

# BERÜHRUNGSLOSE ENERGIEÜBERTRAGUNG FÜR HOHE LEISTUNGEN

F. Turki , R. Czainski

## 1 EINFÜHRUNG

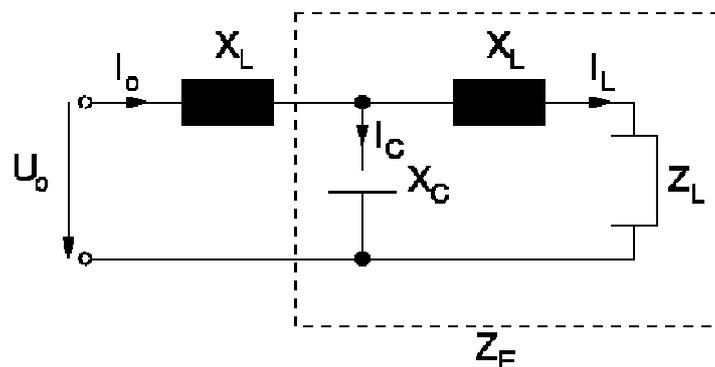
Jedes bewegliche Gerät, das eine externe Energieversorgung braucht, wird herkömmlicherweise mit Schleppkabel oder Schleifkontakten gespeist. Beide Versorgungsvarianten benötigen Wartung und stellen in der Regel eine Begrenzung in der Bewegungsfreiheit dar. Eine berührungslose Energieübertragung ist dagegen aufgrund der galvanischen Trennung sicherer und wartungsfrei. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, auch Daten berührungslos über diese Strecke übertragen zu können.

Die momentanen Entwicklungsziele bei der berührungslosen Energieübertragung sind:

- Minimierung der Verluste
- Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit

## 2 DER VIERPOL

Die berührungslose Energieübertragung setzt ein magnetisches Feld konstanter Amplitude voraus. Letzteres wird durch einen konstanten Strom in der Primärleitung gewährleistet. Dieses Stromquellenverhalten ermöglicht der in **Bild 1** dargestellte Vierpol, in dem der Strom, entsprechend der Gln. (2.1) bis (2.4), unabhängig von der Last konstant gehalten wird.



**Bild 1:** Prinzipieller Aufbau des Vierpols

Die Impedanz der in **Bild 1** gestrichelt abgegrenzten Anordnung ist:

$$Z_E = \frac{X_C(X_L + Z_L)}{X_C + X_L + Z_L} \quad (2.1)$$

Damit ergibt sich für die Berechnung des Stromes:

$$I_L = I_o - I_C = \frac{U_o}{X_L + Z_E} \left(1 - \frac{Z_E}{X_C}\right) \quad (2.2)$$

Mit 
$$j\omega L = \frac{1}{j\omega C}$$

folgt: 
$$X_L = -X_C = X \Rightarrow Z_E = \frac{-X^2}{Z_L} - X \quad (2.3)$$

Gl. (2.2) kann dann wie folgt geschrieben werden:

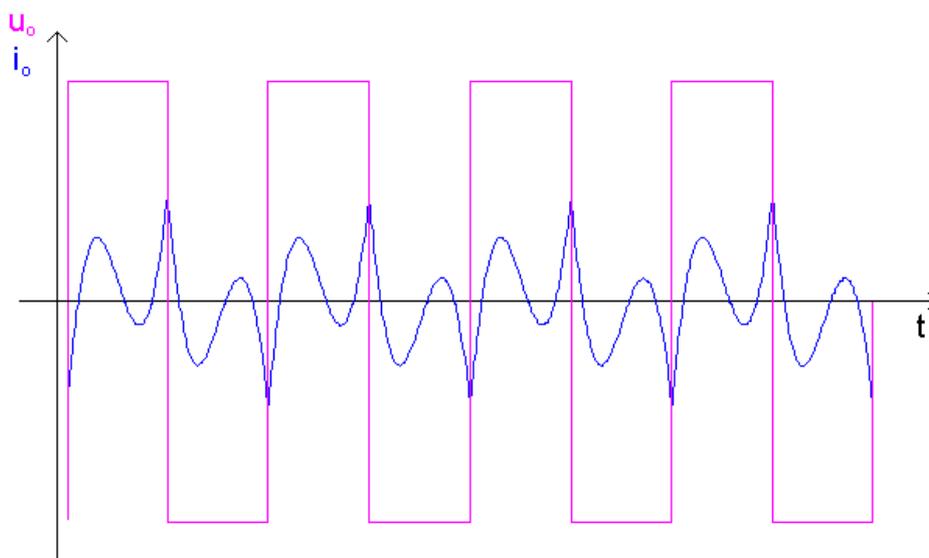
$$I_L = \frac{U_o}{X} \quad (2.4)$$

Es wird ersichtlich, dass der Strom unabhängig von der Last ist.

Die Schaltfrequenz des Wechselrichters sollte so hoch wie möglich sein, um das Bauvolumen der Induktivitäten zu minimieren. Deshalb wurde aufgrund der physikalischen Grenzen der IGBTs eine Frequenz von 20 kHz gewählt. Die passive Verschaltung ist so kalibriert, dass sie einen Bandpass für 20 kHz darstellt. Dies ergibt einen nahezu sinusförmigen Strom in der Primärschleife, obwohl die Spannung am Eingang rechteckförmig ist.

Bei einem abgeglichenen Vierpol sind Strom und Spannung in Phase, weshalb zum Reduzieren der Schaltverluste und zum Verbessern der elektromagnetischen Verträglichkeit möglichst im Stromnulldurchgang umgeschaltet wird.

Im Leerlaufbetrieb ( $Z_L = 0$ ) muss der Wechselrichter einen minimalen Strom bereitstellen (**Bild 2**), der seine Ursache in den Höherharmonischen hat, die in der Rechteckspannung enthalten sind. Demnach hängt der Leerlaufstrom von der Flankensteilheit der Spannung und der Gesamtimpedanz des Vierpols ab.



**Bild 2:** Wechselrichter-Leerlaufstrom und Ausgangsspannung

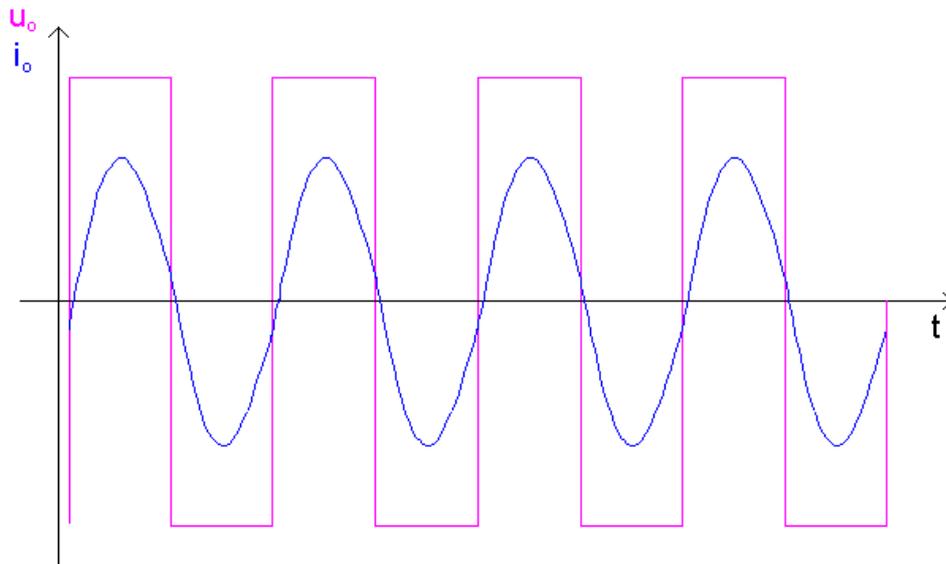
Dementsprechend ergibt sich für die charakteristischen Stromspitzen:

$$I_{\max} = -\frac{1}{L} \int_{t=0}^{t_{\text{switch}}} U dt = \frac{U_d \cdot t_{\text{switch}}}{L} \quad (2.5)$$

Bei kleiner Leistung des Wechselrichters (z.B. 5 kW und 560 V im Zwischenkreis) kann der Vierpol zu niederohmig für die Hochfrequenzkomponenten sein. In diesem Fall ist es angebracht, die Impedanz zu erhöhen, indem man eine größere Induktivität verwendet und Kompensationskapazitäten zuschaltet:

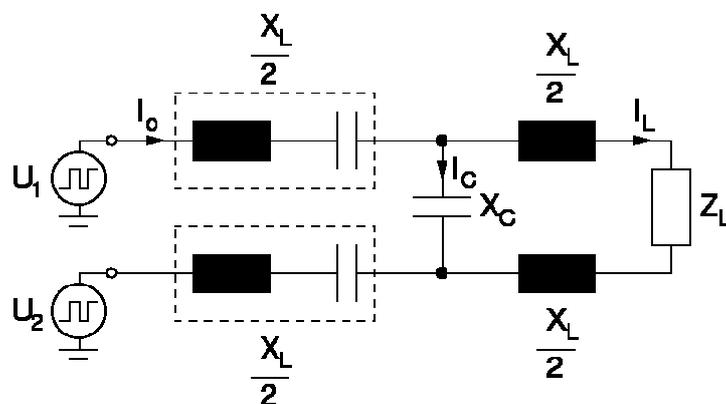
$$j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = j\omega X_L \quad (2.6)$$

Bei Belastung nähert sich die Stromform einem Sinussignal (**Bild 3**):



**Bild 3:** Wechselrichter-Belastungsstrom

Damit die Anordnung symmetrisch ist, werden die Induktivitäten zweigeteilt (**Bild 4**). Dies ergibt kleinere Potenzialdifferenzen gegenüber dem Erdpotential.



**Bild 4:** Symmetrische Anordnung mit Kompensation

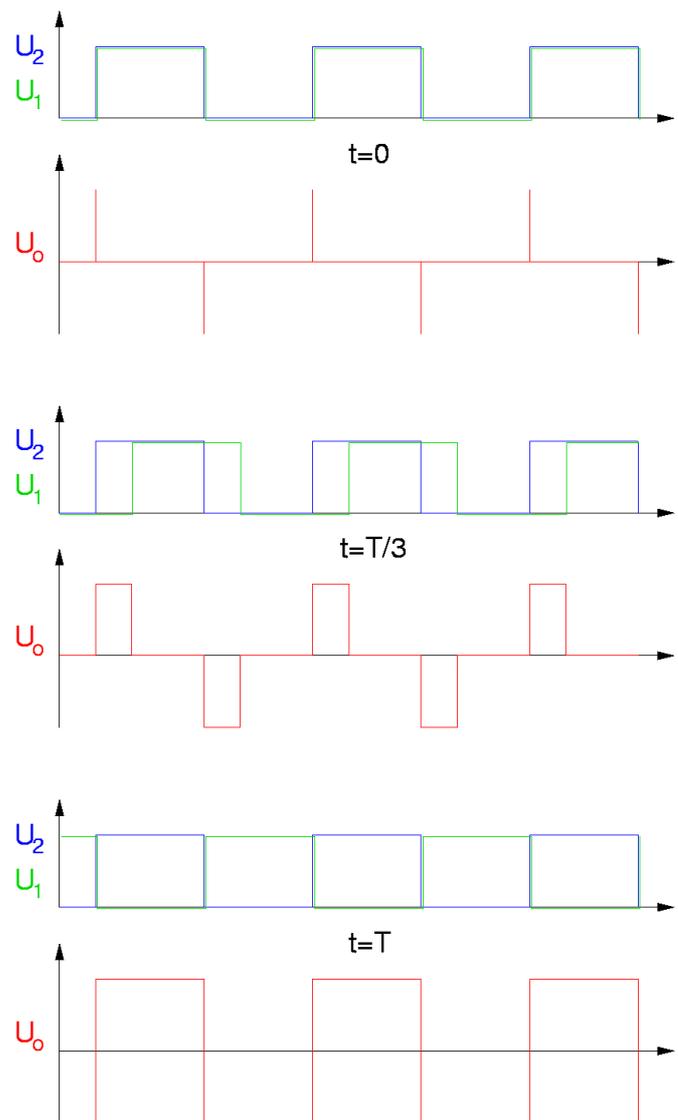
Die aufgrund der Rechteckspannung und der ungeladenen Kapazitäten beim Einschalten des Systems entstehenden Stromspitzen müssen durch geeignete Maßnahmen begrenzt werden, da diese Spitzen so hoch sein können, dass sie den Wechselrichter zerstören. Die Lösung besteht darin, den Strom langsam zu steigern, indem man ihn durch die Pulsbreite des Wechselrichters einstellt ("Soft Start").

