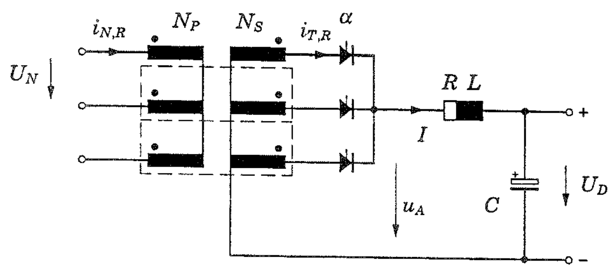
Telefon-Stromversorgung in M3-Schaltung

Gegeben ist die Schaltung einer Stromversorgung (Netzteil) für eine Telefonanlage. Dabei speist ein Drehstromtrafo (Dreischenkel-Typ) in Yy-Schaltung über eine gesteuerte M3-Schaltung mit nachgeschalteter Glättungsinduktivität L in den Stützkondensator C.



Vereinfachend seien ideale Glättung (L,C genügend groß, sodaß I und U_D rippelfrei sind) sowie ein idealer Trafo vorausgesetzt.

Netzspannung:	$U_N = 400V_{RMS}$ (Außenleiterspannung)
Laststrom:	$I = 100A$
Glättungsdrossel:	$R = 75m\Omega$ (ohmscher Anteil, Wicklungswiderstand)
Thyristor:	$U_{T0} = 1V$ (Schwellspannung), $r_D = 10m\Omega$ (dyn. Widerstand)
Trafoübersetzung:	$N_P = 2\ N_S$ (Wicklungsverhältnis $N_P / N_S = 2$)
Steuerwinkel:	$\alpha = 60°$

a) Zeichnen Sie den Zeitverlauf der Stromrichter-Ausgangsspannung u_A über mindestens eine volle Netzperiode und berechnen Sie weiters den Wert der Ausgangs-Gleichspannung U_D.
Anmerkung: Die Thyristoren können dazu als ideale Schalter betrachtet werden.

8% + 7%

b) Berechnen Sie Mittelwert $I_{T,AVG}$ und Effektivwert $I_{T,RMS}$ der Thyristorströme und ermitteln Sie die gesamten Verluste P_V der Schaltung sowie den Wirkungsgrad η.

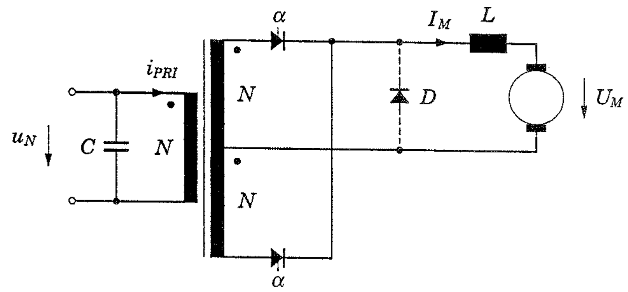
4 x 4%

c) Bestimmen Sie den totalen Leistungsfaktor $\lambda = P_N / S_N$ sowie den Grundschwingungs-Verschiebungsfaktor $\cos\varphi_1$ am Netzanschluß.

8% + 7%

2. Stromrichter in M2F- bzw. M2-Schaltung für einen Wickelantrieb

Gegeben ist die Schaltung eines zweipulsigen netzgeführten Stromrichter mit (bzw. ohne) Freilaufdiode D welcher die Gleichstrommaschine eines Wickelantriebes (konstanter Laststrom I_M als Folge eines geforderten konstanten Drehmomentes) speist:



Vereinfachend seien ideale Glättung (L genügend groß, sodaß I_M rippelfrei ist) sowie ein idealer Trafo mit Übersetzungsverhältnis 1:1 vorausgesetzt.

Netzspannung:	$U_N = 230V_{RMS}$
Laststrom:	$I_M = 15A$

a) Berechnen Sie die Motorspannung U_M für einen Steuerwinkel von $\alpha = 90°$ für die Schaltungsvariante mit Freilaufdiode D.

14%

b) Bestimmen sie anschließend den Steuerwinkel α' den man einstellen müßte, um die gleiche Motorspannung wie unter a) zu erhalten, die Schaltung aber keine Freilaufdiode hat.

Zeichnen Sie weiters den Zeitverlauf des Trafo-Primärstromes i_{PRI} für beide Fälle (d.h., mit und ohne D) in Relation zur Netzspannung u_N (mind. eine Netzperiode).

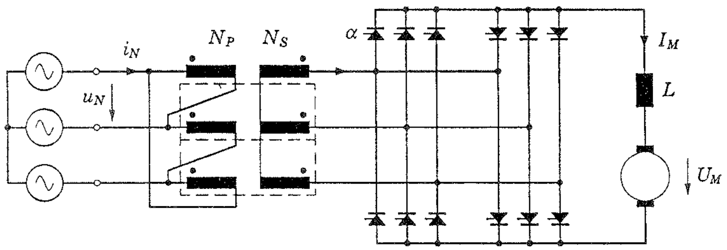
10% + 10%

c) Berechnen Sie den Wert des netzseitigen Kompensationskondensators C bzw. C' (ohne D) wenn dieser jeweils so dimensioniert wird, daß er die im gesamten Steuerbereich (0°...180°) maximal auftretende Grundschwingungs-Steuerblindleistung Q_1 vollständig kompensiert (Hinweis: Kreisdiagramm).

8% + 8%

3. Umkehrstromrichter für 4Q-Gleichstromantrieb

Ein kreisstromfreier Umkehrstromrichter bestehend aus einer Gegenparallelschaltung von zwei B6-Brücken speist einen 4Q-Gleichstromantrieb. Zur Spannungsanpassung (bzw. auch zur Realisierung der Kommutierungsinduktivitäten) erfolgt der Anschluß an das Drehstromnetz über einen Stromrichtertrafo in Dy-Schaltung.



Vereinfachend ist eine gute Glättung (L genügend groß), für die Teilaufgaben a) und b) sogar ideale Glättung (d.h., I_M ist völlig rippelfrei) vorausgesetzt. Weiters kann der Stromrichtertrafo als ideal (streufrei) betrachtet werden.

Netzspannung:	$U_N = 400V_{RMS}$ ±20% (Außenleiterspannung)
Motorstrom:	$I_M = \pm 300A$
Motorspannung:	$U_M = \pm 250V$

a) Dimensionieren Sie das Windungs-Übertragungsverhältnis $\ddot{u} = N_P / N_S$ des Trafos so, daß einerseits am Netz eine möglichst geringe Grundschwingungs-Steuerblindleistung auftritt, andererseits aber die Wechselrichtertrittgrenze (verbotene Zone $\gamma_T = 20°$) auch im ungünstigsten Fall nicht verletzt wird.

15%

b) Zeichnen Sie den Zeitverlauf der Netzströme i_N (eine Phase genügt) und berechnen Sie den zugehörigen Effektivwert I_N, den Grundschwingungs-Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ sowie den totalen Leistungsfaktor $\lambda = P_N / S_N$ am Netzanschluß für den Nennpunkt ($U_N = 400V$, $I_M = 300A$, $U_M = 250V$).

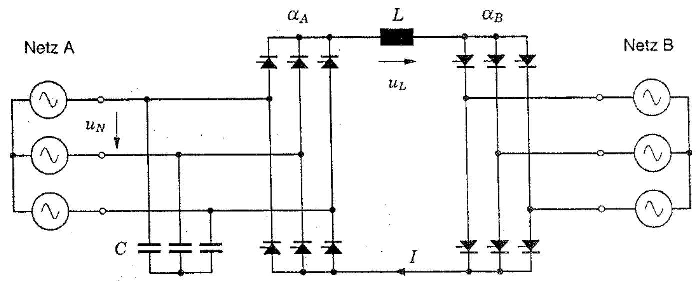
4 x 5%

c) Dimensionieren Sie den Wert der Glättungsinduktivität L so, daß im ungünstigsten Fall des Steuerbereiches (0°...160°) der Rippel ΔI des Motorstromes gerade den Wert $\Delta I = 30A$ erreicht. Diese Berechnung kann näherungsweise erfolgen (lineare Approximation der Spannung an L).

15%

4. Gleichstrom-Kurzkupplung / HGÜ

Gegeben ist das (stark vereinfachte) Schaltbild einer Gleichstrom-Kurzkupplung welche zwei Energieversorgungsnetze (A/B) miteinander verbindet. Durch entsprechende Steuerung der beiden netzgeführten B6-Schaltungen kann ein definierter Energiefluß zwischen A und B realisiert werden.



Vereinfachend ist eine gute Glättung (L genügend groß), für die Teilaufgaben a) und b) sogar ideale Glättung (d.h., I ist völlig rippelfrei) vorausgesetzt. Zusätzlich kann vorausgesetzt werden, daß beide Netze spannungs-, frequenz- und phasengleich sind (Netzfrequenz $f_N = 50Hz$)!

Netzspannung:	$U_N = 380kV_{RMS}$ (Außenleiterspannung beider Netze)
Leistung:	$P_N = 300MW$ (Leistungsfluß von A nach B)
max. Steuerwinkel:	$\alpha_{max} = 150°$ (maximaler Steuerwinkel einer Stromrichtergruppe)

a) Berechnen Sie den Strom I im Zwischenkreis für minimale Steuerblindleistung. 15%

b) Berechnen Sie den Wert der Kompensationskondensatoren C, sodaß für Netz A $\cos \varphi_1 = 1$ gilt und berechnen Sie weiters den Grundschwingungs-Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ sowie den totalen Leistungsfaktor $\lambda = P_N / S_N$ für das Netz B.

3 x 5%

c) Zeichnen Sie den Zeitverlauf der Spannung uL an der Zwischenkreisinduktivität und skizzieren Sie den ihr auftretenden Stromrippel.

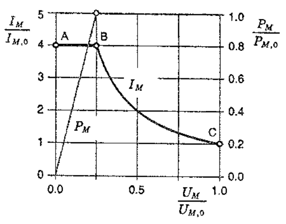
2 x 10%

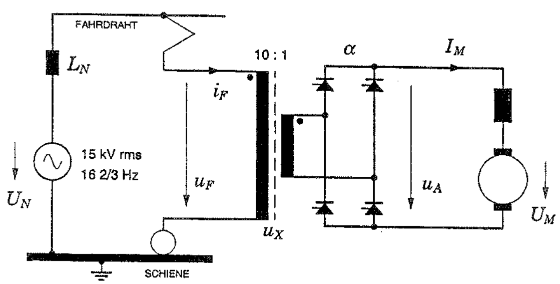
5. Elektrolokomotive

Gegeben ist das vereinfachte*) Schaltbild des Traktionsteiles einer kleineren E-Lok.
Aus dem 15kV/16 $^2/_3$ Hz-Einphasennetz (Fahrdraht) wird dabei über einen Anpaß- (Traktions-) Trafo (Spannungsübersetzungsverhältnis 10:1) ein vollgesteuerter B2-Stromrichter versorgt, an dessen Gleichspannungsseite die Fahrmotoren (Gleichstrom-Kommutatormaschinen) angeschlossen sind.

Aus dem geforderten Zugkraftdiagramm ergibt sich eine Betriebskennlinie mit einer Traktionsleistung von $P_{M,0}$ = konst. = 2000kW ab 25% der maximalen Ausgangsspannung (maximaler Strom in Bereich A-B, größtmögliche Leistung im Bereich B-C).

Bei Nennleistung $P_{M,0}$ und maximaler Ausgangsspannung $U_M = U_{M,0}$ (Betriebspunkt C, $\alpha = 0°$) wurde eine Kommutierungsüberlappung von $u_0 = 15°$ gemessen.





Vereinfachungen: Ideale Glättung, idealer Trafo (bis auf u_X), ideales Netz (bis auf L_N).

a) Zeichnen Sie für den Betriebspunkt C den Zeitverlauf der Stromrichterausgangsspannung u_A und des Fahrdrahtstromes i_F und berechnen Sie Motorspannung U_M und Motorstrom I_M.

5+5+3+2 = 15%

b) Berechnen Sie – unter Annahme von S_K = 200MVA für die Kurzschlußleistung des Netzes am Stromabnehmer – die bezogene Kurzschlußspannung u_X des Traktions-Trafos. Für den Trafo-Nennstrom ist dabei die Grundschwingung im Betriebspunkt A heranzuziehen.

15%

c) Skizzieren Sie den Zeitverlauf von Fahrdrahtspannung u_F und Fahrdrahtstrom i_F beim Anfahren der Lokomotive. Berechnen Sie den zugehörigen Kommutierungsspannungseinbruch Δu_F sowie die Dauer der Kommutierung (in °).

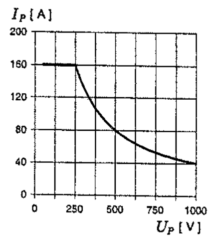
4 x 5 = 20%

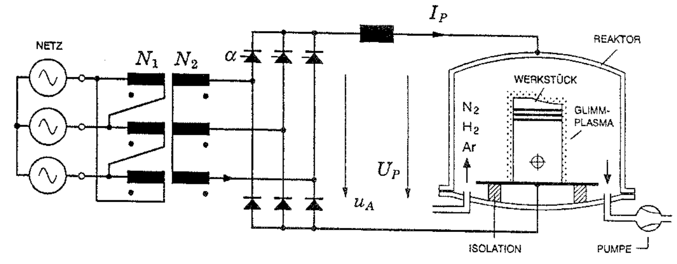
*) Anmerkung: Zur Verringerung der Netzbelastung sind Lokomotiven mit stromrichtergespeisten Kommutatormotoren (z.b. ÖBB 1044) üblicherweise mit halbgesteuerten Schaltungen und/oder Folgesteuerungen ausgerüstet.

