

Vorladen von
Zwischenkreis-ELKOs
bei Drehzahlreglern, Umrichtern
und DC/DC-Wandlern

bestehende Gefahren und die sich daraus
ergebende Notwendigkeit des Vorladens
sowie

Beispiele der praktischen Umsetzung

(C) IBZ 31.07.2014

www.SinusLeistungsSteller.de

info@SinusLeistungsSteller.de

1. Einleitung

Moderne bürstenlose E-Motoren werden mit getakteten Umrichtern (“Reglern”) gesteuert, die ihrerseits aus einem DC-Zwischenkreis versorgt werden. Diese Gleichspannung kann mit einem Netzteil aus dem Versorgungsnetz z.V. gestellt werden oder (z.B. für mobile Anwendungen) auch direkt aus einem Akku bezogen werden.

Zur Stabilisierung und Pufferung der DC-Eingangsspannung besitzen diese Regler am DC-Eingang Zwischenkreis-Elektrolyt-Kondensatoren (“ZK-ELKOs”), die i.d.R. direkt parallel zu den Plus- und Minus-Anschlußklemmen geschaltet sind. **Diese ELKOs bedürfen beim Ein- und Ausschalten des Gerätes besonderer Aufmerksamkeit!**

Zum Trennen von Versorgung (Netzteil oder Akku) und Regler kommen dabei Stecker oder mechanische Schalter bzw. Schütze zum Einsatz, wodurch sich gewisse Gefahren für diesen Kontakt aber auch für den angeschlossenen Regler selbst ergeben! Dies trifft insbesondere dann zu, wenn ein Akku als Energiequelle eingesetzt wird, bei dem wesentlich höhere (Kurzschluß-)Ströme auftreten können als bei Versorgung aus einem Netzteil.

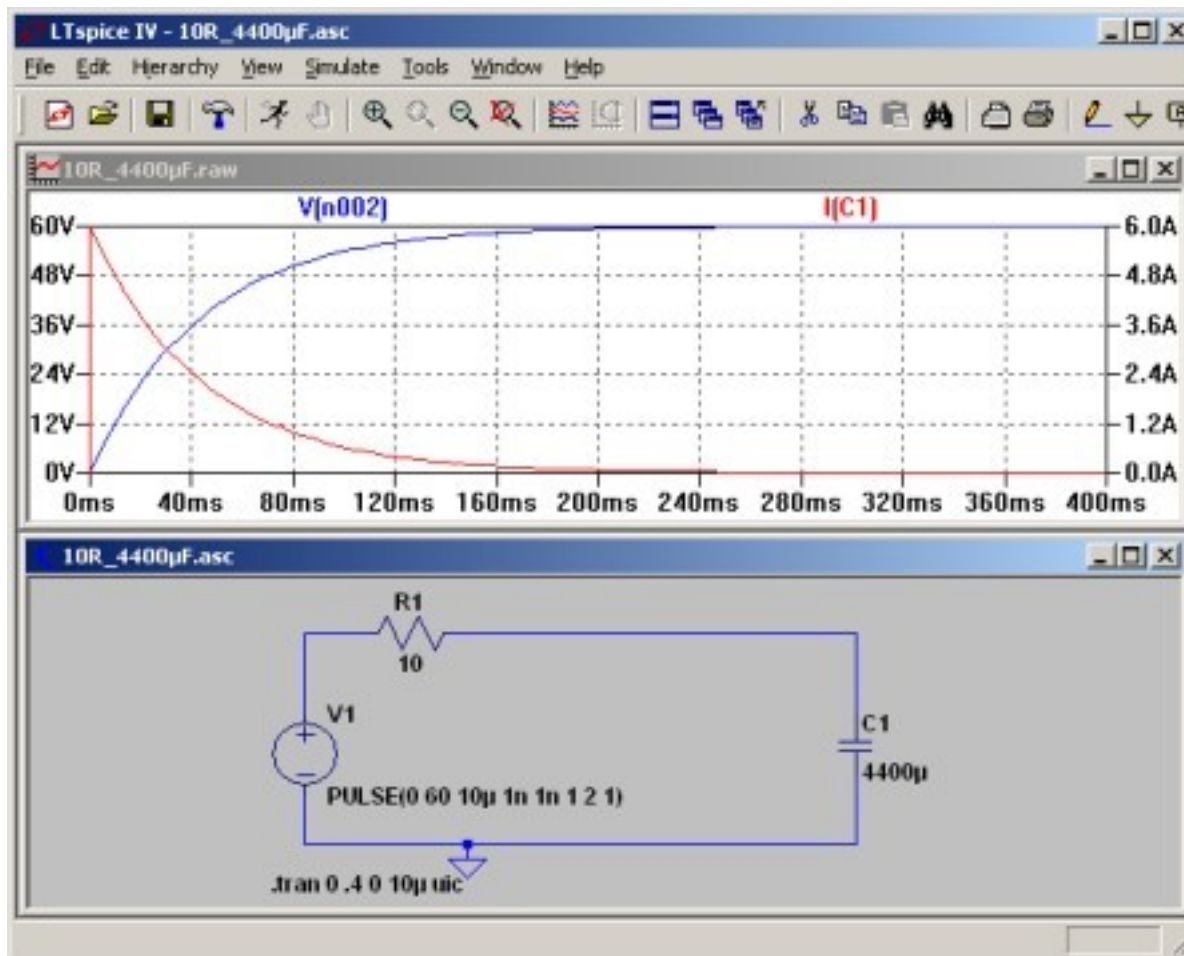
Auf diese Gefahren will dieses Papier aufmerksam machen. Den Anwendern solcher Regler soll die Notwendigkeit des Vorladens deutlich gemacht werden.

