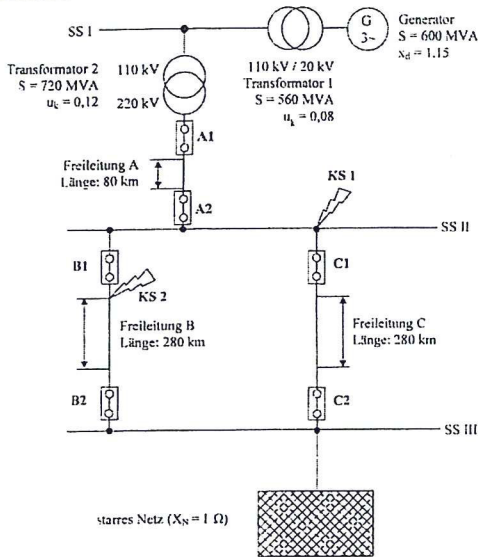


1. Aufgabe:



In einem Auszug aus einem Übertragungsnetz sind einige Fehlerfälle zu betrachten. Alle Querglieder und Verluste sollen hierbei vernachlässigt werden. Alle Schalter sind geschlossen.

Der Induktivitätsbelag jeder dargestellten Freileitung ist $\omega L' = 0,39 \Omega/\text{km}$.

- a.) Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild des abgebildeten Netzteils. Berechnen Sie die Ersatzreaktanzen bezogen auf 220 kV.

2. Aufgabe:

Eine Drehstromfreileitung (400 kV / 50 Hz) mit einer Länge von 300 km hat die Leitungsbeläge $\omega L' = 0,3 \Omega/\text{km}$ und $R' = 0,1 \Omega/\text{km}$. Die Querglieder sollen vernachlässigt werden.

Für die Zeigerdiagramme ist folgender Maßstab zu verwenden: 20 kV \triangleq 1 cm.

- a) Welche Wirk- und Blindleistung nimmt ein Verbraucher am Ende der Leitung ab, wenn am Anfang der Leitung bei $U_1 = 400 \text{ kV}$ eine Scheinleistung von 1000 MVA bei einem $\cos \varphi_1$ von 0,92 (induktiv) eingespeist wird? Zeichnen Sie hierzu das einphasige Ersatzschaltbild, berechnen Sie den Betrag des Stroms, und konstruieren Sie ein Zeigerdiagramm zur Bestimmung von U_2 und φ_2 !

Die Freileitung verbindet nun ein Kraftwerk mit einem starren Netz. Sie soll dabei als verlustfrei ($R = 0 \Omega$) betrachtet werden. Im Kraftwerk arbeitet ein Drehsynchrongenerator ($U_n = 20 \text{ kV}$, $S_n = 800 \text{ MVA}$, $x_d = 1,1$), der über einen Transformator (20 kV / 400 kV, $S_n = 800 \text{ MVA}$, $u_k = 0,12$) und die Freileitung in ein starres 400 kV Netz speist.

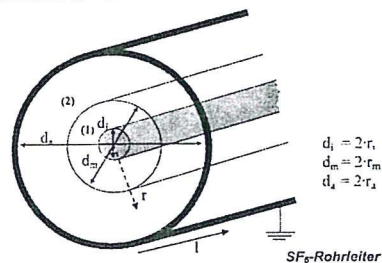
- b) Welche Wirk- und Blindleistung gibt der Generator an seinen Klemmen ab, wenn bei einem gesamten Übertragungswinkel von 30° in das Netz nur Wirkleistung eingespeist werden soll? Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild, berechnen Sie alle Reaktanzen und konstruieren Sie ein Zeigerdiagramm zur Bestimmung der Generatorspannung sowie allen relevanten Größen! Die Ersatzreaktanzen sollen auf 400 kV bezogen werden.
- c) Welche Wirkleistung kann höchstens in das starre 400 kV Netz mit $\cos \varphi = 0,92$ (induktiv) eingespeist werden, wenn aus Stabilitätsgründen 55 % der Kippleistung nicht überschritten werden soll?

