



GRUNDSCHALTUNGEN DER LEISTUNGSELEKTRONIK

ÜBUNG

EINPHASEN- UND DREIPHASEN- SPANNUNGSWECHSELRICHTER

Inhalte:

- Einphasen-Spannungswechselrichter
 - Prinzipielle Funktionsweise
 - Aussteuergrad
 - Frequenzverhältnis
 - Oberschwingungsanalyse

- Dreiphasen-Spannungswechselrichter
 - Herleitung Ersatzschaltbild
 - Prinzipielle Funktionsweise
 - Erstellung Simulationsmodell

1 Einphasen-Spannungswechselrichter

In der Tutorial-Übung zur Schaltungssimulation mit LTSpice wurde das Simulationsmodell eines Einphasen-Spannungswechselrichters erstellt. Mit Hilfe dieses Modells können unterschiedliche Betriebszustände untersucht werden bzw. unterschiedliche Fragestellungen beantwortet werden.

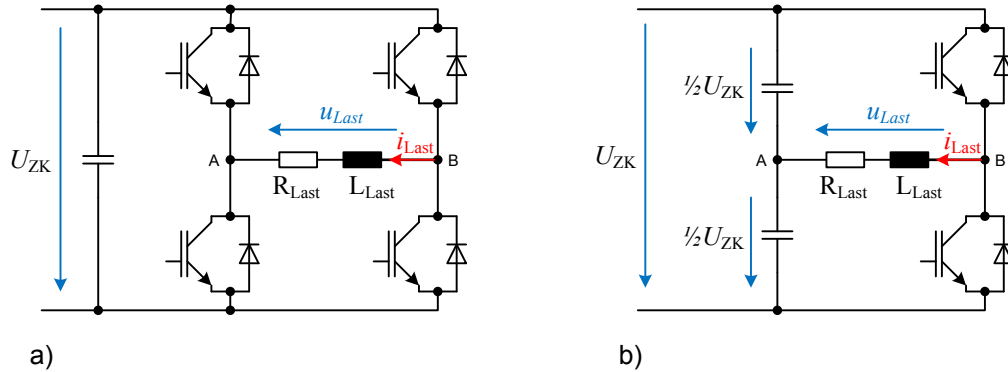


Abbildung 1.1: Prinzipieller Schaltplan von Einphasen-Spannungswechselrichtern

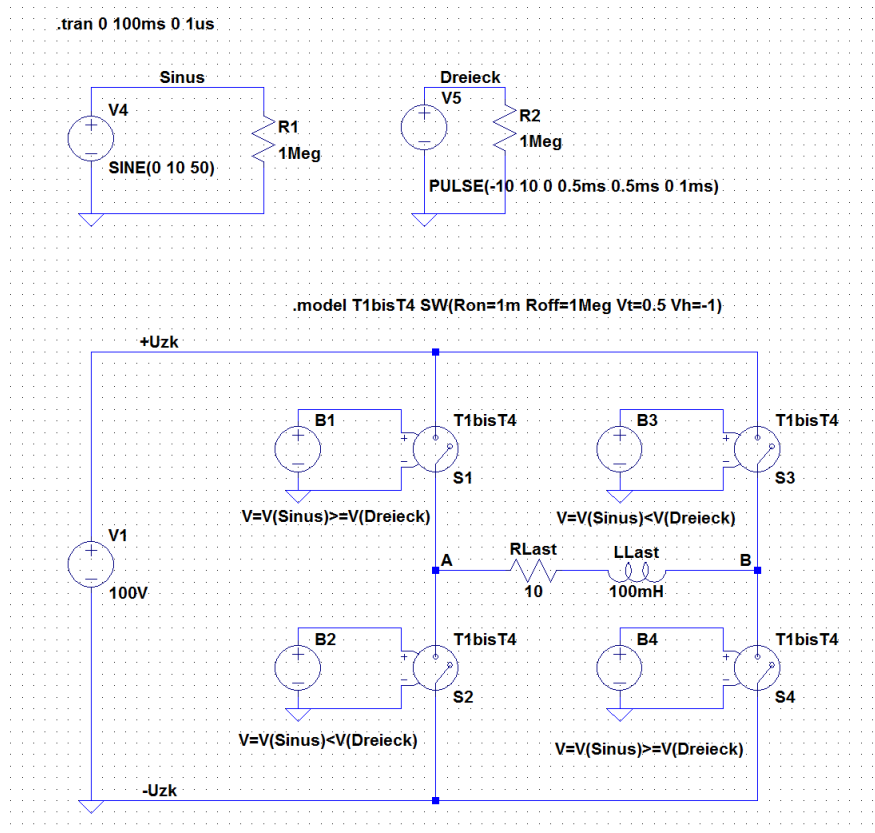


Abbildung 1.2: LTSpice-Simulationsmodell eines Einphasen-Spannungswechselrichters