**Bild 4** zeigt, dass man den Umrichter durch zwei Rechteck-Spannungsquellen darstellen kann. Beide Rechteckspannungen haben 50% Pulsbreite, ihre Phasenlage zueinander ist variabel. Bei  $t = 0$  sind beide Quellen in Phase. Ab  $t > 0$  wird die Phasendifferenz erhöht, bis diese bei  $t = T_r$  eine halbe Periode erreicht entsprechend einem Phasenunterschied der Spannungsquellen von  $180^\circ$ .

Die Ausgangsspannung

$$U_o = U_2 - U_1 \quad (2.7)$$

ist bipolar und rechteckförmig. Die peak-to-peak-Spannung ist dabei doppelt so hoch wie die Zwischenkreisspannung (**Bild 5**).



**Bild 5:** Der Soft Start Prozess

Um den Vierpol auf die gewünschte Resonanzfrequenz  $\omega$  abzustimmen, werden folgende Schritte ausgeführt:

Da  $U_o$  und  $\omega$  vorgegeben sind, wird die Hauptkapazität durch den gewünschten Primärstrom  $I_L$  wie folgt bestimmt:

$$C = \frac{I_L}{\omega U_o} \quad (2.8)$$

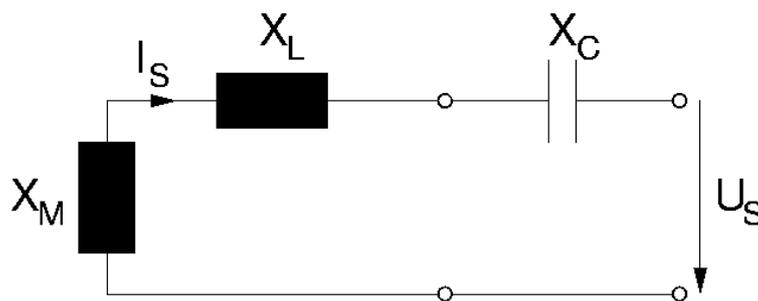
Damit ergibt sich die Induktivität für den Bandpass:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.9)$$

Wenn der Leerlaufstrom zu hoch ist, wird die wechselrichterseitige Induktivität wie beschrieben vergrößert und anschließend auf 20 kHz kompensiert.

### 3 DER PICK-UP

Der Pick-Up stellt die Sekundärwicklung des Transformators dar. Er besteht lediglich aus einer Induktivität und einer Kapazität. Beide Elemente bilden einen Schwingkreis für 20 kHz. Dieser Schwingkreis kann als Reihen- oder als Parallelschwingkreis ausgeführt werden. Der Ferritkern der Spule konzentriert den magnetischen Fluss, der von dem Primärkreis aufgebaut wird. Die Ausgangsspannung des in **Bild 6** dargestellten Pick-Up, der als Reihenschwingkreis ausgeführt wurde, ist proportional zur Windungszahl und zum Primärstrom, so dass sich die Möglichkeit ergibt, hierüber die Spannung einzustellen. Diese Wechselspannung kann anschließend gleichgerichtet werden, um sie beispielsweise für einen Gleichstromsteller zur Verfügung zu stellen.



**Bild 6:** Der Pick-Up

**Bild 6** zeigt den prinzipiellen Aufbau des Pick-Up.  $X_M$  ist die Hauptinduktivität und  $X_L$  die Streuinduktivität. Für  $f = 20$  kHz wird  $X_C$  wie folgt gewählt:

$$X_C = -(X_M + X_L) \quad (3.1)$$

### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe der vorgestellten Dimensionierungsrichtlinien für die Komponenten des verwendeten Vierpols sowie der Verfahren zum Betrieb dieses Vierpols kann eine schaltverlustreduzierte und gleichzeitig EMV-günstige berührungslose Energieübertragung auch für hohe Leistungen realisiert werden.