



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 [4]. 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
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	1
1.2 Ziel der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Wasserstoff-Elektrolyse	4
2.2 Stromrichter	5
2.2.1 Gleichrichter	5
2.2.2 DC-DC Wandler	6
2.2.3 Power Factor Correction (PFC)	7
2.3 IAF Rectifier	8
2.4 1/3 PWM PFC Rectifier	8
2.5 Leistungshalbleiter	9
2.6 Induktive Komponenten	10
2.7 Simulationssoftware	10
2.7.1 PLECS	10
3 Anforderungen	12
3.1 Stromnetz	12
3.1.1 Systemdienstleistungen (Systemdienstleistungen (SDL))	13
3.1.2 Fault-Ride-Through (Fault-Ride-Through (FRT))	14
3.2 Elektrolyseur	14
3.3 Zusammenfassung	15
3.4 Bewertungskriterien	15
4 Vorauswahl	16
4.1 Mögliche Topologien	16
5 Simulation	18
5.1 Randbedingungen	18
5.2 IAF	18
5.2.1 Auslegung der Induktivitäten	18
5.2.2 Regelung	18
5.2.3 Ergebnisse	18

5.3	B6 1/3 PFC Buck	18
5.3.1	Auslegung der Induktivitäten	18
5.3.2	Regelung	18
6	Auswertung	20
6.1	Simulationsergebnisse	20
6.2	Auswertung	21
6.2.1	IAF	21
7	Zusammenfassung & Ausblick	22
	Literatur	23
	Inhalt der CD	25
	Anhang	26

Abbildungsverzeichnis

1.1-1	Systemkosten PEM Elektrolyse	2
1.1-2	Elektrolyse Kapazität bis 2030	2
2.1-1	Elektrolyseur Spannungseffizienz	5
2.2.1-1	Strom und Spannungsverlauf am B6 Diodengleichrichter	6
2.2.2-1	Tiefsetzsteller	7
2.3-1	IAF Gleichrichter Topologie	8
2.4-1	1/3 PWM PFC Buck	9
2.5-1	Darstellung der Ausschaltverluste	10
2.7.1-1	Tiefsetzsteller mit Effizienzbestimmung	11
3.1-1	Zulässiger Bereich des Verschiebungsfaktors $\cos \phi$ bei Wirkleistungsbezug	12
3.1-2	quasistationären Betrieb (a) und FRT (b)	13
3.1.1-1	Technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen Stand 2019	14
5.3.2-1	Regelung des 1/3-PWM-PFC	19

Tabellenverzeichnis

3.3-1	Anforderungen an den Gleichrichter Aktuell und in Zukunft	15
4.1-1	Topologievergleich zur Vorauswahl	17
6.1-1	Auflistung der Simulationsergebnisse und Bewertung	20

Abkürzungsverzeichnis

S	Scheinleistung
U_{LL}	Leiterleiterspannung
1/3-PWM-PFC	Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier
AEL	alkalische Elektrolysetechnik
AFE	active front end
FRT	Fault-Ride-Through
HTEL	Hoch Temperatur Elektrolyse
IAF	Integrated Active Filter
IRENA	Internationale Organisation für Erneuerbare Energien
IVS	Input Voltage Selector
PEM	proton exchange membrane bzw. polymer electrolyte membrane
PFC	Power Factor Correction
PLECS	PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation)
THD	Total Harmonic Distortion
THI	third harmonic injection
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

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 [14].

1.1 Stand der Technik

Aktuelle Ansätze werden in [18] 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 [8].

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.

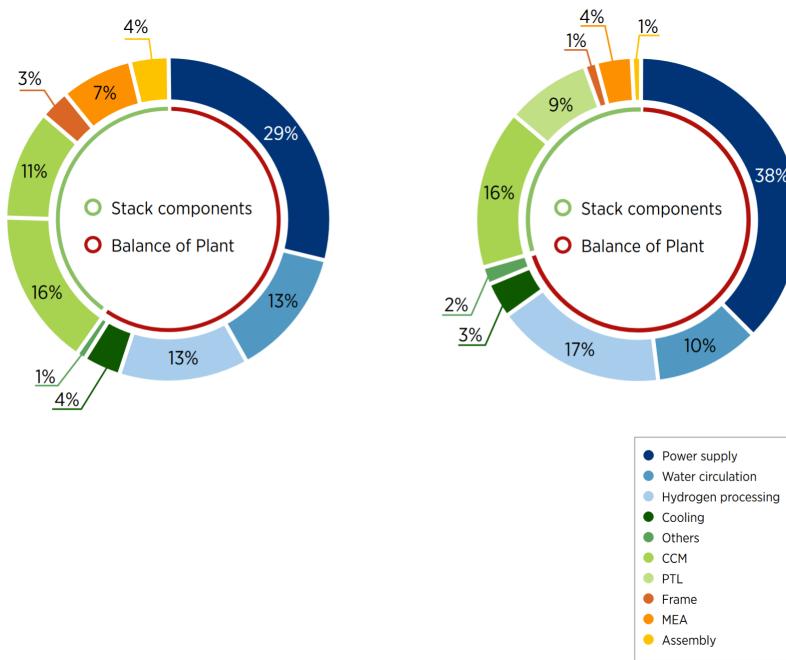


Abbildung 1.1-1: Systemkosten PEM Elektrolyse links 10 MW pro Jahr, rechts 1 GW pro Jahr [8]

