

Schriftliche Prüfung aus Energieversorgung, am 29.01.2013

Name/Vorname: _____ / _____ Matr.-Nr./Knz.: _____ / _____

1. Leitungsgleichungen (24 Punkte)

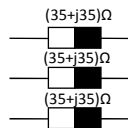
Auf einem Donaumast ist ein 380 kV-Drehstromfreileitungssystem bestehend aus Dreierbündel mit den folgenden geometrischen Daten der Aufhängung aufgezogen (Koordinatenursprung = Mastfußpunkt):

- Leiter A: $x = -7\text{m}, y = 18\text{m}$
- Leiter B: $x = +6\text{m}, y = 20\text{m}$
- Leiter C: $x = -2\text{m}, y = 22\text{m}$

Der gegenseitige Abstand der Leiter a im Dreierbündel beträgt 20 cm. Der Querschnitt eines Leiterseils beträgt 187,233 mm². Die Leitung ist 400 km lang und verdreht. Die thermische Dauerstrombelastbarkeit eines Leiterseils beträgt 346 A.

- a. (3) Zeichnen Sie eine schematische **Skizze der Leiteraufhängung**, beschriften Sie die Leiter und bemaßen Sie die Leiterabstände in beiden Koordinatenachsen.
- b. (6) Wie groß ist die längenbezogene symmetrische **Betriebsinduktivität** und **Betriebskapazität** der Leitung?
- c. (3) Wie groß ist der **Wellenwiderstand der verlustlosen Leitung** ($R' = 0 \frac{\Omega}{\text{km}}, G' = 0 \frac{\text{S}}{\text{km}}$) ?
- d. (3) Die Leitung wird im Leerlauf betrieben. Wie groß ist die **Spannung am Ende** der verlustlosen Leitung?
- e. (3) Berechnen Sie die **thermisch übertragbare Scheinleistung** der Leitung.

Die Leitung wird an ihrem Ende mit einer dreiphasigen, ohmsch-induktiven Last abgeschlossen (siehe Bild rechts) und am Leitungsanfang mit Nennspannung betrieben.

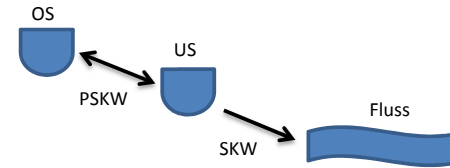


- f. (2) Wie groß ist die **Mitimpedanz** der ohmsch-induktiven Last?
- g. (4) Wie groß ist die **die Eingangsimpedanz Z_1** der verlustlosen Leitung?

2. Wasserkraft (24 Punkte)

Der **Obersee (OS)** ist über ein **Pumpspeicherkraftwerk (PSKW)** mit dem **Untersee (US)** verbunden. Mit je einem Pump- und Turbinensatz können die Wassermengen zwischen Ober- und Untersee bewegt werden.

Zusätzlich besteht über ein **Speicherkraftwerk (SKW)** die Möglichkeit den Inhalt des **Untersees (US)** in Richtung **Fluss** hin abzuarbeiten. Dieses abgelassene Wasser kann aus dem Fluss nicht mehr hochgepumpt werden.



Kenndaten des **Pumpspeicherkraftwerks** zwischen Obersee (OS) und Untersee (US):

Volumen Obersee	V_{OS}	20 Mio. m ³
Volumen Untersee	V_{US}	20 Mio. m ³
mittlere Fallhöhe	h	150 m
Nenndurchfluss	Q_N	25 m ³ /s
Gesamtwirkungsgrad - Turbinenbetrieb	η_{Turb}	93 %
Gesamtwirkungsgrad - Pumpbetrieb	η_{Pump}	85 %

Das **Speicherkraftwerk** zwischen Untersee (US) und Fluss weist folgende Kenndaten auf:

mittlere Fallhöhe	h	564 m
Nenndurchfluss	Q_N	35 m ³ /s
Gesamtwirkungsgrad - Turbinenbetrieb	η_{Turb}	90 %

- a. (6) Welche **elektrische Energie** kann (in einem Zyklus) maximal verpumpt werden? Welchen **Anfangs-** und **Endfüllstand** müssen hierzu **Ober-** und **Untersee** aufweisen?
- b. (6) Welche **elektrische Energie** kann in Summe über das **Pumpspeicherkraftwerk** und das **Speicherkraftwerk** im **Turbinenbetrieb** entnommen werden? Welchen **Anfangs-** und **Endfüllstand** müssen hierzu **Ober-** und **Untersee** aufweisen?

Hinweis: Die Wassermengen sollen zur Gänze hinunter zum Fluss abgearbeitet werden.

- c. (4) Welche **elektrischen Verluste** entstehen durch **einen vollständigen Umwälz-Zyklus** des **Pumpspeichervorgangs**?
- d. (4) Wie lange dauert der Pumpvorgang aus (a) unter Nennbedingungen?
- e. (4) Wie lange dauert die vollständige Abarbeitung der Wassermengen aus Punkt (b)?

