
Anhang A Dynamik und Regelungstechnik

A.1 Darstellung linearer Systeme

Ein lineares System mit Eingangsvektor \vec{u} und Ausgangsvektor \vec{y} (Abb. A.1) lässt sich durch ein System linearer Differentialgleichungen erster Ordnung beschreiben, welche die Form annehmen

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \\ \vec{y} &= \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{u},\end{aligned}\tag{A.1}$$

worin \vec{x} der Vektor der Zustandsgrößen und \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} die Zustandsraummatrizen darstellen. Die stationäre Lösung ist

$$\vec{x} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\vec{u}, \vec{y} = (\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})\vec{u}.$$

Dynamisch entspricht Gleichungssystem (A.1) dem Blockschaltbild Abb. A.2. Aus der ersten der Gl. (A.1) ergibt sich durch Laplace-Transformation im Bildbereich

$$\begin{aligned}s\vec{x} - \vec{x}_0 &= \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \\ \Rightarrow \vec{x} &= (s\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}(\vec{x}_0 + \mathbf{B}\vec{u})\end{aligned}$$

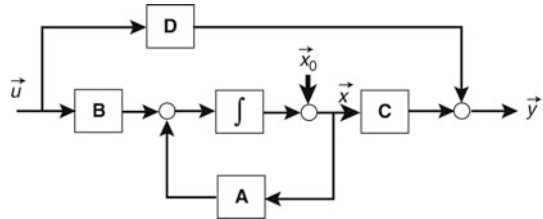
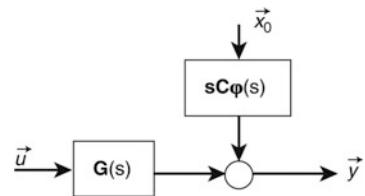
mit \vec{x}_0 Anfangsbedingungen und \mathbf{E} Einheitsmatrix.

Der Ausgangsvektor ist

$$\vec{y} = \mathbf{C}\varphi(s)\vec{x}_0 + \mathbf{G}(s)\vec{u}, \text{ mit } \begin{cases} \varphi(s) = (s\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \\ \mathbf{G}(s) = \mathbf{C}\varphi(s) + \mathbf{B} + \mathbf{D}. \end{cases}\tag{A.2}$$

Daraus ergibt sich die Darstellung mit Übertragungsfunktionen von Abb. A.3 (Laplace-Carson, s. Ba 1, Abschn. 6.2.6).

$\varphi(s)$ wird *Fundamentalmatrix* genannt. Sie bestimmt die Dynamik und kann folgendermaßen berechnet werden [A.7]

Abb. A.1 Lineares System**Abb. A.2** Blockschaltbild des linearen Systems im Zustandsraum**Abb. A.3** Darstellung des linearen Systems mit Übertragungsfunktionen

$$\varphi(s) = (sE - A)^{-1} = \frac{Adj(sE - A)}{|sE - A|}. \quad (\text{A.3})$$

Der Nenner (Determinante von $sE - A$) stellt das *charakteristische Polynom* dar und liefert die *Eigenwerte* der *Systemmatrix* A . Vor allem die Matrix A ist somit für das dynamische Verhalten des Systems maßgebend.

$G(s)$ ist die *Übertragungsmatrix* (Matrix der Übertragungsfunktionen y_i/u_k für $\vec{x}_0 = 0$). Sie lässt sich analytisch aus den Zustandsraummatrizen durch

$$G(s) = \frac{C \cdot Adj(sE - A) \cdot B + D \cdot |sE - A|}{|sE - A|} \quad (\text{A.4})$$

bestimmen. Den Übergang von der Zustandsraumdarstellung zur äquivalenten Darstellung mit Übertragungsfunktionen erhält man z. B. in Matlab (Control System Toolbox) mit dem Befehl

$$\text{sys} = \text{ss}(A, B, C, D) \rightarrow g = \text{tf}(\text{sys})$$

Das System sys ist durch die Zustandsraummatrizen A, B, C, D gegeben, und daraus ergibt sich die Übertragungsmatrix g

Sind umgekehrt die einzelnen Übertragungsfunktionen g_k gegeben, kann mit sysk das Zustandsraummodell pro Eingang, oder durch Bildung der Übertragungsmatrix g das dieser Übertragungsmatrix entsprechende Zustandsraummodell sys minimalster Ordnung (vollständig steuerbar und beobachtbar [A.1]) bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 g1 &= tf(num1, den) \\
 g2 &= tf(num2, den) \\
 & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} sysk = ss(gk) \text{ oder} \\ g = [g1, g2, g3, g4] - - f \text{ sys} = ss(g). \end{array} \\
 g3 &= tf(num3, den) \\
 g4 &= tf(num4, den)
 \end{aligned}$$

A.2 Stabilität

Ein *lineares System* ist dann *asymptotisch stabil*, wenn alle *Eigenwerte der Systemmatrix A negative Realteile* aufweisen. Sind komplex konjugierte Eigenwerte vorhanden, ist die Systemantwort oszillierend. Sie ist merklich oszillierend, wenn *wichtige* Eigenwerte komplex sind (s. dazu auch [Abschn. A.4](#)).

In einem *nichtlinearen System* muss zwischen der *Stabilität im Kleinen*, d. h. der Stabilität für kleine Abweichungen um eine Gleichgewichtslage und der *Stabilität im Großen* unterschieden werden.

Stabilität im Kleinen

Das nichtlineare System wird um eine stationäre Lösung linearisiert. Die Stabilität im Kleinen ist für den betrachteten stationären Betrieb dann gewährleistet, wenn das linearisierte System stabil ist, was durch die Analyse von dessen Systemmatrix festgestellt werden kann. In diesem Zusammenhang wird auch von *statischer Stabilität* (oder Stabilität des stationären Betriebs) gesprochen, obwohl letztere auf Grund rein statischer Überlegungen ermittelt wird (stationäre Kennlinie). Die statische Stabilität ist zwar eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung für die Stabilität im Kleinen (z. B. ungenügende Dämpfung ist möglich).

Stabilität im Großen

Die Stabilität für große Störungen einer Gleichgewichtslage ist dann gegeben, wenn das System eine neue statisch stabile Lage erreicht oder nach Elimination der Störung in eine statisch stabile Lage zurückkehrt. Die Stabilität im Großen ist keine Systemeigenschaft, sondern von Art, Größe und Ort der Störung abhängig. Sie kann durch eine transiente Analyse oder nichtlineare Simulation überprüft werden.

Kurzzeit- und Langzeitstabilität

Instabilitäten (im Kleinen wie im Großen) können sowohl bei Vorgängen auftreten, die sich im Sekundenbereich abspielen, als auch bei Vorgängen, die minutenlang dauern. Um sie zu untersuchen, werden verschiedene Modelle verwendet, die im jeweiligen Frequenzbereich eine realistische Nachbildung der Systemelemente sicherstellen.

So werden bei der Analyse der *Kurzzeitstabilität* langsame Vorgänge vernachlässigt, d. h. die entsprechenden Zustandsvariablen als konstant betrachtet (Beispiele im

Energieversorgungsnetz: Übersetzung von Stelltransformatoren, Flussverkettung von Synchronmaschinen bei der transienten Analyse).

Umgekehrt werden bei der Analyse der Langzeitstabilität schnelle Vorgänge als bereits ausgeklungen betrachtet, d.h. die entsprechenden Zeitkonstanten vernachlässigt (Beispiel: Vernachlässigung von subtransienten Effekten, von Synchronisierschwingungen bei Drehzahl- und Frequenzregelung oder bei der Analyse der Spannungsstabilität, von Motorlastdynamik bei der Spannungsstabilität).

A.3 Kopplung linearer Teilsysteme

Besteht das betrachtete Gesamtsystem aus n Teilsystemen, die gemäß Gl. (Formel A.1) folgendermaßen beschrieben werden

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{x}_i}{dt} &= \mathbf{A}_i \vec{x}_i + \mathbf{B}_i \vec{u}_i \\ \vec{y}_i &= \mathbf{C}_i \vec{x}_i + \mathbf{D}_i \vec{u}_i, \quad i = 1 \dots n,\end{aligned}\tag{A.5}$$

können die Gleichungen zu einem resultierenden System zusammengefasst werden, welches wieder die Form

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A} \vec{x} + \mathbf{B} \vec{u} \\ \vec{y} &= \mathbf{C} \vec{x} + \mathbf{D} \vec{u}\end{aligned}\tag{A.6}$$

annimmt, mit

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vdots \\ \vec{x}_n \end{pmatrix}, \vec{u} = \begin{pmatrix} \vec{u}_1 \\ \vdots \\ \vec{u}_n \end{pmatrix}, \vec{y} = \begin{pmatrix} \vec{y}_1 \\ \vdots \\ \vec{y}_n \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 0 & \mathbf{A}_n \end{vmatrix}, \text{ usw.}\tag{A.7}$$

Die resultierenden Zustandsraummatrizen \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} sind *Block-Diagonalmatrizen*.

