

# Kaskadenmaschine als Generator für die dezentrale regenerative Energieerzeugung

## KasKaEE

**Projekt:** Kaskadenmaschine als Generator für die dezentrale regenerative Energieerzeugung (KasKaEE)

**Laufzeit:** 01.02.2014 bis 30.09.2017

**Gesamtkosten:** 275.731,38 €

**Davon Förderung:** 269.558,00 €

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz

Institut ELSYS

Technische Hochschule

Nürnberg Georg Simon Ohm

Der Ausbau erneuerbarer Energien schreitet im Zuge der Energiewende bereits mit großen Schritten voran. So gilt es, besonderes Augenmerk auf Energieeffizienz und Kosten zu legen. Stetige Entwicklungen, wie zum Beispiel der Ausbau vieler kleiner dezentraler Systeme statt großer zentraler Energieerzeuger, stellen den Bereich der Energietechnik stets vor neue Aufgaben. So werden innovative Generatorkonzepte erforderlich, die diesen Anforderungen gerecht werden. Die Lösung könnte dabei in einer effizienten und kostenoptimierten Antriebstopologie liegen. Aktuell werden bei dezentralen und regenerativen Kleinkraftwerken, wie Wind-, Wasser- und Organic-Rankine-Cycle-Anlagen (ORC), spezielle Generatortypen verwendet, die unterschiedliche Merkmale besitzen, wie beispielsweise Schleifringe, eine große Umrichterleistung oder die Verwendung von teurem Magnetmaterial. Diese wirken sich jedoch nachteilig auf das Betriebsverhalten oder die Herstellungs- bzw. Wartungskosten aus. Eine energieeffiziente und gleichzeitig kostengünstige Alternative bieten hier drehzahlvariable Generatortypen, welche ohne den Einsatz von Magnetmaterialien und Schleifringen hergestellt werden können.

Das Forschungsprojekt KasKaEE hat dazu ein neuartiges Generatorkonzept für dezentrale regenerative Kleinkraftwerke entwickelt, welches eine hohe Einspeisequalität, Energieeffizienz und Kostenoptimierung verspricht.

## Ziele

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin, eine Kaskadenmaschine mit Frequenzumrichter für dezentrale regenerative Energien im Kleinstleistungsbereich von 10 kW bis 100 kW zu realisieren, welche durch Energieeffizienz und Kostenersparnis die Basis für eine Industrialisierung bildet. Darüber hinaus sollte ein Regelkonzept entwickelt werden, welches eine optimale Ausnutzung dieses neuartigen Generatorkonzepts für die jeweilige Anwendung garantiert.

## Projektverlauf

Beginnend mit einer Einordnung der Kaskadenmaschine im Vergleich zu herkömmlichen, bekannten elektrischen Maschinen wurde vor allem die Modellbildung im Projekt KasKaEE fokussiert. Zur allgemeinen Analyse der modernen Kaskadenmaschine wurde ein analytisches Maschinenmodell auf Grundlage induktiv gekoppelter Kreise und der Drehwellentheorie erarbei-