- b.) Bestimmen Sie für einen auftretenden Kurzschluss 1 (Stelle KS 1) die notwendige Abschalleistung des Schalters A2.
- c.) Bestimmen Sie für einen auftretenden Kurzschluss 2 (Stelle KS 2) die notwendige Abschalleistung des Schalters B1.

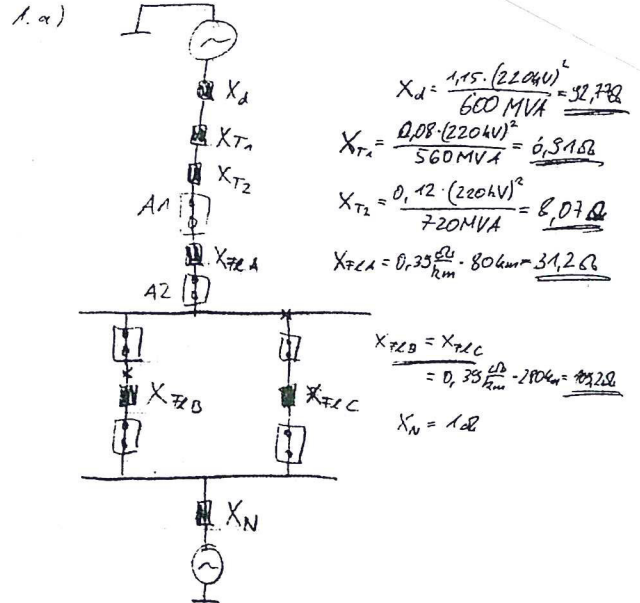
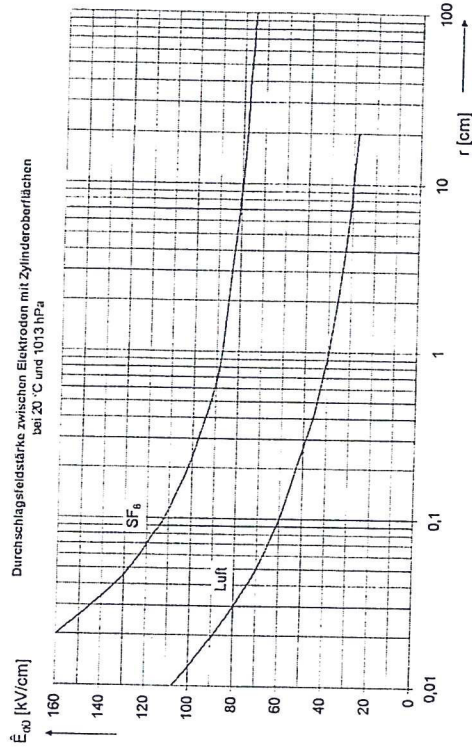
A.3 für Diplom!

3. Aufgabe:

Ein gasisoliertes Drehstromübertragungssystem mit einer Bemessungsspannung von $U_d = 800 \text{ kV}$ / 50 Hz besteht aus drei identischen Rohrleitern gemäß der abgebildeten coaxialen Zylinderanordnung. Der spannungsführende Innenleiter wird von vernetztem Polyethylen (1) umgeben ($\epsilon_r = 2,3$). Zwischen dieser Feststoffisolierung und dem geerdeten, zylindrischen Mantel befindet sich das Isoliergas SF₆ (2) bei einem Druck von $p = 3,2 \text{ bar}$ mit $\epsilon_r = 1$. Die Durchmesser betragen $d_1 = 30 \text{ mm}$, $d_m = 100 \text{ mm}$ und $d_s = 200 \text{ mm}$.