1. Aufgabe:

- 1.1. Beschreiben Sie die Funktionsweise des Unterschwingungsverfahrens.
- 1.2. Wie sind der Aussteuergrad m_a und das Frequenzverhältnis m_f definiert?
- 1.3. Welchen positiven und welchen negativen Maximalwert kann die Spannung über der Last (u_{Last}) bei der Schaltung in Abb. 1.1 a) und in Abb. 1.1 b) erreichen?
- 1.4. Erklären Sie die Begriffe *Lineare Aussteuerung*, *Übermodulation* und *Grundfrequenztaktung*.
- 1.5. Welche Anforderungen sind bei der Wahl des Frequenzverhältnisses beim Unterschwingungsverfahren für Einphasen-Spannungswechselrichter zu berücksichtigen?
- 1.6. Was versteht man unter "synchronisierter" und "unsynchronisierter" Pulsweitenmodulation? Wann ist eine Synchronisation sinnvoll?
- 1.7. Welchen Einfluss haben Aussteuergrad und Frequenzverhältnis auf Amplitude und Frequenz der Oberschwingen bzw. das Frequenzspektrum der Ausgangsspannung?

zu 1.1) und 1.2)

sinusförmige Steuerspannung (= Sollwert für Grundschwingung der Spannung über der Last)

Vergleich mit dreieckförmiger Vergleichsspannung führt zu Schaltzeitpunkten

✓ => Über der Last liegen positive und negative Spannungsblöcke an, deren Breite moduliert wird

✓ => Induktivität in der Last führt je nach Größe der Induktivität zu mehr oder weniger rippelbehaftetem sinusförmigen Stromverlauf

Modulationsgrad bzw. Aussteuergrad:

$$m_a = \frac{\text{Amplitude Steuerspannung}}{\text{Amplitude Dreiecksspannung}}$$

Frequenzverhältnis:

$$m_f = \frac{\text{Frequenzdreiecksspannung}}{\text{Frequenzsteuerspannung}}$$

zu 1.3)

$$\text{Abb. 1.1.a)} \Rightarrow +U_{\text{Last,max}} = +U_{\text{ZK}} \quad -U_{\text{Last,max}} = -U_{\text{ZK}}$$

$$\text{Abb. 1.1.b)} \Rightarrow +U_{\text{Last,max}} = +\frac{1}{2}U_{\text{ZK}} \quad -U_{\text{Last,max}} = -\frac{1}{2}U_{\text{ZK}}$$

zu 1.4)

Lineare Aussteuerung liegt vor, solange der Dachwert der sinusförmigen Steuerspannung kleiner oder gleich dem Dachwert der Dreiecks-Vergleichsspannung ist. Während jeder Periode der Dreiecksspannung gibt es genau zwei Schnittpunkte mit der Steuerspannung, zu denen dementsprechend über der Last zwischen + oder – der Zwischenkreis-Gleichspannung U_{ZK} (siehe V(B,A) in Abb. 1.3) umgeschaltet wird. Nur in diesem Aussteuerbereich kann auch ein sinusförmiger Strom in der Last erzeugt werden.

Bei *Übermodulation* ist der Dachwert der sinusförmigen Steuerspannung größer als der Dachwert der Dreiecks-Vergleichsspannung. Im Bereich des pos. und neg. Maximums der Steuerspannung entfallen zunehmend Umschaltzeitpunkte, so dass die Spannungsblöcke über der Last immer breiter werden. Der Vorteil gegenüber der linearen Aussteuerung ist die größere "*Spannungs-Zeit-Fläche*", sodass auch höhere Stromamplituden erreicht werden können. Nachteilig ist, dass der Stromverlauf zunehmend nicht-sinusförmig wird, was einem erhöhten Oberschwingungsanteil im Strom entspricht.

Bei der *Grundfrequenztaktung* wird die Amplitude der Steuerspannung so weit erhöht, dass kein Schnittpunkt mit der Dreiecks-Vergleichsspannung mehr existiert. Die Spannung über der Last besteht nur noch aus einem positiven und einem negativen U_{ZK} -Spannungsblock pro Periode. Sowohl die Spannungszeitfläche über der Last, als auch der resultierende Strom erreichen ihren Maximalwert.

