Verluste der 20kV Leitung sind beinahe gleich, wie diejenigen der 400V Leitung, obwohl sie 50-mal länger ist.

Aufgabe 8 / Gesamtwirkungsgrad

Wie gross ist der Gesamtwirkungsgrad der Anlage, vom Wasser bis zur Hochspannungsleitung?

$$\text{Gesamtwirkungsgrad} = \frac{\text{Transformatorleistung} - \text{Verlustleistung}20kV}{\text{HydraulischeLeistung}}$$

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{P_{\text{Trans}} - P_{\text{Verl}20kV}}{P_{\text{Hyd}}} = \frac{455.2kW - 0.8102kW}{588.6kW} = 77.2\%$$

Aufgabe 9 / Spannungsanpassung

Aus welchen Gründen wird mit dem Generator eine Spannung von 400 V erzeugt und diese dann zur Übertragung auf 20 kV hoch transformiert?

Im Generator müssen die Leiter der Spulen zur Verbesserung des induktiven Effektes sehr kompakt angeordnet werden. Würde man im Generator Hochspannung erzeugen, so müssten die Leiter besser isoliert sein, was mehr Platz benötigen würde. Durch das Erhöhen der Spannung für die Übertragung kann die selbe Leistung mit kleinerer Stromstärke übertragen werden. Die Leitungsverluste sind proportional zum Leitungswiderstand und dem Quadrat der Stromstärke. Durch das Senken der Stromstärke darf der Leitungswiderstand erhöht und somit der Leitungsquerschnitt reduziert werden, was die Materialkosten senkt.

Aufgabe 10 / Vergleich Photovoltaik

Welche Fläche müsste eine Photovoltaikanlage mit gleicher Leistung (Generatorleistung) aufweisen, wenn die Sonne mit 1000 W/m² auf die Erde scheint und die Module einen Wirkungsgrad von 12% haben? Es wird nur die Leistung betrachtet und die Tatsache, dass die Photovoltaik nur einige Stunden im Tag ihre Maximalleistung erbringt, wird für diesen Vergleich nicht berücksichtigt.

$$\text{Panelfläche} = \frac{\text{Generatorleistung}}{\text{Panelwirkungsgrad} \cdot \text{Bestrahlungsstärke}}$$

$$A_{\text{Panel}} = \frac{P_{\text{Gen}}}{\eta_{\text{Panel}} \cdot E} = \frac{465.3kW}{0.12 \cdot 1 \frac{kW}{m^2}} = 3'877'402m^2$$

Dies entspricht einem quadratischen Feld von 1.97km Kantenlänge oder 650 Fussballfeldern.

Potenzialabschätzung (Drehstrom)

Am mittleren Standort des Lehrpfades Wasser hat es in der Thur einen Wasserfall. Dieser bietet die Möglichkeit für den Bau eines Wasserkraftwerkes. Für dieses Fallbeispiel wollen wir ein paar grundlegende Berechnungen durchführen.

Aufgabe 1 / Hydraulische Leistung

Wie gross ist die effektive hydraulische Leistung des Wasserfalls?

Hydraulische Leistung = Höhendifferenz · Vollumenstrom · Dichte · Erdbeschleunigung

$$P_{Hyd} = h \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot g = 6 \text{ m} \cdot 10 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = \mathbf{588.6 \text{ kW}} \quad \left[1 \text{ W} \triangleq 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}\right]$$

Aufgabe 2 / Abgabeleistung Generator

Berechne die Leistung, welche der Generator abgibt.

Generatorleistung = Hydraulische Leistung · Turbinenwirkungsgrad · Generatorwirkungsgrad

$$P_{Gen} = P_{Hyd} \cdot \eta_{Turb} \cdot \eta_{Gen} = 588.6 \text{ kW} \cdot 0.85 \cdot 0.93 = \mathbf{465.3 \text{ kW}}$$

Aufgabe 3 / Leiterstrom und Durchmesser 400V

Ermittle den Leiterstrom der Verbindungsleitung vom Drehstromgenerator zum Transformator. Wie gross muss der Durchmesser eines Leiters sein?

$$\text{Strangstrom} = \frac{\text{Leistung}}{\sqrt{3} \cdot \text{Verkettete Spannung}}$$

$$I_{Str400V} = \frac{P_{Gen}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{465.3 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 671.6 \text{ A}$$

$$\text{Querschnitt} = \frac{\text{Strom}}{\text{Stromdichte}}$$

$$A_{Leitung400V} = \frac{I_{Str400V}}{J} = \frac{671.6 \text{ A}}{2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 335.8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Durchmesser} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Querschnitt}}{\pi}}$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{Leitung400V}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{335.8 \text{ mm}^2}{\pi}} = \mathbf{20.7 \text{ mm}}$$

Aufgabe 4 / Leitungsverluste

Berechne die Verluste, die in einer 10 m lange 400 V Verbindungsleitung auftreten würden.