- a) Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild und bestimmen Sie die Spannungsverteilung über den einzelnen Dielektrika. Berechnen Sie die Feldstärken an den Orten $r = r_1$, $r = r_m$ und $r = r_s$ bei Betriebsbeanspruchung. Skizzieren Sie den Feldstärkeverlauf $E_{eff} = f(r)$ für $r_1 \leq r \leq r_s$.
- b) Aufgrund eines Lecks halbiert sich der SF₆-Druck bei konstanter Temperatur (20°C). Bleibt die dielektrische Festigkeit in diesem Fall noch gewährleistet? Rechnen! Benutzen Sie zur Bestimmung das Zusatzblatt zur Durchschlagsfeldstärke.
- c) Welcher Außenradius r_s würde sich ergeben, wenn die Isolierung ausschließlich aus dem Feststoff bestehen würde, und die Feldstärke am Innenleiter r_1 der in a) berechneten entsprechen soll?



b) $S_{A2} = ?$

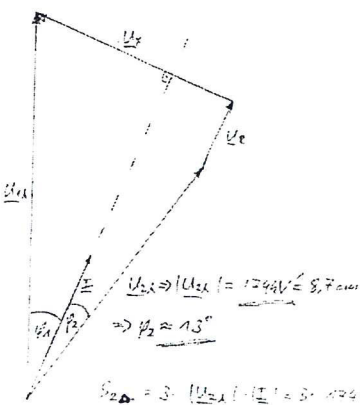
$X_{ges} = X_d + X_{T1} + X_{T2} + X_{T2A}$
 $= 92,77 \Omega + 6,51 \Omega + 8,07 \Omega + 28 \Omega$
 $= 135,35 \Omega$
 $\Rightarrow S_{A2} = \frac{U_N^2}{X_{ges}} = \frac{(220kV)^2}{135,35 \Omega} = 348 MVA$

c) $S_{A1} = ?$

$I_{KWB} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot (X_N + \frac{1}{2} X_{T2A})} \cdot \frac{1}{2} = 1142 A$
nur halber Strom fließt bis zu $X_{T2} = 72 \Omega$ (I-Teil)
 $I_{KAW} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot (X_d + X_{T1} + X_{T2} + X_{T2A})} = 314 A$
 $I_K = I_{KWB} + I_{KAW} = 2056 A$
 $\Rightarrow S_{A1} = \sqrt{3} \cdot 220kV \cdot 2056 A = 783 MVA$

2. a)

$S_{A1} = \sqrt{3} \cdot U_{A1} \cdot I_A \Rightarrow I = I_A = \frac{1000 MVA}{\sqrt{3} \cdot 400kV} = 1443 A$
 $U_{A1} = \frac{U_A}{\sqrt{3}} = 231 kV \hat{=} 11,55 cm$
 $X = \omega L' \cdot l = 0,3 \frac{\Omega}{km} \cdot 300 km = 90 \Omega$
 $R = R' \cdot l = 0,1 \frac{\Omega}{km} \cdot 300 km = 30 \Omega$
 $\cos \varphi_1 = 0,92 \Rightarrow \varphi_1 = 23^\circ$
 $U_{Z1} = U_A + U_R + U_{Z1} = I \cdot (R + jX) + U_{Z1}$
 $|U_{Z1}| = |I| \cdot X = 1443 A \cdot 90 \Omega = 129,87 kV \hat{=} 6,5 cm$
 $|U_{Z1}'| = |I| \cdot R = 1443 A \cdot 30 \Omega = 43,29 kV \hat{=} 2,2 cm$



$S_{A2} = 3 \cdot |U_{Z1}| \cdot |I| = 3 \cdot 129,87 kV \cdot 1443 A = 753,2 MVA$
 $P_{A2} = S_{A2} \cdot \cos \varphi_2 = 753,2 MVA \cdot \cos 13^\circ = 733,3 MW$
 $Q_{A2} = S_{A2} \cdot \sin \varphi_2 = 753,2 MVA \cdot \sin 13^\circ = 167,4 MVar$

6)