6. Plasma-Beschichtungsanlage

Gegeben ist eine halbgesteuerte B6-Schaltung mit einem Dy-Trafo zur Speisung einer Plasma-Oberflächenbeschichtungsanlage (CVD-Anlage). Das zu beschichtende Werkstück befindet sich dabei in einem mit Prozessgas gefüllten Reaktor und dient als Kathode während die Anode durch den Reaktorkessel selbst gebildet wird. Durch Einprägung des Gleichstromes I_P entsteht an der Werkstück-Oberfläche ein Glimmplasma das ein Eindiffundieren des Prozessgases in die Oberfläche bewirkt (z.B. zur Titan-Nitrid-Beschichtung von Werkzeugen).

Im Bereich von U_P = 250V... 1000V soll das Stromversorgungsgerät eine Leistung P_P = 40kW abgeben können, im Intervall U_P = 50V (Mindestspannung) bis 250V ist ein maximaler Strom von I_P = 160A gefordert (siehe Kennlinie).





Netzspannung: $U_N = 400V_{RMS}$ (Außenleiterspannung), 50Hz

Vereinfachungen: Ideale Glättung, idealer Trafo (auch streufrei, außer bei Punkt c)), ideales Netz.

a) Dimensionieren Sie das Windungsübersetzungsverhältnis $ü = N_2 / N_1$ des Trafos unter Berücksichtigung eines möglichst guten Netzverhaltens (minimale Blindleistung). Berechnen Sie weiters, wie groß die Schonzeit t_C der Thyristoren im gesamten Betriebsbereich U_P = 50...1000V mindesten ist.

9 + 9 = 18%

b) Zeichnen Sie den Zeitverlauf i_{SEK} der Trafo-Sekundärströme und berechnen Sie deren Effektivwert $I_{SEK,RMS} = f(u)$ im gesamten Betriebsbereich als Funktion der relativen Ausgangsspannung u = 5% ... 100%.
Bestimmen Sie weiters den maximal auftretenden Wert von $I_{S,RMS}$ und geben Sie an, auf welche Scheinleistung $S = 3 \cdot U_{S,RMS} \cdot I_{SEK,RMS,max}$ der Trafo dimensioniert sein muß.

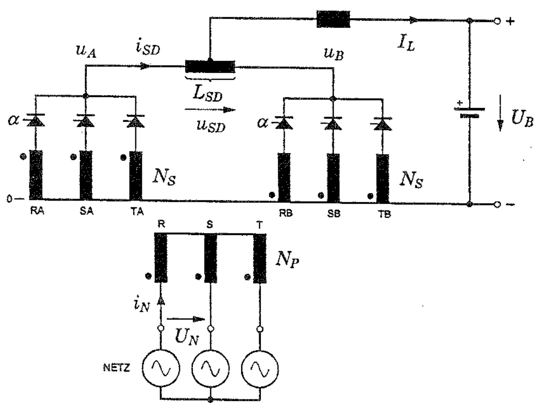
3 x 5 = 15%

c) Zeichnen Sie den Zeitverlauf der Stromrichter-Ausgangsspannung u_A für einen Steuerwinkel von $\alpha = 30°$ unter qualitativer Berücksichtigung des Dällenbachabfalles.

2 x 10%

7. Telefonstromversorgung mit Saugdrosselschaltung

Die 60kW-Stromversorgung für ein größeres Wählamt ist zur Minimierung der Durchlaßverluste der Thyristoren (nur ein Ventil im Strompfad) als 6-pulsige Saugdrosselschaltung ausgeführt. Zwei parallele phasenversetzte M3-Stufen A/B speisen dabei auf die Batterieanlage, welche alle Telefonsysteme auch bei Netzausfall versorgt (Pufferbetrieb):



Netzspannung:	$U_N = 400V_{RMS}$ (Nennwert)
Ladestrom:	$I_L = 1000A$
Batteriespannung:	$U_B = 60V$ (konstant)
Übersetzungsverhältnis:	$ü = N_P / N_S = 4$
Saugdrossel:	$L_{SD} = 500\mu H$

Vereinfachungen: Ideale Glättung, idealer Trafo (streufrei), ideales Netz.

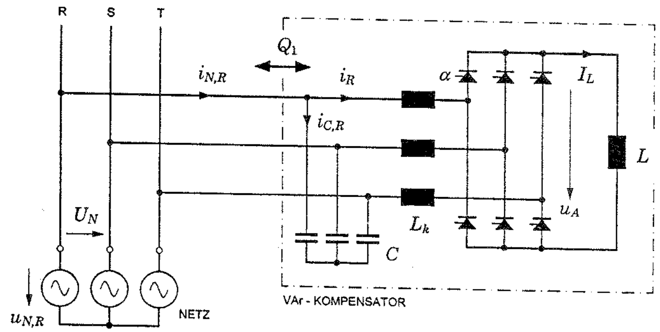
a) Berechnen Sie, wie groß die Netzspannung U_N mindestens sein muß (Effektivwert der Außenleiterspannung) damit die Batterie stets geladen werden kann.
Berechnen Sie weiters den totalen Leistungsfaktor $\lambda = P_N / S_N$ am Netzanschluß wenn die Netzspannung im Bereich von 360...440V schwankt (Tabelle und/oder Diagramm).
Der durch die Saugdrossel bedingte Rippel ist dabei zu vernachlässigen!
10 + 10 =20%

b) Zeichnen Sie für einen Steuerwinkel von $\alpha = 30°$ den Zeitverlauf der Spannung u_{SD} (Saugdrosselspannung) und berechnen Sie deren Spitzenwert $u_{SD,pk}$.
10 + 5 = 15%

c) Skizzieren Sie ebenfalls für den Wert von $\alpha = 30°$ den Zeitverlauf des Stromes i_{SD} (Saugdrosselstrom) und bestimmen Sie daraus, wie groß der Laststrom I_L mindestens sein muß, damit 6-pulsiger Saugdrosselbetrieb herrscht.
Die Integration kann dabei näherungsweise erfolgen.
8 + 7 = 15%

8. VAr-Kompensator

Eine vollgesteuerte B6-Schaltung ohne Lastwiderstand (nur Glättungsinduktivität) wird in Verbindung mit drei Kondensatoren in Sternschaltung als Blindleistungskompensator verwendet. Mit diesem System soll an das Netz zur Kompensation diverser Lasten eine variable Grundschwingungs-Blindleistung von Q_1 = 20kVAr kap. ... 20kVAr ind. abgegeben werden können



Netzspannung:	$U_N = 400V_{RMS}$ (50Hz)
Kommutierungsind.:	$L_k = 2mH$

Vereinfachungen: Ideale Glättung, Vernachlässigung von L_k für Teilaufgabe a) und b)!

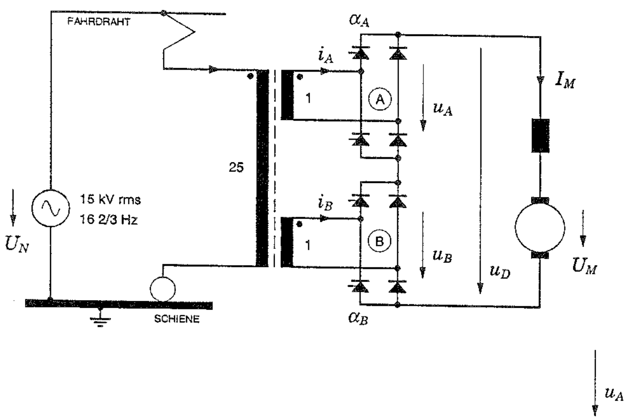
a) Berechnen Sie den Kapazitätswert der Kondensatoren C sowie den maximalen Strom $I_{L,max}$ der im angegebenen Q_I-Bereich in der Glättungsinduktivität L auftritt.
8 + 9 = 17%

b) Skizzieren Sie den Zeitverlauf des Kompensator-Eingangsstromes $i_{N,R}$ für die drei Fälle: • Q_1 = 20kVAr kap., • $Q_1 = 0$, • Q_1 = 20kVAr ind. und tragen Sie in dieses Diagramm auch die zugehörige Netzspannung $u_{N,R}$ ein.
3 x 5 +2 = 17%

c) Berechnen Sie unter Berücksichtigung von $L_k = 2mH$ und $I_L = 50A$ den einzustellenden Steuerwinkel α und bestimmen Sie die für diesen Fall auch die Kommutierungszeit bzw. Überlappungsdauer t_u.
8 + 8 = 16%

9. E-Lok mit Folgesteuerung

Gegeben ist das vereinfachte Schaltbild des Traktionsteiles der ÖBB-Lok 1044.
Der Stromrichter ist als Folgesteuerung von zwei halbgesteuerten B2-Schaltungen ausgeführt.
Bis zur halben maximalen Motorspannung ist ausschließlich die Stromrichter-Gruppe A in Betrieb, ab beide Gruppen (A ist dabei vollgesteuert).



Vereinfachungen: Ideale Glättung, idealer Trafo, ideales Netz, keine Berücksichtigung der Freiwerdezeit.

Normierung: $u = U_M / U_{M,max}$ (Motorspannung bezogen auf maximal möglichen Wert)

a) Zeichnen Sie für eine Motorspannung von $U_M = 810V$ den Zeitverlauf der Stromrichterausgangsspannung u_D sowie der beiden Trafoströme i_A und i_B.

3 x 5 = 15%

b) Berechnen Sie unter Annahme eines Motorstromes von $I_M = 2000A$ den Maximalwert $Q_{I,max}$ der Steuerblindleistung am Netz im gesamten Steuerbereich $u = 0...1$ und skizzieren Sie das zugehörige Q_I-P-Diagramm.

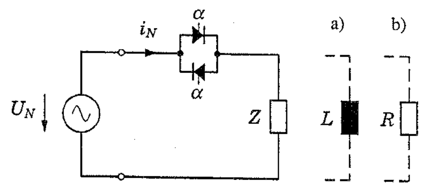
15%

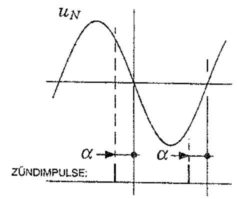
c) Berechnen und zeichnen Sie den totalen Leistungsfaktor λ am Netz im gesamten Steuerbereich $u = 0...1$.

20%

10. Wechselstromsteller

Gegeben ist ein Wechselstromsteller gebildet aus einer Gegen-Parallelschaltung von zwei Thyristoren welcher eine induktive (Teilaufgabe a)) bzw. ohmsche (Teilausgabe b)) Last speist:





Netzspannung: $U_N = 230V_{RMS}$ (50Hz)

Lastinduktivität: $L = 15mH$

Anmerkung: Es ist die in der Abbildung rechts oben angegebene Bezugsweise des Steuerwinkels α (d.h., dem Nulldurchgang voreilend) zu verwenden!

a) Zeichnen Sie für rein *induktive* Last ($Z = \omega L$) den Zeitverlauf des Netzstromes i_N inklusive der zugehörigen Netzspannung u_N.
Berechnen Sie weiters für einen Steuerwinkel von $\alpha = 60°$ die Spitzenströme $i_{T,max}$ in den Thyristoren und ermitteln Sie den Grundschwingungs-verschiebungsfaktor $\cos\varphi_1$.

10 + 10 + 5 = 25%

b) Berechnen Sie für rein *ohmsche* Last ($Z = R$) den totalen Leistungsfaktor am Netz als Funktion des Steuerwinkels α sowie zusätzlich auch in Abhängigkeit der normierten Leistung $p = P / P_{max}$ (P_{max} ... größtmögliche Leistung in R).
Zu bestimmen sind also die beiden Funktionen $\lambda = f(\alpha)$ und $\lambda = f(p)$ welche für den relevanten Steuerbereich auch graphisch auszuwerten sind.

13 + 12 = 25%

11. Gleichstromsteller – Resonanter Tiefsetzsteller (Zero-Current Switch)

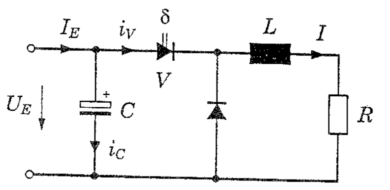
Gegeben ist ein Gleichstromsteller (Tiefsetzsteller) welcher eine RL-Last speist (ideale Glättung!).

Eingangsspannung:	$U = 300\text{V}$
Lastwiderstand:	$R = 10\Omega$

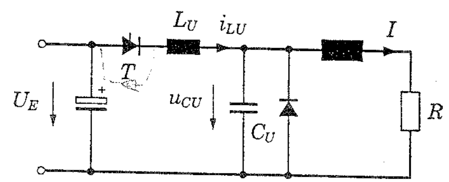
a) Berechnen Sie für den idealisierten Steller (abschaltbares Ventil V) die größte Belastung des Eingangskondensators C (Effektivwert $I_{C,\text{MAX}}$) sowie das zugehörige Tastverhältnis δ_{MAX} , bei dem dieser maximale Stromwert auftritt (Definition: $\delta = T_{\text{ON}}/T_{\text{PER}} = 0...1$).

