

## Züge in Bewegung halten - neue Technologie-Anforderungen erfüllen

Ein wesentlicher Bestandteil eines Antriebssystems für den innerstädtischen Nahverkehr mit niedriger Geschwindigkeit bis hin zu Intercity-Zügen mit hoher Geschwindigkeit ist der Antriebsumrichter, der die Energie von der Energiequelle – ob Oberleitung oder Dieselmotor – umwandelt, um die Elektromotoren im Fahrzeuginneren anzutreiben.

Der Antriebsumrichter besteht aus einem Gleichrichter, sofern er an ein Wechselstromnetz (AC) angeschlossen ist oder aus einem Filter, falls eine direkte Verbindung mit einem Gleichstromnetz (DC) besteht. Hinzu kommt ein Wechselrichter zur Ansteuerung des Motors. Der Zwischenkreis ist die Verbindung zwischen dem Gleichrichter oder dem DC-Netz und dem Wechselrichter. Um eine stabile Performance zu garantieren ist, unabhängig von der Last eine konstante Zwischenkreisspannung erforderlich. Um diese Regelung durchzuführen, muss eine zuverlässige Messung der Spannung erfolgen. Die Schlüsselkomponente für diese Aufgabe ist der Spannungswandler.

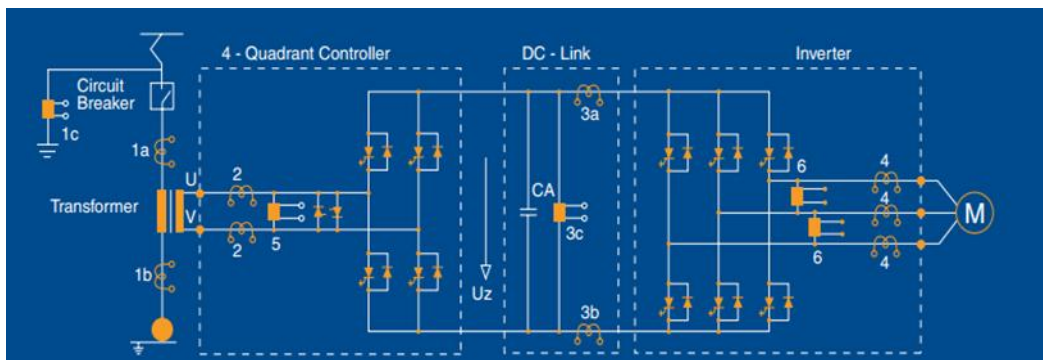


Bild 1: Blockschaltbild eines Zugantriebssystems

Züge müssen in Gebieten mit unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen betrieben werden, sei es bei extremen Temperaturen, Trockenheit oder hoher Luftfeuchtigkeit. Die Antriebsumrichter und dessen Komponenten sind daher hohen Belastungen ausgesetzt. Hinzu kommt, dass die Weiterentwicklung der Leistungselektronik neben ihren Vorteilen aber auch negative Auswirkungen auf das Verhalten deren Komponenten mit sich bringt. Der Hauptvorteil dieser neuen Entwicklungen für Antriebsumrichter ergibt sich durch die Halbleitertechnik, die höhere Schaltfrequenzen und geringere Verluste, sowie ein kompakteres Design ermöglicht. Die Nachteile sind stärkere Magnetfelder und höhere Gleichtaktstörungen, die sich negativ auf die Funktion des Spannungswandlers auswirken können. Die bisherigen Messverfahren eignen sich nicht mehr für diese neuen, anspruchsvolleren Umgebungsbedingungen. Der neue DVM-Wandler basiert auf der patentierten DV-Technologie von LEM und ist daher heute die geeignete Lösung. Er bietet eine hohe Immunität gegen externe Magnetfelder und eine Teilentladungsfestigkeit, die höher als die maximale Zwischenkreisspannung ist. Mit seinem kompakten Design, seiner hohen Genauigkeit, der geringen Temperaturdrift und der hohen Gleichtakt- (du/dt) Störfestigkeit, ist der DVM die beste Wahl für die Messung der Zwischenkreisspannung.

