

DISS. ETH Nr. 21548

SWITCHING ARCS IN PASSIVE RESONANCE HVDC CIRCUIT BREAKERS

A thesis submitted to attain the degree of

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

presented by

MICHAEL MAX WALTER

MSc ETH Zurich

born on 31.03.1984
citizen of Zurich (ZH)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Christian M. Franck
Prof. Dr. Volker Hinrichsen

2013

Abstract

This work aims to systematically and accurately investigate switching arc characteristics in passive resonance high voltage direct current (HVDC) circuit breakers.

The replacement of classical band energy with fluctuating wind and solar power from peripheral locations in Europe will significantly challenge the European transmission grid in the future. Energy must be transmitted via cables for distances > 50 km and via overhead lines for distances > 1000 km with low losses. Voltage-Sourced-Converter (VSC) HVDC is considered to be superior to the classical alternating current (AC) transmission for long distance energy transfer, because it has significantly smaller losses and requires no reactive power compensation.

Mechanical circuit breakers are standard fault protection devices in AC networks but do not yet exist for HVDC with sufficient interruption performance. The current zero crossing, essential for arc extinction in mechanical breakers, is not inherently available in DC systems. This makes DC interruption more challenging than AC interruption. Passive resonance breakers excite an unstable current oscillation and create artificial current zero crossings by interaction of the switching arc with an LC-commutation circuit. This principle has been successfully applied for Metal-Return-Transfer-Breakers (MRTB) in operation. It is, however, limited in maximum interruptible current, takes too long for current zero creation and uses a large capacitor, which significantly contributes to the breaker costs.

Significant improvement of the interruption performance is expected if the arc chamber and nozzle design is optimized for passive resonant creation of current zero crossings in DC circuits. For this, the improvement of the switching arc characteristic is shown to be

more effective and most probably also more economical compared to the passive L and C components of the resonance path. The main goal of this thesis is a systematic characterization of different arc configurations for use in black-box simulations.

For that purpose, a novel arbitrary pulsed current source has been developed. By creation of complex current waveforms, (eg. staircase-like currents and spikes superimposed on a current slope,) the transient and stationary arc characteristic can be measured independently of each other. Thereby, a more accurate parameter determination and a better validation of black-box models is achieved. In principle, the source could also be used to characterize the arc completely model-independent, by generation of step currents with variable slope steepness. Furthermore, a novel improved method for arc characterization has been developed. A flexible model circuit breaker has been used to investigate the effect of blow pressure, nozzle geometry, nozzle material and blow gas type.

The investigations confirmed that a *falling* stationary *UI*-characteristic with decreasing arc voltage at increasing current is a necessary condition for creation of passive resonance. A *rising* characteristic, the arc thermal inertia and high current gradients act as damping terms and inhibit passive resonance. For current amplitudes < 2 kA the following has been shown: a) an increase of blow pressure intensifies the *falling* slope of the stationary *UI*-characteristic and improves passive resonance, b) a narrow throat diameter and a large nozzle throat length exhibit a *rising* *UI*-characteristic and should therefore be avoided, c) nozzle material and blow gas type have shown only minor influence on the arc characteristics.

The results gained can be used to improve an existing HVDC MRTB in two ways: Firstly, if the time for current zero creation (and with it the total break time) is not important, the switching arc characteristic could be influenced so that a) the size of the capacitance is minimized or b) the interruption current amplitude is maximized. Application for this are MRTB or HVDC load break switches. Secondly, the time for current zero creation can be minimized by suit-

able arc chamber design changes with consequent changes in the arc characteristic. By this, together with an increase in maximum interruption current, existing MRTBs could be improved for use as HVDC circuit breakers. Such a passive resonance HVDC circuit breaker would be a low loss and low cost alternative to the recently proposed hybrid breakers, which use expensive and inherently lossy solid state components.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die systematische und präzise Untersuchung von Schaltlichtbogencharakteristiken in Hochspannungs-Gleichstrom (HGÜ) Leistungsschaltern.

Der Ersatz klassischer Bandenergie durch fluktuierende Wind- und Sonnenenergie aus peripheren Standorten Europas stellt das Europäische Übertragungsnetz zukünftig vor grosse Herausforderungen. Energie muss in Off-shore-Kabeln über Distanzen > 50 km und in Übertragungsleitungen über Distanzen > 1000 km verlustarm zum Verbraucher geleitet werden. Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) wird gegenüber der klassischen Wechselstrom (AC)-Übertragung bevorzugt, aufgrund der markant kleineren Übertragungsverluste bei grossen Übertragungsdistanzen und aufgrund der Blindleistungskompensation, welche bei ersterer entfällt.