3. Wirtschaftlichkeitsvergleich (24 Punkte)

Über das als Versuchsanlage gebaute Solarkraftwerk „Gemasolar“ (solarthermisches Kraftwerk mit Salzschnmelze und Speicher) in Spanien sind folgende Angaben bekannt:

Leistung	19,9 MW _{el}
Errichtungskosten	230 Mio. €
geschätzte Jahresenergieeinspeisung	110 GWh/a
leistungsabhängige Kosten	6% der Errichtungskosten pro Jahr

Um die Wirtschaftlichkeit dieser Versuchsanlage beurteilen zu können, soll ein konventionelles GuD-Kraftwerk mit folgenden Daten betrachtet werden:

spezifische Errichtungskosten	650 €/kW _{el}
leistungsabhängige Kosten	95 €/kW _{el} a
Brennstoffkosten	0,40 €/m ³ Erdgas
Heizwert von Erdgas H _u	30 MJ/m ³
Gesamtwirkungsgrad	58 %
betriebsabhängige Kosten	0,001 €/kWh _{el}

Für beide Anlagen sollen eine Nutzungsdauer von 25 Jahren und ein Zinssatz am Kapitalmarkt von 7% gelten.

- Ermitteln Sie die **Stromgestehungskosten** für das **Versuchskraftwerk** „Gemasolar“.
- Wie hoch sind die **Stromgestehungskosten** des **GuD-Kraftwerks**, wenn es die gleiche Volllaststundenzahl pro Jahr aufweist, wie das Versuchskraftwerk?
- Wie hoch dürften die **spezifischen Errichtungskosten** von „Gemasolar“ **maximal** sein, damit dieses mit dem konventionellen GuD-Kraftwerk konkurrieren kann?

Hinweis: Auch die leistungsabhängigen Kosten ändern sich, sie belaufen sich weiterhin auf 6% der jeweiligen Errichtungskosten!

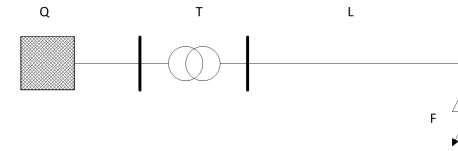
- Um zusätzliche 25 Mio. € könnte das Versuchskraftwerk „Gemasolar“ mit größeren Speichern ausgestattet werden, wodurch sich die Volllaststundenzahl um 15% erhöht. Wäre dies eine **sinnvolle Investition**? (Es gilt hier ebenso der Hinweis von Punkt c.)

4. Fünf Sicherheitsregeln (4 Punkte)

Bringen Sie die fünf Sicherheitsregeln in die richtige Reihenfolge:

- Erden und kurzschließen
- Gegen Wiedereinschalten sichern
- Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken
- Spannungsfreiheit allpolig feststellen
- Freischalten (d.h. allpoliges Trennen einer elektrischen Anlage von spannungsführenden Teilen)

5. Kurzschlussberechnung (24 Punkte)



Die **Netzeinspeisung** (50Hz) weist folgende Kenndaten auf:

Nennspannung	U_{nQ}	110 kV
Kurzschlussleistung	S_{kQ}	4,5 GVA
Sicherheitsfaktor	c	1,1
Resistanz-Reaktanz-Verhältnis	$R_Q / X_Q $	0,5

Der **Transformator** weist folgende Kenndaten auf:

Primärspannung	U_1	110 kV
Sekundärspannung	U_2	30 kV
Nennscheinleistung	S_N	40 MVA
Kurzschlussspannung	u_k	0,16
Kurzschlussverluste	P_k	500 kW

Die **Leitung** weist folgende Kenndaten auf:

Widerstandsbelag	R'	0,24 Ω/km
Induktivitätsbelag	L'	1,145 mH/km
Kapazitätsbelag	C'	9 nF/km
Länge	l	50 km

Am Ende der Leitung ereignet sich ein **2-poliger Kurzschluss ohne Erdberührung**.

- Berechnen Sie die **Netzimpedanz** (Resistanz und Reaktanz) bezogen auf die Kurzschlussseite (Leitung).
- Berechnen Sie die **Transformatorimpedanz** (Resistanz und Reaktanz) bezogen auf die Kurzschlussseite (Leitung).
- Berechnen Sie die **Leitungslängsimpedanz** (Resistanz und Reaktanz) bezogen auf die Kurzschlussseite (Leitung).
- Wie muss das Komponentensystem bei einem zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung verschaltet sein (**Skizze**)? Berechnen Sie damit die im Kurzschluss wirksame **Gesamtimpedanz** (Resistenz und Reaktanz) bezogen auf die Kurzschlussseite (Leitung).
- Berechnen Sie den Betrag des **Anfangs-Kurzschlussstrom** I''_{k2p} .
Hinweis: Verwenden Sie $Z_{(0)} = 15\Omega - j2500\Omega$; $Z_{(1)} = Z_{(2)} = 15\Omega + j20\Omega$
- Wie hoch ist der Betrag des Anfangs-Kurzschlussstrom I''_{k2p} , wenn der zweipolige **Fehler** nicht am Ende der Leitung sondern auf der **Primärseite** des **Transformators** erfolgt?
- Für die Auslegung der mechanischen Festigkeit wird der dreipolige Kurzschlussstrom benötigt. Berechnen Sie den Betrag des maximalen **Stoßstroms** i_p , wenn der Anfangs-Kurzschlussstrom $I''_{k3p} = 0,95 kA$ beträgt.
Hinweise: $i_p = \sqrt{2} (1 + e^{-t.R/L}) I''_{k3p}$; „worst case“ bei $t \cong 10 ms$;
Verwenden Sie die Impedanzen aus Punkt e.