

PSS[®] SINCAL 10.5

Oberschwingungen

**Berechnung von Oberschwingungen und der Rundsteuerung
in elektrischen Netzen**

Herausgegeben von
SIEMENS AG
Freyeslebenstraße 1, 91058 Erlangen

IC SG SE PTI SW

Vorbemerkung

Die PSS SINCAL Handbücher bestehen aus drei Teilen:

- Benutzerhandbuch PSS SINCAL Bedienung
- Fachhandbücher für Elektronetze und Strömungsnetze
- Systemhandbuch Datenbankbeschreibung

Allgemeine Grundsätze der Bedienung und der Grafikoberfläche von PSS SINCAL können dem **Benutzerhandbuch PSS SINCAL Bedienung** entnommen werden.

Die **Fachhandbücher für Elektronetze** beinhalten detaillierte Beschreibungen der verschiedenen Berechnungsverfahren für Elektronetze (Lastfluss, Kurzschluss, etc.) sowie deren Eingabedaten.

Die **Fachhandbücher für Strömungsnetze** beinhalten detaillierte Beschreibungen der verschiedenen Berechnungsverfahren für Strömungsnetze (Wasser, Gas und Wärme/Kälte) sowie deren Eingabedaten.

Das **Systemhandbuch Datenbankbeschreibung** beinhaltet eine vollständige Beschreibung der Datenmodelle für Elektronetze und Strömungsnetze.

Urheber- und Verlagsrechte

Das Handbuch und alle in ihm enthaltenen Informationen und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

Die Rechte, insbesondere die Rechte zur Veröffentlichung, Wiedergabe, Übersetzung, zur Vergabe von Nachdrucken, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken, Fotokopien und Mikrokopien liegen bei SIEMENS.

Für jede Wiedergabe oder Verwendung außerhalb der durch das Urhebergesetz erlaubten Grenzen ist eine vorherige schriftliche Zustimmung von SIEMENS unerlässlich.

Gewährleistung

Trotz sorgfältiger Ausarbeitung könnten in diesem Handbuch Fehler enthalten sein. Es wird keinerlei Haftung für Fehler und deren Folgen übernommen. Änderungen des Textes und der Funktion der Software werden im Rahmen der Pflege ständig durchgeführt.

1.	Einleitung Oberschwingungen und Rundsteuerung	1
2.	Oberschwingungen	3
2.1	Allgemeines zur Oberschwingungsberechnung	3
2.2	Datenerfassung	5
2.3	Sortieren nach Ordnungszahlen	5
2.4	Festlegung der Eliminationsreihenfolge	6
2.5	Berechnung der aktuellen Admittanzwerte	6
2.5.1	Allgemeine Ersatzschaltbilder und Formelzeichen	7
2.5.2	Leitungen mit Wellenwiderstandsgleichungen	8
2.5.3	Leitungen mit Koppeldaten	10
2.5.4	Leitungen, Spulen und Längselemente (R und X in Reihe geschaltet!)	11
2.5.5	Sperrkreis – RLC parallel	12
2.5.6	Sperrkreis – RLC seriell	13
2.5.7	Hochpass R	14
2.5.8	Hochpass C	15
2.5.9	Längskondensatoren	16
2.5.10	Induktive Querzweige	16
2.5.11	Kapazitive Querzweige	17
2.5.12	Querzweige über Wertepaare R, X (R und X in Reihe)	17
2.5.13	Saugkreis – Güte seriell	18
2.5.14	Saugkreis – RLC seriell	18
2.5.15	Saugkreis – RLC parallel	19
2.5.16	Tonfrequenzsperre	20
2.5.17	Einspeisungen (R und X in Reihe)	21
2.5.18	Zweiwicklungstransformatoren	22
2.5.19	Dreiwicklungstransformatoren	24
2.5.20	Oberschwingungs-Resonanznetz	27
2.5.21	Beschreibung der Admittanzvektoren	34
2.6	Besetzung der Knotenpunktadmittanzmatrix	35
2.7	Dreiecksfaktorisierung	35
2.8	Berechnung der Spannungs- und Oberschwingungsstromverteilung	36
2.9	Berechnung von Frequenzgängen	37

Inhalt

2.10	Ortskurven	38
2.11	Periodische Schwingungen beliebiger Kurvenform	40
2.11.1	Fourier-Reihe	40
2.11.2	Darstellung nichtsinusförmiger Vorgänge	41
2.12	Ergebnisaufbereitung	43
3.	Rundsteuerung	44
3.1	Nachbildung der Verbraucher	46
3.2	Nachbildung von Senderankopplungen	48
3.2.1	Serienankopplung	48
3.2.2	Parallelankopplungen	49
3.3	Nachbildung von RLC-Elementen	50
3.3.1	Quer RLC-Kreis – Serienschaltung	50
3.3.2	Quer RLC-Kreis – Parallelschaltung	51
3.3.3	Quer RLC-Kreis – Hochpass R	51
3.3.4	Quer RLC-Kreis – Hochpass C	52
3.3.5	Längs RLC-Kreis – Serienschaltung	52
3.3.6	Längs RLC-Kreis – Parallelschaltung	53
3.3.7	Längs RLC-Kreis – Tonfrequenzsperre	53
3.4	Nachbildung von Einspeisungen und Asynchronmotoren	54
3.5	Nachbildung aller übrigen Zweigelemente	54
3.6	Technische Gegebenheiten und Vorbedingungen	55
3.6.1	Ankopplungsprinzip	55
3.6.2	Rundsteuerfrequenz	56
3.6.3	Frequenzfilter	56
3.6.4	Rundsteuer-Berechnung	56
4.	Anwendungsbeispiel für Oberschwingungen	57
4.1	Voreinstellen der Berechnungsparameter	58
4.2	Erfassen von Frequenzgängen	59
4.3	Festlegen des Frequenzverhaltens der Netzelemente	60
4.4	Definieren von Strom- und Spannungsquellen	61
4.5	Zuordnen von Strom- und Spannungsquellen	61

4.6	Starten der Berechnung	62
4.7	Darstellen und Auswerten der Ergebnisse	62

1. Einleitung Oberschwingungen und Rundsteuerung

PSS SINICAL bietet wirkungsvolle Werkzeuge zur Bestimmung des frequenzabhängigen Betriebsverhaltens elektrischer Netze.

Dieses Handbuch enthält folgende Kapitel:

- [Oberschwingungen](#)
- [Rundsteuerung](#)
- [Anwendungsbeispiel für Oberschwingungen](#)

Oberschwingungen

PSS SINICAL Oberschwingungen stellt ein wirkungsvolles Werkzeug bei der Berechnung von

- Netzeingangsimpedanzen an beliebigen Netzknoten
- Koppelimpedanzen zwischen beliebigen Netzknoten
- Oberschwingungsspannungs- und -stromverteilung sowie deren Bewertung

in elektrischen Übertragungs- und Verteilungsnetzen dar.

PSS SINICAL Oberschwingungen berechnet die Impedanz des Netzes, ausgehend von einer vorzugebenden Start- bis hin zu einer vorzugebenden Endfrequenz. Der Frequenzschritt kann dabei frei gewählt werden. Alle im Frequenzband auftretenden Resonanzen werden genau erfasst und protokolliert.

Wie rasch die Berechnung eines Netzes abläuft, ist hauptsächlich von sechs Faktoren abhängig:

- Netzgröße und Topologie
- Anzahl der zu rechnenden Impedanzkurven
- Berechnungsart
- Verfügbarer Hauptspeicher
- Breite des Frequenzbandes
- Breite des Frequenzschrittes

Lastfluss zur Berechnung des Laststromes

Im Zuge der Oberschwingungsberechnung wird die Lastflussberechnung zur Ermittlung des Laststromes verwendet.

Rundsteuerung

Mit PSS SINICAL Rundsteuerung lassen sich die Spannungspegeln und die dadurch verursachten Ströme für verschiedenste Rundsteuerfrequenzen berechnen. Die in der Praxis realisierten Rundsteuerankopplungen, Sperr- und Saugkreisschaltungen können damit einfach nachgebildet werden. Durch die einfache Art und Weise der Handhabung können Aussagen über folgende, für die Rundsteuerung, wichtigen Parameter getroffen werden:

- Rundsteuerfrequenz
- Einspeiseebene
- Ankopplungsprinzip

- Höhe des Einspeisepegels

Die Festlegung dieser Parameter für eine Rundsteueranlage erfolgt aufgrund der betrieblichen Anforderungen und des technischen Umfeldes des Energienetzes.

Wie rasch die Berechnung eines Netzes abläuft, ist hauptsächlich von drei Faktoren abhängig:

- Netzgröße und Topologie
- Berechnungsart
- Verfügbare Hauptspeicher

Vorgehensweise Oberschwingungen und Rundsteuerung

Um eine Oberschwingungs- oder Rundsteuerberechnung durchführen bzw. spezielle Daten erfassen zu können, muss zuerst die Berechnungsmethode **Oberschwingungen und Rundsteuerung** aktiviert werden.

Oberschwingungen

Es sind folgende Schritte notwendig:

- Festlegen der Randbedingung bei Oberschwingung und Rundsteuerung Berechnungsparametern
- Festlegen des Frequenzverhaltens der Netzelemente
- Erfassen von Frequenzgängen zum Erhalt von Frequenzgangsdiagrammen
- Eingeben von Oberschwingungs-Strom bzw. -Spannungsquellen
- Zuordnen der Oberschwingungs-Strom bzw. -Spannungsquellen zu den Einspeisungen oder Verbrauchern
- Festlegen des Umfangs der Diagramme bei Basisdaten Berechnungsparametern
- Markieren von Knoten für die Erstellung von Pegeldiagrammen

Rundsteuerung

Es sind folgende Schritte notwendig:

- Festlegen der Rundsteuerfrequenz bei Oberschwingung und Rundsteuerung Berechnungsparametern
- Erfassen von Rundsteuersendern

Abbildung der Netze für die Berechnung

Die Darstellung der Netze zur Berechnung wird im Kapitel Netzdarstellung des Eingabedaten Handbuches genau beschrieben.

2. Oberschwingungen

Bei der Oberschwingungsberechnung handelt es sich um die Berechnung eines elektrischen Netzwerkes mit gegebenen Längs- und Queradmittanzen und gegebenen Spannungen und Strömen der Generatoren. Die Längs- und Queradmittanzen sind durch die Betriebsmittel gegeben. Gesucht sind die Eingangs- und Koppelimpedanzen für einen Frequenzbereich, sowie die Oberschwingungsstromverteilung.

Das Programm rechnet auf der Basis von Ersatzschaltbildern, die aus Impedanzen bestehen, ohne Iterationen zur Erfüllung von Lastangaben oder ähnlichem.

Folgende Ergebnisse werden ermittelt:

- Spannungs- und Oberschwingungsstromverteilung, einschließlich Spannungs- und Stromverteilung bei Grundfrequenz
- Frequenzgang der Netz-Eingangsimpedanz an beliebigen Netzknoten
- Frequenzgang der Koppelimpedanz zwischen beliebigen Netzknoten

Folgende Anwendungsmöglichkeiten sind vorgesehen:

- Ordnungszahlen der Oberschwingungen können beliebige Werte annehmen (reelle Zahlen)
- Freie Netztopologie
- Mehrere gekoppelte Netzteile mit unterschiedlichen und/oder gleichen Spannungsebenen können untersucht werden
- Alle in praktischen Netzen vorkommenden Elemente können verarbeitet werden
- Alle Filter- oder Sperrkreisschaltungen (z.B. Saugkreis, Hochpässe, usw.) können durch entsprechende Anordnung von Längs- und Querzweigen aufgebaut oder direkt eingegeben werden
- Jedes Netzelement kann individuell nachgebildet werden (parallel geschaltete Leitungen, Transformatoren, usw.)
- Homogene Leitungen werden unter Berücksichtigung der Leitungsgleichungen durch Einzelvierpole nachgebildet
- Das Netz kann potentialgesteuerte (potentialfreie) Netzteile enthalten (z.B. bei mehreren in Reihe geschalteten Transformatorwicklungen).

2.1 Allgemeines zur Oberschwingungsberechnung

PSS SINICAL Oberschwingungen dient der Berechnung der Oberschwingungsverteilung in elektrischen Netzen und der Berechnung von Frequenzgängen.

Die Netzelemente werden Netzebenen zugeordnet. Dabei wird die Netzebenenspannung als Bezugsspannung für prozentuale Oberschwingungswerte benutzt. Die Nennspannung der Elemente dagegen wird zur Ermittlung der Elementadmittanzen benutzt. Alle Elemente können mit verschiedenen Frequenzabhängigkeiten nachgebildet werden.

Das Rechenverfahren basiert auf dem Aufbau einer Knotenpunktadmittanzmatrix. Durch schematisches Auflösen, d.h.

- Festlegen der Eliminationsreihenfolge
- Dreiecksfaktorisierung
- Rückwärtssubstitution

der Gleichung

$$(\underline{Y}) * (\underline{U}) = \underline{I}$$

lässt sich

- die Impedanz gegen Erde an beliebigen Netzknoten,
- die Impedanz über zwei Phasen an beliebigen Netzknoten,
- die Koppelimpedanz zwischen zwei beliebigen Netzknoten, laut Definition

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1} \text{ sowie}$$

- die Oberschwingungsverteilung bei eingprägten Oberschwingungsströmen bzw. Oberschwingungsspannungen

berechnen.

Die errechneten Oberschwingungsspannungen bzw. -ströme können nach folgenden Verfahren bewertet werden:

- IEEE 519 (Telephone Influence Factor)
- THFF (Telephone High Frequency Factor)
- $N_Y * U_{NY} (\gamma * U_\gamma)$
- IEC 61000-2-4

Die Bewertung spiegelt den Einfluss auf das Telefonnetz wieder.

Prinzipieller Rechnungsablauf Oberschwingungen

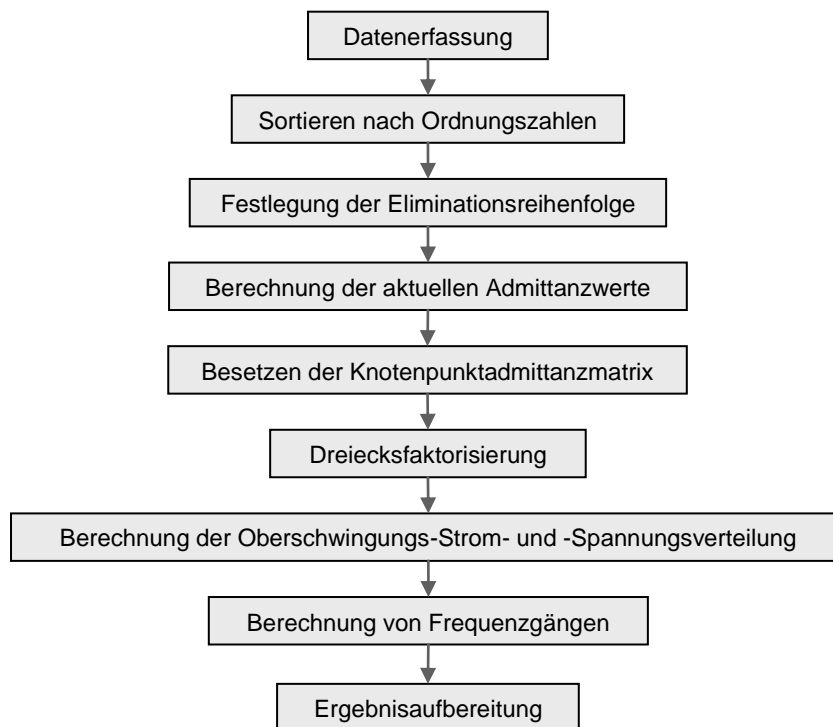


Bild: Ablaufdiagramm

2.2 Datenerfassung

Die Eingabe der Netzdaten erfolgt über die grafische Benutzeroberfläche. Die Topologie des Netzes ist frei, d.h. das Netz kann beliebig komplex und wahlweise symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Die Oberschwingungsberechnung verwendet die Basisdaten der Netzelemente sowie zusätzliche Daten, um die Frequenzabhängigkeit zu modellieren.

Eine Beschreibung der zusätzlichen Oberschwingungsdaten ist dem Kapitel Oberschwingungen des Handbuches Eingabedaten zu entnehmen.

2.3 Sortieren nach Ordnungszahlen

Alle Ordnungszahlen, für die ein Oberschwingungsstrom oder eine Spannung eingegeben wurde, werden in aufsteigender Reihenfolge sortiert.

Anschließend werden mehrfach auftretende Ordnungszahlen bis auf das erstmalige Auftreten gelöscht.

2.4 Festlegung der Eliminationsreihenfolge

Zuerst werden die Knotennummern der Zweiwicklungs- und Dreiwicklungstransformatoren (Sternersatzschaltung) sowie der Längszweig in einem Hilfsfeld gespeichert. Sind mehrere Transformatoren oder Längszweige parallel geschaltet (d.h., beide Anschlussknoten stimmen überein), wird auf mehrmaliges Abspeichern gleicher Knotennummern verzichtet.