Die Eingänge eines beliebigen Teilsystems seien von den Ausgängen anderer Teilsysteme über eine Kopplungsmatrix \mathbf{K} abhängig

$$\vec{u} = \vec{u}_s + \mathbf{K} \vec{y},\tag{A.8}$$

worin in \vec{u}_s lediglich die Gesamtsystem-Eingangsgrößen verschieden von null sind.

Wird \vec{u} aus den Gl. (A.6) und (A.8) eliminiert, folgen die Beziehungen

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A}_s \vec{x} + \mathbf{B}_s \vec{u}_s \\ \vec{y} &= \mathbf{C}_s \vec{x} + \mathbf{D}_s \vec{u}_s\end{aligned}\tag{A.9}$$

Mit

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_s &= \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{G} \\
 \mathbf{B}_s &= \mathbf{B}\mathbf{H} \\
 \mathbf{C}_s &= \mathbf{C} + \mathbf{D}\mathbf{G} \text{ mit } \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{G} = \mathbf{K}(\mathbf{E} - \mathbf{D}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{C} \\ \mathbf{H} = \mathbf{E} + \mathbf{K}(\mathbf{E} - \mathbf{D}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{D} \end{array} \right. \\
 \mathbf{D}_s &= \mathbf{D}\mathbf{H}
 \end{aligned} \tag{A.10}$$

(\mathbf{E} = Einheitsmatrix), die das dynamische Verhalten des Gesamtsystems vollständig beschreiben. Die Systemmatrix \mathbf{A}_s liefert die entsprechenden Eigenwerte.

A.4 Modale Analyse

A.4.1 Modale Zerlegung

Wird in Gl. (A.1) der Zustandsvektor \vec{x} durch den Zustandvektor \vec{z} ersetzt

$$\vec{x} = \mathbf{M}\vec{z}, \tag{A.11}$$

folgt

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{z}}{dt} &= \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{M}\vec{z} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\vec{u} \\
 \vec{y} &= \mathbf{C}\mathbf{M}\vec{z} + \mathbf{D}\vec{u},
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

das vereinfacht wieder durch

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{z}}{dt} &= \mathbf{A}_d\vec{z} + \mathbf{B}_d\vec{u} \\
 \vec{y} &= \mathbf{C}_d\vec{z} + \mathbf{D}\vec{u}
 \end{aligned} \tag{A.13}$$

beschrieben werden kann, mit

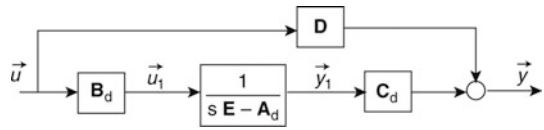
$$\mathbf{A}_d = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{M}, \mathbf{B}_d = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}, \mathbf{C}_d = \mathbf{C}\mathbf{M}. \tag{A.14}$$

Durch geschickte Wahl der Matrix \mathbf{M} wird die Systemmatrix \mathbf{A}_d diagonal. In Matlab kann dies mit

$$[\mathbf{M}, \mathbf{A}_d] = \text{eig}(\mathbf{A}) \tag{A.15}$$

geschehen, ein Befehl, der die Diagonalmatrix \mathbf{A}_d und die Diagonalisierungsmatrix \mathbf{M} (Matrix der Eigenvektoren) liefert. Die Diagonalmatrix enthält die Eigenwerte λ_i des Systems. [Abbildung A.4](#) zeigt das Blockdiagramm des modaltransformierten Systems. Die Matrix $(s\mathbf{E} - \mathbf{A}_d)$ enthält in der Diagonalen die Lösungen oder Modi $(s - \lambda_i)$, und Gl. (A.13) lässt sich im Bildbereich schreiben

Abb. A.4 Blockdiagramm des modaltransformierten Systems



$$z_j = \sum_k \frac{b_{jk} u_k}{s - \lambda_j}$$

$$y_i = \sum_k u_k \left(\sum_j \frac{c_{ij} b_{jk}}{s - \lambda_j} + dik \right). \quad (\text{A.16})$$

Dies bedeutet, dass jeder Eingang u_k über jeden Modus j mit dem Faktor $c_{ij}b_{jk}$ an der Bildung der Ausgangsgröße y_i beteiligt ist. Die Koeffizienten c_{ij} und b_{jk} der Matrizen C_d und B_d sind im allgemeinen komplex.

A.4.2 Modale Reduktion

Die modale Reduktion besteht nun darin, das System in der Ordnung dadurch zu reduzieren, dass nur wichtige Modi berücksichtigt werden. Dazu ist eine Bewertung der Modi notwendig. Reelle Eigenwerte ergeben aperiodische und die Zusammenfassung komplex konjugierter Eigenwerte oszillierende Teilbewegungen.

Jeder reelle Eigenwert ergibt gemäss Gl. (A.16) folgenden Beitrag zu y_i

$$\Delta y_{ijk} = u_k \frac{k_{ijk}}{1 + sT_j} \text{ mit } T_j = -\frac{1}{\lambda_j}, k_{ijk} = -\frac{c_{ij}b_{jk}}{\lambda_j}. \quad (\text{A.17})$$

Die entsprechende Antwort auf einen Einheitssprung von u_k lautet

$$\Delta y_{ijk}(t) = k_{ijk} \left(1 - e^{\frac{t}{T_j}} \right). \quad (\text{A.18})$$

Jeder komplex-konjugierte Eigenwert liefert den Beitrag

$$\Delta y_{ijk} = u_k \left(\frac{k_{ijk1} \frac{s}{\omega_{0j}} + k_{ijk2}}{1 + 2\zeta_j \frac{s}{\omega_{0j}} + \frac{s^2}{\omega_{0j}^2}} \right) \text{ mit } \omega_{0j} = |\lambda_j|, \zeta_j = \frac{1}{2} \frac{\lambda_j + \lambda_j^*}{|\lambda_j|}$$

$$k_{ijk1} = \frac{(c_{ij} b_{jk} + c_{ij}^* b_{jk}^*)}{|\lambda_j|}, k_{ijk2} = - \left(\frac{c_{ij} b_{jk}}{\lambda_j} + \frac{c_{ij}^* b_{jk}^*}{\lambda_j^*} \right). \quad (\text{A.19})$$

Die entsprechende Sprungantwort ist

$$\Delta y_{ijk}(t) = k_{ijk2} \left[1 - \frac{e^{-\zeta_j \omega_{0j} t}}{\sin \varphi_j} \sin(\omega_{cj} t + \varphi_j) \right] \quad (\text{A.20})$$

$$\omega_{cj} = \sqrt{1 - \zeta_j^2} \omega_{0j}, \quad \tan \varphi_j = \frac{\sqrt{1 - \zeta_j^2}}{\zeta_j - \frac{k_{ijk1}}{k_{ijk2}}}$$

Die reellen Faktoren k_{ijk} , die im wesentlichen vom Verhältnis $|c_{ij} b_{jk}|/|\lambda_j|$ abhängen, ermöglichen zusammen mit der Zeitkonstanten T_j bzw. der Eigenfrequenz ω_{0j} und Dämpfung ζ_j eine Bewertung der Wichtigkeit der einzelnen Terme für den Verlauf der Systemantwort [A.4], [A.8].

A.5 Netzdarstellung für höhere Frequenzen

Das aus linearen Elementen bestehende elektrische Netz kann für Vorgänge, die eine Frequenz eindeutig unter 50 Hz aufweisen, durch die komplexen Knotenadmittanzen beschrieben werden. Für höhere Frequenzen sei nachstehende Darstellung im Bildbereich näher betrachtet.

Induktive Netzzweige

Entsprechend Abb. A.5 gilt für die Momentanwerte im Zeitbereich

$$u - u_S = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (\text{A.21})$$

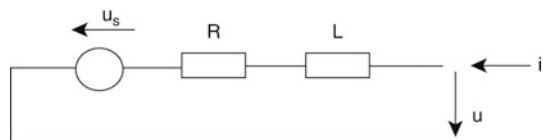
worin u_S eine Spannungsquelle darstellt. Im Bildbereich der Laplace-Transformation folgt

$$u - u_S = (R + sL)i - Li_{L0} \quad (\text{A.22})$$

und mit der Laplace-Carson-Transformation (Bd 1, Abschn. 6.2.6)

$$u - u_S = (R + sL)i - Lsi_{L0}, \quad (\text{A.23})$$

Abb. A.5 Induktiver Netzzweig mit Spannungsquelle



worin i_{L0} der Anfangsstrom darstellt. Diese Gleichung lässt sich auch schreiben

$$\begin{aligned} u - u_S &= Z(s)i + u_{z0} \\ \text{mit } Z(s) &= (R + sL); u_{z0} = Ls i_{L0}. \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

u_{z0} drückt darin, die über der Zweigimpedanz liegende Anfangsspannung aus.

