



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 [1]. Dies zeigt, wie wichtig es ist die Elektrolyse für zukünftige Szenarien vorzubereiten. Um zusätzlich das Ziel rein erneuerbarer 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. Anhand einer Vorauswahl wurden die relevanten Topologien bereits auf den Integrated Active Filter (IAF) und Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier (1/3-PWM-PFC) eingegrenzt, diese werden im Detail untersucht und durch Simulationsmodelle charakterisiert.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abstract | I |
| Abbildungsverzeichnis | IV |
| Tabellenverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Stand der Technik | 1 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 4 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 Wasserstoff-Elektrolyse | 5 |
| 2.2 Stromrichter | 6 |
| 2.2.1 Gleichrichter | 6 |
| 2.2.2 DC-DC Wandler | 7 |
| 2.2.3 Power Factor Correction | 7 |
| 2.3 IAF Rectifier | 8 |
| 2.4 1/3 PWM PFC Rectifier | 8 |
| 2.5 Leistungshalbleiter | 8 |
| 2.6 Induktivitäten | 8 |
| 2.7 Simulationssoftware | 8 |
| 2.7.1 PLECS | 8 |
| 3 Anforderungen | 9 |
| 3.1 Stromnetz | 9 |
| 3.1.1 Systemanforderungen | 9 |
| 3.1.2 Überspannungsschutz | 9 |
| 3.2 Elektrolyse | 9 |
| 3.3 Bewertungskriterien | 9 |
| 4 Simulation | 10 |
| 4.1 Randbedingungen | 10 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 IAF | 10 |
| 4.3 B6 1/3 PFC Buck | 10 |
| 5 Auswertung | 11 |
| 5.1 Simulationsergebnisse | 11 |
| 5.1.1 IAF | 11 |
| 5.2 Auswertung | 11 |
| 6 Zusammenfassung & Ausblick | 12 |
| Literatur | 13 |
| Inhalt der CD | 15 |
| Anhang | 16 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------|--|---|
| 1.1-1 | Systemkosten PEM Elektrolyse | 2 |
| 1.1-2 | Elektrolyse Kapazität bis 2030 | 3 |
| 2.1-1 | Elektrolyseur Spannungseffizienz | 6 |
| 2.2.1-1 | Strom und Spannungsverlauf am B6 Diodengleichrichter | 7 |

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

Um die Ziele zum Schutz des Klimas 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 langfristigen 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 nachhaltig generiert werden [8].

1.1 Stand der Technik

Aktuelle Ansätze werden in [11] dargestellt, diese sind wie beschrieben jedoch auf einzelne Anwendungsfälle 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 Verringerung der Kosten auf Seiten der Leistungselektronik. Jedoch hängt die optimale Ausführung der Elektrolyseanlage von vielen Anwendungsspezifischen Parametern ab, wie der Betriebsführung. Insbesondere die Entwicklung des Strompreises und die Stabilität des Netzes in der Zukunft können die Amortisierung stark beeinflussen.

Die Internationale Organisation für Erneuerbare Energien (IRENA) hat in ihrem Bericht aus dem Jahr 2020, über die Kostenentwicklung der Elektrolyse, den Anteil der Kosten für die Stromversorgung mit 29 bis 38 Prozent angegeben für proton exchange membrane bzw. polymer electrolyte membrane (PEM). Wobei die Elektrolysezellen selbst weniger als die Hälfte der Kosten ausmachen. Außerdem werden als Mögliche Faktoren für die Senkung der Gleichrichterkosten der Skaleneffekt, Standardisierung der Komponenten sowie die Teilnahme von Unternehmen aus der Elektronikbranche

anstelle von Elektrolyseur Herstellern genannt [4].