## Der neue Spannungswandler DVM von LEM

LEM bietet nun neue Spannungswandler auf Basis der DVL-Technologie, die im Jahr 2012 vorgestellt wurde. Die Spannungswandler der DVM-Serie eignen sich für Spannungsmessungen von nominal 600 bis 4200 V<sub>eff</sub> (Bild 2) und ermöglichen nun auch eine Spannungsmessung größer 2000 V<sub>eff</sub> in einer sehr kompakten Bauform. Gegenüber der DVL-Serie konnte somit die Nennspannung, bei nahezu gleichen Abmessungen enorm erweitert werden. Für den Betrieb müssen sie nur an die zu messende Spannung angeschlossen und mit einer Standard-DC-Hilfsspannung von ±13,5 bis ±26,4 V versorgt werden. Zusätzliche Vor-Widerstände auf der Primärseite sind nicht mehr notwendig.



Bild 2: DVM-Spannungswandler für 600 bis 4200 V<sub>eff</sub>

Der maximale Eigenverbrauch der Wandler-Elektronik bei 0V Primärspannung liegt bei nur 30mA. Hinzu kommen 50mA bei Nennspannung, sofern eine Version mit Stromausgang ausgewählt wurde.

Der DVM-Wandler kombiniert alle Vorteile der bisherigen LEM-Produkte und erfüllt sämtliche EMV-Anforderungen. Die DVM-Serie wurde entsprechend den IRIS- und ISO-9001-Standards ausgelegt und unterscheidet sich von der vorherigen Generation in vier Punkten:

- Geringer Stromverbrauch von ca. 30 mA
- Frequenz-Bandbreite 12 kHz
- Isolationsspannung 12 kV
- Hohe Genauigkeit über den gesamten Temperaturbereich (-40°...+85°C)

## Funktion

Auf der linken Seite in *Bild 3* (Primärseite) beträgt die Eingangsspannung bis zu  $\pm 4,2$  kV. Die erste Stufe ist ein Spannungsteiler, der diese Spannung auf einige wenige Volt reduziert. Dieser widersteht hohen  $du/dt$ -Werten und weist eine geringe thermische Drift auf. Ein Sigma-Delta-Modulator wandelt dann das analoge Signal in ein Digitalsignal mit 16-Bit-Ausgang um.

Anschließend erzeugt ein Digital-Encoder ein serielles Signal, mit dem die Daten über einen einzigen isolierten Kanal übertragen werden. Danach speist ein Verstärker das Signal in den primärseitigen Transformator, der für die gewünschte galvanische Trennung erforderlich ist. Hierdurch wird eine Isolationsprüfspannung maximal 12 kV erreicht.

Der Transformator muss einer so hohen Testspannung widerstehen, damit die Lebensdauer der Isolierung gewährleistet werden kann. Der Nachweis wird durch eine Teilentladung von weniger als 10 pC (Pico-Coulomb) bei 5 kV Spannung zwischen Primär- und Sekundärkreis gewährleistet. Der DVM-Spannungswandler wurde speziell für diese Performance entwickelt.

Auf der Sekundärseite wird der Datenstrom dekodiert und über einen Digitalfilter gefiltert. Da das primärseitige Rechtecksignal durch den Transformator verzerrt wird, kommt auf der Sekundärseite des Transformators ein Schmitt-Trigger zum Einsatz um die Rechteckform wiederherzustellen. Anschließend erfolgt die Einspeisung in einen Decoder und Digitalfilter. Der Datenbitstrom wird dabei in einen Standard-Digitalwert dekodiert, der im D/A-Wandler des Mikrocontrollers verarbeitet wird. Das wiedergewonnene Ausgangssignal ist gegenüber dem Primärkreis (hohe Spannung) vollständig galvanisch isoliert und bietet ein exaktes Abbild der Primärspannung.