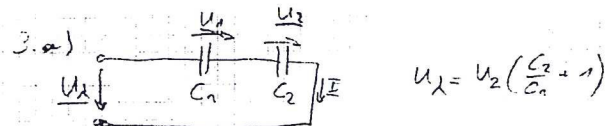
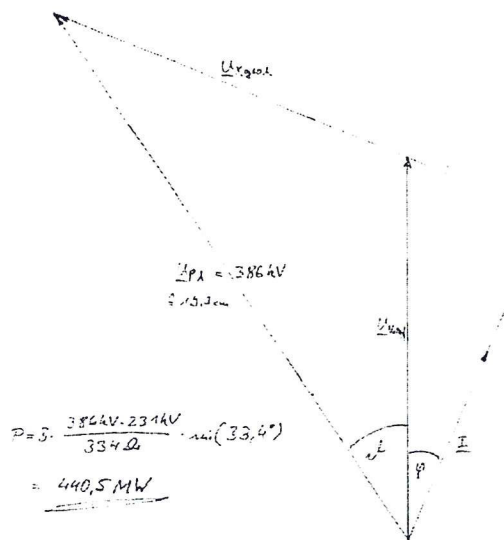
$X_d = \frac{x_d \cdot U_N^2}{S_N} = \frac{1,1 \cdot (400kV)^2}{800 MVA} = 220 \Omega$
 $X_{T1} = \frac{x_{T1} \cdot U_N^2}{S_N} = \frac{0,12 \cdot (400kV)^2}{800 MVA} = 24 \Omega$
 $X_{T2} = 30 \Omega$
 $X_{ges} = X_d + X_{T1} + X_{T2} = 374 \Omega$
 $I = \frac{U_{A1}}{X_{ges}} = \frac{231 kV}{374 \Omega} = 617,6 A$
 $U_{Z1} = I \cdot X_{ges} = 617,6 A \cdot 374 \Omega = 231 kV$
 $U_{Z1}' = I \cdot R = 617,6 A \cdot 30 \Omega = 18,5 kV$
 $U_{Z1} = 231 kV \hat{=} 11,5 cm$
 $U_{Z1}' = 18,5 kV \hat{=} 0,9 cm$
 $\varphi_2 \approx 13^\circ$

$\Rightarrow P_{A1} = 3 \cdot 231 kV \cdot 617,6 A \cdot \cos 13^\circ = 278,7 MW$
 $Q_{A1} = 3 \cdot 231 kV \cdot 617,6 A \cdot \sin 13^\circ = 54,2 MVar$

$$e) P = 3 \cdot \frac{U_{p1} \cdot U_{p2}}{x_{gs}} \cdot \sin \alpha = P_k \cdot \sin \alpha = P_k \cdot 0,55$$

$$\Rightarrow \alpha = \arcsin(0,55) = 33,4^\circ$$

$$\varphi = \arccos(0,9923)$$



$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$E_{\infty} = \frac{U}{x \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$U_1 = \frac{U_2}{\frac{C_2}{C_1} + 1} = \frac{800 \text{ kV}}{1,5} = 462 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned} r_1 &= 15 \text{ mm} \\ r_m &= 50 \text{ mm} \\ r_2 &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r L \ln\left(\frac{r_m}{r_1}\right)}{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r L \ln\left(\frac{r_2}{r_m}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{50}{15}\right)}{2,3 \cdot \ln\left(\frac{100}{50}\right)} = 0,9552$$

$$U_2 = \frac{U_1}{\frac{C_2}{C_1} + 1} = \frac{462 \text{ kV}}{1,9552} = 263,2 \text{ kV}$$

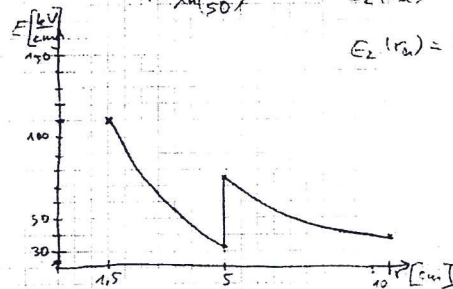
$$U_1 = U_2 = 462 \text{ kV} - 263,2 \text{ kV} = 198,8 \text{ kV}$$