Anmerkung: Eingangsspannung U_E , Eingangsstrom I_E und Laststrom I können als rippelfrei vorausgesetzt werden.

13 + 12 = 25%



b) Nehmen Sie nun an, daß die idealisierte Schaltung aus a) als resonanter Tiefsetzsteller realisiert ist (normaler Thyristor T anstelle des abschaltbaren Ventils V, hinzufügen von Umschwingdrossel $L_U = 100\mu\text{H}$ und Umschwingkondensator $C_U = 1\mu\text{F}$):

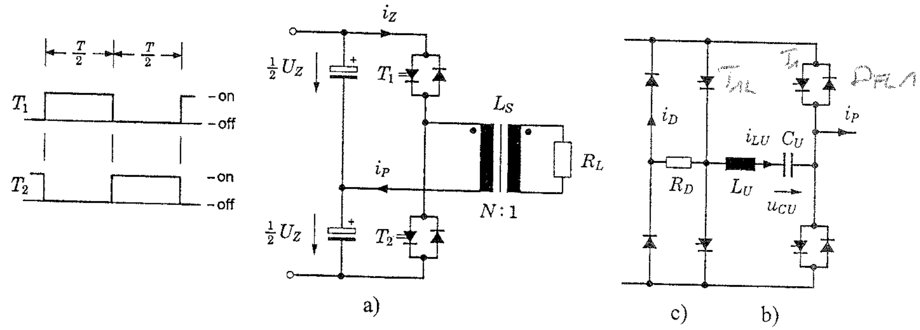


Zeichnen Sie unter Annahme eines konstanten Laststromes von $I = 15\text{A}$ das vollständige u_{CU}-Zi_{LU}-Diagramm des Umschwingkreises für den stationären Betrieb.
Berechnen Sie den im Thyristor T auftretenden Spitzenstrom $i_{T,\text{MAX}}$ sowie die Schonzeit t_C.
Berechnen Sie weiters die Schonzeit t'_C wenn zu T eine Diode in Rückwärtsrichtung parallelgeschaltet wird.

10 + 5 + 5 + 5 = 25%

12. Punktschweißgerät – Einphasiger Wechselrichter nach McMURRAY

Gegeben ist das Schaltbild eines Punktschweißgerätes. Die extrem niederohmige Last R_L wird dabei über einen Transformator mit Übersetzungsverhältnis N an einen einphasigen Brückenzweig bestehend aus zwei abschaltbaren Ventilen T_1, T_2 angekoppelt.



$\gamma = 2\cdot\arccos\left(\frac{Z\cdot i_P}{U_Z}\right)$

Eingangsspannung:	$U_Z = 600\text{V}$
Lastwiderstand:	$R_L = 1\text{m}\Omega$
Trafostreuung:	$L_S = 5\text{mH}$ (Trafo ideal bis auf Streuung!)
Übersetzungsverhältnis:	$N = 100:1$
Arbeitsfrequenz:	$f = 1/T = 1\text{kHz}$

a) Skizzieren Sie den Zeitverlauf des Zwischenkreisstromes i_Z für den stationären Zustand.

15%

b) Die zunächst (unter a)) abschaltbar angenommenen Ventile T_1, T_2 werden nun durch eine selbstgeführte Schaltung nach McMURRAY realisiert:

Zeichnen Sie das vollständige u_{CU}-$Z\, i_{LU}$-Diagramm der Löschschaltung für den stationären Fall (der Abbau der durch die Kommutierung entstehenden Spannungsüberhöhung erfolgt durch einen aus einem Dämpferwiderstand R_D und zwei Dioden bestehenden Dämpferkreis – dieser Vorgang ist im Diagramm nur skizzenhaft einzutragen!).

Dimensionieren sie weiters L_U und C_U des Löschkreises so, daß der Maximalwert des Stromes im Löschthyristor 30A beträgt und sich eine Schonzeit des Hauptthyristors von 40µs ergibt.

15 + 5 + 5 = 25%

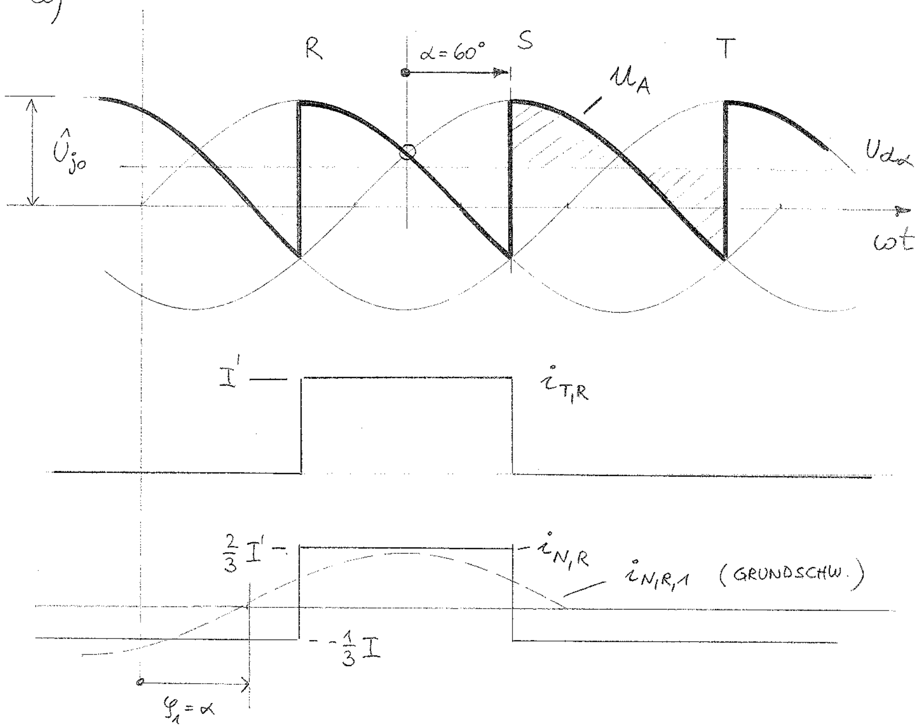
c) Dimensionieren Sie den Wert des Dämpferwiderstandes so, daß der Abbau der Kommutierungs-Überspannung schnellstmöglich aperiodisch erfolgt (reeller Doppelpol!). Berechnen Sie weiters den Mittelwert I_D des Stromes durch jede der beiden Dämpferdioden.

5 + 5 = 10%

Hinweis: Vereinfachend kann für b) und c) vorausgesetzt werden, daß der zu kommutierende Strom ±15A ist!

BEISPIEL 1 : TELEFON-STROMVERSORGUNG IN M3

a)



ALLG: $\quad U_{d\alpha} = U_{do} \cdot \cos\alpha \quad$ MIT $\quad U_{do} = \hat{U}_{jo} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \sin\frac{\pi}{P}$

(P-PULSIGE MITTELP. SCH.)

HIER: $P = 3$

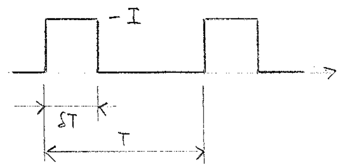
$$U_{do} = \hat{U}_{jo} \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 163{,}3 \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 135V$$

$$\hat{U}_{jo} = \frac{U_N \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_S}{N_P} = \frac{400 \cdot \sqrt{2} \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 2} = 163{,}3V$$

$$U_{d\alpha} = U_{do} \cdot \cos\alpha = 135 \cdot \cos 60° = \underline{67{,}5V}$$

AUSGANGS-GEICHSP: $\quad U_D = U_{d\alpha} - I \cdot R = 67{,}5V - \overbrace{100A \cdot 75m\Omega}^{7{,}5V} = \underline{\underline{60V}}$

b)



P-PULSIGE MP-SCHALTG:

$$\delta = \frac{1}{P}$$

GENERELL: $\quad I_{AVG} = I \cdot \delta \qquad I_{RMS} = I \cdot \sqrt{\delta}$

HIER: $\quad \underline{I_{T,AVG}} = \frac{I}{3} = \frac{100A}{3} = \underline{33{,}3A} \qquad \underline{I_{T,RMS}} = \frac{100A}{\sqrt{3}} = \underline{57{,}7A}$

THYRISTOR-LEITVERLUSTE:

$$P_L = U_{TO} \cdot I_{T,AVG} + r_D \cdot I_{T,RMS}^2 = 1V \cdot 33{,}3A + 10m\Omega \cdot (57{,}7A)^2 = 66{,}7W$$

$$\underline{P_V} = 3 \cdot P_L + I^2 \cdot R = \underbrace{3 \cdot 66{,}7W}_{200W} + \underbrace{(100A)^2 \cdot 75m\Omega}_{750W} = \underline{950W} \text{ GESAMT-VERLUSTE}$$

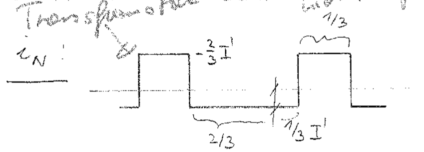
WIRKUNGSGRAD:

$$\underline{\eta} = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_V} = \frac{\overbrace{60V \cdot 100A}^{6KW}}{6KW + 950W} = \underline{86{,}3\%}$$

c) $\quad \lambda = \frac{P_N}{S_N} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot \underbrace{U_N}_{\Delta\text{ Spannung}} \cdot I_{N,RMS}}$

$$\underline{\lambda} = \frac{6950W}{\underbrace{\sqrt{3} \cdot 400V \cdot 23{,}6A}_{16330VA}} = \underline{0{,}426}$$

Transformator kann Gleichstrom nicht transformieren



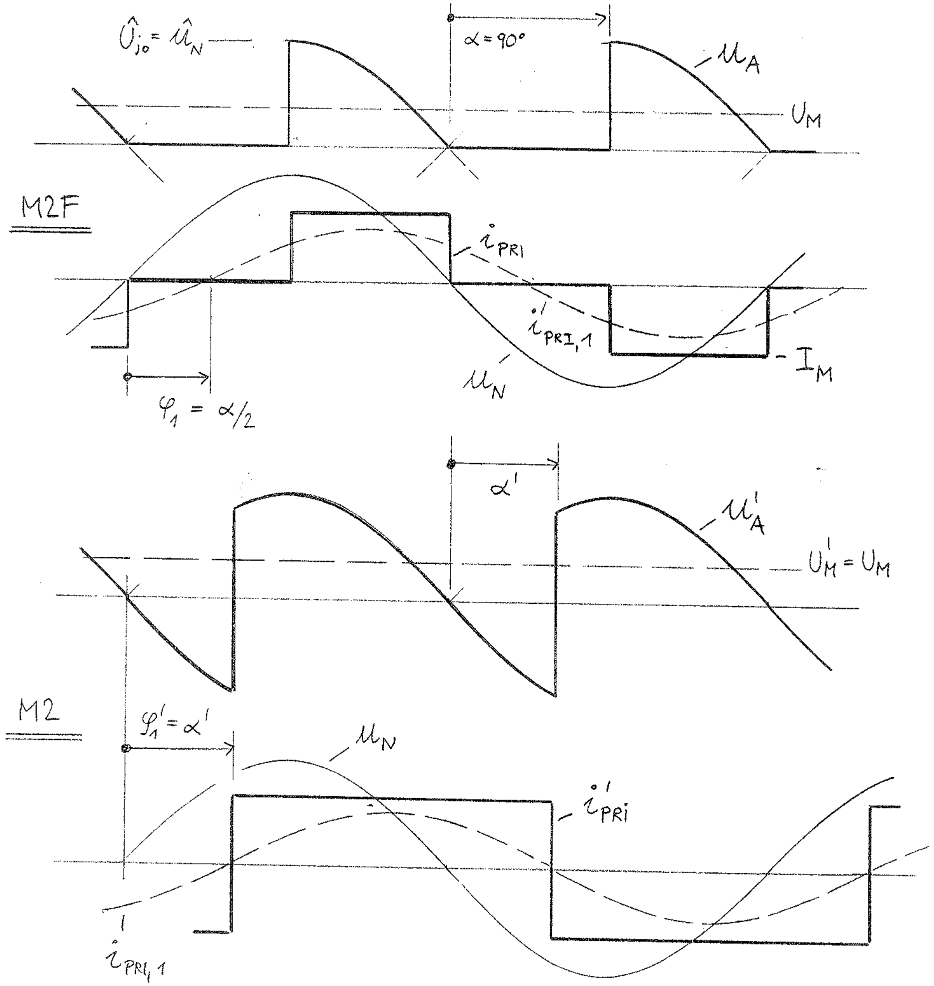
$$I_{N,RMS}^2 = \underbrace{\left\{ \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{2}{3} \right\}}_{\frac{4}{27} + \frac{2}{27} = \frac{6}{27} = \frac{2}{9}} \cdot I'^2$$

$$\underline{I_{N,RMS}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I}{ü} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100A}{3 \cdot 2} = \underline{23{,}6A}$$

$$\varphi_1 = \alpha$$

$$\underline{\cos\varphi_1} = \cos\alpha = \cos 60° = \underline{0{,}5}$$

BEISPIEL 2 : M2F- / M2-SCHALTUNG (W_ELANTRIEB)



a)

$$U_M = \overline{u_A} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \hat{U}_{j0} \cdot \sin\omega t \, d\omega t = \underbrace{\frac{2}{\pi}\cdot\hat{U}_{j0}}_{U_{d0}} \cdot \underbrace{\frac{1+\cos\alpha}{2}}_{\frac{1}{2} \text{ für } \alpha = 90°}$$