Der Wandler lässt sich an verschiedene Spannungs-Bereiche anpassen, indem die Verstärkung über den Mikrocontroller eingestellt wird. Änderungen am Aufbau des Transformators oder auf der Leiterplatte sind damit nicht erforderlich. Der Mikrocontroller löscht Offsets und stellt die Verstärkung mittels Software ein. Anschließend wird das digitale Signal auf einen analogen Ausgang gewandelt. Der Mikrocontroller überträgt innerhalb von etwa 6  $\mu$ s die Daten vom Digitalfilter an einen 12-Bit-D/A-Wandler. Die analoge Ausgangsspannung wird dann gefiltert und in einen Strom gewandelt ( $\pm 75$  mA bei Messbereichsendwert). Dabei kommt eine kurzschlussfeste Stromquelle zum Einsatz.

Der Mikrocontroller steuert auch einen DC/DC-Wandler der intern, geregelte Versorgungsspannungen für den Sekundärkreis erzeugt. Die DVM-Versorgung beträgt  $\pm 24$  oder  $\pm 15$  VDC. Der DC/DC-Wandler versorgt, über einen weiteren galvanisch getrennten Transformator, den Sigma-Delta-Wandler und den Digital-Encoder auf der Primärseite mit  $\pm 5$  und  $\pm 3,3$  V. Der zusätzliche Schaltkreis ist im oberen Teil des Blockschaltbilds dargestellt. Die Übertragungsfrequenz der Spannungsversorgung wird ebenfalls durch den Mikrocontroller vorgegeben.

Der letzte Block rechts neben dem Mikrocontroller ist ein Spannungs- zu Strom-Umsetzer für DVM-Varianten mit Stromausgang (typ. 50 mA bei Nennspannung). Damit wird den Richtlinien hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) entsprochen, da der Stromausgang eine geringere Impedanz aufweist und daher weniger anfällig für elektromagnetische Störungen von außen ist. Eine Version mit Spannungsausgang (10 V bei Nennspannung) ist ebenfalls erhältlich, ebenso wie Versionen mit 4 bis 20 mA Ausgang für unipolare Messungen.