Nun wird ermittelt, wie oft jeder Knoten in der Hilfsliste (Längszweige und Transformatoren) vorkommt.

Dadurch kann der Knoten mit den wenigsten Nachbarknoten bestimmt werden.

Nun können die an den Knoten mit den wenigsten Nachbarknoten angeschlossenen Zweige aus der Hilfsliste gelöscht werden.

Der damit eliminierte Knoten erhält eine neue Nummer. Eine Zuordnung alte Knotennummer \leftrightarrow neue Knotennummer ist jederzeit möglich. Die neue Knotennummer ist dabei 1 für den zuerst eliminierten Knoten, 2 für den zweiten eliminierten Knoten, usw.

Die neue Knotennummer gibt nun in der Admittanzmatrix die bestmögliche Position für die Auflösung des Gleichungssystems an. Bei der Dreiecksfaktorisierung entsteht eine minimale Anzahl von Folgeelementen und somit eine minimale Anzahl von Rechenoperationen und eine kürzere Rechenzeit.

2.5 Berechnung der aktuellen Admittanzwerte

Die frequenzabhängigen Admittanzwerte der Netzelemente werden mit einer linearen Interpolation berechnet. Diese wird zwischen den Stützpunkten durchgeführt, um für jede Rechenfrequenz die Werte für R_f und L_f bzw. C_f und $\tan\delta_f$ zu ermitteln. Die Stützpunkte werden über Frequenzdaten und bei konstanten Induktivitäten über die Güte oder über die folgende Angabe definiert:

$$\frac{R_f}{R_{\text{Grundfrequenz}}}$$

Die Admittanzberechnung erfolgt spezifisch für die einzelnen Netzelemente. Der Index 0 steht in den folgenden Formeln für den Wert bei Basisfrequenz (nicht für Nullsystem!).

Bei den verschiedenen Netzelementen kann das frequenzabhängige Verhalten im Register **Oberschwingung** parametrisiert werden. Hierzu steht das Feld **Status Oberschwingung** zur Verfügung, das im Wesentlichen folgende Optionen zur Verfügung stellt:

- Keine Frequenzabhängigkeit:
Dieses Element wird in der Oberschwingungsberechnung mit einer Güte für X/R konstant = 5,0 berücksichtigt.
- Güte für R konstant:
Der eingegebene Faktor des Feldes **Güte für R konstant** wird zur Bestimmung der Impedanz für die Oberschwingungsberechnung verwendet. X und R werden in Serie geschaltet.
- Güte für X/R konstant:
Der eingegebene Faktor des Feldes **Güte für X/R konstant** wird zur Bestimmung der Impedanz für die Oberschwingungsberechnung verwendet. X und R werden in Serie geschaltet.

- Impedanzkennlinie:
Der Name der **Impedanzkennlinie** (Impedanzen über die Frequenz) wird angegeben. Diese wird zur Oberschwingungsberechnung verwendet.

Das folgende Bild zeigt das frequenzabhängige Verhalten entsprechend der gewählten Option.

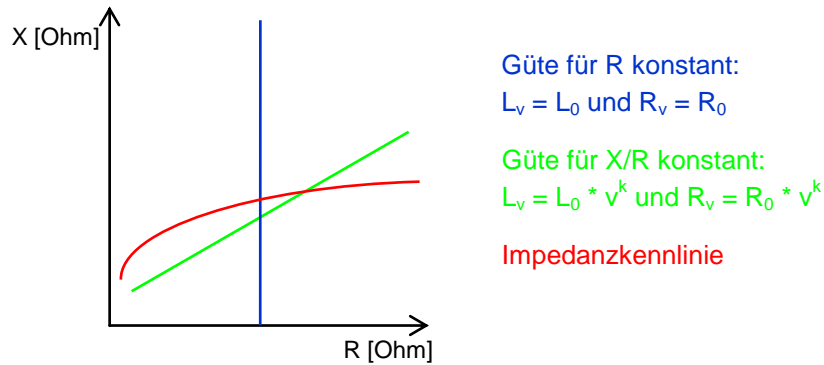


Bild: Impedanzverlauf entsprechend gewählter Frequenzabhängigkeit

Wenn keine Frequenzabhängigkeit angegeben ist, verwendet PSS SINCAL automatisch eine Güte für X/R konstant 5,0.

Für Längskondensatoren wird X/R über den Kehrwert des R/X Verhältnisses der Eingabedaten bestimmt.

Für Querkondensatoren wird X/R aus der Scheinleistung und den dielektrischen Verlusten bestimmt.

2.5.1 Allgemeine Ersatzschaltbilder und Formelzeichen

Längselemente

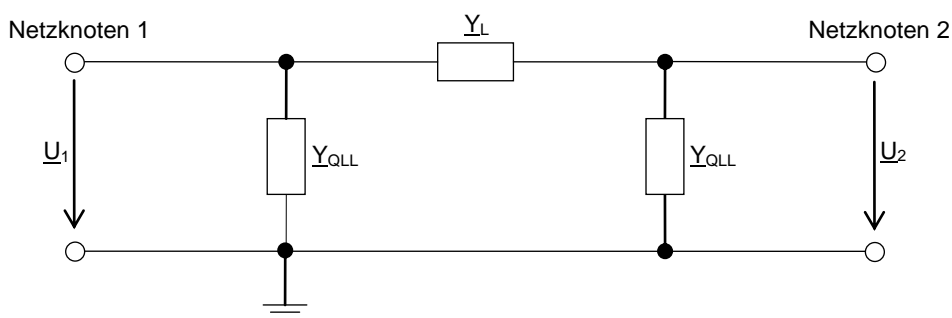


Bild: Ersatzschaltbild für Längselemente

Querelemente

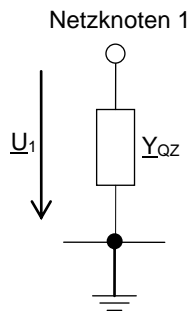


Bild: Ersatzschaltbild für Querelemente

Formelzeichen

\underline{U}_1	... Pegel am Knoten 1 [kV]
\underline{U}_2	... Pegel am Knoten 2 [kV]
R	... Widerstand [Ohm]
L	... Induktivität [H]
C	... Kapazität [nF]
V_A	... Ableitverluste [kW]
S_N	... Bemessungsleistung [MW]
G	... Leitwert der Ableitverluste [1/Ohm]
f	... Aktuelle Frequenz [Hz]
f_0	... Basisfrequenz [Hz]
v	... Ordnungszahl: $v = f_0 / f$
w	... Kreisfrequenz: $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ [Hz]
w_0	... Basiskreisfrequenz: $w_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ [Hz]

2.5.2 Leitungen mit Wellenwiderstandsgleichungen

Die Nachbildung der Leitung mit Wellenwiderstandsgleichungen wird entweder individuell über das Feld **Wellenwiderstandsgleichung** der Leitung aktiviert oder aber global für alle Leitungen durch die entsprechende Option in den Berechnungsparametern für die Oberschwingungsberechnung.

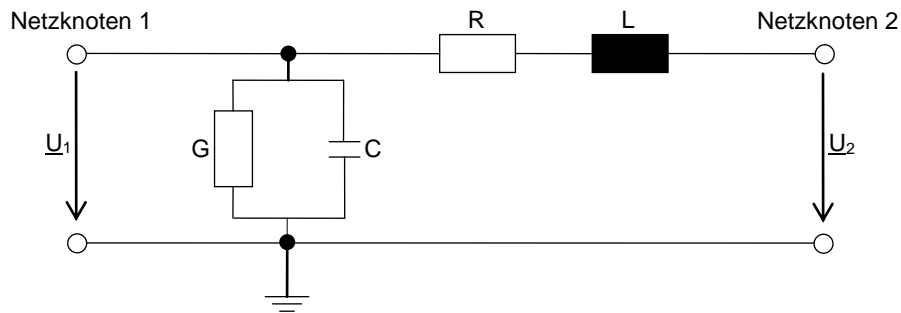


Bild: Ersatzschaltbild Leitung

Die Längs- und Queradmittanz der Leitung ergibt sich wie folgt:

$$G = \frac{V_A \cdot 10^{-3}}{U_N^2}$$

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{\underline{Z}_L \cdot \sinh(\underline{\gamma})}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = \frac{\tanh(0,5 \cdot \underline{\gamma})}{\underline{Z}_L}$$

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{\left(\frac{R_v}{R_0} R_0 + jv \frac{L_v}{L_0} X_0 \right)}{G + jv\omega_0 C \cdot 10^{-9}}}$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{R_v}{R_0} R_0 + jv \frac{L_v}{L_0} X_0 \right) (G + jv\omega_0 C \cdot 10^{-9})}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{vR_0 + jvX_0}{G + jv\omega_0 C \cdot 10^{-9}}}$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(vR_0 + jvX_0)(G + jv\omega_0 C \cdot 10^{-9})}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{\left(\frac{R_v}{R_0} R_0 + jvX_0\right)}{G + jv\omega_0 C * 10^{-9}}}$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{R_v}{R_0} R_0 + jvX_0\right)(G + jv\omega_0 C * 10^{-9})}$$

2.5.3 Leitungen mit Koppeldaten

Die Impedanzen der Kopplungsmatrix werden einzeln abhängig von der Frequenz bestimmt.

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

Für $x_{ij} > 0$:

$$z_{ij} = \frac{R_0}{X_0} * v * x_{ij} + j * v * x_{ij}$$

Für $x_{ij} < 0$:

$$z_{ij} = \frac{R_0}{X_0} * \frac{x_{ij}}{v} + j * \frac{x_{ij}}{v}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$z_{ij} = \frac{R_v}{R_0} * r_{ij} + j * v * x_{ij}$$

2.5.4 Leitungen, Spulen und Längselemente (R und X in Reihe geschaltet!)

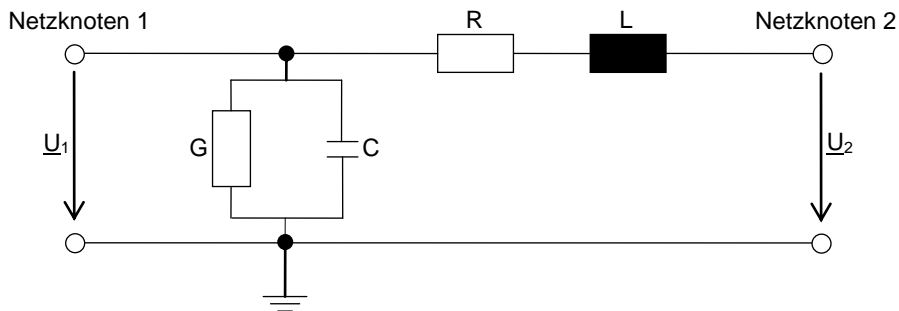


Bild: Eingabe- und PI-Ersatzschaltbild Leitung

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{\frac{R_v}{R_0} \frac{R_0}{X_0} \frac{L_0}{L_v v} + j \frac{L_v}{L_0} v \omega_0}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_A * 10^3}{U_N^2} + j v \omega 2C * 10^{-9} \right)$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{L_0 v \omega_0 \left(\frac{R}{X} + j \right)} = \frac{1}{v R + j \omega_0 v L_0}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_A * 10^3}{U_N^2} + j v \omega C * 10^{-9} \right)$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{L_0 v \omega_0 \left(\frac{R_v}{R_0} \frac{R_0}{X_0} \frac{1}{v} + j \right)} = \frac{1}{R_v + j \omega_0 v L_0}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_A * 10^3}{U_N^2} + j v \omega C * 10^{-9} \right)$$

Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell

Die Nachbildung erfolgt abhängig vom Leitungswiderstand r in Ohm/km.

$$\text{für } r \geq 0,004398 + 0,020465 * v$$

$$\frac{R_v}{R_0} = 1 + 0,004398 * \frac{v-1}{r}$$

$$\text{für } r \leq 0,004398 + 0,020465 * v$$

$$\frac{R_v}{R_0} = 0,12811 * \frac{\sqrt{v * (r - 0,004398)}}{r} + 0,3198294 * \frac{r - 0,004398}{r}$$

$$\frac{L_v}{L_0} = 1,0$$

$$Y_L = \frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0 + j * \frac{L_v}{L_0} * \omega_0 * v * L_0}$$

$$Y_{QLL} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_A * 10^3}{U_N^2} + j v \omega 2C * 10^{-9} \right)$$

2.5.5 Sperrkreis – RLC parallel

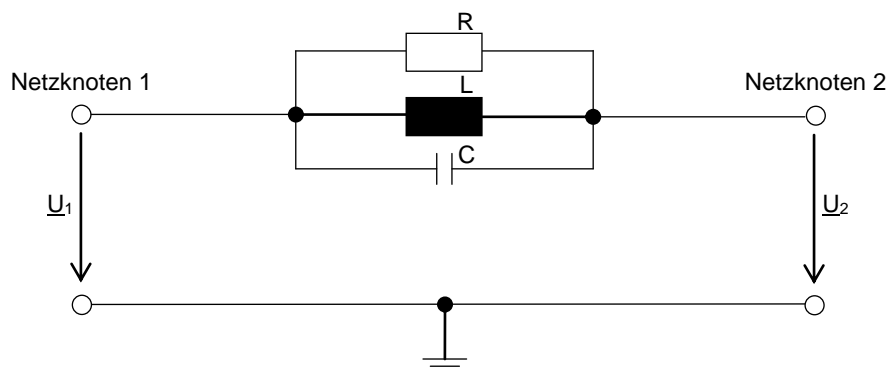


Bild: Ersatzschaltbild Sperrkreis Parallelschaltung

- R ... Innenwiderstand des Sperrkreises [Ohm]
- L ... Induktivität des Sperrkreises [H]
- C ... Kapazität des Sperrkreises [nF]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_0 vL} + j\omega_0 vC * 10^{-9}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = (0 + j0)$$

2.5.6 Sperrkreis – RLC seriell

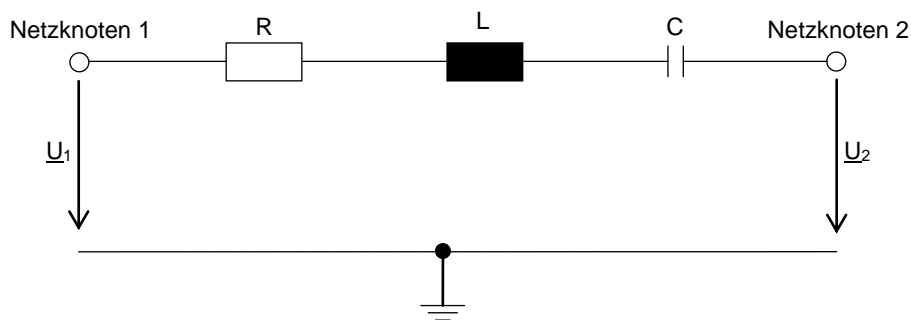


Bild: Ersatzschaltbild Sperrkreis Serienschaltung

R ... Innenwiderstand des Sperrkreises [Ohm]

L ... Induktivität des Sperrkreises [H]

C ... Kapazität des Sperrkreises [nF]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{R + j\omega_0 vL + \frac{1}{j\omega_0 vC * 10^{-9}}}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = (0 + j0)$$

2.5.7 Hochpass R

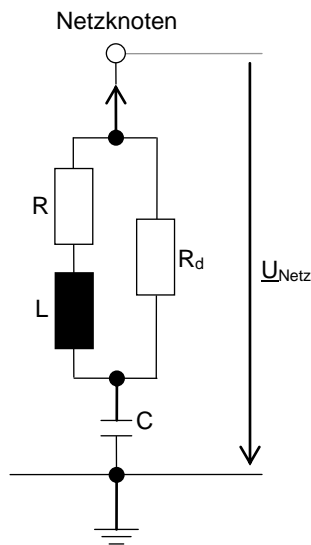


Bild: Ersatzschaltbild Hochpass R

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Hochpasses R [Ohm]
 L ... Induktivität des Hochpasses R [H]
 C ... Kapazität des Hochpasses R [nF]
 R_d ... Dämpfungswiderstand des Hochpasses R [Ohm]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{\text{QZ}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0 + j\omega_0 v * \frac{L_v}{L_0} * L_0} + \frac{1}{R_d}} + j * \frac{1}{\omega_0 v * \frac{C_v}{C_0} * C_0 * 10^{-9}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_{\text{QZ}} = \frac{1}{\frac{1}{L_0 v \omega_0 \left(\frac{R}{X} + j \right)} + \frac{1}{R_d}} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_0 * 10^{-9}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0 + j\omega_0 v * L_0} + \frac{1}{R_d}} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_0 * 10^{-9}}$$

