

Vermogenselektronica II

Peter van Duijsen

20 mei 2020

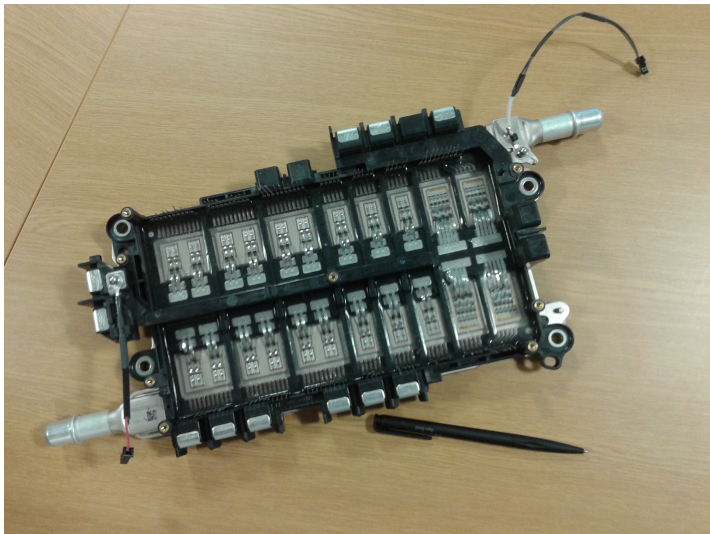
Table of contents

- 1 Modulatie
- 2 Spanningsmodulatie
- 3 Pulsbreedte Modulatie
- 4 Drie-fasen PWM
- 5 Zero Point Shift
- 6 Space Vector Modulatie

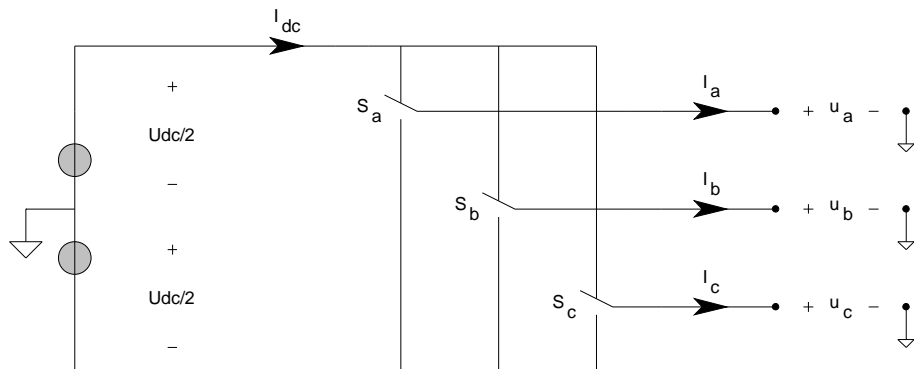
Modulatie van een inverter?

PWM en space Vector Modulatie.

IGBT Inverter

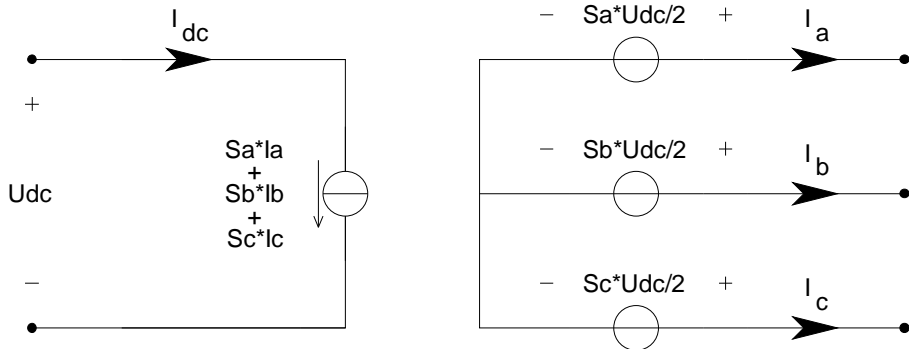


Inverter



Figuur: Basis inverter schakeling met schakelaars.