Die Ergebnisse und Schlußfolgerungen können analog auch auf andere Geräte übertragen und angewendet werden, welche ELKOs in ähnlicher Art und Weise zur Pufferung der angelegten DC-Versorgung einsetzen - z.B. Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler).

2 Simulation eines Einschaltvorgangs

2.1 Modellierung mit einem vereinfachten Modell: RC-Ladevorgang

Jeder kennt wohl noch aus dem Physikunterricht in der Schule den Aufladevorgang eines Kondensators über einen Widerstand. Es ergibt sich eine ansteigende e-Funktion für die Kondensatorspannung (blau) und eine abklingende e-Funktion für den Ladestrom (rot) wie unten dargestellt. (Die Quelle V1 entspricht dem Akku, zugeschaltet bei 0ms; der Widerstand R1 dem Widerstand der Zuleitung und C1 einem ZK-ELKO am Eingang eines Reglers.)



Es wird hier das Aufladen eines $4.400\mu\text{F}$ Kondensators über einen 10 Ohm Widerstand an einer Spannungsquelle von 60V simuliert.

Gut erkennbar ist die Annäherung der Spannung an den theoretischen Grenzwert von 60V (voll geladen) und das Abklingen des Stroms auf 0A

Der maximale Strom fließt gleich zu Beginn des Aufladevorgangs. Er beträgt im ersten Moment $60\text{V}/10\text{R}=6\text{A}$.

Würde man dieses Simulationsmodell mit einem realen Zuleitungswiderstand von 10 milliOhm ($=0,010\text{ Ohm}$) rechnen, dann würde sich theoretisch ein Peakstrom von **6.000A** ergeben!

(... leider kam das Simulationsprogramm an seine Grenzen, so daß mit einem unrealistisch hohen R gerechnet wurde; am prinzipiellen Verlauf ändert das jedoch nichts... im Diagramm einfach den Strom mit 1000 multiplizieren und die Zeitachse durch 1000 teilen ...)

Bereits mit diesem stark vereinfachten Modell kann das erst Problem erkannt werden:

>>> 1. Problem: Es fließt ein sehr hoher Strom direkt beim Einschalten!

... zwar nur für kurze Zeit aber in der Höhe weit jenseits von Stromwerten mit denen übliche elektronische Bauteile gewohnt sind umzugehen.

Nähern wir obiges Beispiel noch etwas mehr der Wirklichkeit an:

- die **10 mOhm** aus dem Beispiel entsprechen ca. 2m Zuleitung (1m Abstand Akku-Regler) bei 4mm²
- C1 hat als reales Bauteil einen zusätzlichen Widerstand: **13 mOhm** (ja, das ist ein sehr guter Kondensator!)
- der Akku bringt es voll geladen vielleicht auf einen Innenwiderstand von **20 mOhm**
- dann kommen Übergangswiderstände am Schalterkontakt und Schraubverbindungen dazu: **1 .. 2 mOhm(?)**

.... selbst wenn wir mit einem realistischen Gesamtwiderstand von **50 mOhm** rechnen, ergibt sich immer noch ein Peakstrom von **1.200A!** ...und je niederohmiger die Sache wird (z.B. größerer Leitungsquerschnitt), je höher wird dieser Peakstrom!