2.5.8 Hochpass C

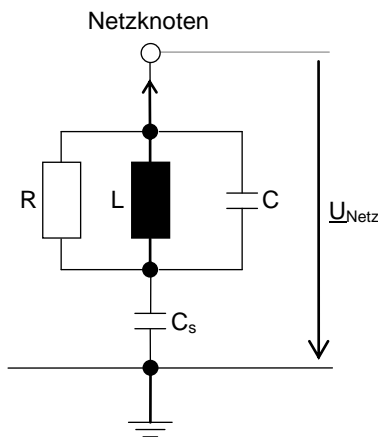


Bild: Ersatzschaltbild Hochpass C

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Hochpasses C [Ohm]
 L ... Induktivität des Hochpasses C [H]
 C ... Kapazität des Hochpasses C [nF]
 C_s ... Serielle Kapazität des Hochpasses C [nF]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0} + j * \left(\frac{1}{\omega_0 v * \frac{L_v}{L_0} * L_0} + \omega_0 v * \frac{C_v}{C_0} * C_0 * 10^{-9} \right)} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_s * 10^{-9}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{1}{L_0 v \omega_0 \left(\frac{R}{X} + j \right)} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_0 * 10^{-9}} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_s * 10^{-9}}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0} + j * \left(-\frac{1}{\omega_0 v * L_0} + \omega_0 v * \frac{C_v}{C_0} * C_0 * 10^{-9} \right) + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_s * 10^{-9}}}$$

2.5.9 Längskondensatoren

$$\tan \delta = \frac{1}{R * \omega * C * 10^{-9}}, R \text{ und } C \text{ parallel}$$

Frequenzabhängigkeit über C/C₀ und tanδ

$$\underline{Y}_L = \omega_0 v C_0 * 10^{-9} \frac{C}{C_0} (\tan \delta_v + j)$$

$$\underline{Y}_{QLL} = (0 + j0)$$

Keine Frequenzabhängigkeit von tanδ und C

$$\underline{Y}_L = \omega_0 v C * 10^{-9} (\tan \delta_v + j)$$

$$\underline{Y}_{QLL} = (0 + j0)$$

2.5.10 Induktive Querzweige

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{R_v}{R_0} P_v + j v \frac{L_v}{L_0} Q}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant (seriell)

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{vQ \left(\frac{R}{X} + j \right)}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant (parallel)

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{vQ * \frac{R}{X}} + j \frac{1}{vQ}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{R_v}{R_0} P_v + j v Q}$$

2.5.11 Kapazitive Querzweige

$$\tan \delta = \frac{1}{R \omega_0 C * 10^{-9}}, R \text{ und } C \text{ parallel}$$

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{QZ} = \omega_0 C_0 * 10^{-9} \frac{C}{C_0} v (\tan \delta_v + j)$$

Keine Frequenzabhängigkeit von C und $\tan \delta$

$$\underline{Y}_{QZ} = \omega_0 C * 10^{-9} v (\tan \delta + j)$$

2.5.12 Querzweige über Wertepaare R, X (R und X in Reihe)**Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie**

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{R + jX}$$

2.5.13 Saugkreis – Güte seriell

Frequenzabhängigkeit über Güte

$$a = -1 * |Q| \left(\frac{\omega_r^2}{b q^2} + b \right)$$

$$b = \frac{\omega_0^2 - \omega_r^2}{\omega_0}$$

$$L = \frac{U^2}{a}$$

$$C = \frac{a}{U^2 * \omega_r^2}$$

$$R = \frac{\omega_r * U^2}{G * a}$$

$$\underline{Y}_{QZ} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_0 \nu L + \frac{1}{j\omega_0 \nu C * 10^{-9}}}}$$

$$\underline{Y}_{QLL} = (0 + j0)$$

2.5.14 Saugkreis – RLC seriell

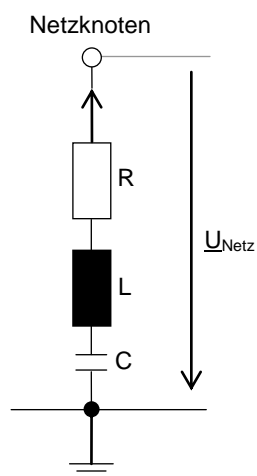


Bild: Ersatzschaltbild Saugkreis Serienschaltung

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Saugkreises [Ohm]
 L ... Induktivität des Saugkreises [H]
 C ... Kapazität des Saugkreises [nF]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{\text{QZ}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_0 vL + \frac{1}{j\omega_0 vC * 10^{-9}}}}$$

2.5.15 Saugkreis – RLC parallel

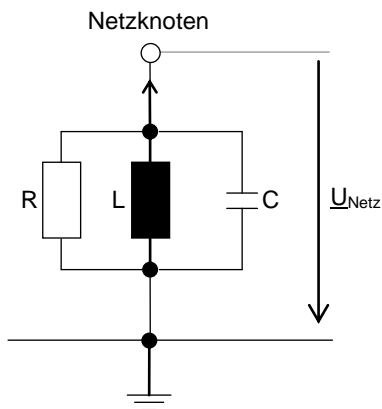


Bild: Ersatzschaltbild Saugkreis Parallelschaltung

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Saugkreises [Ohm]
 L ... Induktivität des Saugkreises [H]
 C ... Kapazität des Saugkreises [nF]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{\text{QZ}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega_0 vL} + j\omega_0 vC$$

$$\underline{Y}_{\text{QLL}} = (0 + j0)$$

2.5.16 Tonfrequenzsperre

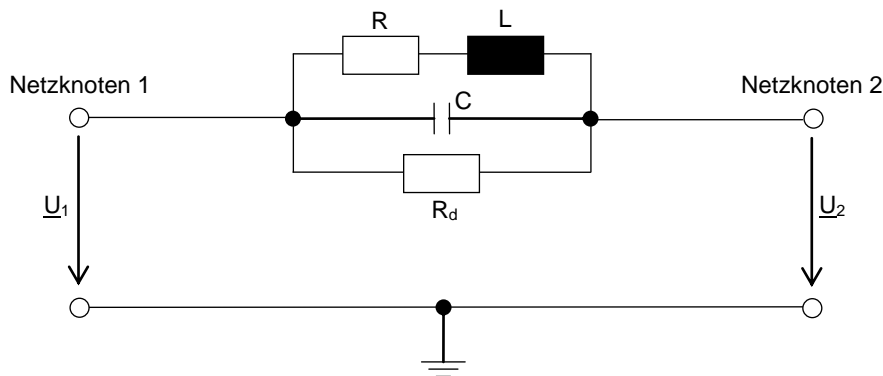


Bild: Ersatzschaltbild Tonfrequenzsperre

- R ... Innenwiderstand der Tonfrequenzsperre [Ohm]
- L ... Induktivität der Tonfrequenzsperre [H]
- C ... Kapazität der Tonfrequenzsperre [nF]
- R_d ... Dämpfungswiderstand der Tonfrequenzsperre [Ohm]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0 + j * \omega_0 v * \frac{L_v}{L_0} * L_0} + \frac{1}{R_d} + j * \frac{1}{\omega_0 v * \frac{C_v}{C_0} * C_0 * 10^{-9}}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{L_0 v \omega_0 \left(\frac{R}{X} + j \right)} + \frac{1}{R_d}} + j * \frac{1}{\omega_0 v * \frac{C_v}{C_0} * C_0 * 10^{-9}}}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_L = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_v}{R_0} * R_0 + j * \omega_0 v * L_0} + \frac{1}{R_d} + j * \frac{1}{\omega_0 v * C_0 * 10^{-9}}}$$

2.5.17 Einspeisungen (R und X in Reihe)

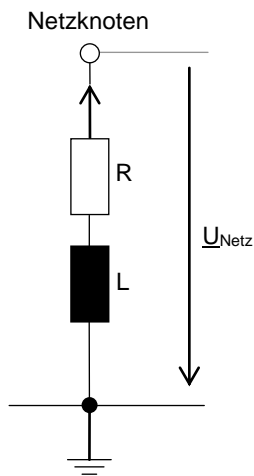


Bild: Ersatzschaltbild R und X in Reihe

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand der Einspeisung [Ohm]
 L ... Induktivität der Einspeisung [H]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{\text{QEIN}} = \frac{1}{X_0 v \frac{L_v}{L_0} \left(\frac{\frac{R_v}{R_0} \frac{R_0}{X_0}}{\frac{L_v}{L_0} + j} + j \right)} = \frac{1}{R_v + jv \frac{L_v}{L_0} X_0}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_{\text{QEIN}} = \frac{1}{X_0 v \left(\frac{R_0}{X_0} + j \right)} = \frac{1}{v R_0 + jv X_0}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_{\text{QEIN}} = \frac{1}{X_0 * v \frac{R_v}{X_0 * v} + j} = \frac{1}{R_v + jX_0 * v}$$

Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell – A

$$\underline{Y}_{QEIN} = \frac{1}{\sqrt{v} * R_0 + jvX_0}$$

Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell – B

$$\underline{Y}_{QEIN} = \frac{1}{\frac{\sqrt{v}}{10 * R/X} * R_0 + jvX_0}$$

2.5.18 Zweiwicklungstransformatoren

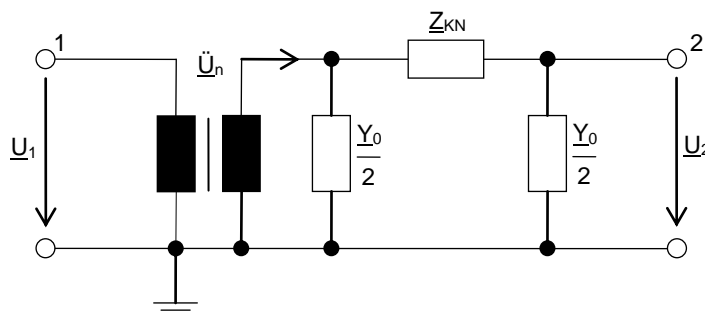


Bild: Ersatzschaltbild – Zweiwicklungstransformator

- S_N ... Bemessungsleistung [MVA]
- \underline{Z}_{KN} ... Kurzschlussimpedanz [Ohm]
- \underline{Y}_0 ... Admittanz der Leerlaufverluste [1/Ohm]
- u_k ... Betrag Kurzschlussimpedanz [%]
- u_r ... Realteil Kurzschlussimpedanz [%]
- u_x ... Imaginärteil Kurzschlussimpedanz [%]

Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Y}_{TR} = \frac{100S_N}{U_2^2 \left(\frac{R_v}{R_0} u_r + jv \frac{L_v}{L_0} u_x \right)} = \frac{1}{R_v + jX_v}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Y}_{TR} = \frac{100S_N}{U_2^2 \left(\frac{R}{X} v u_x + jv u_x \right)} = \frac{1}{vR + jvX}$$

Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell – A

$$\tan \psi = e^{(0,693+0,796 \cdot \ln(S_N) - 0,0421 \cdot [\ln(S_N)]^2)}$$

$$\frac{R_v}{R_0} = \frac{1+100 \cdot (\tan \psi)^2}{1+110 \cdot (\tan \psi)^2} * \left(1 + \frac{10 \cdot (\tan \psi)^2}{1 + \left(\frac{10 \cdot \tan \psi}{v} \right)^2} \right)$$

$$\frac{L_v}{L_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{10 \cdot \tan \psi} \right)^2}$$

$$\underline{Y}_{TR} = \frac{100 S_N}{U_2^2 \left(\frac{R_v}{R_0} u_r + j v \frac{L_v}{L_0} u_x \right)}$$

Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell – B

$$\tan \psi = e^{(0,693+0,796 \cdot \ln(S_N) - 0,0421 \cdot [\ln(S_N)]^2)}$$

$$\frac{R_v}{R_0} = \frac{\sqrt{u_k^2 - u_r^2}}{u_r} * \left(\frac{1}{\tan \psi} + \frac{10 \cdot \tan \psi}{1 + \left(\frac{10 \cdot \tan \psi}{v} \right)^2} \right)$$

$$\frac{L_v}{L_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{10 \cdot \tan \psi} \right)^2}$$

$$\underline{Y}_{TR} = \frac{100 S_N}{U_2^2 \left(\frac{R_v}{R_0} u_r + j v \frac{L_v}{L_0} u_x \right)}$$

Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Y}_{TR} = \frac{100 S_N}{U_2^2 \left(\frac{R_v}{R_0} u_r + j v u_x \right)}$$

Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses

$$\underline{Y}_{TRWA} = (\underline{Y}_{TRW} + 0j) \frac{U_1}{U_2} \frac{U_{N2}}{U_{N1}}$$

Bestimmung der Längs- und Queradmittanzen

$$\underline{Y}_{Q1} = \frac{\underline{Y}_{TR}}{\underline{Y}_{TRWA}^*} \left(\frac{1}{\underline{Y}_{TRAWA}} - 1 \right) + \underline{Y}_{QUER} \text{ (Knoten1)}$$

$$\underline{Y}_{Q2} = \underline{Y}_{TR} \left(1 - \frac{1}{\underline{Y}_{TRAWA}} \right) + \underline{Y}_{QUER} \text{ (Knoten2)}$$

$$\underline{Y}_{21} = \frac{\underline{Y}_{TR}}{\underline{Y}_{TRWA}} \quad \underline{Y}_{12} = \frac{\underline{Y}_{TR}}{\underline{Y}_{TRWA}^*}$$

2.5.19 Dreiwicklungstransformatoren

Dreiecksimpedanzen für Frequenzabhängigkeit über Impedanzkennlinie

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rAB} + jv \frac{L_v}{L_0} u_{xAB}}{100S_{NAB}}$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rBC} + jv \frac{L_v}{L_0} u_{xBC}}{100S_{NBC}}$$

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rCA} + jv \frac{L_v}{L_0} u_{xCA}}{100S_{NCA}}$$

Dreiecksimpedanzen für Frequenzabhängigkeit über Güte für X/R konstant

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{v u_{xAB} \left(\frac{R}{X} + j \right)}{100S_{NAB}}$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{v u_{xBC} \left(\frac{R}{X} + j \right)}{100S_{NBC}}$$

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{v u_{xCA} \left(\frac{R}{X} + j \right)}{100 S_{NCA}}$$

Dreiecksimpedanzen für Frequenzabhängigkeit über CIGRE Modell – A und B

Die Faktoren für R_v/R_0 und L_v/L_0 ergeben sich für jede Seite identisch zum [Zweiwicklungstransformator](#).

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rAB} + j v \frac{L_v}{L_0} u_{xAB}}{100 S_{NAB}}$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rBC} + j v \frac{L_v}{L_0} u_{xBC}}{100 S_{NBC}}$$

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rCA} + j v \frac{L_v}{L_0} u_{xCA}}{100 S_{NCA}}$$

Dreiecksimpedanzen für Frequenzabhängigkeit über Güte für R konstant

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rAB} + j v u_{xAB}}{100 S_{NAB}}$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rBC} + j v u_{xBC}}{100 S_{NBC}}$$

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{\frac{R_v}{R_0} u_{rCA} + j v u_{xCA}}{100 S_{NCA}}$$

Bestimmung der Längs- und Queradmittanzen

Nun erfolgt eine Dreieck-/Sternumwandlung. Die Ersatzadmittanzen der Sternschaltung werden berechnet zu:

$$\underline{Y}_A = \frac{2}{\underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}$$

$$\underline{Y}_B = \frac{2}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{CA}}$$

$$\underline{Y}_C = \frac{2}{-\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}$$

Der Ersatzwickler A-S wird als 1:1 Überträger angesetzt. Damit hat S die gleiche Nennspannung wie A.

Zur Berücksichtigung schiefer Übersetzungen (wenn $U_{\text{Nenn}} \neq \text{Netzebenenspannung}$) werden die Größen

$$\underline{W}_A = \frac{U_A * U_{\text{NAMES}}}{U_{\text{NAMEA}} * U_S} * \underline{W}_{\text{Reglerkarte}} = 1 * \underline{W}_{\text{Reglerkarte}}$$

$$\underline{W}_B = \frac{U_B * U_{\text{NAMES}}}{U_{\text{NAMEB}} * U_S}$$

$$\underline{W}_C = \frac{U_C * U_{\text{NAMES}}}{U_{\text{NAMEC}} * U_S}$$

berechnet. \underline{W}_A ist ein komplexer Wert, \underline{W}_B und \underline{W}_C sind reell.