$$E_1(r) = \frac{U_1}{r \cdot \ln\left(\frac{50}{15}\right)} \Rightarrow E_1(r_1) = 110 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$E_1(r_m) = 33 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$E_2(r) = \frac{U_2}{r \cdot \ln\left(\frac{100}{50}\right)} \Rightarrow E_2(r_m) = 76 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$E_2(r_2) = 38 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$



b)

$$\hat{E}_1(p, T) = \frac{P}{10 \pi \epsilon_0 L} \cdot \frac{273^\circ \text{C} + 10^\circ \text{C}}{273^\circ \text{C} + T} \cdot \hat{E}_{20}$$

$$\hat{E}_2(r_m) = \sqrt{2} \cdot 76 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} = 107,5 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$$

$$\hat{E}_{20}(r_m) = 82 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad (\text{Hilfsleistung})$$

$$\hat{E}_L(1,66 \text{ bar}, 20^\circ \text{C}) = 1,6 \cdot \hat{E}_{20} = 131,2 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} > \hat{E}_2(r_m)$$

Die elektrische Feldstärke ist kleiner als gewöhlich.

c)

$$E(r_2) = \frac{462 \text{ kV}}{2 \cdot \ln\left(\frac{r_{\text{max}}}{r_2}\right)} = 110 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad \text{mit } r_2 = 1,5 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{r_{\text{max}}}{1,5 \text{ cm}}\right) = \frac{462}{1,5 \cdot 110} = 2,8$$

$$r_{\text{max}} = 1,5 \text{ cm} \cdot e^{2,8} = 24,66 \text{ cm}$$

2. Teil: Elektromechanische Energieumformung

1. Aufgabe: Gleichstrommaschine

- 1.1 Mit welchen Maßnahmen kann die Leerlaufdrehzahl einer fremderregten Gleichstrommaschine eingestellt werden? [2 P]
- 1.2 Nennen Sie eine Ursache für Bürstenfeuer und eine mögliche Abhilfemaßnahme. [2 P]
- 1.3 Wodurch wird bei der fremderregten Gleichstrommaschine das maximale Drehmoment und wodurch die maximale Drehzahl begrenzt? [2 P]

Von einer fremderregten Gleichstrommaschine sind für den Betrieb im Nennpunkt folgende Daten bekannt:

Erregerspannung :	U_{fN}	=	200 V
Erregerstrom :	I_{fN}	=	1 A
Ankerspannung :	U_{aN}	=	200 V
Ankerstrom :	I_{aN}	=	10 A
Drehzahl :	n_N	=	2000 min ⁻¹

Der Wirkungsgrad beträgt im Nennpunkt 98,8 % (ohne Berücksichtigung der Erregerverluste). Anker- und Erregerspannung können mit Hilfe von Gleichstromstellern variabel zwischen 0 V und 200 V eingestellt werden. Sättigungserscheinungen im Eisenkreis, Reibungs- und Eisenverluste sowie Verluste durch die Wendepol- oder Kompensationswicklung werden nicht berücksichtigt.

- 1.4 Wie groß sind im Nennpunkt die aufgenommene elektrische Leistung P_{elN} (ohne Erregerleistung), die mechanische Leistung P_{mechN} und das Antriebsdrehmoment M_N ? [3 P]
- 1.5 Berechnen Sie die Rotationsinduktivität M'_f , den Ankerwiderstand R_a und den Erregerwiderstand R_f der Maschine. [3 P]
- 1.6 Welche Erregerspannung muss eingestellt werden, damit bei Nenn-Ankerspannung und Belastung mit Nenn-Ankerstrom eine Drehzahl von 3000 min⁻¹ erreicht wird? Wie groß ist die mechanische Leistung P_{mech} in diesem Betriebspunkt? [3 P]

3. Aufgabe: Vollpol-Synchronmaschine

- 3.1 Wie kann bei einer am starren Netz arbeitenden Synchronmaschine die Blindleistungsabgabe beeinflusst werden? Wie wirkt sich der übererregte Betrieb von Synchronmaschinen am starren Netz bezüglich der Blindleistung im Netz aus? [2 P]
- 3.2 Warum sollte der Dauerkurzschlussstrom bei einem Synchrongenerator deutlich größer (z. B. 3 · I_{fN}) als der Nennstrom sein? [1 P]
- 3.3 Nennen Sie mindestens zwei Einsatzbereiche bzw. Anwendungsgebiete, für die der Einsatz von Synchronmaschinen besonders vorteilhaft ist, und begründen Sie Ihre Antwort. [2 P]