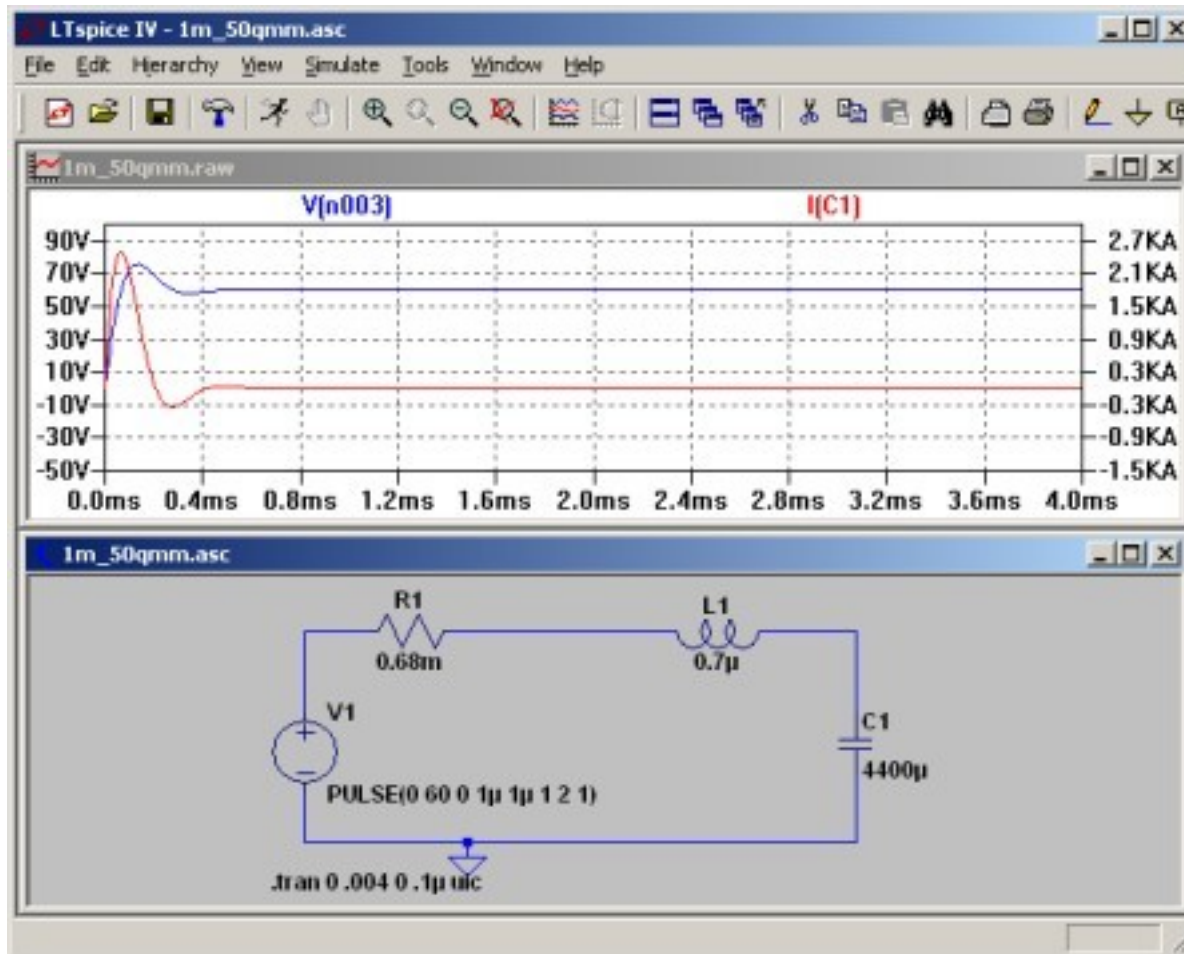
Es dürfte jedem klar sein, daß diese Stromstärken (auch wenn sie bei jedem Einschaltvorgang nur kurze Zeit auftreten) nicht gerade gesund für die beteiligten Bauteile (Akku, Stecker/Kontakte, ELKOs) sind. ... Kontaktabbrand mit sich immer weiter verschlechterndem Übergangswiderstand ist hier das wohl offensichtlichste Problem. Aber auch Langzeitschäden bei Akku und ZK-ELKOs sind sehr wahrscheinlich.