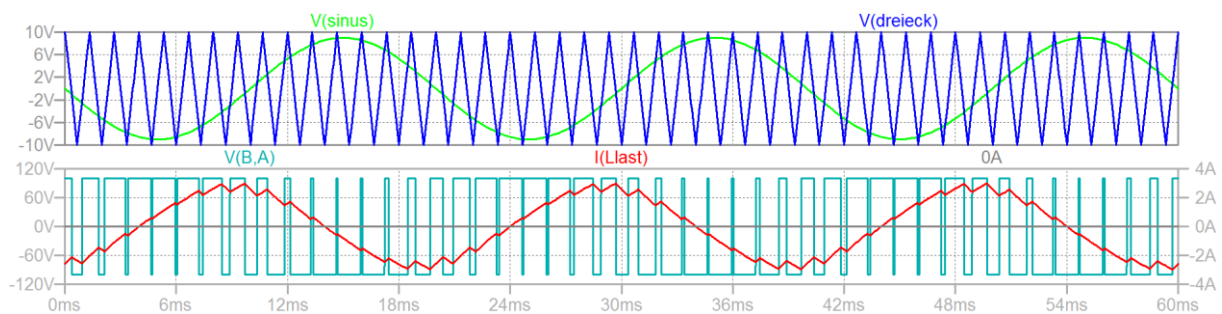


Abbildung 1.3: Beispiel für lineare Aussteuerung mit Aussteuergrad = 0,9

$$\hat{I} = 3A$$

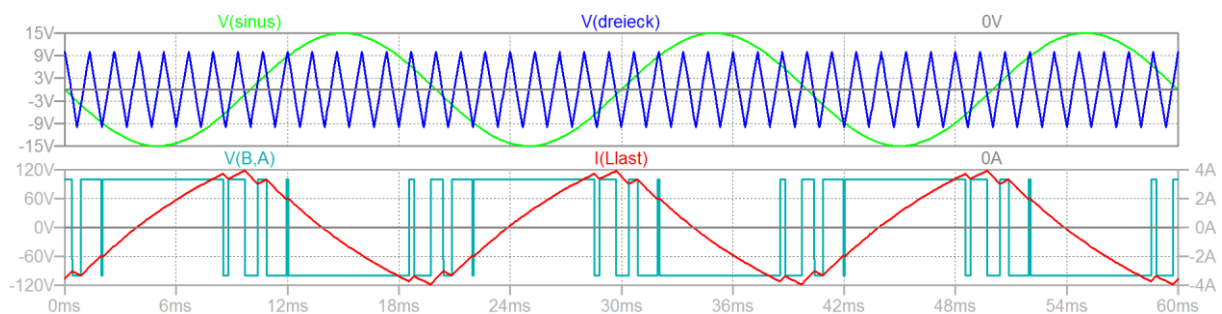


Abbildung 1.4: Beispiel für Übermodulation, z.B. Aussteuergrad = 1,5

$$\hat{I} \approx 4A$$

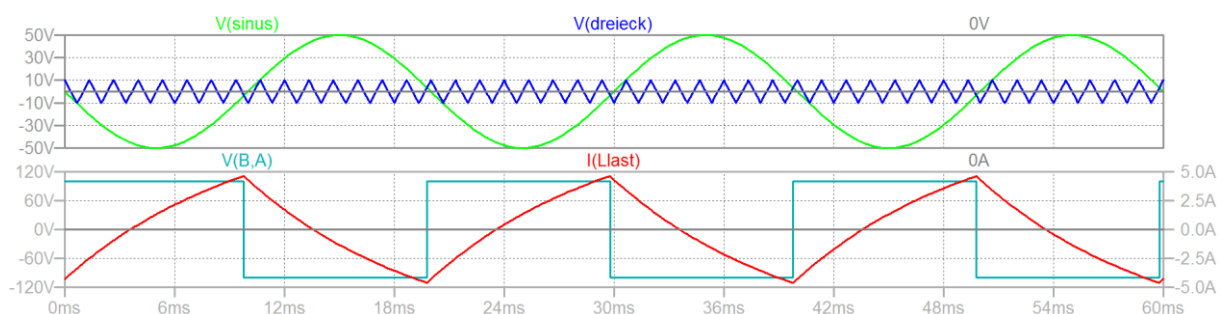


Abbildung 1.5: Beispiel für Grundfrequenztaktung

$$\hat{I} \approx 4.5A$$

zu 1.5) und 1.6)