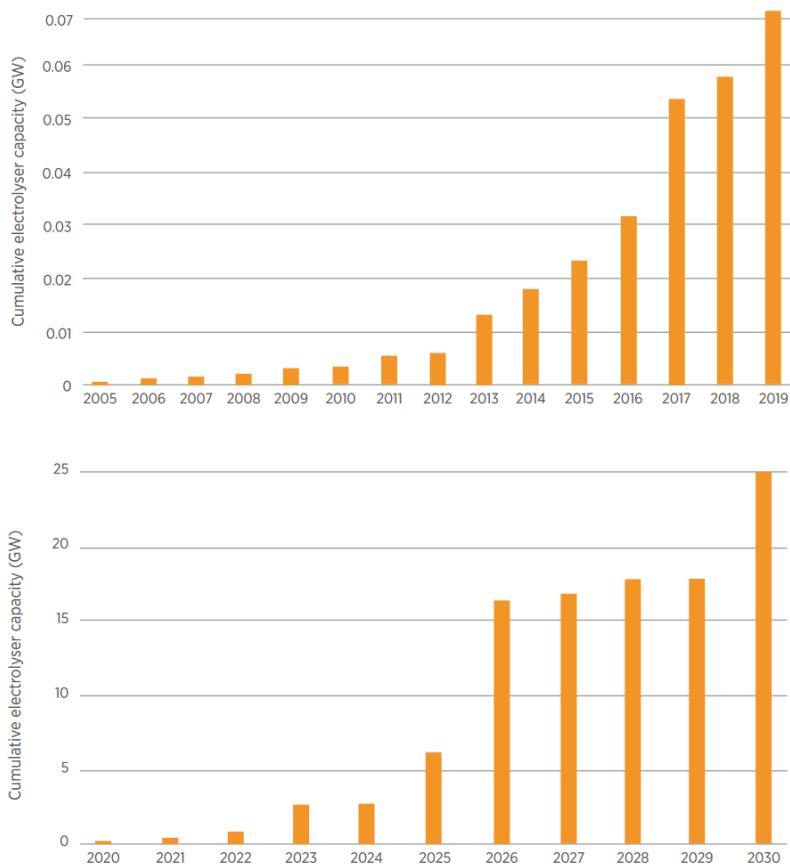


Abbildung 1.1-2: Elektrolysekapazität Stand 2020 mit Ausblick bis 2030 [8]

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 verbreiteteren 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 [13]. 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 [14].

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 [15].

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 [15].

Die HTEL nutzt die Vorteile durch höhere Temperatur, welche auf der Seite der Thermodynamik Vorteile für die Elektrische-Effizienz bringen, jedoch hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien stellen. Daher ist die Festoxid Elektrolyse noch in einer Grundlagenforschung im Laborstadium. Da fast alle Festoxid-Zellen umkehrbare Eigenschaften besitzen ist das Interesse an ihnen besonders groß, dies ermöglicht die direkte Rückverstromung des Wasserstoffs. Jedoch wird hier ebenfalls noch eine Materialoptimierung sowie Verbesserung der Langzeiteigenschaften benötigt.

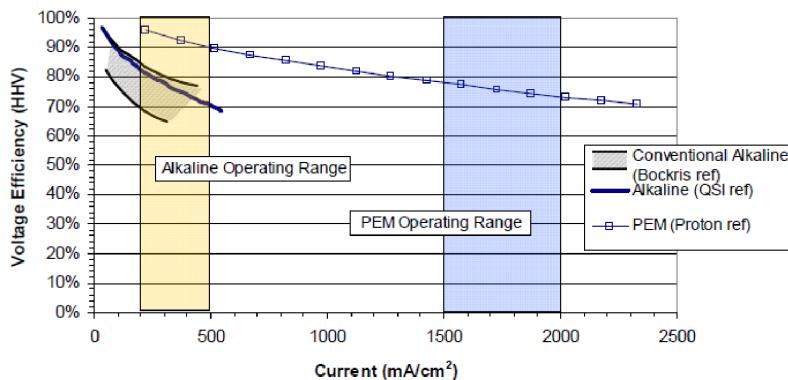


Abbildung 2.1-1: Elektrolyseur Spannungseffizienz [15]

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.

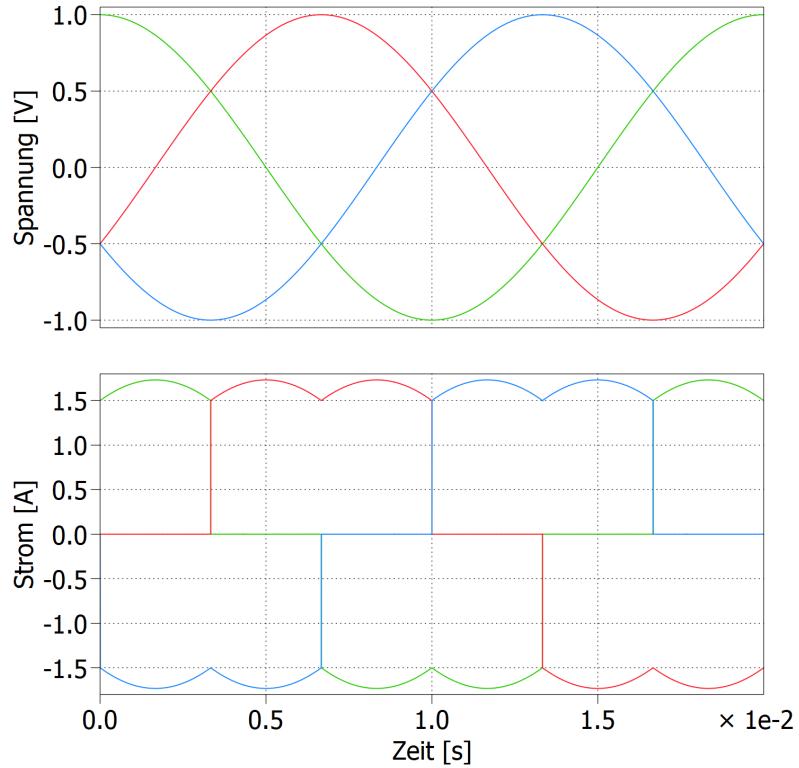


Abbildung 2.2.1-1: Strom und Spannungsverlauf am B6 Diodengleichrichter

Für Elektrolyseanlagen mit mehreren Megawatt Leistung müssen Zwangsweise Leistungs-Halbleiter parallelisiert werden, da bei Spannungen bis 1000 V die Ströme für einzelne Halbleiter zu hoch sind. Außerdem bietet die Parallelisierung durch Interleaving und Phasenverschiebung deutliche Vorteile für die Verzerrung und damit Filterung. Durch Thyristor basierte Schaltungen können große Leistungen effizient umgesetzt werden, jedoch führen diese zu deutlichen Verzerrungen des Stromverlaufs und schlechterem Leistungsfaktor. Daher benötigen diese passive oder aktive Filter, welche die Systemkosten erhöhen [6]. Als Alternative dazu werden active front end (AFE) Gleichrichter eingesetzt diese bieten deutlich geringere Verzerrungen und völlige Freiheit bei der Regelung des Eingangsstroms. Daher können die Filter und Blindleistungskompensation in diesem Fall eingespart werden [6].