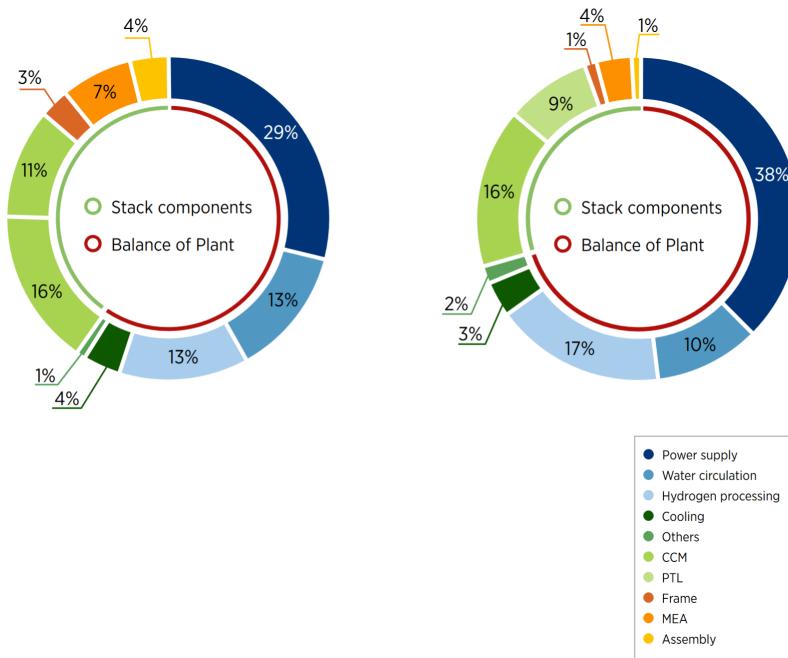


Abbildung 1.1-1: Systemkosten PEM Elektrolyse links 10 MW pro Jahr, rechts 1 GW pro Jahr [4]

Es zeigt sich in 1.1-2 darüber hinaus, dass der Ausbau der Elektrolyse in den letzten Jahren enorm gestiegen ist und in Zukunft deutlich zunehmen wird. Die Weltweite Leistung ist gerade erst in den Gigawatt Bereich gestiegen und soll allein in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf mindestens zehn Gigawatt ausgebaut werden.

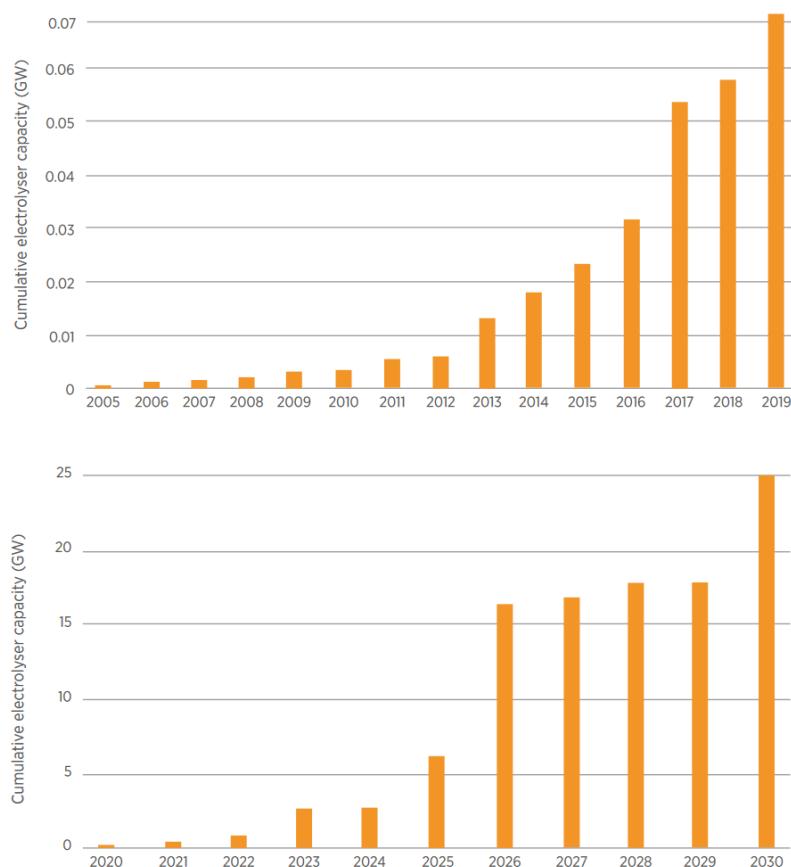


Abbildung 1.1-2: Elektrolysekapazität Stand 2020 mit Ausblick bis 2030 [4]

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. Durch Modelle der Halbleiter kann die Verlustleistung und damit die Effizienz und indirekt der Kühlauflauf bewertet werden. Außerdem kann anhand der gespeicherten Energie in den Magnetischen Komponenten die Größe und Kosten dieser bewertet werden, da diese mit den größten Anteil an den Gesamtkosten für Stromrichter bilden. Weitere Komponenten wie Treiberschaltung und benötigte Kapazitäten spielen eine untergeordnete Rolle bei der Bewertung. Um die Bereitstellung von Systemdienstleistungen zu Berücksichtigen, wird die Verlustleistung bei einer Phasenverschiebung von 30 Grad und 0 Grad betrachtet.

2 Grundlagen

Die Leistungselektronik ist ein komplexes Thema das im Grunde mit dem Beginn der Elektrizität beginnt, die Wandlung und Übertragung von Strom stellte die ersten großen Hindernisse dar. Insbesondere die Entscheidung zwischen Wechsel- und Gleichspannung in den Übertragungs- und Verteilnetzen stellte eine erste Große Debatte dar. Durch die Weiterentwicklung in der Halbleitertechnik zeigt sich, dass Gleichstromtechnik insbesondere bei langen Übertragungsstrecken Vorteile gegenüber der Wechselstromtechnik besitzt. Um die Anforderungen und Zusammenhänge verstehen zu können, werden Details zur Elektrolyse, zu Stromrichtern sowie Komponenten und der verwendeten Simulationsumgebung dargestellt.