Bemerkenswert ist die perfekte Analogie mit der *Zweig-Differenzengleichung* nach [A.5], die sich durch Diskretisierung der Differentialgleichung (A.21) ergibt:

$$\begin{aligned} u - u_S &= Z(\Omega)i + u_v \\ \text{mit } Z(\Omega) &= (R + \Omega L); u_v = L\Omega v_L, \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

die sich also aus der Laplace-Carson-Beschreibung des Zweiges Gl. (A.24) direkt ableiten lässt, mit Ersatz von

- s durch den von der Schrittweite h abhängigen Parameter Ω ,
- der Anfangsspannung u_{z0} durch den Vergangenheitswert u_v bzw. des Anfangsstromes i_{L0} durch den Vergangenheitswert v_L , welche die Spannung bzw. den Strom des vorherigen Rechenschritts darstellen.

Ω und u_v sind vom Diskretisierungsverfahren abhängig. Für die Trapezregel gilt z. B. [A.5]

$$\Omega = \frac{2}{h}, \text{ und } v_L(t+h) = 2i(t) + v_L(t). \quad (\text{A.26})$$

Kapazitive Netzzeige

Analog dazu und entsprechend Abb. A.6 folgt für einen kapazitiven Zweig mit Stromquelle i_S

$$i - i_S = Gu + C \frac{du}{dt}, \quad (\text{A.27})$$

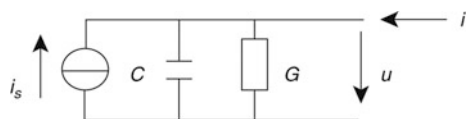
und die Laplace-Carson-Transformierte

$$i - i_S = (G + sC)u - Csu_{C0}, \quad (\text{A.28})$$

die auch in der Form

$$\begin{aligned} i - i_S &= Y(s)u + i_{Y0} \\ \text{mit } Y(s) &= (G + sC); i_{Y0} = Csu_{C0}. \end{aligned} \quad (\text{A.29})$$

Abb. A.6 Kapazitiver Netzzeig mit Stromquelle



geschrieben werden kann. Die Diskretisierung der Differentialgleichung führt andererseits zur analogen Zweig-Differenzgleichung [A.5]

$$i - i_s = Y(\Omega)u + i_v \quad (\text{A.30})$$

mit $Y(\Omega) = (G + \Omega C)$; $i_v = C\Omega v_C$,

Insgesamt lassen sich also die Zweig-Differenzgleichungen aus der Beschreibung mit der Laplace-Carson-Transformation Gl. (A.24) und (A.29) mit den Substitutionen

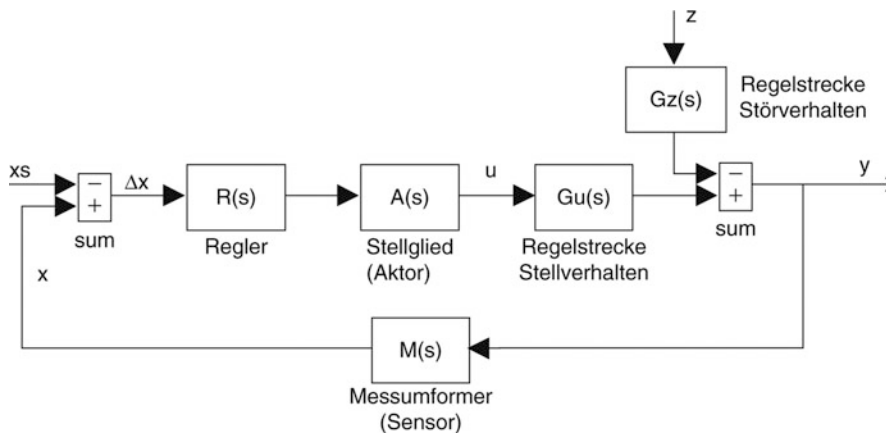
$$\begin{aligned} s &\rightarrow \Omega \\ i_{L0} &\rightarrow v_L, u_{C0} \rightarrow v_C \\ u_{Z0} &\rightarrow u_v, i_{Y0} \rightarrow i_v \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

erhalten.

A.6 Elementare lineare Regelungstechnik

Abbildung A.7 zeigt das Blockschema eines einfachen einschleifigen linearen Regelkreises. Es enthält neben der Regelstrecke den Sensor, den Aktor zur Leistungsverstärkung und den Regler. Die Regelstrecke ist durch zwei das Stell- und Störverhalten beschreibende Übertragungsfunktionen gegeben.

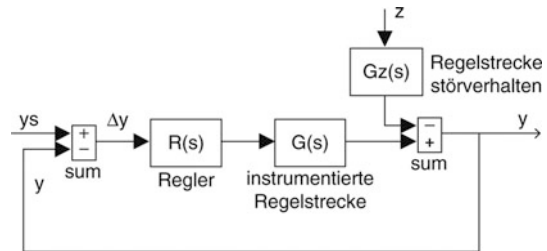
Aus dem Blockschema folgt durch Einführung des auf die Regelgröße bezogenen (fiktiven) Sollwertes y_s und der Übertragungsfunktion $G(s)$ der *instrumentierten Regelstrecke*



- y = Regelgrösse (geregelte Grösse)
- z = Störgrösse
- u = Stellgrösse
- x = Istwert
- x_s = Sollwert
- Δx = Regelabweichung

Abb. A.7 Grundelemente des einschleifigen Regelkreises

Abb. A.8 Vereinfachtes
Blockschaltbild des linearen
Regelkreises



$$y_s = \frac{x_s}{M(s)}, G(s) = A(s)G_u(s)M(s) \quad (\text{A.32})$$

der Zusammenhang

$$\begin{aligned} y &= [x_s - M(s)y]R(s)A(s)G_u(s) - zG_z(s) \\ \text{--} \text{ } &\text{--} \text{ } y = (y_s - y)R(s)G(s) - zG_z(s), \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

der zum vereinfachten Blockdiagramm mit Einheitsrückführung von [Abb. A.8](#) führt.

Als Übertragungsfunktion des offenen (oder aufgeschnittenen) Regelkreises wird

$$G_0(s) = R(s)G(s). \quad (\text{A.34})$$

bezeichnet. Das Stell- und Störverhalten des Regelkreises wird dann durch

$$\frac{y}{y_s} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)}, \frac{y}{z} = -\frac{G_z(s)}{1 + G_0(s)} \quad (\text{A.35})$$

gegeben. Das Stellverhalten wird einzig von der Übertragungsfunktion $G_0(s)$ bestimmt. Dies gilt, zumindest bezüglich Eigenwerte, auch für die Dynamik des Störverhaltens.

Hauptaufgabe des Regelungstechnikers ist es also, bei Vorgabe der instrumentierten Regelstrecke $G(s)$ den Regler $R(s)$ so festzulegen, dass die Übertragungsfunktion $G_0(s)$ den Anforderungen an den Regelkreis Genüge leistet. Diese Anforderungen betreffen die *Stabilität*, die *Genauigkeit* (Regelabweichung) und die *Regelgeschwindigkeit*. Die klassischen Lösungen dieses Synthese-Problems sind

- Analytische Lösung durch Vorgabe des Stellverhaltens
- Synthese im Frequenzbereich

A.6.1 Vorgabe des Stellverhaltens

Wird die Übertragungsfunktion $G_y(s)$ des geschlossenen Regelkreises vorgegeben

$$\frac{y}{y_s} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} = G_y(s), \quad (\text{A.36})$$

kann nach $R(s)$ aufgelöst werden. Es folgt

$$R(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{G_y(s)}{1 - G_Y(s)} \quad (\text{A.37})$$

Ist n der Grad des Nenner- und m jener des Zählerpolynoms einer Übertragungsfunktion, sei mit $\text{PNÜ} = n - m$ der Pol-Nullstellen-Überschuss bezeichnet. Aus physikalischen Gründen ist der PNÜ einer Übertragungsfunktion nie negativ. Die Wahl von $G_y(s)$ ist im Prinzip frei, unterliegt jedoch für die Realisierbarkeit von $R(s)$ der Einschränkung, dass der PNÜ von $G_y(s)$ mindestens so groß wie der PNÜ von $G(s)$ sein muss. Ist der PNÜ von $G(s) \leq 2$, was vielen praktischen Fällen entspricht, kann eine Stellantwort zweiter Ordnung gewählt werden, z. B.

$$G_y(s) = \frac{1}{1 + s \frac{2\zeta}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad (\text{A.38})$$

Durch diese Wahl wird die Regelabweichung null, die Schwingungsfrequenz ω_0 (und damit die Regelgeschwindigkeit) und die Dämpfung ζ können frei den Bedürfnissen angepasst werden. Für den Regler folgt

$$R(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{1}{s \frac{2\zeta}{\omega_0} \left(1 + \frac{s}{2\zeta\omega_0}\right)} \quad (\text{A.39})$$

Kann die Regelstrecke z. B. durch die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{K}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (\text{A.40})$$

beschrieben werden, liefert die Gl. (Formel A.39) den optimalen PID-Regler.

