

PSPICE-SIMULATION DER SPANNUNGSBEANSPRUCHUNG VON DREHSTROMMOTOREN BEI SPEISUNG DURCH PULSUMRICHTER

J. Poschadel

Drehzahlvariable Drehstromantriebe bestehen heutzutage meist aus Umrichtern mit Spannungszwischenkreis und Pulswechselrichtern. Der Einsatz von IGBT's ermöglicht wegen ihrer kurzen Schaltzeiten Pulsfrequenzen von bis zu 20 kHz und damit eine hohe Regeldynamik und große Drehmomentkonstanz des Antriebes. Der zum Betrieb der elektrischen Maschinen notwendige Sinusspannungsverlauf wird dabei durch ein Pulsmuster von einzelnen impulsförmigen Spannungsblöcken nachgebildet, die kurze Anstiegs- bzw. Stirnzeiten aufweisen. Die Schaltspannungen mit sehr kleinen Stirnzeiten führen in Verbindung mit hohen Pulsfrequenzen zu Wanderwellen zwischen Wechselrichter und Maschine und innerhalb der Maschine, die besonders bei langen Motorzuleitungen Spannungsüberhöhungen und damit erhöhte elektrische Beanspruchungen der Wicklungsisolierung zur Folge haben. Deren Lebensdauer wird durch elektrische Alterung wesentlich beeinflusst.

Die Aufgabe, die elektromagnetischen Ausbreitungsvorgänge auf Leitungen vollständig zu erfassen, ist wegen der kontinuierlich verteilten Leitungsbeläge (Längswiderstand, Querleitwert, Längsinduktivität und Querkapazität) recht schwierig und aufwendig. Daher werden für die technische Beschreibung und die Simulation der oben genannten Vorgänge einfache Ersatzschaltungen herangezogen, bei denen konzentrierte Schaltelemente Verwendung finden (**Bild 1**).

Die Leitungskennwerte werden durch die entsprechenden, auf die Längeneinheit bezogenen Beläge ersetzt. Für ein dreidrahtiges Kupferkabel mit einem Leiterquerschnitt von $2,5 \text{ mm}^2$ gilt beispielsweise:

$$R' = 7,4 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$G' = 0,0001 \text{ pS}/\text{m}$$

$$L' = 0,2 \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$$

$$C' = 0,07 \text{ nF}/\text{m}$$

Eine lange Leitung, die Leitungslängen können je nach Anwendungsfall mehrere hundert Meter betragen, kann durch ein Schaltbild entsprechend **Bild 1**

nachgebildet werden oder aber durch das Hintereinanderschalten mehrerer solcher Anordnungen, die dann einzelnen Teilabschnitten der Leitung entsprechen. Allerdings wird damit die Simulations- bzw. Rechenzeit erheblich verlängert.

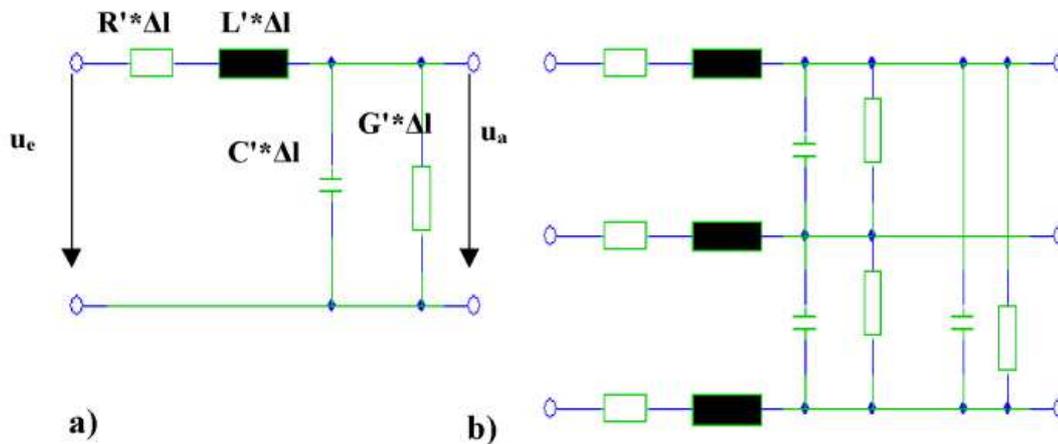


Bild 1: Ersatzschaltbild einer Leitung der Länge Δl
 a) einphasig b) dreiphasig

Die nicht in **Bild 1** eingetragene Motorwicklung stellt eine hochohmige Last dar, denn im Vergleich zum Kabel hat die Wicklung einen sehr viel größeren Wellenwiderstand. Die Spannungsverhältnisse am Ende der Leitung entsprechen damit bei Anschluß eines Drehstrommotors im wesentlichen den Verhältnissen, die sich bei offenem Leitungsende einstellen.