Die Queradmittanzen werden gebildet zu:

$$\underline{Y}_{QA} = \frac{\underline{Y}_A}{\underline{W}_A} * \frac{1}{\underline{W}_A} - 1 + \underline{Y}_{\text{QUER}} \text{ (Knoten A)}$$

$$\underline{Y}_{QB} = \frac{\underline{Y}_B}{\underline{W}_B} * \frac{1}{\underline{W}_B} - 1 + \underline{Y}_{\text{QUER}} \text{ (Knoten B)}$$

$$\underline{Y}_{QC} = \frac{\underline{Y}_C}{\underline{W}_C} * \frac{1}{\underline{W}_C} - 1 + \underline{Y}_{\text{QUER}} \text{ (Knoten C)}$$

$$\underline{Y}_{QS} = \underline{Y}_A * \left(1 - \frac{1}{\underline{W}_A}\right) + \underline{Y}_B * \left(1 - \frac{1}{\underline{W}_B}\right) + \underline{Y}_C * \left(1 - \frac{1}{\underline{W}_C}\right)$$

Die endgültigen Zweigadmittanzen werden folgendermaßen berechnet:

$$\underline{Y}_{AS} = \frac{\underline{Y}_A}{\underline{W}_A}$$

$$\underline{Y}_{BS} = \underline{Y}_{SB} = \frac{\underline{Y}_B}{\underline{W}_B}$$

$$\underline{Y}_{CS} = \underline{Y}_{SC} = \frac{\underline{Y}_C}{\underline{W}_C}$$

$$\underline{Y}_{SA} = \frac{\underline{Y}_A}{\underline{W}_A}$$

2.5.20 Oberschwingungs-Resonanznetz

In PSS SINICAL kann ein Fremdnetz für die Oberschwingungsberechnung mit dem Netzelement Resonanznetz nachgebildet werden. Die Impedanz dieses Resonanznetzes wird für jede Frequenz berechnet.

Unter der wirksamen Impedanz eines Resonanznetzes versteht man eine bestimmte Impedanz innerhalb eines zulässigen Impedanzbereiches, die unter Berücksichtigung von z.B. verschiedenen Netzschaltzuständen, Lastzuständen oder ähnlichem ergibt. Zusätzlich gibt es im Rahmen der Resonanznetze bei PSS SINICAL die Möglichkeit, eine Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz einzugeben.

Wenn ein Impedanzbereich eingegeben wird, dann wird für die aktuelle Frequenz in der Oberschwingungsberechnung automatisch die Impedanz ausgewählt, die zusammen mit den übrigen Impedanzen

- zur höchsten Gesamtimpedanz oder
- zur kleinsten Gesamtimpedanz

führt.

Ein Resonanznetz kann aus Gründen der Eindeutigkeit der Lösung pro topologisch getrenntem Teilnetz nur einmal angegeben werden. Dabei sind verschiedene Typen von Resonanznetzen möglich.

Die Ermittlung der wirksamen Impedanz des Resonanznetzes erfolgt je nach Netztyp aus

- einer Fläche (Impedanzbereich) oder
- einem Polygonzug (feste Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz)

in der (komplexen) R-jX-Ebene. Die Wirkwiderstandswerte können dabei nur positive Werte annehmen.

Wie die festen Impedanzen können auch die Impedanzbereiche frequenzabhängig eingegeben werden.

Quer Oberschwingungs-Resonanznetz

Die wirksame Impedanz wird von PSS SINICAL automatisch bestimmt. Sie liegt grundsätzlich auf der Randkurve der zu berücksichtigenden Fläche.

Je nachdem, ob die wirksame Impedanz zur höchsten oder kleinsten Impedanz vom Anschlussknoten führt, ergeben sich am Anschlussknoten des Resonanznetzes die

- größte Spannungsverzerrung (U-MAX) oder
- der größte Strom (I-MAX)

in das Resonanznetz.

Längs Oberschwingungs-Resonanznetz

Die wirksame Impedanz wird von PSS SINICAL automatisch bestimmt.

Je nachdem, ob die wirksame Impedanz zur höchsten oder kleinsten Impedanz am Endknoten führt, ergeben sich am Endknoten des Resonanznetzes die

- größte Spannungsverzerrung (U-MAX) oder
- der größte Strom (I-MAX)

in das Resonanznetz.

Um die Eingabe der Daten möglichst einfach zu gestalten, wurde eine Reihe verschiedener Resonanznetzformen vorprogrammiert. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden.

Impedanzfläche, begrenzt durch 3 Geraden und 1 Kreis (3G/1K)

Die Fläche ist durch drei Geraden und einen Kreis begrenzt. Die Eingabe des Kreises erfolgt über die Koordinaten des Anfangs-, Bogen- und Endpunktes (Wirk- und Blindanteil).

Die Eingabe der Geraden erfolgt über einen Punkt der Geraden (Wirk- und Blindanteil) im Winkel in Grad. Der Winkel wird immer gegen die positive R-Achse gemessen.

Der Winkel der 1. Geraden (G1) ist immer 90 Grad. Der Kreis muss durch den Nullpunkt gehen; sein Mittelpunkt liegt immer auf der R-Achse.

Die Geraden G2 und G3 gehen immer durch den Koordinatenursprung.

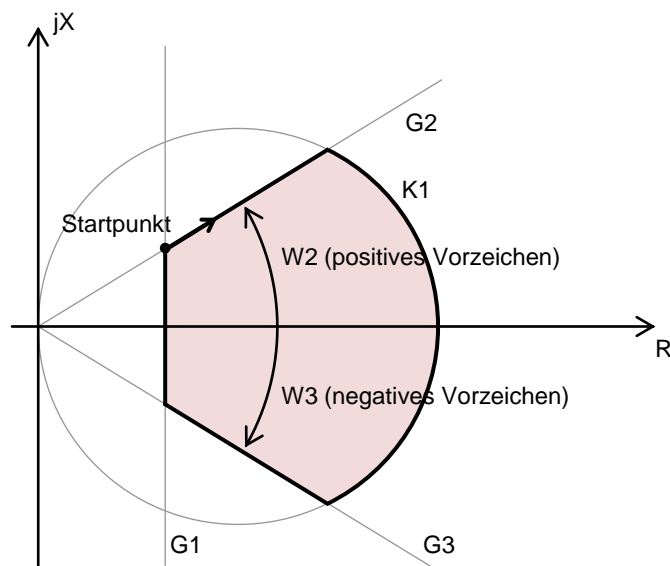


Bild: Impedanzfläche, begrenzt durch 3 Geraden und 1 Kreis

Die Reihenfolge für die Begrenzung der Fläche ist wie folgt festgelegt:

- 1. Gerade (G1)
- 2. Gerade (G2)
- 1. Kreis (K1)
- 3. Gerade (G3)

- 1. Gerade (G1)

Der Startpunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt des ersten Elements G1 mit dem zweiten Element G2.

Von diesem Startpunkt beginnend wird die Randkurve der Fläche durchlaufen, um die wirksame Impedanz zu ermitteln. Im Schnittpunkt von 2 Begrenzungslinien wird automatisch zur nächsten gewechselt.

Die ermittelte wirksame Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

Impedanzpolygonzug Absolutwert und Winkel (Z/PHI)

Die Eingabe der Punkte des Polygonzuges erfolgt über den Absolutwert der Impedanz Z in Ohm und des Winkels in Grad. Der Winkelbereich ist von -90 bis $+90$ Grad begrenzt und wird gegen die positive R-Achse gemessen.

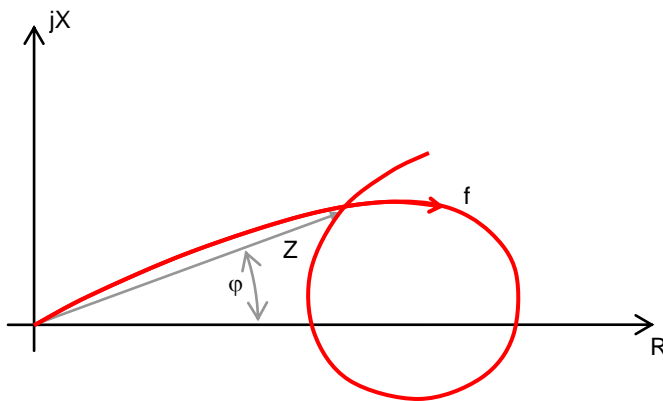


Bild: Impedanzpolygonzug mit Absolutwert und Winkel

Für jede Frequenz wird die zugehörige Impedanz berücksichtigt.

Impedanzpolygonzug Wirk- und Blindanteil (R/X)

Die Eingabe der Punkte des Polygonzuges erfolgt über Wirk- und Blindanteil (R und jX) der Impedanz in Ohm.

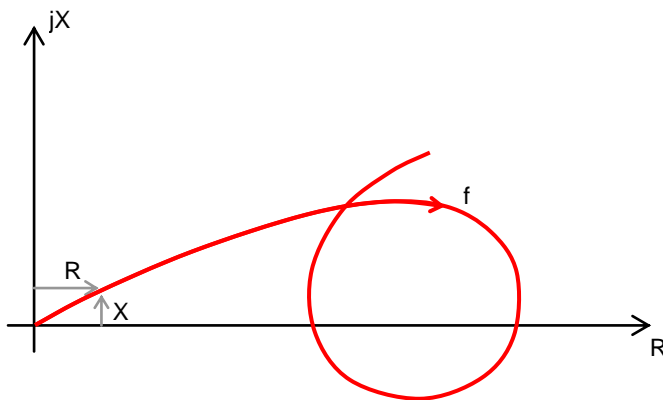


Bild: Impedanzpolygonzug mit Wirk- und Blindanteil

Für jede Frequenz wird die zugehörige Impedanz berücksichtigt.

Impedanzfläche begrenzt durch 4 Geraden und 1 Kreis (4G/1K)

Die Nachbildung erfolgt über eine Impedanzfläche. Die Fläche ist mittels 4 Geraden und einem Kreis begrenzt.

Die Eingabe des Kreises erfolgt über die Koordinaten des Anfangs-, Bogen- und Endpunktes (Wirk- und Blindanteil). Der Kreis muss durch den Nullpunkt gehen. Sein Mittelpunkt liegt immer auf der R-Achse.

Die Eingabe der Geraden erfolgt über einen Punkt der Geraden (Wirk- und Blindanteil) im Winkel in Grad. Die Winkel der Geraden G1 und G3 sind immer 0 Grad, die der Geraden G2 und G4 immer 90 Grad.

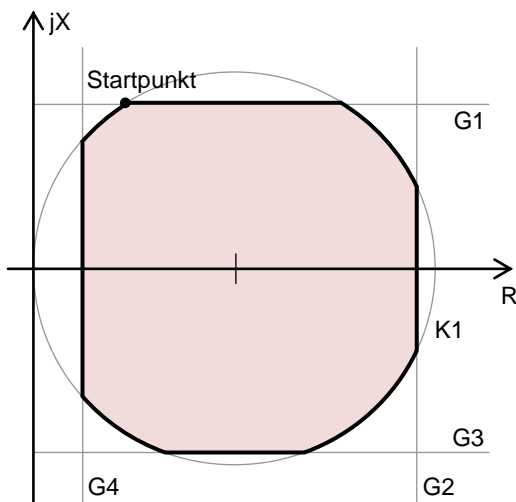


Bild: Impedanzfläche, begrenzt durch 4 Geraden und 1 Kreis

Die Reihenfolge für die Begrenzung der Fläche ist wie folgt festgelegt:

- 1. Gerade (G1)
- 1. Kreis (K1)
- 2. Gerade (G2)

- 1. Kreis (K1)
- 3. Gerade (G3)
- 1. Kreis (K1)
- 4. Gerade (G4)
- 1. Kreis (K1)

Der Startpunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt des ersten Elements G1 mit dem zweiten Element K1.

Von diesem Startpunkt beginnend wird die Randkurve der Fläche in Richtung Bogenpunkt des Kreises K1 durchlaufen, um die wirksame Impedanz zu ermitteln. Im Schnittpunkt von 2 Bezugslinien wird automatisch zur nächsten gewechselt.

Die ermittelte wirksame Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

Impedanzfläche 2 Geraden und 2 Kreise (2G/2K)

Die Nachbildung erfolgt über eine Impedanzfläche. Die Fläche ist mittels 2 Geraden und 2 Kreisen begrenzt.

Die Eingabe der Kreise erfolgt über die Koordinaten des Anfangs-, Bogen- und Endpunktes (Wirk- und Blindanteil). Der Kreismittelpunkt der Kreise K1 und K2 ist der Koordinatenursprung.

Die Eingabe der Geraden erfolgt über einen Punkt der Geraden (Wirk- und Blindanteil) und dem Winkel in Grad. Der Winkel wird immer gegen die positive R-Achse gemessen. Die Geraden gehen immer durch den Koordinatenursprung.

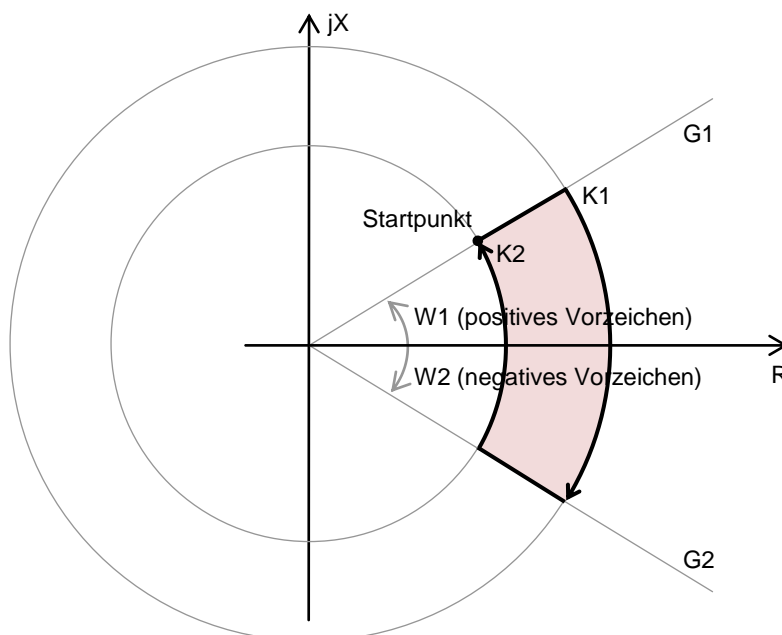


Bild: Impedanzfläche, begrenzt durch 2 Geraden und 2 Kreise

Die Reihenfolge für die Begrenzung der Fläche ist wie folgt festgelegt:

- 1. Gerade (G1)

- 1. Kreis (K1)
- 2. Gerade (G2)
- 2. Kreis (K2)

Der Startpunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt des ersten Elements G1 mit dem zweiten Element K1.

Von diesem Startpunkt beginnend wird die Randkurve der Fläche durchlaufen, um die wirksame Impedanz zu ermitteln. Im Schnittpunkt von 2 Bezugslinien wird automatisch zur nächsten gewechselt.

Die ermittelte wirksame Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

Allgemein mit Koordinaten (KOORD)

Die Nachbildung erfolgt über eine Impedanzfläche. Die Fläche ist mittels maximal 6 Geraden und 4 Kreisen begrenzt. Weniger Begrenzungslinien sind möglich.

Die Eingabe der Kreise erfolgt über die Koordinaten des Anfangs-, Bogen- und Endpunktes (Wirk- und Blindanteil).

Die Eingabe der Geraden erfolgt über den Startpunkt (Wirk- und Blindanteil). Der Winkel der Geraden wird über den Startpunkt des nächsten Elementes errechnet.

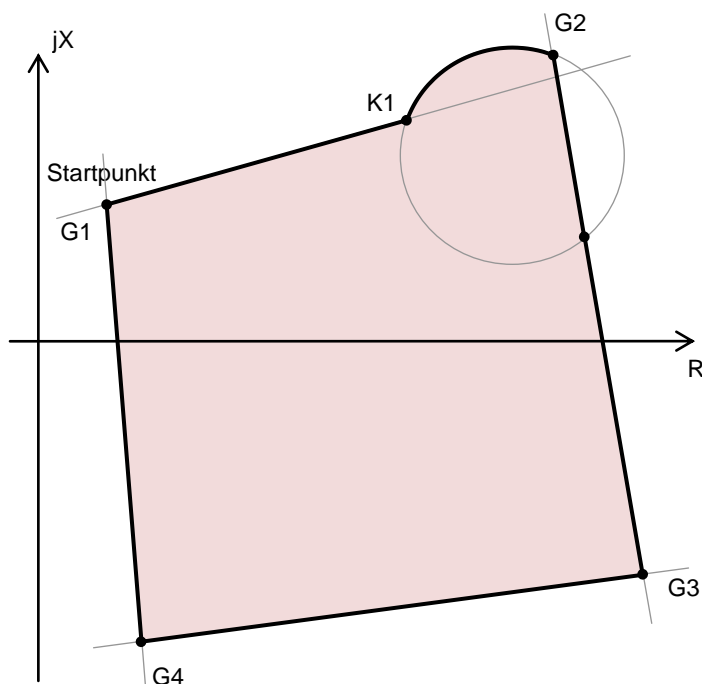


Bild: Impedanzfläche, Allgemein mit Koordinaten

Die Reihenfolge der Geraden und Kreise für die Begrenzung der Impedanzfläche ist vom Benutzer festzulegen. Für das Beispiel könnte die Reihenfolge für die Begrenzung der Fläche wie folgt festgelegt sein:

- 4. Gerade (G4)

- 1. Gerade (G1)
- 1. Kreis (K1)
- 2. Gerade (G2)
- 3. Gerade (G3)
- 4. Gerade (G4)

Von einem Startwert beginnend, wird die Randkurve der Fläche durchlaufen, um die wirksame Impedanz zu ermitteln. Im Schnittpunkt von 2 Bezugslinien wird automatisch zur nächsten gewechselt.