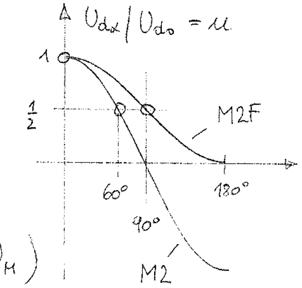
$$U_{d0} = \frac{2}{\pi}\cdot\underbrace{\hat{U}_{j0}}_{=\hat{U}_N \ (\ddot{u}=1)} = \frac{2}{\pi}\cdot 230V \cdot \sqrt{2} = 207V$$

$$\underline{\underline{U_M}} = \frac{207V}{2} = \underline{\underline{103{,}5V}}$$

b)

M2F : $U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \frac{1+\cos\alpha}{2}$

M2 : $U'_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos\alpha'$

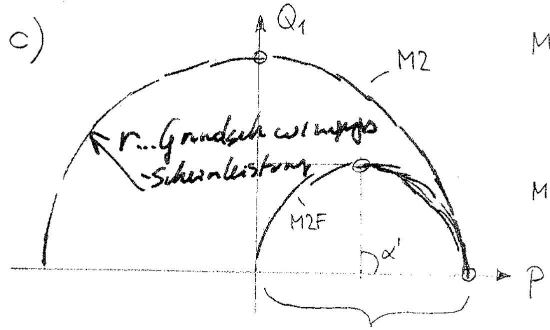


FÜR $U_{d\alpha} = U_{d\alpha'}$ (GLEICHES U_M)

$\alpha = 90°$ $\quad u = \frac{1}{2}$

$\underline{\underline{\alpha'}} = \arccos\frac{1}{2} = \underline{\underline{60°}}$

c)



M2: $Q'_{1,MAX} = S_1$ @ $u = 0$

$\underline{\underline{Q'_{1,MAX} = 3105\,VAr}}$

M2F: $Q_{1,MAX} = \frac{1}{2} S_1$ @ $u = \frac{1}{2}$

$\underline{\underline{Q_{1,MAX} = 3105/2 = 1553\,VAr}}$

$S_1 = U_{d0} \cdot I_M = 207V \cdot 15A = 3105VA$

KOMPENSATION :

$$Q_1 = Q_C = \frac{U_N^2}{X_C} = \omega C \cdot U_N^2$$

M2 : $\underline{\underline{C'}} = \frac{3105\,VAr}{\omega \cdot U_N^2} = \frac{3105\,VAr}{314\,s^{-1}\cdot(230V)^2} = \underline{\underline{186{,}8\,\mu F}}$

$I_{N,rms}$: Netzstrom effektivwert

M2F: $\underline{\underline{C}} = C'/2 = \underline{\underline{93{,}4\,\mu F}}$

λ)

$\lambda = \frac{P}{S}$ $\quad P = 103{,}5V \cdot 15A = 1553W$ $\quad S = U_N \cdot I_N$

M2 : $I_N = I_M = 15A$

M2F : $I_N = I_M \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}} = 10{,}6A$

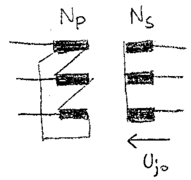
M2: $\lambda' = \frac{1553W}{230V \cdot 15A} = 0{,}45$ $\quad \overset{60°}{\downarrow} \cos\varphi_1 = 0{,}5$

M2F: $\lambda = \frac{1553W}{230V \cdot 10{,}6A} = 0{,}64$ $\quad \overset{45°}{\downarrow} \cos\varphi_1 = 0{,}7$

OHNE C !

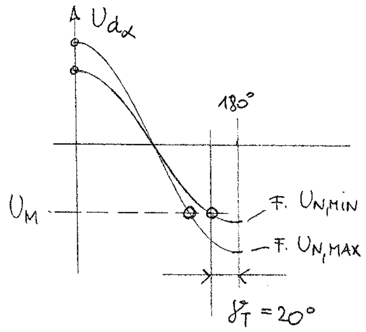
BEISPIEL 3: UMKEHRSTROMRICHTER (4Q-DC-ANTRIEB)

a)



B6: $U_{d0} = \underbrace{\hat{U}_{j0}}_{\frac{U_N}{\ddot{u}}\cdot\sqrt{2}} \cdot \underbrace{2 \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}}_{M3} = \frac{U_N}{\ddot{u}} \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi}$ (A)

$\ddot{u} = N_P / N_S$



WORST CASE: $U_N = U_{N,MIN} = 320V$

$U_M = -250V$

$\ddot{u}$ SO WÄHLEN, DASS BEI $U_{N,MIN}$ UND $\alpha = \pi - \delta_T$ $U_M = -250V$ GERADE NOCH ERREICHT WIRD (ERGIBT MINIMALES Q_1 AM NETZ).

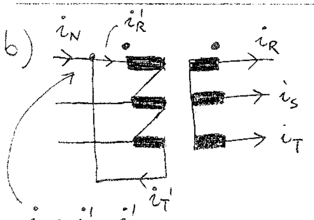
$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos\alpha$

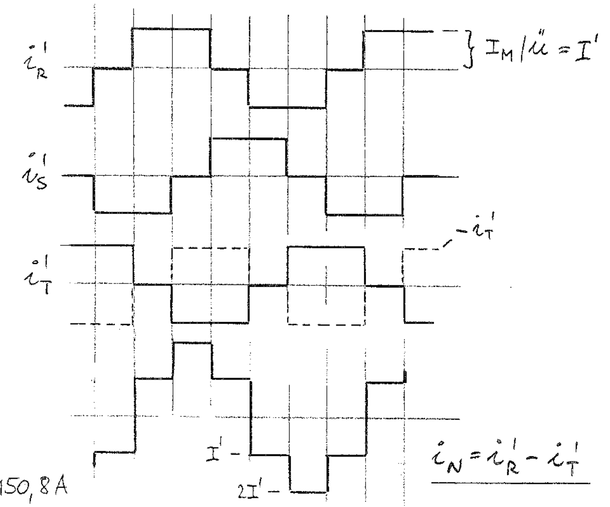
AUS (A): $-250V = \frac{320V}{\ddot{u}} \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \cos 160° \longrightarrow \underline{\ddot{u} = 2{,}813}$

NENNPUNKT: $U_N = 400V$ $U_{j0} = 400/2{,}813 = 142V$ $\hat{U}_{j0} = 201V$

$U_{d0} = \frac{400V}{2{,}813} \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi} = 332{,}6V$ $\underline{\alpha} = \arccos \frac{250V}{332{,}6V} = \underline{41{,}3°}$

b)





$\underline{i_N = i_R' - i_T'}$

NETZSTROM-EFFEKTIVWERT:

$I_{N,RMS} = \frac{I_M}{\ddot{u}} \cdot \sqrt{\underbrace{2^2 \cdot \frac{1}{3} + 1^2 \cdot \frac{2}{3}}_{\frac{6}{3} = 2}}$

$\underline{I_{N,RMS}} = \frac{I_M}{\ddot{u}} \cdot \sqrt{2} = \frac{300A}{2{,}813} \cdot \sqrt{2} = \underline{150{,}8A}$

VOLLGESTEUERTE SCHALTUNG:

(NENNPUNKT: $\alpha = 41{,}3°$)

$\varphi_1 = \alpha$

$\underline{\cos\varphi_1} = \cos\alpha = \cos 41{,}3° = \underline{0{,}75}$

TOT. LEISTUNGSFAKTOR: $\lambda = P_N / S_N$

$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{N,RMS}$
$= \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 150{,}8A = 104{,}5$ KVA

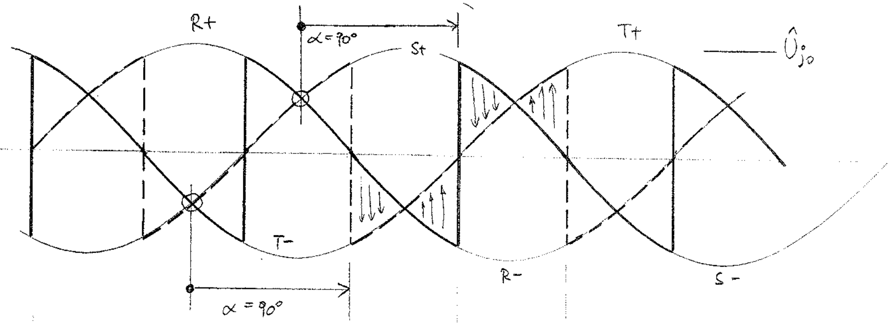
$P_N = U_M \cdot I_M = 250V \cdot 300A = 75KW$

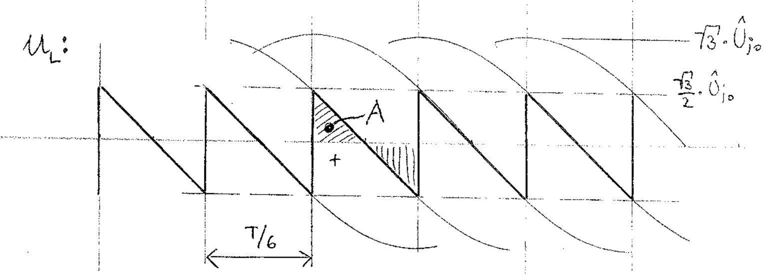
$\underline{\lambda} = \frac{75KW}{104{,}5KVA} = \underline{0{,}718}$

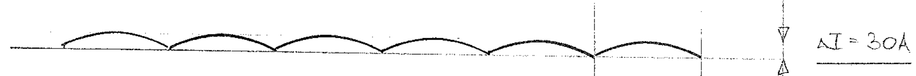
PROBE: SEKUNDÄRSEITE: $I_{RMS} = 300A \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 245A$

$S = 3 \cdot U_{j0} \cdot I_{RMS} = 3 \cdot 142V \cdot 245A = 104{,}4KVA \rightarrow \underline{\lambda = 0{,}7}$

c) WORST CASE FÜR RIPPEL VON I_M: $\alpha = 90°$







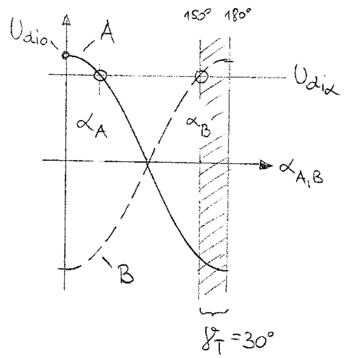
$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \rightarrow \Delta I = \frac{1}{L} \underbrace{\int u_L dt}_{A} \cong \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{U}_{j0} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}}_{\Delta} \cdot \frac{T}{12} \cdot \frac{1}{L}$

$\underline{L} = \frac{\sqrt{3}}{48} \cdot \hat{U}_{j0} \cdot \frac{T}{\Delta I} = \frac{\sqrt{3}}{48} \cdot 201V \cdot \frac{20ms}{30A} = \underline{4{,}84mH}$

BEISPIEL 4: GLEICHSTROM-KURZKUPPLUNG / HGÜ

a) <u>LEISTUNGSFLUSS</u>: A → B
↗ A: GLEICHRICHTER
↘ B: WECHSELRICHTER

$Q_1 \rightarrow$ MIN WENN $\underline{\alpha_B = \alpha_{MAX} = 150°}$ $\underline{\alpha_A = 30°}$



$$U_{di0} = \underbrace{2 \cdot \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}}_{B6 = 2 \cdot M3} = \cancel{2} \cdot \underbrace{\frac{380kV}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}_{\hat{U}_{j0}} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{\cancel{2}\pi}$$

$$U_{di0} = 380kV \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 3}{\pi} = 513\,kV$$

$$\underline{U_{di\alpha}} = U_{di0} \cdot \cos\alpha = 513kV \cdot \cos 30° = \underline{444{,}4\ kV}$$

$$\underline{\underline{I}} = P / U_{di\alpha} = 300\,MW / 444{,}4\,kV = \underline{\underline{675\,A}}$$

b)
$$\left.\begin{aligned} P &= S_1 \cdot \cos\varphi_1 \\ Q_1 &= S_1 \cdot \sin\varphi_1 \end{aligned}\right\} \quad Q_1 = P \cdot \frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} = P \cdot tg\,\varphi_1 = P \cdot tg\,\alpha_A$$

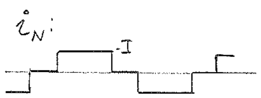
$$\underline{Q_1} = 300MW \cdot tg\,30° = \underline{173{,}2\ MVAr} \qquad \varphi_1 = \alpha_A!$$

<u>FÜR VOLLST. KOMPENSATION AUF SEITE A:</u> $Q_c = Q_1$

3 C's IN λ: $Q_c = 3 \cdot \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \omega C$ → $\underline{\underline{C}} = \frac{Q_1}{U_N^2 \omega} = \frac{173{,}2\ MVAr}{(380kV)^2 \cdot 100\pi} = \underline{\underline{3{,}82\,\mu F}}$

<u>NETZ B:</u> $\underline{\underline{\cos\varphi_1}} = \cos\alpha_B = \cos 150° = \underline{\underline{0{,}866}}$

i_N:

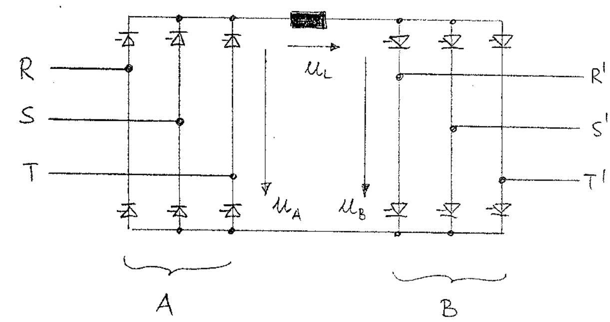


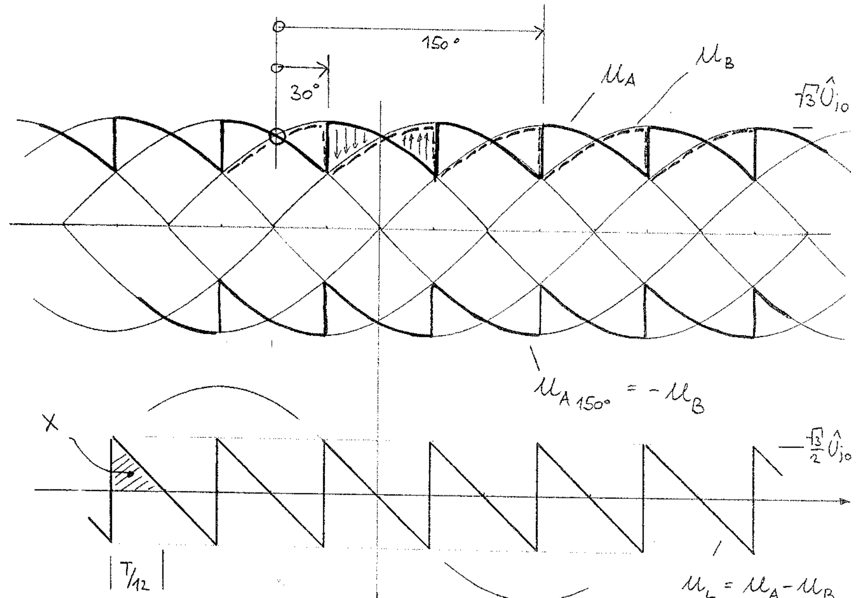
$$I_{N,RMS} = I \cdot \sqrt{\tfrac{2}{3}} = 675A \cdot \sqrt{\tfrac{2}{3}} = 551\ A$$

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{N,RMS} = \sqrt{3} \cdot 380kV \cdot 551A = 362{,}7\ MVA$$

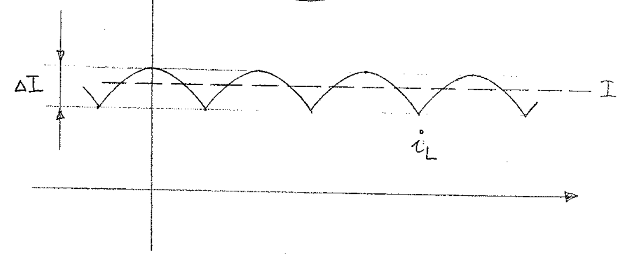
$$\underline{\lambda} = P / S_N = 300MW / 362{,}7\,MVA = \underline{0{,}827}$$

c) <u>SPANNUNG AN L UND RIPPEL VON I</u>





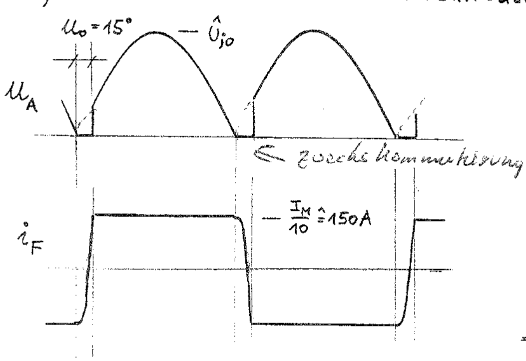
$$\Delta I = \frac{1}{L} \underbrace{\int u\,dt}_{X}$$



$$\Delta I \sim \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{U}_{i0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{12} \cdot \frac{1}{L}$$

BEISPIEL 5: E-LOK

a) ARBEITSPUNKT C: $\hat{=}$ MAX. AUSGANGSSPANNUNG : $\alpha = 0°$ $\quad u_0 = 15°$



$$\hat{U}_{j0} = \frac{15kV}{\underset{\text{TRAFO}}{10}} \cdot \sqrt{2} = 2121V$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi} = 1350V$$

$$U_M = U_d = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{1}{\pi} \int_{u_0}^{\pi} \sin x \, dx = \underbrace{\hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi}}_{U_{di0}} \cdot \frac{1 + \cos \overset{15°}{u_0}}{2}$$

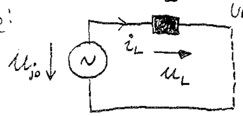
$$\underline{\underline{U_M}} = 1350V \cdot \underbrace{\frac{1 + \cos 15°}{2}}_{0,983} = \underline{\underline{1327V}}$$

$$\underline{\underline{I_M}} = P/U_M = 2000kW/1327V = \underline{\underline{1507A}}$$

---

b) KOMMUTIERUNG:

ESB:



AB: $x = \omega t = \alpha \rightarrow i_L = I_M$

$$u_L = -\hat{U}_{j0} \cdot \sin x$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L \, dt = \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega L} \cos x + C$$

$$\longrightarrow \quad C = I_M - \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega L} \cdot \cos\alpha$$

$$i_L = I_M - \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega L} \left[\cos\alpha - \cos x \right] \quad (A)$$

ENDE DER KOMMUTIERUNG:

$$\left. \begin{array}{l} x = \alpha + u_\alpha \\ i_L = -I_M \end{array} \right\} \text{ IN (A) EINSETZEN ERGIBT:}$$

$$\boxed{\frac{2 \omega L I_M}{\hat{U}_{j0}} = \cos\alpha - \cos(\alpha + u_\alpha)} \quad (B)$$

BERECHNUNG VON ωL:

BEI $\alpha = 0°$ $\quad u_\alpha = u_0 = 15°$

AUS (B) $\quad \underline{\underline{\omega L}} = \frac{\hat{U}_{j0}}{2 I_M} \cdot \overbrace{(1 - \cos 15°)}^{0,034} = \frac{2121V}{2 \cdot 1507A} \cdot 0,034 = \underline{\underline{24 m\Omega}}$

GESAMTIMPEDANZ IM KOMMUTIERUNGSKREIS

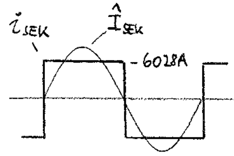
NETZ: $\quad \underset{\substack{\uparrow \\ \text{KURZSCHLUSS-LEISTUNG}}}{S_K} = \frac{U_N^2}{\omega L_N} \longrightarrow \underline{\underline{\omega L_N'}} = \frac{(1,5kV)^2}{200MVA} = \underline{\underline{11,25 m\Omega}}$

BEZOGEN AUF DIE TRAFO-SEKUNDÄRSEITE

TRAFO-STREUREAKTANZ:

$$\underline{\underline{\omega L_\sigma'}} = 24 m\Omega - 11,25 m\Omega = \underline{\underline{12,75 m\Omega}}$$

TRAFO-NENNSTROM:



ARBEITSPUNKT A:

ANFAHRSTROM: $I_M = 4 \times 1507A = 6028A$

TRAFO-GRUNDSCHWINGUNGS-EFFEKTIVWERT:

$$I_{SEK,1,RMS} = 6028A \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \underline{5427A}$$

$\hat{=}$ TRAFO-NENNSTROM

TRAFO-KURZSCHLUSS-SP.:

$$U_X = \omega L_\sigma' \cdot I_{SEK,1,RMS} = 12,75 m\Omega \cdot 5,427kA = 69,2V$$

BEZOGEN: $\quad \underline{\underline{u_X}} = \frac{U_X}{1500V} = \frac{69,2V}{1500V} = \underline{\underline{4,61\,\%}}$

---

c) ANFAHREN: (ARB. PKT. A) $\quad I_M = 6028A \;/\; U_M \sim 0 \;/\; \alpha = 90° \quad (U_M = U_{d0} \cdot \cos\alpha)$

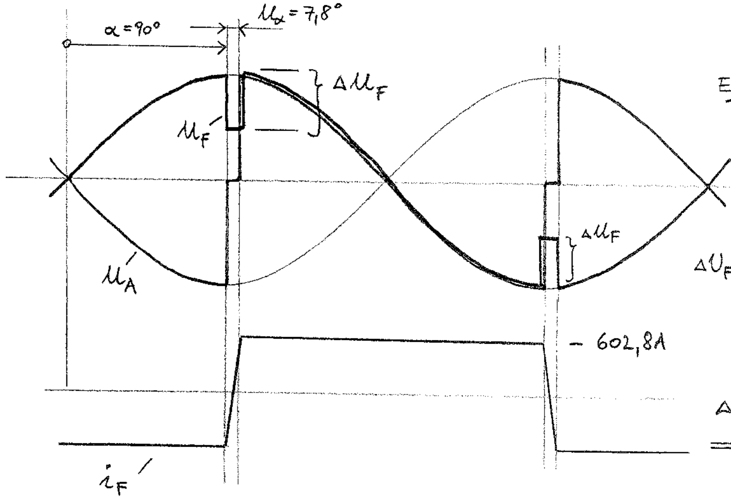
GL. (B) für $\alpha = 0° / I_M = 1507A$, $u_0 = 15°$: $\quad \frac{2 \omega L I_M}{\hat{U}_{j0}} = 1 - \cos 15°$

GL. (B) für $\alpha = 90° / I_M = 4 \cdot 1507A$, $u_\alpha = ?$: $\quad 4 \cdot \frac{2 \omega L I_M}{\hat{U}_{j0}} = -\cos(90° + u_\alpha)$

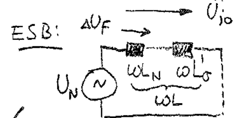
$$\left. \right\} \begin{array}{l} 4 \cdot (1 - \cos 15°) \\ = -\cos(90° + u_\alpha) \end{array}$$

$$\underline{\underline{u_\alpha = 7,83°}}$$

$\hat{=} 1,3 ms$ @ $16,7 Hz$



ESB:



$$\Delta U_F = \hat{U}_N \cdot \frac{\omega L_N}{\omega L}$$

$$= 15kV \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{11,25 m\Omega}{24 m\Omega}$$

$$\underline{\underline{\Delta u_F = 9,94 kV}}$$

BEISPIEL 6 : PLASMA-BESCHICHTUNGSANLAGE

a) B6: $U_{d0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{\pi}$

$\boxed{Q_1 \text{ MINIMUM WENN } \ddot{u} \text{ SO, DASS } U_{d0} = U_P = 1000V \text{ BEI } \alpha = 0° \,!}$

$\hat{U}_{j0} = U_{d0} \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{3}} = 1000V \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{3}} = 604{,}6V \rightarrow U_{j0} = \frac{604{,}6V}{\sqrt{2}} = 427{,}5V_{RMS}$

$\ddot{u}$ VON TRAFO SO WÄHLEN, DASS $U_{SEK} \hat{=} U_{j0} = 427{,}5V$ @ $400V_{LL}$ PRIMÄR

$\rightarrow \underline{\underline{\ddot{u}}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{427{,}5V}{400V} = \underline{\underline{1{,}069}}$

t_c MINIMAL BEI $\alpha = \alpha_{MAX}$

STEUERKENNLINIE:

$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \frac{1+\cos\alpha}{2} \rightarrow \alpha_{MAX} = \arccos\left(2 \cdot \frac{U_{d,MIN}}{U_{d0}} - 1\right) = \arccos\left(2 \cdot \frac{50V}{1000V} - 1\right) = 154{,}2°$

(HALBGEST. B6)

$\underline{\underline{t_c}} = 180° - \alpha_{MAX} = 25{,}8° = \underline{\underline{1{,}44\,ms}}$ (50Hz)

b) TRAFO-SEKUNDÄRSTRÖME

3 BEREICHE:

NORMIERTE SPANNUNG: $u = \frac{U_P}{U_{P,MAX}}$

I $\alpha = 0° \dots 60°$, $u = \frac{3}{4} \dots 1$

i_{SEK} ... 120° LEITDAUER $(\hat{=} \frac{2}{3})$

$I_{SEK,RMS} = I_P \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{40A}{u} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$

