

4 **Dynamisches Verhalten von Netzwechselrichtern und Netzfiltern**

Bei vielen Applikationen aus dem Bereich der elektrischen Antriebstechnik arbeiten die Motoren häufig oder sogar ausschließlich im generatorischen Betrieb. So werden beispielsweise in Verbrennungsmotorprüfständen die elektrischen Bremsmotoren nach dem Hochfahren des Prüfstands ausschließlich generatorisch betrieben. Bei Aufzügen wird immerhin während der Abwärts- bzw. Aufwärtsfahrt (je nach Beladung und Schwere des Gegengewichts) und bei Kranantrieben während der Abwärtsbewegung ein mitunter nennenswerter Anteil der potentiellen Energie in elektrische umgewandelt. Bei Traktions- oder Zentrifugenantrieben ist es vorwiegend Bewegungsenergie, aus der während des Abbremsens elektrische Energie erzeugt wird. Um diese elektrisch anfallende Energie nicht über Bremswiderstände in Wärme umwandeln zu müssen, sondern anderweitig nutzen zu können, wird sie bei solchen Applikationen in der Regel über einen Netzwechselrichter ins Netz zurückgespeist [CLOS86, BRAU87, KOHL88, NIER91, LINK99, BÖCK01, TWIN03, POH05, FISC06, NUSS06a, KIEL07, WEIS07, SPEC08, DANN10, TANG12, KUKK14, MISK14, PAN14]. Bei Windenergie- und Photovoltaikanlagen wird dieses Prinzip heutzutage sogar ausschließlich dazu benutzt, um Energie für Verbraucher zur Verfügung zu stellen.

Damit andere elektrische Geräte möglichst wenig beeinflusst werden, die am selben, nachfolgend mit IPC (in-plant point of coupling) indizierten Netzanschlusspunkt angeschlossen sind, sollte der bezogene oder zurückgespeiste Netzstrom so weit wie möglich sinusförmig verlaufen. Um das zu erreichen und um die anfallende elektrische Energie auch möglichst schnell und oszillationsfrei ins Netz zurückspeisen zu können, muss der Netzstrom direkt oder indirekt geregelt werden. Als Grundlage ist hierfür ein Modell der Netzstromregelstrecke erforderlich. Darüber hinaus muss die Zwischenkreisspannung geregelt werden, wofür ebenfalls ein Modell der betreffenden Regelstrecke zu erstellen ist. Die Beschreibung dieser Modelle sowie die prinzipielle Regelung derartiger Strecken stehen im Blickpunkt des vorliegenden Kapitels. Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um eine einphasige oder um eine dreiphasige Netzankopplung handelt. Beide Fälle werden nachfolgend erörtert.

4.1 Grundlegende Beschreibung des Verhaltens der Netzankopplung

4.1.1 Beschreibung bei einphasiger Netzeinspeisung

Die einfachste Möglichkeit, einen elektrischen Antrieb so ans Netz anzukoppeln, dass sinusähnliche Ströme mit dem Netz ausgetauscht werden können, besteht darin, den Antrieb netzseitig über einen Wechselrichter in Wechselstrombrückenschaltung und über eine Drossel mit dem Netz zu verbinden. Das Bild 4.1 zeigt das zu dieser Variante gehörende Prinzipschaltbild. Als Besonderheit ist darin der bei Photovoltaikanlagen oft vorliegende Fall dargestellt, dass die Drossel symmetrisch auf beide Zuleitungen verteilt ist [NUSS06a, SCHR08, SPEC08]. Die Summe der Induktivitäten beider Drosseln wird darin mit L_D bezeichnet. Der Ausgangsstrom des Netzwechselrichters ist i_A und die Ausgangsspannung u_A . Die Zwischenkreisspannung des Wechselrichters wird mit u_{ZK} bezeichnet.

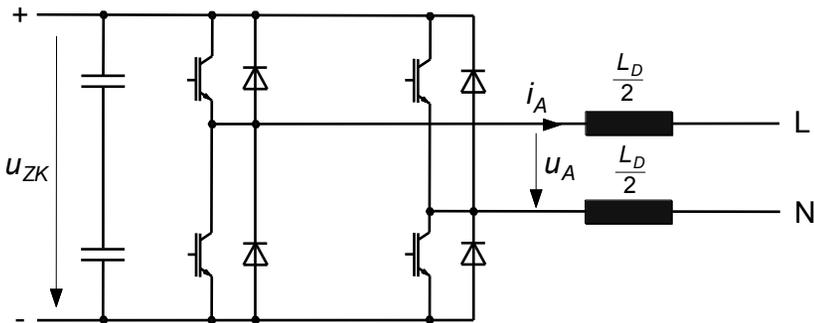


Bild 4.1: Prinzipschaltbild eines über Drosseln mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung

Konzentriert man sich bei der Analyse des dynamischen Verhaltens auf die Netzstromregelstrecke und lässt dabei auch andere Wechselrichtertopologien zu als die im Bild 4.1 gezeigte, dann reduziert sich das Ersatzschaltbild auf die im Bild 4.2 angegebene Struktur. Die im Bild 4.1 noch getrennt eingezeichneten Drosseln sind darin der Einfachheit halber zu einer Ersatzdrossel zusammengefasst. Zusätzlich ist im Bild 4.2 noch die Netzinduktivität L_N dargestellt. Sie soll die Induktivität des Netzes zwischen dem Netzanschlusspunkt und der Netzquellenspannung u_N charakterisieren. Im Gegensatz zur Netzquellenspannung wird die Spannung am Netzanschlusspunkt, an dem andere Verbraucher in der Nähe des betrachteten Netzwechselrichters angeschlossen sein können, mit u_{IPC} bezeichnet.

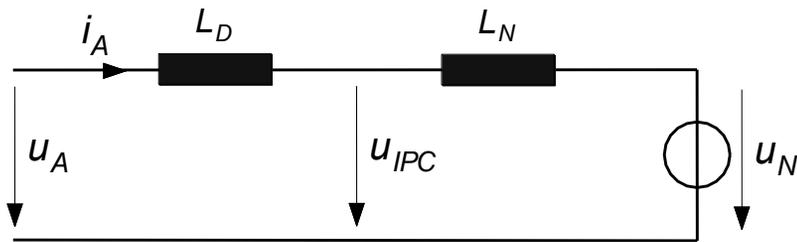


Bild 4.2: Ersatzschaltbild der Netzstromregelstrecke eines über Drosseln mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung

Die Differentialgleichung für den Ausgangsstrom des Netzwechselrichters des oben beschriebenen Systems ergibt sich durch Aufstellen einer Maschengleichung. Man erhält dadurch die Beziehung

$$(L_D + L_N) \cdot \dot{i}_A = u_A - u_N \quad (4.1)$$

In regelungstechnischer Hinsicht handelt es sich um einen Integrierer mit dem Integrationsbeiwert $1/(L_D+L_N)$. Würde bei der Modellierung auch der ohmsche Widerstand der Drosseln berücksichtigt, dann müsste das Integrierglied durch ein PT1-Glied ersetzt werden. Aufgrund der üblicherweise vorhandenen Dominanz des induktiven Anteils der Drosselimpedanz reicht es aber völlig aus, das Drosselverhalten mithilfe der Differentialgleichung (4.1) zu beschreiben. Der Vollständigkeit halber zeigt das Bild 4.3 noch das zu Gl. (4.1) gehörende Strukturbild.

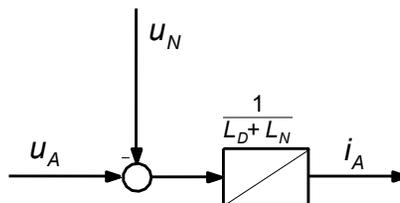


Bild 4.3: Strukturbild der Netzstromregelstrecke eines über Drosseln mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters

Die Verwendung ausschließlich von Drosseln zur Anbindung eines Netzwechselrichters ans Netz hat in der Regel noch zu große, vom Netzwechselrichter verursachte Oberschwingungen der Netzanschlusspunktspannung u_{IPC} zur Folge. Denn anhand einer Netzwerkanalyse (Spannungsteilerregel) ergibt sich für u_{IPC} die Beziehung

$$u_{IPC} = \frac{L_N}{L_D + L_N} \cdot u_A - \frac{L_D}{L_D + L_N} \cdot u_N \quad (4.2)$$