2.2.2 DC-DC Wandler

Der Hoch- und Tiefsetzsteller sind essenzielle Topologien und bestehen im wesentlichen aus zwei Halbleitern und einer Induktivität. In Abb. 2.2.2-1 ist die Schaltung für einen Tiefsetzsteller zu sehen. Über das Tastverhältnis des Schalters kann die Ausgangsspannung (U_a) eingestellt werden, dabei sind die Parameter Eingangsspannung (U_e), Lastimpedanz sowie Wert der Induktivität relevant. Die Ausgangsspannung lässt sich im nicht lückendem Betrieb über den Zusammenhang $U_{out} = D \cdot U_{in}$ berechnen.

Die Speicherdiode des Tiefsetzstellers kann über Formel 2.2.2-1 ausgelegt werden, der gewünschte Stromrippel wird dazu auf maximal 30 Prozent des Ausgangsstrom (I_a) festgelegt

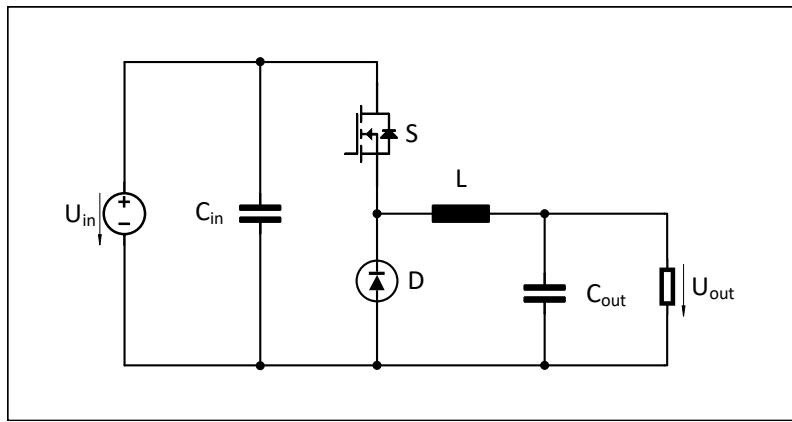


Abbildung 2.2.2-1: Tiefsetzsteller

[10].

$$L = \frac{U_{emax} - U_a}{f \cdot 0,3 \cdot I_a} \cdot \frac{U_a}{U_{emax}} \quad (2.2.2-1)$$

Wenn die Eingangsspannung durch einen, wie in Abb. 2.2.1-1 dargestellten, Dreiphasigen Diodengleichrichter implementiert ist, kann die Eingangsspannung mit $U_{LL} \cdot \sqrt{2}$ berechnet werden. Daraus folgt Formel 2.2.2-2 bezogen auf die Phasenspannungen.

$$L = \frac{U_{LL} \cdot \sqrt{2} - U_a}{f \cdot 0,3 \cdot I_a} \cdot \frac{U_a}{U_{LL} \cdot \sqrt{2}} \quad (2.2.2-2)$$

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bietet das Interleaving, hierbei werden zwei Schaltungen parallel betrieben und die Regelung gekoppelt, dass Sie abwechselnd schalten. Dies ermöglicht es zum einen die Drosseln besser auslasten zu können und zum anderen den Rippel zu halbieren.

2.2.3 Power Factor Correction (PFC)

Die PFC ist eine nötige Maßnahme um den Blindleistungsanteil im Netz zu reduzieren und wird daher in aktuellen Geräten Standardmäßig implementiert. Ein Beispiel aus der Industrie bei dem bereits eine einfache Blindleistungskompensation durchgeführt wurde, war bei Leuchtmitteln mit Halogenröhren. Diese wurden zur Erzeugung der nötigen Spannung mit einem Transformator ausgestattet, welcher jedoch Blindleistung verursachte, dies konnte durch einfache Ergänzung eines Kondensators optimiert werden.

In gängigen Gleichrichtersystemen werden getrennte Einheiten bestehend aus einer dreiphasigen PFC-Gleichrichterschaltung und einem Gleichspannungswandler (DC/DC-Buck-Wandler) eingesetzt, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Regelung der beiden Wandlerstufen ist in der Regel entkoppelt, wobei der Gleichrichter sinusförmige Netzströme zieht und der nachfolgende DC/DC-Wandler die Spannung auf den erforderlichen Ausgang anpasst. Auf der Suche nach kompakten und leichten Systemen sind hohe Schaltfrequenzen notwendig, was jedoch zu erhöhten Schaltverlusten und verringriger Wandlereffizienz führen kann. Um dies zu adressieren, werden fortgeschrittene Modulationstechniken wie Einfügen der dritten harmonischen und Raumzeigermodulation möglich. Alternativ kann

auch Diskontinuierliche Pulsweltenmodulation (DPWM) als Methode zur Reduzierung der Schaltverluste in dreiphasigen PFC-Gleichrichtern verwendet werden, um sinusförmige Eingangsströme und eine konstante Gleichspannung sicherzustellen. Im Gegensatz dazu müssen Einstufen-Wandlersysteme beide Anforderungen gleichzeitig erfüllen, während Zweistufen-Systeme trotz niederfrequenter Spannungsschwankungen im Zwischengleichspannungsnetz eine konstante Ausgangsspannung sicherstellen können.

2.3 IAF Rectifier

Der IAF Gleichrichter wurde erstmals vorgestellt in [9] im Jahr 1997, zur Verwendung in Photovoltaik Anwendungen. 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 mit einer Induktivität und Halbbrücke ergänzt, dies wird als third harmonic injection (THI) Schaltung bezeichnet. Durch die Integration des Filters in den Leistungspfad, wird keine externe Blindleistungskompensation benötigt und die Filter können kleiner ausfallen. Aufgrund des ungesteuerten Diodengleichrichters wird jedoch eine anschließende Spannungsregelung durch einen Tiefsetzsteller benötigt [11].

