

Übungsunterlagen zur Vorlesung

ELEKTROENERGIESYSTEME

Sommersemester 2020

Version 1.0

Terminübersicht der Übungen im Sommersemester 2020:

	Übungstermin	Themenschwerpunkt	Übungsaufgaben
1.	Do, 14.05.2020	Komplexe Wechselstromrechnung/ 3-phasige Schaltungen	A1 – A4
2.	Do, 28.05.2020	Wanderwellen	A5 – A6
3.	Do, 04.06.2020	Netzwerkanalyse	A7 – A9
4.	Mi, 10.06.2020	Magnetischer Kreis	A10 – A11
5.	Do, 02.07.2020	Synchrongeneratoren	A12 – A13
6.	Do, 09.07.2020	Transformatoren	A14 – A16

1. Aufgabe: Unsymmetrische Last am Drehstromnetz

Ein Ingenieur betreibt am Drehstromnetz an einer Phase eine ohmsche Last (G) und an der zweiten Phase eine kapazitive Last (C) (Abbildung 1). Er weiß, dass bei unsymmetrischer Belastung des Drehstromnetzes üblicherweise über den Sternpunkt N ein Strom I_M in den Sternpunkt M fließt (vorausgesetzt ein Nullleiter ist vorhanden). Durch geschickte Wahl der Admittanz $\underline{Y}_T$ in der dritten Phase kann dieser Strom I_M zum Verschwinden gebracht werden. Helfen Sie dem Ingenieur bei seinen folgenden Berechnungen!

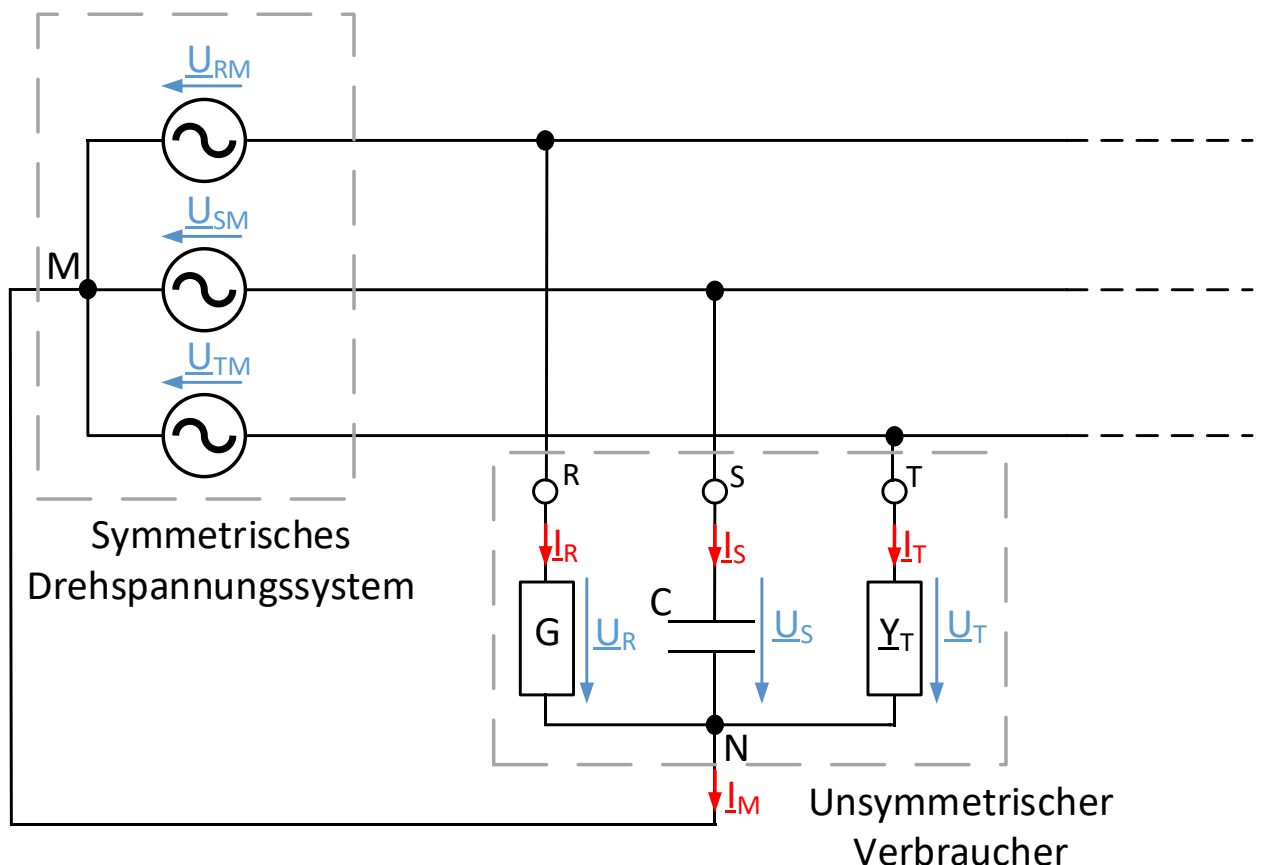


Abbildung 1a: Unsymmetrischer Verbraucher am Drehstromnetz – mit Nullleiter

- Berechnen Sie den Strom I_M für die in Abbildung 1a gegebene Last bei Anschluss an ein symmetrisches Drehspannungssystem.
- Berechnen Sie die erforderliche Admittanz $\underline{Y}_T$, damit der Strom I_M zu Null wird. Bringen Sie das Ergebnis in die Form $\underline{Y}_T = a + j \cdot b$.
- Überlegen Sie sich eine einfache Schaltung, mit der Sie diese Admittanz realisieren können und geben Sie die notwendigen Bauelemente an.

- d. Nun wird die Verbindung zwischen M und N geöffnet (Kein Nullleiter mehr vorhanden). Bestimmen Sie die Spannung $\underline{U}_{NM}$ in Abhängigkeit von $\underline{Y}_R$, $\underline{Y}_S$ und $\underline{Y}_T$. Welchen Wert nimmt $\underline{U}_{NM}$ an, wenn der Strom $\underline{I}_M$ bei geschlossener Verbindung 0 war (Auslegung von $\underline{Y}_T$ nach Aufgabenteil b).