Bei Pulsumrichterspeisung über längere Anschlußkabel ergibt sich am leerlaufenden Kabelausgang ein typischer Spannungsverlauf gemäß **Bild 2b** und **Bild 2c**. Dieser wird bei Kabeln durch die Potentialsprünge (**Bild 2a**) am Umrichterausgang ausgelöst. Sie verursachen Schaltwellen, die das Kabel durchlaufen und am offenen Ausgang reflektiert werden. Der ohmsche Leitungswiderstand des Kabels dämpft die auftretenden Einschwingvorgänge.

Die Theorie der Elektrischen Wanderwellen besagt, daß bei der leerlaufenden, verlustlosen Leitung die Amplitude der Ausgangsspannung den doppelten Wert der Zwischenkreisspannung erreicht. Bei Berücksichtigung des ohmschen Widerstandes wird die maximale Amplitude $\hat{U} < 2U_d$. Dies gilt nur für quasistationäre Anfangszustände. Ändert sich jedoch (hohe Pulsfrequenz) der Schaltzustand des Wechselrichters während des transienten Ausgleichsvorganges- trifft z.B. eine rücklaufende Ausschaltflanke auf die bereits wieder eingeschaltete Schaltwelle- so pflanzt sich eine Einschaltflanke mit der Amp-

litute $\hat{U} > U_d$ auf der Leitung fort. Am offenen Leitungsende kann diese Welle bei Reflexion zu einer Gesamtspannung führen, die größer als das Zweifache der Zwischenkreisspannung ist (ungedämpfte Leitung $\hat{U} = 3U_d$). Insgesamt kann man davon ausgehen, daß die Spannungsüberhöhungen größer werden, wenn die Pulsfrequenz erhöht wird, wenn die Anstiegsgeschwindigkeit der Impulse wächst (Halbleiter mit immer kürzeren Schaltzeiten und damit geringeren Schaltverlusten) und wenn die Länge der eingesetzten Leitungen zunimmt. Außerdem hängen sie von den Leitungs- und von den Motordaten ab.