Das Netzwerk aus bidirektionalen Schaltern, auch als Input Voltage Selector (IVS) bezeichnet, ermöglicht das Schalten zwischen den einzelnen Phasen, in welche durch die Induktivität und Halbbrücke der gewünschte Sinusförmige Stromverlauf eingeprägt wird. Der Diodengleichrichter bezieht immer nur aus zwei Phasen Strom, daher prägt die Schaltung, ohne Phasenverschiebung, nur in die jeweils dritte Phase Strom ein. Die Diode und der IVS schalten mit Netzfrequenz, um während der kommutierungsphase von

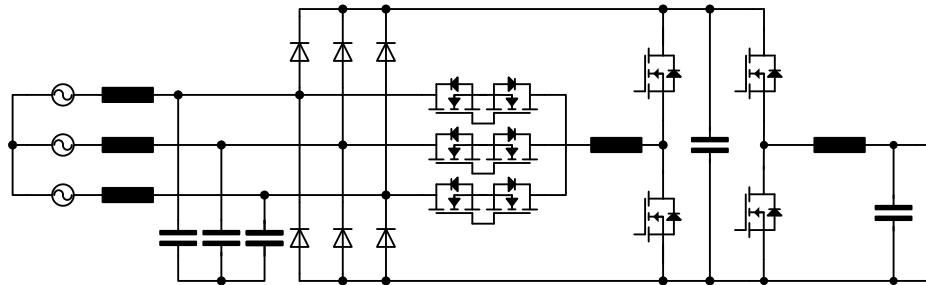


Abbildung 2.3-1: IAF Gleichrichter Topologie

2.4 1/3 PWM PFC Rectifier

Bei dieser Topologie handelt es sich um eine gängige Schaltung, welche durch ein adaptives Modulationsverfahren unter Verwendung von Induktivitäten auf der Netzseite eine Reduzierung der Schaltverluste bewirkt undSDL ermöglicht. Das Verfahren wurde ausführlich von Menzi, Bortis und Kolar beschrieben [7]. Zur Regelung der Ausgangsspannung wird ein entkoppelter Tiefsetzsteller eingesetzt.

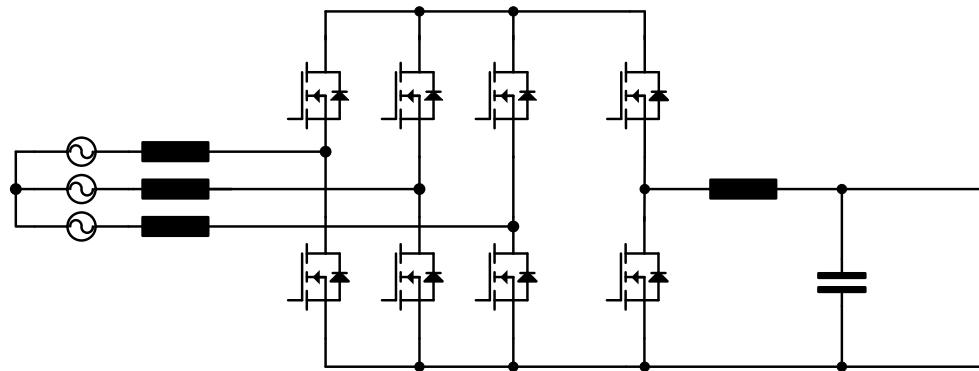


Abbildung 2.4-1: 1/3 PWM PFC Buck

2.5 Leistungshalbleiter

Halbleiter sind prinzipiell alle Komponenten mit mindestens einem PN-Übergang, wenn diese größere Leistungen Schalten können, werden sie als Leistungshalbleiter bezeichnet. Dazu sind für die verwendete Topologie, neben der klassischen Diode, Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistors (MOSFET) relevant. Diese lösen in der Leistungselektronik aktuell den verbreiteteren IGBT oftmals ab aufgrund der günstiger gewordenen Silicium Carbide Variante [1]. Die Vorteile dieser neuen Technologie liegen in der Ermöglichung höherer Schaltfrequenzen, dies wiederum ermöglicht die Reduzierung der Energie welche in den Induktiven Komponenten gespeichert werden muss und spart somit Kosten.

Um die am besten geeigneten Halbleiter auszuwählen werden u.a. Simulationen der Schaltung verwendet, diese benötigen eine Nachbildung der Halbleiter. Um die Modelle der Leistungshalbleiter zu erstellen und ggf. vorhandene zu validieren, können Messungen mittels Doppelpulstest (DPT) durchgeführt werden. Ein Beispiel der in PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) (PLECS) dargestellten Ausschaltverluste für einen Halbleiter können in Abb. 2.5-1 gefunden werden. Es ist zu sehen, dass die Punkte nur für den Betriebspunkt von 600 Volt zur Verfügung stehen, für andere Betriebsbereiche muss das Verhalten approximiert werden. Außerdem wird der Gatevorwiderstand (R_{GV}) nur für einen Begrenzten Bereich dargestellt und die Gate-Source-Spannung (U_{GS}) nur auf einen Wert beschränkt. Dies kann für die spätere Anwendung zu deutlichen Abweichungen führen.

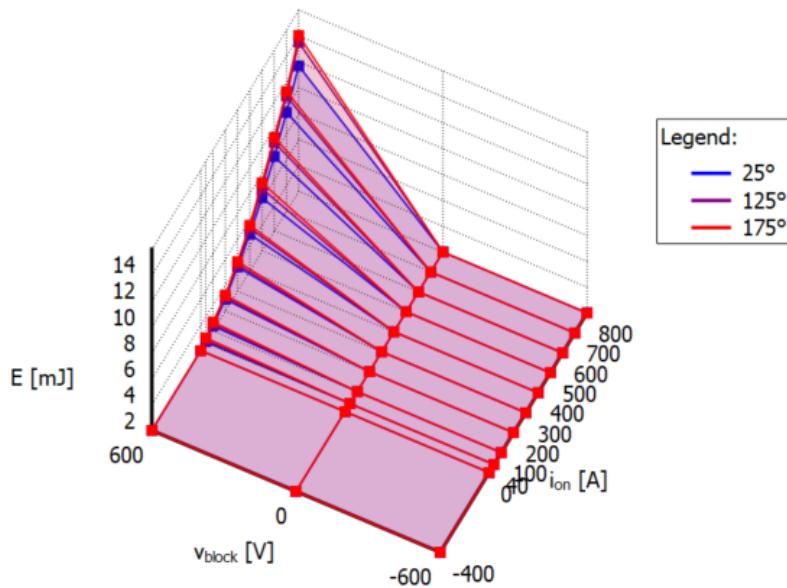


Abbildung 2.5-1: Darstellung der Ausschaltverluste

2.6 Induktive Komponenten

Als Induktive Komponenten werden in der Regel Spulen und Transformatoren betrachtet, diese dienen dazu Energie zu Speichern und zu Übertragen. Transformatoren bieten zusätzlich die Möglichkeit der galvanischen Entkopplung von Stromkreisen. Zur Auslegung von Induktivitäten wird das Delta des Stroms in der Spule benötigt, der sogenannte Stromrippel. Dieser Strom wird meist auf 30 Prozent des Effektivstroms ausgelegt. Der Rippelstrom für Drehstromsysteme kann über Formel 2.6-1 bestimmt werden. Dabei ist die Scheinleistung (S) und Leiterleiterspannung (U_{LL}) die Spannung zwischen den Außenleitern.

$$\Delta I = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot S}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{LL}} \quad (2.6-1)$$

2.7 Simulationsssoftware

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 Entscheidungsgrundlage dienen.