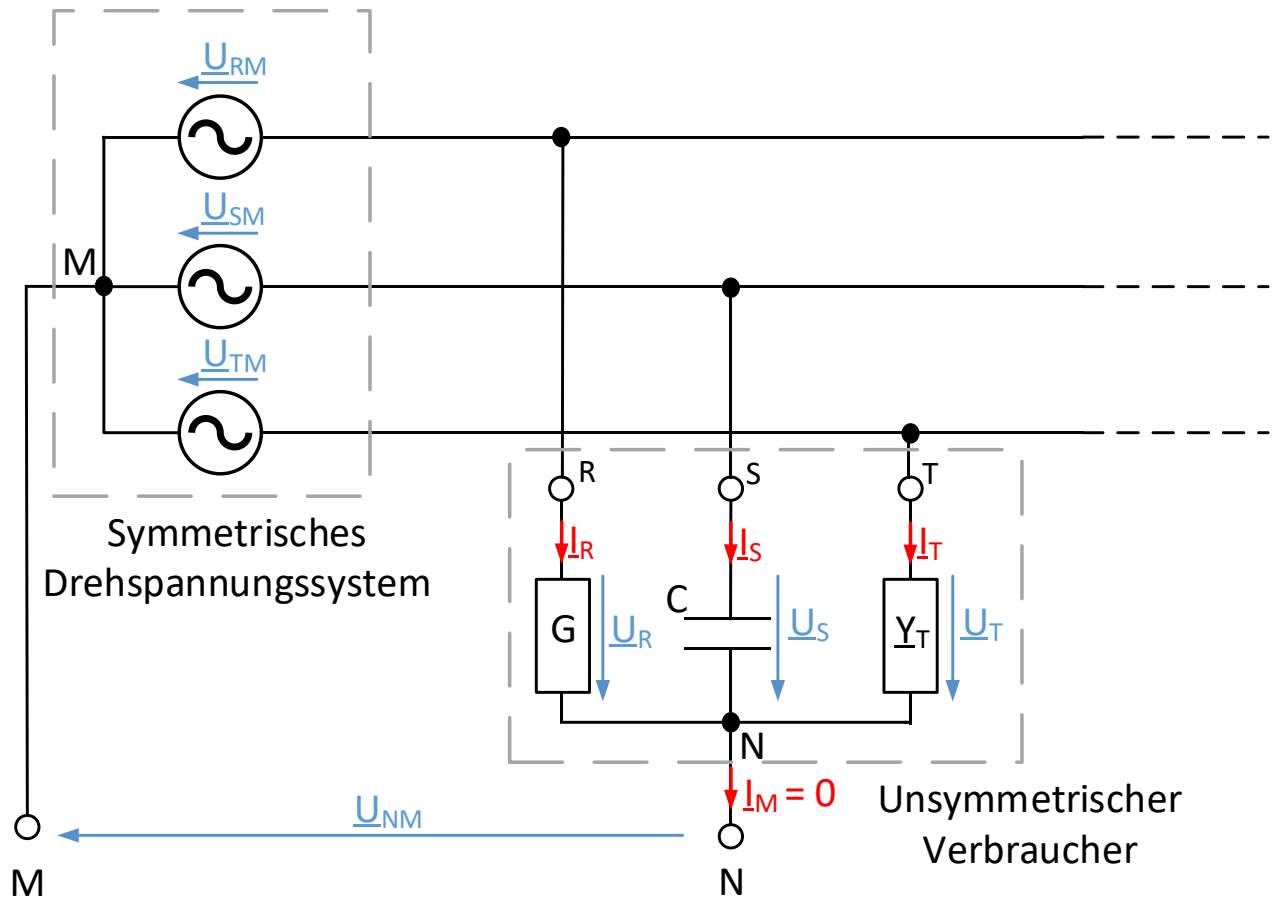


Abbildung 1b: Unsymmetrischer Verbraucher am Drehstromnetz – ohne Nullleiter

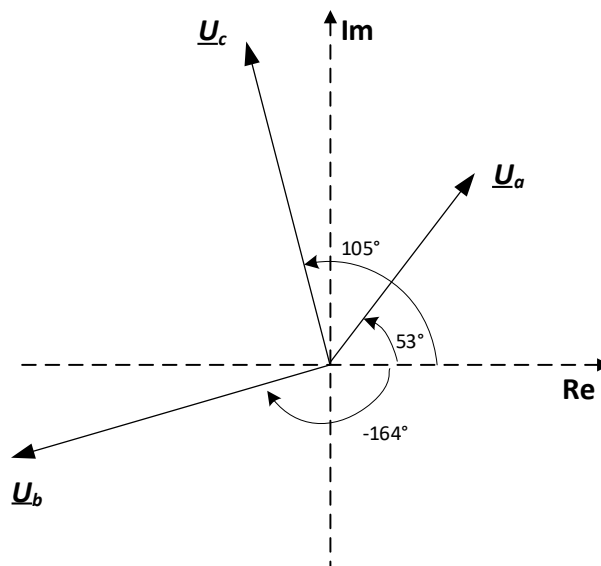
2. Aufgabe: Symmetrische Komponenten

Ein schlecht konfigurierter Umrichter stellt an seinen Klemmen a, b und c eine unsymmetrische Spannung. Für die Spannungen gilt:

$$\underline{U}_a = 250V e^{j53^\circ} e^{j\omega t}$$

$$\underline{U}_b = 350V e^{-j164^\circ} e^{j\omega t}$$

$$\underline{U}_c = 350V e^{j105^\circ} e^{j\omega t}$$



- Berechnen Sie das Mit-, Gegen- und Nullsystem der Spannung $\underline{U}_a$
- Berechnen Sie das Mit-, Gegen- und Nullsystem der Spannung $\underline{U}_b$ und $\underline{U}_c$
- Zeigen Sie grafisch, dass sich der Spannungszeiger $\underline{U}_a$ als vektorielle Summe aus seinem Mit-, Gegen- und Nullsystem zusammensetzt

3. Aufgabe: Kapazitiver Spannungswandler

Kapazitive Spannungswandler dienen der Messung hoher Spannungen in Energieversorgungsnetzen und stellen eine Kombination aus kapazitiver Spannungsteilung und transformatorischer Spannungswandlung dar (Abbildung 3). Sie sind kostengünstiger als reine induktive Spannungswandler.

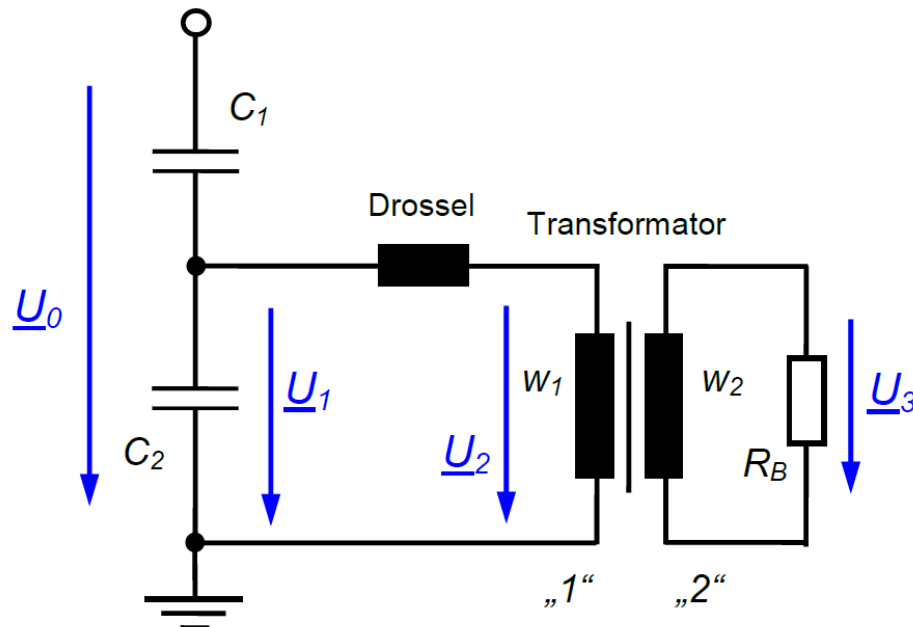


Abbildung 3: Schaltung eines kapazitiven Spannungswandlers, belastet mit einer Bürde R_B

- Der Transformator kann als idealer Transformator betrachtet werden. Berechnen Sie mit diesem Ansatz die Spannung $\underline{U}_2$ als Funktion der Spannung $\underline{U}_3$ und der Windungszahlen $w_1/w_2 = \ddot{u}$ sowie die auf die Primärseite (Index „1“) des Transformators transformierte Impedanz $\underline{Z} = R_B'$.
- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der Anordnung gemäß Abbildung mit der auf der Primärseite des Transformators wirksamen Impedanz $\underline{Z} = R_B'$. Berücksichtigen Sie, dass die Drossel durch ihren Wicklungswiderstand R_D und ihre Induktivität L_D wirkt.
- Berechnen Sie die Übertragungsfunktionen $\underline{E}_1(\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_0}$ und $\underline{E}_2(\omega) = \frac{\underline{U}_3}{\underline{U}_0}$.
- Wie muss die Drossel L_D gewählt (abgeglichen) werden, damit die Übertragungsfunktion $\underline{E}_1(\omega)$ rein reell wird? Bestimmen Sie $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ für diesen Fall.
- Üblicherweise ist der Wicklungswiderstand R_D der Drossel gegenüber dem auf der Primärseite des Transformators (Index „1“) wirksamen ohmschen Widerstand (Impedanz $\underline{Z}$) vernachlässigbar. Bestimmen Sie $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ für diesen Fall unter der Voraussetzung, dass $\underline{E}_1(\omega)$ und $\underline{E}_2(\omega)$ rein reell werden, d. h., dass die unter (d.) gefundene Abgleichbedingung für L_D erfüllt ist.