Eine elektrisch erregte Vollpol-Synchronmaschine wird in Sternschaltung am 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von der Maschine sind folgende Daten bekannt:

Synchrondrehzahl:	n_0	=	600 min ⁻¹
synchrone Reaktanz:	X_d	=	10 Ω
Polradspannung je Strang:	U_{pN}	=	115 V bei Nennerregerstrom I_{fN}
Verluste können vernachlässigt werden ($R_a = 0$)			

- 3.4 Bestimmen Sie die Polpaarzahl p . [1 P]
 - 3.5 Wie groß ist der Kurzschlussstrom I_k bei Nennerregung? [1 P]
- Die Maschine wird bei Nennerregung und mechanisch unbelastet als Phasenschieber betrieben:
- 3.6 Wird die Maschine über- oder untererregt betrieben? Begründen Sie Ihre Antwort. [1 P]
 - 3.7 Wie groß ist der Strangstrom I_A ? [2 P]
 - 3.8 Um welchen Faktor muss der Erregerstrom verändert werden, damit der Strangstrom $I_A = 0$ wird? [2 P]

2. Aufgabe: Asynchronmaschine (ASM)

- 2.1 Wodurch wird bei der Asynchronmaschine der Anlaufstrom begrenzt und warum sollten Asynchronmaschinen, die am Netz anlaufen, mit trägen Sicherungen abgesichert werden? [2 P]
- 2.2 Welche Leerlaufdrehzahl besitzt eine Drehfeldmaschine mit der Polpaarzahl $p = 1$ bei einer Statorfrequenz von $f_s = 60$ Hz? Wie kann man die Drehrichtung ändern? [2 P]

Eine vierpolige Käfigläufer-Asynchronmaschine wird in Dreieckschaltung an einem 400V/50Hz-Drehstromnetz betrieben. Von dem Asynchronmotor sind für den Nennpunkt folgende Daten bekannt:

Drehzahl:	n_N	=	1320 min ⁻¹
Drehmoment:	M_N	=	200 Nm
Strangstrom:	I_{sN}	=	34,84 A

Die Drehzahl im Kippunkt beträgt $n_k = 929$ min⁻¹

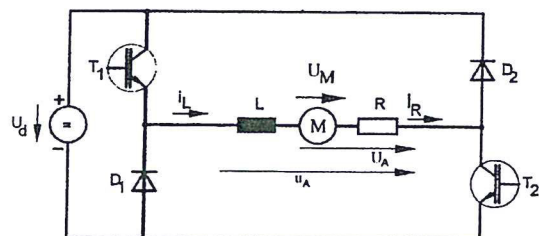
Der Statorwiderstand sowie Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste sind vernachlässigbar (vereinfachtes Ersatzschaltbild).

- 2.3 Bestimmen Sie die Leerlaufdrehzahl n_0 . [1 P]
- 2.4 Bestimmen Sie für den Nennpunkt: [6 P]
 - den Schlupf s_N
 - die mechanische Leistung P_{mechN}
 - die Luftspaltleistung $P_{\Delta N}$
 - den Leistungsfaktor $\cos \phi_N$
 - die Wirkstromkomponente I_{wN} und die Blindstromkomponente I_{bN} des Strangstromes I_{sN} .
- 2.5 Wie groß sind der Kippeschlupf s_k und das Kippmoment M_k ? [2 P]

3. Teil: Grundlagen der Leistungselektronik

Aufgabe 1: Zweiquadrantensteller

Gehen Sie von idealen Bedingungen aus (ideale Bauteile, idealer Stromübergang von einem auf das andere Ventil).