II $\alpha = 60° \dots 120°$, $u = \frac{1}{4} \dots \frac{3}{4}$

$I_{SEK,RMS} = I_P \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

$= \frac{40A}{u} \cdot \sqrt{1 - \frac{\arccos(2u-1)}{\pi}}$

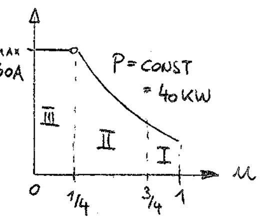
$u = \frac{1+\cos\alpha}{2}$

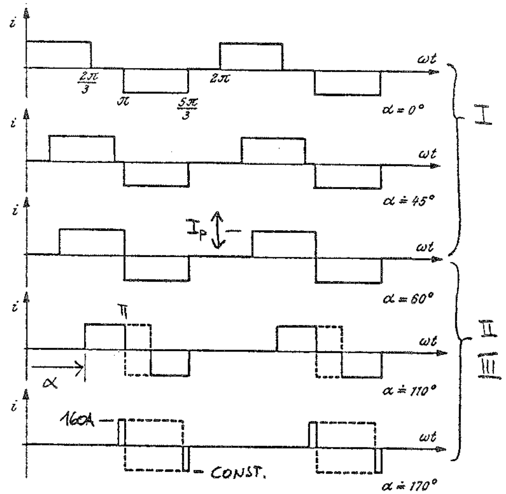
$\alpha = \arccos(2u-1)$

I + II: P = CONST

$I_P = \frac{P}{U_P} = \frac{P}{U_{P,MAX}} \cdot \frac{1}{u}$

$= \frac{40kW}{1000V} \cdot \frac{1}{u} = \frac{40A}{u}$



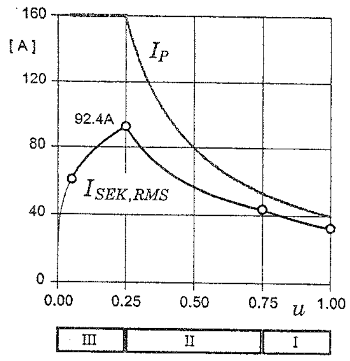


III $\alpha = 120° \dots (180°)$, $u = 0 \dots \frac{1}{4}$

I_P = CONST = 160A

$I_{SEK,RMS} = I_P \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

$= 160A \cdot \sqrt{1 - \frac{\arccos(2u-1)}{\pi}}$



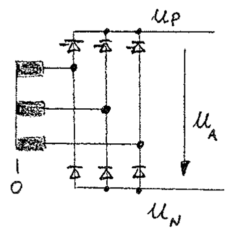
MAXIMALER SEK. STROM:

BEI $u = \frac{1}{4}$

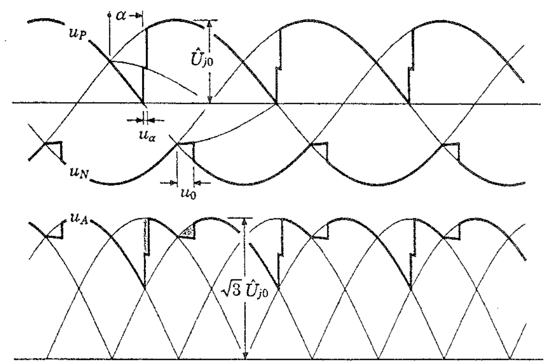
$\underline{\underline{I_{SEK,RMS,max}}} = 160A \cdot \underbrace{\sqrt{1 - \frac{120°}{180°}}}_{1/\sqrt{3}} = 160A/\sqrt{3} = \underline{\underline{92{,}4A}}$

TRAFO-SCHEINLEISTUNG: $\underline{\underline{S}} = 3 \cdot U_{j0} \cdot I_{SEK,RMS,max} = 3 \cdot 427{,}5V \cdot 92{,}4A = \underline{\underline{118{,}5kVA}}$

c)



$u_A = u_P - u_N$



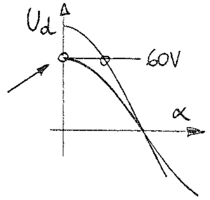
- DREIPULSIGE AUSGANGSSPANNUNG !
- UNTERSCHIEDLICHE ÜBERLAPPUNG !

BEISPIEL 7: SAUGDROSSELSCHALTUNG

a) STEUERGESETZ VON M3: $U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}$ $\quad U_B = U_{di0} \cdot \cos\alpha$

$U_B = \text{konst.} = 60V$

MINIMALES U_N BEI $\alpha = 0°$!

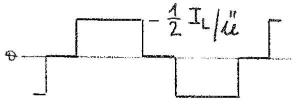


$U_{di0,MIN} = 60V$

$\hat{U}_{j0,MIN} = 60V \cdot \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} = 72{,}6V$

$U_{j0,MIN} = \hat{U}_{j0,MIN} / \sqrt{2} = 51{,}3V$

NETZSTROM:



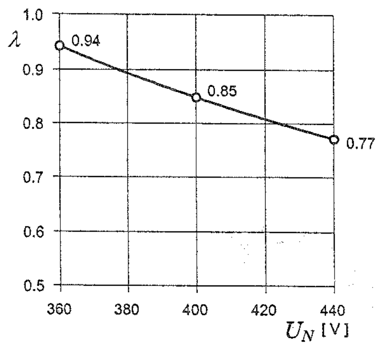
PRIMÄR: $ü \cdot 51{,}3V = 4 \cdot 51{,}3V = \underline{205{,}2V}$ (STRANG)

$\underline{U_{N,MIN}} = \sqrt{3} \cdot 205{,}2 = \underline{355{,}4V}$ (AUSSENLEITER)

$\lambda = P/S \qquad P = 60kW \qquad S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{N,RMS}$

$\underline{I_{N,RMS}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_L}{ü} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1000A}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = \underline{102{,}1\,A}$ UNABHÄNGIG VON U_N!

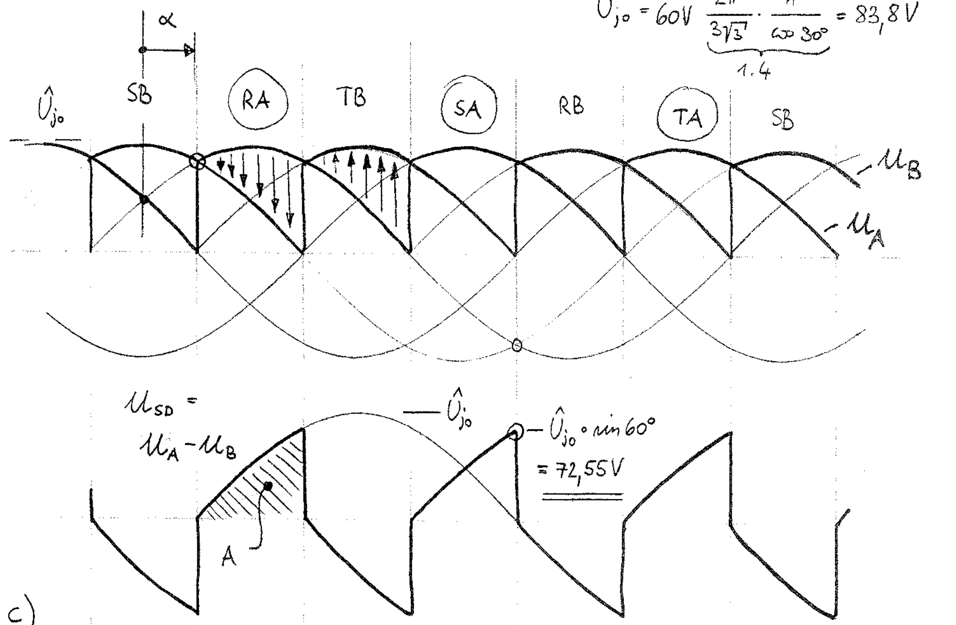
$$\underline{\underline{\lambda}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{N,RMS}} = \frac{60000W}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot 102{,}1A} = \underline{\underline{\frac{339{,}4V}{U_N}}}$$



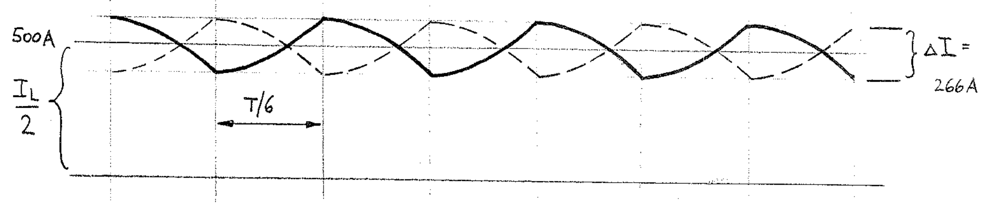
U_N [V]	λ	S_N [KVA]
360	0,94	63,6
380	0,89	67,2
400	0,85	70,7
420	0,81	74,2
440	0,77	77,8

b) $\alpha = 30°$ $\quad U_B = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos\alpha \rightarrow \hat{U}_{j0} = U_B \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\cos\alpha}$

$$\hat{U}_{j0} = 60V \underbrace{\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\cos 30°}}_{1.4} = 83{,}8V$$



c)



$$\Delta I = \frac{1}{L} \int_{A} u_{SD}\, dt = \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega L} \int_0^{60°} \sin x\, dx = \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega L} \underbrace{(1 - \cos 60°)}_{1/2} = \frac{\hat{U}_{j0}}{2 \omega L} =$$

$$\underline{\underline{\Delta I}} = \frac{83{,}8V}{100\pi \cdot 2 \cdot 0{,}5mH} = \underline{\underline{266A}}$$

DAMIT 6-PULSIGER SD-BETRIEB:

$\frac{1}{2} I_L > \frac{1}{2} \Delta I$

$\underline{\underline{I_{L,MIN} = \Delta I = 266\,A}}$

NÄHERUNG: (LIN.)

$\Delta I = \frac{1}{L} \int_{A} u_L\, dt \sim \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{SD} \cdot \frac{T}{6}$

$\underline{\Delta I} \sim \frac{72{,}55V \cdot 20ms}{2 \cdot 0{,}5mH \cdot 6} = \underline{242\,A}$

BEISPIEL 8: VAR-KOMPENSATOR

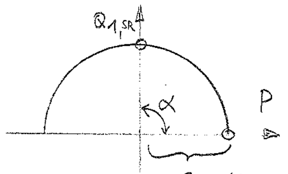
a) C's so dimensionieren, dass sie $Q_C = 20\,\text{kVAr}$ liefern.

$$Q_C = 3 \cdot U_C \cdot I_C = 3\,\frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot I_C \rightarrow \underline{I_C} = \frac{Q_C}{\sqrt{3}\,U_N} = \frac{20\,\text{kVAr}}{\sqrt{3}\cdot 400\,\text{V}} = \underline{28{,}9\,A_{RMS}}$$

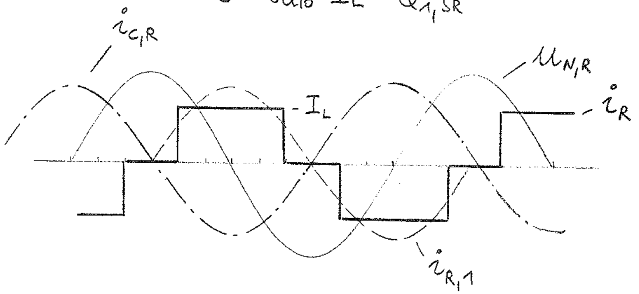
$$U_C = I_C \cdot \frac{1}{\omega C} \rightarrow \underline{\underline{C}} = \frac{I_C}{\omega U_C} = \frac{\sqrt{3}\cdot I_C}{\omega U_N} = \frac{\sqrt{3}\cdot 28{,}9\,\text{A}}{100\pi \cdot 400\,\text{V}} = \underline{\underline{398\,\mu F}}$$

STROMRICHTER: B6-VOLLGESTEUERT $P = 0$ (NUR BLINDLEISTUNG)

$\underline{\alpha = 90°}$ $\qquad \underline{U_A = U_{di0} \cdot \cos\alpha = 0}$



$$\underbrace{}_{S = U_{di0}\cdot I_L = Q_{1,SR}}$$



$\underline{B6:}$ $$U_{di0} = \hat{U}_{j0}\,\frac{3\sqrt{3}}{\pi} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}\cdot\sqrt{2}\,\frac{3\sqrt{3}}{\pi} = U_N \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 400\,\text{V}\cdot\frac{3\sqrt{2}}{\pi} = \underline{540\,\text{V}}$$

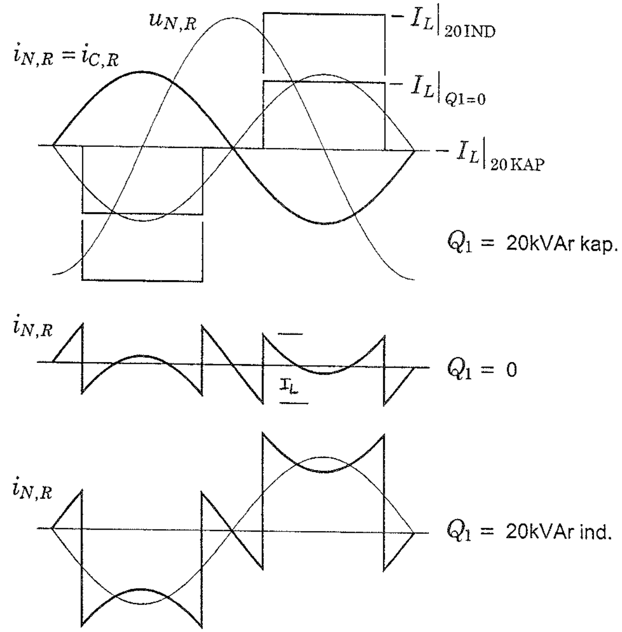
DAMIT $Q_1 = 20\,\text{kVAr}$ IND. AM NETZ, MUSS B6 $Q_{1,SR} = 40\,\text{kVA}$ LIEFERN.
($Q_C = 20\,\text{kVA}$ KAP.!)