Averaged inverter



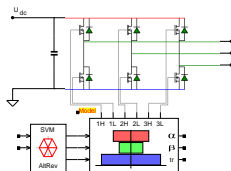
Figuur: Equivalent circuit voor de mathematische voorstelling van de inverter d.m.v. gestuurde spannings- en stroombronnen.

Circuit symbool

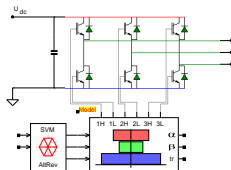


Figuur: Circuit symbool voor de DC-AC inverter.

Opbouw met Mosfets en IGBTs



Figuur: Drie-fasen inverter met Mosfets.



Figuur: Drie-fasen inverter met IGBTs.

Vermogensbereik

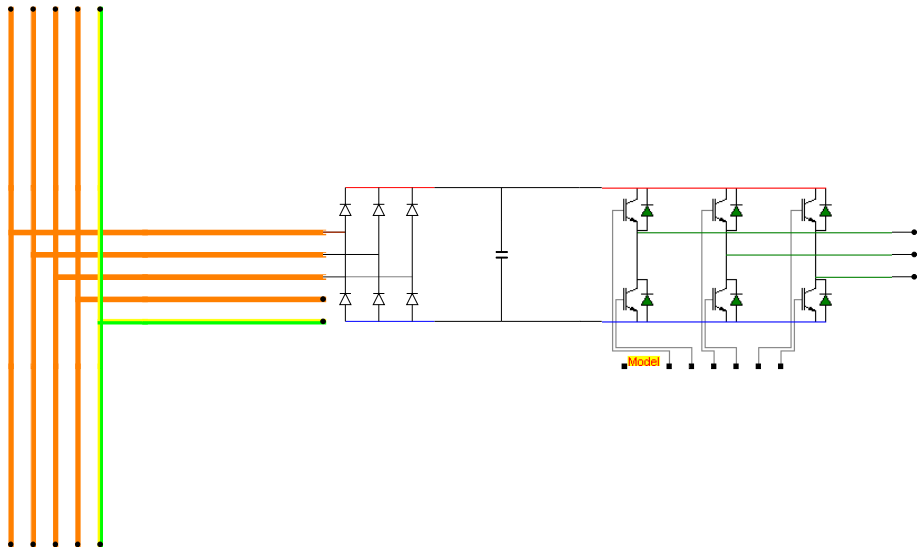
- Mosfet (Metal Oxide Field Effect Transistor)
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
- Uitschakelbare thyristor zoals de GRO (Gate Turn Off) of de IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)

Toepassingsgebied

	Mosfet	IGBT	GTO/IGCT
Spanning	1000V	6500V	6000V
Stroom	100A	2400A	4000A
Schakel frequentie	10 – 1000kHz	2 – 20kHz	0.2 – 1kHz

Tabel: Toepassingsgebied van de halfgeleiders

DC Tussenkring



nul-component

De nul-component u_0 is de gelijkspannings-component van de AC spanning.

Spanningsvectoren

$$v_i = T_{23} \begin{pmatrix} u_{ai} \\ u_{bi} \\ u_{ci} \end{pmatrix} = \frac{u_{dc}}{2} T_{23} \begin{pmatrix} s_{ai} \\ s_{bi} \\ s_{ci} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Spanningsvectoren

$$\tilde{v}_i = \frac{v_i}{u_{dc}/2} T_{23} \begin{pmatrix} s_{ai} \\ s_{bi} \\ s_{ci} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Transformatie