Wegen der üblicherweise erfüllten Ungleichung $L_N \ll L_D$ stimmt u_{IPC} zwar näherungsweise mit u_N überein. Die Anschlusspunktspannung enthält aber dennoch in der Regel einige Prozent der Wechselrichterausgangsspannung. u_{IPC} besitzt dadurch einen rechteckförmigen Anteil, der andere am selben Netzanschlusspunkt angeschlossene Geräte stark stören kann, sofern die Drosselinduktivität L_D nicht hinreichend groß gewählt wird. Wegen der mit zunehmender Drosselinduktivität steigenden Kosten sowie des mit der Induktivität ebenfalls zunehmenden Platzbedarfs und der abnehmenden Dynamik werden bei entsprechend strengen Forderungen an die Netzstromoberschwingungen vorwiegend LCL-Filter anstatt einfacher Drosseln eingesetzt. Die Grundidee eines derartigen LCL-Filters besteht darin, dass die Netzdrossel geteilt wird und an der Trennstelle ein Kondensator zwischen die jeweiligen Leiter geschaltet wird. Da sich die Spannung am Kondensator nur allmählich ändern kann, werden Spannungssprünge am Netzanschlusspunkt vermieden. Die Drossel zwischen Kondensator und Netzanschlusspunkt ist hierbei dafür verantwortlich, dass im Netz vorhandene Oberschwingungsströme nicht vom Filter angesaugt werden, was gegebenenfalls die Überlastung des Kondensators zur Folge haben könnte. Das Bild 4.4 zeigt das zu dieser Realisierungsvariante gehörende, mit dem Bild 4.1 vergleichbare Prinzipschaltbild. Die Kapazität des Filterkondensators wird darin mit C_F bezeichnet. Die Gesamtinduktivität der netzseitigen LCL-Filterdrossel ist L_F . Sie ist bei einphasiger Netzankopplung wiederum oft gleichmäßig auf die Netzzuleitungen verteilt. Darüber hinaus enthält das Bild 4.4 noch die Bezeichnungen u_{CF} für die Spannung am Filterkondensator und i_{LF} für den netzseitigen Filterstrom.

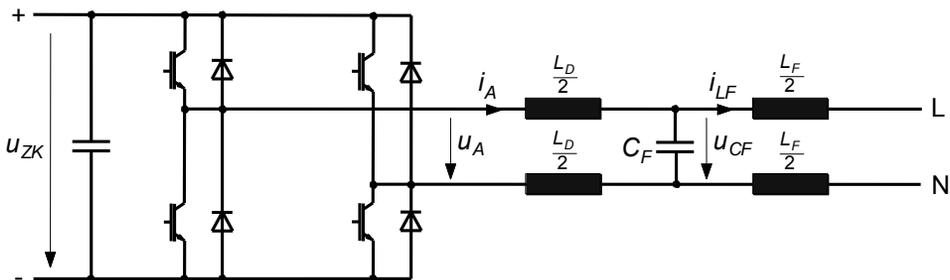


Bild 4.4: Prinzipschaltbild eines über ein LCL-Filter mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung

Legt man den Schwerpunkt der Betrachtungen auf die Analyse des dynamischen Verhaltens der Netzstromregelstrecke, dann lässt sich aus Bild 4.4 das im Bild 4.5 angegebene Ersatzschaltbild extrahieren. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind darin wieder die Induktivitäten der jeweiligen parallelen Drosseln zu je einer Induktivität zusammengefasst. Außerdem enthält das Bild 4.5 erneut die Netzinduktivität L_N und die Netzquellenspannung u_N .

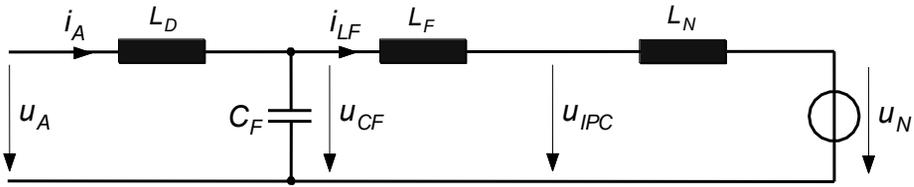


Bild 4.5: Ersatzschaltbild der Netzstromregelstrecke eines über ein LCL-Filter mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung

Die für die obige Filterkonfiguration geltenden Differentialgleichungen gehen aus Bild 4.5 mittels einer Knoten- und Maschenanalyse hervor. Sie lauten

$$L_D \cdot \dot{i}_A = u_A - u_{CF}, \quad (4.3)$$

$$(L_F + L_N) \cdot \dot{i}_{LF} = u_{CF} - u_N, \quad (4.4)$$

$$C_F \cdot \dot{u}_{CF} = i_A - i_{LF}. \quad (4.5)$$

Das zu diesen Differentialgleichungen gehörende Strukturbild ist im Bild 4.6 dargestellt.