Die Methode unterliegt in der hier gegebenen Form gewissen Einschränkungen; so eignet sie sich z. B. nicht, wenn die Übertragungsfunktion $G(s)$ instabil ist, oder zwar stabil ist, jedoch nichtminimales Phasenverhalten, also z. B. die Form

$$G(s) = \frac{K(1 - sT)}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (\text{A.41})$$

aufweist. Für allgemeinere Verfahren sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (z. B. unter Polvorgabe [A.7]).

A.6.2 Synthese im Frequenzbereich

Diese Methode besteht darin, den Frequenzgang der Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Regelkreises $G_0(s)$ zu optimieren.

Ausgangspunkt ist der Amplituden- und Phasengang (Bode-Diagramm) der instrumentierten Regelstrecke $G(s)$. Durch die Einführung geeigneter Korrekturglieder

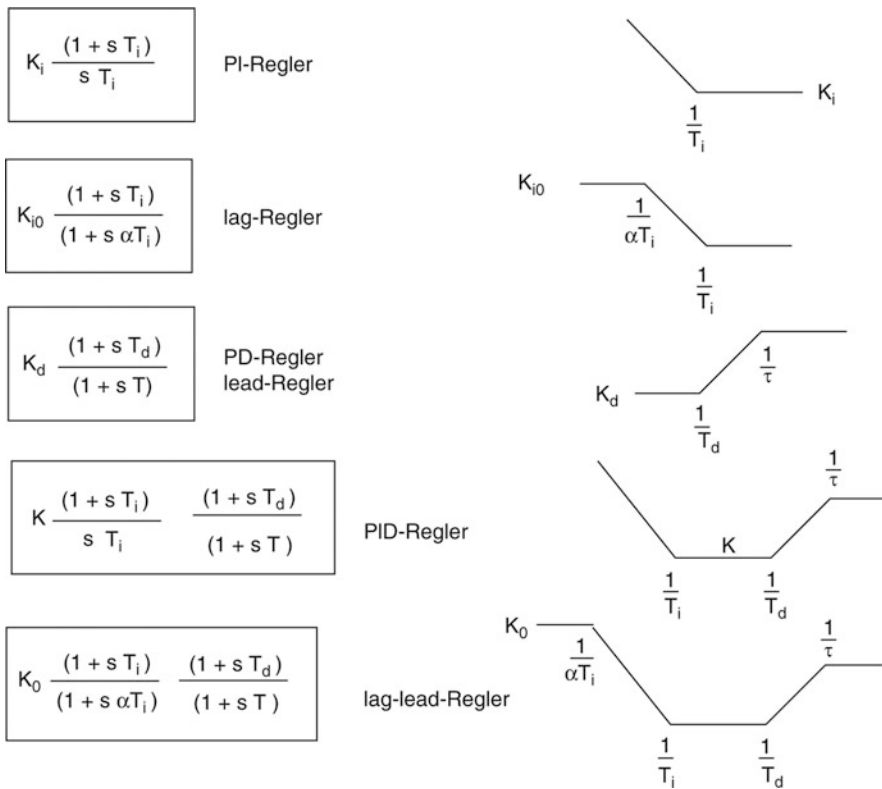
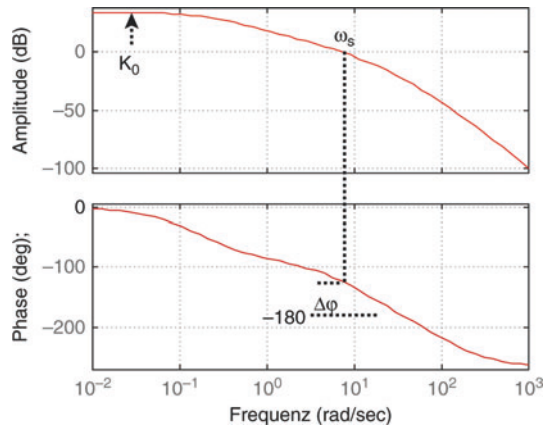


Abb. A.9 Übertragungsfunktionen und Frequenzgang üblicher Regler

$R(s)$ (z. B. PI, PD, PID-Glieder usw., s. Zusammenstellung in [Abb. A.9](#)), wird der gewünschte Frequenzgang von $G_0(s)$ erzielt. Die Eigenschaften des Regelkreises können aus dem Frequenzgang von $G_0(s)$ herausgelesen werden ([Abb. A.10](#)):

- Die *Regelgeschwindigkeit* wird im Wesentlichen von der Schnittfrequenz ω_s (Frequenz für Amplitude = 1, d. h. 0 dB) bestimmt, die in erster Näherung der dominanten Schwingungsfrequenz entspricht.
- Die (asymptotische) *Stabilität* ist dann sichergestellt, wenn bei der Schnittfrequenz die Phase größer ist als -180° . Eine gute *Dämpfung* ist gewährleistet, wenn die *Phasenreserve* $\Delta\varphi$ (Abstand zu -180°) bei der Schnittfrequenz ω_s allg. etwa $40\text{--}70^\circ$ aufweist. Gleichzeitig sollte die *Verstärkungsreserve* (vertikaler Verschiebungsfaktor des Amplitudengangs, welcher die Stabilität nicht kompromittiert) mindestens $0,5\text{--}2$ (± 6 dB) betragen.
- Die *Regelabweichung* in% wird von $1/(1 + K_0)$ gegeben, worin K_0 die Amplitude (Absolutwert, nicht dB!) für $\omega \rightarrow 0$ darstellt.

Abb. A.10 Beispiel für den Frequenzgang von $G_0(s)$ eines Regelkreises: Schnittfrequenz 7.1 rad/s, Phasenreserve 56° , Regelabweichung 2 %



Die auf dem Bode-Diagramm beruhende Methode unterliegt bzgl. Stabilität der Einschränkung, dass die Funktion $G_0(s)$ asymptotisch stabil sein muss (alle Eigenwerte mit negativem Realteil), was praktisch der meist erfüllten Bedingung entspricht, dass die Regelstrecke stabil sein muss. Andernfalls ist das allgemeine Nyquist-Kriterium zu verwenden. Dieses besagt, dass das System dann und nur dann stabil ist [1.3], wenn die Anzahl Drehungen der Nyquistkontur (Darstellung von $G_0(j\omega)$ von $-\infty$ bis $+\infty$) im Gegenuhrzeigersinn um den Punkt -1 , gleich zur Anzahl instabiler Eigenwerte ist (= Anzahl Wurzeln mit positivem Realteil).