$$\text{Leiterwiderstand} = \frac{\text{Spezifischer Widerstand} \cdot \text{Länge}}{\text{Querschnitt}}$$

$$R_{Leiter400V} = \frac{\rho \cdot l}{A_{Leitung400V}} = \frac{0.0178 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m}}{335.8 \text{ mm}^2} = 530 \mu\Omega$$

$$\text{Verlustleistung 400V} = 3 \cdot \text{Strangstrom}^2 \cdot \text{Leiterwiderstand}$$

$$P_{Verl400V} = 3 \cdot I_{Str400V}^2 \cdot R_{Leiter400V} = 3 \cdot (671.6)^2 \cdot 530 \mu\Omega = \mathbf{717.3 \text{ W}}$$

Dies ist ein Verlust von fast 2% auf einer sehr kurzen Leitung. Der Querschnitt müsste wohl noch grösser gewählt werden.

Aufgabe 5 / Abgabeleistung Transformator

Bestimme die Leistung, die der Transformator abgibt

Transformatorleistung = (Generatorleistung – Verlustleistung 400V) · Transformatorwirkungsgrad

$$P_{Trans} = (P_{Gen} - P_{Verl400V}) \cdot \eta_{Trans} = (465.3 \text{ kW} - 0.7173 \text{ kW}) \cdot 0.98 = \mathbf{455.3 \text{ kW}}$$

Aufgabe 6 / Leiterstrom und Durchmesser 20 kV

Bestimme den Leiterstrom der Leitung vom Transformator zur Hochspannungsfreileitung und berechne deren Querschnitt.

$$\text{Strangstrom} = \frac{\text{Leistung}}{\sqrt{3} \cdot \text{VerketeteSpannung}}$$

$$I_{\text{Str}20\text{kV}} = \frac{P_{\text{Trans}}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{455.3\text{kW}}{\sqrt{3} \cdot 20\text{kV}} = 13.14\text{A}$$

$$\text{Querschnitt} = \frac{\text{Strangstrom}}{\text{Stromdichte}}$$

$$A_{\text{Leitung}400\text{V}} = \frac{I_{\text{Str}20\text{kV}}}{j} = \frac{13.14\text{A}}{2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 6.57 \text{ mm}^2$$

$$\text{Durchmesser} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\text{Querschnitt}}{\pi}}$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{Leitung}20\text{kV}}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{6.57\text{mm}^2}{\pi}} = 2.89\text{mm}$$

Aufgabe 7 / Leitungsverluste

Berechne die Verluste, die in einer 500 m langen 20 kV Verbindungsleitung auftreten würden.

$$\text{Leiterwiderstand} = \frac{\text{SpezifischerWiderstand} \cdot \text{Länge}}{\text{Querschnitt}}$$

$$R_{\text{Leiter}20\text{kV}} = \frac{\rho \cdot l}{A_{\text{Leitung}20\text{kV}}} = \frac{0.0178 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 500 \text{ m}}{6.57\text{mm}^2} = 1.354\Omega$$

$$\text{Verlustleistung}20\text{kV} = 3 \cdot \text{Strangstrom}^2 \cdot \text{Leiterwiderstand}$$

$$P_{\text{Verl}20\text{kV}} = 3 \cdot I_{\text{Str}20\text{kV}}^2 \cdot R_{\text{Leiter}20\text{kV}} = 3 \cdot (13.14\text{A})^2 \cdot 1.354\Omega = 701.8\text{W}$$

Die Verluste der 20kV Leitung sind beinahe gleich wie diejenigen der 400V Leitung, obwohl sie 50-mal länger ist.

Aufgabe 8 / Gesamtwirkungsgrad

Wie gross ist der Gesamtwirkungsgrad der Anlage, vom Wasser bis zur Hochspannungsleitung?

$$\text{Gesamtwirkungsgrad} = \frac{\text{Transformatorleistung} - \text{Verlustleistung}20\text{kV}}{\text{HydraulischeLeistung}}$$

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{P_{\text{Trans}} - P_{\text{Verl}20\text{kV}}}{P_{\text{Hyd}}} = \frac{455.3\text{kW} - 0.7018\text{kW}}{588.6\text{kW}} = 77.2\%$$

Aufgabe 9 / Spannungsanpassung

Aus welchen Gründen wird mit dem Generator eine Spannung von 400 V erzeugt und diese dann zur Übertragung auf 20 kV hoch transformiert?

Im Generator müssen die Leiter der Spulen zur Verbesserung des induktiven Effektes sehr kompakt angeordnet werden. Würde man im Generator Hochspannung erzeugen, so müssten die Leiter besser isoliert sein, was mehr Platz benötigen würde. Durch das Erhöhen der Spannung kann die selbe Leistung mit kleinerer Stromstärke übertragen werden. Die Leitungsverluste sind proportional zum Leitungswiderstand und dem Quadrat der Stromstärke. Durch das Senken der Stromstärke darf der Leitungswiderstand erhöht und somit der Leitungsquerschnitt reduziert werden, was die Materialkosten senkt.