4. Aufgabe: Bandpass

Am Eingang des in Abbildung 4 dargestellten Vierpols wirkt die eingeprägte Spannung $\underline{U}_1$, als Folge tritt am Lastwiderstand R_2 die Spannung $\underline{U}_2$ auf. Untersuchen Sie schrittweise das Übertragungsverhalten in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω , d. h. die Eigenschaften der Übertragungsfunktion $\underline{E}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$.

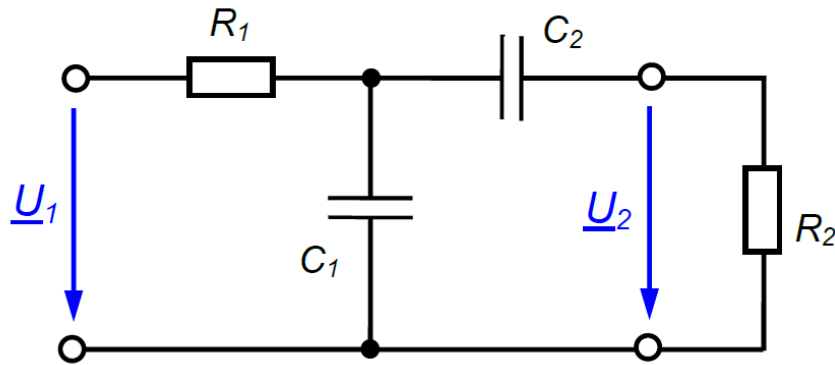


Abbildung 4: Schaltung eines passiven Bandpasses

- Berechnen Sie $\underline{E}(\omega) = \underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)$.
- Berechnen Sie $|\underline{E}(\omega)| = |\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)|$ und $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$.
- Bestimmen Sie die Kreisfrequenz ω_0 , bei der $|\underline{E}(\omega)|$ ein Maximum annimmt. Wie groß ist dieser Maximalwert? Welche Werte nimmt $|\underline{E}(\omega)|$ bei $\omega = 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ an?
- Skizzieren Sie die Funktion $|\underline{E}(\omega)|$ mit Hilfe der Ergebnisse aus c).
- Begründen Sie mit physikalischen Überlegungen anhand des Schaltbildes, warum sehr niedrige und sehr hohe Frequenzen nicht übertragen werden.
- Skizzieren Sie $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\}$ als Funktion von ω und geben Sie die Werte von φ bei $\omega = 0$ und $\omega \rightarrow \infty$ an. Bei welcher Kreisfrequenz wird $\varphi = \arg\{\underline{U}_2(\omega)/\underline{U}_1(\omega)\} = 0$?

5. Aufgabe: Wanderwellenphänomene in Energienetzen

Beim Zuschalten eines Teilnetzabschnitts sind Wanderwellenvorgänge unvermeidlich. Besonders hinsichtlich der auftretenden Überspannungen sind diese Effekte bereits im Netzplanungsprozess detailliert zu beachten. Gehen Sie davon aus, dass der hier betrachtete einlaufende Spannungsimpuls mit guter Näherung durch eine Sprungfunktion beschrieben werden kann:

$$u_0(t) = U_0 \cdot \sigma(t) .$$

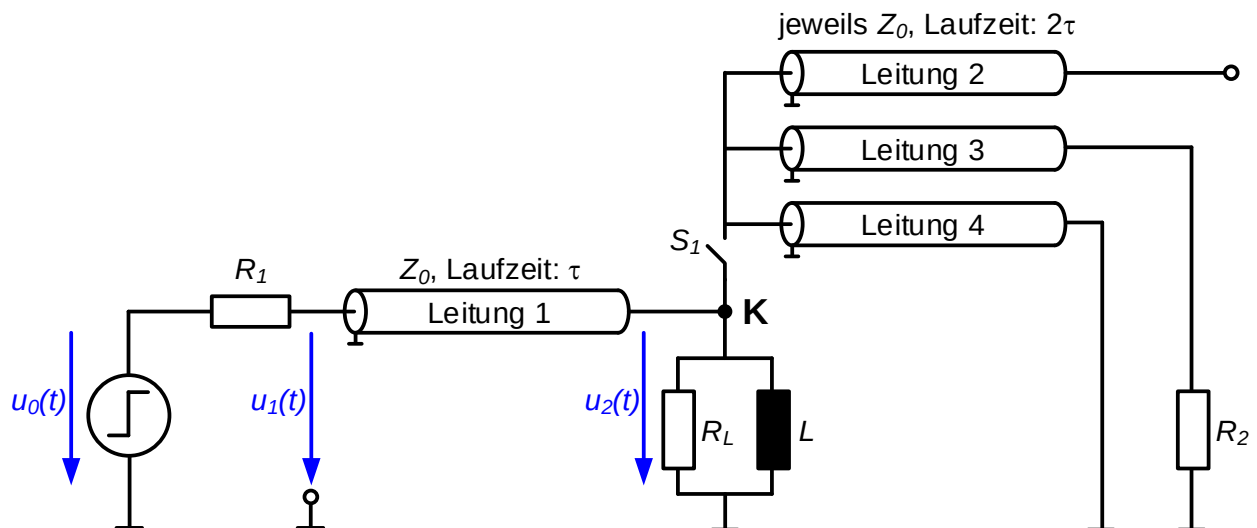


Abbildung 5: Sammelschiene mit mehreren Verzweigungen

- Wie muss der Widerstand R_1 gewählt werden, damit die zurücklaufende Wanderwelle an R_1 vollständig absorbiert wird?
- Geben Sie die Zeitfunktion der Spannungswelle $u_2(t)$ bei geöffnetem Schalter S_1 an (nur R_L und L wirksam). Stellen Sie hierzu das Wellenersatzschaltbild auf und nutzen Sie folgende Korrespondenzen:

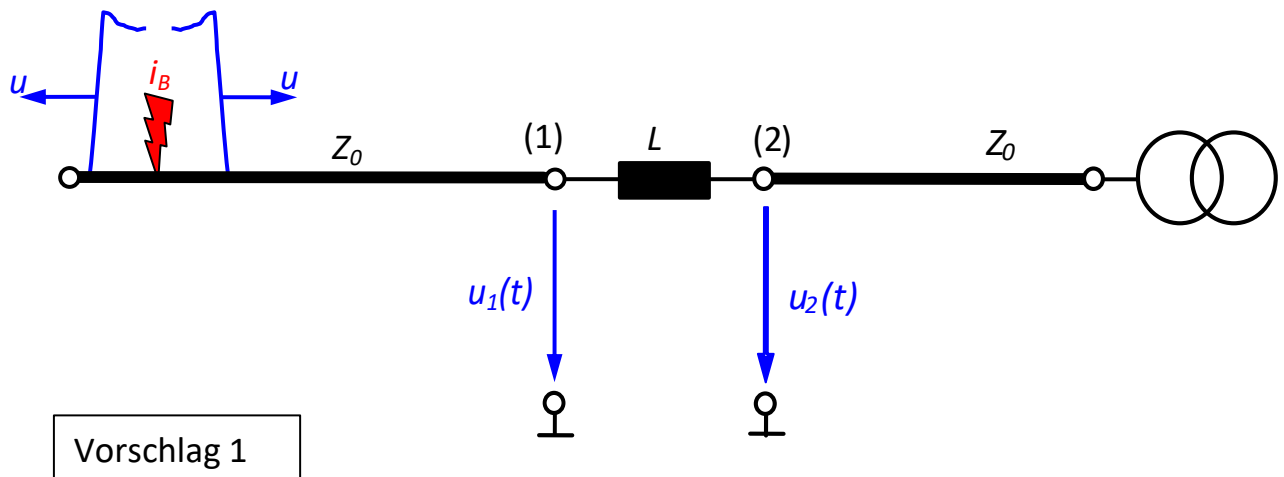
$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}, \quad \mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}\} = \frac{1}{p + \alpha},$$

wobei p die Variable im Bildbereich ist, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