A.7 Anhang B Berechnung der Blindleistungen im Rahmen der linearen Analyse von Mehrmaschinensystemen

A.7.1 Blindleistungsabgabe der Generatoren

Die ans Netz gelieferte Blindleistung des Generators ist in p. u. (Bd 1, Abschn. 6.5.1.1)

$$q = u_{Qd} i_d - u_{Qd} i_q.$$

Durch Linearisierung folgt

$$\Delta q = \Delta u_{Qq} i_{d0} + \Delta i_d u_{Qq0} - \Delta u_{Qd} i_{q0} - \Delta i_q u_{Qd0}. \quad (\text{A.42})$$

Mit ähnlichem Vorgehen wie in Abschn. 3.2, durch Einsetzen der Gl. (3.22) und (3.23), folgen die zu (3.25) analogen Gleichungen

$$\begin{aligned} \Delta q &= K_b(s) \Delta \delta_Q + Q_b(s) \Delta u_Q + F_b(s) \Delta u_f \quad \& \\ \text{mit } K_b(s) &= -p_0 - \frac{1}{2} u_{Q0}^2 \left(\frac{1}{x_{qQ}(s)} - \frac{1}{x_{dQ}(s)} \right) \sin(2\delta_{Q0}) \\ Q_b(s) &= \frac{q_{Q0}}{u_{Q0}} - u_{Q0} \left(\frac{\cos^2 \delta_{Q0}}{x_{dQ}(s)} + \frac{\sin^2 \delta_{Q0}}{x_{qQ}(s)} \right) \\ F_b(s) &= \frac{G(s)}{x_{dQ}(s)} u_{Q0} \cos \delta_{Q0}. \end{aligned} \quad (\text{A.43})$$

Durch Einbezug von Spannungsregelung und Pendeldämpfungsgerät erhält man in formal identischer Weise die zu Gl. (3.35) analogen Beziehungen

$$\begin{aligned} \Delta q &= K_{Rb}(s) \Delta \delta + Q_{Rb}(s) \Delta u_Q \\ \text{mit } K_{Rb}(s) &= K_{gb}(s) + K_u(s) \frac{F_b(s) E(s)}{1 + F_u(s) E(s)} \\ Q_{Rb}(s) &= Q_b(s) - Q_u(s) \frac{F_b(s) E(s)}{1 + F_u(s) E(s)}. \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

A.8 Lineare Analyse des Mehrmaschinensystems

An Stelle der starren Netzspannung tritt in den Gl. (B.3) die Anschlussspannung an das Netz. Die Spannung U_Q ist durch U und δ_Q durch $\delta = \delta_Q - h$ zu ersetzen.

Durch Einbezug von Gl. (B.3) wird die Gl. (3.112) zur folgenden erweitert

$$\begin{aligned} [s^2 M_i + K_{Ri}(s)] \Delta \delta_{Qi} &= \Delta P_{ai} + K_{Ri}(s) \Delta \vartheta_i - Q_{Ri}(s) \Delta U_i - s M_i \Delta \omega_s \\ \Delta P_i &= K_{Ri}(s) \Delta \delta_{Qi} - K_{Ri}(s) \Delta \vartheta_i + Q_{Ri}(s) \Delta U_i \\ \Delta Q_i &= K_{Rbi}(s) \Delta \delta_{Qi} - K_{Rbi}(s) \Delta \vartheta_i + Q_{Rbi}(s) \Delta U_i, \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

und durch Elimination von $\Delta \delta$ erhält man neben der Gl. (3.113) noch folgenden Zusammenhang

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= G_{ib1}(s) \Delta P_{ai} - G_{ib2}(s) \Delta \vartheta_i + G_{ib3}(s) \Delta U_i - G_{ib4}(s) \Delta \omega_s \\ \text{mit } G_{ib1}(s) &= \frac{K_{Rbi}(s)}{s^2 M_i + K_{Ri}(s)}, \quad G_{ib2}(s) = \frac{-s^2 M_i K_{Rbi}(s)}{s^2 M_i + K_{Ri}(s)} \\ G_{ib3}(s) &= \frac{s^2 M_i Q_{Rbi}(s) (Q_{Rbi}(s) K_{Ri}(s) - K_{Rbi}(s) Q_{Ri}(s))}{s^2 M_i + K_{Ri}(s)}. \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

Bei der Umwandlung in den Zustandsraum muss die Beziehung (3.115) durch die Blindleistung ergänzt werden

$$\begin{aligned}
\frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A}_G \vec{x} + \mathbf{B}_1 \Delta \vec{P}_a + \mathbf{B}_2 \Delta \vec{\vartheta} + \mathbf{B}_3 \Delta \vec{U} + \vec{h} \Delta P_m \\
\Delta \vec{P} &= \mathbf{C}_w \vec{x} + \mathbf{D}_{w1} \Delta \vec{P}_a + \mathbf{D}_{w2} \Delta \vec{\vartheta} + \mathbf{D}_{w3} \Delta \vec{U} + \vec{k}_w \Delta P_m \\
\Delta \vec{Q} &= \mathbf{C}_b \vec{x} + \mathbf{D}_{b1} \Delta \vec{P}_a + \mathbf{D}_{b2} \Delta \vec{\vartheta} + \mathbf{D}_{b3} \Delta \vec{U} + \vec{k}_b \Delta P_m,
\end{aligned} \tag{A.47}$$

und an Stelle der Gl. (3.117) tritt

$$\begin{aligned}
\frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A}_G \vec{x} + \mathbf{B} \vec{u} \vec{u} = \begin{pmatrix} \Delta \vec{P}_a \\ \Delta \vec{\vartheta} \end{pmatrix} \\
\vec{y} &= \mathbf{C} \vec{x} + \mathbf{D} \vec{u}, \\
\vec{y} &= \begin{pmatrix} \Delta \vec{P} \\ \Delta \vec{Q} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \Delta \vec{\vartheta} \\ \Delta \vec{U} \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_w \\ \mathbf{C}_b \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} \vec{b}'_1 & \vec{b}'_2 \end{pmatrix} \\
\mathbf{B} &= \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 + \vec{h} \vec{b}'_1 & \mathbf{B}_3 + \vec{h} \vec{b}'_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{w1} & \mathbf{D}_{w2} + \vec{k}_w \vec{b}'_1 & \mathbf{D}_{w3} + \vec{k}_w \vec{b}'_2 \\ \mathbf{D}_{b1} & \mathbf{D}_{b2} + \vec{k}_b \vec{b}'_1 & \mathbf{D}_{b3} + \vec{k}_b \vec{b}'_2 \end{pmatrix}.
\end{aligned} \tag{A.48}$$

Netzgleichungen

Werden alle Lasten als statisch betrachtet und durch Admittanzen beschrieben, lauten die Netzgleichungen nach Elimination aller Lastknoten, in Netzkoordinaten gemäss den Gln. (3.66) bis (3.68)

$$\vec{I}_G = \mathbf{Y} \vec{U}_G, \quad \rightarrow \quad I_{Gi} = \sum_{k=1}^m Y_{ik} U_{Gk} \quad i = 1 \dots m. \tag{A.49}$$

Die Umwandlung in Generatorkoordinaten entsprechend der Umformung Gl. (3.73) bis (3.76) führt zur Parkvektorgleichung

$$\vec{I}_i = Y_{ii} \vec{U}_i + \sum_{k \neq i, 1}^m \mathbf{R}^t \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{T}_{ik}^t \vec{U}_k, \quad i = 1 \dots m. \tag{A.50}$$

Die ins Netz injizierte Wirkleistung erhält man aus Gl. (3.69)

$$P_i = 3 \vec{U}_i^t \vec{I}_i, \tag{A.51}$$

die durch Linearisierung zu

$$\Delta P_i = 3(\Delta \vec{U}_i^t \vec{I}_{i0} + \vec{U}_{i0}^t \Delta \vec{I}_i)$$

führt. Die Linearisierung der Stromgleichung (13.105) liefert andererseits

$$\begin{aligned}
\Delta \vec{I}_i &= Y_{ii} \Delta \vec{U}_i + \sum_{k \neq i, 1}^m \mathbf{R}^t \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{T}_{ik}^t \Delta \vec{U}_k + \sum_{k \neq i, 1}^m \mathbf{R}^t \mathbf{Y}_{ik} \mathbf{R}^t \mathbf{T}_{ik}^t \vec{U}_{k0} \Delta \delta_{ik}, \\
da \Delta \mathbf{T}_{ik}^t &= \mathbf{R}^t \mathbf{T} \mathbf{T}_{ik0}^t \Delta \delta_{ik}.
\end{aligned} \tag{A.52}$$

A.9 Anhang C Optimierung

A.9.1 Lagrange-Verfahren

Lagrangefunktion ohne Begrenzungen

Gesucht ist das Minimum (Optimum) einer Zielfunktion von n Variablen

$$F(x_i) \rightarrow \text{Min}, \quad i = 1 \dots n, \quad (\text{A.53})$$

mit den m Nebenbedingungen

$$f_k(x_i) = 0 \quad k = 1 \dots m \quad (\text{A.54})$$

Das Minimum existiert und ist ein *globales Minimum*, wenn die Funktion F *konvex* ist. Es wird durch Minimierung der Lagrangefunktion erhalten

$$L = F(x_i) - \sum_k \lambda_k f_k(x_i) \rightarrow \text{Min}, \quad (\text{A.55})$$

die zur Lösung führt

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i} - \sum_k \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1 \dots n \quad (\text{A.56})$$

Die Gln (C.2) und (C.4) bilden ein System von $(n + m)$ Gleichungen dessen Lösung die n optimalen Werte für x_i und die m *Lagrange'schen Multiplikatoren* λ_k liefert. Für die exakte mathematische Fundierung s. z. B. [A.6].