2.7.1 PLECS

Die Software PLECS aus dem Haus PLEXIM wird als Integration in MATLAB mit Simulink verwendet. Diese ermöglicht die Modellierung von Schaltungen mit der Betrachtung des Thermischen Verhaltens durch elektrische Modelle der Verlustleistung. Dazu wird die Energie im Schaltvorgang sowie im durchgeschalteten Zustand in der Schaltung berück-

sichtigt. Dies ermöglicht es die Verlustleistung innerhalb der Halbleiter zur betrachten und damit den Aufwand für die Kühlung und eine Abschätzung der Schaltungseffizienz. Ein Beispiel der Funktionen kann in Abb. 2.7.1-1 gesehen werden, die thermische Kette muss anhand von Datenblättern oder ähnlichem der Kühlkörper bekannt sein. Für die Halbleiter werden thermische Modelle benötigt, die ebenfalls aus Datenblättern erstellt oder vom Hersteller bereitgestellt werden können. Jedoch gibt es nicht für alle Halbleiter ausreichend Informationen und die reale Verlustleistung hängt von vielen Parametern ab. Daher wird es oftmals benötigt eigene Messungen durchzuführen, um die spätere Anwendung bestmöglich simulieren zu können.

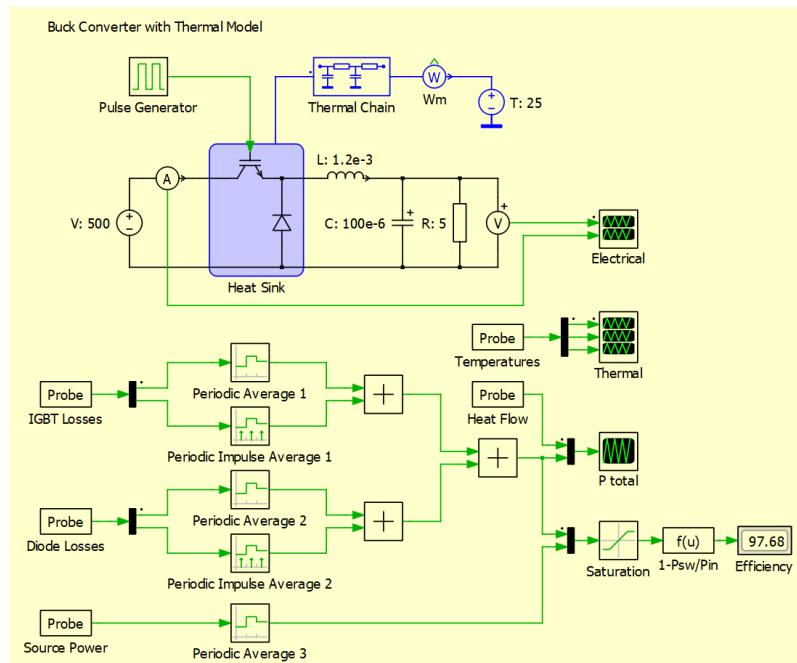


Abbildung 2.7.1-1: Tiefsetzsteller mit Effizienzbestimmung

3 Anforderungen

Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen der beiden Seiten an den Elektrolyseur. Auf der einen fordert der Versorgungsnetzbetreiber u.a. die Einhaltung der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) Richtlinien für den Anschluss an das Stromnetz. Die andere Seite wird vom Hersteller der Elektrolyseur Stacks definiert, wozu es nach heutigem Stand keine Standards gibt.

3.1 Stromnetz

In Deutschland sind die Vorgaben für den Anschluss von Anlagen an das Stromnetz durch den VDE definiert. Je nach Anschlussleistung, Standort und Betriebsverhalten, 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 Anforderungen 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)" [17]. Hierzu zählt unter anderem die Anforderung an die Phasenverschiebung, bei Wirkleistungsbezug darf eine maximale Verschiebung von $\cos(\phi) = 0,95$ was einem Winkel von etwa 18 Grad entspricht auftreten vgl. Abb. 3.1-1. Jedoch kann der Netzbetreiber mit dem Anlagenbetreiber gesonderte Vereinbarungen treffen, dies ermöglicht es Netzdienstleistungen anzubieten. Dies führt zur Anforderung an die Topologie eine Phasenverschiebung von mindestens 18 Grad zu ermöglichen.

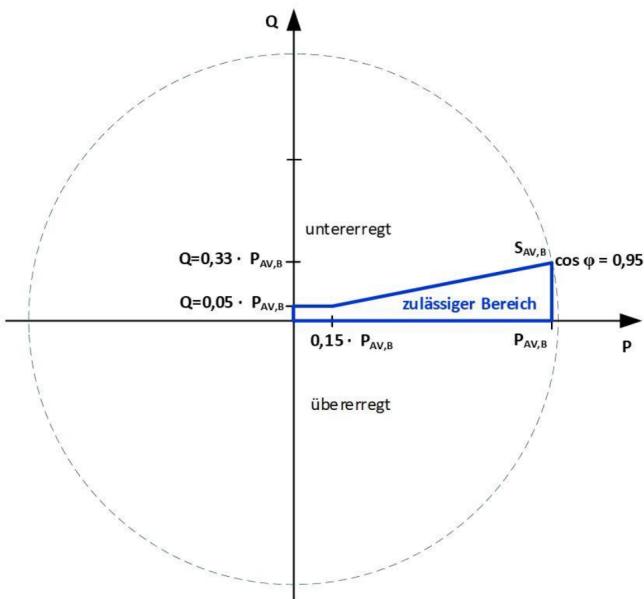
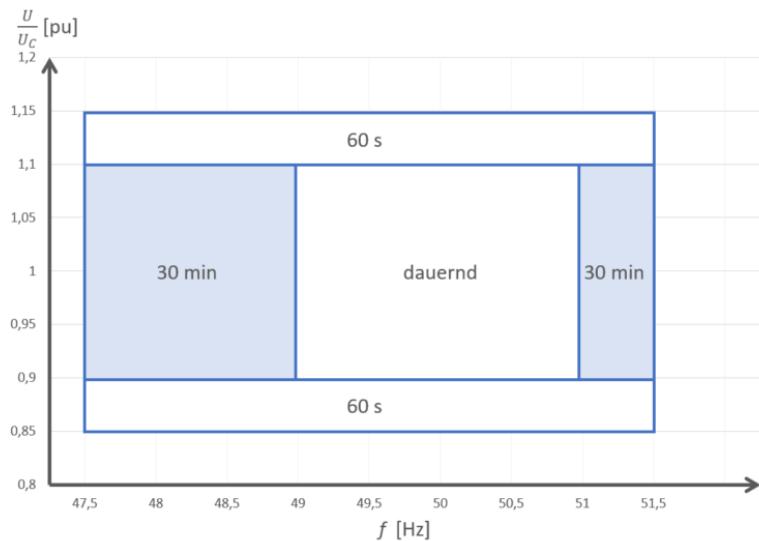