- Frequenz Dreiecksspannung deutlich größer als Frequenz Steuerspannung (z.B. $m_f > 10$)
- bei kleinem m_f -Wert sollte Dreiecksfrequenz ein ungerade Vielfaches der Sollspannungsfrequenz sein = synchronisierte Taktung

$$\Rightarrow m_f = 3, 5, 7, 9$$

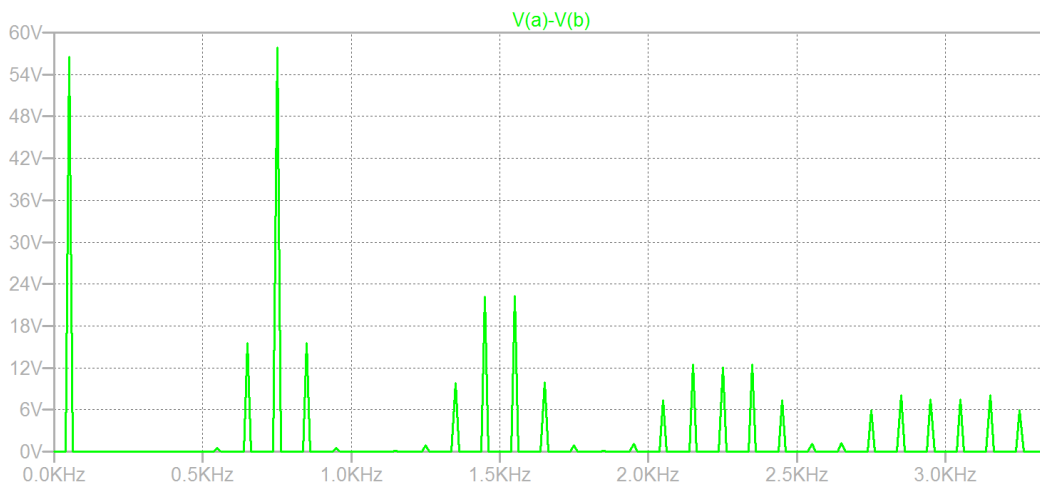
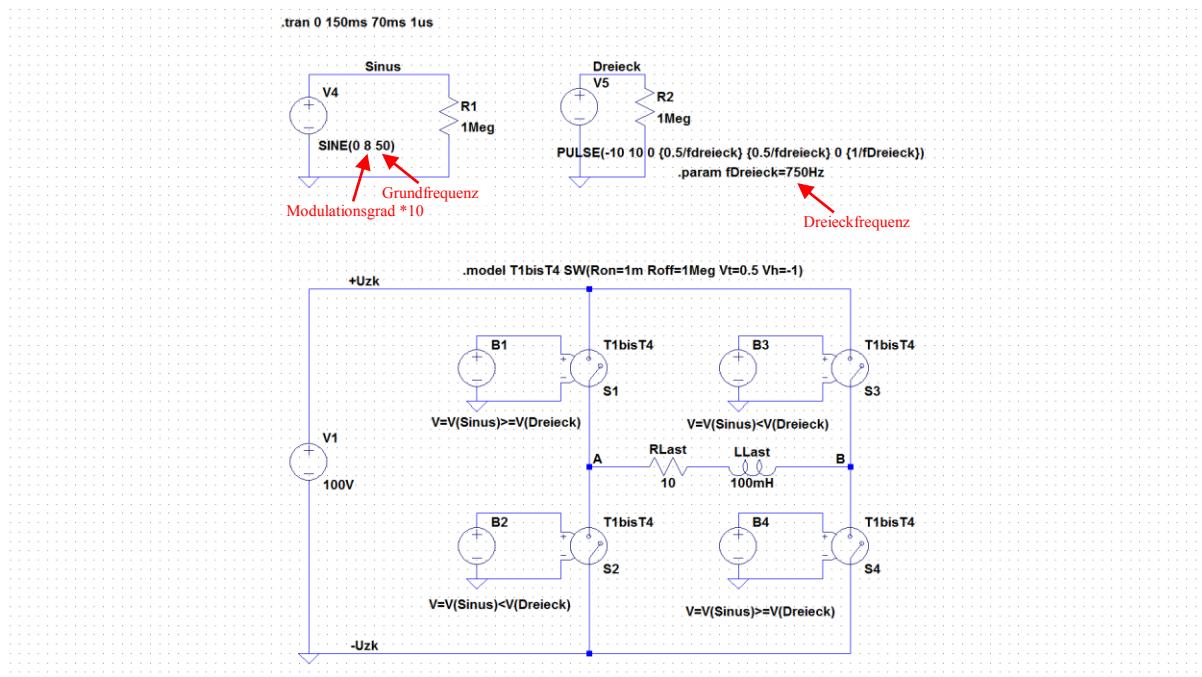
\Rightarrow synchronisierte Taktung bzw. synchronisierte Pulsweitenmodulation verhindert Schwebungen in der Ausgangsspannung bzw. eine schwankende Grundfrequenz der Ausgangsspannung \rightarrow 振动, 干涉

zu 1.7) siehe auch VL-Folien

\Rightarrow tendenziell gilt: je größer m_f und je größer der Aussteuergrad (aber $m_a \leq 1$), desto geringer wird der Anteil an Oberschwingungen bezogen auf die Grundschwingungsamplitude