Die ermittelte Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

Allgemein mit Winkeln (WINKEL)

Die Nachbildung erfolgt über eine Impedanzfläche. Die Fläche ist mittels maximal 6 Geraden und 4 Kreisen begrenzt. Weniger Begrenzungslinien sind möglich

Die Eingabe der Kreise erfolgt über die Koordinaten des Anfangs-, Bogen- und Endpunktes (Wirk- und Blindanteil).

Die Eingabe der Geraden erfolgt über einem beliebigen Punkt der Geraden (Wirk- und Blindanteil) und dem Winkel der Geraden in Grad.

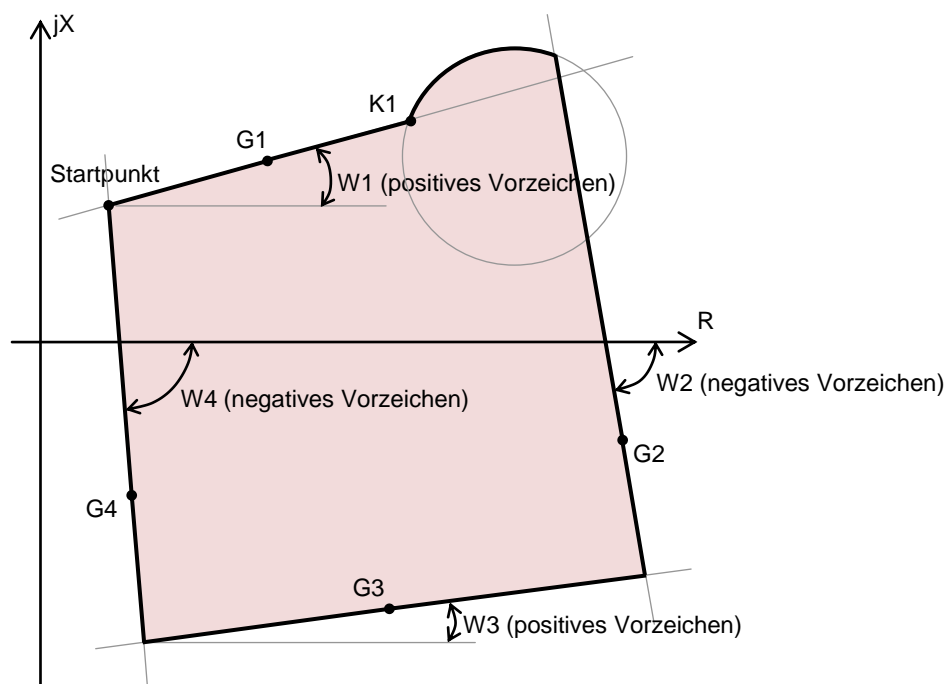


Bild: Impedanzfläche, Allgemein mit Winkeln

Die Schnittpunkte der Geraden werden berechnet. Die Reihenfolge der Geraden und Kreise für die Begrenzung der Impedanzfläche ist vom Benutzer festzulegen. Für das Beispiel könnte die Reihenfolge für die Begrenzung der Fläche wie folgt festgelegt sein:

- 4. Gerade (G4)

- 1. Gerade (G1)
- 1. Kreis (K1)
- 2. Gerade (G2)
- 3. Gerade (G3)
- 4. Gerade (G4)

Von einem Startwert beginnend, wird die Randkurve der Fläche durchlaufen, um die wirksame Impedanz zu ermitteln. Im Schnittpunkt von 2 Bezugslinien wird automatisch zur nächsten gewechselt.

Die ermittelte Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

Impedanzfläche

Die Nachbildung erfolgt über eine frei einzugebende Impedanzfläche.

Eine genaue Beschreibung zur Eingabe der Impedanzfläche ist im Kapitel Oberschwingungs-Impedanzfläche im Handbuch Eingabedaten zu finden.

Die ermittelte Impedanz des Resonanznetzes liegt für jede betrachtete Frequenz innerhalb der zulässigen Fläche.

2.5.21 Beschreibung der Admittanzvektoren

$Y_L (n)$	Längsadmittanzen der Leitungen, Spulen und Längskondensatoren (n = Zweignummer des Elements)
$Y_{QLL} (n)$	Queradmittanz der Leitungen (n = Zweignummer des Elements)
$Y_{TR} (n)$	Y_{12} der Zweiwicklungstransformatoren (n = Nummer des Transformators)
$Y_{TRW} (n)$	Zusatzspannung durch Stufenstellung bei Benutzung der Regelkarte für Zweiwicklungstransformatoren (n = Nummer des Transformators)
$Y_{DRWAB} (n)$, $Y_{DRWBC} (n)$, $Y_{DRWCA} (n)$	Y_A , Y_B und Y_C der Dreiwicklungstransformatoren in Ersatzschaltung mit Berücksichtigung der Zusatzspannung bei Benutzung der Regelkarte (n = Nummer des Dreiwicklers)
$W_{AO} (n)$, $W_{BO} (n)$, $W_{CO} (n)$	Korrekturfaktor für Zusatzspannung bei Benutzung der Regelkarte beim Dreiwickler bzw. für Abweichungen zwischen Transformator-Nennspannung und Netzebenenanspannung (n = Nummer des Dreiwicklers)
$Y_{QZ} (n)$	Queradmittanz von Einspeisungen bzw. Asynchronmaschinen (n = Nummer des Querspeises)
$Y_{QEIN} (n)$	Queradmittanz von Einspeisungen bzw. Asynchronmaschinen (n = Nummer der Einspeisung)
Y_{QUER}	Gesamte Queradmittanz durch Querspeises der Quer-Anteile von Längselementen bis auf Einspeisungen (n = Knotennummer)
Y_{RES}	Admittanz des Resonanznetzes (n = Nummer des Resonanznetzes)

2.6 Besetzung der Knotenpunktadmittanzmatrix

Die Impedanzwerte der Netzelemente werden nun mit Hilfe der neuen Knotennummern in die Matrix eingetragen.

Für Längszweige gilt:

$$\underline{Y}_{m,n} = \underline{Y}_{Elm}$$

$$\underline{Y}_{n,m} = \underline{Y}_{Elm}$$

m ... neue Anfangsknotennummer bzw. Zeilenindex

n ... neue Endknotennummer bzw. Spaltenindex

Für Querzweige gilt:

$$\underline{Y}_{m,m} = \underline{Y}_{Elm}$$

m ... neue Knotennummer bzw. Zeilen- oder Spaltenindex

Die Admittanzen paralleler Zweige werden durch Addition der Impedanzwerte zusammengefasst.

2.7 Dreiecksfaktorisierung

Die besetzte Knotenpunktadmittanzmatrix wird in zwei Dreiecksmatrizen zerlegt. Dabei werden bei der unteren Dreiecksmatrix die Elemente der Hauptdiagonale 1 sein. Für die untere Dreiecksmatrix wird die erste Spalte (bis auf a_{11}), für die obere Dreiecksmatrix die erste Zeile der Rechtecksmatrix übernommen.

Die übrigen Elemente der zu bildenden Dreiecksmatrizen lassen sich dann nach den folgenden Formeln

$$b_{ik} = \frac{1}{c_{kk}} \left(a_{ik} - \sum_{v=1}^{k-1} b_{iv} c_{vk} \right) \quad (i > k, c_{kk} \neq 0)$$

$$c_{ik} = a_{ik} - \sum_{v=1}^{i-1} b_{iv} c_{vk} \quad (i \leq k)$$

berechnen.

Die Reihenfolge der Berechnung ist wie folgt festgelegt:

2. Zeile, 2. Spalte, 3. Zeile, 3. Spalte, usw.

Dabei sind a_{ik} die Elemente der Rechtecksmatrix, b_{ik} die Elemente der unteren Dreiecksmatrix und c_i die Elemente der oberen Dreiecksmatrix.

Im Anschluss an die Dreiecksfaktorisierung gilt die Beziehung:

$$(A) = (B) * (C)$$

(A) ... Admittanzmatrix

(B) ... untere Dreiecksmatrix

(C) ... obere Dreiecksmatrix

2.8 Berechnung der Spannungs- und Oberschwingungsstromverteilung

Zuerst werden die Admittanzwerte der Netzelemente für jede einzelne Oberschwingungseinspeisung ermittelt. Anschließend erfolgt die Besetzung der Knotenpunktadmittanzmatrix mit den für die jeweilige Frequenz berechneten Werten. Anschließend erfolgt die Dreiecksfaktorisierung.

Nun wird die rechte Seite des Gleichungssystems

$$(YAD) * (CUSPVN) = (CI)$$

die für die aktuelle Frequenz eingespeisten Oberschwingungsströme an den entsprechenden Knoten (d.h., an der entsprechenden Stelle des Vektors (CI)) eingesetzt. Eingeprägte Oberschwingungsspannungen werden mit

$$I = \frac{U}{Z_{\text{einsp}}}$$

in eingespeiste Ströme umgerechnet und wie diese in den Vektor (CI) eingesetzt.

Nun wird durch Rückwärtssubstitution der Lösungsvektor (CUSPVN) bestimmt.

Nach der Berechnung des Lösungsvektors, der die Oberschwingungsspannungen für alle Netzknoten bezogen auf 1 kV enthält, werden die im Netz fließenden Oberschwingungsströme von Knoten m nach Knoten n berechnet.

$$I_{m,n} = (U_n - U_m) * Y_{m,n}$$

Wurden die Oberschwingungsströme für alle gewünschten Oberschwingungsfrequenzen berechnet, ist die Berechnung der Oberschwingungsverteilung abgeschlossen.

Anschließend werden die Oberschwingungsströme und -spannungen mit den Bewertungsfaktoren multipliziert.

Der vorgegebene Vektor (CI) auf der rechten Seite des Gleichungssystems (z.B. korrigierte Einspeiseströme oder der Vektor mit einem Einheitsstrom am Bezugsknoten) wird zunächst mittels der Matrix B in CI' umgerechnet. Für das neue System wird der gesuchte Spannungsvektor CU (= CUSPVN) bestimmt.

Bewertungsfaktoren

Oberschwingungen mit höheren Ordnungszahlen erzeugen durch induktive Kopplung in Telefonleitungen Spannungen und Ströme. Da diese im menschlichen Hörbereich liegen, bewirkt dies ein Rauschen beim Telefonieren (z.B. Ordnungszahl 20 erzeugt ein Rauschen mit einer Frequenz von 1 kHz).

Da das menschliche Ohr auf unterschiedliche Frequenzen verschieden stark reagiert, müssen die induzierten Spannungen und Ströme für den menschlichen Höreindruck bewertet werden.

Die Bewertung erfolgt für die Spannungen und analog für die Ströme. PSS SINICAL stellt folgende Bewertungsmöglichkeiten zur Verfügung:

Spannungsbewertung	Strombewertung
TIF	IT
THFF	EDC
NY * UNY	NY * INY
IEC 61000-2-4	IEC 61000-2-4

2.9 Berechnung von Frequenzgängen

Zuerst werden die Admittanzwerte der Netzelemente für die jeweilige Frequenz berechnet.

Anschließend erfolgen die Besetzung der Knotenpunktadmittanzmatrix mit den berechneten Admittanzen und die Dreiecksfaktorisierung.

Auf der rechten Seite des Gleichungssystems

$$(YAD) * (CUSPVN) = (CI)$$

wird für die Berechnung des Frequenzganges der Vektor (CI) für den Knoten, an dem die Impedanz berechnet wird, mit 1 besetzt, für alle anderen Knoten mit 0.

Das bedeutet, dass an dem Bezugsknoten des Frequenzgangs für jede Rechenfrequenz 1A eingespeist wird und dieser Strom von 1A damit für diese Rechnung die einzige Oberschwingungsquelle ist. Nach der Rückwärtssubstitution beinhaltet der Lösungsvektor (CUSPVN) nun die Oberschwingungsspannungen an den Netzknoten bei Einspeisung von 1A am Bezugsknoten des Frequenzgangs. Damit ergibt sich für den Bezugsknoten der Wert der Impedanz am Bezugsknoten (bezogen auf 1 kV), als Wert von (CUSPVN), da $Z = U/I$ und I an diesem Knoten 1 ist (mit Phasenlage 0°). Für alle anderen Knoten hat (CUSPVN) auch die Bedeutung der Koppelimpedanz zum Bezugsknoten, da Z_{21} definiert ist zu

$$Z_{21} = \frac{U_2}{I_1}$$

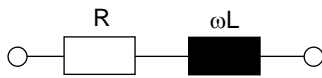
wobei I_1 der Strom am Bezugsknoten und U_2 die resultierende Spannung am Knoten ist, also (CUSPVN) vom bezogenen Knoten.

2.10 Ortskurven

Zeigerdiagramme vermitteln in anschaulicher Art und Weise eine Übersicht von Summen gleichfrequenter Sinusgrößen bzw. frequenzunabhängiger Größen. In der Praxis ist die Voraussetzung der konstanten Frequenz jedoch nur selten erfüllt. In der Energietechnik ist vor allem das Verhalten von Spannung und Strom bei Belastungs-, also Widerstandsänderungen von Bedeutung.

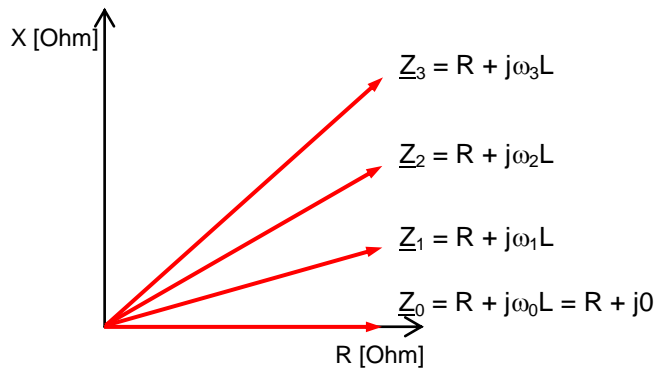
Die Übersichtlichkeit einer Darstellung von frequenzabhängigen komplexen Größen kann dadurch erreicht werden, dass man nur noch die Kurve zeichnet, auf der die Spitzen der Zeiger liegen. Diese Kurve wird als Ortskurve bezeichnet.

Ortskurve für komplexen Widerstand



$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

Bild: Ersatzschaltbild



$$\omega_0 = 0 < \omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$

Bild: Resultierende Vektoren

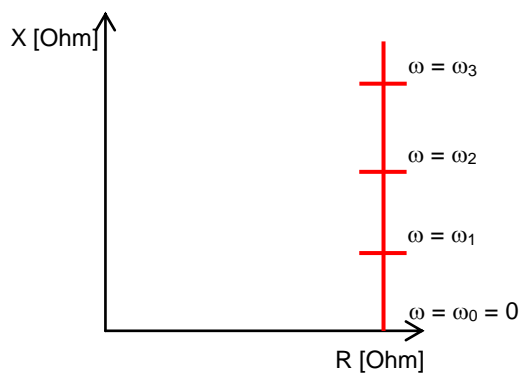


Bild: Ortskurve

2.11 Periodische Schwingungen beliebiger Kurvenform

Die reine Sinusform tritt nur selten auf. Meist werden schon in den Generatoren keine rein sinusförmigen Spannungen erzeugt. Transformatoren benötigen Magnetisierungsströme, die wegen der Sättigung der Eisenkerne verzerrt sind; sie können nichtsinusförmige Teilspannungen verursachen. Auch Gleichrichter verzerren den Strom.

Die Behandlung periodischer, nichtsinusförmiger Vorgänge erfolgt mit der Fourier-Reihe.

Nach Fourier lässt sich jeder periodische Vorgang in eine Reihe von Sinusschwingungen zerlegen. Bei dieser Fourier-Analyse sind einige Sonderfälle zu beachten, die die Zerlegung vereinfachen. In der Elektrotechnik werden darüber hinaus diese Vorgänge durch besondere Kenngrößen charakterisiert.

2.11.1 Fourier-Reihe

Die Fourier-Analyse zerlegt eine allgemeine periodische Zeitfunktion $y = f(t)$ in sinusförmige Teilschwingungen, die auch als **Harmonische** bezeichnet werden. Die Sinusschwingung mit der Periodendauer der vorgegebenen Kurve heißt Grundschiwingung oder 1. Teilschwingung bzw. 1. Harmonische. Die Frequenzen der Oberschwingungen, das sind die höheren Teilschwingungen bzw. Harmonischen, betragen ganzzahlige Vielfache der Grundschiwingungsfrequenz, wobei das Verhältnis von Teil- zu Grundschiwingungsfrequenz die Ordnungszahl der Teilschwingung darstellt.