$$Q_{1,SR} = S = U_{di0} \cdot I_L$$

$$I_{L,MAX} = \frac{Q_{1,SR}}{U_{di0}} = \frac{40\,\text{kVAr}}{540\,\text{V}} =$$

$$\underline{\underline{I_{L,MAX} = 74\,\text{A}}}$$

b)
- $Q_1 = 20\,\text{kVAr}$ KAP. $\rightarrow Q_{1,SR} = 0 \rightarrow I_L = 0$
- $Q_1 = 0 \rightarrow Q_{1,SR} = 20\,\text{kVAr} \rightarrow I_L = I_{L,MAX}/2 = 37\,\text{A}$
- $Q_1 = 20\,\text{kVAr}$ IND. $\rightarrow Q_{1,SR} = 40\,\text{kVAr} \rightarrow I_L = I_{L,MAX} = 74\,\text{A}$



c) Gl. (4.135): $$\underline{D_x} = \frac{P}{2}\cdot\frac{\omega L \cdot I_L}{\pi} = \frac{6}{2}\cdot\frac{100\pi \cdot 2\,\text{mH}\cdot 50\,\text{A}}{\pi} = \underline{30\,\text{V}}$$
f. $I_L = 50\,\text{A}$

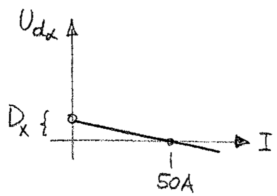
$\underline{\text{B6-KENNL.:}}$ MIT L_K: $U_{d\alpha} = D_x = 30\,\text{V}$

$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos\alpha$

$U_{d0} = 540\,\text{V}$

$\alpha = \arccos\left(\frac{30\,\text{V}}{540\,\text{V}}\right)$

$\underline{\underline{\alpha = 86{,}8°}}$



Gl. (4.136)

$$u_\alpha = -\alpha + \arccos\left(\cos\alpha - \frac{2\cdot D_x}{U_{di0}}\right)$$

$$\underline{\underline{u_\alpha}} = -86{,}8° + \arccos\left(\cos 86{,}8° - 2\cdot 30\,\text{V}/540\,\text{V}\right) = \underline{6{,}38°}$$

$t_c \mathrel{\hat{=}} 355\,\mu s$

BEISPIEL 9: FOLGESTEUERUNG

a) MAXIMALE MOTORSPANNUNG: $\underline{U_{M,MAX}} = 2 \cdot \underbrace{\frac{U_N}{25} \cdot \sqrt{2}}_{\hat{U}_{j0}} \cdot \frac{2}{\pi} = 2 \cdot \frac{15kV}{25} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = \underline{1080V}$ (1)

BEREICH I:

B NICHT ANGESTEUERT: $U_M = \frac{U_{M,MAX}}{2} \cdot \underbrace{\frac{1+\cos\alpha_A}{2}}_{\text{STEUERGESETZ B2H}} \rightarrow u = \frac{U_M}{U_{M,MAX}} = \frac{1+\cos\alpha_A}{4}$ (2)

$\alpha_A = 0 \dots 180°$

BEREICH II:

$\alpha_A = 0 \dots 180° \rightarrow u = 0 \dots \frac{1}{2}$

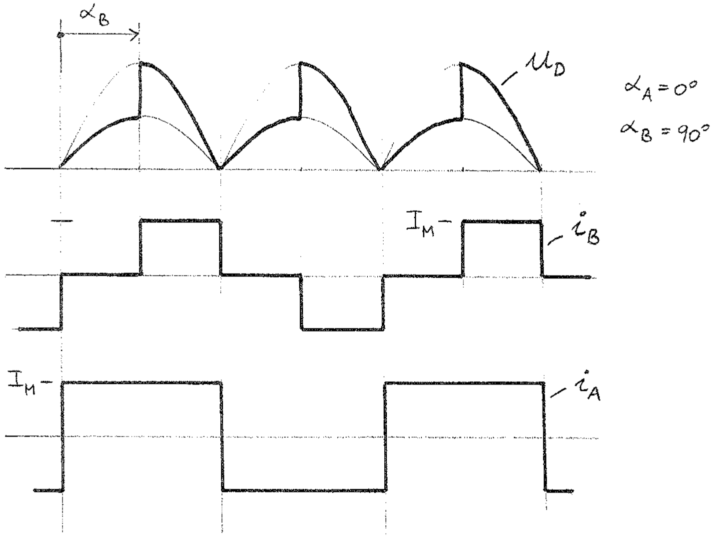
A VOLL ANGEST. ($\alpha_A = 0°$)

$\alpha_B = 0 \dots 180°$ $\quad U_M = \frac{U_{M,MAX}}{2} \cdot \left(\underbrace{1}_{A} + \underbrace{\frac{1+\cos\alpha_B}{2}}_{B}\right) \longrightarrow u = \frac{3+\cos\alpha_B}{4}$ (3)

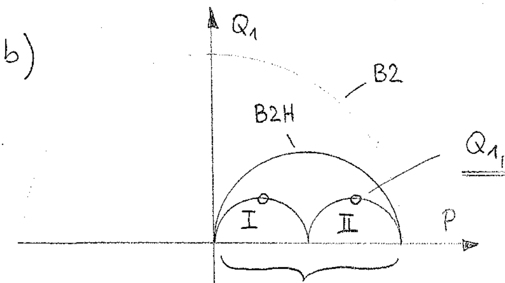
$u = \frac{1}{2} \dots 1$

$\underline{U_M = 810V} \rightarrow u = \frac{810V}{1080V} = \frac{3}{4} \rightarrow \text{II}$

$\alpha_A = 0°$ $\quad \alpha_B = \arccos(4u-3) = \arccos(\overbrace{4 \cdot \tfrac{3}{4} - 3}^{0}) = 90°$



b)



$S = U_{M,MAX} \cdot I_M = 1080V \cdot 2000A = 2{,}16\,MW$

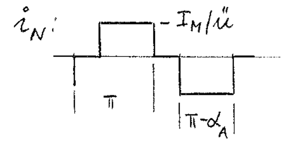
$\underline{Q_{1,MAX}} = \frac{S}{4} = \frac{2160kVA}{4} = \underline{540kVAr}$

@ $\alpha_A / \alpha_B = 90°$

c) BEREICH I:

$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_M \cdot I_M}{U_N \cdot I_N} = \frac{U_{M,MAX} \cdot u \cdot I_M}{U_N \cdot I_N}$

i_N:



$I_N = \frac{I_M}{ü} \cdot \sqrt{1-\alpha_A/\pi}$

FÜR I: $u = 0 \dots \frac{1}{2}$ $\quad u = \frac{1+\cos\alpha_A}{4}$ (2)

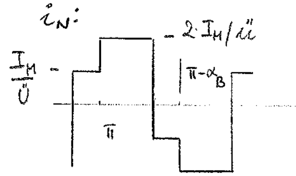
$\alpha_A = \arccos(4u-1)$

$U_{M,MAX} = \frac{U_N}{ü} \cdot \frac{4\sqrt{2}}{\pi}$ (1)

$$\underline{\lambda_I} = \frac{U_N \cdot 4\sqrt{2} \cdot u \cdot I_M \cdot ü}{ü \cdot \pi \cdot I_M \cdot \sqrt{1-\alpha_A/\pi} \cdot U_N} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{u}{\sqrt{1-\alpha_A/\pi}} = \underline{\underline{\frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{u}{\sqrt{1-\arccos(4u-1)/\pi}}}}$$

BEREICH II: $u = \frac{1}{2} \dots 1$ $\quad u = \frac{3+\cos\alpha_B}{4}$ (3) $\rightarrow \alpha_B = \arccos(4u-3)$

i_N:

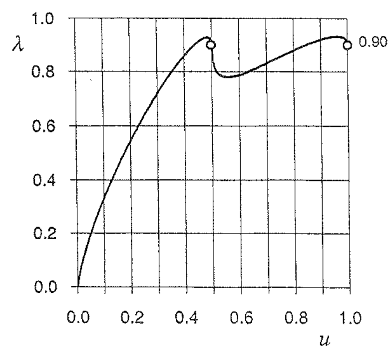


$$\lambda_{II} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{u}{\sqrt{4-3\alpha_B/\pi}} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{u}{\sqrt{4-3\arccos(4u-3)/\pi}}$$

$$I_N^2 = \left(\frac{I_M}{ü}\right)^2 \cdot \left[\alpha_B + 4(\pi-\alpha_B)\right] \cdot \frac{1}{\pi}$$

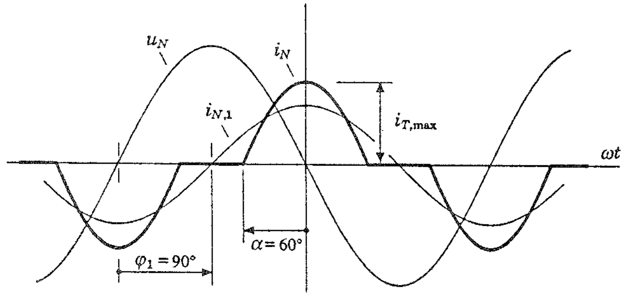
$$I_N = \frac{I_M}{ü} \cdot \sqrt{4-3\alpha_B/\pi}$$

u	λ
0	0
$\frac{1}{2}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$
1	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0{,}90$



BEISPIEL 10: WECHSELSTROMSTELLER

a)



$\underline{\underline{Z = \omega L}}$:

$u_L = u_N$ FÜR $\omega t = -\alpha \ldots +\alpha$

$u_N = -\hat{U}_N \cdot \sin\omega t$

$i_N = \frac{1}{L} \int u_N \cdot dt = \frac{1}{\omega L} \int -\hat{U}_N \cdot \sin x \, dx = \frac{\hat{U}_N}{\omega L} \cdot \cos x + C$

FÜR $x = -\alpha$ $\quad i_N = 0 \longrightarrow C = -\frac{\hat{U}_N}{\omega L} \cdot \cos\alpha$

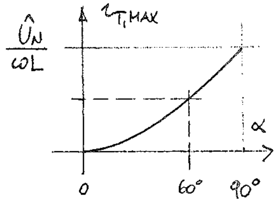
$$\underline{i_N(x) = \frac{\hat{U}_N}{\omega L} \cdot \left[\cos x - \cos\alpha\right]}$$

$i_{T,MAX} = i_N \Big|_{x=0} = \frac{\hat{U}_N}{\omega L}(1 - \cos\alpha)$ $\qquad \underline{\alpha = 0° \ldots 90°}$ STEUERBEREICH

FÜR $L = 15mH$:
UND $\alpha = 60°$

$$\underline{\underline{i_{T,MAX}}} = \underbrace{\frac{230V \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 15mH}}_{69A} \cdot \underbrace{(1 - \cos 60°)}_{\frac{1}{2}} = \underline{\underline{34{,}5A}}$$

($\hat{=}\ i_{T,MAX}$ F. $\alpha = 90°$)



GRUNDSCHWINGUNGS-
VERSCHIEBUNGSFAKTOR:

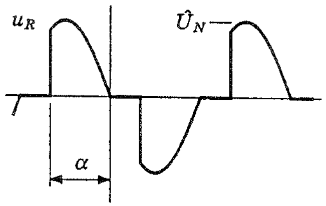
$\varphi_1 = 90° \ \forall \alpha$!
(IND. LAST!)

$\underline{\underline{\cos\varphi_1 = 0}} \longrightarrow$ TCR (THYRISTOR CONTROLLED REACTOR)
$\hat{=}$ REGELBARER BLINDLEISTUNGSKOMPENSATOR

b) $\underline{\underline{Z = R}}$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U^2_{R,RMS}/R}{U_N \cdot \underset{\uparrow\ U_{R,RMS}/R}{I_{N,RMS}}} = \frac{U_{R,RMS}}{U_N}$$

$$U^2_{R,RMS} = \frac{1}{\pi} \cdot \hat{U}_N^2 \cdot \underbrace{\int_{-\alpha}^{0} \sin^2 x \, dx}_{\left(\frac{x}{2} - \frac{\sin 2x}{4}\right)\Big|_{-\alpha}^{0} = \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4}} = \frac{2 \cdot U_N^2}{\pi}\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{4}\right) = U_N^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)$$

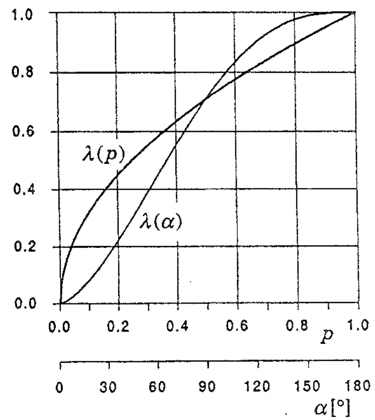


$$\underline{\underline{\lambda(\alpha)}} = \frac{U_{R,RMS}}{U_N} = \underline{\underline{\sqrt{\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}}$$

$\lambda(p)$:

$$\lambda^2 = \frac{P^2}{S^2} = \frac{P^2}{U_N^2 \cdot \underbrace{I_N^2}_{= P/R}} = \frac{P^2}{\underbrace{\frac{U_N^2}{R}}_{P_{MAX}} \cdot P} = \frac{P}{P_{MAX}} = p$$