(课半里)

Simulationsbeispiel mit LTSpice: $m_a = 0,8$ und $m_f = 15$



2 Dreiphasen-Spannungswechselrichter

Analog zum Funktionsprinzip eines Einphasen-Spannungswechselrichters kann durch simples Vervielfältigen der in Abb. 1.1 b) gezeigten Schaltung ein Dreiphasen-Spannungswechselrichter realisiert werden. Statt an eine geteilte Zwischenkreis-Gleichspannung werden drei Lastanschlüsse zu einem gemeinsamen sogenannten 'Sternpunkt' bzw. 'Mittelpunkt (M)' verschaltet.

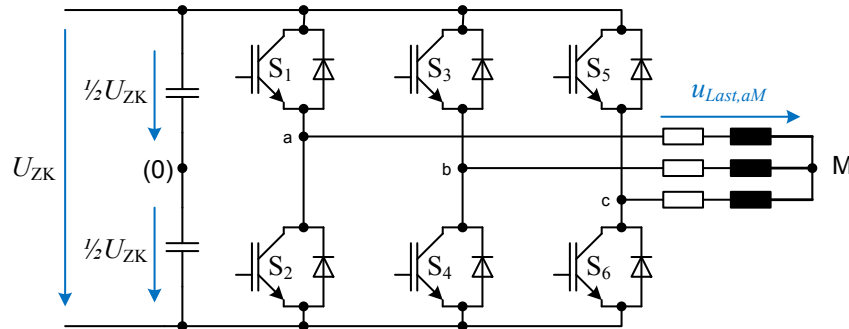


Abbildung 2.1: Prinzipielles Ersatzschaltbild eines Dreiphasen-Spannungswechselrichters

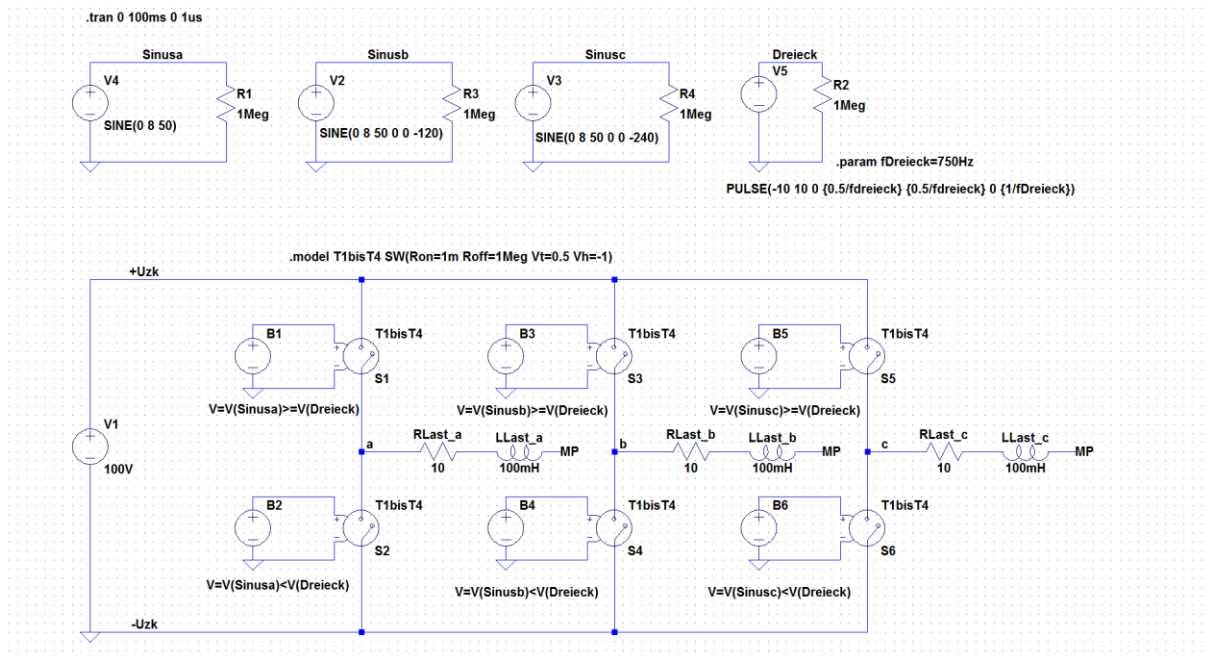


Abbildung 2.2: LTSpice-Simulationsmodell eines Dreiphasen-Spannungswechselrichters