Zeitfunktion

Mit der Periode $T = 1/f = 2\pi/\omega$, der allgemeinen periodischen Zeitfunktion $y = f(t)$, der zugehörigen Frequenz f bzw. Kreisfrequenz ω und der Teilschwingungszahl v kann diese Funktion einmal mit den Fourier-Koeffizienten a_v und b_v und dem Gleichglied

$$a_0 = \underline{y} = \frac{1}{T} \int_0^T y dt$$

das den linearen Mittelwert \underline{y} wieder gibt, mit

$$y = a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} [a_v \cos(v\omega t) + b_v \sin(v\omega t)]$$

als Summe von Cosinus- und Sinusschwingungen darstellen. Diese Fourier-Reihe lässt sich aber auch mit der Amplitude

$$c_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}$$

und dem Phasenwinkel

$$\alpha_v = \arctan(b_v / a_v) = \arcsin(b_v / c_v) = \arccos(a_v / c_v)$$

über

$$y = \sum_{v=0}^{\infty} y_v = a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v \cos(v\omega t + \alpha_v)$$

als Überlagerung verschiedener frequenter und gegeneinander phasenverschobener Sinusschwingungen y_v auffassen.

Die Fourier-Reihe kann meist nach einigen Gliedern abgebrochen werden. Für viele Betrachtungen dürfen somit die höheren Teilschwingungen vernachlässigt werden.

2.11.2 Darstellung nichtsinusförmiger Vorgänge

Jeder nichtsinusförmiger Vorgang kann mittels der Fourier-Analyse in einzelne sinusförmige Vorgänge zerlegt werden.

Sonderfälle

Reiner Wechselvorgang

Wenn positive und negative Halbschwingungen der Zeitfunktion y gleiche Flächen einschließen, verschwindet der lineare Mittelwert \underline{y} bzw. das Gleichglied a_0 und es liegt ein reiner Wechselvorgang vor.

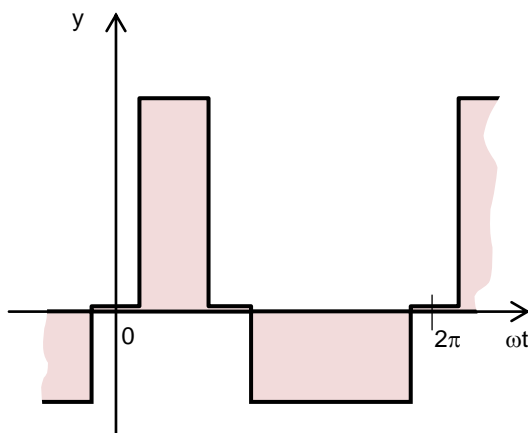


Bild: Sonderfall für einen reinen Wechselvorgang

Gerade Zeitfunktion

Folgt eine Funktion der Bedingung $y(t)=y(-t)$, so sind die Fourier-Koeffizienten $b_v=0$, und es treten nur Cosinusglieder auf.

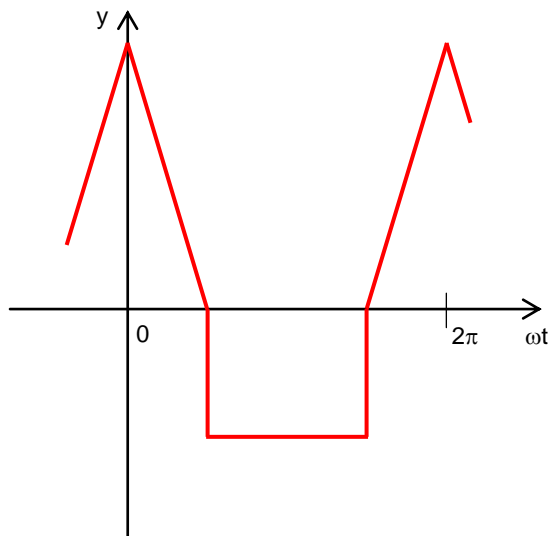


Bild: Sonderfall für eine gerade Zeitfunktion

Ungerade Zeitfunktion

Wenn die Funktion y die Bedingung $y(t) = -y(-t)$ erfüllt, treten wegen $a_v = 0$ nur Sinusglieder auf.

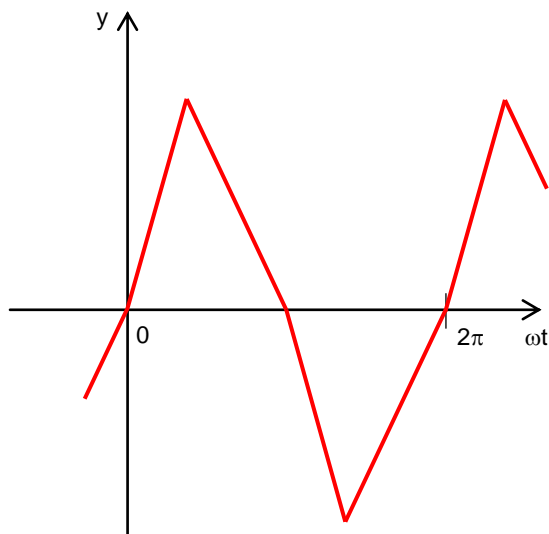


Bild: Sonderfall für eine ungerade Zeitfunktion

Alternierende Zeitfunktion

Diese Funktion erfüllt die Bedingung $y(t) = -y(t+T/2)$. Für solche Funktionen verschwinden die Fourier-Koeffizienten a_v und b_v für alle geraden Ordnungszahlen n . Es treten daher nur ungerade Ordnungszahlen auf. Dies trifft auf die meisten mit Oberschwingungen behafteten Wechselströme zu, da dort positive und negative Halbschwingungen meist gleich verlaufen.

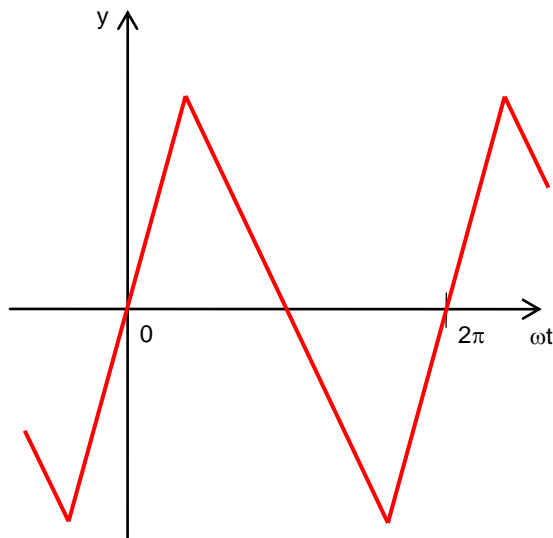


Bild: Sonderfall für eine alternierende Zeitfunktion

2.12 Ergebnisaufbereitung

Die Ergebnisse für Frequenzgänge werden in Form von Diagrammen zur Verfügung gestellt. Sie sind nach verschiedenen Gesichtspunkten als Ortskurven bzw. Frequenzgänge zusammengestellt und können am Bildschirm angesehen bzw. geplottet werden.

Die Ergebnisse der Oberschwingungsstrom- und -spannungsverteilung werden in Form von Tabellen, Masken und in der Netzgrafik zur Verfügung gestellt. Sie sind nach Ordnungszahlen geordnet und können am Bildschirm angesehen bzw. geplottet werden.

3. Rundsteuerung

Die Berechnung der Ströme und Spannungen führt zu einem linearen Gleichungssystem, welches nach Gauß gelöst wird.

Die Nachbildung der aktiven und passiven Netzelemente (Generatoren, Lasten, Leitungen) erfolgt für die Rundsteuer-Berechnung als Impedanzen. Die Nachbildung der Rundsteuersender erfolgt als Spannungsquellen oder Stromquellen.

Alle Impedanzen müssen vor der Lösung des Gleichungssystems mit der Rundsteuerfrequenz umgerechnet werden.

Bei den Lasten muss eine Kompensationsleistung mitberücksichtigt werden.

Bei der Rundsteuer-Berechnung handelt es sich um die Berechnung eines elektrischen Netzwerkes mit gegebenen Längs- und Queradmittanzen und gegebenen Spannungen der Rundsteuersender. Die Längs- und Queradmittanzen sind durch die Betriebsmittel gegeben. Gesucht sind die Ströme und Knotenpunktspannungen in allen Knotenpunkten.

Für die Berechnung wird das Verfahren mit bezogenen Impedanzen (Bezugsleistung 1 MVA) verwendet.

Aus den Knotenpunktgleichungen (Summe der zufließenden Ströme ist gleich der Summe der abfließenden Ströme) ergibt sich folgendes lineares Gleichungssystem:

$$\underline{Y} * \underline{\varphi} = \underline{I}$$

\underline{Y} ... Knotenpunktadmittanzmatrix

$\underline{\varphi}$... Vektor der Knotenpunktpotentiale

\underline{I} ... Vektor der Einspeiseströme am jeweiligen Knoten

Die Hauptdiagonalglieder sind gleich der Summe der Admittanzen, die zu dem jeweiligen Knotenpunkt führen. Die Nebendiagonalglieder sind der negative Wert der Längsadmittanz zwischen zwei Knoten.

Zur Berechnung der Knotenpunktpotentiale φ muss die rechte Seite des Gleichungssystems, also die Ströme, bekannt sein. Das setzt voraus, dass Spannungen der Rundsteuersender bekannt sind.

Bei der Parallelankopplung ist der Strom das Produkt aus Spannung des Senders und der Senderadmittanz.

$$I_{\text{Sender}} = U_{\text{Sender}} * Y_{\text{Sender}}$$

I_{Sender} ... Strom des Rundsteuersenders

U_{Sender} ... Spannungspegel des Rundsteuersenders

Y_{Sender} ... Admittanz des Rundsteuersenders und der Ankopplung

Der Stromvektor bei der Serienankopplung ergibt sich aus $\underline{I}_{\text{Sender}}$ für alle Knoten, an denen eine Parallelkopplung stattfindet bzw. mit $\underline{I}_{\text{Sender}}$ für alle auszusteuernden Knoten, an denen eine Serienkopplung stattfindet bzw. mit $-\underline{I}_{\text{Sender}}$ für alle nicht auszusteuernden Knoten, an denen eine Serienkopplung stattfindet bzw. mit Null für alle übrigen Knoten des Netzes.

Damit ist die rechte Seite des Gleichungssystems bestimmt und die Knotenpunktpotentiale werden durch Dreiecksfaktorisierung bestimmt.

Die Ströme im Netz berechnen sich aus der Potentialdifferenz der Knoten und der dazwischenliegenden Impedanz.

$$\underline{I}_{\text{Anf}} = \frac{\underline{U}_{\text{Anf}} - \underline{U}_{\text{End}}}{\underline{Z}_{\text{Elm}}}$$

$$\underline{I}_{\text{End}} = \frac{\underline{U}_{\text{End}} - \underline{U}_{\text{Anf}}}{\underline{Z}_{\text{Elm}}}$$

- $\underline{I}_{\text{Anf}}$... Strom vom Knoten ins Element
- $\underline{I}_{\text{End}}$... Strom vom Element zum Knoten
- $\underline{U}_{\text{Anf}}$... Pegel am Anfangsknoten
- $\underline{U}_{\text{End}}$... Pegel am Endknoten
- $\underline{Z}_{\text{Elm}}$... Impedanz des Netzelementes

Prinzipieller Rechnungsablauf Rundsteuerung



Bild: Ablaufdiagramm

3.1 Nachbildung der Verbraucher

Alle Verbraucher im Netz werden für die Rundsteuer-Berechnung als Impedanzen nachgebildet. Bei dieser Nachbildung muss der Blindanteil der Leistung wegen einer eventuell zu berücksichtigenden Kompensation in einen induktiven und kapazitiven Anteil zerlegt werden.

Es gilt somit:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

- S ... Verbraucherscheinleistung [MVA]
- P ... Verbraucherwirkleistung [MW]
- Q ... Verbraucherblindleistung [Mvar]
- Q_L ... Induktive Verbraucherblindleistung [Mvar]
- Q_C ... Kapazitive Verbraucherblindleistung [Mvar]

Der kapazitive Anteil der Blindleistung ist von der Abnehmerstruktur abhängig und errechnet sich aus:

$$Q_C = p_k * P$$

- Q_C ... Kapazitive Verbraucherblindleistung [Mvar]
- p_k ... Faktor für die bezogene Kompensationsleistung
- P ... Verbraucherwirkleistung [MW]

Der induktive Anteil der Blindleistung errechnet sich somit wie folgt:

$$Q_L = Q + p_k * P$$

- Q_L ... Induktive Verbraucherleistung [Mvar]
- Q ... Verbraucherblindleistung [Mvar]
- p_k ... Faktor für die bezogene Kompensationsleistung
- P ... Verbraucherwirkleistung [MW]

Durch diese Nachbildung müssen folgende Fälle unterschieden werden:

Resultierende Blindleistung $Q > 0$ (induktiv)

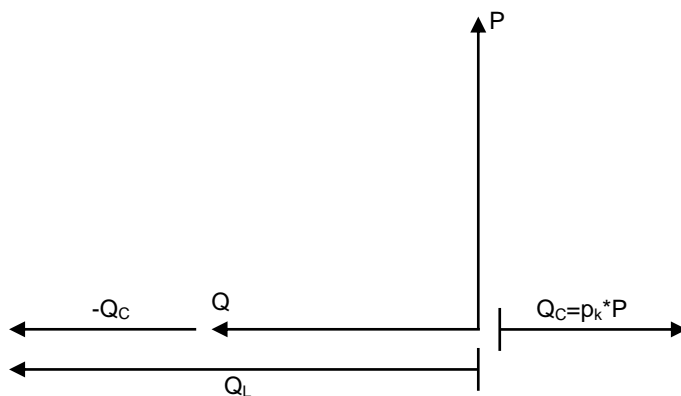


Bild: Zeigerdiagramm Leistungsermittlung

Gerechnet wird mit:

$$Q_L = Q + |Q_C|$$

$$Q_C$$

Resultierende Blindleistung $Q < 0$ und $|Q_C| > |Q|$

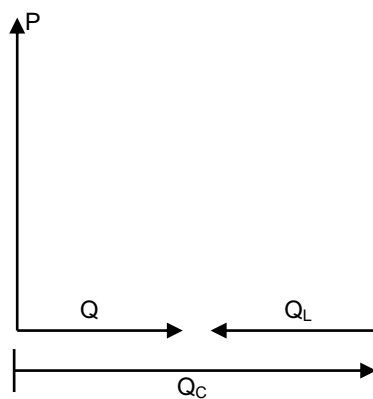


Bild: Zeigerdiagramm Leistungsermittlung

Gerechnet wird mit:

$$Q_L = |Q_C| - |Q|$$

$$Q_C$$

Resultierende Blindleistung $Q < 0$ und $|Q_C| < |Q|$

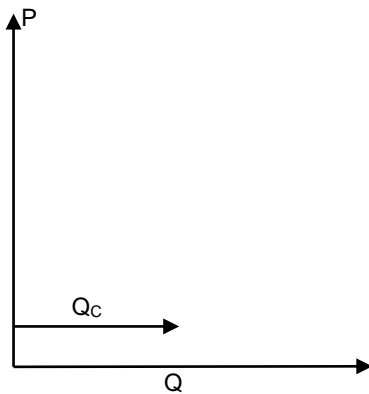


Bild: Zeigerdiagramm Leistungsermittlung

Gerechnet wird mit:

$$Q_L = 0$$

$$Q_C = Q$$

Erfahrungswerte für die bezogene Kompensationsleistung

- Haushalt: 0
- Landwirtschaft: 0.1 – 0.3
- Industrie: 0.3 – 0.5
- Supermärkte: 0.7 – 0.9
- Gewerbe: 0.5 – 0.7
- Büros: 0.9 – 1.3

3.2 Nachbildung von Senderankopplungen

Mit PSS SINCAL Rundsteuerung können

- [Serienankopplungen](#) und
- [Parallelankopplungen](#)

von Rundsteuerungen nachgebildet werden.

3.2.1 Serienankopplung

Bei dieser Art der Senderankopplung liegt der Rundsteuersender im Leistungsfluss der Energieübertragung.