tet. Mithilfe des Modells kann, ausgehend vom Strombelag des Wicklungssystems, die Durchflutungsverteilung und in weiteren Folgeschritten die Induktionsverteilung im Luftspalt, die induzierten Spannungen in den gekoppelten Kreisen und auch das Drehmoment berechnet werden. Weiterhin konnten die Streuung (Nutstreuung, Wickelkopfstreuung) sowie weitere Effekte (z. B. Sättigungsverhalten und verschiedene Verlustmechanismen) über aus der Literatur bekannte Zusammenhänge abgeschätzt und über Berechnungen mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) verifiziert werden. Wichtige Kenngrößen, wie zum Beispiel das erzielbare Drehmoment und der Wirkungsgrad im gesamten Lastbereich, konnten unter Berücksichtigung der bekannten Einschränkungen analytischer Luftspaltmodelle aus dem Modell für verschiedene Baugrößen abgeleitet werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse, weiterführenden Überlegungen, Berechnungen und Simulationen wurden dann Maschinenvarianten entworfen und verglichen. Erster Schritt der Maschinenauslegung war die Festlegung des effektiven Strombelags und der maximalen Flussdichte im Luftspalt. Diese Kenngrößen wurden von denen einer Asynchronmaschine übernommen – unter der Berücksichtigung der Rotorstruktur, welche für die Aufteilung von Strombelag und Flussdichte auf die beiden Statorwicklungen von Bedeutung ist. Anschließend wurde die Baugröße festgelegt und die Blechpaketabmessungen an der IEC-Norm orientiert, sodass eine Vergleichbarkeit der Maschine zu einer 8-poligen Normmaschine entstand. Im Folgenden wurde eine weitere Detaillierung erarbeitet und Randbedingungen wie Rotorlagegeber, Leistungselektronik und Regelung für das gewählte Konzept überprüft. Dabei war vor allem die Abstimmung auf den Frequenzumrichterbetrieb wesentlicher Bestandteil. Die Drehmomentwelligkeit und die Form der induzierten Spannung wurden dabei mittels FEM verifiziert. Als Basiswerkzeug wurde ein 2D/3D-FEM-Programm verwendet. Die elektrischen Größen ließen sich anhand der Geometrie errechnen und mit den späteren realen Messungen vergleichen, um Korrekturfaktoren für weitere Größen zu definieren. Über zahlreiche analytische und numerische Berechnungen unterschiedlicher Varianten konnten Zusammenhänge erkannt und verwendet werden. Diese Erkenntnisse flossen dann in die Prototypenentwicklung ein.

Der Aufbau des Prototyps (verwendete einen gemeinsamen Stator mit zwei Drehstromwicklungen mit zwei und vier Polpaaren und einem Rotor mit dem Konzept der „Nested Loops“. Die Kopplung der Maschine mit einer Wasserkraftschraube und der Leistungselektronik bzw. dem elektrischen Netz wurde simulationstechnisch nachgebildet und die Regelungskonzepte unter-

sucht. Anhand der Untersuchungen wurden die Hauptabmessungen des Prototyps final festgelegt. Der endgültige Prototyp wurde mit dem Partner aus der Industrie, OSWALD Elektromotoren GmbH, aufgebaut und das entsprechende Regelungskonzept anschließend weiterentwickelt. Dabei wurde auf das auch für andere Maschinen typische feldorientierte Regelungskonzept zurückgegriffen. In einer Voruntersuchung über zwei gekoppelte Schleifringläufer-Asynchronmaschinen als Nachbildung einer Kaskadenmaschine konnten grundlegende Erkenntnisse zum Betriebsverhalten der Maschine und zur Aufteilung der Leistungen gewonnen werden. Anschließend wurde der entwickelte Prototyp auf dem Antriebsprüfstand des Energie Campus Nürnberg getestet (siehe Abb.1). Der Entwurf der Re-

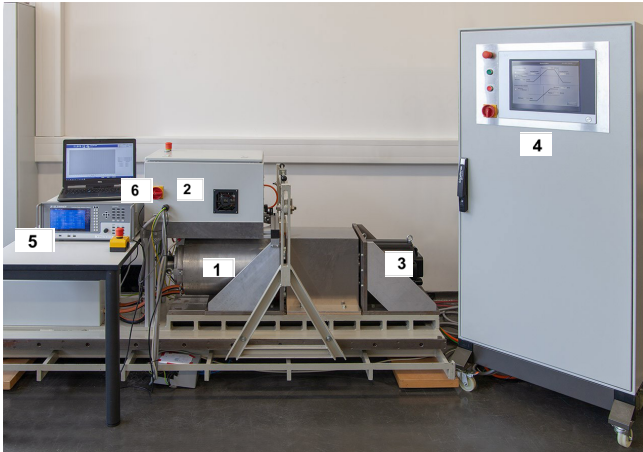


Abb.1: Prototypmaschine am Prüfstand; (1) Kaskadenmaschine, (2) Reduziert ausgelegter Frequenzumrichter, (3) Belastungsmaschine, (4) Frequenzumrichter der Belastungsmaschine, (5) Präzisionsleistungsmessgerät, (6) Computer zur Bedienung und Diagnose der Kaskadenmaschinenregelung

