

HOCHSCHULE LUZERN - TECHNIK & ARCHITEKTUR

EAT - LABOR

Wechselrichter einphasig

Pascal Häfliger
Cyrill Knüsel

betreut durch:
Prof. Dr. Adrian OMLIN

6. Mai 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Laboreinrichtung	3
1.2	Ziele	3
1.3	Versuchsaufbau	3
2	Messungen	4
2.1	Grundfrequenztaktung	5
2.1.1	Stromform	5
2.1.2	Einstellen von Wirk- und Blindleistung	7
2.2	Weitere Pulsmuster	10
2.2.1	Eliminierung 3 bis 5 Harmonischer	10
2.2.2	Eliminierung 3 bis 9 Harmonischer	13
2.2.3	Eliminierung 3 bis 21 Harmonischer	14
2.2.4	Sinusträger, grobe Auflösung	16
2.2.5	Sinusträger, feine Auflösung	18
2.3	Fazit	21
3	Messgeräte	21
4	Anhang	22
A	Aufgabenstellung	22

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	3
2	Schema	4
3	U_A	5
4	U_A (orange) , U_L (violett)	5
5	U_L (violett), I_{L1} (blau)	6
6	$P(\theta)(\text{blau})$, $Q(\theta)(\text{grün})$, $S(\theta)(\text{rot})$ von dem Effektivwert in Abhängigkeit des Zündwinkels	7
7	$P1(\theta)(\text{blau})$, $Q1(\theta)(\text{grün})$, $S1(\theta)(\text{rot})$ von dem Effektivwert in Abhängigkeit des Zündwinkels	7
8	Wirkleistung $P(\theta)(\text{blau})$, $P1(\theta)(\text{grün})$ in Abhängigkeit des Zündwinkels	8
9	Blindleistung $Q(\theta)(\text{blau})$, $Q1(\theta)(\text{grün})$ in Abhängigkeit des Zündwinkels	8
10	Blindleistung $P(U_{DC})(\text{blau})$, $P1(U_{DC})(\text{grün})$ in Abhängigkeit der Gleichspannung	9
11	Blindleistung $Q(U_{DC})(\text{blau})$, $Q1(U_{DC})(\text{grün})$ in Abhängigkeit der Gleichspannung	9
12	<i>Zwei Freiheitsgrade</i>	10
13	$U_A(\text{Orange})$	11
14	$U_A(\text{Orange})$, $U_L(\text{Violett})$	11
15	$U_L(\text{Violett})$, $I_{L1}(\text{Hellblau})$	12
16	$U_A(\text{Orange})$	13
17	$U_A(\text{Orange})$, $U_L(\text{Violett})$	13
18	$U_L(\text{Violett})$, $I_{L1}(\text{Hellblau})$	14
19	$U_A(\text{Orange})$	14
20	$U_A(\text{Orange})$, $U_L(\text{Violett})$	15
21	$U_L(\text{Violett})$, $I_{L1}(\text{Hellblau})$	15
22	$U_A(\text{Orange})$	16
23	$U_A(\text{Orange})$, $U_L(\text{Violett})$	16
24	$U_L(\text{Violett})$, $I_{L1}(\text{Hellblau})$	17
25	$U_A(\text{Orange})$	18

26	$U_A(Orange), U_L(Violett)$	18
27	$U_L(Violett), I_{L1}(Hellblau)$	19
28	$P(\theta), Q(\theta), S(\theta)$	19
29	$P(U_{dc}), Q(U_{dc}), S(U_{dc})$	20

Tabellenverzeichnis

1	Kanalbelegung	4
2	Harmonische der Wechselrichterspannung U_A	6
3	Harmonische der Netzspannung	6

1 Einleitung

Selbstgeführte Schaltungen in Wechselrichter kommen immer häufiger zum Einsatz.

In diesem Versuch soll das Funktionsprinzip bei einem einphasigen Wechselrichter praktisch untersucht werden. Insbesondere die typischen Strom- und Spannungsverläufe. Dabei soll untersucht werden wie sich Wirk- und Blindleistung einstellen lassen und welche Auswirkungen dies auf die harmonischen Oberwellen hat.

1.1 Laboreinrichtung

- Mit Netz synchronisierbarer einphasiger Wechselrichter
- Einphasentransformator, 400V / 230V, 25A
- Entkopplungsinduktivität 70mH, 30A
- Maschinenersatz zur DC-seitigen Speisung eines Wechselrichters

1.2 Ziele

- Überprüfen des theoretisch behandelten Verhalten von selbstgeführten einphasigen Stromrichtern
- Einstellen der Wirk- bzw. Blindleistung
- Die Auswirkungen der verschiedenen Pulsmuster auf die harmonischen Oberschwingungen

1.3 Versuchsaufbau

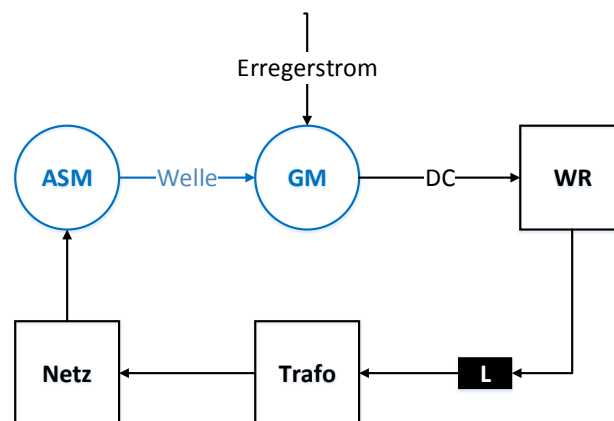


Abbildung 1: Versuchsaufbau

2 Messungen

Schema:

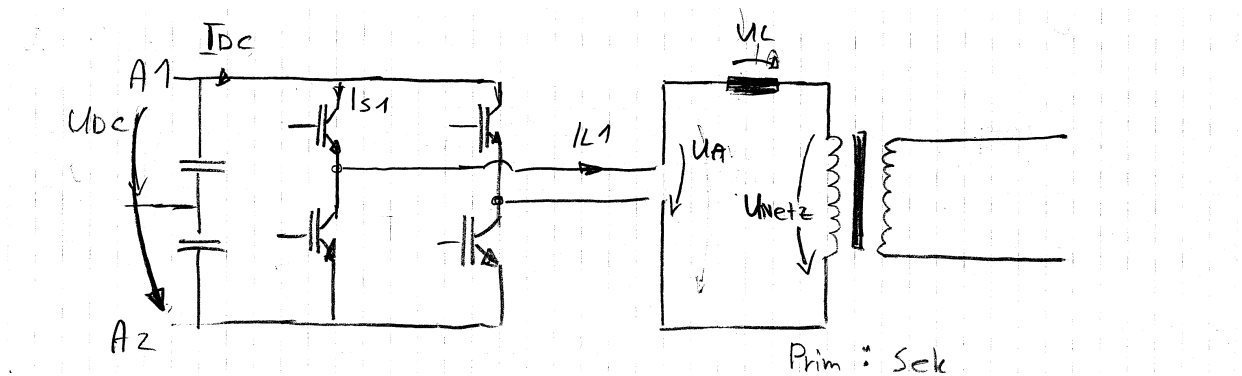


Abbildung 2: Schema

Kanalbelegung beim KO:

Channel	Farbe	Bezeichnung
1	gelb / orange	U_A
2	hellblau	I_{L1} , da Einphasig
3	pink / violette	U_L
4	grün	I_{DC}

Tabelle 1: Kanalbelegung

2.1 Grundfrequenztaktung

Bei der Grundfrequenztaktung entspricht die Ausgangsspannung U_A einer Rechteckspannung $\pm U_{DC}/2$ (siehe Abbildung: 3).

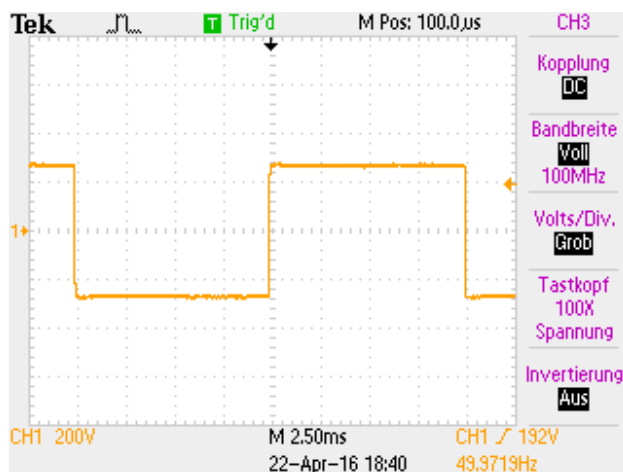


Abbildung 3: U_A

2.1.1 Stromform

Folgende Einstellungen wurden bei diesem Versuch vorgenommen:

- Winkel $\alpha = 0^\circ$
- Wechselrichter ist mit dem Netz synchronisiert.

Die Spannung U_L ist die zeitliche Ableitung des Stromes multipliziert mit der Induktivität.

$$U_L = L * \frac{di}{dt}$$

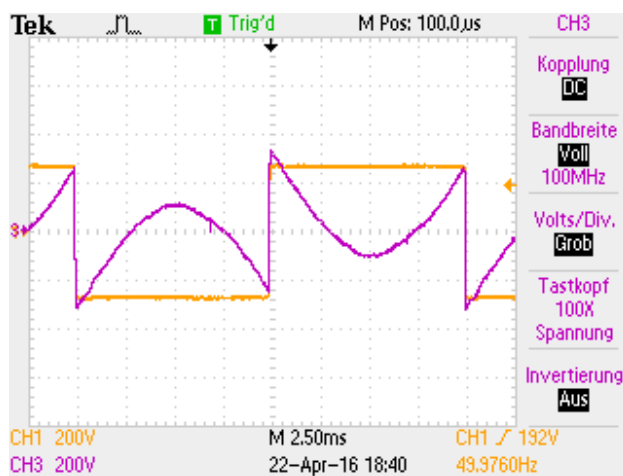


Abbildung 4: U_A (orange) , U_L (violett)

Die Strom I_L ist das Integral der Spannung U_L geteilt durch die Induktivität, zuzüglich des Startwerts.

$$I_L = \frac{1}{L} * \int U_L dt$$

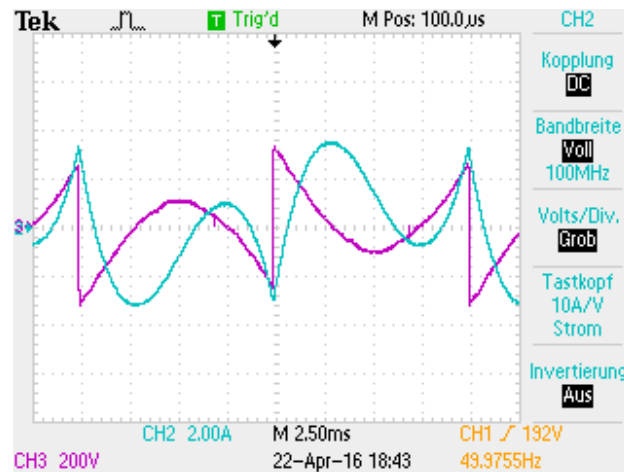


Abbildung 5: U_L (violett), I_{L1} (blau)

Nur die Wechselrichterspannung U_A enthält harmonische Oberschwingungen, nämlich alle ungeraden. Anhand der Tabelle 2 sieht man, dass die Amplitude der v -ten Oberschwingung jeweils um $1/v$ kleiner ist als die der Grundschiwingung.

Harmonische	Wert	Einheit
U_A eff.	253	V
U_A 01	220	V
U_A 02	0.1	%
U_A 03	33.5	%
U_A 05	20	%
U_A 07	14	%
U_A 09	11	%

Tabelle 2: Harmonische der Wechselrichterspannung U_A

Harmonische	Wert	Einheit
U_A 01	220	V
U_A 03	0.1	%

Tabelle 3: Harmonische der Netzspannung

2.1.2 Einstellen von Wirk- und Blindleistung

Bei dieser Messung wurde die Wirk- bzw. Blindleistung anhand des Zündwinkels und der DC-Spannung (Zündwinkel $\theta = 0^\circ$) eingestellt.