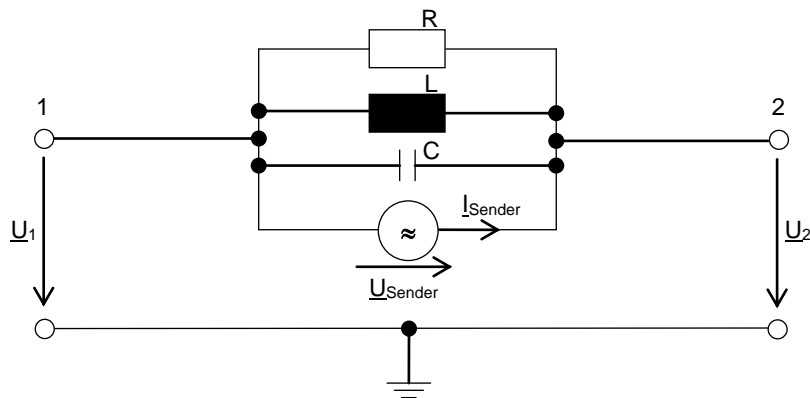


Bild: Ersatzschaltbild Senderserienankopplung

- \underline{U}_1 ... Pegel am nicht angesteuerten Knoten [kV]
- \underline{U}_2 ... Pegel am angesteuerten Knoten [kV]
- $\underline{U}_{\text{Sender}}$... Pegel des Senders [kV]
- I_{Sender} ... Strom über Rundsteuersender [kA]
- R ... Ohmscher Widerstand des Ankopplungskreises [Ohm]
- L ... Induktiver Widerstand des Ankopplungskreises [H]
- C ... Kapazitiver Widerstand des Ankopplungskreises [nF]

3.2.2 Parallelankopplungen

Bei dieser Art der Senderankopplung liegt der Rundsteuersender im Spannungspfad der Energieübertragung.

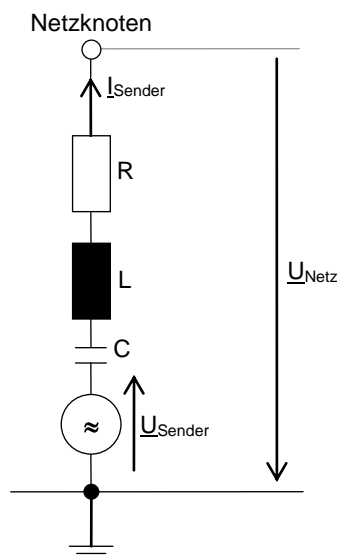


Bild: Ersatzschaltbild Senderparallelankopplung

$\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
$\underline{U}_{\text{Sender}}$... Pegel des Rundsteuersenders [kV]
$\underline{I}_{\text{Sender}}$... Strom über Rundsteuersender [kA]
R	... Ohmscher Widerstand des Ankopplungskreises [Ohm]
L	... Induktiver Widerstand des Ankopplungskreises [H]
C	... Kapazitiver Widerstand des Ankopplungskreises [nF]

3.3 Nachbildung von RLC-Elementen

RLC-Elemente dienen zum Lenken der Rundsteuersignale. Sie können nachgebildet werden als:

- Quer RLC-Kreis (Saugkreis)
- Längs RLC-Kreis (Sperrkreis)

3.3.1 Quer RLC-Kreis – Serienschaltung

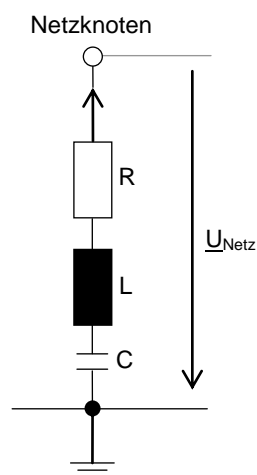


Bild: Ersatzschaltbild Serienschaltung

$\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
R	... Innenwiderstand des Saugkreises [Ohm]
L	... Induktivität des Saugkreises [H]
C	... Kapazität des Saugkreises [nF]

3.3.2 Quer RLC-Kreis – Parallelschaltung

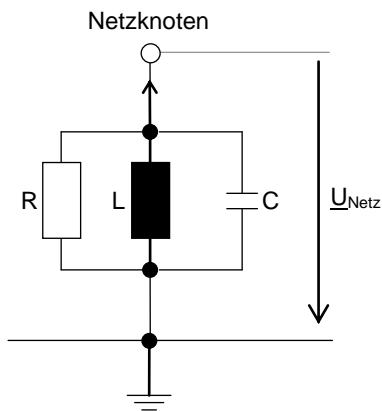


Bild: Ersatzschaltbild Parallelschaltung

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Saugkreises [Ohm]
 L ... Induktivität des Saugkreises [H]
 C ... Kapazität des Saugkreises [nF]

3.3.3 Quer RLC-Kreis – Hochpass R

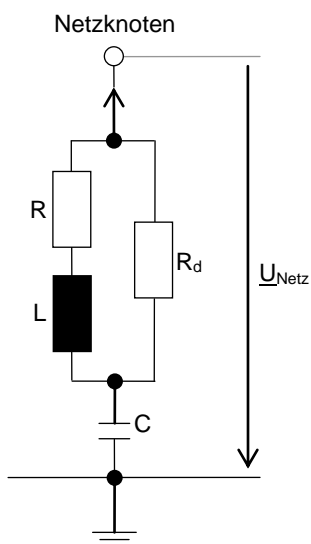


Bild: Ersatzschaltbild Hochpass R

- $\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]
 R ... Innenwiderstand des Hochpasses R [Ohm]
 L ... Induktivität des Hochpasses R [H]
 C ... Kapazität des Hochpasses R [nF]

R_d ... Dämpfungswiderstand des Hochpasses R [Ohm]

3.3.4 Quer RLC-Kreis – Hochpass C

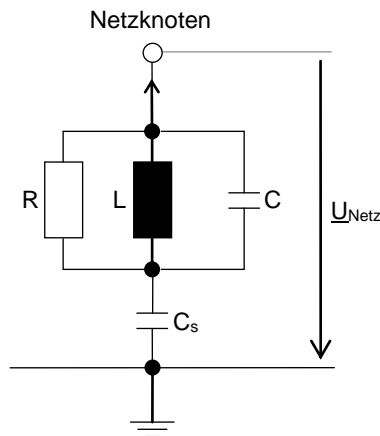


Bild: Ersatzschaltbild Hochpass C

$\underline{U}_{\text{Netz}}$... Netzseitiger Pegel [kV]

R ... Innenwiderstand des Hochpasses C [Ohm]

L ... Induktivität des Hochpasses C [H]

C ... Kapazität des Hochpasses C [nF]

C_s ... Serielle Kapazität des Hochpasses C [nF]

3.3.5 Längs RLC-Kreis – Serienschaltung

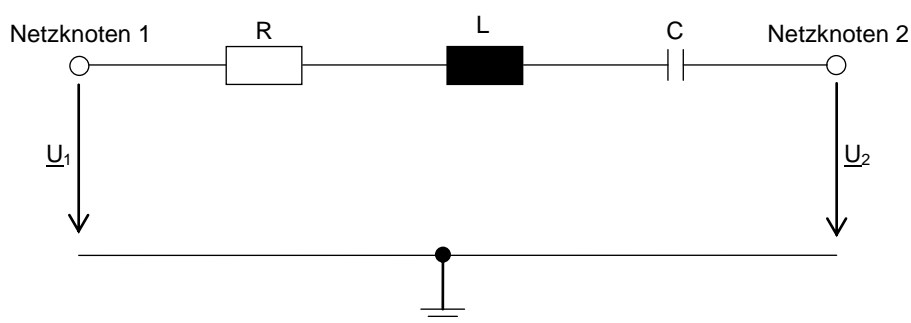


Bild: Ersatzschaltbild Serienschaltung

\underline{U}_1 ... Pegel am Knoten 1 [kV]

\underline{U}_2 ... Pegel am Knoten 2 [kV]

R ... Innenwiderstand des Sperrkreises [Ohm]

L ... Induktivität des Sperrkreises [H]

C ... Kapazität des Sperrkreises [nF]

3.3.6 Längs RLC-Kreis – Parallelschaltung

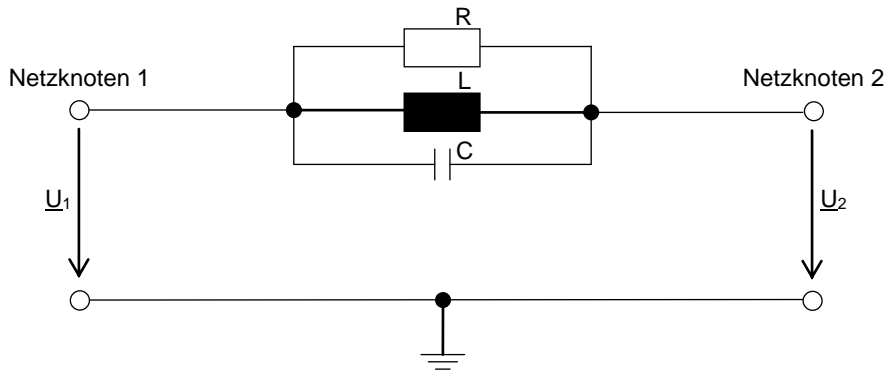


Bild: Ersatzschaltbild Parallelschaltung

- \underline{U}_1 ... Pegel am Knoten 1 [kV]
- \underline{U}_2 ... Pegel am Knoten 2 [kV]
- R ... Innenwiderstand des Sperrkreises [Ohm]
- L ... Induktivität des Sperrkreises [H]
- C ... Kapazität des Sperrkreises [nF]

3.3.7 Längs RLC-Kreis – Tonfrequenzsperre

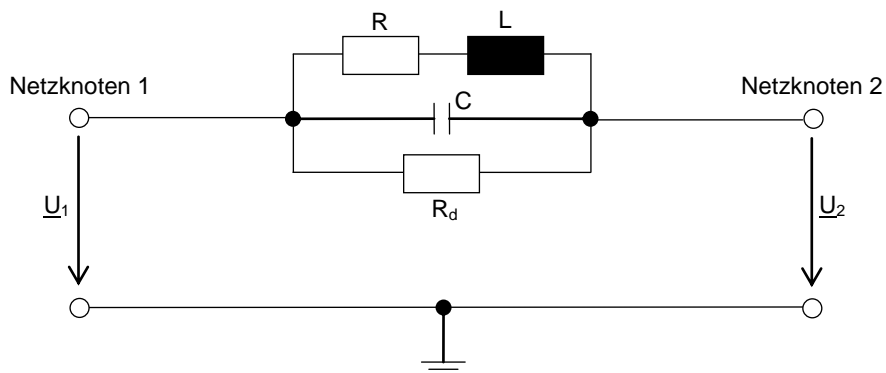


Bild: Ersatzschaltbild Tonfrequenzsperre

- \underline{U}_1 ... Pegel am Knoten 1 [kV]
- \underline{U}_2 ... Pegel am Knoten 2 [kV]
- R ... Innenwiderstand der Tonfrequenzsperre [Ohm]
- L ... Induktivität der Tonfrequenzsperre [H]
- C ... Kapazität der Tonfrequenzsperre [nF]
- R_d ... Dämpfungswiderstand der Tonfrequenzsperre [Ohm]

3.4 Nachbildung von Einspeisungen und Asynchronmotoren

Alle in PSS SINCAL zur Verfügung stehenden Einspeisungen (Generatoren Typ Slack, U, P und I) und Asynchronmotoren (Typ P und I) werden für die Rundsteuer-Berechnung als Impedanz nachgebildet. Der Blindanteil der Impedanz wird auf Rundsteuerfrequenz umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt für induktiven Blindanteil mit

$$X_{RF} = X_{BF} * \frac{f_R}{f_B}$$

und für kapazitiven Blindanteil mit

$$X_{RF} = X_{BF} * \frac{f_B}{f_R}$$

X_{RF} ... Blindwiderstand bei Rundsteuerfrequenz [Ohm]

X_{BF} ... Blindwiderstand bei Basisfrequenz [Ohm]

f_R ... Rundsteuerfrequenz [Hz]

f_B ... Basisfrequenz [Hz]

3.5 Nachbildung aller übrigen Zweigelemente

Die Nachbildung der in PSS SINCAL zur Verfügung stehenden Zweigelemente (Leitung, Leitung Mittelspannung, Leitung mit Querschnittsangabe, Lange Leitung, Kurzschlussdrossel, Längskondensator, Zwei- und Dreiwicklertrafo) erfolgt als Impedanz. Verluste und Kapazitäten gegen Erde werden je zur Hälfte auf den Anfangs- und Endknoten konzentriert. Der Blindanteil der Impedanz wird auf Rundsteuerfrequenz umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt getrennt für induktiven und kapazitiven Blindanteil analog zu den Einspeisungen.

Die Frequenzabhängigkeit aller Betriebsmittel kann aber auch wie beim Programm Oberschwingungen durch Kennlinien $R = R(f)$, $L = L(f)$, $C = C(f)$, durch die Vorgabe einer konstanten Güte oder durch die Vorgabe von

$$\frac{R_f}{R_{50\text{Hz}}} = \text{konstant}$$

erfolgen.

3.6 Technische Gegebenheiten und Vorbedingungen

Alle Rundsteueranlagen arbeiten in dem Frequenzbereich von 110 bis 1600 Hz. Da die Netze für die Energieübertragung ausgelegt sind, ergeben sich nur in diesem Frequenzbereich günstige Ausbreitungseigenschaften für die Rundsteuersignale. Um Empfangsprobleme durch netzseitige Resonanzfrequenzen, Kompensationskondensatoren und Filterkreise zu vermeiden, wird der Bereich über 500 Hz gemieden.

3.6.1 Ankopplungsprinzip

Für die Ankopplung der Rundsteuersignale an das Energienetz stehen folgende Möglichkeiten offen:

- [Serielle Ankopplung](#)
- [Parallele Ankopplung](#)

Beide Kopplungsarten sind im praktischen Einsatz und bieten für den Betrieb der Rundsteueranlage verschiedene Vor- und Nachteile. Die Entscheidung für die Art der Ankopplung hängt von den betrieblichen Erfordernissen ab.

Serielle Ankopplung

Vorteile

Die Ankopplungsgeräte liegen im Leistungsfluss des Energienetzes. Betriebliche Umschaltungen im Energienetz bringen keine Beeinträchtigung für die Einspeisung der Rundsteuersignale mit sich, wenn alle Netzeinspeisestellen mit geeigneten, zueinander phasenrichtigen Ankopplungseinrichtungen ausgestattet sind.

Nachteile

Eine Störung in der Einspeiseanlage unterbricht bei dieser Kopplungsart den Energiefluss. Umschaltungen sind für die Aufrechterhaltung des Netzbetriebes notwendig.

Parallele Ankopplung

Vorteile

Die Ankopplungsgeräte liegen im Spannungspfad des Energienetzes. Sie können praktisch an beliebigen Knoten des Netzes platziert werden. Bei einer Störung in der Einspeiseanlage kann diese problemlos abgeschaltet werden, ohne einen Einfluss auf den Netzbetrieb nach sich zu ziehen.

Nachteile

Parallelankopplungen müssen bei betrieblichen Umschaltungen im Netz mit umgeschaltet werden. Nur auf diese Art und Weise kann der Betrieb der Rundsteueranlage aufrechterhalten werden.

3.6.2 Rundsteuerfrequenz

Die Rundsteuersignale werden mittels Rundsteuerfrequenz übertragen und empfangen. Um einen problemlosen Betrieb sicherzustellen, müssen Störeinflüsse von vornherein vermieden werden. Störende Frequenzen treten teilweise mit erheblichen Pegeln auf, die Pegel der Netzfrequenz mit 100 % der Netzspannung, die harmonischen Oberschwingungen der Netzfrequenz zeitweise mit bis zu 8 % der Netzspannung.

Weiterhin können Rundsteuersignale von in benachbarten Netzen arbeitenden Rundsteueranlagen verschleppt werden. Die Eingangsfiler der Rundsteuerempfänger müssen nun aus diesem Frequenzgemisch die für sie richtige herausfiltern. Dies erfordert eine ausreichende Bandbreite des Filters. Die Rundsteuerfrequenzen liegen daher zwischen den Netzharmonischen. Der Abstand zu den Netzharmonischen beeinflusst die Qualität des zu filternden Rundsteuerpegels.

3.6.3 Frequenzfilter

Frequenzfilter sind elektrotechnisch gesehen Serien- bzw. Parallelschwingkreise. Sie dienen zum Erkennen eines Signals mit einer bestimmten Frequenz, Sperren eines Signals mit einer bestimmten Frequenz und Absaugen eines Signals mit einer bestimmten Frequenz.

Eine Rundsteueranlage kann nur durch die Eigenschaften von Frequenzfiltern mit einwandfreier Funktionalität betrieben werden. Die Frequenzfilter werden aufgrund von betrieblichen Gegebenheiten an den Netzknoten angeschlossen.

3.6.4 Rundsteuer-Berechnung

Das Ziel einer Rundsteuer-Berechnung ist es, aufgrund gegebener Impedanzen, Leistungen und Senderspannungen die Knotenpegel und die Senderströme zu errechnen.

Die Impedanzen der einzelnen Netzelemente müssen dabei vorher auf die Rundsteuerfrequenz umgerechnet werden.

Bei den Leistungen der einzelnen Netzelemente muss eine kapazitive Kompensationsleistung in die Berechnung mit einbezogen werden können.

