Universität Rostock Traditio et Innovatio

Methoden zur Analyse der Spannungsqualität im Frequenzbereich bis 500 kHz

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von
Jan-Philipp Kitzig, M. Eng.
geboren am 26.09.1990 in Saarbrücken
aus Düsseldorf

Rostock, 29.04.2022

Kurzfassung

Mit der stetigen Entwicklung und Verbesserung der Leistungselektronik konnte eine signifikante Effizienzsteigerung der Verbraucher und Erzeuger am elektrischen Energieversorgungsnetz erreicht werden. Die direkte Ankopplung leistungselektronischer Baugruppen an das Stromnetz führt jedoch dazu, dass sich das Stromverhalten dieser Geräte unmittelbar auf das Netz auswirkt. Zwischengeschaltete Transformatoren, die zwischen Netz und Gerät als Puffer wirken konnten, sind heute obsolet. Dadurch kommt es vermehrt zu nicht-linearen Stromverläufen, die über dem Längswiderstand des Netzes als Spannungen abfallen, die sich der sinusförmigen Grundschwingung der Netzspannung überlagern und damit die Spannungsqualität verschlechtern. Signifikant sind hierbei die harmonischen Signalbestandteile, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz ist. Sind harmonische Spannungen und Ströme am Anschlusspunkt eines Geräts vorhanden, fließen auf diesen Harmonischen auch Leistungen. Insbesondere die Wirkleistungen sind hier von Interesse, da sich deren Flussrichtung von der Hauptleistungsrichtung und damit der Klassifikation des Geräts als Verbraucher oder Erzeuger unterscheiden kann. Weiterhin können sich diese Emissionen auf andere Netzteilnehmer und das Netz selbst negativ auswirken.

Bei der Messung harmonischer Spektren muss eine Vielzahl von Einflüssen entlang der Messkette berücksichtigt werden, die die Güte der Messung negativ beeinflussen. Insbesondere zeigt sich, dass die Netzfrequenz zeitvariant ist und im Normalbetrieb des Netzes um ihren Nennwert herum oszilliert. Durch den Umbau des Netzes hin zu mehr dezentraler und umrichtergespeister Erzeugung werden diese Oszillationen mittelfristig weiter zunehmen. Damit sind die am Netz gemessenen Signale nicht mehr streng periodisch im signaltheoretischen Sinne, wodurch es bei der Spektralanalyse mittels der auf der Fourier-Transformation basierenden Verfahren der digitalen Signalverarbeitung zu Problemen kommt, setzen diese doch absolute Periodizität zur fehlerfreien Berechnung des Spektrums voraus. Insbesondere der Phasenwinkel kann hierdurch empfindlich verfälscht werden. Zusätzlich erschwert wird die Spektralanalyse durch nicht-harmonische Signale, die von gepulster Leistungselektronik oder Kommunikationssystemen emittiert werden und die sich der Netzspannung zusätzlich überlagern. Die klassischen Methoden zur Spannungsqualitätsanalyse umgehen diese Probleme durch Verlängerung der Messfenster und ausschließliche Bewertung von Betragsspektren.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Messung der spektralen Spannungsqualität und harmonischer Leistungsflüsse entwickelt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der digitalen Signalverarbeitung der abgetasteten Spannungs- und Stromsignale. Dazu wird zunächst der Periodizitätsbegriff für Netzsignale erweitert, bevor darauf aufbauend das digitale System entwickelt wird. Teil dieser Entwicklung ist eine neue Klasse von Fensterfunktionen, mit denen die Güte der Spektralanalyse verbessert wird sowie eines neuen Qualitätsmaßes zur Bewertung der Güte der Netzfrequenzsynchronizität von Messdaten am echten Netz. Auch in den bestehenden Definitionen der Leistungsgrößen bei verzerrten Netzsignalen sowie der Messgröße Netzfrequenz zeigen sich Lücken, die in dieser Arbeit herausgearbeitet und diskutiert werden. Diese Entwicklungen werden ausführlich validiert, bevor mit einem Laborprototypen anschließend Messungen am echten Netz durchgeführt werden. Es zeigt sich, dass mit dem neuen System eine deutliche Verbesserung der Güte der harmonischen Spektralanalyse erreicht werden kann. Mit den eingeführten Qualitätsmaßen kann in Messdaten dynamisch evaluiert werden, bis zu welcher Frequenz die Qualität der Phaseninformation zur Berechnung harmonischer Wirkleistungen ausreicht.

Abstract

The continuous developments and improvements in power electronics lead to a significant increase in the efficiency of generating units and loads connected to the electrical power grid. However, the direct coupling of power electronic assemblies to the power grid causes those to directly influence the grid by their current draw. Interposed transformers, which could act as a buffer between the grid and the device are now obsolete due to their inefficiencies. This leads to an increase in non-linear currents, which cause a voltage drop across the series resistance of the local power grid. In turn, this results in voltages on higher frequencies that are superimposed on the sinusoidal fundamental component of the grid voltage, impairing the power quality. Harmonic frequencies are of special interest, since they cause the most significant distortion. If harmonic voltages and currents are present at the connection point of a device, there will be power flows on those harmonic frequencies. The active powers are of particular interest, since their direction of flow can differ from the main power flow direction and thus the classification of the device as generating unit or load. Furthermore, those emissions can have a negative impact on other appliances as well as the power grid itself.

A large number of influences along the chain of measurement must be considered when measuring harmonic spectra. Particularly the mains frequency as the fundamental grid frequency is time-variant and oscillates around its nominal value during the normal operation of the grid. With the grid being in a process of transformation towards more decentralized and and inverter-fed generation, those oscillations will increase further in the medium term. As a result, the signals measured on the power grid are no longer strictly periodic in the signal-theoretical sense, which causes problems in the spectral analysis. The methods used for spectral analysis in digital signal processing are based on the Fourier transform and require absolute periodicity for an accurate calculation of the spectrum. The phase angle of harmonics in particular is distorted significantly by minor non-periodicities. The spectral analysis is complicated further by additional non-harmonic signals as emitted by pulsed power electronics or mains communication systems. The classical methods for power quality analysis circumvent these problems by extending the measurement time windows and exclusively evaluating magnitude spectra.

In this dissertation, a novel method for measuring the spectral power quality is presented, with a emphasis on accurate phase estimation for harmonic power flow analysis. The work is focused on the digital signal processing of sampled voltage and current signals. At first, the definition of periodicity is extended towards power grid signals, before the digital system is developed on that idea. Part of the developments are a novel class of window functions to further improve the spectral power quality analysis as well as a new quality index to assess the quality of the phase information in measured data. Futhermore, inconsistencies in the definitions of certain power quantities as well as the mains frequency measurand itself are presented and discussed. The developments are extensively validated using simulations, before a prototype is built and used for real-world measurements. A significant improvement in harmonic power quality analysis can be achieved by those developments.