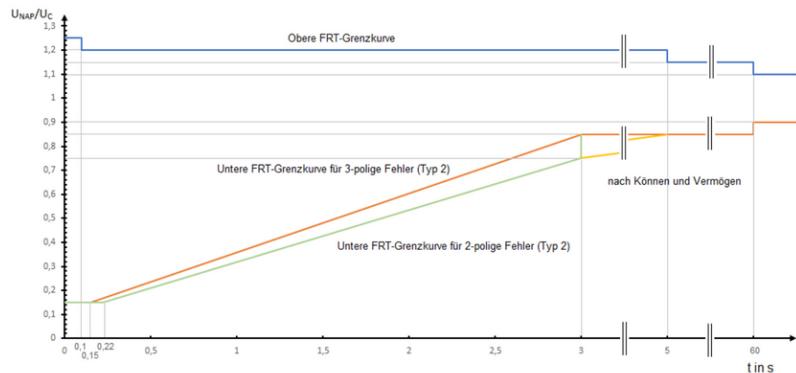
Abbildung 3.1-1: VDE TAR4120: Zulässiger Bereich des Verschiebungsfaktors [17]

Des weiteren sind zeitlich begrenzte Frequenz und Spannungsänderung die auftreten können definiert als quasistationärer Betrieb. Die Netzspannung kann im Bereich von +/- 15 Prozent schwanken, sowie die Frequenz von 50 Hertz zwischen 47,5 und 51,5 variieren vgl. Abb 3.1-2 (a). Innerhalb dieses Bandes muss die Anlage im regulären Betrieb bleiben. Dabei wird ein Gradient von <5 % im Spannungsbereich sowie <0,5 % pro Minute im Frequenzband vorausgesetzt.

Im Fehlerfall durch Blitzeinschlag oder Kurzschluss, muss die Anlage kurzzeitig deutlich stärkere Spannungsschwankungen mit machen. Diese Anforderung wird als FRT bezeichnet und kann für bis zu 100 Millisekunden die Spannung um 25 Prozent erhöhen vgl. Abb. 3.1-2 (b). Aufgrund eines Kurzschlusses kann die Spannung auf 15 Prozent der eigentlichen Netzspannung abfallen. Dies stellt für Verbraucheranlagen eine große Herausforderung dar, da die zu betreibenden Systeme meist eine minimal Spannung benötigen.



(a)



(b)

Abbildung 3.1-2: Mindestanforderungen an den quasistationären Betrieb (a) und FRT (b)

3.1.1 Systemdienstleistungen (SDL)

Die Systemdienstleistungen werden nach VDE-ARN 4141-1 in vier Kategorien unterteilt, diese sind Frequenz- und Spannungshaltung, Netzwiederaufbau und die Betriebsführung.

Durch Technische Anschlussregeln (TAR) werden diese definiert und Anforderungen für Nachweise und Ausschreibungen von SDL gestellt. Eine Übersicht über die technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen in den verschiedenen Spannungsklassen ist in Abb. 3.1.1-1 dargestellt.

**Technische Mindestanforderungen an
Erzeugungsanlagen (Stand 2019)**



	NS	MS	HS	HöS
Unterfrequenz	✓	✓	✓	✓
Überfrequenz	✓	✓	✓	✓
Momentanreserve	✗	✗	✗	✗
RoCoF	✓	✓	✓	✓
Primärregelleistung	✗	✗	✓	✓
Statische Spannungshaltung	✓	✓	✓	✓
Dynamische Netzstützung	✓	✓	✓	✓
Netzrückwirkungen	✓	✓	✓	✓
Schwarzstartfähigkeit	✗	✗	(✓)	(✓)

Abbildung 3.1.1-1: Technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen Stand 2019 [2]

3.1.2 Fault-Ride-Through (FRT)

Aufgrund von Netzfehlern oder Blitzscheinschlag, kann es zu kurzfristiger Erhöhung der Netzspannung kommen, dies wird als Überspannung bezeichnet. Aufgrund dieser Spannungsverhöhung kann es zur Fehlfunktion bis hin zur Zerstörung von Anlagenteilen kommen. Um die Anlage innerhalb der Norm betreiben zu können, müssen Schutzmaßnahmen getroffen werden, um einen Ausfall der Anlage und Schutz der dahinter liegenden Komponenten zu Gewährleisten.

Wichtig hierbei ist es insbesondere bei Spannungseinbrüchen, dass der Wirkleistungsbezug nach dem Fehler wieder möglichst schnell auf das Niveau vor dem Fehler zurückkehrt, falls dieser Reduziert wurde. Dies wird von den vier in Deutschland zuständigen Übertragungsnetzbetreibern gefordert [16].

3.2 Elektrolyseur

Zur Elektrolyse wird eine Gleichspannung benötigt welche aufgrund von Alterungsprozessen, innerhalb der Zellmembrane, mit der Zeit ansteigt [6]. Außerdem wird zu Beginn der Elektrolyse eine niedrige Spannung benötigt um den Prozess zu starten. Daher wird ein Bandbreite von 0 bis einigen 100 Volt benötigt. Um die gewünschte Leistung umsetzen zu können ist es für die Wirtschaftlichkeit relevant den Strom möglichst zu reduzieren, woraus eine höhere Spannung resultiert. Dies wird durch den modularen Zellaufbau unterstützt der eine flexible Systemspannung ermöglicht.

Um die Effizienz und Lebensdauer des Elektrolyseurs nicht zu reduzieren, wird ein maximaler

Stromrippel angegeben. Dieser liegt zwischen 5 und 10 Prozent bei Anlagen bis drei Megawatt, für größere Leistungen und zukünftige Anwendungen soll er kleiner als drei Prozent sein [18].