2.2 Modellierung unter Einbeziehung der Zuleitungsinduktivität

2.2.1 ... kurze Zuleitung 1m, 50mm²

Verfeinern wir jetzt unser Simulationsmodell und beziehen die Induktivität der Zuleitung mit ein:

In der Simulation legen wir eine Zuleitung von 1m (Abstand Akku-Regler) mit einem Querschnitt von 50mm² zugrunde. Die Induktivität ergibt sich hierfür mit 0,7µH (für eng-parallel verlegte Hin-/Rückleitung). Der Anteil des Leitungswiderstands errechnet sich zu 0,68mOhm. Das ELKO-Modell beinhaltet zusätzliche 13mOhm.



Jetzt erreicht der Strom sein Maximum erst kurz nach dem Einschalten.

Das Strommaximum liegt immer noch sehr hoch bei ca. 2.600A.

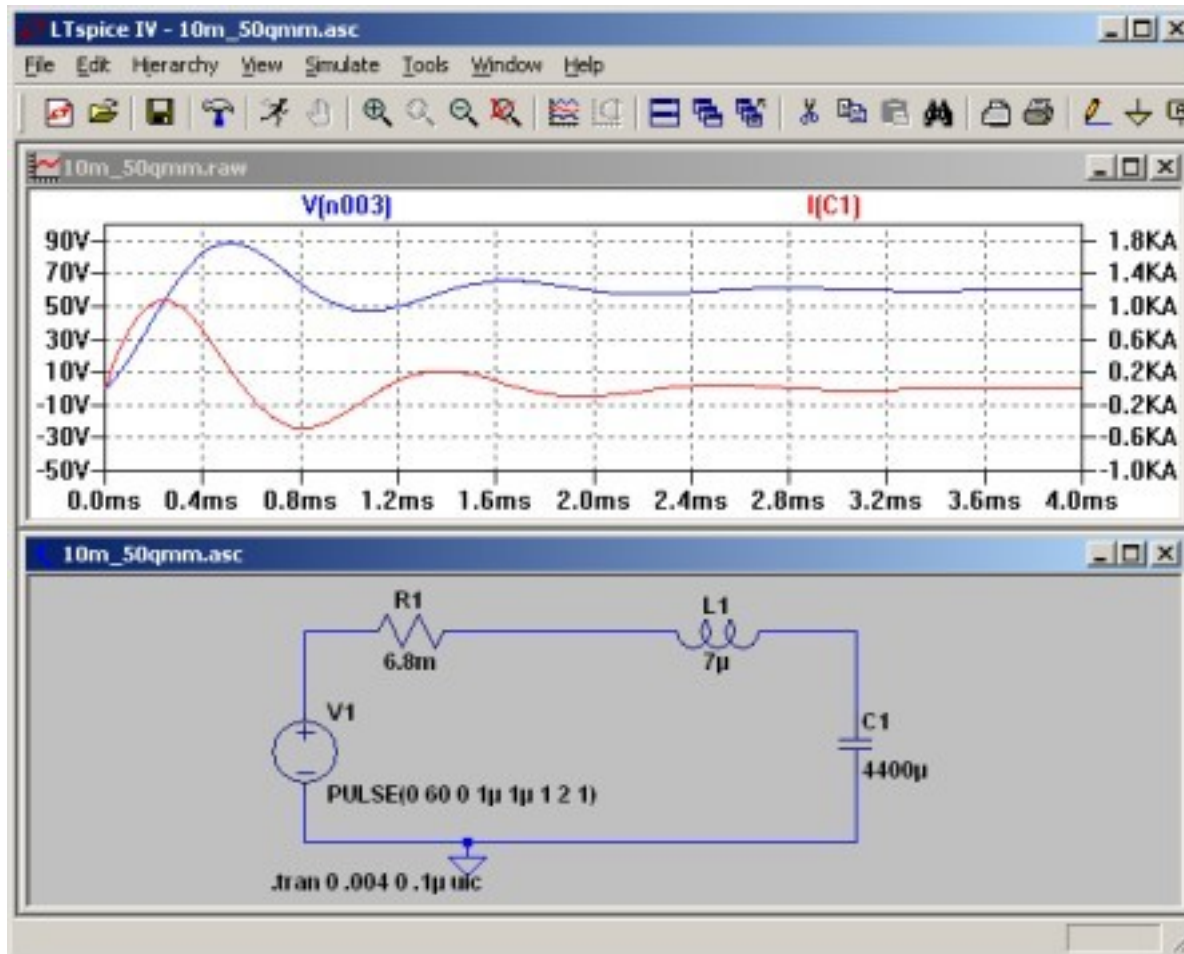
Zusätzlich ist zu erkennen, daß sich die Spannung an C1 jetzt nicht mehr asymptotisch an den Endwert (60V) annähert sondern um diesen Wert herum einschwingt **und dabei bis auf ca. 75V überschwingt!**

>>> 2. Problem:

Die Eingangsspannung schwingt über!

