



Fachbereich Ingenieurwissenschaften
und Kommunikation (IWK)
Studiengang Elektrotechnik M. Eng.
Vertiefungsrichtung Elektronische Systementwicklung

Master-Thesis

Netzdienliche Wasserstoff-Elektrolysegleichrichter: Eine Analyse von IAF und 1/3 PWM PFC Rectifier in der Leistungsklasse 400 kVA

Vorgelegt von:
Jonas Heinemann
Cecilienstraße 28
53840 Troisdorf
Tel. 015783841858
Jonas.Heinemann@h-brs.de
Matr.-Nr. 9031399

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Marco Jung
Zweitprüfer: Prof. Dr. Heinrich Richard Salbert

Troisdorf, den 20.01.2024

Erklärung zur Master-Thesis

„Ich versichere hiermit, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Mir ist bewusst, dass sich die Hochschule vorbehält, meine Arbeit auf plagiierte Inhalte hin zu überprüfen und dass das Auffinden von plagiierten Inhalten zur Nichtigkeit der Arbeit, zur Aberkennung des Abschlusses und zur Exmatrikulation führen können.“

Ort, Datum

Unterschrift

Abstract

Um in Zukunft unabhängiger von Importen zu sein und die Energieversorgung nachhaltiger zu machen, hat die Bundesregierung das Ziel zur Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse im Jahr 2030 von fünf auf zehn Gigawatt Leistung erhöht. Wovon drei Gigawatt systemdienlich sein sollen. Dies zeigt, wie wichtig es ist die Elektrolyse für zukünftige Szenarien vorzubereiten. Um das Ziel rein erneuerbare Energien im Stromnetz zu erreichen, wird ein Wandel in den Anforderungen an größere Lasten notwendig. Dies bezieht sich auf Systemdienstleistungen, die bisher hauptsächlich von den zentralen Großkraftwerken bereitgestellt werden. Wasserstoff-Elektrolyse-anlagen in der Leistungsklasse von mehreren Megawatt Leistung sollen in Zukunft in Deutschland aufgebaut werden, dies bietet viele Möglichkeiten durch Dynamik und Regelungen das Stromnetz zu unterstützen. Daher werden in dieser Arbeit Stromrichter für die Anwendung der Wasserstoffelektrolyse untersucht, die innovative Ansätze und eine optimierte Betriebsführung ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	1
1.2 Ziel der Arbeit	1
2 Grundlagen	2
2.1 Wasserstoff-Elektrolyse	2
2.2 Stromrichter	2
2.2.1 Gleichrichter	2
2.2.2 Wechselrichter	2
2.2.3 DC-DC Wandler	2
2.2.4 Power Factor Correction	3
2.3 IAF Rectifier	3
2.4 1/3 PWM PFC Rectifier	4
2.5 Bewertungskriterien	4
2.6 Leistungshalbleiter	4
2.7 Simulationssoftware	4
2.7.1 PLECS	4
3 Anforderungen	5
3.1 Stromnetz	5
3.1.1 Systemanforderungen	5
3.1.2 Überspannungsschutz	5
3.2 Elektrolyse	5
4 Simulation	6
4.1 Randbedingungen	6

4.2 IAF	6
4.3 B6 PFC Buck	6
5 Auswertung	7
5.1 Simulationsergebnisse	7
5.1.1 IAF	7
5.2 Auswertung	7
6 Zusammenfassung & Ausblick	8
Literatur	9
Inhalt der CD	11
Anhang	12

Abbildungsverzeichnis

2.2.1-1	B6DiodRect	3
---------	------------	---

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Um die Ziele zum Klimaschutz zu erreichen wird eine Vielzahl an Maßnahmen nötig sein, welche nur im Zusammenspiel zum Erfolg führen können. Ein großes Problem bei der Verwendung von erneuerbaren Energien ist die Volatilität dieser, daher sind deutlich größere Speichermöglichkeiten notwendig. Ein Medium zum Speichern und Transport von Energie bietet Wasserstoff, dieser kann auf verschiedene Arten gewonnen werden und bietet eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten. In der Industrie wird Wasserstoff bereits heute im großen Stil eingesetzt, jedoch in den meisten Fällen durch Dampfreformation aus Erdgas direkt am Einsatzort. Zukünftig kann dieser durch den Einsatz von Elektrolysezellen mit erneuerbaren Energien generiert werden [6] .

1.1 Stand der Technik

Aktuelle Ansätze werden in [8] dargestellt, diese sind wie beschrieben jedoch auf einzelne Szenarien beschränkt. Die Entwicklung der Elektrolyse läuft sehr rasant und es werden in den kommenden Jahren Änderungen erwartet, die auch die Stromversorgung betreffen. Insbesondere der Trend zu höheren Spannungsklassen ermöglicht eine deutliche Verringerung der Kosten auf Seiten der Leistungselektronik.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel ist es die beiden vorab ausgewählten Stromrichter Topologien anhand von detaillierten Simulationen unter gegebenen Randbedingungen zu vergleichen, um eine eindeutige Bewertung durchzuführen. Dazu werden zunächst die Randbedingungen und Eigenschaften der Schnittstellen, Elektrolyseur und Stromnetz, definiert um diese in einer Simulation mittels Matlab und der Erweiterung PLECS abzubilden.