3.3 Zusammenfassung

Die Anforderungen an den Gleichrichter sind in Tabelle 3.3-1 zusammengefasst, für die Implementierung werden die Zukünftigen Anforderungen als relevant betrachtet.

Tabelle 3.3-1: Anforderungen an den Gleichrichter Aktuell und in Zukunft

	Aktuell	Zukünftig
Leistungsfaktor stationär	>0.95	>0.99
Leistungsfaktor als Systemdienstleistung	keine Angabe	+/- 30°
THD_i	<5 %	<3%
Ausgangsstromrippel	<5 %	<2 %
Ausgangsspannung	< 1000 V	< 1500 V

3.4 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 Vorauswahl

Um die möglichen Optionen einzugrenzen wird im folgenden eine Auflistung der Topologien erstellt und anhand einfacher Kriterien die Auswahl eingegrenzt. Einen guten Überblick über Schaltungen für Dreiphasige Gleichrichter mit Leistungsfaktorkorrektur gibt die Präsentation von Dominik Bortis et al. [3]. Diese bezieht sich auf Systeme mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur. Aufgrund gewünschter Systemdienstleistungen und flexibler Blindleistungsbereitstellung sind Systeme mit Hybrider Kompensation nicht ausreichend.

4.1 Mögliche Topologien

Zur Eingrenzung des Lösungsraums wird zunächst eine Auflistung der möglichen Schaltungstopologien zum Anschluss an das dreiphasige Stromnetz erstellt, vgl. Tabelle 4.1-1. Die 15 aufgelisteten Topologien, begonnen mit dem in ?? dargestellten Diodengleichrichter, werden anhand der benötigten Induktivitäten, Dioden, Schalter und Stufen, sowie der Funktionsweise Hoch- bzw. Tiefstellend bewertet.

Die Tabelle 4.1-1 zeigt, dass sich für eine engere Betrachtung die vier in grün dargestellten Topologien eignen, da diese die im Vergleich wenigstens Induktivitäten und Halbleiter benötigen. Dioden sind aufgrund ihrer simpleren Funktionsweise günstiger als Leistungsschalter und fallen daher nicht so stark ins Gewicht.

Aufgrund der Komplexität der Schaltungen und benötigten Regelungen werden in dieser Arbeit der IAF und 1/3-PWM-PFC betrachtet und die Ergebnisse für eine finale Bewertung aufbereitet.

Tabelle 4.1-1: Topologievergleich zur Vorauswahl

	Induktivitäten	Dioden	Schalter	Buck/Boost	Stufen
3-ΦDiode Bridge Rectifier	3	6	0	-	1
6-Switch Boost PFC Rectifier	3	0	6	Boost	1
Vienna Rectifier	3	6	6	Boost	1
6-Switch Buck PFC Rectifier	1	6	6	Buck	1
Integr. Active Filter (IAF) PFC Rectifier + Buck	2	6	10	Buck	2
Swiss Rectifier	1	8	8	Buck	2
1/3 PWM Boost & Buck PFC Rectifier	4	0	8	Boost/Buck	2
2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier	1	0	14	Buck/Boost	2
Trident Rectifier	6	0	12	Buck/Boost	2
Y-Rectifier	3	0	12	Buck/Boost	2
3-Level Neutral Point Clamped	3	6	12	Boost	1
3-Level Active Neutral Point Clamped	3	0	18	Boost	1
3-Level Active Neutral Point Clamped + Tiefsetzsteller	4	0	20	Boost/Buck	2
Three-Level Flying Capacitor (FC) Boost-Type Rectifier System	3	0	12	Boost	1
Three-Level Flying Capacitor (FC + Tiefsetzsteller)	4	0	14	Boost/Buck	2

5 Simulation

5.1 Randbedingungen

Die Regelung benötigt eine Erkennung des aktuellen Phasenwinkelabschnitts, diese ist implementiert nach [5].

5.2 IAF

[12]

5.2.1 Auslegung der Induktivitäten

5.2.2 Regelung

5.2.3 Ergebnisse

5.3 B6 1/3 PFC Buck

Die in Kapitel 2.4 dargestellte Schaltung wird durch Halbbrücken Module des Typs FF2MR12W3M1H_B11 von Infineon implementiert. Dabei handelt es sich um verbreitete 1200 V Module, sie besitzen einen nominellen Einschaltwiderstand von etwa $2 \text{ m}\Omega$ und können Spitzenströme von bis zu 800 A schalten. Um die Ausgangsleistung auch bei geringerer Spannung bereitstellen zu können und ein späteres Interleaving zu ermöglichen werden für den Tiefsetzsteller zwei Halbbrücken vorgesehen.

5.3.1 Auslegung der Induktivitäten

5.3.2 Regelung

Die Regelung besteht aus einer Kaskadierten Struktur mit vier Stufen. Die erste ist die Ausgangsspannungsregelung, welche durch die Solleistung und Netzspannung die gewünschte äquivalente Phasenimpedanz als Eingangsgröße für die Phasenstromregelung bildet.

In der dritten Stufe wird die Phase mit der mittleren Spannung ausgewählt und die Zwischenkreisspannung Zwischenkreisspannung (U_{pn}) anhand der Phasenlage bestimmt. Die Zwischenkreisspannung resultiert als sechspulsige Gleichspannung und dient als Eingangsspannung für den Tiefsetzsteller. Die mittlere Phasenspannung wird als Referenz für den Tastgrad der entsprechenden Halbbrücke verwendet und prägt somit einen zur Spannung proportionalen Strom ein. Somit wird immer nur eine der drei Halbbrücken getaktet geschaltet, die anderen beiden sind wie bei einem Diodengleichrichter auf die jeweils positivste und negativste Spannung geschaltet.

Die vierte Stufe ist die des Tiefsetzstellers, mit Reglern für den Eingangsstrom sowie die Ausgangsspannung.