Für den Effektivwert wurde die Wirk- bzw. Blindleistung folgendermassen ausgerechnet.

$$S = U \cdot I, U = \text{const} \quad P \text{ abgelesen} \quad Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$$

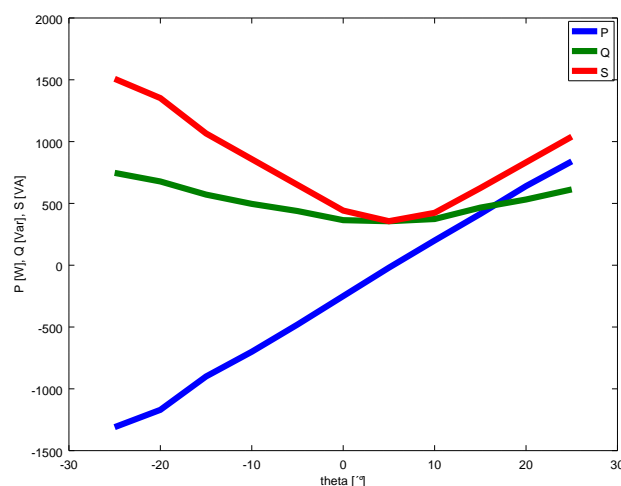


Abbildung 6: $P(\theta)$ (blau), $Q(\theta)$ (grün), $S(\theta)$ (rot) von dem Effektivwert in Abhängigkeit des Zündwinkels

Für die Grundschiwingung wurde die Wirk- bzw. Blindleistung folgendermassen ausgerechnet.

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \quad \underline{I_1} \text{ abgelesen, Trigger auf Strom} \quad P_1 = S_1 \cdot \cos(\phi) \quad Q_1 = S_1 \cdot \sin(\phi)$$

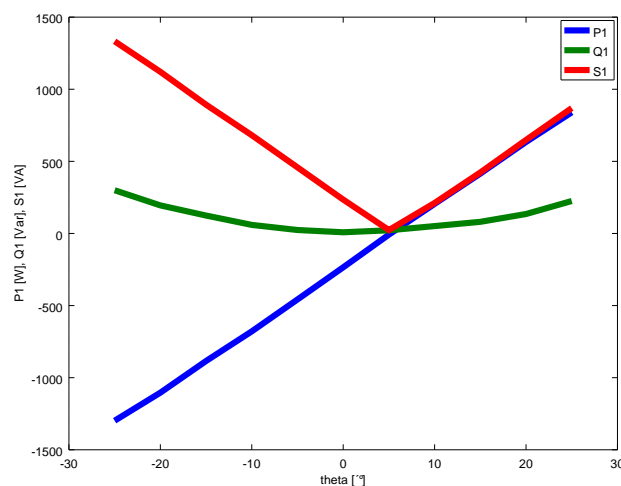


Abbildung 7: $P_1(\theta)$ (blau), $Q_1(\theta)$ (grün), $S_1(\theta)$ (rot) von dem Effektivwert in Abhängigkeit des Zündwinkels

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen nochmals die Wirk- bzw. Blindleistung im direkten Vergleich.

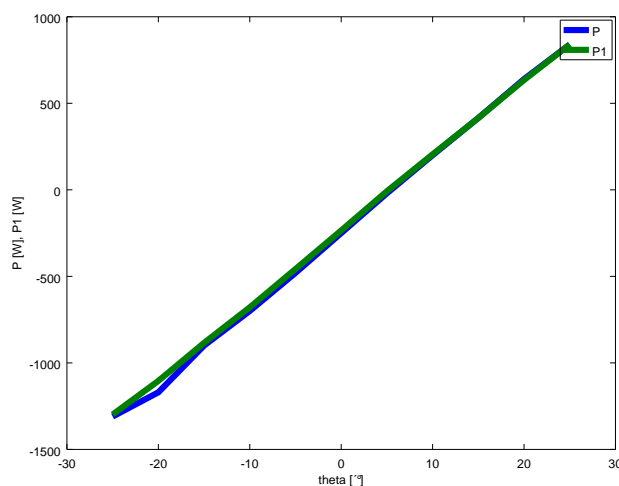


Abbildung 8: Wirkleistung $P(\theta)$ (blau), $P1(\theta)$ (grün) in Abhängigkeit des Zündwinkels

Auffallend ist, dass beim Zündwinkel von -30° die gesamte Wirkleistung kleiner ist als die der Grundschwingung. Eine mögliche Begründung wäre, dass in diesem Betriebspunkt die harmonischen Oberschwingungen zusätzlich Wirkleistung erzeugen und dies das Leistungsmessgerät beim Effektivwert nicht berücksichtigt.

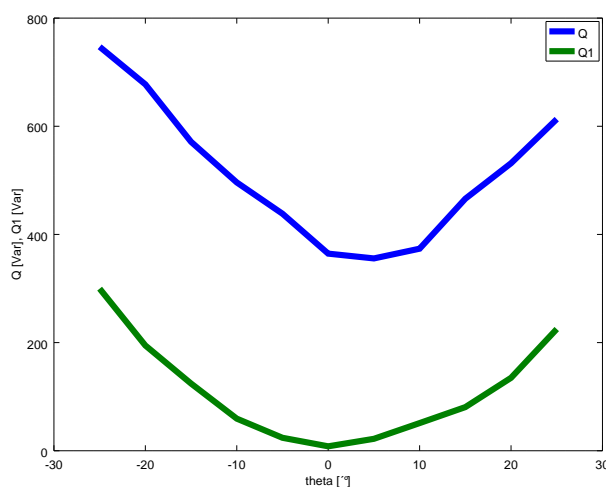


Abbildung 9: Blindleistung $Q(\theta)$ (blau), $Q1(\theta)$ (grün) in Abhängigkeit des Zündwinkels

Die Blindleistung ist immer positiv da diese mit Hilfe des Quadrats berechnet wurde.

Anhand der Abbildungen 6 - 9 ist zu sehen, dass der eingestellte Zündwinkel von $\theta = 5^\circ$ dem effektiven Winkel von 0° entspricht. Denn in diesem Punkt gibt der Wechselrichter weder Wirkleistung ab noch bezieht er Wirkleistung.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Wirk- bzw. Blindleistung in Abhängigkeit von der Gleichspannung. Bei 310 Volt war der Wechselrichter synchron und der eingestellte Zündwinkel betrug 0° .

$$S = U \cdot I \quad \text{I und P abgelesen} \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

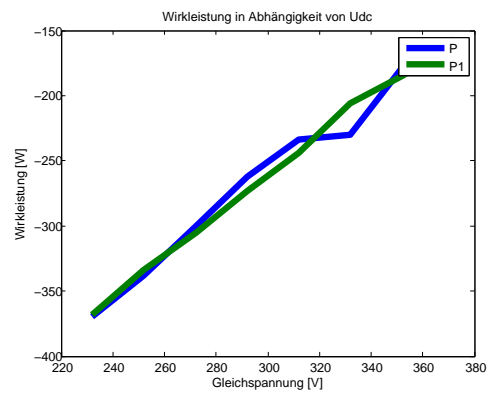


Abbildung 10: Blindleistung $P(U_{DC})(blau)$, $P1(U_{DC})(grün)$ in Abhängigkeit der Gleichspannung

