7 SINUSFILTER

7.1 Einleitung

Auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter sind in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt worden. Heute stehen Leistungstransistoren und abschaltbare Tyristoren zur Verfügung, die als schnelle elektronische Schalter ohne Kommutierungseinrichtung auskommen. Ihr Einsatz ist vorwiegend für Antriebe mit variabler Drehzahl verwendet. Die meist verwendete Variante transformiert zuerst die Wechsel Spannung in konstante Gleichspannung Udc die wiederum durch Pulsbreitenmodulation in eine Wechselspannung variabler Frequenz und Amplitude transformiert wird.

Die Frequenz der Pulsbreitenmodulation **(PBM)** kann einige kHz betragen, gewöhnlich 2-20 kHz.

7.2 Die Probleme von Umrichtern mit PBM

Die rechteckigen Spannungsimpulse des Wechselrichters beanspruchen den Motor durch die Steilheit der Spannungsänderung dU/dt. Damit entstehen die folgenden Probleme:

- Die Isolation ist oft gefährdet und damit die Lebensdauer des Motor.
- Die Oberwellen erzeugen im Eisen HF-Verluste die eine Überhitzung des Motors verursachen. Weil die hochfrequenten Oberwellen die Motorspannung prägen, ist es schwierig die Eingangsleistung des Motors zu messen und damit zu regulieren.
- Durch die Erdung des Netzes und des Motorgehäuses, treten überlagerte hochfrequente Stromkomponenten auf, welche die anderen Verbraucher im Netz stören.

Um diese Probleme besser zu erklären ist im Bild 7.2.1 das typische Schema eines Motorantriebes mit PBM.

Das dreiphasige Netz hat im Normalfall einen Nulleiter, der geerdet ist. Z_L ist die Impedanz der Erdung. Die vollgesteuerte Drehstrombrücke mit Tiefpassfilter erzeugt eine beinahe konstante Gleichspannung Udc

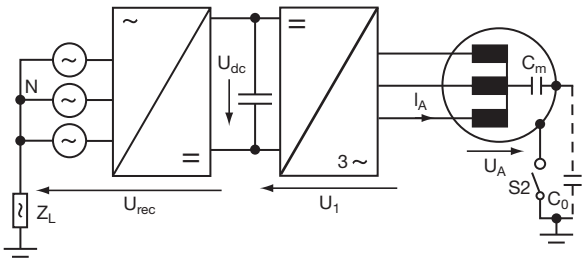


Bild 7.2.1: Schema des Motorantriebs mit PBM

Die Pulsbreite wird kontinuierlich in einem bestimmten Verhältnis so reguliert, dass die Spannung Ui beinahe einen sinusförmigen Verlauf erfährt. Die Amplitude dieser Spannung ist natürlich von der Form der Modulation abhängig. Sie ist begleitet auch von hochfrequenten Oberwellen: f_S + 2xfi, $2xf_S$ ± fi,.... Der Sternpunkt der Motorwicklungen ist im Normalfall schwimmend. Damit werden alle Harmonischen 3-ter Ordnung dazu addiert.

Die Kapazität zwischen den Motorwicklungen und Motorgehäuse **Cm** ist, bei den HF-Komponenten der Spannung, nicht zu vernachlässigen. Falls das Motorgehäuse nicht geerdet ist entsteht eine zusätzliche Kapazität: **Ce**. Die Brumspannung: **Ubr** = Urec + Ui - Ua erzeugt einen asymmetrischen schwankenden HF-Strom durch die Erdung. Diese Probleme können weitgehend mittels eines passiven LC-Filters gelöst werden.

7.3 LC-Filter

Das **Bild 7.3.1** zeigt ein typisches Schema eines PBM-Wechselrichters mit einem LC-Filter. Dabei ergeben sich zwei Möglichkeiten, die mit dem Schalter Si beschrieben sind. Der Sternpunkt des Filters kann mit dem Minus-Linie des Wechselrichter **(Si geschlossen)** verbunden sein, oder schwebend (Si **offen**). In beiden Fällen ist die Motorspannung gleich.

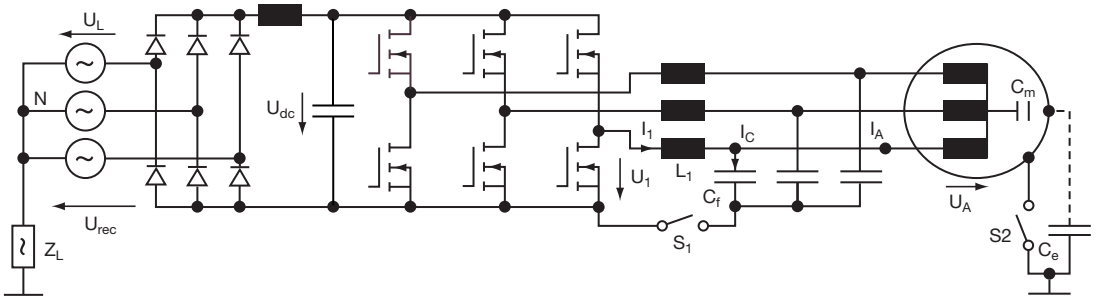


Bild 7.3.1: Vereinfachtes Schema des Motorantriebs mit PBM und Sinusfilter

Die Welligkeit der Motorspannung kann mit der Formel:

$$u_{A\sim} = \sqrt{\frac{\Sigma U_{A.i}^2 - U_{A.1}^2}{\Sigma U_{A.i}^2}} \qquad \text{und} \qquad U_{A.1} = m \frac{U_{dc}}{2\sqrt{2}}$$

mit: U_{Ai} - die i-ten Harmonischen (RMS) der Spannung
m - Modulationsfaktor = 0 ... 1.15