Berücksichtigung von Begrenzungen

Sind die Variablen x_i Begrenzungen unterworfen des Typs

$$x_{iM} \leq x_i \leq x_{iM} \quad (\text{A.57})$$

lässt sich nach Karush-Kuhn-Tucker [A.2], [A.3], die Lagrangefunktion folgendermaßen erweitern

$$L = F(x_i) - \sum_k \lambda_k f_k(x_i) + \sum_i [v_{iM}(x_i - x_{iM}) + v_{im}(x_{im} - x_i)] \rightarrow \text{Min}. \quad (\text{A.58})$$

Die Variablen v_{iM} und v_{im} sind immer positiv und nur dann verschieden von Null, wenn die Begrenzungen wirksam sind. Es folgen die Optimalitätsbedingungen (C.7), die zusammen mit Gl. (C.2) und (C.5) wiederum die optimalen Werte von x_i , den Multiplikator λ und bei wirksamer Begrenzung auch v_{iM} oder v_{im} liefern.

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i} - \sum_k \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial x_i} + v_{iM} - v_{iM} = 0, \quad i = 1 \dots n \quad (\text{A.59})$$

$$\text{wobei } \begin{cases} v_{iM}(x_i - x_{iM}) = 0 \\ v_{im}(x_{im} - x_{iM}) = 0 \end{cases}$$

Interpretation von ·

Die Bedeutung der Multiplikatoren kann veranschaulicht werden, wenn z. B. angenommen wird, die Funktion F stelle die Kosten eines zu optimierenden Systems dar.

Sind die Nebenbedingungen für die Variablen x_i linear (oder im Betriebspunkt linearisiert) lassen sie sich in die Form bringen

$$f_k(x_i) = a_{k0} + x_1 + \sum_{i=2}^n a_{ki} x_i = 0, \quad (\text{A.60})$$

mit x_1 als Bezugsvariable. Aus Gl. (C.7) folgt, wenn die Begrenzungen nicht wirksam sind

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = \sum_k \lambda_k = \lambda, \quad \frac{\partial F}{\partial x_i} = \sum_k \lambda_k a_{ki} = \lambda \alpha_i \quad (\text{A.61})$$

Der Lagrange'sche Multiplikator λ drückt die Grenzkosten der Bezugsvariable x_1 aus. Die Grenzkosten der anderen Variablen sind über Faktoren a_i proportional zu λ . Ist eine der Begrenzungen wirksam tritt $v_i \cdot v_{iM} - v_{im}$ an Stelle von $\partial F / \partial x_i$.

Interpretation von V

Ist z. B. die obere Begrenzung wirksam und somit $x_i = \cdot x_{iM}$, folgt aus Gl. (C.7)

$$v_{iM} = - \frac{\partial F}{\partial x_i}(x_{iM}) = - \frac{\Delta F}{\Delta x_{iM}} \quad (\text{A.62})$$

Wird die Kapazität x_{iM} um Δx_{iM} vergrößert ergibt sich die Kostenänderung ΔF , womit die Größe v_{iM} als *Grenzkosten einer Kapazitätserweiterung* zu verstehen ist. Sie kann als Entscheidungsgrundlage verwendet werden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Kapazitätsvergrößerung.

Allgemeinere Begrenzung

Etwas allgemeiner kann die Begrenzung (C.5) durch

$$g_j(x_i) \leq 0, \quad j = 1 \dots q \quad (\text{A.63})$$

ersetzt werden, wodurch die Karusch-Kuhn-Tucker-Formulierung (C.6) zu

$$L = F(x_i) - \sum_k \lambda_k f_k(x_i) + \sum_j v_j g_j(x_i) \rightarrow \text{Min.} \quad (\text{A.64})$$

wird, und die Optimalitätsbedingungen (C.7) zu

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i} - \sum_k \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial x_i} + \sum_j v_j \frac{\partial g_j}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1 \dots n \quad (\text{A.65})$$

$$\text{wobei } v_j g_j(x_i) = 0, \quad j = 1 \dots q$$

A.10 Optimaler Leistungsfluss (OPF)

Bei gegebener Netzkonfiguration gelten folgende Netzgleichungen, welche die in den Knoten injizierten Wirk- und Blindleistungen ausdrücken

$$\begin{aligned} P_1 &= f_1(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & Q_1 &= g_1(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & \text{Bilanzknoten} \\ P_j &= f_j(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & Q_j &= g_j(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & \text{freie Einspeiseknoten} \\ P_k &= f_k(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & Q_k &= g_k(\vec{\vartheta}, \vec{U}), & \text{Lastknoten} \end{aligned} \quad (\text{A.66})$$

mit $j = 1 \dots (r-1)$, $k = 1 \dots s$. Die Anzahl Gleichungen ist insgesamt $2(r+s) = 2n$, mit $n = \text{Anzahl Knoten}$, $r = \text{Anzahl Einspeiseknoten}$, $s = \text{Anzahl Lastknoten}$.

Die $4n$ Variablen \vec{P} , \vec{Q} , $\vec{\vartheta}$, \vec{U} können bei bekanntem Lastzustand und in Abwesenheit von Begrenzungen folgendermaßen klassiert werden:

	Bekannte Größen	Steuervariablen	Zustandsvariablen
Bilanzknoten	$\vartheta = 0$	$U_1, (Q_1)$	$P_1, Q_1, (U_1)$
übrige Einspeiseknoten	-	$P_j, U_j, (Q_j)$	$\vartheta_j, Q_j, Q_j, (U_j)$
Lastknoten	P_k, Q_k		ϑ_k, U_k

stung P_k, Q_k muss nicht unbedingt konstant sein, sondern kann iterativ dem Wert anderer Betriebsvariablen, z. B. der Spannung angepasst werden. Die $(2r-1)$ Steuervariablen werden im Rahmen der *Leistungsflussberechnung* vorgegeben. Die $2n$ *Zustandsvariablen* können dann durch Auflösung des nichtlinearen Gleichungssystems (C.14) bestimmt werden. Dazu sind mehrere Methoden bekannt, z. B. die iterative Knotenpunktmethod (Gauß-Seidel), das Newton-Raphson-Verfahren (Bd 1, Abschn. 9.6.2) oder auf der linearen und nichtlinearen Programmierung basierende Verfahren.

Das System hat entsprechend der Anzahl Steuervariablen $(2r-1)$ *Freiheitsgrade*, welche den *Optimierungsfreiraum* darstellen. Als Steuervariablen können, an Stelle der Spannungen der Einspeiseknoten, auch die entsprechenden Blindleistungen genommen werden, die Spannungen werden in diesem Fall zu Zustandsvariablen. Im allgemeinsten Fall hat die zu optimierende Zielfunktion die Form

$$F(P_1, P_j, Q_1, Q_j, U_1, U_j, U_k, \vartheta_j, \vartheta_k) \rightarrow \text{Min} \quad (\text{A.67})$$

mit den Nebenbedingungen (C.14).

Begrenzungen

Durch die Auslegung der Generatorgruppen oder allgemeiner der Einspeisungen, sind maximale und minimale Leistungswerte vorgegeben. Neben den Gln. (C.14) sind also noch folgende Beschränkungen der Zustandsvariablen zu berücksichtigen

$$\begin{aligned} P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \\ Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max}, \quad i = 1 \dots r \end{aligned} \quad (\text{A.68})$$

Sind r' Begrenzungen wirksam ($r' = \dots \dots \dots r' - 1$).

Eine weitere Einschränkung ist möglich, wenn auch die Spannungen oder die Phasendifferenzen aus betrieblichen Gründen (Spannungsqualität, Stabilität) zu begrenzen sind

$$\begin{aligned} U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \\ -\theta_{ik} \leq \vartheta_i - \vartheta_k \leq \theta_{ik}, \quad i, k = 1 \dots n \end{aligned} \quad (\text{A.69})$$

Andere Beschränkungen entsprechend der allgemeineren Formulierung (C.11) sind möglich.