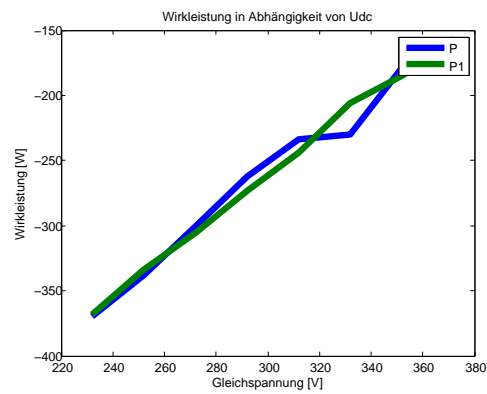


Abbildung 11: Blindleistung $Q(U_{DC})(blau)$, $Q1(U_{DC})(grün)$ in Abhängigkeit der Gleichspannung

2.2 Weitere Pulsmuster

Nebst der Grundfrequenztaktung wurden noch weitere Pulsmuster genauer betrachtet. Dies wäre das optimierte Pulsmuster sowie das Carrier-Verfahren.

Bei dem optimierten Pulsmuster werden gewisse harmonische eliminiert. Die Energie dieser Komponente kann jedoch nicht eliminiert werden und findet sich in anderen harmonischen wieder.

Beim gepulsten Wechselrichter mit PWM (Sinusträger) wird ein Sinus abgesteuert und über einen Komparator ein PWM ausgegeben. Beim Sinus mit grober Auflösung war $f_{Carrier}$ kleiner als beim Sinusträger mit feiner Auflösung.

2.2.1 Eliminierung 3 bis 5 Harmonischer

Bei diesem Verfahren wurde die dritte und fünfte Harmonische eliminiert. Da es sich hierbei um einen zweiphasigen Wechselrichter handelt, ist die dritte Harmonische nicht automatisch eliminiert.

Um zwei Harmonische eliminieren zu können, muss das Steuersignal zwei Freiheitsgrade aufweisen.

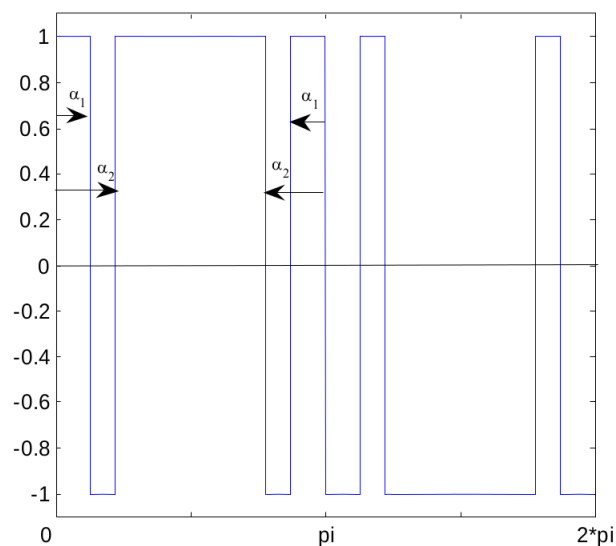


Abbildung 12: Zwei Freiheitsgrade

Durch Berechnen von α_1 und α_2 können bestimmte harmonische entfernt werden, in unserem Fall die dritte und fünfte.

Das Ansteuerungssignal in Abbildung 13 sieht gleich aus wie in Abbilung 12.

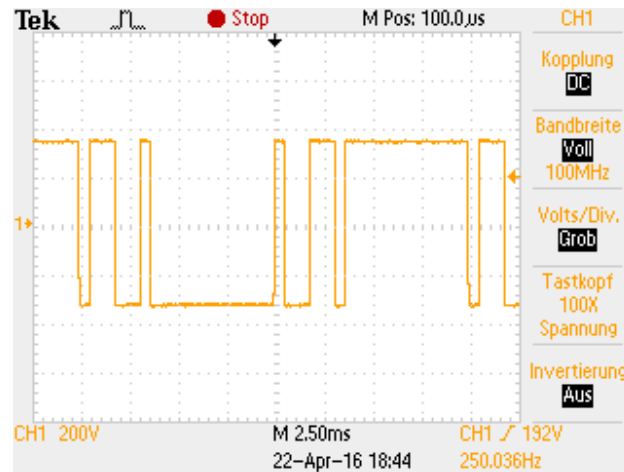


Abbildung 13: $U_A(Orange)$

Die violette Kurve entspricht: $U_L = U_A - U_{Netz}$



Abbildung 14: $U_A(Orange), U_L(Violett)$

Der Stromverlauf I_{L1} richtet sich nach der Spannung U_L . Der Kurvenverlauf von I_{L1} ist sehr gut ersichtlich anhand des Integrales, $I_L = \frac{1}{L} \int U_L dt$.

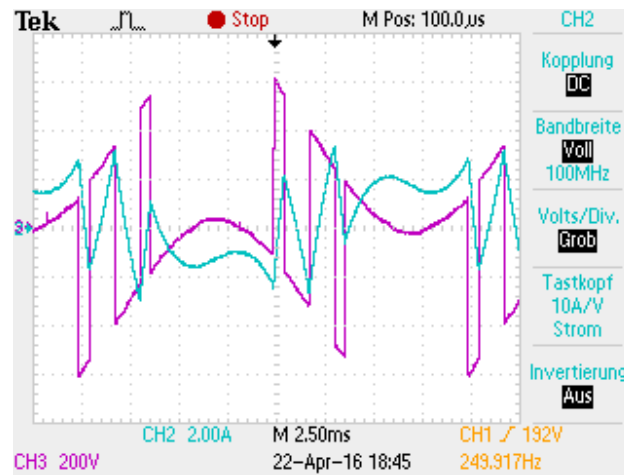


Abbildung 15: U_L (Violett), I_{L1} (Hellblau)

Bei der Messung war ersichtlich, dass der Anteil der dritten und fünften Harmonischen kleiner als 1% war. Dieses Prozent kann durch Messfehler verursacht werden, sowie durch nicht exaktes einhalten von α_1 und α_2

2.2.2 Eliminierung 3 bis 9 Harmonischer

Dieses Pulsmuster basiert auf dem selben Prinzip wie jenes im Kapitel 2.2.1. Jedoch werden hier die [3, 5, 7, 9] Harmonische eliminiert. Um vier Harmonische zu eliminieren, benötigt man vier Freiheitsgrade $[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]$.