$U_d = 580$ V
 $R = 12,5$ Ω
 Motorgegenspannung $U_M = 80$ V
 Taktfrequenz $f_T = 25$ kHz
 Glättungsinduktivität $L \rightarrow \infty$

1. Annahme: Betriebszustände des 2Q-Stellers: Treiben $T_s = 25$ µs und Rückspesen T_r
 - 1.1. Berechnen Sie die Rückspesezeit T_r .
 - 1.2. Berechnen Sie die Gleichspannung U_A .
 - 1.3. Berechnen Sie den Laststrom I_A .
 - 1.4. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung u_A und kennzeichnen Sie U_A , T_s und T_r . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (1.1).

2. Annahme: Betriebszustände des 2Q-Stellers: Treiben $T_a = 25 \mu s$, Freilauf T_b

2.1. Berechnen Sie für Annahme 2 die Ausgangsspannung U_A .

2.2. Bestimmen Sie unter Verwendung der Pulsfolgesteuerung (variable Frequenz) die Schaltzeiten T_a und T_b so, dass $U_A = 140V$.

2.3. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung u_A für $U_A = 140V$ und kennzeichnen Sie U_A , T_a und T_b .

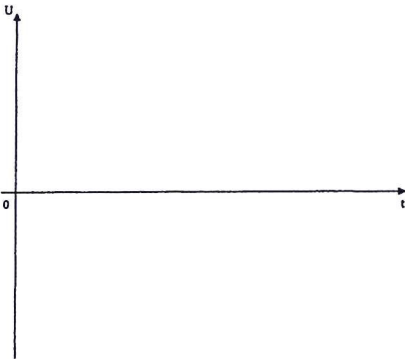
Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (1.2).

3. Annahme: Für die Induktivität L gilt nun nicht mehr $L \rightarrow \infty$

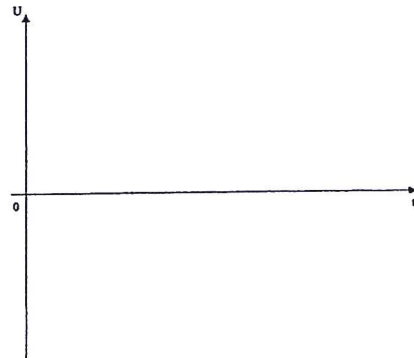
3.1. Berechnen Sie unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus 2.2. die Induktivität L so, dass der Strom i_L gerade nicht mehr lückt.

3.2. Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf des Stroms i_L . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (1.3).

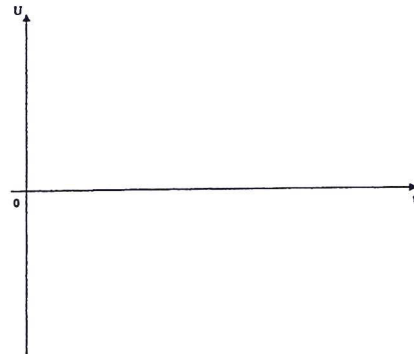
(1.1)



(1.2)

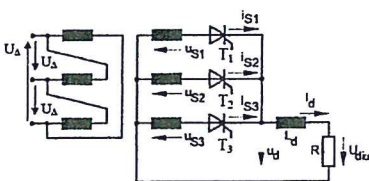


(1.3)



Aufgabe 2: M3-Schaltung

Gehen Sie von **idealen Bedingungen** aus (ideale Bauteile, idealer Stromübergang von einem auf das andere Ventil). Sämtliche Wechselgrößen sind als **Effektivwerte** gegeben.



$U_A = 400 V, 50 Hz$
 $\varnothing = N_P/N_S = \sqrt{2}$
 $R = 10 \Omega$
 Steuerwinkel $\alpha = 60^\circ$
 $L_d \rightarrow \infty$

\varnothing : Übersetzungsverhältnis des Transformators

N_P : Primärwindungszahl des Transformators je Strang

N_S : Sekundärwindungszahl des Transformators je Strang

1. Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf der Spannung u_d . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (2a).

