

Kalibrierensemble für Messgeräte zur Bestimmung des Wirkungsgrades von HGÜ-Umrichtern

Enrico Mohns

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2013

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Meinhard Schilling

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

In der vorliegenden Arbeit wird über Möglichkeiten zur Kalibrierung der Messtechnik für die integrale Bestimmung des Wirkungsgrades von Umrichtern für die Hochspannungsgleichstromübertragung berichtet. Verluste in diesen Komponenten der elektrischen Energieübertragung gehen im großen Maßstab in deren Wirtschaftlichkeit ein. Es ist daher von großem Interesse diese messtechnisch rückführbar zu bestimmen.

Unter Berücksichtigung dieses Aspektes der Rückführung auf nationale Normale wird einleitend, und ausgehend von einem kommerziellen multikanaligen Leistungsanalysator mit geeigneten Wechsel- und Gleichstromsensoren aufgezeigt, welche Messgrößen mit zugehörigen Randbedingungen kalibrierbar sein müssen, um die gestellte Aufgabenstellung zu lösen. Dabei zeigte sich, dass sowohl Messsysteme zur Kalibrierung von Leistungsanalysatoren, als auch Messsysteme zur Kalibrierung von breitbandigen Wechselstrom- und Wechselspannungssensoren aufgebaut bzw. untersucht werden müssen.

Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Messtechnik zur Kalibrierung des Leistungsanalysators mit breitbandig verschmutzten Gleich- und Wechselstromsignalen. Es konnte gezeigt werden, dass diese vorteilhaft auf der, die Sekundärgrößen der Hochspannungssensoren emulierenden Kleinsignalebene durchgeführt werden kann. Die Anstrengungen konnten sich damit auf den Aufbau hochwertiger, und dem Anwendungszweck angemessen breitbandiger Komponenten konzentrieren. Der so aufgebaute Wirkungsgrad-Kalibrator integriert eine hochwertige multikanalige Signalerzeugung, Stromverstärker mit galvanisch isolierten Kanälen, breitbandige Messwiderstände mit zugehörigen Messverstärkern, sowie ein duales, mit bis zu 2×8 Eingängen ausgestattetes, selbstkalibrierendes Messsystem mit einem kommerziellen, hochauflösenden 2-Kanal Digitizer. Zusammengefasst wurden die zugrundeliegenden Theorien diskutiert und die Rückführung dieses Referenzmesssystems dargestellt.

Auch auf dem Gebiet der Messwandler sind Anstrengungen nötig, um sowohl den Anforderungen nach genauen Messmöglichkeiten mit hohen Wechselspannungen und Wechselströmen im Bereich der Netzfrequenz einerseits, als auch dem Bedarf nach angemessen breitbandigen Messmöglichkeiten für die eingesetzten Hochspannungssensoren andererseits gerecht zu werden. Nach Erläuterung der zugrundeliegenden Theorien und der vorhandenen Messtechnik zur Kalibrierung konventioneller Messwandler, wurden die Änderungen und Anpassungen der existierenden, wie auch der Aufbau neuer Messtechnik dargestellt. Im Ergebnis dieser Arbeit können nun analoge Spannungs- und Stromsensoren mit praktisch beliebigen Sekundärpegeln,

basierend auf den etablierten Normalspannungs- und Normalstromwandlern der PTB im Bereich der Netzfrequenz bis maximal $400 \text{ kV}/\sqrt{3}$ oder 100 kA kalibriert werden. Zusätzlich wurden entsprechend breitbandige Messsysteme und zugehörige Referenzen aufgebaut. Messunsicherheitsbudgets weisen die erreichten Genauigkeiten nach.

Calibration ensemble of measuring instruments for determining the efficiency of HVDC converters

In this work, suitable calibration equipment for measuring instruments for the determination of the integral conversion efficiency of converters for high-voltage direct current transmission is shown. Losses in these components of electric power transmission represent an important key factor when determining their life cycle costs. It is therefore of high interest to determine their losses, or equivalently their efficiency in a metrologically traceable manner.

Taking into account this aspect of traceability to national standards, a commercially available modular ac and dc power measurement system is used in the introduction to identify the required measurement quantities and their boundary conditions. It was found that calibration systems for calibrating multi-channel power analyzers as well as measurement systems for the calibration of wideband alternating current and voltage sensors need to be developed or tested.

One focus of this work was the calibration of the power analyzer with wideband polluted dc and ac signals. It is shown that this can be advantageously carried out using emulated secondary voltage and current signals of the high-voltage sensors as calibration signals. These emulate typical waveforms of modern multi-level voltage source converters. The efforts could thus focus on building high quality components for a small-signal reference measurement system with reasonable wideband behavior. This new power and efficiency calibrator integrates a high-quality multi-channel signal generator, a transconductance amplifier with electrically isolated channels, wideband measuring resistors with associated instrumentation amplifiers, as well as a dual - with up to 2×8 input-equipped - self-calibrating sampling system with a commercial, high-resolution two-channel digitizer. In summary, the underlying theories were discussed and the traceability of this reference measurement system was demonstrated.

In the field of instrument transformers, additional efforts are needed to meet the requirements for accurate measurement capabilities for high-voltage wideband sensors with high ac voltages and currents at mains frequencies on the one hand, and their assessment in the audio frequency range using frequency response measurement capabilities on the other hand. After explaining the underlying theories and the existing measurement systems for the calibration of conventional transformers, the necessary changes and the adaptation of the existing equipment, as well as the development of new measurement equipment are shown. As a result of this work, analogue voltage and current sensors with virtually any secondary voltage or current level can be calibrated, based on the well-established standard voltage and current transformers of PTB at the mains frequency and at primary voltages or currents up to $400 \text{ kV}/\sqrt{3}$ or 100 kA , respectively. In addition, a wideband measurement system for high-voltage sensors with associated references was developed. Uncertainty budgets demonstrate the accuracies reached.