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 Elektrolysetechnik (AEL), welche bereits im großen Maßstab von bis zu zwei Giga Watt eingesetzt wird [7]. Des weiteren wird viel Potential in der Weiterentwicklung der PEM Elektrolyse gesehen, da diese durch einen simpleren Aufbau und höhere Stromdichten bessere Skalierbarkeit bieten kann. Außerdem wird die Hoch Temperatur Elektrolyse (HTEL) verwendet, wenn sich die Nutzung von Prozess technischer Abwärme anbietet, wodurch der Gesamtwirkungsgrad steigt [8]. Das Prinzip der AEL wird, im Gegensatz zur neueren PEM, Elektrolyse bereits seit langer Zeit verwendet und optimiert. Die AEL benötigt in der Regel eine wässrige KOH-Lauge und kann durch Reihenschaltung der Zellen Wasserstoff und Sauerstoff mit erhöhtem Druck von Beispielsweise 30 Bar bereitstellen. Die Entwicklung und insbesondere Steigerung der Stromdichte und Effizienz brachte in den letzten Jahren jedoch keine großen Änderungen. Der Spannungswirkungsgrad liegt zwischen 62 und 82 Prozent [9].

Die PEM Elektrolyse bietet Vorteile durch erhöhte Stromdichte, bei größeren Anlagen spart dies unter anderem Platzbedarf, außerdem ist zu erwarten, dass Druckelektrolyse

bis 100 Bar möglich ist. Jedoch gibt es noch Optimierungsbedarf bei der Langlebigkeit der Membranen und der benötigten Edelmetalle [9].

Die HTEL nutzt die Vorteile durch höhere Temperatur, welche auf der Seite der Energieniveaus Vorteile für die Effizienz bringen, jedoch hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien stellen.

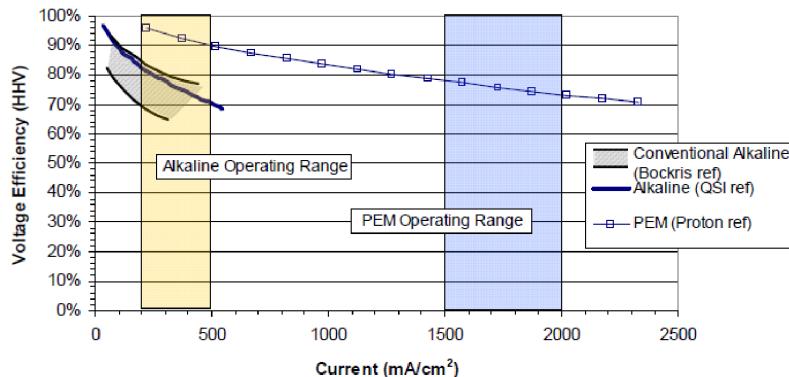


Abbildung 2.1-1: Elektrolyseur Spannungseffizienz [9]

2.2 Stromrichter

Allgemein kann man jede Schaltung die zur Strom- und Spannungsversorgung dient als Stromrichter bezeichnen, dabei wird unterschieden zwischen Wechsel- und Gleichspannungsvarianten. Außerdem kann bei Netzanwendungen in gesteuerte, Netz-gesteuerte und ungesteuerte unterschieden werden, sowie die Umsetzung einer Power Factor Correction (PFC) betrachtet werden.

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, da die Diode nur während der positiven Halbwelle Leitet. Dies lässt sich durch die Ergänzung zum Brückengleichrichter mit vier und für dreiphasige Anwendungen mit sechs Dioden ausgestattet ist.

Anhand des Diodengleichrichters wird schnell klar, dass eine solche Schaltung nur bedingt für einen gewünschten Stromverlauf sorgt. In Abbildung 2.2.1-1 sind Netzspannung und Strom dargestellt, der Stromverlauf zeigt Starke Sprünge und der

gewünschte Sinusförmige Verlauf ist nur schwer erkennbar. Außerdem lässt sich mit dieser Schaltung die Ausgangsspannung sowie der Strom nicht variieren.