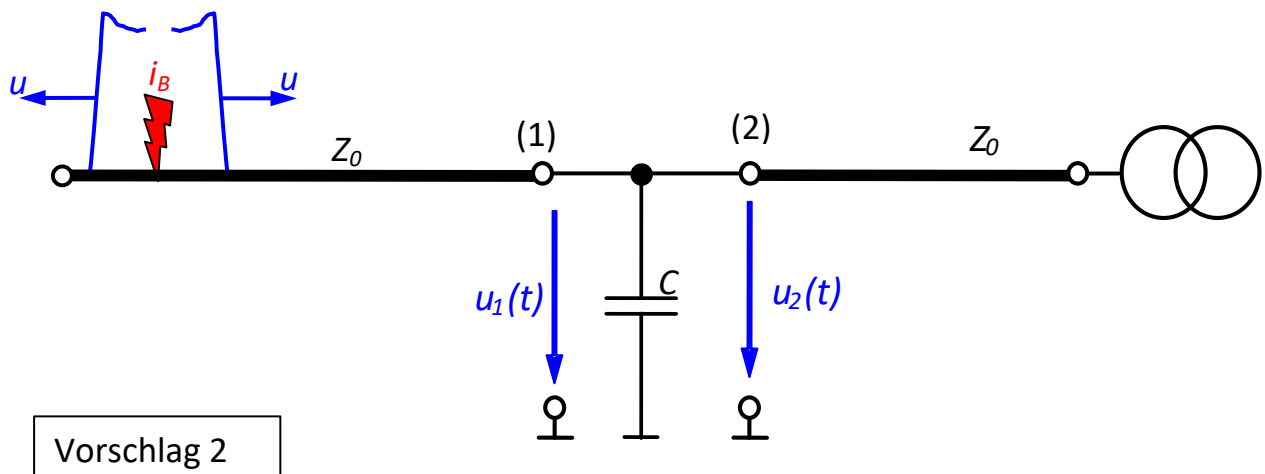
- Bestimmen Sie die Zeitfunktion der Spannung $u_2(t)$, bei geschlossenem Schalter S_1 im Zeitintervall von 0 bis 4τ ab Eintreffen der Wanderwelle an **K**. Stellen Sie hierzu ein Wellenersatzschaltbild auf und nutzen Sie die Korrespondenzen aus Teilaufgabe b).
- Geben Sie qualitativ an, was mit den Wellen an den Enden von Leitung 2-4 passiert und beschreiben Sie wie sich zum Zeitpunkt $t=4\tau$ (nach Eintreffen der ersten Welle an **K**) alle Wellen überlagern.

6. Aufgabe: Schutz eines Transformators vor steiflankigen Wanderwellen

Zwei Ingenieure möchten den Transformator am Ende einer Freileitung (Stichleitung) vor Überspannungen mit hoher Steilheit (dU/dt) schützen. Einer der Ingenieure kommt auf die Idee, eine Drossel in Serie zwischen die beiden Freileitungsabschnitte zu schalten. Beurteilen Sie die Wirksamkeit der Maßnahme und berechnen Sie dazu die Spannung $u_2(t)$, die in die zweite Leitung einläuft und auf den Transformator am Ende der Leitung trifft.



Vorschlag 1



Vorschlag 2

Abbildung 6: Vorschläge zum Schutz des Transformators gegen steile Blitzüberspannungen

- Im Fall eines Blitzeinschlages soll ein Spitzenwert des Blitzstromes i_B von 10 kA und eine Impedanz der Freileitung von 350Ω angenommen werden. Berechnen Sie die Amplitude $\hat{U}$ der Spannungswelle u , die sich zu beiden Seiten der Freileitung ausbreitet unter der Annahme, dass sich der Strom hälftig zu beiden Seiten hin gleichmäßig aufteilt.

Die Spannungswelle kann mit guter Näherung durch eine Rechteckspannung

$$u_0(t) = U_0 \cdot \sigma(t)$$

dargestellt werden.

Benutzen Sie die folgenden Korrespondenzen zwischen dem Zeitbereich und den Laplacetransformierten:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t)\} = \frac{1}{p}$$

$$\mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}\} = \frac{1}{(p + \alpha)}$$

$$\mathcal{L}\left\{\sigma(t) \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \mathcal{L}\left\{\frac{1}{\alpha} \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]\right\} = \frac{1}{p \cdot (p + \alpha)}$$

p ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

Da in dieser Anordnung kein Innenwiderstand existiert, rechnen Sie vereinfacht mit $X(p)=1$

- b. Berechnen Sie für den Vorschlag 1 die in die zweite Leitung einlaufende Welle, d. h. die Spannung $u_2(t)$ am Punkt (2).
- c. Berechnen Sie für den Vorschlag 1 die Zeitfunktion der am Punkt (1) reflektierten und in die erste Leitung zurücklaufende Welle.
- d. Der andere Ingenieur schlägt vor, eine Kapazität C zwischen den beiden Leitungen gegen Erde zu schalten (Vorschlag 2). Berechnen Sie hierfür ebenfalls die Spannung $u_2(t)$.
- e. Unter welcher Bedingung sind die beiden Lösungen äquivalent? Welche der beiden Lösungen zum Schutz des Transformators halten Sie trotz der Äquivalenz für günstiger und warum?

7. Aufgabe: Übertragungsverhalten einer Kabeltrasse mit ohmscher Last

Gegeben sei eine Kabeltrasse mit einer rein ohmschen Last. Berechnen Sie das Übertragungsverhalten dieser Anordnung im Laplacebereich $F(p) = U_a(p) / U_e(p)$ mit Hilfe der Maschenstromanalyse. Die Energiespeicher seien zu Beginn der Betrachtung ungeladen. Nutzen Sie hierzu die in Abbildung 7 eingezeichneten Maschenströme I_1 und I_2 .

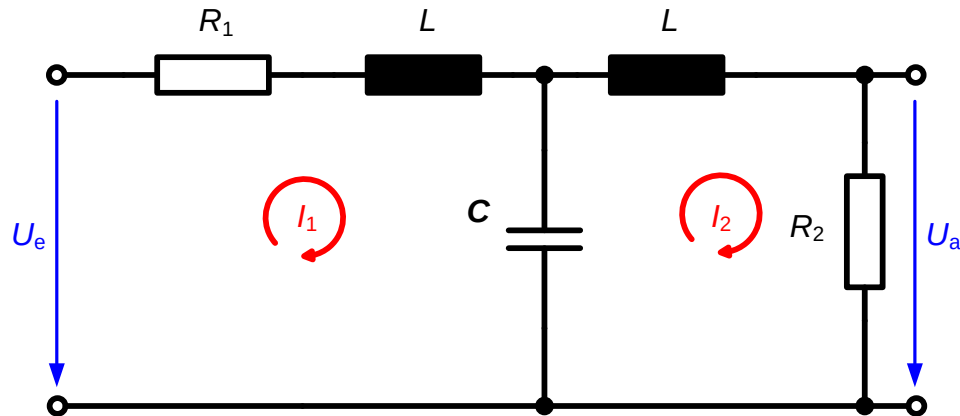


Abbildung 7: Kabeltrasse mit ohmscher Last

- Stellen Sie für die gegebene Anordnung das resultierende Gleichungssystem (bei Anwendung der Maschenstromanalyse) in Matrixform auf.
- Wie lässt sich nun aus den Maschenströmen das Übertragungsverhalten der Anordnung berechnen? Bringen Sie ihr Ergebnis auf die Form $F(p) = \frac{\chi}{p^3\psi + p^2\nu + p\zeta + \kappa}$.

8. Aufgabe: Übertragungsverhalten mit Transformator

Gegeben sei eine Übertragungsstrecke mit Transformator. Die Energiespeicher seien zu Beginn der Betrachtung ungeladen. Nutzen Sie die in Abbildung 8 eingezeichneten Maschenströme i_1 , i_2 und i_3 .