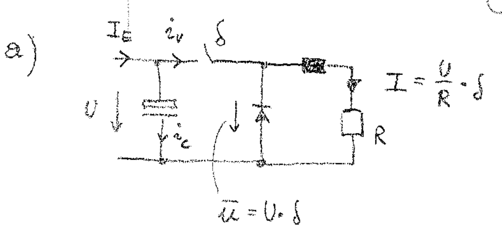
$$\underline{\underline{\lambda = \sqrt{p}}}$$



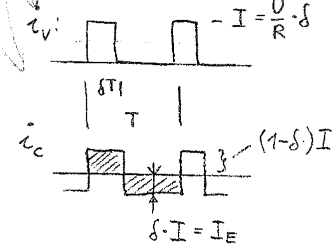
BEISPIEL 11: GLEICHSTROMSTELLER (ZCS)

C muss Wechselanteil für i_V puffern

a)



(ID. GLÄTTUNG)



$$I^2_{C,RMS} = [(1-\delta)\cdot I]^2\cdot\delta + [\delta\cdot I]^2\cdot(1-\delta)$$

$$= I^2\left[(1-\delta)^2\cdot\delta + \delta^2(1-\delta)\right] = I^2\left[\delta - 2\delta^2 + \cancel{\delta^3} + \delta^2 - \cancel{\delta^3}\right] = \underline{I^2(\delta-\delta^2)}$$

ABER:

$I = \frac{U}{R}\cdot\delta$!

$$I^2_{C,RMS} = \left(\frac{U}{R}\right)^2\cdot(\delta-\delta^2)\cdot\delta^2$$

$$\underline{\underline{I_{C,RMS} = \frac{U}{R}\cdot\sqrt{\delta^3-\delta^4}}}$$

$f(\delta) = \delta^3 - \delta^4$

$\frac{\partial f}{\partial\delta} = 3\delta^2 - 4\delta^3 = 0$

$3\cancel{\delta^2} = 4\delta^3 \longrightarrow \underline{\underline{\delta_{MAX} = \frac{3}{4}}}$

$$I_{C,RMS,MAX} = \frac{U}{R}\cdot\delta^2_{MAX}\cdot\sqrt{\frac{1}{\delta_{MAX}}-1}$$

$$= \frac{U}{R}\cdot\frac{9}{16}\cdot\underbrace{\sqrt{\frac{4-3}{3}}}$$

$$\frac{9}{16\sqrt{3}} = 0{,}325$$

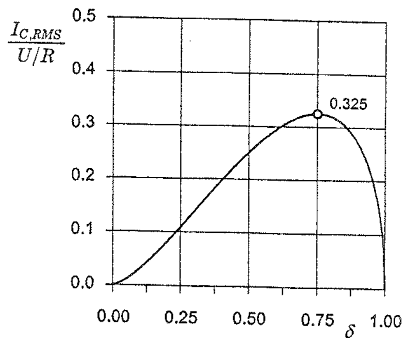
$$I_{C,RMS,MAX} = \frac{300V}{10\Omega}\cdot 0{,}325 =$$

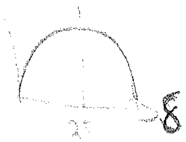
$U = 300V$

$R = 10\Omega$

$$\underline{\underline{I_{C,RMS,MAX} = 9{,}75A}}$$

@ $\delta = 3/4$

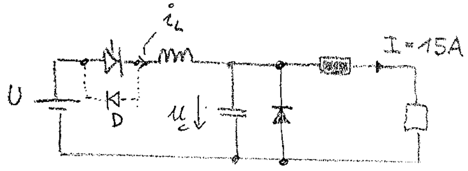




VS.

b) REALISIERUNG MIT RESONANTEM SCHALTER

(ZERO-CURRENT-SWITCH)



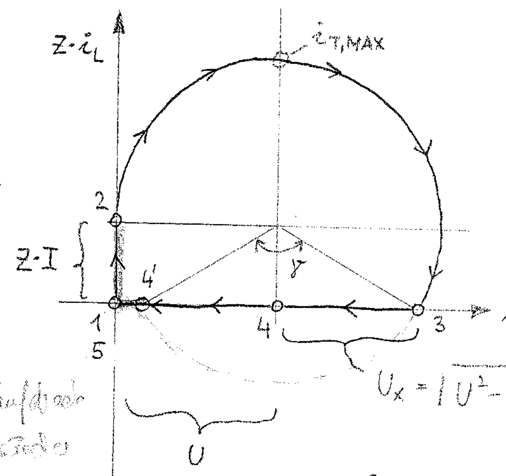
$L = 100\mu H$

$C = 1\mu F$

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{100\mu H}{1\mu F}} = 10\Omega$

$Z\cdot I = 100\Omega\cdot 15A$

$= 150V$



$U_X = \sqrt{U^2-(Z\cdot I)^2} = \sqrt{300^2-150^2} = 259{,}8V$

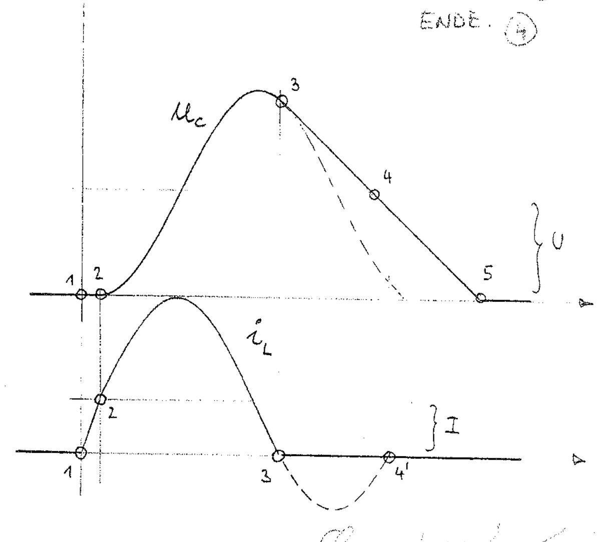
SCHONZEIT. $i = C\,\frac{du}{dt}$ } LINEAR !

BEGINN: (3)

ENDE: (4)

$t_c = \frac{C\cdot U_X}{I} = \frac{1\mu F\cdot 259{,}8V}{15A}$

$\underline{\underline{t_c = 17{,}3\,\mu s}}$



MIT RÜCKDIODE:

$t_c' = \gamma\sqrt{LC}$

AUS DIAGR. $U\cdot\cos\frac{\gamma}{2} = Z\,I$

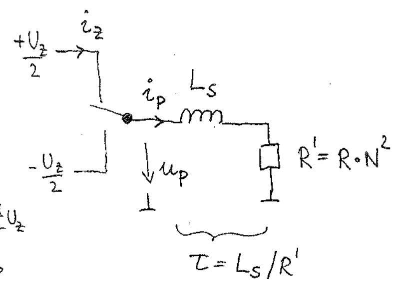
$\gamma = 2\cdot\arccos\frac{150V}{300V} = 120°$ $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$

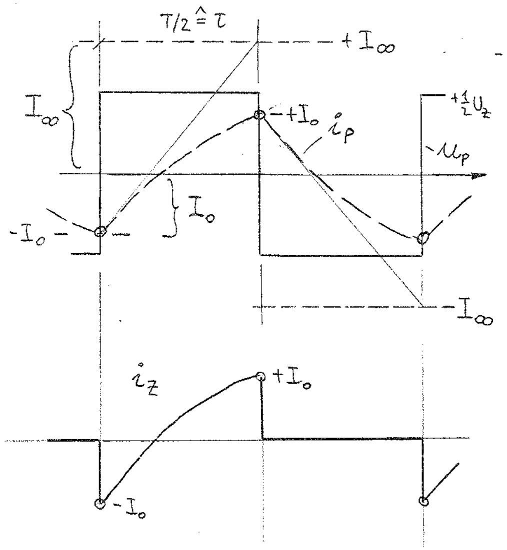
$t_c' = \frac{2\pi}{3}\sqrt{LC} = \frac{2\pi}{3}\sqrt{1\mu F\,100\mu H}$

$\underline{\underline{t_c' = \frac{2\pi}{3}\cdot 10\mu s = 20{,}9\,\mu s > t_c}}$

BEISPIEL 12: PUNKTSCHWEISSGERÄT

a) ERSATZSCHALTBILD:





NORMIERTE ZEIT: $x = t/\tau$

$$(I_\infty + I_0)(1-e^{-x}) - I_0 = I_0$$

FÜHRT AUF:

$$I_0 = I_\infty \frac{1-e^{-x}}{1+e^{-x}} = I_\infty \cdot th\frac{x}{2}$$

MIT $I_\infty = \frac{U_Z}{2R'}$

HIER: $N = 100$

$R = 1m\Omega \quad R' = 1m\Omega \cdot 100^2 = 10\Omega$

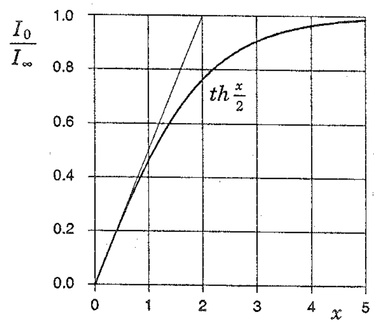
$$\tau = \frac{L_S}{R'} = \frac{5mH}{10\Omega} = 0{,}5ms$$

$$I_\infty = \frac{U_Z}{2R'} = \frac{600V}{2 \cdot 10\Omega} = 30A$$

$$x = \frac{T}{2}/\tau = \frac{1}{2f \cdot \tau} = \frac{1}{2 \cdot 1k \cdot 0{,}5ms} = 1$$

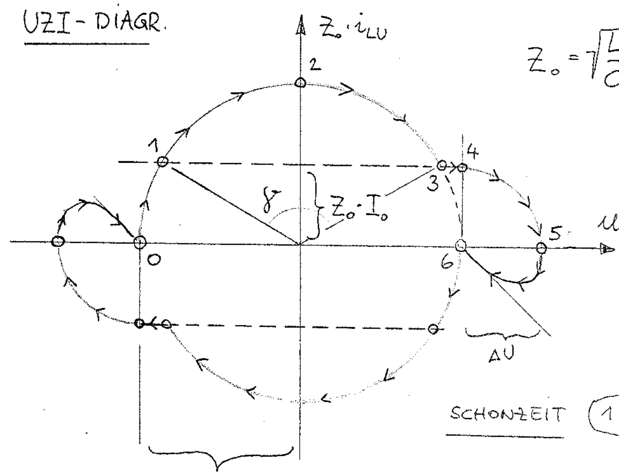
$$I_0 = I_\infty \cdot th\frac{x}{2} = I_\infty\, th\frac{1}{2}$$

$$\underline{\underline{I_0}} = 30A \cdot 0{,}462 = \underline{\underline{13{,}86A}}$$



b) REALISIERUNG DES UMSCHALTERS ALS HALBBRÜCKE MIT KOMMUTIERUNG NACH McMURRAY

UZI-DIAGR.



$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_U}{C_U}}$$

$$\underline{\underline{I_0 = 15A}}$$

$\underbrace{\hat{i}_{LU}}_{30A}$

(2): $Z_0 \cdot \hat{i}_{LU} = U_Z = 600V$

$$Z_0 = \frac{600V}{30A} = \underline{20\Omega}$$

$$Z_0 \cdot I_0 = 20\Omega \cdot 15A = 300V$$

$$\rightarrow \gamma = 120° = \frac{2\pi}{3}$$

SCHONZEIT (1→3):

$$t_c = \gamma\sqrt{L_U C_U} = \frac{2\pi}{3} \cdot Z_0 \cdot C_U = \frac{2\pi}{3} \cdot 20\Omega \cdot C_U \hat{=} 40\mu s$$

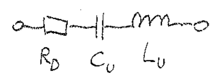
$$\underline{\underline{C_U}} = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{40}{20}\mu F = \frac{3}{\pi}\mu F \sim \underline{\underline{1\mu F}}$$

$$\underline{\underline{L_U}} = Z_0^2 \cdot C_U = (20\Omega)^2 \cdot 1\mu F = \underline{\underline{400\mu H}}$$

c) DÄMPFER

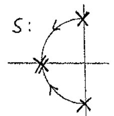
5 → 6

ERSATZSCHALTBILD:



CHAR. GL: $1 + sRC + s^2LC = 0$

$$Z(s) = R + \frac{1}{sC} + sL = \frac{1 + sRC + s^2LC}{sC}$$



REELLER DOPPELPOL BEI: $(RC)^2 = 4LC$

$$R^2 = 4\,L/C \rightarrow \underline{\underline{R_D}} = 2\sqrt{\frac{L_U}{C_U}} = 2 \cdot Z_0 = 2 \cdot 20\Omega = \underline{\underline{40\Omega}}$$

ABBAU VON $\Delta U = Z_0 \cdot I_0$ ÜBER DIODE D FÜHRT AUF $\Delta Q = C \cdot \Delta U$

LADUNGSABBAU JE KOMMUTIERUNG:

$$I_D = \overline{i_D} = \frac{\Delta Q}{T} = \Delta Q \cdot f = C \cdot \Delta U \cdot f$$

SCHALTFREQUENZ: $f = 1kHz$

$$I_D = C \cdot Z_0 \cdot I_0 \cdot f = 1\mu F \cdot 20\Omega \cdot 15A \cdot 1kHz$$

$$\underline{\underline{I_D = 0{,}3A}}$$