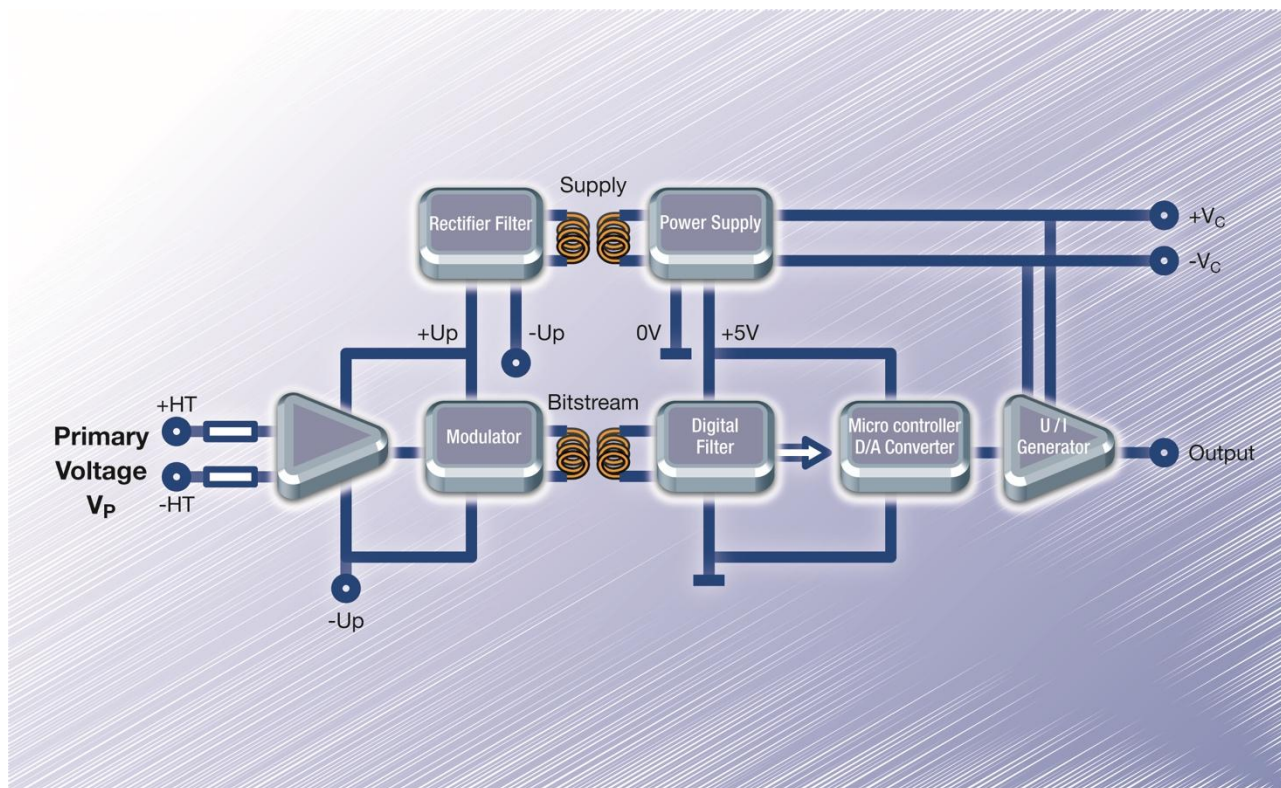


Bild 3: DVM-Spannungswandler – Funktionsprinzip der isolierenden Digitaltechnik

## Wesentliche Leistungsmerkmale

Mit einer typischen Genauigkeit von  $\pm 0,5\%$  von  $V_{PN}$  bei Umgebungstemperatur und einer sehr geringen Temperaturdrift, bietet der DVM eine typische Genauigkeit von nur  $\pm 1\%$  von  $V_{PN}$  über den gesamten Betriebstemperaturbereich von  $-40$  bis  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der anfängliche Offset bei  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt max.  $50\text{ }\mu\text{A}$ , mit einer maximal möglichen Drift von  $\pm 100\text{ }\mu\text{A}$  (typ.) über dem Betriebstemperaturbereich. Die Linearität beträgt nur  $\pm 0,1\%$ .

Die Reaktionszeit des DVM-Spannungswandlers bei einem Spannungssprung von  $V_{PN}$  beträgt  $48\text{ }\mu\text{s}$  (max.  $60\text{ }\mu\text{s}$ ; bei  $90\%$  von  $V_{PN}$ ). Durch die schnellere Reaktionszeit ergibt sich eine große Bandbreite von  $12\text{ kHz}$  (bei  $-3\text{ dB}$ ).

## Aufbau und Standards

LEMs neue Spannungswandler sind kompatibel zu vorherigen Generationen wie der LV 100-Serie und übertreffen deren Leistungsfähigkeit. Wichtige elektrische Parameter sind  $100\%$  kompatibel, die Genauigkeit und Temperaturstabilität wurden erhöht, was das Nachrüsten vereinfacht.

Die DVM-Serie ist auch bezüglich ihrer Befestigungspunkte  $100\%$  kompatibel. Geringe Unterschiede bestehen bei den Primär- und Sekundär-Anschlüssen. Durch den neuen Aufbau der DVM-Spannungswandler ist er nun  $30\%$  flacher, besitzt  $25\%$  weniger Bauvolumen und das Gewicht ist um  $56\%$  geringer. (Bild 4)