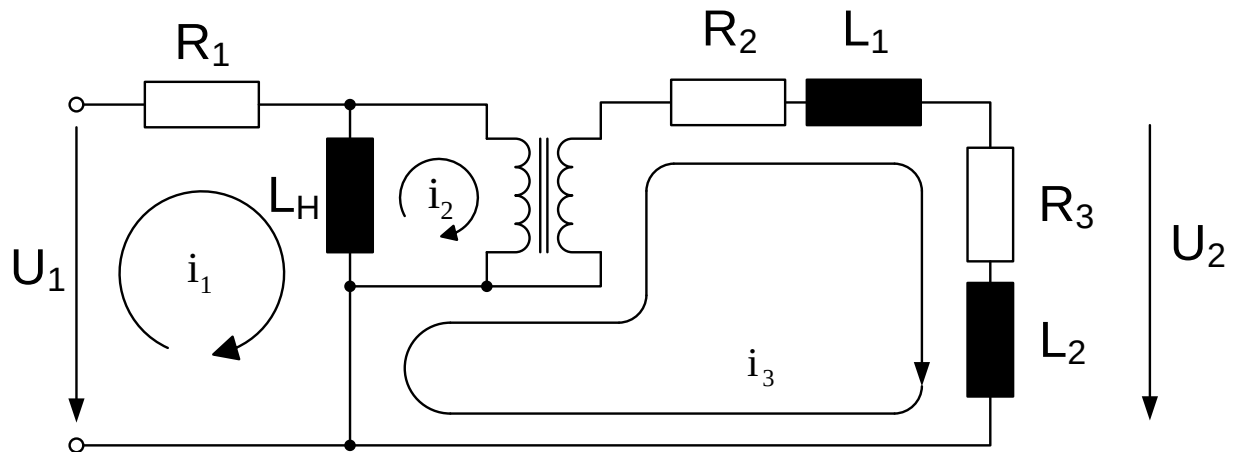


Abbildung 8: Übertragungsstrecke mit Transformator

- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$ im Laplacebereich mit Hilfe der Maschenstromanalyse.
- Berechnen Sie das Übertragungsverhalten $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$ im Laplacebereich mit Hilfe der Knotenpotentialanalyse.

9. Aufgabe: RC-Schaltung, angeregt durch ein Schwingungspaket

Am Eingang der RC-Schaltung gemäß Abbildung 9 wird die in Abbildung 10 dargestellte Spannung $u_1(t)$ angelegt. Die Spannung $u_1(t)$ ist offensichtlich nicht periodisch. Die Zeitfunktion ist eine Kosinusfunktion mit der Periodendauer T_0 , die zum Zeitpunkt $t = 0$ beginnt und zum Zeitpunkt $t = T = n T_0$ mit $n \in \mathbb{N}$ endet

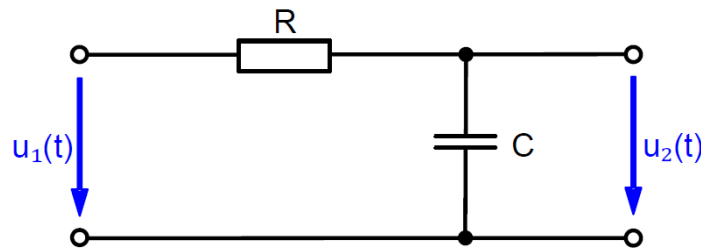


Abbildung 9: RC-Schaltung, angeregt durch die Spannung $u_1(t)$

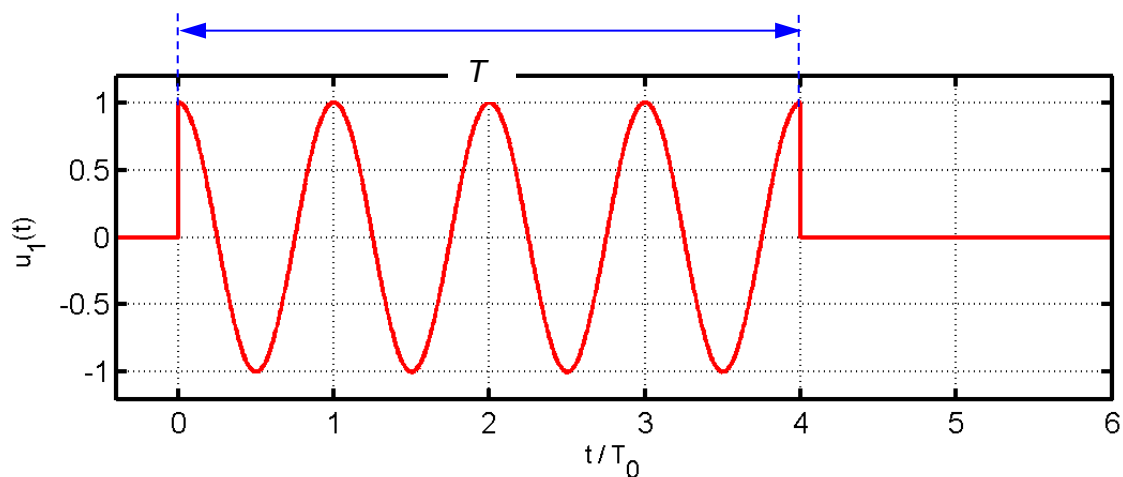


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der anregenden Spannung mit $T = 4 \cdot T_0$

- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $F(p) = U_2(p)/U_1(p)$ der RC-Schaltung für anfänglich leere Energiespeicher.
- Bestimmen Sie die Laplace-Transformierte $U_1(p)$ der Spannung $u_1(t)$.
- Berechnen Sie die Laplace-Transformierte $U_2(p)$ der Ausgangsspannung $u_2(t)$.
- Bestimmen Sie die Zeitfunktion der Ausgangsspannung $u_2(t)$ durch Anwendung der Partialbruchzerlegung bei der Rücktransformation. Benutzen Sie zur Berechnung der Zeitfunktion die folgenden Korrespondenzen:

$$\mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot \cos(\omega_0 t)\} = \frac{p}{p^2 + \omega_0^2} \quad \text{und} \quad \mathcal{L}\{\sigma(t) \cdot \sin(\omega_0 t)\} = \frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}.$$

p ist die Variable im Bildbereich, auch als „komplexe Frequenz“ bezeichnet.

10. Aufgabe: Magnetischer Kreis mit Luftspalt

Gegeben sei der in Abbildung 11 dargestellte magnetische Kreis. Im Luftspalt soll eine Induktion B_L von 0,2 T erreicht werden. Die Stromdichte in der Kupferwicklung soll höchstens $j_{Cu} = 3 \text{ A/mm}^2$ betragen. Der Drahtdurchmesser beträgt $d = 1 \text{ mm}$.

Die Anordnung hat die folgenden Abmessungen: $l_1 = 2 \text{ cm}$, $l_2 = 6 \text{ cm}$, $\delta = 0,2 \text{ cm}$, $d_1 = 1 \text{ cm}$, $d_2 = 2 \text{ cm}$, $d_3 = 1 \text{ cm}$, Breite der Anordnung $b = 2 \text{ cm}$.

Die relative Permeabilität des Eisens kann zu $\mu_r = 2000$ angesetzt werden.

Streuung, Verzerrung der Feldlinien in den Kanten und die Aufweitung des Felds im Luftspalt können vernachlässigt werden.