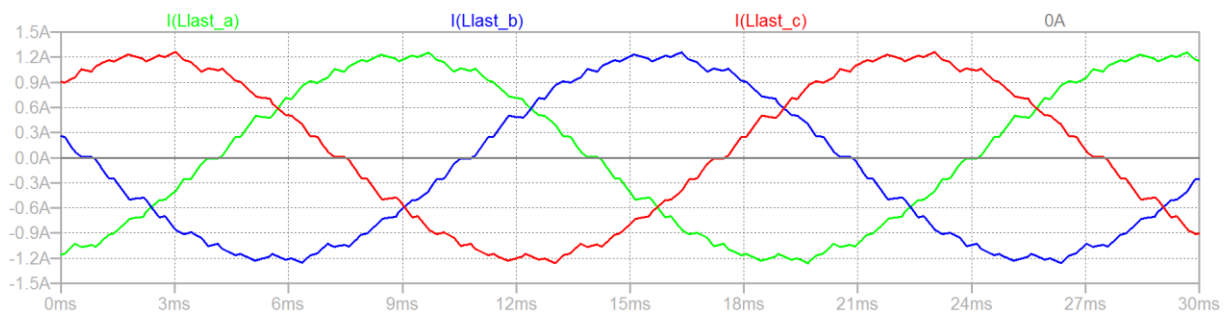
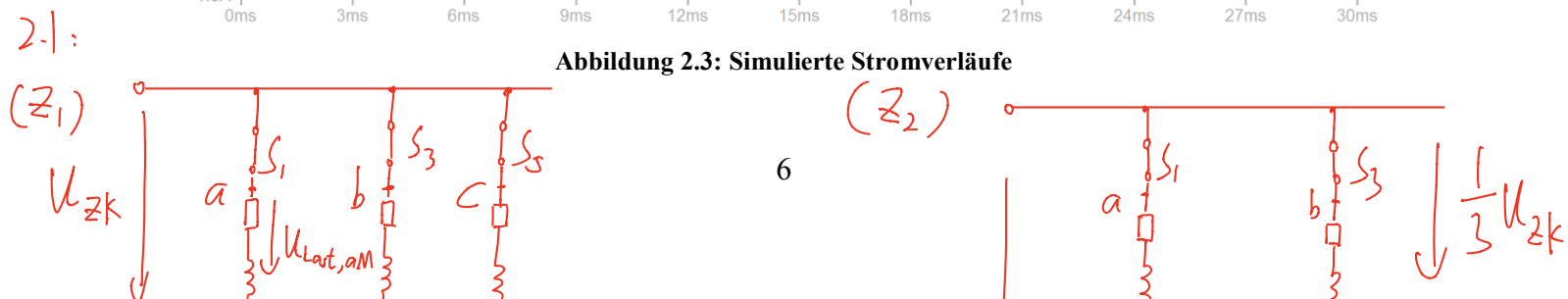


Abbildung 2.3: Simulierte Stromverläufe



2. Aufgabe:

- 2.1. Welche sinnvollen Schaltkombinationen sind für den Dreiphasen-Spannungswechselrichter möglich?
- 2.2. Welche Werte kann die Spannung über jeweils einen der drei Laststränge (z.B. $u_{\text{Last,aM}}$) bei der Schaltung in Abb. 2.1 erreichen?
- 2.3. Welche Anforderungen sind bei der Wahl des Frequenzverhältnisses beim Unterschwingungsverfahren für Dreiphasen-Spannungswechselrichter zu berücksichtigen?

zu 2.1)

Schaltmatrix (Brückenkurzschluss d.h. Ober- und Unterschalter geschlossen nicht sinnvoll):

Syntax: S1 = S1 geschlossen /S1 = S1 geöffnet

Zustand	S1	S2	S3	S4	S5	S6	$u_{\text{Last,aM}}$
Z1	S1	/S2	S3	/S4	S5	/S6	0V
Z2	S1	/S2	S3	/S4	/S5	S6	$+\frac{1}{3}U_{\text{ZK}}$
Z3	S1	/S2	/S3	S4	S5	/S6	$+\frac{1}{3}U_{\text{ZK}}$
Z4	S1	/S2	/S3	S4	/S5	S6	$+\frac{2}{3}U_{\text{ZK}}$
Z5	/S1	S2 ✓	S3	/S4	S5	/S6	$-\frac{2}{3}U_{\text{ZK}}$
Z6	/S1	S2 ✓	/S3	/S4	/S5	S6	$-\frac{1}{3}U_{\text{ZK}}$
Z7	/S1	S2 ✓	S3	S4	S5	/S6	$-\frac{1}{3}U_{\text{ZK}}$
Z8	/S1	S2 ✓	/S3	S4	/S5	S6	0V

zu 2.2)