Allgemeine Formulierung der Optimalitätsbedingungen

Die Minimierung der Zielfunktion (C.15) unter den Bedingungen (C.14), (C.16) und (C.17) führt durch Ableitung der entsprechenden Lagrangefunktion zu den Optimalitätsbedingungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial P_i} - \lambda_i + v_{iM} - v_{im} &= 0 \\ v_{iM}(P_i - P_{i \max}) \\ v_{im}(P_{i \min} - P_i), \quad i = 1, j \\ \frac{\partial F}{\partial Q_i} - \mu_i + \eta_{iM} - \eta_{im} &= 0 \\ \eta_{iM}(Q_i - Q_{i \max}) \\ \eta_{im}(Q_{i \min} - Q_i), \quad i = 1, j \\ \frac{\partial F}{\partial U_i} - \sum_h \lambda_h \frac{\partial f_h}{\partial U_i} + \sum_h \mu_h \frac{\partial g_h}{\partial U_i} + \varepsilon_{iM} - \varepsilon_{im} &= 0 \\ \varepsilon_{iM}(U_i - U_{i \max}) \\ \varepsilon_{im}(U_{i \min} - U_i), \quad i = 1, j, k \\ \frac{\partial F}{\partial \vartheta_i} - \sum_h \lambda_h \frac{\partial f_h}{\partial \vartheta_i} + \sum_h \mu_h \frac{\partial g_h}{\partial \vartheta_i} + \sum_h (\tau_{ih} - \tau_{hi}) &= 0 \\ \tau_{hi}(\vartheta_i - \vartheta_h - \theta_{ih}) \\ \tau_{hi}(\vartheta_h - \vartheta_i - \theta_{hi}), \quad i = j, k \end{aligned} \quad (\text{A.70})$$

Die Ableitungen von f und g sind Koeffizienten der Jacobi-Matrix (Bd 1, Abschn. 9.6.2)

A.11 Anhang D Abkürzungen

ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
AID	Average Interruption Duration
AIF	Average Interruption Frequency
AIT	Average Interruption Time
ASIDI	Average System Interruption Duration Index
ASIFI	Average System Interruption Frequency Index
BT	Technisches Büro des ► CENELEC
BTF	Task Force des ► BT
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index
CAIFI	Customer Average Interruption Frequency Index
CECAPI	Europäischer Verband der Hersteller von Ausrüstung für die Elektroinstallation
CECED	Europäischer Verband der Hersteller von Hausgeräten
CEER	Council of European Energy Regulators
CENELEC	Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
CI	Customer Interruptions
CIGRE	Internationale Konferenz für große Hochspannungsnetze
CIREN	Internationale Konferenz für Verteilung elektrischer Energie
CML	Customer Minutes Lost
CoS	Continuity/(Reliability) of Supply
CQ	Commercial Quality
CTAIDI	Customer Total Average Interruption Duration Index
DEA	Dezentrale Erzeugungsanlagen
EC	European Commission
ECG	Energie-Control GmbH, Wien
ECI	European Copper Institute
EHV	Extra High Voltage
EICTA	European Information, Communications and Consumer Electronics Technology Associations
EM	elektromagnetisch
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europannorm
END	Energy Not Distributed
ENS	Energy Not Supplied
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity (2009)
ERGEG	European Energy Regulators Group For Electricity and Gas
ETSO	European Transmission System Operators

Eurelectric	Union der Elektrizitätswirtschaft
HD	Harmonisierungsdokument (des ► CENELEC)
ICER	International Confederation of Energy Regulators
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronic Engineers
LVD	Niederspannungsrichtlinie
MAIFI	Momentary Average Interruption Frequency Index
MoU	Memorandum of Understanding
NARUC	US National Association of Regulatory Utility Commissioners
NIEPI	Number of equivalent interruptions per power installed
ORGALIME	Europäische Dachorganisation der Maschinen-, Metallwaren- sowie Elektro- und Elektronikindustrie
PE	Primärenergie
PQ	Power Quality
QoS	Quality of Supply
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SARI	System average restoration index
SCC	Standards Coordinating Committee (IEEE)
SI	Short Interruptions
SoS	Security of Supply
T-SAIDI	Transformer SAIDI, mit jährlichem Energieverbrauch gewichtet
T-SAIFI	Transformer SAIFI, mit jährlichem Energieverbrauch gewichtet
TC	Technical Committee
TIEPI	Time of equivalent interruptions per power installed
TR	Technical Report
UCPTE	Union für die Koordinierung der Erzeugung und des Transports elektrischer Energie
UCTE	Union für die Koordinierung des Transports elektrischer Energie
UIE	Internationale Elektrowärme-Union
UNICE	Union der Industrie- und Arbeitgeberverbände Europas
UNPEDE	Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique
ÜN	Übertragungsnetz
VN	Verteilernetz
VQ	Voltage Quality
VSI	Very Short Interruptions

Stichwortverzeichnis

A

Algorithmus, 519, 524, 559
Analyse
 in der Praxis, 125
 lineare, 104
asymmetrischer Monopol, 442
Asynchronmaschine, 191

B

Betriebsoptimierung, 479, 505, 510, 514
Betriebsplanung, 270, 477, 512
Bilanz-Generator, 105
Bipol, 441
 System, 442
Blindleistungskompensator, 279, 313, 315
Blockschaltbild, 72, 74, 87, 146, 160–163, 166, 169
Brennstoffkosten, 485

C

CCCM (Combined and Coordinated Control Method), 416
Combined and Coordinated Control Method, 416
Commercial Quality, 200, 202

D

Dimensionierung, 220
Domänen, 547, 549, 550, 579
Drehzahl
 Wirkung, 169

Drehzahlregelung, 4, 53, 54, 58, 59, 65, 86, 100, 103, 146
 Wirkung, 86, 94
Drei-Maschinen-System, 110
Dreipunktschaltung, 294–296
Dreipunktumrichter, 300, 303
DVR (Dynamic Voltage Restorer), 386
Dynamic Voltage Restorer, 386, 387, 390, 391, 394
Dynamik, 71, 75, 82, 102, 104, 105, 177, 194
 der kleinen Störungen, 82, 83

E

Eigenbedarf von Kraftwerken, 274
Einfluss von Leistungstransit, 132
Einspeisung, 192, 596, 599
elektrische Leistung, 75, 106, 169
EMV (elektromagnetische Verträglichkeit), 202, 219–224, 229, 230
Energieaustausch, 479, 518, 562
Erregersystem, 160
ESCR (effektives Kurzschlussleistungsverhältnis), 412

F

FACTS, 10, 11, 15, 98, 99, 175, 483, 485
Fernwirktechnik, 539, 541
Festdruckregelung, 57–59
Flächenkriterium, 92, 93
Frequenzleistungsregelung, 53, 54, 67, 108, 122, 480, 503, 504

Frequenzregelung, 64, 71, 275, 518
 Funktionen, 108, 122, 191, 519, 520, 533, 535,
 550–553, 557–559, 561, 563–568, 574,
 577, 581, 583, 587, 589

G

Genauigkeit, 539
 Generatorblindleistung, 188
 Generatoren
 Darstellung, 104
 kohärente, 115
 Gleichgewicht
 Störung, 74
 Gleichstromgenerator, 160, 167
 Gleitdruckregelung, 57, 59

H

HGÜ (Hochspannungsgleichstromübertragung),
 504
 Back-to-Back, 398, 408, 416
 Back-to-Back-Systeme, 408
 bipolare, 399, 408–410, 446
 bipolare Systeme, 409
 monopolare, 399, 408, 409
 monopolare Systeme, 408
 Multiterminal, 410, 411
 HGÜ-Regelung
 CCCM, 416
 Gleichrichterregelung, 421
 MCCM, 414–416, 432
 Wechselrichterregelung, 415, 419, 421,
 425–428, 433
 Historie, 518
 Hochspannungsgleichstromübertragung Siehe
 HGÜ, 504

I

Industriernetz, 245, 253, 255, 256, 268–270, 275
 Informationstechnik, 199, 517–520
 Inselnetz, 568
 Integration, 90, 94, 517, 519–521, 525, 541,
 544, 546, 564, 589, 591, 594, 595

J

Jahreskosten, 240, 479

K

kleine Störungen, 104, 120
 Knotenadmittanzmatrix, 15, 106
 Knoteninjektionsverfahren, 344, 347
 kohärente Generatoren, 115
 Kohärenz, 118, 119
 Kompensationsanlage, 11, 159, 175–178, 182,
 184, 248, 249
 Konkurrenz, 505, 510
 Konzeptanalyse, 240, 241
 Kosten, 477–479, 485, 486, 490, 498, 499, 504,
 506, 508, 566
 Kraftwerk, 25, 53–55, 68, 142, 144, 147, 149,
 479, 480, 485, 488, 489, 491, 496, 497,
 500, 502, 503, 505, 507, 510, 511, 518,
 566, 568, 569, 597
 Eigenbedarf, 274
 Kurzschlussleistungsverhältnis, 412
 effektives, 412
 Kurzschlussrajektorie, 94
 Kurzzeitbereich, 75, 81, 181, 195