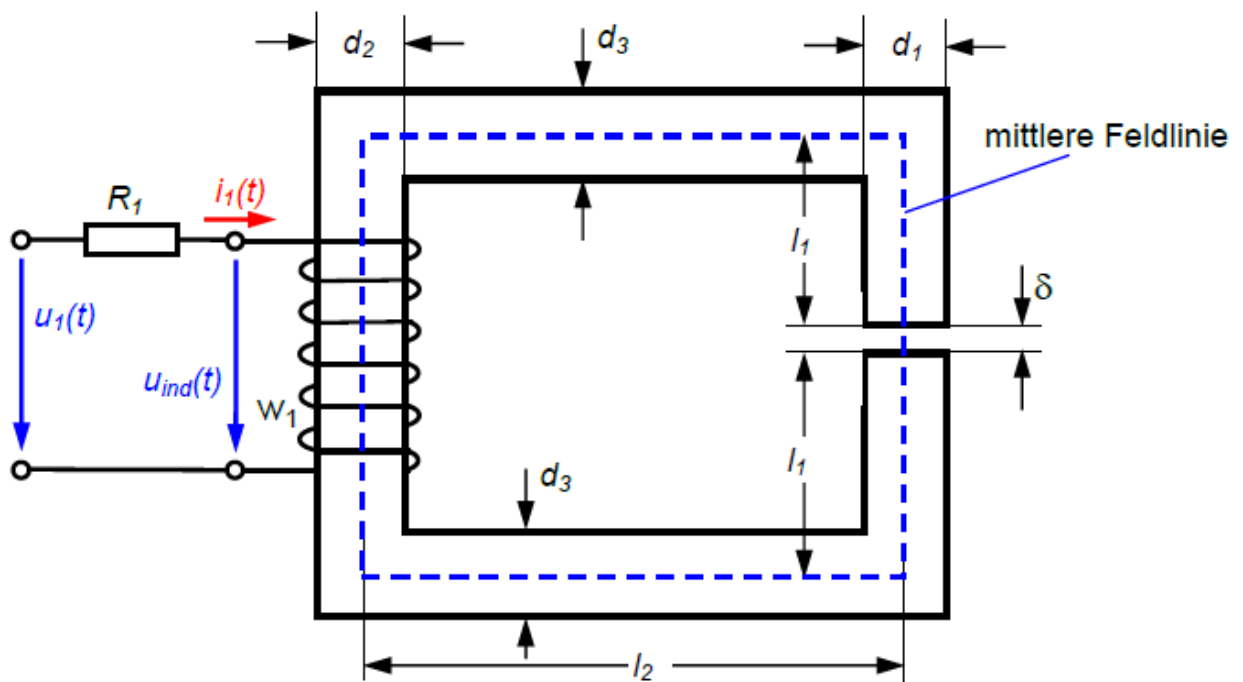


Abbildung 11: Magnetischer Kreis mit unterschiedlichen Geometrieparametern

- Berechnen Sie die einzelnen magnetischen Widerstände der verschiedenen Abschnitte des magnetischen Kreises.
- Berechnen Sie die erforderliche Windungszahl N um bei maximaler Stromdichte in der Kupferwicklung eine Induktion im Luftspalt von mindestens $B_L = 0,2 \text{ T}$ zu erreichen.
- Bestimmen Sie den (analytischen) Zusammenhang zwischen der Induktion B_L , der Stromdichte j_{Cu} in der Wicklung, dem Leiterquerschnitt A_{Cu} , der Windungszahl N und den Geometrieparametern.

11. Aufgabe: Magnetischer Kreis mit Verzweigung und Luftspalt

Gegeben sei der in Abbildung 12 dargestellte magnetische Kreis. Gegeben sind die geometrischen Verhältnisse (h , d , b), die Windungszahlen (N_1 und N_2) und die Ströme (i_1 und i_2) sowie die relative Permeabilität des Eisens (μ_r). Der Querschnitt des Kernmaterials ist quadratisch, d. h. das Maß d gilt auch für die Breite der Anordnung in die Zeichenebene hinein. Streuung, Verzerrung der Feldlinien in den Kanten und die Aufweitung des Felds im Luftspalt können vernachlässigt werden.

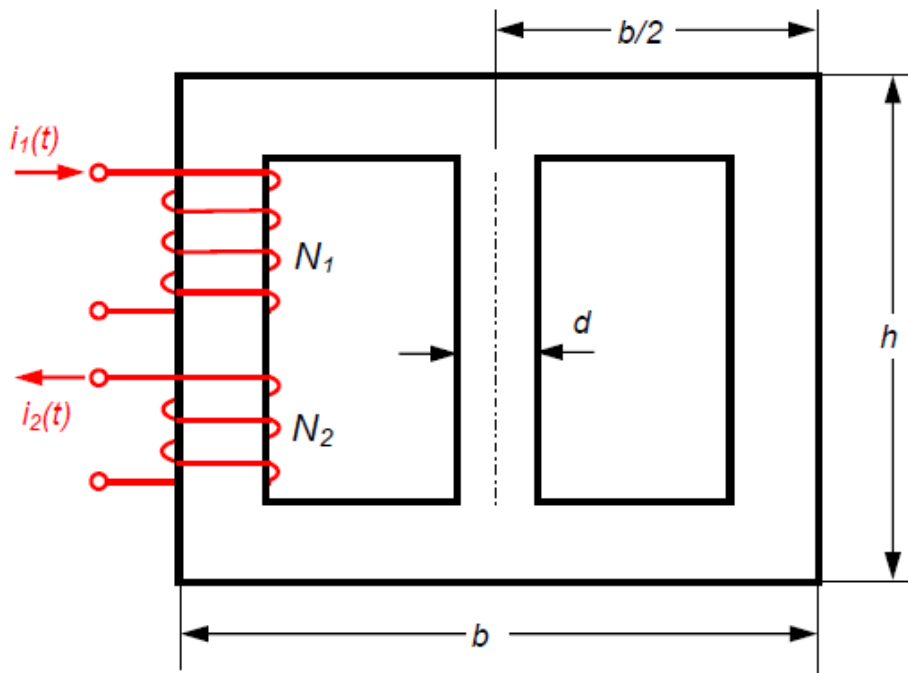


Abbildung 12: Magnetischer Kreis mit Verzweigungen

- Erstellen Sie ein magnetisches Ersatzschaltbild für den magnetischen Kreis und geben Sie die Elemente des magnetischen Kreises an.
- Berechnen Sie die magnetischen Flüsse in den einzelnen Schenkeln sowie die dort herrschenden magnetischen Induktionen.

Nun wird in den dritten Schenkel ein Luftspalt δ eingefügt (Abbildung 13).

- Bestimmen Sie nun die magnetischen Flüsse in den einzelnen Schenkeln. Wie verändert sich qualitativ die Verteilung der magnetischen Flüsse in den Schenkeln, wenn man ein hohes μ_r wählt und zusätzlich den Luftspalt vergrößert.

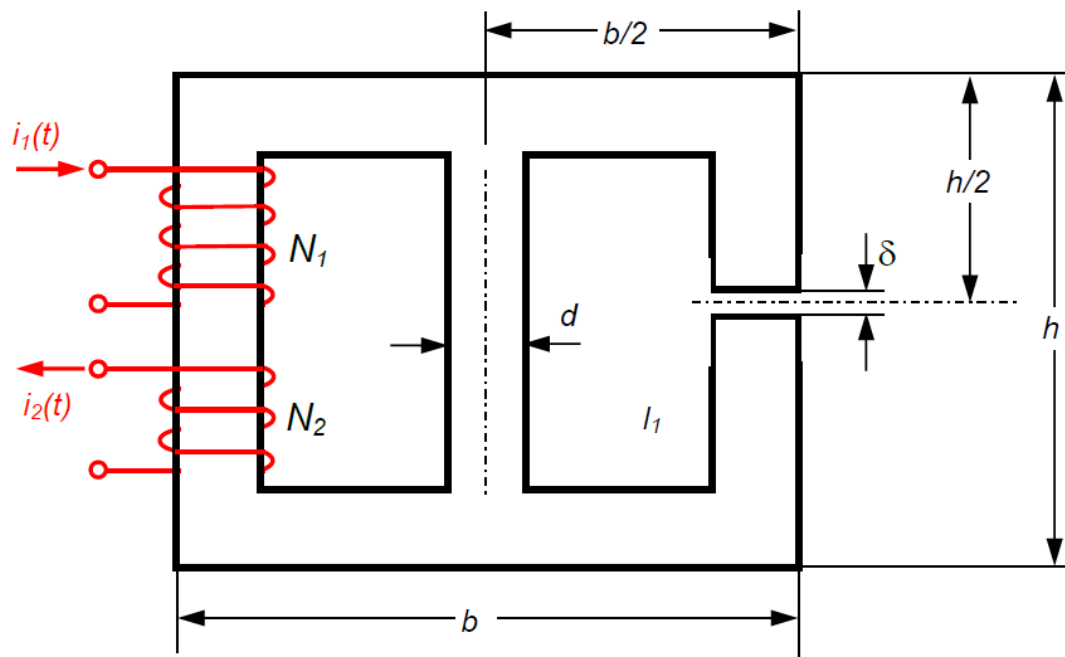


Abbildung 13: Magnetischer Kreis mit Verzweigungen und Luftspalt

12. Aufgabe: Turbogenerator am Netz, verschiedene Betriebszustände

Ein Turbogenerator mit den Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_N = 10,5 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad X_d = 1,18 \, \Omega$$