2. Berechnen Sie Gleichspannung U_{d0} und den Gleichstrom I_d .

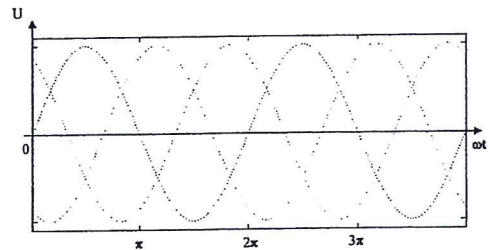
Annahme: Der Thyristor T_1 bekommt durch eine Fehlansteuerung einen Zündwinkel $\alpha_{T1} = 90^\circ$. Die Steuerwinkel für die Thyristoren T_2 und T_3 bleiben unverändert bei 60° .

3. Zeichnen Sie für diesen Fall den zeitlichen Verlauf der Spannung u_d und kennzeichnen Sie α_{T1} . Benutzen Sie das bereitgestellte Diagramm (2b).

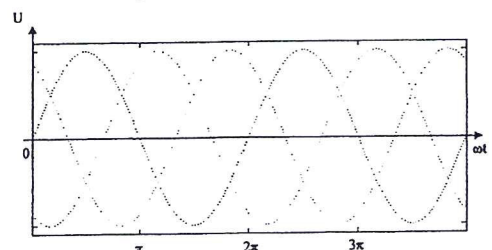
4. Berechnen Sie die neue Gleichspannung U_{d0} .

5. Zeichnen Sie die zeitlichen Verläufe der Ströme i_{S1} , i_{S2} und i_{S3} . Benutzen Sie das beigefügte Diagramm (2c).

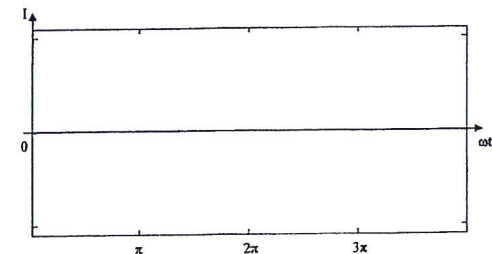
(2a)



(2b)



(2c)



Kurzfragen

(a) Skizzieren Sie die Schaltsymbole folgender Bauteile:

Diode

Zenerdiode

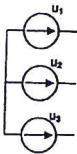
Thyristor

Bipolar Transistor

IGBT

(b) Bei welchem Steuerverfahren für einen Tiefsetzsteller ist die Einschaltdauer T_{on} variabel und die Periode T konstant (ggf. kurze Beschreibung des Verfahrens)?

(c) Zeichnen Sie eine ungesteuerte Sechspulsbrückenschaltung mit einer ohmsch-induktiven Last, die über einen Transformator am dreiphasigen Wechselstromnetz betrieben wird. Der Transformator ist primär- und sekundärseitig in Y geschaltet.



(d) Zeichnen Sie das Schaltbild für einen 4-Quadrantensteller mit ohmsch-induktiver Last und der Eingangsspannung U_d . Geben Sie für alle Betriebszustände des Freilaufes die möglichen Bauteilpaarungen an, die stromführend sind (Benennung analog ESB).

(e) Vergleichen Sie eine B2- und M2-Schaltung qualitativ miteinander. Tragen Sie nachfolgend entweder (B2) oder (M2) ein.

1. Die Sperrspannungsbeanspruchung der Ventile ist größer bei:
2. Die gesamten Halbleiterverluste sind größer bei:
3. Der Aufwand für den Transformator ist größer bei:

(f) Welche niedrigste Frequenz tritt an der Glättungsinduktivität einer ungesteuerten B6-Brücke auf, die an einem 50 Hz Netz betrieben wird?

(g) Wie verändert sich die Ausgangsleistung einer B6-Schaltung mit ohmscher Belastung, wenn die Sekundärwicklungen des Transformators, die zuvor in Y-Schaltung mit dem Dreiphasenwechselstromnetz verbunden waren, nun in Δ -Schaltung angeschlossen werden?

$$P_{\Delta} = \dots \cdot P_Y$$