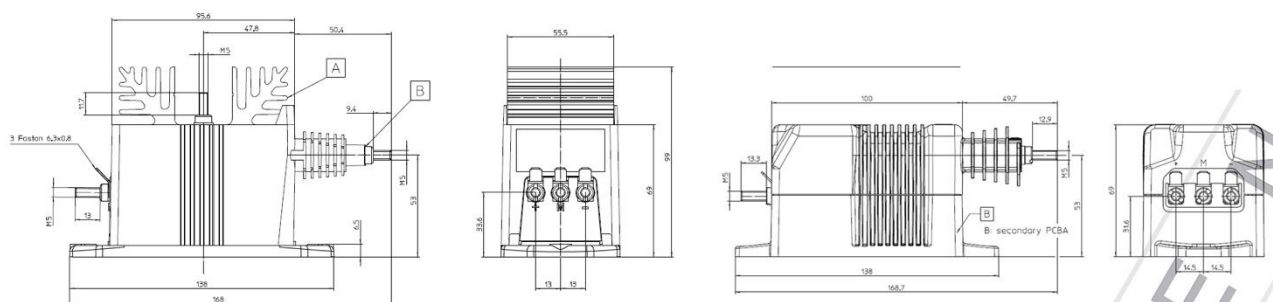
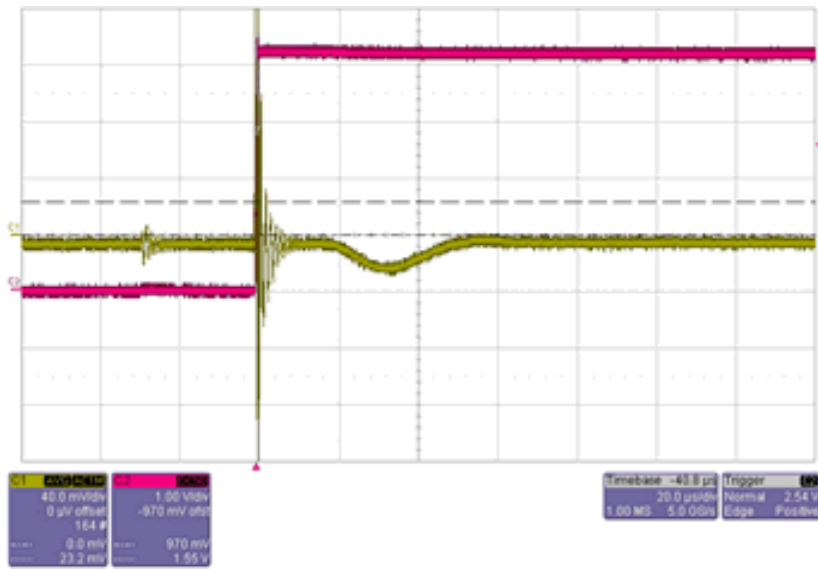


Bild 4: Abmessungen des DVM-Spannungswandlers im Vergleich zum LV 100-Spannungswandler

Die geringere Größe des DVM beeinträchtigt nicht dessen hohe Immunität gegen externe Störungen oder Spannungsschwankungen. Das ausgefeilte Elektronikdesign der Leiterplatte und der mechanische Aufbau garantieren hierfür (Bild 5).





**Bild 5: DVM 4000 Gleichtaktverhalten bei  $du/dt = 6 \text{ kV}/\mu\text{s}$  (bei 4200 V) – nur 0,5% von  $V_{PN}$  als Fehler bei einer Erholungszeit von weniger als 50  $\mu\text{s}$**

Bei DVM 4000 beschränkt sich der Fehler im Gleichtaktbetrieb (mit  $6 \text{ kV}/\mu\text{s}$  und 4200 V) auf 0,5%. Die Erholungszeit beträgt nun weniger als 50  $\mu\text{s}$ . Bei einem entsprechenden LV 100 betragen diese Werte, unter gleichen Testbedingungen bis zu 18% von  $V_{PN}$  und einer Erholungszeit von 500  $\mu\text{s}$ .

Aufgrund der geringen parasitären Kapazität des DVM sind die Auswirkungen eines dynamischen Gleichtaktbetriebs nahezu vernachlässigbar (*Bild 5*). Dies ist ein wichtiges Kriterium, da neue Halbleitertechnologien wie IGBT und MOSFETs SIC zu höheren  $du/dt$ -Werten zwischen dem Primär- und Sekundärkreis des Wandlers führen. Der Sekundärkreis ist aus Sicherheitsgründen generell mit Masse verbunden. Im Primärkreis erfolgt die Messung der Hochspannung, welche allerdings einen Schwebezustand gegen Masse (Floating) einnehmen kann. Diese Spannungsänderung im Primärkreis kann eine Störung im Sekundärkreis hervorrufen, die nicht gefiltert werden kann, da sonst die Reaktionszeit beeinträchtigt wird. Folglich muss die parasitäre Kapazität zwischen dem Primär- und Sekundärkreis innerhalb des Wandlers so gering wie möglich sein.