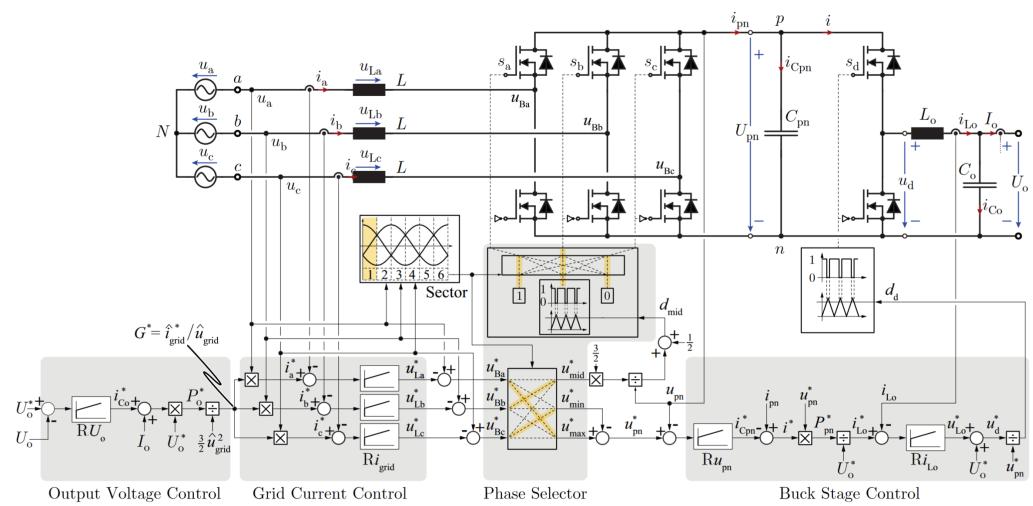


Abbildung 5.3.2-1: Regelung des 1/3-PWM-PFC [7]

6 Auswertung

6.1 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse zur Gesamtbewertung finden sich in Tabelle 6.1-1. Diese beinhaltet die Hardware, welche zum Großteil durch die Induktivitäten beeinflusst wird, sowie die Kapazitäten, Halbleiter und Treiber. Außerdem werden die Ergebnisse der Simulation durch die Verlustleistung der Halbleiter bewertet.

Tabelle 6.1-1: Auflistung der Simulationsergebnisse und Bewertung

	Topologie	B6_Buck	IAF	Gewichtung:
Induktivitäten [uH]	L1 Netzinduktivität	136,0	1,0	
	L2 DC Induktivität	136,0	136,0	
	Gespeicherte Energie	7,8	7,8	
	L3 IAF IVS Induktivität	-	302,2	
	Induktivität normiert:	1,00	0,43	50%
Kapazitäten [uF]	C1 Netzkapazität	-	50,0	
	C2 Kondensator am Elektrolyseur	1,0	1,0	
	C3 DC Zwischenkreis	25,0	50,0	
Halbleiter	Kapazität normiert:	0,26	1,00	5%
	SiC 4 mOhm	0,0	2,0	
	SiC 2 mOhm	10,0	4,0	
	Vienna SiC 5 mOhm	0,0	6,0	
	SiC normiert:	1,00	0,64	15%
Treiber	Vienna Diode	0,0	6,0	
	Dioden normiert	0,0	1,0	5%
	Treiberanzahl	8,0	7,0	
	Treiber normiert:	1,00	0,88	5%
Verluste [W]	Schaltverluste 30 Grad	567,0	503,0	
	Leitverluste 30 Grad	254,0	1311,0	
	30 Grad normiert:	75%	75%	
	Schaltverluste 0 Grad	554,0	511,0	
	Leitverluste 0 Grad	326,0	748,0	
Gesamt	0 Grad normiert:	25%	25%	
	Verluste normiert:	0,50	1,00	20%
		0,813	0,654	100%

6.2 Auswertung

6.2.1 IAF

Aufgrund der Anforderung an Blindleistungsbereitstellung hat die Topologie durch den 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.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Wie in Kapitel 2 erwähnt, sind die Halbleiter Modelle ein essenzieller Teil, daher sollen diese optimiert und in die Simulation zurück geführt werden. Die für diese Schaltung ausgewählten Halbleiter können dazu beschafft und im Prüfstand vermessen werden. Anhand dieser Messdaten kann das Modell validiert und die Simulationsergebnisse somit optimiert werden.

Literatur

- [1] Alberto O. Adan u. a. *The Current Status and Trends of 1,200-V Commercial Silicon-Carbide MOSFETs: Deep Physical Analysis of Power Transistors From a Designer's Perspective*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/MPEL.2019.2909592> (besucht am 21.11.2023).
- [2] Thoralf Bohn. *Von statischer Spannungshaltung bis Kurzschlussstrom – Blindleistung für einen sicheren Systembetrieb* dena-Workshop „Beschaffung von Systemdienstleistungen“. 2019. URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/SDL_Symposium/6_Bohn_FNN.pdf (besucht am 27.12.2023).
- [3] Dominik Bortis. *Advanced Three-Phase PFC-Rectifiers*. 2019. URL: https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/_ECPE_Seminar_Augsburg_3ph_PFC_rectifiers_210519_final_V3.pdf (besucht am 17.12.2023).
- [4] 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).
- [5] 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.
- [6] Chen, Mengxing and Chou, Shih-Feng and Blaabjerg, F. and Davari, Pooya. *Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis*. 2022. URL: [10.3390/app12041906](https://doi.org/10.3390/app12041906) (besucht am 20.11.2023).
- [7] 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.
- [8] IRENA. *GREEN HYDROGEN COST REDUCTION SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [9] 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).
- [10] Walter Schmidt. *Abwärtswandler*. 2023. URL: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smmps/abw_hilfe.html (besucht am 28.12.2023).
- [11] Lukas Schrittwieser. *Ultra-Efficient Three-Phase Buck-Type PFC Rectifier Systems*. 2018. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000311863> (besucht am 23.11.2023).

- [12] 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).
- [13] 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-wasser-stoffprojekte-der-welt--thyssenkrupp-unterzeichnet-vertrag-uber-2gw-elektrolyse-anlage-fur-air-products-in-neom-124583> (besucht am 13.10.2023).
- [14] Toepler, Johannes and Lehmann, Jochen. *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [15] Tom Smolinka, Martin Günther (Fraunhofer ISE) und Jürgen Garche (FCBAT). *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).
- [16] 4 ÜNB. *4-ÜNB-Positionspapier zu Fault-Ride-Through- und Modell- anforderungen an Elektrolyseanlagen*. 2023. URL: https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/%C3%BCber%20uns/studien%20und%20positionspapiere/frt-anforderungen/4-u%CC%88nb-papier_zu_elektrolyse_frt_anforderungen.pdf (besucht am 27.12.2023).
- [17] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. *VDE-ARN 4120:2018-11 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)*. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2018.
- [18] Zhiyu Cao and Peter Wallmeier. *High-Power Rectifier Technologies for Hydrogen Electrolysis*. Warstein: IEEE, 2023.

Inhalt der CD

- Master-Thesis
- Simulationsdaten
- Halbleitermodelle

Anhang

Hier sind wichtige Dinge enthalten bla...