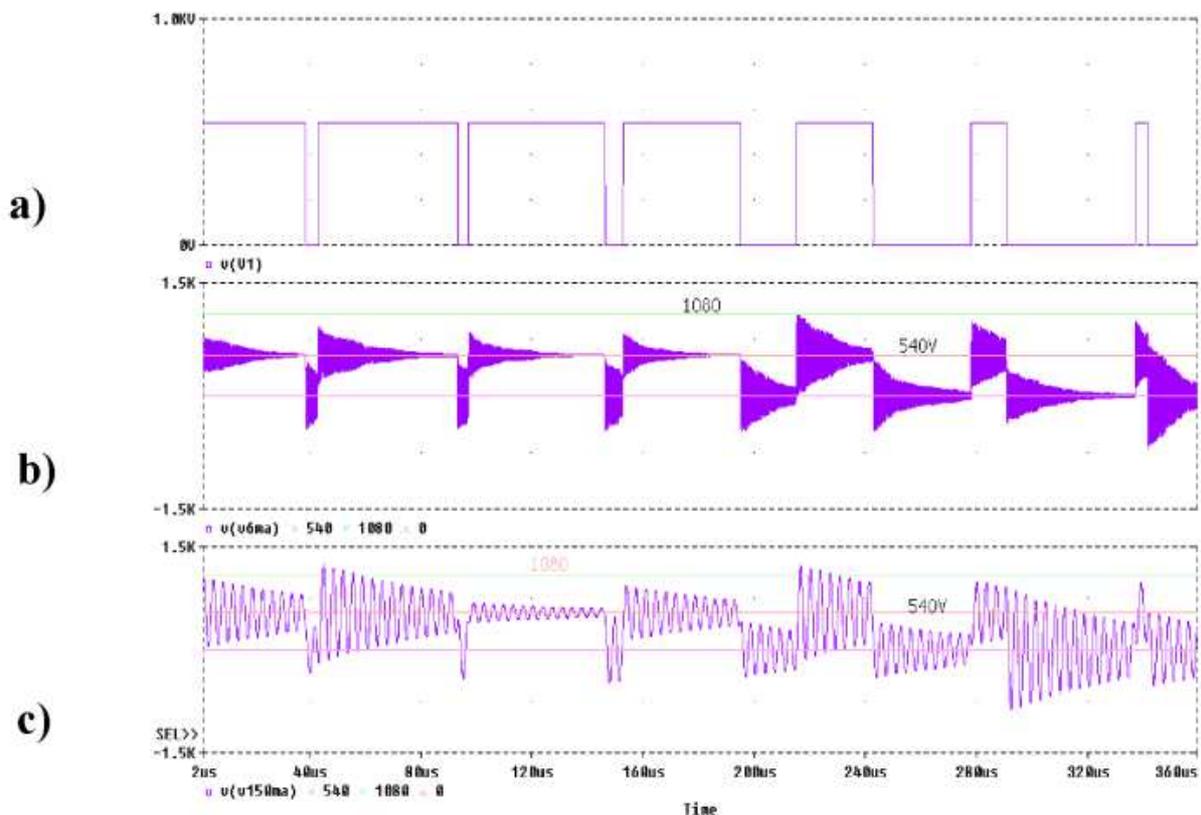


Bild 2: Typische Spannungsverläufe an durch Pulswechselrichter gespeisten, leerlaufenden Kabeln (Simulation mit Ersatzbildern nach **Bild 1a**).

- a) Spannung an einem Umrichterausgang (unipolare Impulsspannung, Zwischenkreisspannung $U_d=540$ V, Pulsfrequenz $f_p=18,4$ kHz).
- b) Spannung am Ende einer 6m langen Leitung (max. Spannung $\hat{U} = 2U_d=1080$ V, Einschwingfrequenz 2,8 MHz).
- c) Spannung am Ende einer 150 m langen Leitung (max. Spannung $\hat{U} \geq 2U_d=1200$ V, Einschwingfrequenz 285 kHz).

Bei der 6 m langen Leitung (**Bild 2b**) tritt trotz starker Dämpfung im ungünstigsten Fall des simulierten Zeitbereichs als Maximalspannung $\hat{U}_{\max} = 2U_d$ auf. Die Maximalwerte bei der 150 m langen Leitung liegen oberhalb der doppelten Zwischenkreisspannung bei ungefähr 1200 V.

Je nach Modulationsart liegt die maximale Grundswingungsamplitude bei der linearen Pulsbreitenmodulation zwischen $U_d/2$ (Sinus-Dreieck-Modulation) und $2/\sqrt{3} * U_d/2$ (Raumzeigermodulation). Diese Werte gelten für die Strangspannungen. Für die verketteten Spannungen einer dreiphasigen Anordnung ergeben sich damit die Amplituden $\sqrt{3} * U_d/2$ bzw. U_d . Das sind gleichzeitig die Amplituden der Nennspannung des anzuschließenden Motors.

Die verketteten Spannungen am Ein- und Ausgang einer 150 m langen Leitung zeigt **Bild 3**.