Das Ansteuerungssignal hat nun mehrere High-Low-Übergänge, da es nun vier Freiheitsgrade besitzt.

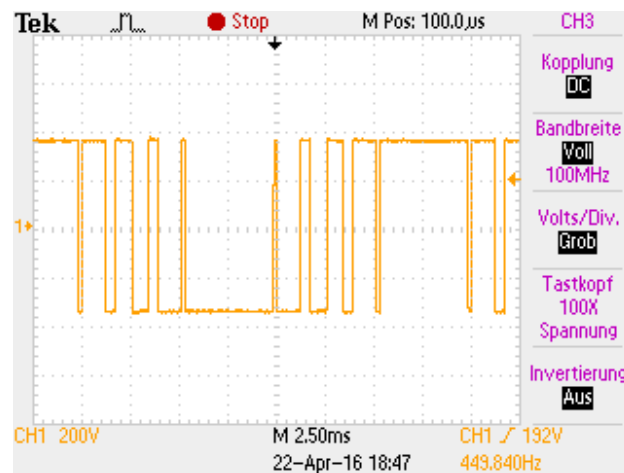


Abbildung 16: $U_A(Orange)$

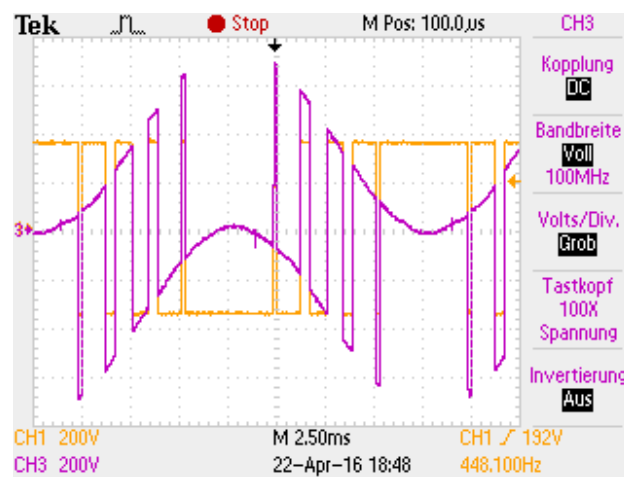
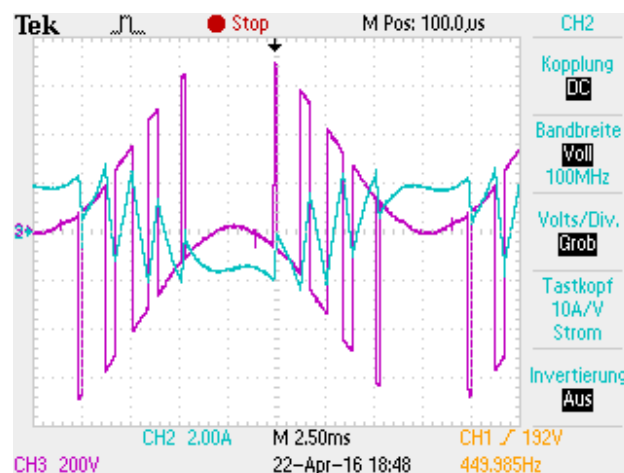


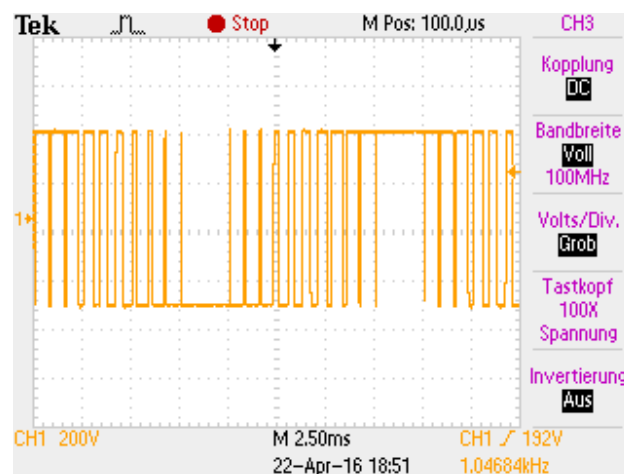
Abbildung 17: $U_A(Orange), U_L(Violett)$

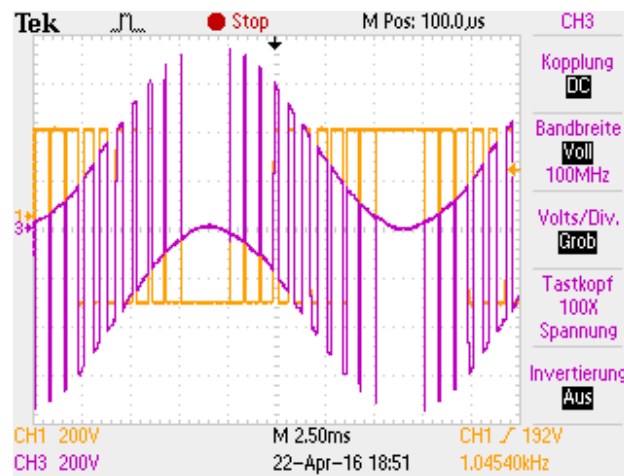
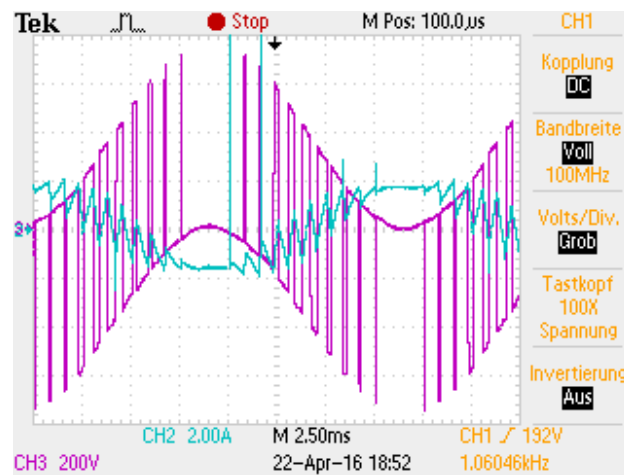
Abbildung 18: U_L (Violett), I_{L1} (Hellblau)

In dem Stromverlauf I_{L1} ist bereits eine Sinusform erkennbar.

