

Institut für Automatisierungstechnik

Beitrag zur Stabilitätsuntersuchung für Umrichter am schwachen Netz

Dissertation

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

vorgelegt von:
Alexander Schöley, geb. am 24.02.1990 in Rostock
aus Rostock

Rostock, 24. April 2023

Kurzfassung

Elektrische Energie wird in zunehmenden Maße aus regenerativen Quellen in das elektrische Versorgungsnetz eingespeist, wodurch eine Ergänzung bzw. Verdrängung der konventionellen Energieeinspeisung auf der Basis von Großkraftwerken mit direkt an das Netz gekoppelten Synchrongeneratoren einhergeht. Da bei der Einspeisung aus regenerativen Quellen der Netzanschluss i.d.R. durch Umrichter realisiert ist und daher andere Eigenschaften aufweist, bedingt diese Entwicklung eine Veränderung des strukturellen Aufbaus des Energienetzes. Es resultieren schwache Teilnetze, in denen die umrichterbasierten Einspeiser die Synchronität mit dem Energienetz verlieren können, was zu einer instabilen Umrichterregelung führt.

In dieser Arbeit wird die Netzsynchronisation eines umrichterbasierten Einspeisers mittels Phasenregelschleife (PLL) unter dem Einfluss eines schwachen Netzes analysiert und Bedingungen für deren Stabilität hergeleitet. Die Untersuchung erfolgt anhand des Systems aus netzseitigem Umrichter mit LC-Ausgangsfilter, der PLL und dem Energienetz in einer Darstellung nach dem Thévenin-Theorem.

Die Betrachtung des Systems im eingeschwungenen Zustand ermöglicht die Herleitung einer notwendigen Stabilitätsbedingung, die ein ausreichend starkes Netz für die PLL-basierte Netzsynchronisation kennzeichnet. Zudem stellt das Erfüllen der notwendigen Bedingung die Existenz der Ruhelagen des Systems sicher, deren Stabilität durch eine Linearisierung und anschließend durch lineare Untersuchungsmethoden gezeigt wird. Darauf aufbauend wird das transiente Systemverhalten bei einem Übergang von einer stabilen Ruhelage zu einer zweiten analysiert. Es resultiert eine Bedingung, welche die Stabilität der Netzsynchronisation und das Einschwingen auf die Zielruhelage sicherstellt. Gemäß dieser transienten Stabilitätsbedingung darf der PLL-Phasenwinkel während des Übergangs einen kritischen Wert nicht erreichen und demzufolge erfordert das direkte Überprüfen der Bedingung die Lösung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen, um den Maximalwert zu ermitteln. Auf der Grundlage von geeigneten Vereinfachungen und Annahmen wird eine Methode erarbeitet, die den Maximalwert für eine gegebene Systemanregung konservativ abschätzt und so den Nachweis der transienten Stabilität ohne Lösung der Differentialgleichungen zulässt. Die Nachweismethode wird mit einer Optimierung unter Nebenbedingungen in zwei Varianten implementiert.

Die hergeleiteten Stabilitätsbedingungen und die Methode zum Nachweis der transienten Stabilität werden an numerischen Beispielen demonstriert. Anhand von Versuchsreihen nach dem Prinzip von Monte-Carlo-Simulationen wird außerdem die Konservativität der Nachweismethode eingeschätzt.

Abstract

Electrical energy from renewable sources is increasingly fed into the electrical grid, which complements or rather replaces the feed-in from conventional sources based on large power plants with synchronous generators that are directly coupled to the grid. Since the grid connection of feeders based on renewable sources is usually realized by inverters and has different properties, this trend causes a changing structure of the energy grid. Weak subparts in the grid result, in which the inverter-based feeders may lose synchronism to the grid, which leads to an unstable inverter control loop.

In this thesis, the grid synchronization of an inverter-based feeder with a phase-locked loop (PLL) is analyzed under the influence of a weak grid and conditions for its stability are derived. The analysis is based on the system consisting of a grid-side inverter with LC-output filter, the PLL and the energy grid in a representation according to Thévenin's theorem.

By considering the steady-state, a necessary stability condition is derived which characterizes a sufficiently strong grid for the PLL-based grid synchronization. In addition, the necessary condition ensures the existence of the system's equilibrium points and their stability is shown by linear methods after performing a linearization. The transient behavior of the system is then analyzed by examining the transition from one stable equilibrium point to another. As a result, a condition arises which ensures the stability of the grid synchronization and the settling in the second equilibrium point. According to this transient stability condition, the PLL phase angle must not reach a critical value during the transition and therefore a direct verification of the condition requires the solution of the underlying differential equations to identify the maximum value. Based on appropriate simplifications and assumptions, a method is deduced to conservatively estimate the maximum value for a given excitation, thus allowing the transient stability condition to be verified without solving the differential equations. The verification method is implemented by an optimization with constraints in two variants.

The derived stability conditions and the method to verify the transient stability condition are demonstrated by numerical examples. Furthermore, the conservativeness of the verification method is evaluated by a series of experiments according to the principle of Monte-Carlo-simulations.