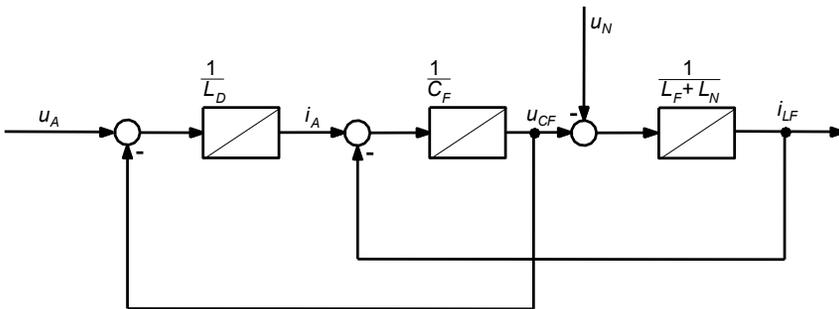


Bild 4.6: Strukturbild der Netzstromregelstrecke eines über ein LCL-Filter mit dem Netz verbundenen Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung

Neben der Regelung des Netzwechselrichterausgangsstroms bzw. des netzseitigen LCL-Filterausgangsstroms und gegebenenfalls der Filterkondensatorspannung muss bei Netzwechselrichtern auch die Zwischenkreisspannung geregelt werden. Denn im Gegensatz zu Stromrichtern mit einem Eingangsgleichrichter ist bei Netzwechselrichtern die Zwischenkreisspannung nicht fest an die Netzspannung gekoppelt. Vielmehr lässt sie sich oberhalb der natürlichen Aufladespannung bei Gleichrichterbetrieb auf beliebige Werte einstellen. Welchen Wert sie annimmt, hängt davon ab, wie viel Energie zwischen dem Netz, dem Netzwechselrichter und gegebenenfalls dem über einen maschinenseitigen Wechselrichter an den Zwischenkreis angeschlossenen Motor ausgetauscht wird.

Um zu vermeiden, dass durch eine eventuell zu hohe Zwischenkreisspannung Schädigungen am Wechselrichter auftreten und um das Gesamtsystem im optimalen Betriebspunkt zu betreiben, muss die Zwischenkreisspannung geregelt werden. Zu diesem Zweck ist eine Modellierung der Zwischenkreisspannungsregelstrecke erforderlich. Der einfachste Zugang hierzu erfolgt über eine Leistungsbilanz. Bezeichnet man diesbezüglich die vom Netzwechselrichter ins Netz bzw. ins LCL-Filter abgegebene Leistung mit P_N sowie die gegebenenfalls zum Motor abfließende Leistung mit P_M , dann gilt wegen der annähernden Freiheit von Leistungssenken und -quellen im Wechselrichter und im Netzfilter die Bilanzgleichung

$$u_{ZK} \cdot i_{C,ZK} = -(P_N + P_M). \quad (4.6)$$

Darin ist $i_{C,ZK}$ der in den Zwischenkreiskondensator mit der Zwischenkreiskapazität C_{ZK} hineinfließende Strom, der der Differentialgleichung

$$C_{ZK} \cdot \dot{u}_{ZK} = i_{C,ZK} \quad (4.7)$$

gehört. Da für die Netzleistung P_N außerdem der Zusammenhang

$$P_N = \begin{cases} u_{IPC} \cdot i_A & \text{für den Fall mit Drosselankopplung} \\ u_{CF} \cdot i_A & \text{für den Fall mit LCL-Filterankopplung} \end{cases} \quad (4.8)$$

gilt, kann die Differentialgleichung (4.7) in Verbindung mit der Bilanzgleichung (4.6) auch in der Form

$$\dot{u}_{ZK} = -\frac{u_{IPC/CF} \cdot i_A + P_M}{C_{ZK} \cdot u_{ZK}} \quad (4.9)$$

angeschrieben werden. Die darin benutzte Indexschreibweise IPC/CF soll darauf hinweisen, dass je nach Art der Netzankopplung (über eine Drossel oder ein LCL-Filter) der Index IPC oder CF zu verwenden ist. Gl. (4.9) kann darüber hinaus in guter Näherung als Differentialgleichung eines Integrierglieds aufgefasst werden, wengleich auf der rechten Gleichungsseite u_{ZK} als nicht konstante Größe im Nenner steht. Das Bild 4.7 zeigt das zu Gl. (4.9) gehörende Strukturbild.

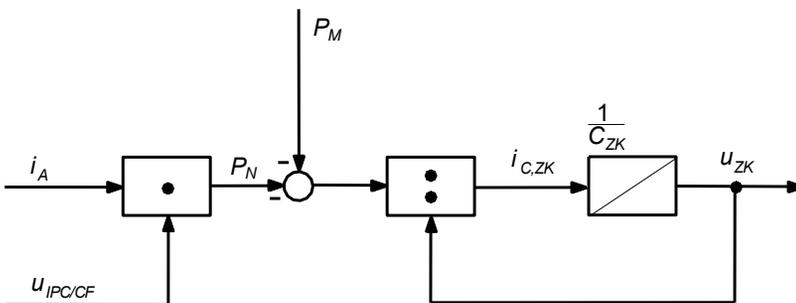


Bild 4.7: Strukturbild der Zwischenkreisspannungsregelstrecke eines Netzwechselrichters in Wechselstrombrückenschaltung