2.2.3 Eliminierung 3 bis 21 Harmonischer

Dieses Pulsmuster basiert auf dem selben Prinzip wie jenes im Kapitel 2.2.1. Jedoch werden hier die [3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21] Harmonische eliminiert. Um zehn Harmonische zu eliminieren, benötigt man zehn Freiheitsgrade $[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}]$.

Abbildung 19: U_A (Orange)

Abbildung 20: U_A (Orange), U_L (Violett)Abbildung 21: U_L (Violett), I_{L1} (Hellblau)

In dem Stromverlauf I_{L1} ist nun eine klare Sinusform erkennbar.

2.2.4 Sinusträger, grobe Auflösung

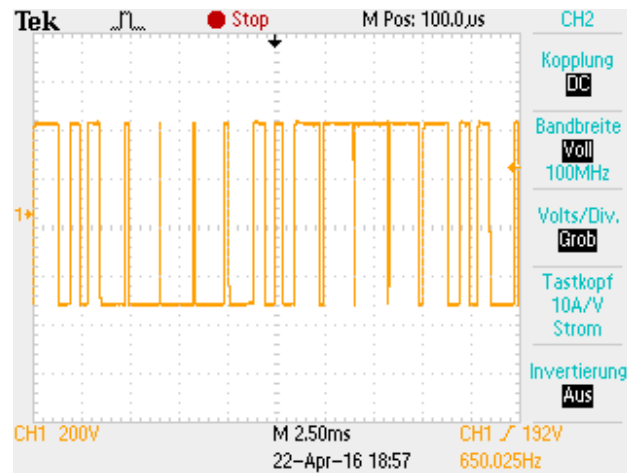


Abbildung 22: $U_A(Orange)$

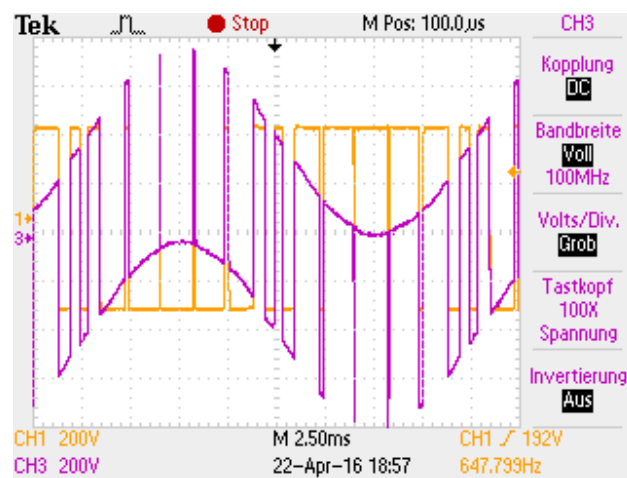
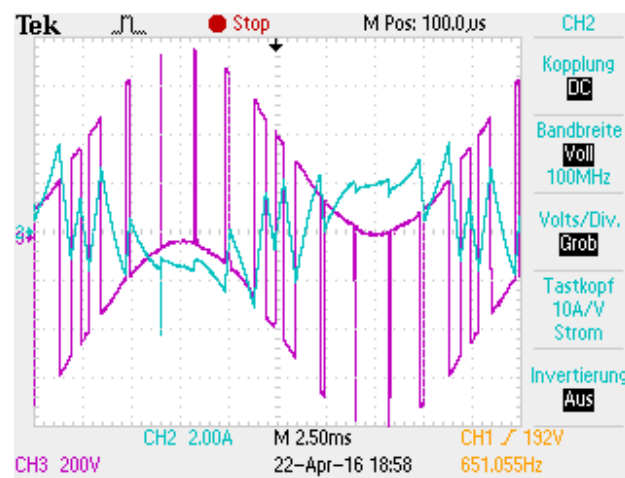


Abbildung 23: $U_A(Orange), U_L(Violett)$

Abbildung 24: U_L (Violett), I_{L1} (Hellblau)