Mechanische Leistungsschalter zur Unterbrechung von Fehlerströmen sind Standardkomponenten in AC-Netzen, existieren für HGÜ jedoch noch nicht mit ausreichender Kurzschlussunterbrechungsleistung. Die Schwierigkeit der HGÜ Stromunterbrechung ist der fehlende Stromnulldurchgang, welcher in mechanischen Schaltern unerlässlich ist zum Löschen des Lichtbogens. Passiv resonante Schalter erzeugen durch Wechselwirkung eines Schaltlichtbogens mit einem LC-Kommutierkreis eine instabile Stromschwingung zur Erzeugung eines Stromnulldurchgangs. Das Prinzip wurde erfolgreich in Metal-Return-Transfer-Breakern (MRTB) umgesetzt, ist jedoch limitiert in Bezug auf den maximal unterbrechbaren Strom, die Schalter benötigen zu lange zur Erzeugung eines Stromnulldurchgangs und verwenden einen grossen Kondensator, welcher wesentlich zu den Schalterkosten beiträgt.

Eine wesentliche Verbesserung des Unterbrechungsverhaltens sol-

cher Schalter ist zu erwarten, falls die Lichtbogenkammer und die Düsengeometrie optimiert wird zur passiv resonanten Erzeugung von Stromnulldurchgängen. Es wird aufgezeigt, dass die Verbesserung der Lichtbogencharakteristik effizienter und höchst wahrscheinlich auch ökonomischer ist verglichen mit der Optimierung der passiven L und C Elemente des Resonanzkreises. Das Ziel dieser Arbeit ist das systematische Charakterisieren von verschiedenen Lichtbogenkonfigurationen zur Verwendung in Black-Box Modellen.

Zu diesem Zweck wurde eine neuartige Pulsstromquelle entwickelt. Durch Erzeugung komplexer Stromformen (z.B. treppenförmig ansteigende Ströme und Stromspitzen, die einer flachen Stromflanke überlagert sind) kann das transiente und das stationäre Lichtbogenverhalten unabhängig voneinander gemessen werden. Dies hat den Vorteil einer genaueren Parameterbestimmung und einer besseren Validierung von Black-Box-Modellannahmen. Prinzipiell wäre auch eine komplett modell-unabhängige Charakterisierung des Lichtbogens möglich durch die Verwendung von Schritten mit unterschiedlicher Flanken Steilheit. Es wurde zudem eine neue verbesserte Methode zur Bestimmung von Black-Box-Parametern entwickelt. Ein flexibler Modell-Leistungsschalter wurde verwendet, um den Einfluss von Beblasungsdruck, Düsengeometrie, Düsenmaterial und Beblasungsgas zu untersuchen.

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass eine stationäre *UI*-Lichtbogencharakteristik mit *fallender* Spannung bei steigendem Strom notwendig ist zur Erzeugung von passiver Resonanz. Eine *ansteigende* Charakteristik, die Lichtbogenträgheit sowie steile Stromgradienten dämpfen hingegen das System und verhindern passive Resonanz. Es konnte für Ströme ≤ 2.5 kA folgendes gezeigt werden: a) Ein Erhöhen des Beblasungsdrucks verstärkt die passive Resonanz durch Erhöhen von Steilheit und Spannung der *fallenden* Charakteristik, b) ein enger Durchmesser oder eine grosse Länge des engen Bereichs der Düse hingegen führen zu einer *ansteigenden* Charakteristik und sollten daher vermieden werden, c) verschiedene Düsenmaterialien und Beblasungsgase zeigten nur kleinen Einfluss auf die Charakte-

ristik.

Die gewonnenen Erkenntnisse können auf zwei Arten zur Verbesserung eines bestehenden HGÜ-MRTB Schalters verwendet werden: 1) falls die Zeit zur Stromnulldurchgangserzeugung (bzw. die gesamte Unterbrechungszeit) keine Rolle spielen, kann die Schaltlichtbogencharakteristik beeinflusst werden, um a) die Grösse des Kondensators zu minimieren oder b) den unterbrechbaren Strom zu maximieren. Anwendungen dafür sind MRTB-Schalter oder HGÜ-Lastschalter. 2) Die Zeit zur Erzeugung des Stromnulldurchgangs kann durch Anpassungen in der Lichtbogenkammer minimiert werden, welche sich auf die Lichtbogencharakteristik auswirken. Dadurch, und durch Erhöhen des Unterbrechungsstroms, können existierende MRTBs zur Anwendung als HGÜ-Leistungsschalter verbessert werden. Solch ein passiv resonanter HGÜ-Leistungsschalter wäre eine verlustarme und preislich attraktive Alternative zu den kürzlich vorgeschlagenen Hybridschaltern, welche teure und verlustreiche leistungselektronische Komponenten verwenden.