五电平 / 5点控制

$$U_{\text{Last}} = +\frac{2}{3}U_{\text{ZK}} \quad \checkmark$$

$$U_{\text{Last}} = +\frac{1}{3}U_{\text{ZK}} \quad \checkmark$$

$$U_{\text{Last}} = 0 \quad \checkmark$$

$$U_{\text{Last}} = -\frac{1}{3}U_{\text{ZK}} \quad \checkmark$$

$$U_{\text{Last}} = -\frac{2}{3}U_{\text{ZK}} \quad \checkmark$$

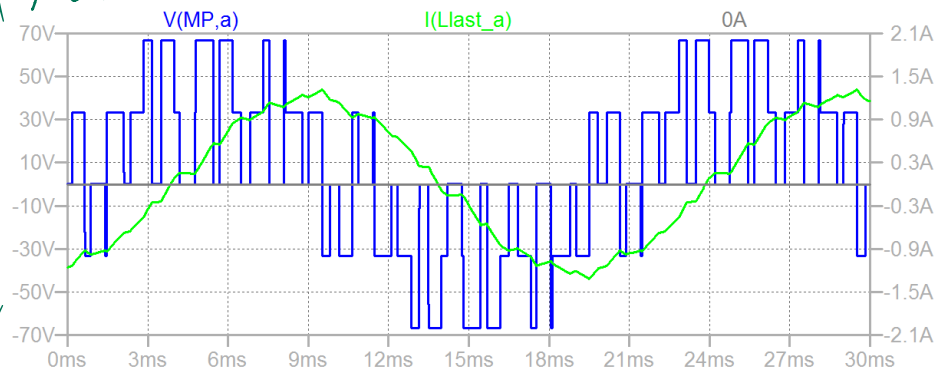


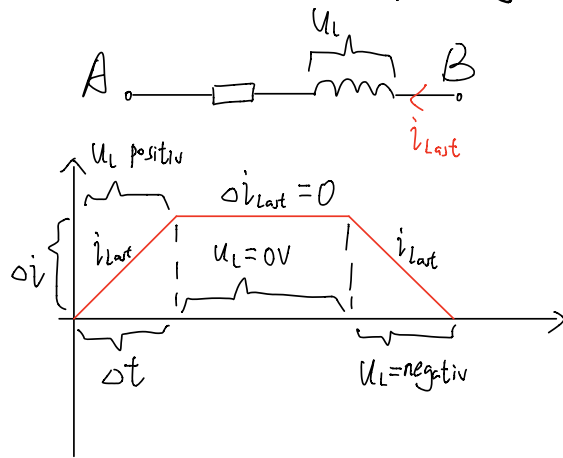
Abbildung 2.4: Simulierte Verläufe für $m_f = \frac{450 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 9$, $m_a = 0,8$

zu 2.3)

Bei kleinem m_f -Wert sollte das Frequenzverhältnis ungerade und ein ganzzahliges Vielfaches von drei sein: $m_f = 3, 9, 15, \dots$

Bei großen Frequenzverhältnissen ($m_f > 10$) kann freie Taktung gewählt werden, d.h. Dreieckfrequenz unabhängig von der Steuerspannungsfrequenz.

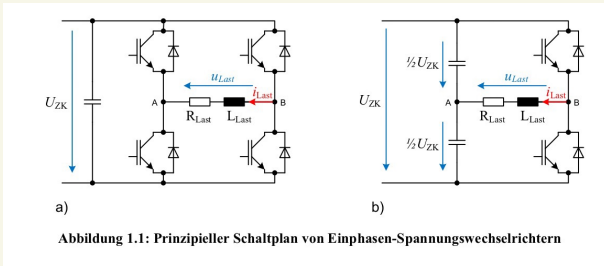
Spannungswechselrichter



$$u_L = L_{Last} \cdot \frac{di_{Last}}{dt}$$

$$\Delta i_{Last} = \frac{u_L}{L_{Last}} \cdot \Delta t \approx \frac{u_{Last}}{L_{Last}} \cdot \Delta t$$

1 Dreiphasen-Spannungswechselrichter



Frage 1: die Funktionsweise des Unterschwingungsverfahrens.