2.2.5 Sinusträger, feine Auflösung

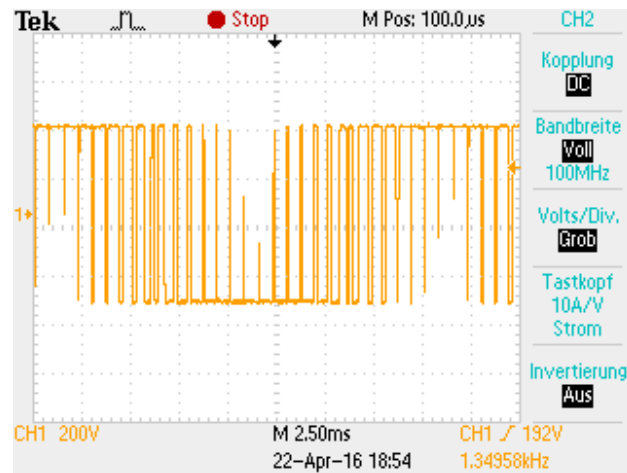


Abbildung 25: $U_A(Orange)$

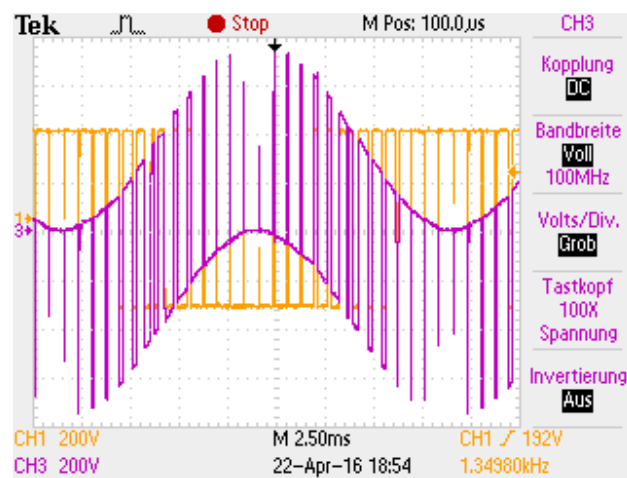
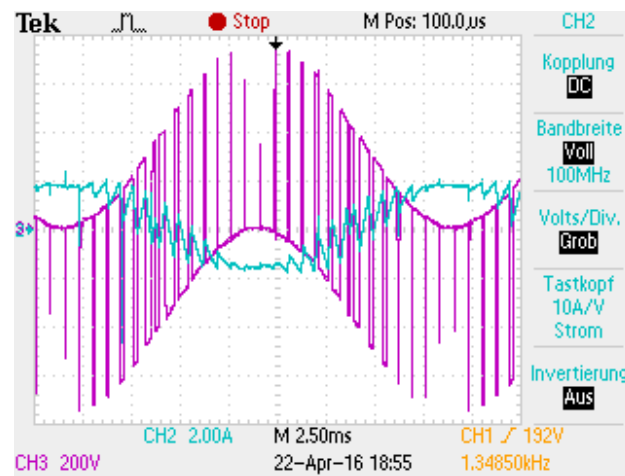
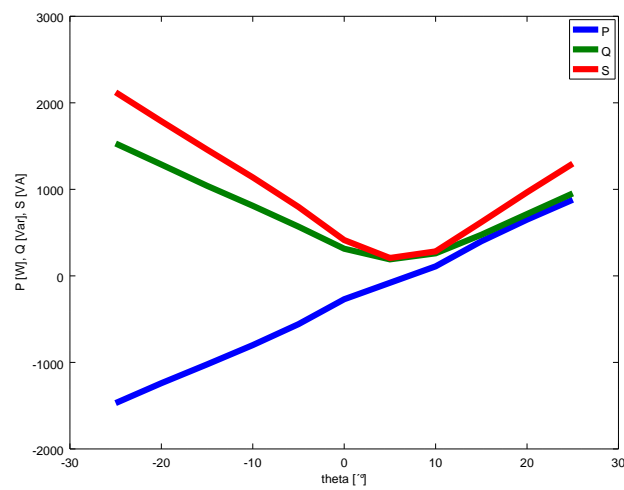
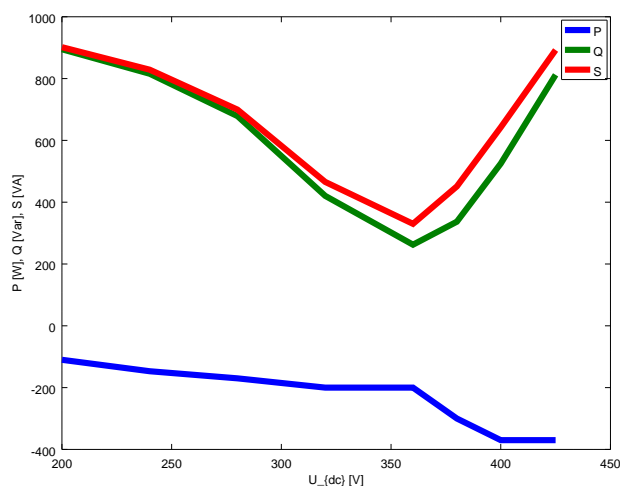


Abbildung 26: $U_A(Orange), U_L(Violett)$

Abbildung 27: U_L (Violett), I_{L1} (Hellblau)

Wirk und Blindleistung

Abbildung 28: $P(\theta)$, $Q(\theta)$, $S(\theta)$

Abbildung 29: $P(U_{dc}), Q(U_{dc}), S(U_{dc})$

2.3 Fazit

Anhand dieses Versuches konnten selbstgeführte Schaltungen nochmals Praktisch vertieft werden und das sich die Wirk- bzw. Blindleistung über den Zündwinkel einstellen lassen. Ebenfalls wie sich die verschiedenen Pulsmuster auf die harmonischen Oberschwingungen auswirken. Um die KO-Bilder bzw. Kurven richtig interpretieren zu können, muss die AC / DC Kopplung richtig gewählt werden. Ebenfalls ist die Skalierung der Spannungsentkoppler-Boxen richtig einzustellen, damit der richtige Wert abgelesen werden kann.

Ein weiterer Punkt der zu beachten ist, ist die Stromrichtung der Stromzangen. Bei getakteten Pulsmustern ist es besser das Leistungsmessgerät via den Strom, welcher per Filter geglättet wird, zu synchronisieren.

3 Messgeräte

Inv. Nummer	Name	Verwendung
545	Tektronix TPS2014	Strom-, Spannungs-Messung
120	PM3000 A	Strom-, Spannungs-Messung für die harmonischen
xxx	DA 1000VN, Differentialmesssonde	
xxx	DA 1000VN, Differentialmesssonde	
xxx	PR 30	Stromzange
xxx	PR 30 A	Stromzange

4 Anhang

A Aufgabenstellung

Versuchsanleitung

Selbstgeführter Stromrichter (WR einphasig)

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	1
2. Einführung	1
3. Verfügbare Einrichtungen	2
4. Ziele	2
5. Vorbereitende Aufgaben.....	3
6. Messungen.....	3
6.1. Grundfrequenztaktung	3
6.1.1. Stromform	3
6.1.2. Einstellen von Wirk- und Blindleistung.....	3
6.2. Weitere Pulsmuster	3
6.2.1. Stromform	3
6.2.2. Einstellen von Wirk- und Blindleistung.....	4
6.2.3. Stromeffektivwert.....	4
6.3. Spannungsbelastung der Halbleiter.....	4
6.4. Diverse Messungen.....	4
7. Materialliste WR einphasig	5

2. Einführung

Der netzseitige Teil eines Frequenzumrichters (FU) kann auf verschiedene Arten realisiert werden:

- Kommt eine Diodenbrücke zum Einsatz, kann die Energie nur vom Netz bezogen werden. Ein Rückspeisen beispielsweise bei einem Antriebsumrichter im Bremsbetrieb ist nicht möglich.
- Wird ein Umkehrgleichrichter mit Thyristoren eingesetzt, ist Rückspeisen möglich. Der $\cos\varphi$ wird vom Steuerwinkel beeinflusst und liegt auch im Normalbetrieb deutlich unter eins. Die Harmonischen sind durch den Schaltungsaufbau mehr oder weniger gegeben.
- Selbstgeführte Schaltungen ermöglichen ebenfalls Energiefluss in beide Richtungen. Weiter kann der $\cos\varphi$ auf einen gewünschten Wert, z.B. eins, eingestellt werden. Die Oberschwingungen sind nicht einfach durch die Schaltung gegeben, sondern sie können zum Beispiel durch eine Erhöhung der Taktfrequenz und/oder eine geschickte Wahl der Pulsmuster deutlich verkleinert werden.

Aus den genannten Gründen kommen in Frequenzumrichtern, aber auch bei andern Netzanwendungen wie Blindleistungskompensatoren, immer häufiger selbstgeführte

Schaltungen, auch als Gleichspannungswechselrichter oder einfach Wechselrichter bezeichnet, zum Einsatz.