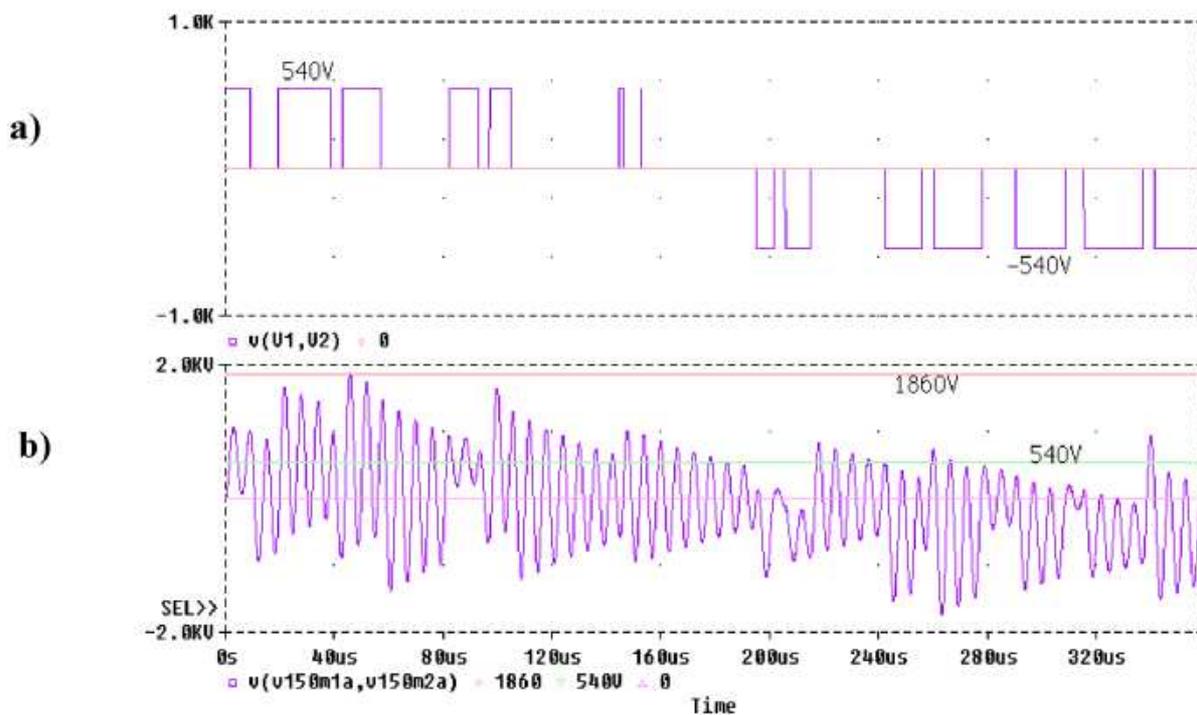


Bild 3: Verketete Spannungsverläufe an einer dreiphasigen Leitung

a) Bipolare Impulsfolge am Eingang ($f_p=18,4$ kHz)

b) Ausgangsspannung (Einschwingfrequenz 178,6 kHz)

Die maximale Spannungsamplitude ist mit 1860 V etwa 3,4 mal so hoch wie die Zwischenkreisspannung. Sie würde aber deutlich kleiner werden, wenn die Wirbelstromverluste, die bei den hohen Frequenzen zweifellos auftreten, Berücksichtigung fänden.

Auf Grund von Wanderwellenvorgängen können beim Wechselrichterbetrieb von Drehstrommaschinen an den Maschinenklemmen deutlich größere Spannungsamplituden als beim Netzbetrieb auftreten. Es entstehen kurzzeitig hohe elektrische Beanspruchungen der Wicklungsisolation, die bei Normmotoren häufig zu Frühausfällen führen.

Als Sekundärmaßnahme einzuordnen, die zwar die hohen Spannungsspitzen und steilen Spannungsanstiege nicht beseitigt, aber ihre Auswirkungen mildert, ist die Verbesserung des Isolationssystems der Maschinen durch den Einsatz höherwertiger Isolierstoffe, durch Verbesserung der Tränkverfahren, durch die Neuentwicklung von Sonderlacken, zusätzliche Isolierschläuche an Schaltverbindungen, Löt- und Schweißstellen und schonendere Behandlung bei der Herstellung der Wicklungen. Diese Maßnahmen können den Ausfall der Wicklung hinausschieben, aber nicht ganz verhindern.

Beseitigen lassen sich die Ursachen durch Pulsumrichter mit ausgangsseitigem Oberschwingungsfilter. Als Filter kommen Drosseln oder auch RLC-Tiefpässe zum Einsatz. Dem Nachteil des Mehraufwandes und zusätzlicher Verluste stehen als Vorteil die Entschärfung der EMV-Problematik und die Minderung der Geräuschentwicklung gegenüber.

Eine weitere Möglichkeit, auch bei ausgedehnten Anlagen die Überspannungen zu vermeiden, besteht in der Reduktion der Leitungslänge. Bei Kompaktantrieben - eine Einheit bestehend aus Motor und Umrichter - ist die lange Leitung auf der Netzseite des Umrichters. Hier ist wegen der niedrigen Frequenz und der sinusförmigen Spannung nicht mit Überspannungen zu rechnen.