2.2.3 ... mittellange Zuleitung 10m, 50mm²

Für eine um Faktor 10 längere Zuleitung gleichen Querschnitts ergeben sich 10-fach höhere Werte für Zuleitungswiderstand (6,8mOhm) und Zuleitungsinduktivität (7.0μH). Eine Simulation mit diesen Werten ist unten dargestellt. Das Einschwingen dauert jetzt wesentlich länger, da der durch L und C gebildete Schwingkreis auf langsamere Eigenfrequenz abgestimmt ist.



Das Strommaximum beträgt jetzt “nur” noch **1.000A** - dauert dafür aber erheblich länger.

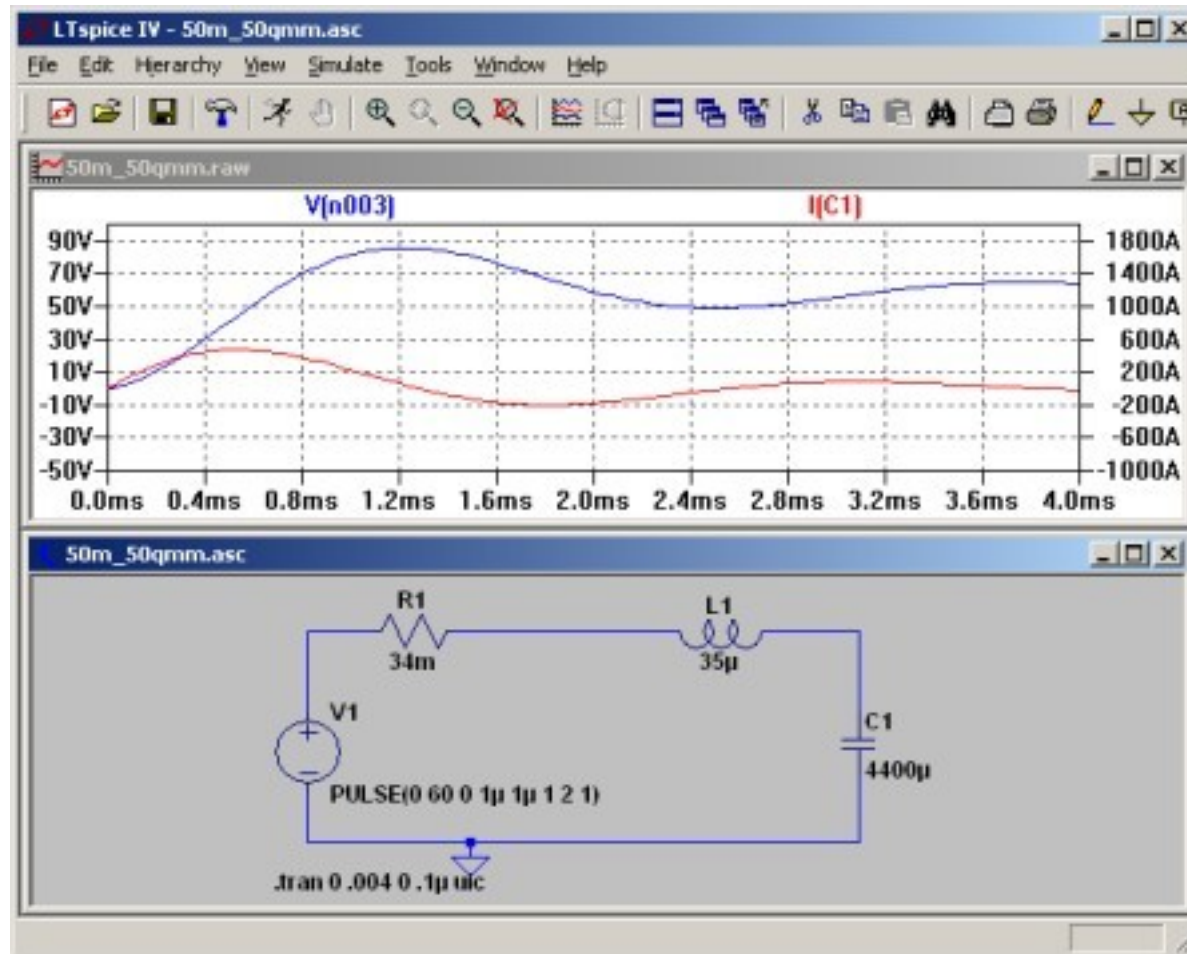
Der wesentliche Unterschied ist im Überschwingen der Spannung am ELKO zu finden:

Es werden jetzt kurzzeitig Spannungen bis 90V erreicht!

2.2.4 ... lange Zuleitung 50m, 50mm²

Nochmaliges verlängern der Zuleitung um den Faktor 5 bringt folgendes Bild:

Die Schwingung verlangsamt sich abermals.



Der Strompeak liegt jetzt im Bereich von **550A**.

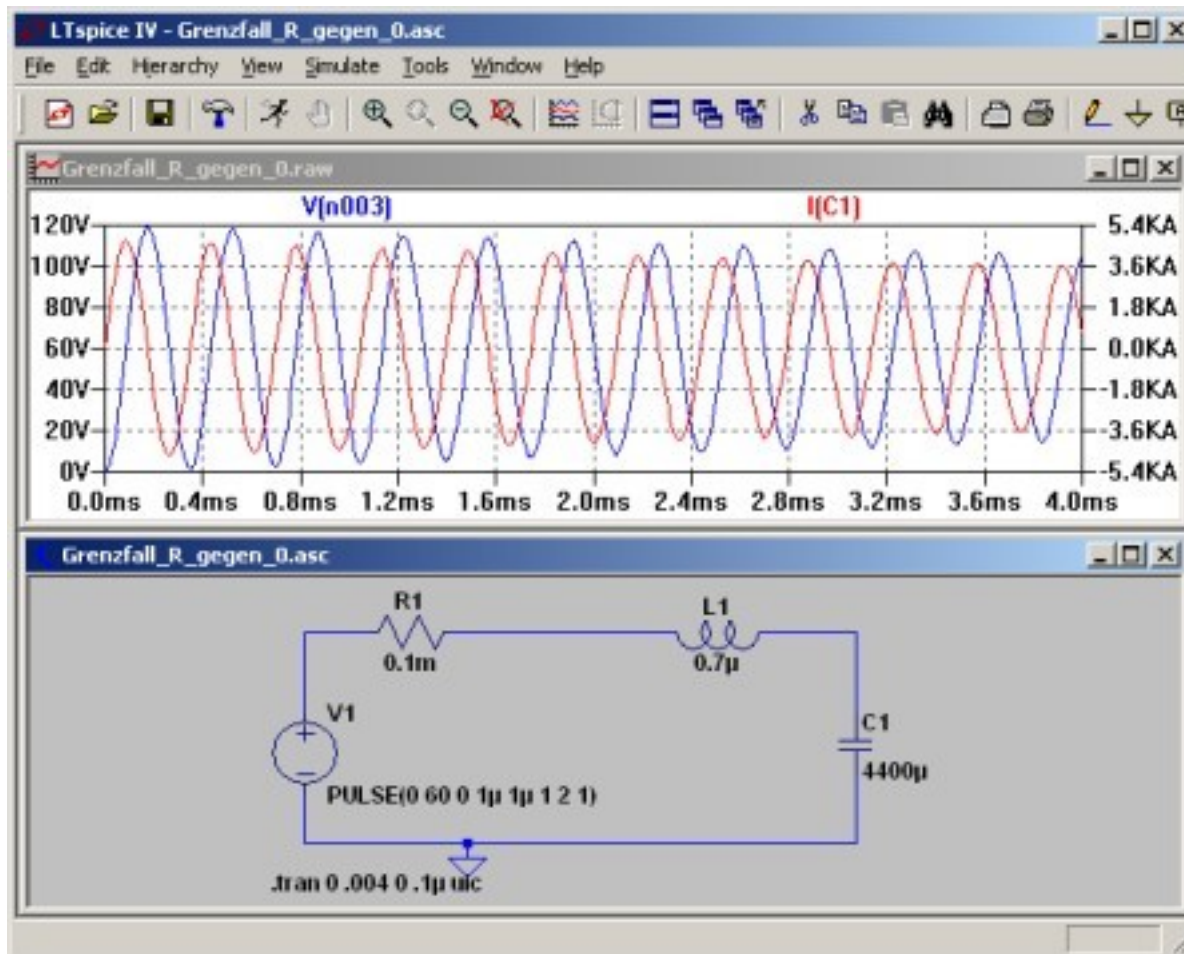
Die Spannungsüberhöhung erreicht auch hier knapp die **90V!**

Gleichzeitig verlängert sich die Dauer der Überspannung!