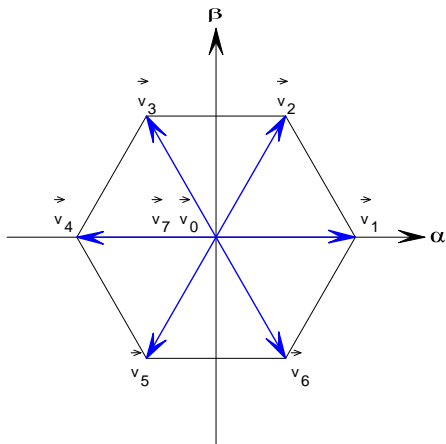
$$T_{23} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Schakeltoestanden

	s_a	s_b	s_c	$\widetilde{v}_{i\alpha}$	$\widetilde{v}_{i\beta}$
\widetilde{v}_0	-1	-1	-1	0	0
\widetilde{v}_1	+1	-1	-1	+4/3	0
\widetilde{v}_2	+1	+1	-1	+2/3	+2/sqrt3
\widetilde{v}_3	-1	+1	-1	-2/3	+2/sqrt3
\widetilde{v}_4	-1	+1	+1	-4/3	0
\widetilde{v}_5	-1	-1	+1	-2/3	-2/sqrt3
\widetilde{v}_6	+1	-1	+1	+2/3	-2/sqrt3
\widetilde{v}_7	+1	+1	+1	0	0

Tabel: Spanningsvectoren afhankelijk van de schakelaarstanden

Zeshoek



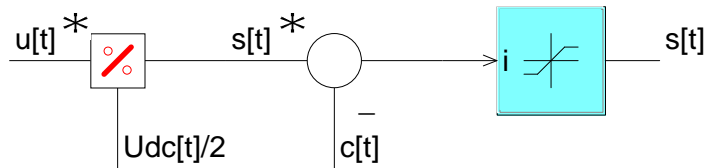
Figuur: Fundamentele vectoren in het orthogonale stelsel.

Enkelfase

$$\tilde{u}^* = \frac{u^*}{u_{dc}/2} \quad (4)$$

$$s^* = \tilde{u}^* \quad (5)$$

Carrier

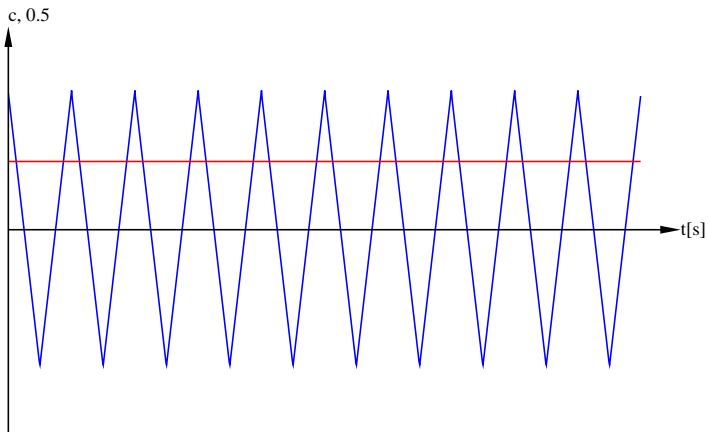


Figuur: Implementatie van de Pulsbreedte modulator met behulp van de driehoek carrier en comparator.

Schakelaartoestanden zijn een representatie voor referentiespanning

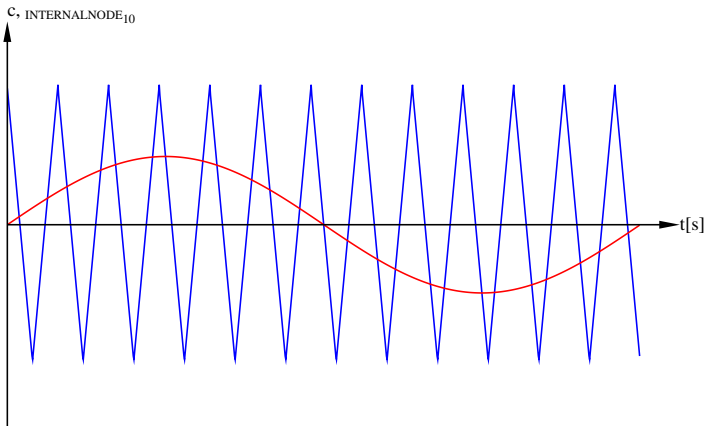
$$\overline{s(t)} = \tilde{u}^*(t) \quad (6)$$

Triangle modulation



Figuur: Modulatie carrier met een constante referentiespanning.

