

Genauigkeitsgrenzen digitaler Messverfahren zur Ermittlung von Leistungskenngrößen in Systemen der Energietechnik

Doctoral Thesis

Author(s):

Kästli, Urs

Publication date:

1992

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000667141>

Rights / license:

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

13. Nov. 1992

Diss. ETH Nr. 9623

Genauigkeitsgrenzen digitaler Messverfahren zur Ermittlung von Leistungskenngrößen in Systemen der Energietechnik

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
URS KÄSTLI
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 28. August 1957
von Münchenbuchsee BE

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. R. Zwicky, Referent
Prof. Dr. P. Leuthold, Korreferent

11. Nov. 1992 R. Zwicky

1992

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Ungenauigkeitsursachen digitaler Messverfahren zur Bestimmung von Leistungskenngrößen in Energiesystemen. Die verschiedenen Mechanismen, die bei Instrumenten auf digitaler Basis zu systematischen Abweichungen oder Unsicherheiten des Messresultats führen können, werden analysiert und quantifiziert. Dabei wird insbesondere berücksichtigt, dass in der Messpraxis wegen den weitverbreiteten leistungselektronischen Lasten heute oft stark nichtsinusförmige Ströme und Spannungen auftreten. Die Untersuchungen sollen als Grundlage für die Auslegung von Messgeräten dienen können.

Da die Natur der Messsignale die Eignung verschiedener Messprinzipien und deren Dimensionierung bestimmt, wird der Charakterisierung der auftretenden Ströme und Spannungen grosse Bedeutung zugemessen. Im ersten Teil der Arbeit stehen daher Betrachtungen zum spektralen und amplitudenmässigen Aufbau der Signale im Netz wie auch in allgemeinen Leistungselektronik-Schaltkreisen im Zentrum. Aufbauend auf einer die Netzimpedanz berücksichtigenden Näherung für Stromverläufe bei Stromrichterlasten, werden begrenzende Enveloppen für Laststrom- und Netzspannungsspektren bestimmt. Es zeigt sich, dass die Spektren der Messsignale immer angenähert als bandbegrenzt betrachtet werden dürfen.

Im zweiten Teil der Arbeit folgt eine Analyse der verschiedenen Verarbeitungsschritte der Messkette:

In der analogen Signalaufbereitungsstufe, die dem A/D-Wandler vorgeschaltet ist, gehören Frequenzgangfehler, Nichtlinearitäten und additive Rausch- und Störsignale zu den wichtigsten Einflussgrößen auf die Messgenauigkeit. Eingehend untersucht werden insbesondere die Auswirkungen einer beschränkten Messbandbreite, da sich damit auch die Einflüsse von Anti-Aliasing Filtern, die oft zu einer korrekten Bandbegrenzung bei Abtastsystemen verwendet werden, beurteilen lassen. Mit Hilfe der über den spektralen Aufbau von Strömen und Spannungen erarbeiteten Kenntnisse werden die zur Messung der Effektivwerte und der Leistung in verschiedenen Anwendungsfällen notwendigen Bandbreiten bestimmt.

Der Uebergang vom analogen zum digitalen Signal wird, aufgeteilt in Abtastung und Amplitudenquantisierung, eingehend untersucht. Die zentrale Frage zur Abtastung ist, inwieweit das Abtasttheorem bei Verzicht

IX

auf Anti-Aliasing Filter einzuhalten ist, wenn nur die Bestimmung von Mittelwertgrößen korrekt möglich sein muss. Es wird gezeigt, dass eine zu tiefe Abtastfrequenz nur eine grössere Streuung der Messresultate zur Folge hat, der Erwartungswert hingegen bleibt, ausser bei stationären periodischen Signalen und exakt synchroner Abtastung, erhalten. Dass keine synchrone Abtastung auftreten kann, lässt sich durch den Einsatz von zufallsgesteuerten Abtastverfahren sicherstellen. Verschiedene Varianten zur zufälligen Abtastung werden vorgeschlagen. Deren Auswirkungen auf den Erwartungswert und die Varianz von Messresultaten wird aufgezeigt. Die erarbeiteten Resultate erlauben zudem auch eine Beurteilung der Auswirkungen von Abtast-Jitter.