In diesem Versuch sollen das Funktionsprinzip und die typischen Strom- und Spannungsverläufe beim einphasigen Wechselrichter praktisch untersucht werden. Es soll auch aufgezeigt werden, wie sich Wirk- und Blindleistung einstellen lassen und wie sich die Harmonischen beeinflussen lassen.

Der einphasige Wechselrichter ist über eine Entkopplungsinduktivität und einen Transformator ac-seitig mit dem Netz verbunden. Die dc-Seite ist mit der Ankerwicklung einer Gleichstrommaschine (GM) verbunden. Die GM wird von einer Asynchronmaschine, die fest mit dem Netz verbunden ist, mit einer nahezu konstanten Drehzahl angetrieben. So lässt sich die dc-Spannung am Wechselrichter (bei FUs als Zwischenkreisspannung bezeichnet) über den Erregerstrom der GM einstellen. Damit lässt sich auch bei festem Pulsmuster die Amplitude der Wechselrichter-Ausgangsspannung einstellen.

Neben der Zwischenkreisspannung lässt sich auch der Winkel zwischen der Wechselrichter-Ausgangsspannung und der Netzspannung über Tasten auf der Bedienpaneele einstellen. So kann die Spannung über der Entkopplungsinduktivität und damit der vom Netz bezogene bzw. der ins Netz eingespeiste Strom eingestellt werden.

3. Verfügbare Einrichtungen

Nebst den im Labor generell verfügbaren Einrichtungen sind folgende Geräte vorhanden:

- mit dem Netz synchronisierbarer einphasiger Wechselrichter
- Einphasentransformator, 400 V / 230 V, 25 A
- Entkopplungsinduktivität 70 mH, 30 A
- Maschinensatz zur dc-seitigen Speisung des Wechselrichters.

Der Versuchsaufbau ist bereits verkabelt und soll nach Versuchsende verkabelt bleiben.

Der Spannungspfad des Leistungsmessgerätes PM 3000 lässt sich mittels Umschalter auf die Netz- oder auf die Wechselrichter-Ausgangsspannung schalten.

4. Ziele

Der/die Studierende...

- überprüft das theoretisch behandelte Verhalten des selbstgeführten einphasigen Stromrichters.
- weiss, wie sich die Wirkleistung einstellen lässt.
- weiss, wie sich die Blindleistung einstellen lässt.

- weiss, wie sich verschiedene Pulsmuster auf die Oberschwingungen auswirken.
- erlangt Sicherheit bei der Interpretation von Spannungs- und Stromverläufen bei selbstgeführten Stromrichtern.

5. Vorbereitende Aufgaben

Repetieren Sie das Kapitel Wechselrichter im ET+ELO-Skript.

Skizzieren Sie den zu erwartenden Stromverlauf, wenn der Wechselrichter mit Grundfrequenztaktung betrieben wird. Nehmen Sie an, dass die Grundschiwingung der Wechselrichter-Ausgangsspannung mit der Netzspannung übereinstimmt.

Wie kann die Wirk- und Blindleistung beeinflusst werden? Falls Sie keine Antwort finden, schauen Sie die Zeigerdiagramme der Synchronmaschine an.

6. Messungen

6.1. Grundfrequenztaktung

6.1.1. Stromform

Nehmen Sie den Laboraufbau in Betrieb und Überprüfen Sie den von Ihnen als Vorbereitung gezeichneten Stromverlauf.

Welche Harmonischen erwarten Sie in der Wechselrichter-Ausgangsspannung und im Netzstrom? Wie gross sind sie?

6.1.2. Einstellen von Wirk- und Blindleistung

Verändern Sie den Winkel ϑ zwischen Wechselrichter-Ausgangsspannung und Netzspannung und stellen Sie $P(\vartheta)$ und $Q(\vartheta)$ sowie $P_I(\vartheta)$ und $Q_I(\vartheta)$ graphisch dar (der Index 1 bezeichnet die Grundschiwingung).

Verändern Sie die dc-Spannung U_{dc} und stellen Sie $P(U_{dc})$ und $Q(U_{dc})$ sowie $P_I(U_{dc})$ und $Q_I(U_{dc})$ graphisch dar.

Welchen Einfluss haben die Veränderungen des Winkels ϑ und der dc-Spannung auf die Harmonischen?

6.2. Weitere Pulsmuster

6.2.1. Stromform

Wie verändert sich die Stromform bei den verschiedenen Pulsmustern?

Welche Oberschwingungen sind vorhanden und wie gross sind sie? Am einfachsten Vergleichen sie die verschiedenen Pulsmuster für einen bestimmten Lastpunkt z.B. $P = 1.5 \text{ kW}$ und $Q_I = 0$.

6.2.2. Einstellen von Wirk- und Blindleistung

Funktioniert das Einstellen von Wirk- und Blindleistung immer noch wie bei Grundfrequenztaktung?

Stellen Sie $P(\mathcal{G})$ und $Q(\mathcal{G})$ sowie $P(U_{dc})$ und $Q(U_{dc})$ für das Pulsmuster mit den tiefsten Harmonischen graphisch dar.

Auf welchen Wert lässt sich der $\cos\varphi$ und der Leistungsfaktor λ bei einer Wirkleistung von $P = 1.5 \text{ kW}$ optimieren.

6.2.3. Stromeffektivwert

Wie gross ist der Effektivwert des Netzstromes bei den verschiedenen Pulsmustern?

6.3. Spannungsbelastung der Halbleiter

Wie sieht der zeitliche Verlauf der Spannung über einem Halbleiter aus?

Wie sieht der zeitliche Verlauf des Stromes durch einen Halbleiter aus?

Skizzieren Sie die Kurvenverläufe.

6.4. Diverse Messungen

Wie gross ist der Klirrfaktor bei Grundfrequenztaktung und bei zwei weiteren frei gewählten Pulsmustern?

Tragen die Oberschwingungen zur Wirkleistung bei?

In welchem Bereich ändert die Drehzahl der Asynchronmaschine?

7. Materialliste WR einphasig

Laborturm

Einphasiger Wechselrichter mit Ansteuerung

Entkopplungsinduktivität 70 mH, 30 A

Einphasentransformator 400 V / 230 V, 25 A

Gleichstrommaschine 6 kW, 500 V

Asynchronmaschine 5.5 kW, 3 x 400 V

Kabelsatz für vollständige Verkablung des Versuchs

Voltech Power-Analyzer PM 3000

Spannungswahlschalter für PM 3000

Multimeter Metra Hit 18S

Vierkanal Oszilloskop

Nicht erwähnt:

Stromzangen

Spannungs-Mess-Trennverstärker