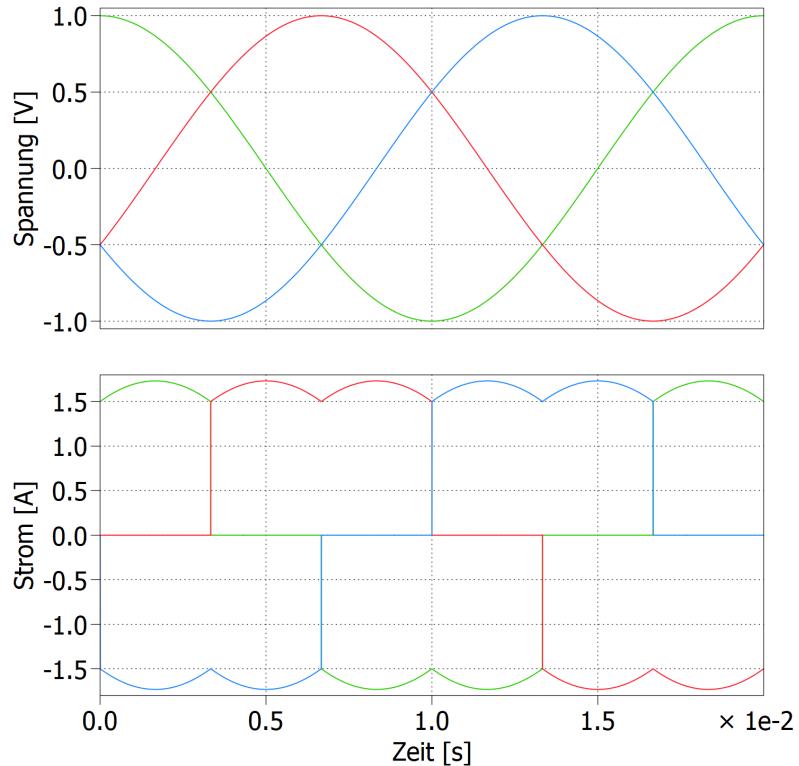


Abbildung 2.2.1-1: Strom und Spannungsverlauf am B6 Diodengleichrichter

ungesteuerte Topologien

Netz gesteuerte Topologien

2.2.2 DC-DC Wandler

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

2.2.3 Power Factor Correction

Die 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 IAF Gleichrichter wurde erstmals vorgestellt in [5] im Jahr 1997 . Dieser besteht für den Hauptleistungspfad aus einem Diodengleichrichter, um sinusförmige Ströme in allen drei Phasen einzuprägen wird dieser 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 Kompen-sation 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 [3].

2.5 Leistungshalbleiter

2.6 Induktivitäten

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 sollen als Entscheidungs-grundlage dienen.

2.7.1 PLECS

Die Software PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) (PLECS) aus dem Haus PLEXIM wird als Integration in MATLAB mit Simulink verwendet.

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 abweichende Anschlussrichtlinien besitzt. Aufgrund der Skalierbarkeit zu höheren Leistungsklassen und der erwartbar steigenden Anforderungen, wird sich für die aktuell striktesten Anforderungen an der 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)" [10].

3.1.1 Systemanforderungen

3.1.2 Überspannungsschutz

3.2 Elektrolyse

3.3 Bewertungskriterien

Die Kriterien zur finalen Auswahl der Topologie setzen sich aus der Erfüllung der Anforderungen zusammen sowie der Bewertung der Hardware. Die Grundlegenden Anforderungen aus Seiten des Stromnetzes und Elektrolyseur wurden bereits in der Vorauswahl berücksichtigt und können nun im Detail anhand von Total Harmonic Distortion (THD) und Rippelgrößen betrachtet werden. Die Quantifizierung der Hardware wird zum einen anhand der Verlustleistung in den Halbleitern, welche indirekt auch den Kühlungsaufwand repliziert, zum anderen durch die Größe und den Aufwand für die Komponenten berücksichtigt.

4 Simulation

4.1 Randbedingungen

Die Regelung benötigt eine Erkennung des aktuellen Phasenwinkelabschnitts, diese ist implementiert nach [2].

4.2 IAF

[6]

4.3 B6 1/3 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 THD des Stroms deutlich verschlechtert wird. Somit kann der IAF den Anforderungen nicht gerecht werden.

5.2 Auswertung

6 Zusammenfassung & Ausblick

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie NWS 2023*. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (besucht am 02.11.2023).
- [2] 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. ISBN: 978-1-4244-0654-8.
- [3] 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. ISBN: 978-1-5386-6054-6.
- [4] IRENA. *GREEN HYDROGEN COST REDUCTION SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. ISBN: 978-92-9260-295-6.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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/presseedetailseite/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).
- [8] Toepler, Johannes and Lehmann, Jochen. *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN: 978-3-662-53360-4.
 - [9] Tom Smolinka, Martin Günther (Fraunhofer ISE) und Jürgen Garche (FC-BAT)). *NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“*. URL: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf> (besucht am 03.11.2023).
 - [10] 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.
 - [11] Zhiyu Cao and Peter Wallmeier. *High-Power Rectifier Technologies for Hydrogen Electrolysis*. Warstein: IEEE, 2023. ISBN: 978-9-0758-1542-9.

Inhalt der CD

- Master-Thesis
- Simulationsdaten
- Halbleitermodelle

Anhang

Hier sind wichtige Dinge enthalten bla...