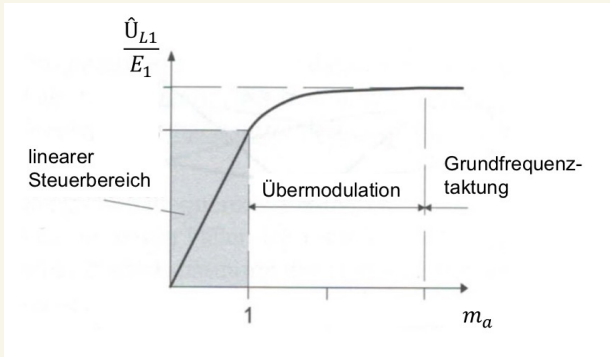
sinusförmige Steuerspannung (= Sollwert für Grundschwingung der Spannung über der Last) Vergleich mit dreieckförmiger Vergleichsspannung führt zu Schaltzeitpunkten

=> Über der Last liegen positive und negative Spannungsblöcke an, deren Breite moduliert wird
=> Induktivität in der Last führt je nach Größe der Induktivität zu mehr oder weniger rippelbehaftetem sinusförmigen Stromverlauf

Frage 2: Wie sind der Aussteuergrad m_a und das Frequenzverhältnis m_f definiert?

Frage 3: Welchen positiven und welchen negativen Maximalwert kann die Spannung über der Last (u_{Last}) bei der Schaltung in Abb. 1.1 a) und in Abb. 1.1 b) erreichen?

Frage 4: die Begriffe Lineare Aussteuerung, Übermodulation und Grundfrequenztaktung.



Frage 5: Anforderungen bei der Wahl des Frequenzverhältnisses beim Unterschwingungsverfahren für Einphasen-Spannungswechselrichter zu berücksichtigen

- Frequenz Dreiecksspannung deutlich größer als Frequenz Steuerspannung (z.B. $m_f > 10$)
- bei kleinem m_f -Wert sollte Dreiecksfrequenz ein ungerade Vielfaches der Sollspannungsfrequenz sein = synchronisierte Taktung $\Rightarrow m_f = 3, 5, 7, 9$

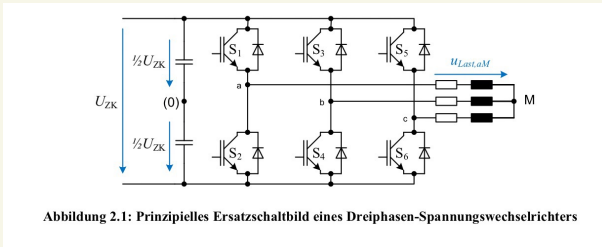
\Rightarrow synchronisierte Taktung bzw. synchronisierte Pulsweitenmodulation verhindert
Schwebungen in der Ausgangsspannung bzw. eine schwankende Grundfrequenz der Ausgangsspannung

Frage 6: Was versteht man unter "synchronisierter" und "unsynchronisierter" Pulsweitenmodulation? Wann ist eine Synchronisation sinnvoll

Frage 7: Welchen Einfluss haben Aussteuergrad und Frequenzverhältnis auf Amplitude und Frequenz der Oberschwingen bzw. das Frequenzspektrum der Ausgangsspannung?

tendenziell gilt: je größer m_f und je größer der Aussteuergrad (aber $m_a \leq 1$) , desto geringer wird der Anteil an Oberschwingungen bezogen auf die Grundschwingungsamplitude

2 Dreiphasen-Spannungswechselrichter



Frage 1: Welche sinnvollen Schaltkombinationen sind für den Dreiphasen-Spannungswechselrichter möglich?

Schaltmatrix (Brückenkurzschluss d.h. Ober- und Unterschalter geschlossen nicht sinnvoll): Syntax: S1 = S1 geschlossen / S1 = S1 geöffnet

Frage 2: Welche Werte kann die Spannung über jeweils einen der drei Laststränge (z.B. $u_{Last,aM}$) bei der Schaltung in Abb. 2.1 erreichen?

Frage 3: Welche Anforderungen sind bei der Wahl des Frequenzverhältnisses beim Unterschwingungsverfahren für Dreiphasen-Spannungswechselrichter zu berücksichtigen?

Bei kleinem m_f -Wert sollte das Frequenzverhältnis ungerade und ein ganzzahliges Vielfaches von drei sein: $m_f = 3, 9, 15, \dots$
Bei großen Frequenzverhältnissen ($m_f > 10$) kann freie Taktung gewählt werden, d.h. Dreiecksfrequenz unabhängig von der Steuerspannungsfrequenz.