



Doctoral Thesis

## **UnACuSo: a Unipolar Arbitrary Current Source for a Hardware-in-the-Loop Test Bench**

**Author(s):**

Carstensen, Christoph

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010619905> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 23189

**UnACuSo**  
**A Unipolar Arbitrary Current**  
**Source for a Hardware-in-the-Loop**  
**Test Bench**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCE of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHRISTOPH CARSTENSEN  
Dipl.-Ing., Technische Universität Braunschweig

born 7. August 1984,  
citizen of Minden, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jürgen Biela, examiner  
Prof. Dr. Drazen Dujic, co-examiner

2015

## ABSTRACT

---

The change from the centralized generation of electrical power which is mainly driven by fossil or nuclear energy sources to renewable energy sources like wind and solar power which are widely distributed requires also a change of the transmission and distribution grids. On the one hand the distances between the main demand sides and the main generation areas increases since the renewable energy is not available everywhere. On the other hand, the power flow direction is not constant anymore caused by the fluctuation of the renewable energies.

These new challenges can only partly be handled by the existing AC based transmission and distribution grid. Hence an extension of the transmission capacities is necessary. One possible solution is a HVDC based super grid which superposes the existing grid. However, today the HVDC technology is basically used for point to point transmissions and there is no HVDC grid available yet. Beside many other reasons this is caused by the lack of suitable and cost efficient circuit breakers to protect and disconnect parts of such a HVDC grid in case of a failure condition.

In order to optimize these circuit breakers one approach is the detailed investigation of the DC arcs which has to be interrupted in mechanical breaker devices. Hence, this thesis deals with the development suitable test bench to investigate this behavior. Therefore a high current source to generate arbitrary output waveforms for a time range of 100 ms is required. In a first step, the requirements for the source are derived from previously performed measurements of DC arcs and the applicability of existing solutions for high power test benches or pulsed current sources is evaluated.

Since there is no suitable approach which can cover all requirements a concept for an unipolar arbitrary current source (UnA-CuSo) is developed. First, it bases on a current shaping converter which operates at low output voltages. It is used to generate the defined current amplitudes and gradients. Second, for enlarging

the output voltage range of the source a modular multi level converter ( $M_2C$ ) is utilized which is able to generate a stepped output voltage. This modular design of the source is beneficial since the source can be easily enhanced to larger output voltages or currents. Furthermore there are some more applications like a kicker magnet power supply which can be covered by this approach.

The thesis describes the development of a suitable current shaping converter in detail and covers therefore the development of a new topology, the optimization for pulsed operation and improvements of the modulation during different boundary condition modes. The  $M_2C$  based step voltage source is enhanced by the charging mechanism of a Marx generator which allows to charge all capacitors in parallel in between two pulses.

A further focus of the thesis is the communication of the converter system. Since the dimensions of the source are not negligible anymore for high speed data exchange two approaches for the communication within the converter system respectively to synchronise the operation of multiple stacks of UnACuSo are developed and discussed.

Finally, a prototype system of UnACuSo is presented, the operation principle is proofed and the limitations of the system are presented.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Der Übergang von einer zentralisierten Energieversorgung, die hauptsächlich aus fossilen und nuklearen Kraftwerken besteht, zur Erzeugung durch erneuerbare Energien wie Wind- oder Sonnenkraft, die allerdings weit verstreut erzeugt werden, erfordert auch Anpassungen an den bestehenden Übertragungs- und Verteilnetzen. Auf der einen Seite werden die Übertragungsdistanzen länger, da die Hauptverbrauchszentren nicht mehr mit den Haupterzeugungsgebieten übereinstimmt. Auf der anderen Seite ist der Leistungsfluss in den Netzen nicht mehr eindeutig definiert, da die eingespeiste Leistung der erneuerbaren Energien stark fluktuieren kann.

Diese neuen Herausforderungen können nur teilweise durch die bestehenden, wechsellastbasierten Übertragungs- und Verteilnetze übernommen werden. Deshalb ist eine Erweiterung der Übertragungskapazität notwendig. Eine mögliche Lösung ist die Installation eines Hochspannungsgleichstromübertragungsnetzes (HGÜ), das dem bestehenden Netz überlagert wird. Allerdings wird die HGÜ Technik heutzutage hauptsächlich für Punkt zu Punkt Verbindungen genutzt und es gibt keine existierenden HGÜ Netze. Unter anderem liegt das darin begründet, dass es keine passenden oder kostengünstigen Leistungsschalter für solche HGÜ Netze gibt, die im Fehlerfall Teile des Netzes abtrennen können.

Ein möglicher Ansatzpunkt für die Optimierung dieser erforderlichen Leistungsschalter ist die weitere Untersuchung des DC Lichtbogens, der in mechanischen Schaltern auftritt und von diesen unterbrochen werden muss. Dafür wird im Rahmen dieser Arbeit eine Stromquelle entwickelt, die solche Untersuchungen ermöglicht. Dazu werden zunächst die Anforderungen an eine solche Testumgebung von vorangegangenen Messungen an Lichtbögen abgeleitet. Ausserdem wird die Eignung bestehender Hoch-Energie Quellen oder gepulsten Stromquellen für diese Anwendungen diskutiert und bewertet.

Da keine passende Lösung verfügbar ist, die alle Anforderungen erfüllen würde, wird ein Konzept für eine unipolare Stromquelle mit frei wählbaren Ausgangsstromformen (UnACuSo) entwickelt. Dieses basiert auf der Kombination einer Stromquelle, die verschiedene Ausgangsstromform für kleine Ausgangsspannungen stellen kann, mit einer modularen Spannungsquelle mit mehreren Ausgangsspannungen, die verwendet wird um die Ausgangsspannung zu erhöhen. Dieses modulare Design ist vorteilhaft, da es eine einfache Erweiterung der Quelle auf höheren Ausgangsströmen und -spannungen erlaubt. Ausserdem kann das Konzept mit leichten Anpassungen auch für weitere Anwendungen verwendet werden.

Diese Arbeit beschreibt weiterhin detailliert die Entwicklung einer für dieses Konzept passenden Stromquelle. Dabei werden unter anderem die Gebiete der Topologieentwicklung, der Optimierung des Konverters für den gepulsten Einsatz und die Optimierung des Betriebs in bestimmten Grenzsituationen vorgestellt und diskutiert. Die modulare Stufenspannungsquelle ( $M_2C$ ) wird mit dem Ladekonzept des Marx Generators kombiniert, die es ermöglicht alle Kondensatoren des Aufbaus parallel zu laden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der benötigten Kommunikation für das Konverter Systems. Da die Dimensionen des Aufbaus für sehr schnelle Datenkommunikation nicht mehr vernachlässigbar sind, werden zwei Ansätze für die Kommunikation innerhalb des Konvertersystem und für die Kommunikation und Synchronisation verschiedener UnACuSo Einheiten entwickelt und vorgestellt, die solche Latenzen berücksichtigen bzw. kompensieren.

Abschliessend wird ein Prototypensystem vorgestellt. An diesem wird das grundlegende Funktionsprinzip anhand von verschiedenen Messungen gezeigt und die Grenzen beim Betrieb des Systems werden aufgezeigt.