Referentie signaal



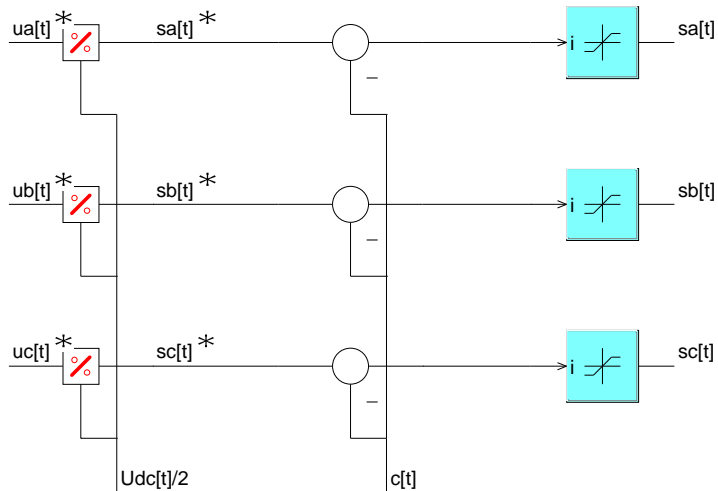
Figuur: Modulatie carrier met een constante referentiespanning.

Modulatieindex

De verhouding in amplitude van het referentie signaal tot de carrier, wordt ook wel de modulatie index m genoemd.

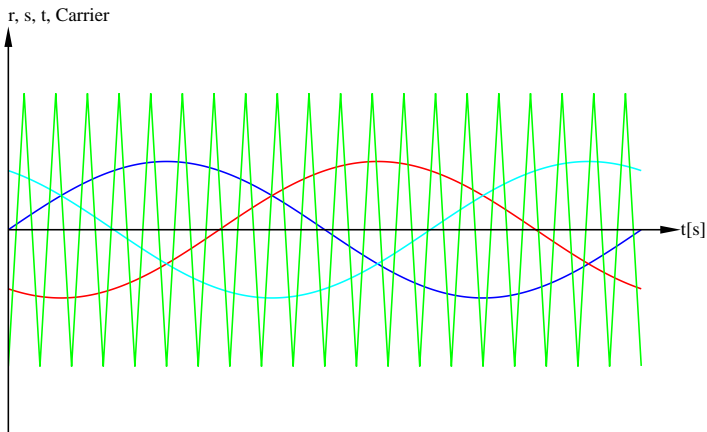
$$m = \max \left| \frac{u^*(t)}{u_{dc}/2} \right| = |\tilde{u}^*(t)| \quad (7)$$

3 fasen PWM

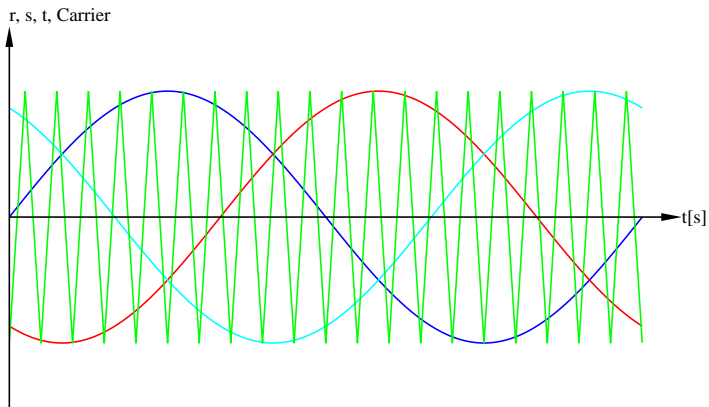


Figuur: Drie-fasen implementatie van de Pulsbreedte modulator met behulp van de driehoek carrier en comparator.