gelung wurde über eine Simulation durchgeführt. Durch experimentelle Verifikation konnten dann neue Aspekte eingebracht werden. Die Berechnungs- und Regelungsmodelle wurden nachfolgend anhand von Messungen überprüft. Die Verifikation war dabei wesentlich für die anschließende Optimierung der Berechnungs- und Regelungsverfahren sowie zur kontinuierlichen Verbesserung des Generators.

Es folgte die Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse aus Test und Messungen sowie die weitere Optimierung der Regelalgorithmen für die Anwendung der Maschine. Abschließend wurde das Generatorsystem unter simulierten, realen Bedingungen am Prüfstand getestet und validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dann anderen Generatorkonzepten zur dezentralen regenerativen Energieerzeugung im Kleinstleistungsbereich von bis zu 100 kW gegenübergestellt.

## Ergebnisse

Aus dem neuen Ersatzschaltbild konnten für die Praxis neue Aussagen zur Ausnutzung der Kaskadenmaschine generiert

Projektleiter  
 Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz  
 Telefon: 0911/ 5880-1056  
 E-Mail: armin.dietz@th-nuernberg.de

Institut ELSYS  
 Technische Hochschule Nürnberg  
 Georg Simon Ohm

www.th-nuernberg.de

werden. Diese liegt bei ca. 70 - 75 % im Mittelwert der Ausnutzung von den zur Energieumwandlung im Klein- bzw. Kleinstkraftwerksbereich am häufigsten verwendeten Asynchronmaschinen. Das Gesamtsystem kann dennoch überzeugen: Da ein rückspeisefähiger Frequenzumrichter typischerweise etwa doppelt so teuer wie ein konventioneller Standard-Asynchrongenerator ist, entstehen hier dank der kleineren Umrichterdimensionierung deutliche Kostenvorteile – selbst wenn die Maschine über eine geringere Ausnutzung verfügt. Damit einhergehend werden zusätzliche Verluste sowie Kosten im Falle eines Austausches bei einem Defekt der Leistungselektronik minimiert. Weiterhin konnten neue Strukturen zur Regelung von Kaskadenmaschinen entwickelt werden, was zu einem deutlich verbesserten Verhalten des Stromreglers (Entkopplungsnetzwerk) führt. Die Besonderheit des Generatortyps Kaskadenmaschine liegt darin, dass ein Großteil der Leistung über die Primärständerwicklung mit annähernd sinusförmigen Strömen ins Netz gespeist wird. Der Restanteil der Leistung wird über die Sekundärständerwicklung und einen Umrichter ins Netz eingespeist. Somit kann der Umrichter auf einen Bruchteil der Generatorleistung ausgelegt werden. Außerdem ist die Maschine über den Umrichter in der Lage, Blindleistung zur Netzstabilisierung zu liefern.

Zum Einsatz als Wasserkraftgenerator konnte die Hypothese aus dem Forschungsvorhaben bestätigt werden: Gerade als Generatorsystem für drehzahlvariable Prozesse ist die Kaskadenmaschine gut geeignet. Mit einem beispielsweise auf ein Drittel der Gesamtmaschinenleistung dimensionierten Frequenzumrichter kann eine Drehzahlvariabilität von  $500 \text{ min}^{-1} \pm 40 \%$  erreicht werden. Bei den typischen Kennlinien der Wasserkraftturbinen kann damit der komplette Leistungsbereich abgedeckt werden.

## Fördergeber



## Projektpartner aus der Wissenschaft



## Projektpartner aus der Industrie

Oswald Elektromotoren GmbH  
 PETER electronic GmbH  
 Andritz GmbH  
 Orcan Energy AG