wird an einem symmetrischen Drehstromnetz mit fester Spannung und fester Frequenz $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$ bei $\cos(\varphi_N) = 0,8$ (induktiv) betrieben. Der ohmsche Widerstand der Statorwicklung sei vernachlässigbar, die Maschine sei verlustfrei.

- a. Berechnen Sie für den Nennbetrieb die Polradspannung nach Betrag und Phase und zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerdiagramm. Legen Sie dazu die Klemmenspannung $\underline{U}_1$ in die reelle Achse.
- b. Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistung, welche die Maschine im Nennbetrieb an den Klemmen abgibt.
- c. Ausgehend vom Nennbetrieb wird die Dampfung der Turbine so gedrosselt, dass sie nur noch 75 % ihres ursprünglichen Drehmomentes abgibt. Berechnen Sie nun die von der Maschine abgegebene komplexe Scheinleistung.
- d. Nun wird – ausgehend vom Nennbetrieb – der Erregerstrom so verkleinert, dass die Polradspannung nur noch 75 % ihres ursprünglichen Wertes beträgt. Um welchen Prozentsatz muss der Erregerstrom verringert werden? Berechnen Sie nun die von der Maschine abgegebene komplexe Scheinleistung. Überlegen Sie zunächst, welche Größen sich ändern und welche ausgehend vom Nennbetrieb unverändert bleiben, wenn nur der Erregerstrom des Generators verändert wird.

13. Aufgabe: Turbogenerator am Netz, Nennbetrieb und Phasenschieberbetrieb

Ein Turbogenerator mit den Daten:

$$S_N = 125 \text{ MVA} \quad U_N = 10,5 \text{ kV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad X_d = 1,59 \, \Omega$$

wird an einem symmetrischen Drehstromnetz mit fester Spannung und fester Frequenz $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$ bei $\cos(\varphi_N) = 0,8$ (induktiv) betrieben. Der ohmsche Widerstand der Statorwicklung sei vernachlässigbar, die Maschine sei verlustfrei.

- a. Berechnen Sie die Polradspannung nach Betrag und Phase und zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerdiagramm. Legen Sie dazu die Klemmenspannung $\underline{U}_1$ in die reelle Achse.
- b. Ausgehend vom Nennbetriebspunkt wird die Polradspannung verringert. Bei welcher Polradspannung gibt der Generator nur Wirkleistung ab und wie groß ist dann der Statorstrom?
- c. Ausgehend vom Betriebspunkt aus b. wird die Polradspannung weiter gesenkt. Bei welcher Polradspannung wird die Stabilitätsgrenze erreicht und wie groß ist dann der Statorstrom?
- d. Wie groß ist die größte induktive Blindleistung, welche die Maschine im Phasenschieberbetrieb abgeben kann? Der Erregerstrom soll dabei derselbe sein, wie im Nennbetrieb.
- e. Wie groß ist die größte kapazitive Blindleistung, welche die Maschine im Phasenschieberbetrieb abgeben kann?

14. Aufgabe: Betrieb eines Drehstromtransformators

Ein Drehstromtransformator mit den folgenden Daten:

$S_N = 2,5 \text{ MVA}$ $U_{OS, N} = 20 \text{ kV}$ $U_{US, N} = 0,4 \text{ kV}$ $f = 50 \text{ Hz}$ Schaltgruppe Dyn5 $u_k = 6\%$

Leerlaufverluste bei Nennspannung: 3,8 kW

Kurzschlussverluste bei Nennstrom: 26,5 kW

- a. Berechnen Sie die Nennströme auf der Ober- und Unterspannungsseite.
- b. Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Transformators bei Volllast und $\cos \varphi = 0,8$ (induktiv).
- c. Bei welcher Belastung tritt bei $\cos \varphi = 0,8$ (induktiv) der größte Wirkungsgrad auf und wie groß ist er?
- d. Geben Sie die Längsimpedanz des Transformators im einphasigen Ersatzschaltbild bezogen auf die 20-kV-Seite an.
- e. Bestimmen Sie die Längsimpedanz des Transformators im einphasigen Ersatzschaltbild bezogen auf die 400-V-Seite.

15. Aufgabe: Netzbetrieb mit parallel geschalteten Transformatoren

Ein dreiphasiger 50-Hz-Generator speist über die zwei parallel geschalteten Drehstromtransformatoren T1 und T2 eine Leitung und direkt angeschlossene Verbraucher. Am Ende der Leitung befindet sich ein Transformator, der die 220 kV auf 30 kV übersetzt.

Die Transformatoren T1 und T2 haben folgende Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_{OS, N} = 220 \text{ kV} \quad U_{US, N} = 10 \text{ kV} \quad u_{k,x} = 10\% \quad u_{k,r} = 0$$

Der Transformator T3 hat folgende Daten:

$$S_N = 150 \text{ MVA} \quad U_{OS, N} = 220 \text{ kV} \quad U_{US, N} = 30 \text{ kV} \quad u_{k,x} = 10\% \quad u_{k,r} = 0$$

Die Transformatoren haben die Schaltgruppe YNy0.