Falls die Pulsfrequenz fs viel größer ist als die maximale, vom Wechselrichter gelieferte Frequenz fm, dann ist die Welligkeit nur von dem Modulationsfaktor und dem Verhältnis fs / fo abhängig, wobei f_0 die Resonanzfrequenz des Filters ist und mit:

$$f_0 = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{(\,Lf \times Cf\,)}}$$

definiert (siehe auch **Bild 7.3.2**).

Um eine Spannungswelligkeit kleiner als 1% zu erreichen, soll das Verhältnis: $f_s / f_o > 8$ sein.

Die Auslegung des LC-Filters erfolgt dann über die Begrenzung des Spannungsabfall über die Drossel auf ΔU_L bei maximaler Motorfrequenz.

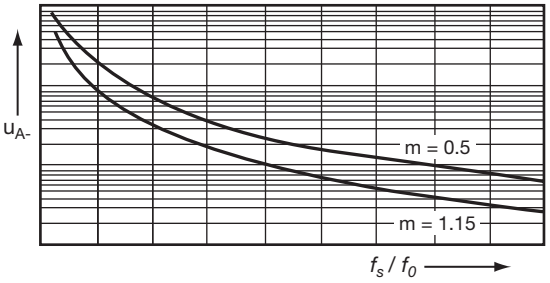


Bild 7.3.2: Rezultierende Welligkeit der Spannung abhängig von f_S / f_O

Der Strom besitzt drei Komponenten unterschiedlicher Frequenzen: die Nennfrequenz, die Pulsfrequenz und zusätzlich, vom LC-Filter erzeugter Frequenz 1-ter und 3-ter Ordnung. Die Pulskomponente des Stromes ist dreieckförmig **(Bild 7.3.3)** und von Pulszyklus a der Pulsfrequenz abhängig:

$$\hat{I}_{p\sim} = k \frac{U_{dc}}{2\,f_S\,Lf}\; a\;(1-a)$$

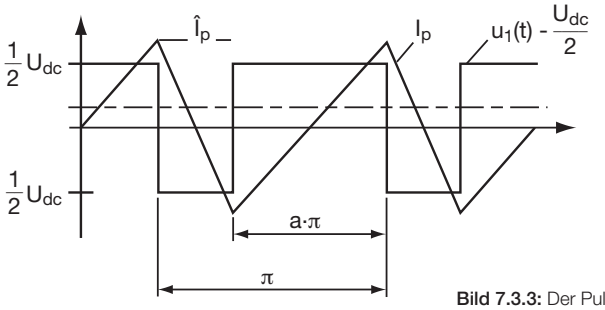
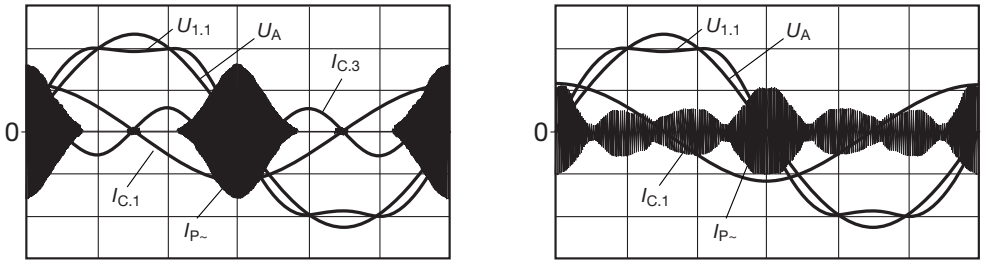


Bild 7.3.3: Der Pulskomponente des Stromes in Sinusfilters

Diese Komponente moduliert über dem Netzfrequenzstrom ergibt, je nach Stellung des Schalter 1 unterschiedliche Formen:

Bild 7.3.4: Der resultierende Strom im Sinusfilter



a. S1 geschlossen

b. S1 offen

Ein wichtiges Phänomen soll noch erwähnt werden. Die LC-Filter tendieren zu Schwankungen, falls die Eingangsspannung Frequenzteile in der Nähe der Resonanzfrequenz beinhaltet, welche in transiente Operationen auftreten können. Dieser unangenehme Vorgang kann mittels eines parallelen LCR-Filter sehr gut beseitigt werden. Eine zuverlässige Dämpfung wird garantiert, wenn die Resonanzfrequenz des LCR-Filters der Resonanzfrequenz des Tiefpaßfilters gleicht:

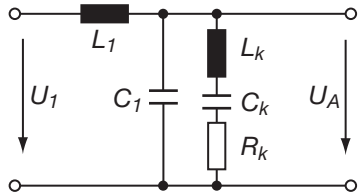


Bild 7.3.5: Sinusfilter mit Dämpfungsfiiter

Die Transferfunktion des gesamten Filter ist:

$$Z_k(\omega,k,r) = \left[\frac{1}{r\sqrt{(L_f / C_f)} + j\omega L_k k + k/(j\omega C_k)} + j\omega C_f\right]^{-1}$$

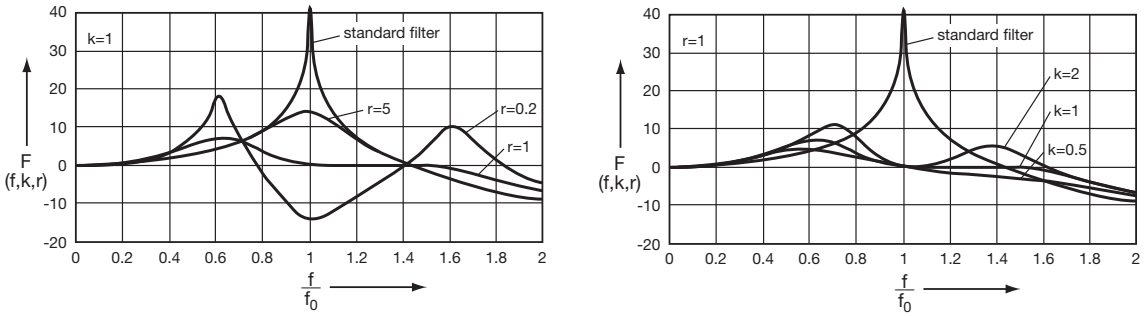
$$Z_f(\omega) = j\omega L_f$$

$$F(\omega,k,r) = 20\log\left[\left|\frac{Z_k(\omega,k,r)}{Z_f(\omega) + Z_k(\omega,k,r)}\right|\right]$$

mit $r = R_k/Z_0$ als Dämpungswiderstand und $Z_0 = \sqrt{L_f / C_f}$

Die Bilder Bild 7.3.6a und Bild 7.3.6b zeigen den Verlauf der Transferfunktion für verschiedene Parameter. Es ist zu sehen dass die Dämpfung desto besser ist je kleiner die Amplitude der Transferfunktion ist. Es ist auch zu sehen dass die Dämpfungskennlinie sinkt mit steigendem Wert des Faktors k.

Bild 7.3.6: Verlauf der Transferfunktion



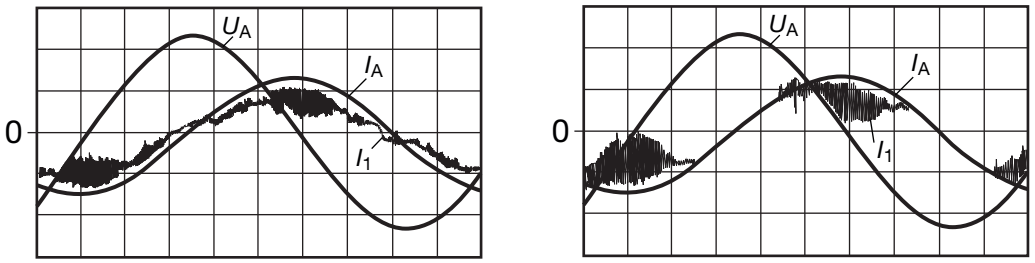
a. k=1=kt. und r variabel

b. r=1=kt. und k variabel

7.4 Wirkung

Die Wirkungen eines LC-Filters kann man in Bild 7.4.1 und Bild 7.4.2 beobachten.

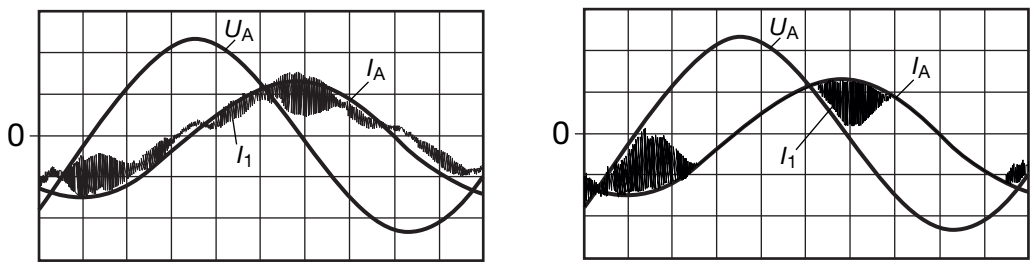
Bild 7.4.1: 1. Messung an einem Wechselrichters mit PBM und Sinusfilter



a. mit S1 offen

b. mit S1 geschlossen

Bild 7.4.2: 2. Messung an einem Wechselrichters mit PBM und Sinusfilter



a. mit S1 offen

b. mit S1 geschlossen