2 Grundlagen

2.1 Wasserstoff-Elektrolyse

Unter Wasserstoff-Elektrolyse versteht man grundlegend die Funktion Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Die verbreitetste Variante ist die alkalische Elektrolyse, welche bereits im großen Maßstab eingesetzt wird. Unter anderem in einer zwei Gigawatt Anlage in Saudi-Arabien [5]. Des weiteren wird viel Potential in der Weiterentwicklung der PEM Elektrolyse gesetzt, da diese durch einen simpleren Aufbau und höhere Stromdichten bessere Skalierbarkeit bieten kann. Außerdem wird die Hochtemperatur Elektrolyse verwendet, wenn sich die Nutzung von Prozess technischer Abwärme anbietet, wodurch der Gesamtwirkungsgrad steigt.

2.2 Stromrichter

2.2.1 Gleichrichter

Ein Gleichrichter wird verwendet, um aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung zu erzeugen. Die einfachste Form ist der Diodengleichrichter, dieser kann für einphasige Wechselspannung durch eine einzelne Diode realisiert werden. Jedoch würde so nur die halbe Periode des Sinus am Ausgang zur Verfügung stehen. Anhand des Diodengleichrichters wird schnell klar, das eine solche Schaltung nur bedingt für einen gewünschten Stromverlauf sorgt.

2.2.2 Wechselrichter

- ungesteuerte Topologien
- Netz gesteuerte Topologien

2.2.3 DC-DC Wandler

Der Hoch- und Tiefsetzsteller sind essenzielle Topologien und bestehen im wesentlichen aus einer Diode, einem Schalter und einer Induktivität.

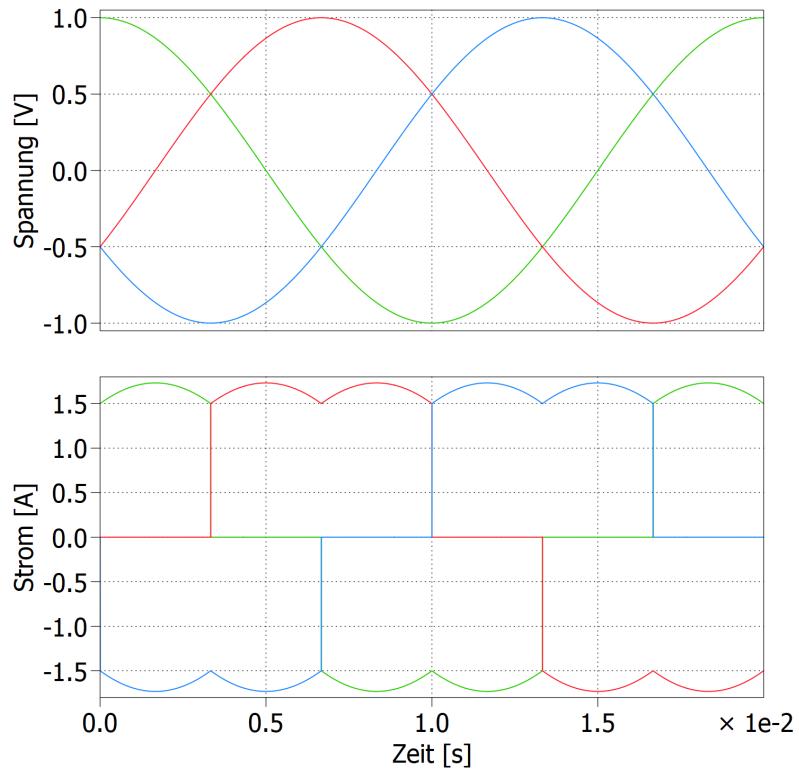


Abbildung 2.2.1-1: Strom und Spannungsverlauf am B6 Diodengleichrichter

2.2.4 Power Factor Correction

Die Power Factor Correction (PFC) ist eine nötige Maßnahme um den Blindleistungsanteil im Netz zu reduzieren. The front-end circuit concept of the H3R system was first introduced in late 90s by Jantsch and Verhoeve,

2.3 IAF Rectifier

Der Integrated Active Filter (IAF) Gleichrichter wurde erstmals vorgestellt in [3] im Jahr 1997. Dieser besteht für den Hauptleistungspfad aus einem Diodengleichrichter, um sinusförmige Ströme in allen drei Phasen einzuprägen. Dieser wird durch ein Netzwerk aus bidirektional sperrenden Leistungshalbleitern ergänzt, welche einen Strom in den Gleichrichter einprägen. Durch die Integration des Filters in den Leistungspfad, kann die Kompensation effizienter funktionieren. Aufgrund des ungesteuerten Diodengleichrichters wird jedoch eine anschließende Spannungsregelung durch einen Tiefsetzsteller benötigt.