4. Anwendungsbeispiel für Oberschwingungen

Im Folgenden soll das Verfahren **Oberschwingungen** in PSS SINCAL anhand einfacher Anwendungsbeispiele dargestellt werden. In den Beschreibungen werden

- das [Voreinstellen der Berechnungsparameter](#),
- das [Erfassen von Frequenzgängen](#),
- das [Festlegen des Frequenzverhaltens der Netzelemente](#),
- das [Definieren von Strom- und Spannungsquellen](#),
- das [Zuordnen von Strom- und Spannungsquellen](#),
- das [Starten der Berechnung](#) sowie
- das [Darstellen und Auswerten der Ergebnisse](#)

dargestellt.

Grundlagen

Alle Beschreibungen basieren auf folgendem Netz.

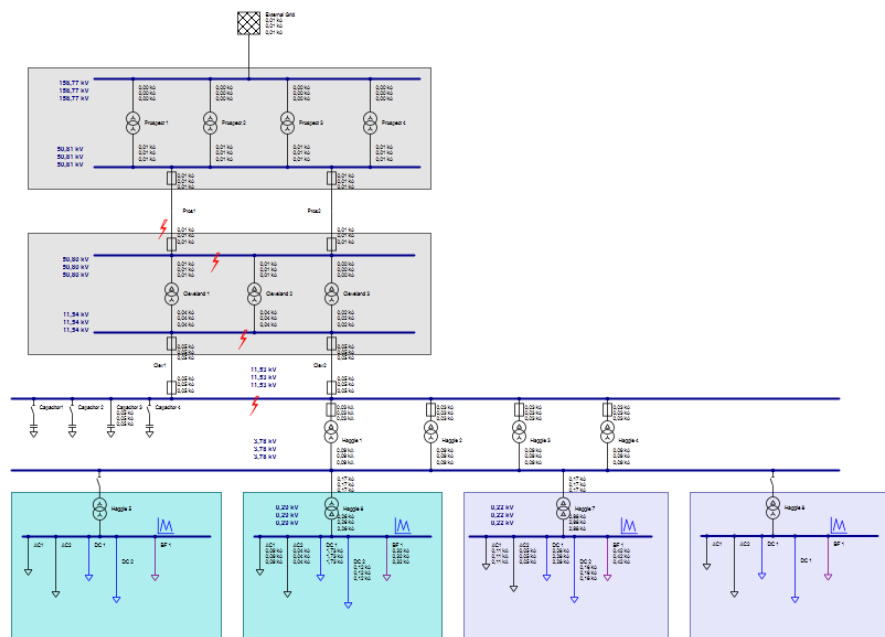


Bild: Beispielsnetz für die Oberschwingungsberechnung

Dieses Netz ("Example Ele2") wird bei der Installation von PSS SINCAL automatisch bereitgestellt und kann zum Testen des Simulationsverfahrens eingesetzt werden.

Voraussetzung für die Oberschwingungsberechnung ist, dass der Punkt **Oberschwingungen und Rundsteuerung** im Menü **Berechnen – Methoden** (siehe Handbuch Bedienung, Kapitel Benutzeroberfläche, Abschnitt Voreinstellen der Berechnungsmethoden) aktiviert ist.

4.1 Voreinstellen der Berechnungsparameter

Die Maske zum Einstellen der Berechnungsparameter wird über den Menüpunkt **Berechnen – Parameter** geöffnet.

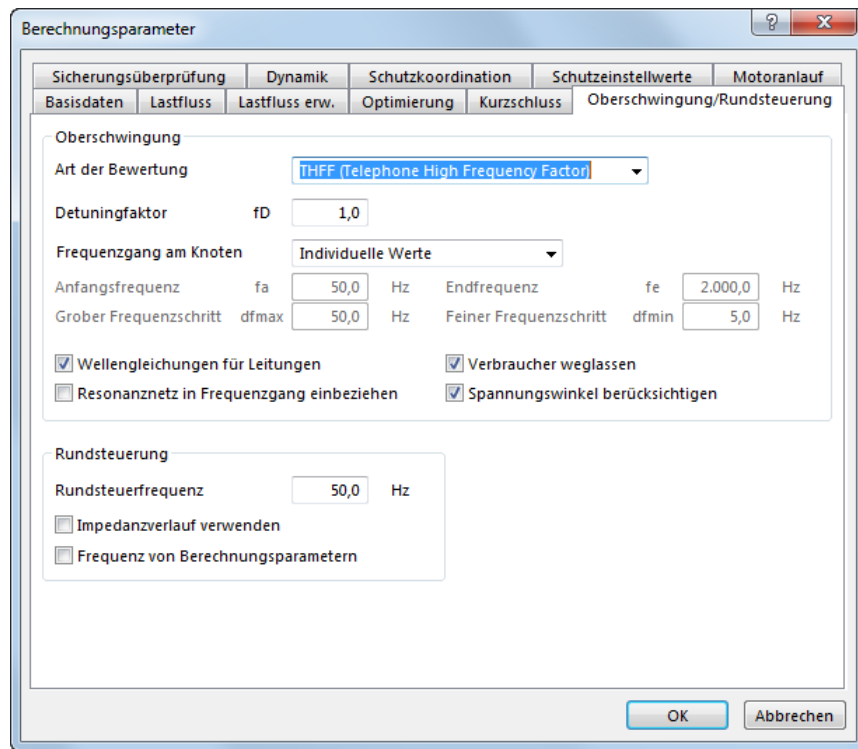


Bild: Berechnungsparameter Oberschwingung/Rundsteuerung

Vor der Oberschwingungsberechnung müssen die Randbedingungen für die Oberschwingungsberechnung festgelegt werden.

4.2 Erfassen von Frequenzgängen

Das Erfassen von Frequenzgängen erfolgt über das Menü **Einfügen – Einfügemodi – Frequenzgang**.

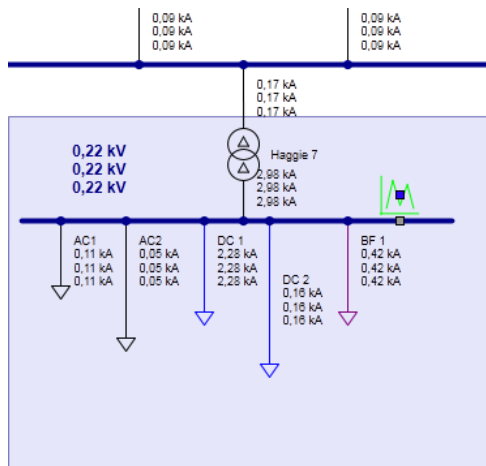


Bild: Netz mit erfasstem Frequenzgang

Soll an einem Knoten der Impedanzverlauf über die Frequenz als Diagramm dargestellt werden, so muss an diesem Knoten ein Frequenzgang erfasst werden.

4.3 Festlegen des Frequenzverhaltens der Netzelemente

Das Festlegen des Frequenzverhaltens der einzelnen Netzelemente erfolgt im Register **Oberschwingung** des jeweiligen Netzelementes.

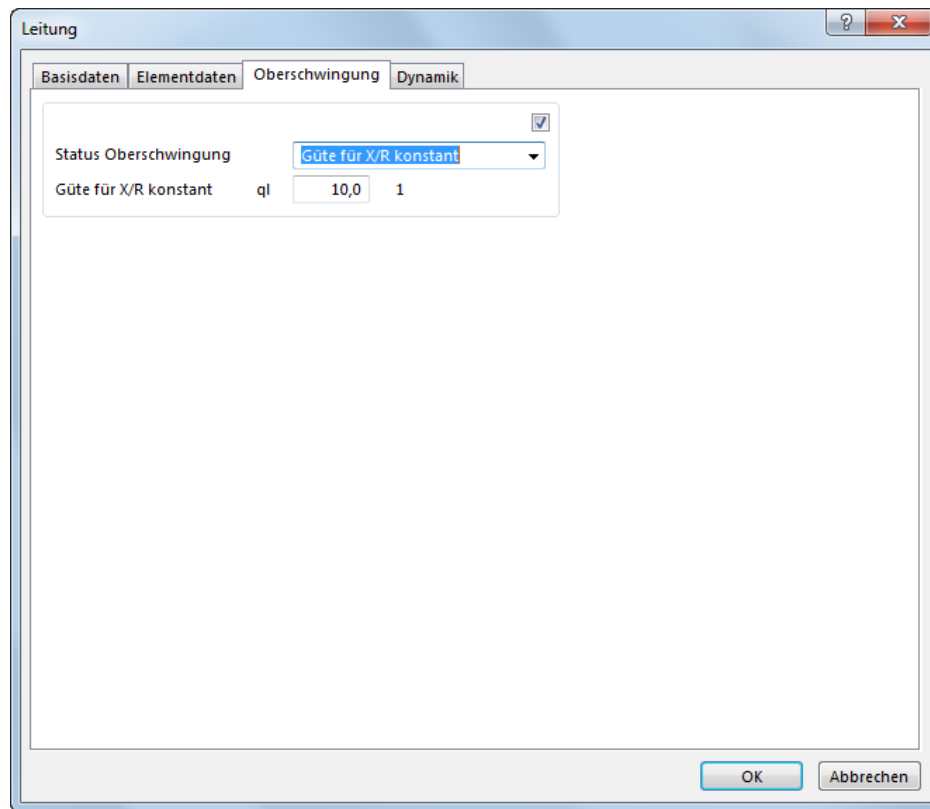


Bild: Festlegen des Frequenzverhaltens einer Leitung

Genauere Informationen über das Frequenzverhalten finden Sie im Kapitel Allgemeine Oberschwingungsdaten für Netzelemente im Handbuch Eingabedaten.

4.4 Definieren von Strom- und Spannungsquellen

Über den Menüpunkt **Daten – Oberschwingung – Stromquelle** bzw. **Daten – Oberschwingung – Spannungsquelle** wird der Dialog zur Definition von Strom- und Spannungsquellen geöffnet.

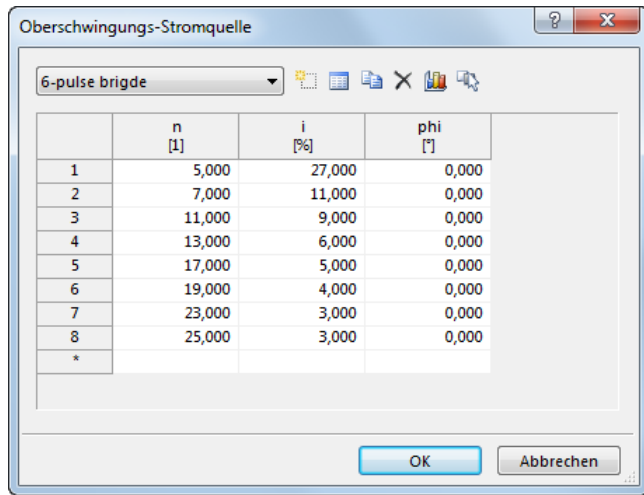


Bild: Definition von Oberschwingungs-Stromquellen

Mit Hilfe dieses Dialoges können Oberschwingungs-Stromquellen erzeugt, bearbeitet und auch gelöscht werden. Für Oberschwingungs-Spannungsquellen gibt es einen korrespondierenden Dialog.

4.5 Zuordnen von Strom- und Spannungsquellen

Das Zuordnen von Strom- und Spannungsquellen erfolgt im Register **Oberschwingung** des jeweiligen Netzelementes.

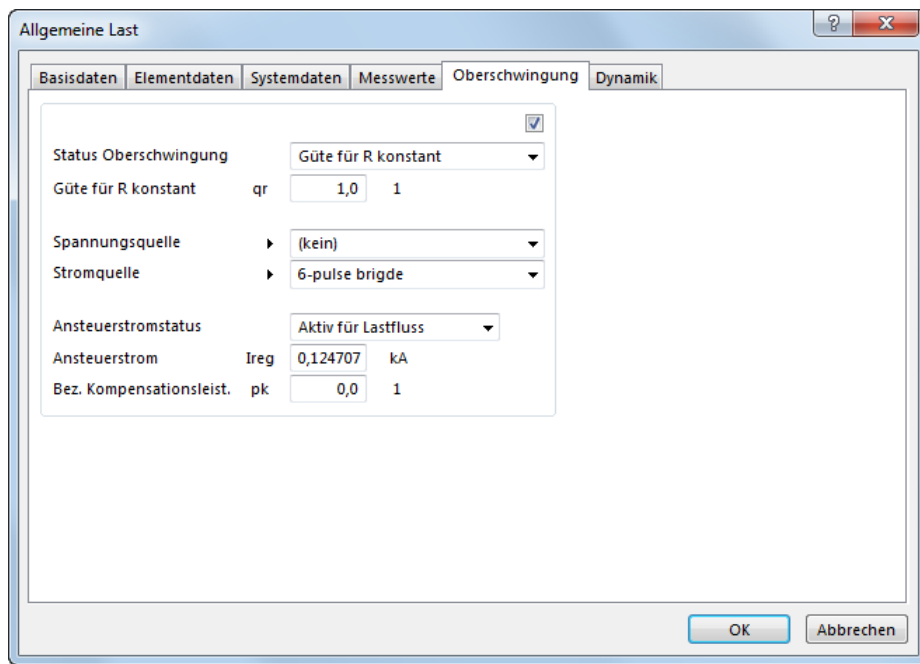


Bild: Zuordnen einer Oberschwingungs-Stromeinspeisung zu einer Last

Die Zuordnung von Strom- und Spannungsquellen erfolgt in den Feldern **Spannungsquelle** und **Stromquelle**.

4.6 Starten der Berechnung

Die Oberschwingungsberechnung wird über den Menüpunkt **Berechnen – Oberschwingung** gestartet.

4.7 Darstellen und Auswerten der Ergebnisse

Nach dem Berechnen wird die Strom- und Spannungsverteilung in der Netzgrafik und als Diagramm zur Verfügung gestellt. Die Frequenzgänge an den Knoten werden nur in Form von Diagrammen zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse der einzelnen Frequenzen können über den Dialog **Eingabedaten und Ergebnisse** in der Netzgrafik angezeigt werden. Hierzu wird der Menüpunkt **Ansicht – Eingabedaten und Ergebnisse** aktiviert.

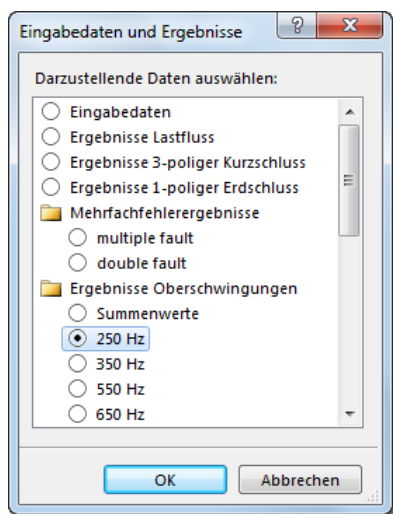


Bild: Dialog Eingabedaten und Ergebnisse

Die Ergebnisse in Diagrammform können über den Menüpunkt **Ansicht – Diagramm** betrachtet werden.

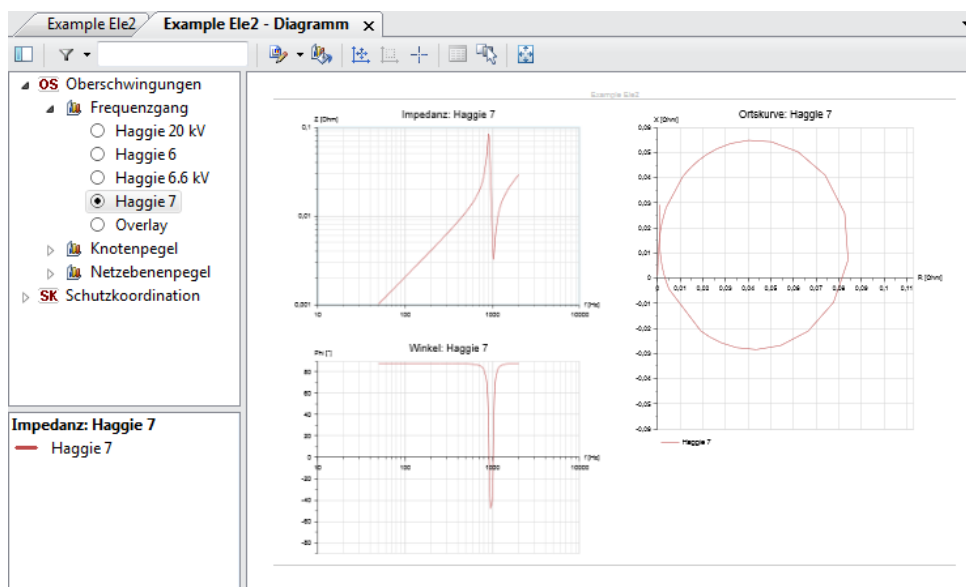


Bild: Frequenzgang am Knoten