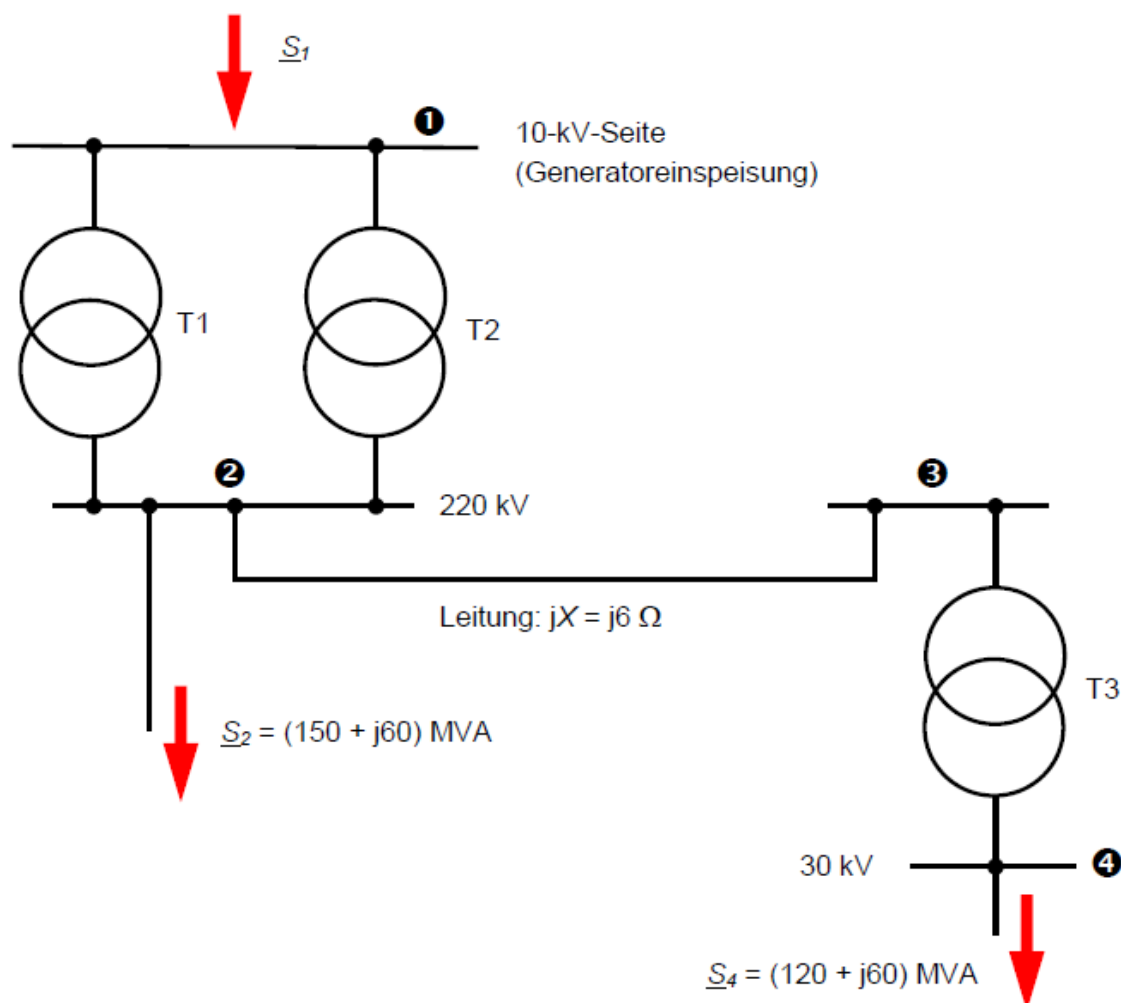


Abbildung 14: Netzausschnitt, bestehend aus einer Einspeisung, parallel geschalteten Transformatoren, einer Leitung und einem weiteren Transformator

Die Spannung an der Unterspannungsseite des Transformators T3 soll genau 30 kV betragen. Wie groß muss dazu die Spannung an der Einspeisestelle (10-kV-Ebene) sein und welche Leistung muss der Generator einspeisen?

- a. Berechnen Sie zunächst die auf die 220-kV-Ebene bezogenen Längsimpedanzen der Transformatoren.
- b. Zeichnen Sie das auf die 220-kV-Ebene bezogene einphasige Ersatzschaltbild der Anordnung.
- c. Berechnen Sie den Strom am Knoten 4 und die Spannung auf der 220-kV-Seite am Knoten 3.
- d. Berechnen Sie den Strom $\underline{I}_2$ aufgrund der Last $\underline{S}_2$ und schließlich die Spannung $\underline{U}_1$ am Knoten 1 auf der 220-kV-Seite.
- e. Berechnen Sie die Leistung $\underline{S}_1$, die am Knoten 1 eingespeist werden muss. Prüfen Sie Ihr Ergebnis, indem Sie die Wirkleistungen der Lasten an Knoten 2 und Knoten 4 betrachten.

16. Aufgabe: Parallelschaltung von Transformatoren in einem Kraftwerk

In einem Kraftwerk ist einer von zwei parallel geschalteten Maschinentransformatoren ausgefallen. Die Maschinentransformatoren haben folgende Daten:

$$S_{N1} = 740 \text{ MVA} \quad U_{OS1, N} = 430 \text{ kV} \quad U_{US1, N} = 27 \text{ kV} \quad u_{k1, x} = 15,5\% \quad u_{k1, r} = 0$$

Aus einem anderen Kraftwerk wird ein Reservetransformator mit den folgenden Daten beschafft und anstatt des defekten Transformators parallel zu dem verbliebenen Transformator mit den obigen Daten betrieben. Die Daten des Reservetransformators sind:

$$S_{N2} = 970 \text{ MVA} \quad U_{OS2, N} = 425 \text{ kV} \quad U_{US2, N} = 27 \text{ kV} \quad u_{k2, x} = 16,6\% \quad u_{k2, r} = 0$$

Beide Transformatoren haben die Schaltgruppe YNd5.

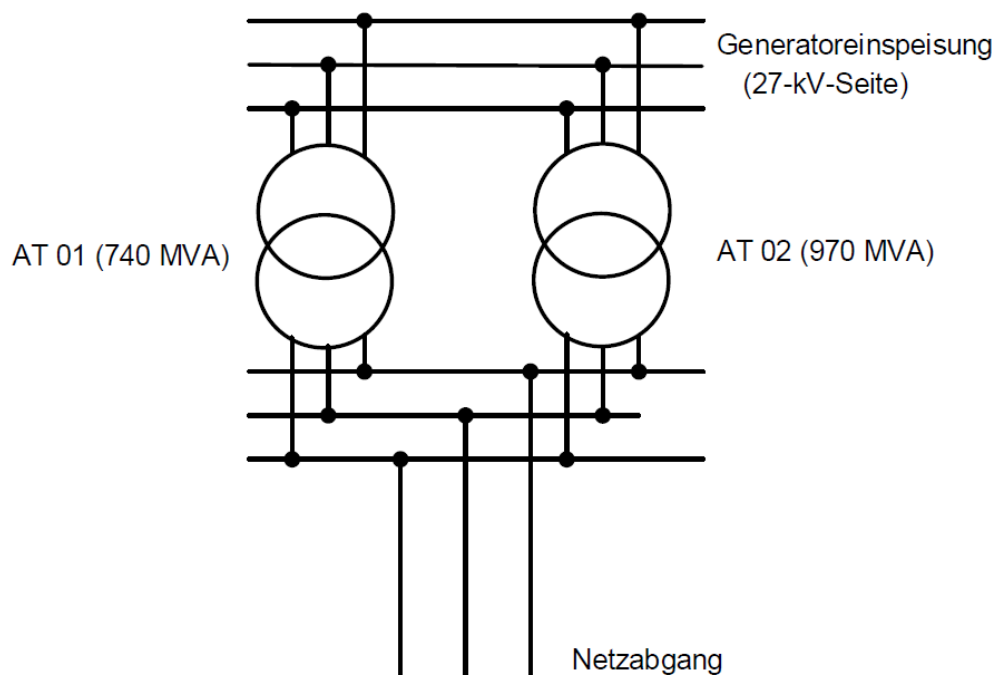


Abbildung 15: Schaltung der parallel betriebenen Maschinentransformatoren AT 01 und AT 02

- Berechnen Sie das Windungszahlverhältnis der beiden Transformatoren näherungsweise aus dem Verhältnis der Bemessungsspannungen.
- Berechnen Sie die Kurzschlussimpedanzen der beiden Transformatoren bezogen auf die jeweilige Oberspannungsseite.
- Zeichnen Sie ein einphasiges Ersatzschaltbild der parallel geschalteten Transformatoren, das auf die Oberspannungsseite bezogen ist. Die Anordnung sei noch nicht mit dem Netz verbunden.

Hinweis:

Berücksichtigen Sie dabei die komplexen Übersetzungen der beiden Transformatoren sowie die Tatsache, dass der Generator den beiden Transformatoren an der Unterspannungsseite dieselbe Spannung $\underline{U}_G = U_G$ zur Verfügung stellt.

- d. Berechnen Sie den auf die Oberspannungsseite bezogenen Kreisstrom zwischen den beiden Transformatoren mit Hilfe des einphasigen Ersatzschaltbildes, falls der Generator eine (verkettete) Spannung von $\underline{U}_G = U_G = 25,5 \text{ kV}$ liefert. Die Anordnung sei noch nicht mit dem Netz verbunden.
- e. In welchem Verhältnis steht der in d. berechnete Kreisstrom zum Leiterstrom des Transformators AT 01, wenn der Generator eine Spannung von $\underline{U}_G = U_G = 25,5 \text{ kV}$ liefert und der Transformator seine Nennleistung zwischen Unter- und Oberspannungsseite überträgt. Halten Sie demnach den Kreisstrom für kritisch?