2.4 1/3 PWM PFC Rectifier

Bei dieser Topologie handelt es sich um eine gängige Schaltung, welche durch ein neuartiges Modulationsverfahren unter Verwendung von Induktivitäten auf der Netzseite eine Reduzierung der Schaltverluste bewirkt und Blindleistung ermöglicht. Das Verfahren wurde ausführlich von Menzi, Bortis und Kolar beschrieben [2].

2.5 Bewertungskriterien

2.6 Leistungshalbleiter

2.7 Simulationssoftware

Zur Bewertung und Betrachtung der Umsetzbarkeit, der Topologien ist es nötig diese in einer Umfassenden Simulation zu betrachten. Dies ermöglicht es die Funktionalität und den Einfluss der Parameter im direkten Zusammenspiel zu untersuchen. Insbesondere das Verhalten für Systemdienstleistungen, wie Phasenverschiebung und die dadurch beeinflusste Verteilung der Verlustleistungen.

2.7.1 PLECS

3 Anforderungen

3.1 Stromnetz

In Deutschland sind die Vorgaben für den Anschluss von Anlagen an das Stromnetz durch den Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) definiert. Je nach Anschlussleistung wird eine unterschiedliche Netzspannungsklasse gewählt, welche geringfügig abweichende Anschlussrichtlinien besitzt. Aufgrund der Skalierbarkeit zu höheren Leistungsklassen und der erwartbar steigenden Anforderungen, wird sich für die Bestimmungen für Hochspannung entschieden. Diese hat die Bezeichnung VDE-AR-N 4120 ”Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)” [7] .

3.1.1 Systemanforderungen

3.1.2 Überspannungsschutz

3.2 Elektrolyse

4 Simulation

4.1 Randbedingungen

Die Regelung benötigt eine Erkennung des aktuellen Phasenwinkelabschnitts, diese ist implementiert nach [1].

4.2 IAF

[4]

4.3 B6 PFC Buck

5 Auswertung

5.1 Simulationsergebnisse

5.1.1 IAF

Aufgrund der Anforderung an Blindleistungsbereitstellung hat die Topologie durch den Input Voltage Selector (IVS) einen Nachteil, da dieser sprunghafte Änderungen des Stromverlaufs verursacht. Diese starken Sprünge führen dazu, dass die Total Harmonic Distortion (THD) des Stroms deutlich verschlechtert wird. Somit kann der IAF den Anforderungen nicht gerecht werden.

5.2 Auswertung

6 Zusammenfassung & Ausblick

Literatur

- [1] Callaway J. Cass, Rolando Burgos, Fred Wang and Dushan Boroyevich. *Three-Phase Ac Buck Rectifier using Normally-On SiC JFETs at 150 kHz Switching Frequency: PESC 07] ; Orlando, Florida, 17 - 21 June 2007.* Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2007.
- [2] David Menzi, Dominik Bortis and Johann W. Kolar. *Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier Employing Novel Variable DC Link Voltage Input Current Control.* Zurich: IEEE, 2018.
- [3] Martin Jantsch and Cornelis Wilhelmus Verhoeve. *Inverters with three phase output and without electrolyte capacitor for improved lifetime, efficiency and costs of grid connected systems.* 1997. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51795249> (besucht am 13.10.2023).
- [4] Schrittwieser, Lukas. *99 Efficient Three-Phase Buck-Type SiC MOSFET PFC Rectifier Minimizing Life Cycle Cost in DC Data Centers.* 2017. URL: <https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2017.00006> (besucht am 13.10.2023).
- [5] thyssenkrupp. *Eines der größten grünen Wasserstoffprojekte der Welt: thyssenkrupp unterzeichnet Vertrag über 2GW Elektrolyse-Anlage für Air Products in NEOM.* URL: <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/pressedetailseite/eines-der-grossten-grunen-wasserstoffprojekte-der-welt--thyssenkrupp-unterzeichnet-vertrag-uber-2gw-elektrolyse-anlage-fur-air-products-in-neom-124583> (besucht am 13.10.2023).
- [6] Toepler, Johannes and Lehmann, Jochen. *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [7] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. *VDE-AR-N 4120:2018-11 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung).* Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2018.

- [8] Zhiyu Cao and Peter Wallmeier. *High-Power Rectifier Technologies for Hydrogen Electrolysis*. Warstein: IEEE, 2023.

Inhalt der CD

- Master-Thesis
- Simulationsdaten
- Halbleitermodelle

Anhang