2.2.5 Abschätzung des Grenzfalls

Nun stellt sich die Frage, welche maximale Spannung durch das Überschwingen überhaupt erreicht werden kann.

Dazu machen wir eine Abschätzung indem wir eine unrealistisch niederohmigen Zuleitung mit $0,1\text{m}\Omega$ simulieren. Zusätzlich wurden die $13\text{m}\Omega$ im C1-Modell drastisch verkleinert. Die Induktivität entspricht der einer 1m langen Zuleitung – andere L-Werte ändern im Grenzfall bzgl. der maximalen Spannungen nichts.



Es stellt sich (fast) eine Dauerschwingung ein, da dämpfende Einflüsse durch ohmsche Anteile weitestgehend fehlen.

Die Ströme pendeln zwischen $\pm 4.500\text{A}$.

Spannungsspitzen erreichen 120V!

Also genau das Doppelte der angelegten Akkuspannung von 60V .

Wir wollen dies als Ergebnis festhalten:

Durch “hartes” Einschalten können im Extremfall Überspannungen von bis zur doppelten Höhe der angelegten Gleichspannung entstehen!

(Es läßt sich mit z.B. energetischen Betrachtung des ungedämpften Schwingkreises leicht zeigen, daß die maximal erreichbare Spannung tatsächlich genau bei Faktor 2 liegt.)

3. Problemlösungen, Abhilfen

3.1 Auslegung des Geräts auf die maximal auftretende Spannungen

Soll das Gerät per Design den maximalen Spannungen durch hartes Einschalten widerstehen können, so müßten Halbleiterbauteile mit mindestens doppelt hoher Sperrspannung eingesetzt werden. Bei einem Regler mit max. 60V Versorgung würde das den Einsatz von MOSFETS mit 120V bedeuten. Um sicher zu gehen müßten 150V-MOSFETs gewählt werden – denn MOSFETs sind nicht in beliebiger Spannungsabstufung verfügbar.

Eine Erhöhung der Sperrspannung geht jedoch einher mit einer Verschlechterung des Durchlaßwiderstandes $R_{(dson)}$. Dadurch lassen sich nur Regler mit verminderter Stromtragfähigkeit bei gleichzeitiger Herabsetzung des Wirkungsgrads (bzw. gleichwertig nur mit wesentlich größerem Bauraum und Gewicht) realisieren. Beides ist wirtschaftlich nicht tragbar. Zudem bleibt auch hier das Problem der viel zu großen Einschaltströme weiterhin bestehen.

>>> schlechtes ETA, technisch&wirtschaftlicher “Overkill”, keine Lösung für Einschaltstrom

3.2 Langsames Hochdrehen der Spannung (Softstart) statt hartes Einschalten

In obigen Simulationen wurde die Spannung schlagartig eingeschaltet. Bei ausreichend langsamem Hochfahren der Spannung können sowohl die hohen Einschaltströme als auch das gefährliche Überschwingen der Spannung vermieden werden. Beim Reglerentwurf könnte so auf doppelte Sperrspannung der MOSFETs verzichtet werden.

Sofern die Versorgung über einen Konstanter erfolgt, könnte dies eine Option sein, da hier i.d.R. eine Strombegrenzung bei maximalen Ausgangsstrom des Konstanters greift und dadurch automatisch ein rampenförmiger Spannungsanstieg erzwungen wird. Jedoch muß das Einschalten durch Einschalten des Konstanters erfolgen! Ein mechanischer Schalter zwischen Konstanter und Regler funktioniert hier **nicht** und führt ebenfalls zum Strom- und Spannungsüberschwingen - es wird hier ein bereits geladener Ausgangs-ELKO des Konstanters mit dem noch entladenen Eingangs-ELKO des Reglers verbunden!