L

Lastflussberechnung, 104, 111, 173, 174, 192,
 194
 Lastkennlinie, 191
 LCC Siehe Line Commutated Converter, 399
 Leistung
 elektrische, 75
 synchrone, transiente, 75
 Leistungseinspeisung, 160
 Leistungstransit, 132
 Leittechnik, 517–521
 Liberalisierung, 505, 510–512, 544, 561
 Line Commutated Converter, 398–400, 403,
 405–407, 409–411, 414–419, 422,
 432–436, 439, 440, 446, 448–451,
 454–456, 458, 460, 462, 464
 lineare Analyse, 104, 120, 124

M

Marginal Current Control Method, 415
 Marginalkosten, 477, 488, 490, 492, 506,
 508–510
 Marktumfeld, 543, 544
 MCCM (Marginal Current Control Method),
 415

Mechanik, 89, 103
MMC Siehe Modular Multilevel Converter, 283
Modellierung, 3, 10, 13, 19, 24, 45, 46, 61, 104,
274, 511–513
mit subsynchronen Schwingungen, 101
Modular Multilevel Converter, 283, 299, 303,
305, 435, 439, 440, 449
Monopol
asymmetrischer, 442
symmetrischer, 442
Multilevel, 435
Multilevelumrichter, 299, 305, 307–309
Multiterminal-Systeme, 410

N

Netz
vermaschtes, 192
Netzberechnung, 4, 25, 239, 258, 269, 480, 483,
485, 488, 502, 586
Netzdarstellung, 106, 107, 123, 567, 586
Netzkosten, 507, 508
Netzplanung, 159, 239–241, 258, 266–268
Netzreaktanz
Wirkung, 76, 80
Netzverbindung, 98, 100–102, 162, 165, 170,
181
Netzzugang, 509–511

O

Oberschwingungen, 175, 248, 250–252
Ordnungsreduktion, 115, 125
Overlay-Netzwerk, 464

P

PAR Siehe Phase Angle Regulator, 325
Parktransformation, 364
Parkvektordarstellung, 108
Pendeldämpfung, 150
Phase Angle Regulator, 325, 326, 328–331,
333, 382
Polradwinkelpendelung, 125, 128, 140, 148
Power System Stabilizer, 279, 312
Primärregelung, 8, 53–55, 58, 60, 64, 66, 596
PSS (Power System Stabilizer), 279, 312
Punkt-zu-Punkt-Verbindung, 415, 439, 464

Q

Quadrature Boosting Transformer (QBT), 325,
326, 329–333, 381, 382
Qualität, 31, 501, 530, 566
Qualität der Spannung, 53

R

Raumzeiger, 20, 22, 23
Referenzsystem, 106
Regelkraftwerk, 54, 67, 69, 504
Regelung, 80, 162, 166, 171, 176, 180, 181,
185, 566, 599
Reglerauslegung, 89, 165, 167, 168, 171

S

SCADA (Supervisory Control and Data
Acquisition), 517–519, 526–530, 532,
535, 550–552, 561, 564, 566, 589
Schrägregelung, 11, 277, 280, 282
Schutzfunktionen, 523, 524, 526
SCR (Short Circuit Ratio), 412
Sekundärregelung, 10, 54, 66, 67
Selbstgeführte Umrichter, 279, 353, 356
selbstgeführte Wechselrichter, 596
Selbstregelung, 69
Sensitivitätsanalyse, 258, 259, 267, 367, 368,
370
Serienkompensation, 98–101, 175, 179, 277,
280–282, 320, 323, 326, 340, 363, 369
Short Circuit Ratio, 412
Shuntkompensation, 277, 279, 281, 313, 316,
369
Sicherheitsindizes, 191, 194
Simulationsprogramm, 40, 41, 71, 195
Simulator, 569
Solid State Series Compensator, 320, 323, 324,
352, 356–359, 380
Solid State Transfer Switch, 391–395
Spannung, 77, 78, 82, 113, 118, 132–134,
144, 145, 150, 153, 161, 169, 175, 182,
184–191, 193, 194, 563
Spannungsqualität, 150, 275, 594
Spannungsregelung, 4, 17, 30, 75, 79, 88, 97,
101, 114, 124, 125, 131–135, 150, 159,
162, 163, 169, 170, 176, 181, 257, 276
der Synchronmaschine, 160, 163
Wirkung, 87, 88

Spannungsschwankungen, 159, 175
 Spannungsstabilität, 4, 159, 162, 173, 175, 177, 180, 181, 184, 191, 192, 195, 258–260
 Spannungsunabhängigkeit der Last, 113
 SSSC Siehe Solid State Series Compensator, 179
 SSTS Siehe Solid State Transfer Switch, 391
 Störung des Gleichgewichts, 74, 93, 176
 Stabilisierungsmassnahmen, 142, 156
 starrer Bipol, 442
 STATCOM Siehe Static Synchronous Compensator, 151, 178
 Static Synchronous Compensator, 279, 313, 315–318, 320, 324, 352–354, 359, 369, 380, 385, 390
 Static Var Compensator, 151, 154, 155, 175, 178, 194, 279, 313, 314, 316–320, 352, 369, 380, 385
 Statik, 53–56, 59, 66, 67, 146, 147, 181, 596
 Stationsleittechnik, 517, 520, 522, 523, 541
 statische Abhängigkeit, 74, 86, 88, 100, 104, 106, 170, 175, 176, 553
 statische Erregung, 162
 statische Stabilität, 75, 80, 86, 180, 185, 188, 194, 258
 Sternpunktbehandlung, 247, 248
 Strahlablenker, 57
 Stufentransformator, 171
 Supervisory Control and Data Acquisition Siehe SCADA, 518
 SVC Siehe Static Var Compensator, 151
 symmetrischer Monopol, 442
 Synchronisierkreis, 86, 169
 Synchronisierung, 65, 71, 87, 270
 Synchronmaschine, 3–7, 41, 48, 51, 87, 101, 130, 161, 162, 168, 180, 181
 Systemarchitektur, 520, 547
 Systemkonfiguration, 537, 538, 578, 589
 Systemkonzeption, 545, 593

T

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator), 320–323
 Technologie, 520, 538, 542, 587
 Tertiärregelung, 54
 Thyristor Controlled Series Compensator, 320–324, 352, 380
 Thyristor Switched Capacitor, 313, 316

Thyristorventil, 398, 400–403, 405, 421
 Torsionsschwingungen, 4, 71, 72, 100, 101, 103, 166
 Trajektorie, 90, 132
 Transformator, 76, 100, 172, 174, 175, 178, 181, 185, 525, 532, 582
 transiente Analyse, 81, 104
 transiente Stabilität, 75
 transiente synchrone Leistung, 75, 82, 97, 100, 109–111, 114, 118, 129–132, 135, 137
 Transportnetzführung, 562, 564
 TSC (Thyristor Switched Capacitor), 313, 316
 TWIN-Schaltung, 295, 296

U

Überspannung, 247, 262–264
 Überstromschutz, 243, 270
 Übertragungsfunktion der SM, 168
 UCTE-System, 125, 127, 129, 139
 Umrichter
 netzgeführte, 398
 selbstgeführte, 398, 433
 Unified Power Flow Controller, 280, 325–328, 333, 334, 343–347, 349–352, 359, 360, 367, 380, 383
 Uninterruptible Power Supply, 387, 388, 392
 UPFC Siehe Unified Power Flow Controller, 280
 UPS (Uninterruptible Power Supply), 387, 388, 392

V

vermaschtes Netz, 192
 Versorgung, 564
 Versorgungsqualität, 199–201, 203, 212, 217, 218, 228, 232, 235, 358, 383, 384, 386, 393, 394, 563, 564
 Versorgungssicherheit, 199–201, 205, 206, 213
 Versorgungszuverlässigkeit, 200, 205, 207, 213, 214, 233, 260–262, 267
 Verteilnetzführung, 562, 563, 591
 Voltage Source Converter, 282, 283, 289, 291–293, 299, 301, 303–309, 314, 315, 344, 398–400, 433–441, 446, 448–450, 454, 456–458, 464
 VSC Siehe Voltage Source Converter, 282

W

Wasserturbine, 56

Wechselrichter, 595, 596, 599

selbstgeführter, 596

Wechselrichterregelung, 415

Wechselstromgenerator, 161

Wettbewerb, 505, 511, 514, 520, 543, 545, 566

Windkraft, 512

Windparks, 595, 596

Wirkung

der Drehzahl, 169

der Drehzahlregelung, 86, 94

der Netzreaktanzen, 76, 80

der Spannungsregelung, 87, 88

Wirtschaftlichkeit, 175, 243, 260, 271, 272, 498

Workflow, 589, 590, 595

Z

Zuverlässigkeit, 53, 260, 261, 266–268, 271,
272, 274, 275

Zweilevelrichter, 436

Zweipunktschaltung, 294, 295