Aufgabe 10 / Vergleich Photovoltaik

Welche Fläche müsste eine Photovoltaikanlage mit gleicher Leistung (Generatorleistung) aufweisen, wenn die Sonne mit 1000 W/m² auf die Erde scheint und die Module einen Wirkungsgrad von 12% haben? Es wird nur die Leistung betrachtet und die Tatsache, dass die Photovoltaik nur einige Stunden im Tag ihre Maximalleistung erbringt, wird für diesen Vergleich nicht berücksichtigt.

$$\text{Panelfläche} = \frac{\text{Generatorleistung}}{\text{Panelwirkungsgrad} \cdot \text{Bestrahlungsstärke}}$$

$$A_{\text{Panel}} = \frac{P_{\text{Gen}}}{\eta_{\text{Panel}} \cdot E} = \frac{465.3\text{kW}}{0.12 \cdot 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} = 3'877'402\text{m}^2$$

Dies entspricht einem quadratischen Feld von 1.97km Kantenlänge oder 650 Fussballfeldern.

Netzbetrieb / Synchronisation

Die meisten Kleinwasserkraftwerke verwenden einen Synchrongenerator. Sein Verhalten verändert sich stark, wenn er nicht im Inselbetrieb mit einigen wenigen Verbrauchern verbunden ist, sondern im Verbundnetz mit vielen weiteren Generatoren und Verbrauchern ist, die zusammen ein starkes Netz bilden. In dieser Aufgabe wollen wir die Bedingungen für eine Verbindung mit dem Netz und die Eigenschaften im Netzbetrieb betrachten.

Aufgabe 1 / Bedingungen

Damit ein Generator schadlos mit dem Netz verbunden werden kann, muss er mit diesem synchronisiert werden. Dazu sind drei Bedingungen zu erfüllen. Welche sind dies?

- 1.) *Netz und Generatorspannung müssen genau gleich sein. Sinusspannung mit 230/400 V.*
- 2.) *Frequenz muss exakt 50 Hz sein.*
- 3.) *Die einzelnen Phasen müssen in der gleichen Reihenfolge und zum genau gleichen Zeitpunkt ihr Maximum erreichen.*

Aufgabe 2 / Synchronisation

Wie kann der Generator beeinflusst werden, so dass diese drei Bedingungen erfüllt werden?

- 1.) *Die Spannung eines Synchrongenerators kann durch den Erregerstrom und die Drehzahl beeinflusst werden. Die Drehzahl ist durch die zu erzeugende Frequenz festgelegt, so dass die Spannung nur noch durch den Erregerstrom beeinflusst werden kann.*
- 2.) *Die Frequenz kann nur über die Drehzahl des Generators beeinflusst werden. Bis der Generator mit dem Netz verbunden wird arbeitet er im Leerlauf. Die über die Turbine zugeführte Leistung wird dabei lediglich dazu verwendet die Verluste zu decken. Wird mehr Wasser turbiniert als zur Deckung dieser Verluste nötig ist, so steigt die Drehzahl an und damit direkt verbunden die Frequenz.*
- 3.) *Stimmt die Frequenz von Generator und Netz genau überein, so erreichen sie mit immer derselben zeitlichen Verzögerung ihr Spannungsmaximum. Weicht die Frequenz des Generators minimal von der des Netzes ab, so verändert sich diese Verzögerung langsam und kontinuierlich. Im Moment der Genauen Übereinstimmung kann der Generator mit dem Netz verbunden werden. Die Frequenzen dürfen nur ganz wenig von einander abweichen und die Zeitpunkte der Spannungsmaximalwerte müssen sehr genau übereinstimmen. Ansonsten wirken im Moment des Verbindens sehr grosse mechanische und elektrische Kräfte auf den Generator, die diesen zerstören können.*

Aufgabe 3 / Leerlauf

Was geschieht, wenn die Turbine ihre volle Leistung liefert und der Generator weder mit dem Netz noch mit anderen Verbrauchern verbunden ist?

Die Turbine liefert viel mehr Energie als zur Deckung der Verluste benötigt würde. Die zusätzliche Energie bewirkt, dass der Rotor beschleunigt wird. Die Drehzahl steigt weit über die Betriebsdrehzahl hinaus. Die Fliehkräfte die dabei auf den Rotor wirken können dazu führen, dass der Generator dabei zerstört wird.

Aufgabe 4 / Wasserausfall

Wie verhält sich ein Synchrongenerator, wenn er mit dem Netz verbunden ist, die Turbine aber keine Leistung auf seinen Rotor überträgt?

Die gesamte Maschine, Generator und Turbine, drehen mit konstanter Drehzahl weiter. Es wird jedoch keine Energie ins Netz abgegeben. Es muss sogar Energie vom Netz bezogen werden um die Verluste zu decken. Diese Situation stellt sich ein, sobald die Turbine weniger Leistung liefert, als die Anlage Verluste aufweist.