Für eine Versorgung aus einem Akku ist dies natürlich keine Option...

>>> keine einheitliche Lösung, nicht geeignet für Akku-Versorgung

3.3 Vorladen der ELKOs

Der einzig gangbare, sichere (und mit vergleichsweise simplen Mitteln realisierbare) Weg diese Problem zu lösen, besteht im Vorladen der Eingangs-ELKOs. Das Prinzip besteht darin, **vor dem eigentlichen Einschalten** einen Spannungsangleich von Versorgung und Eingangs-ELKOs zu erreichen. Ist dieser Spannungsausgleich beendet, kann der Hauptschalter geschlossen werden - ohne riesige Ladeströme (der ELKO ist ja schon geladen!) und ohne das damit verbundene Spannungsüberschwingen!

Der zusätzliche Aufwand besteht lediglich in einem parallel zum Hauptschalter angebrachten **Vorladezweig** mit

- strombegrenzender Wirkung,
- einem 2-stufigen Einschaltvorgang (bestehend aus "Vorladen" und "Einschalten")
- und einer mechanischen oder elektronischen Verriegelung, die sicherstellt, daß das "Einschalten" nicht ohne vorheriges "Vorladen" durchgeführt werden kann.

>>> EINFACH, SICHER, WIRKUNGSVOLL

4. Praktische Umsetzungen des Vorladens

4.1 Widerstand

Im einfachsten Fall genügt ein Widerstand mit ausreichender Impulsfestigkeit(!), um den Vorladezweig zu realisieren. Dies ist jedoch mit einigen Nachteilen verbunden. So muß der Widerstandswert für jeden Fall angepaßt werden und es besteht die Gefahr, daß der Widerstand überlastet wird, wenn vergessen wird, den Hauptschalter zu schließen.

4.2 AVS2 – aktive Vorladeschaltung (extern)

Wir bieten als einfachste Lösung eine externe, aktive Vorladeschaltung an. (“aktiv” weil der Vorladestrom geregelt, begrenzt und bei Erwärmung auch reduziert wird). Die [AVS2](#) schützt sich selbst gegen Überlastung (bis 60V).

Wie bei der Lösung mit einem Widerstand muß hier vom Benutzer selbst sichergestellt werden, daß die Einschaltreihenfolge (zuerst Vorladen) eingehalten wird.

4.3 AVS2 – aktive Vorladeschaltung (intern)

Alle unsere Standard-Regler (mit Ausnahme des SLSi also alle cSLS, cSLSi und SLS) haben eine AVS bereits eingebaut - der dünne rote Draht ist nach außen geführt!

Über diesen (intern strombegrenzten) Anschluß läßt sich der Regler (im inaktiven Mode, Motor dreht nicht) komplett versorgen um z.B. gefahrlos Einstellarbeiten durchführen zu können (Motor kann nicht andrehen, da der Strom begrenzt ist!) Gleichzeitig lassen sich darüber die ELKOs vorladen und im (vor-)geladenen Zustand halten.



4.4 EBSi- elektronischer Batterieschalter

Auch der von uns entwickelte [EBSi](#) hat die Vorladeschaltung onboard!

Der EBSi arbeitet wie ein **Halbleiter-Relais** jedoch zusätzlich **mit einstellbarer Strombegrenzung** (schaltet bei Überstrom aus und baut die dadurch in der Zuleitung induzierte Spannungsspitze kontrolliert ab).

Bei jedem Einschalten startet automatisch eine Sequenz "Vorladen – Einschalten".

Erst wenn das Vorladen erfolgreich abgeschlossen wurde, schaltet der EBS den Hauptkontakt ein.

Mit der Stromüberwachung schützt sich der EBSi nicht nur selbst vor Überstrom, sondern auch alle nachgeschalteten Geräte.

Zusammen mit der potentialfreien Ansteuerung und einem ebenfalls potentialfreien Statusausgang stellt der EBSi bis 60V die "rundum-sorglos Lösung" schlechthin dar!



5. Zusammenfassung, Ergebnisse

Wie gezeigt wurde, ist das Vorladen der Eingangs-ELKOs unbedingt notwendig!

Es handelt sich hierbei um ein allgemeines physikalisches Problem – ist also kein Problem, welches nur für spezielle Regler besteht.

Für die SinusLeistungsSteller stehen mehrere Verfahren z.V. um diesem Problem entgegenzuwirken.

>>> Vorladen ist Pflicht!