Das normalerweise zur Beschreibung der Amplitudenquantisierung angewendete Rauschmodell beschreibt die Verhältnisse wegen der grossen Dynamik der Messsignale nur ungenügend. Bei niedriger Aussteuerung des A/D-Wandlers ist die Quantisierung als Nichtlinearität zu behandeln. Die mit Ansätzen aus der Theorie nichtlinearer Systeme gefundenen Resultate, werden durch Messungen an einem Versuchswandler untermauert. Experimentell wird auch die Wirksamkeit von Dither-Signalen zur Minimierung von Quantisierungseffekten, wie sie speziell bei synchroner Abtastung auftreten können, erhärtet.

Die Verarbeitung der digitalisierten Signale zu den gewünschten Messgrößen ist dadurch charakterisiert, dass Mittelwerte aus einer endlichen Zahl von Abtastwerten zu berechnen sind. Diese Bildung von Kurzzeitmittelwerten wird als Filteraufgabe betrachtet und im Frequenzbereich untersucht. Dies führt zu verschiedenen effizienten Algorithmen, die an die Anforderungen bei kurzen Messzeiten, bei asynchroner Abtastung und bei nichtstationären Messsignalen angepasst sind.

Für einige wichtige Einsatzgebiete mit unterschiedlichen Anforderungsprofilen werden abschliessend geeignete Gerätekonzepte erläutert.

SUMMARY

The object of this thesis is an analysis of measurement inaccuracies in digital instrumentation for electrical power systems. The effects which do contribute to systematic deviations or to uncertainties of measurement results are determined and quantified. Special attention is given to the influences of nonsinusoidal current and voltage waveforms becoming more and more important due to the increasing usage of power electronic loads. The results of this work are aimed to serve as a basis for the design of instruments.

The properties of the measurement signals have a large influence on instrument design and measurement algorithms. In the first part of this work current and voltage signals in the mains and in general power system circuits are characterized. Based on a simple approximation for the current waveshapes in power electronic loads, taking into account the mains impedance, some bounds for spectras of load currents and the mains voltage are given. As a general result it is shown, that these spectras may always be considered as bandwidth limited.

In the second part of the work it follows an analysis of the different stages in a digital measurement chain:

The measurement accuracy in the analog subsystems for the conditioning of voltage and current signals prior to digitization, is influenced by transfer function errors, nonlinearities and additive noise and distortion components. A detailed analysis is carried out on the consequences of a limited measurement bandwidth. This allows for a judgement of the influence of anti-alias filters often used in sampled data systems. By the aid of the acquired knowledge on spectral bounds of currents and voltages, the necessary bandwidths for measurement of power and root mean square values in different applications are examined.

The transformation of continuous analog signals into a set of binary numbers suitable for digital processing is, for a thorough investigation, divided into the sampling process and into amplitude quantization. It is shown, that the correct measurement of mean value quantities is possible even when the sampling rate is lower than stated by Shannon's sampling theorem. Only an exactly synchronous sampling of strictly periodic signals leads to bias, otherwise a too low sampling

XI

rate merely increases the standard deviation of the results. Random sampling is a feasible method to avoid synchronism. Different random sampling schemes are proposed and their influence on the expected value and on the variance of measurement results is given. The results may also be used to judge the influence of sampling jitter.

The widely used noise model for the description of the amplitude quantization process is not appropriate for signals having such a large dynamic range as currents in power systems do. At low signal levels quantization should rather be treated as a nonlinearity. Results based on nonlinear systems theory could be confirmed by measurements on an experimental A/D-converter system. The effects of quantization, especially perceptible in the case of synchronous sampling, may be minimized by the aid of dither signals, as could be verified by experiments.

An important aspect of the numerical processing algorithms used to obtain the desired measurement results is the fact that average values are computed over a finite number of signal samples. In the present work this short time averaging operation is considered as a filtering task and is analyzed in the frequency domain. Computationally efficient algorithms fitted for short measurement delays, for asynchronous sampling or for nonstationary measurement signals are proposed.

Finally some concepts of measurement devices for different application ranges and demands are discussed on the basis of the results found in this work.