Die vorherige Generation der LV 100-Spannungswandler funktioniert wie ein Stromwandler mit Vorwiderständen und basiert auf der Hall-Effekt-Technik mit Kompensation des Magnetflusses. Diese Technik macht sie empfindlicher für externe Magnetfeldänderungen. Die DVM-Spannungswandler enthalten keinen Magnetkreis und somit wesentlich unempfindlicher gegenüber externen Magnetfeldern.

Der DVM ermöglicht je nach Eingangsspannung und Kundenspezifikation eine einfache Anpassung der Größe des Eingangsisolators, sowie verschiedene Ausführung der Sekundärseite; wie z.B. Stecker, geschirmte Kabel, Anschlüsse (Stiftschrauben, M4, M5, Einsätze, UNC etc.).

Die DVM-Spannungswandler wurden entsprechend neuester weltweiter Standards für Eisenbahn- und Industrieanwendungen entwickelt und getestet. Der Standard EN 50155 („Elektronikrüstung in Schienenfahrzeugen“) im Bahnwesen ist der Referenzstandard für elektrische, umgebungsbezogene und mechanische Parameter. Er garantiert die Gesamtleistungsfähigkeit von Produkten im Bahnwesen. Im Industriebereich regelt der Standard IEC 61800 die Antriebstechnik; IEC 62109 die Solartechnik und IEC 61010 die Betriebssicherheit (Safety).

Wie bereits erwähnt, wurde dem Aufbau des DVM besondere Aufmerksamkeit gewidmet um Teilentladungen bei hohen Spannungen gering zu halten. Das Teilentladungsniveau für die Prüfung des DVM wurde mit 10 pC festgelegt. Je höher die Teilentladungsspannung (>5 kV bei DVM) ist, desto besser ist das Produkt gegen Entladungen während des Normalbetriebs geschützt.

Steigt die Spannung, beginnen Teilentladungen zwischen zwei Punkten – für gewöhnlich an gegenüberliegenden Potentialen innerhalb des Wandlers. Das Beibehalten des Entladungsniveaus verringert die Isolierungseigenschaften über der Zeit und schwächt die Qualität des Produkts bis hin zum Ausfall. Diese Entladungen treten bei der sogenannten Zündspannung auf und verschwinden in der Regel, wenn sie durch reduzieren der angelegten Spannung einen Wert von 10 pC unterschreiten. Dieser Punkt wird als Aussetzspannung bezeichnet und ist in der Regel immer niedriger als die Zündspannung.

Um eine lange Produktlebensdauer zu garantieren, sollte die Aussetzspannung über der normalen Arbeitsspannung liegen. Der Einsatz des DVM stellt dies mit einer Aussetzspannung von >5 kV sicher, da er für Nennspannungen bis 4200  $V_{\text{eff}}$  ausgelegt ist.

Beschleunigte Alterungs-Tests wurden durchgeführt, um die Ausfallrate abzuschätzen. Dazu zählen auch u.a. Temperaturzyklen und die vollständige Charakterisierung des Produkts entsprechend aller relevanten Normen. Durch das innovative Design auf Basis eines Isolationstransformators und Digitaltechnik, garantieren die DVM-Spannungswandler Isolations- und Teilentladungsniveaus für Hochspannungsanwendungen bis zu 5 kV Spitzenspannung.

**DVM-Spannungswandler sind vor allem für mittlere bis hohe Spannungen ausgelegt und eignen sich für jede Art von rauer Umgebung, die eine hohe Leistungsfähigkeit bezüglich Genauigkeit, Linearität, geringem Offset, geringer thermischer Drift etc. erfordert. DVMs hohe Immunität gegen externe Störungen, die durch benachbarte Ströme etc. entstehen; sowie seine hohe Immunität gegen Hochspannungsschwankungen sorgen dafür, dass diese Spannungswandler-Serie eine hohe Zuverlässigkeit im Betrieb bietet.**