3 fasen PWM



Figuur: Pulsbreedte modulatie signaal met modulatie index $m = 0.5$.

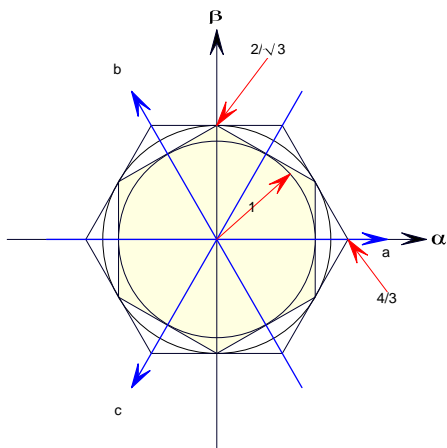
$m=1$ 

Figuur: Pulsbreedte modulatie signaal met modulatie index $m = 1$.

Maximale index

$$|\tilde{u}_{a,b,c}(t)| \leq 1 \quad (8)$$

Zeshoek voor PWM



Figuur: Spanningsvectoren met sinus-driehoek Pulsbreedtemodulatie.

Lengte m $j=1$

$$m = |\tilde{u}| \leq m_{max} = 1 \quad (9)$$

nul component

Als eerste definiëren we de nul-component als functie van de referentiesignalen.

$$u_0(t) = \frac{1}{2} (\max [u_a^*(t), u_b^*(t), u_c^*(t)] + \min [u_a^*(t), u_b^*(t), u_c^*(t)]) \quad (10)$$

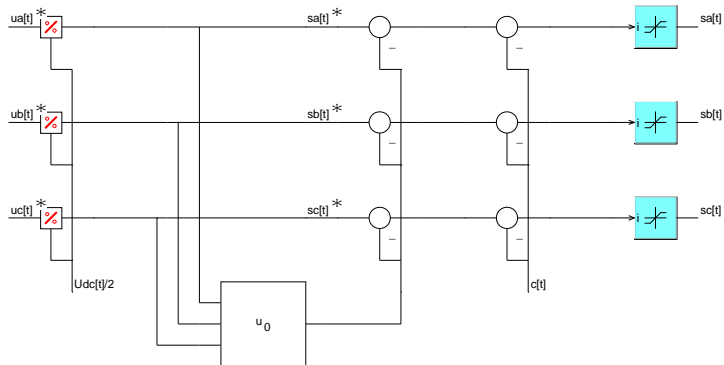
Deze nul-component gaan we vervolgens bij de referentiesignalen optellen.

$$u_a^{**}(t) = u_a^*(t) - u_0(t) \quad (11)$$

$$u_b^{**}(t) = u_b^*(t) - u_0(t) \quad (12)$$

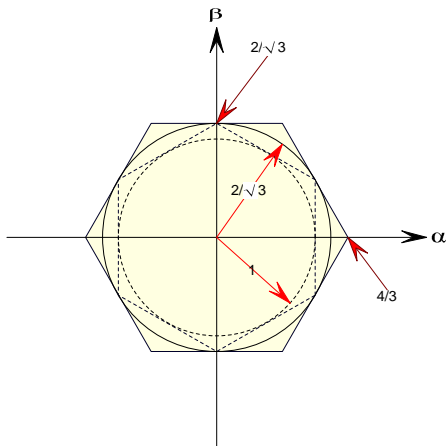
$$u_c^{**}(t) = u_c^*(t) - u_0(t) \quad (13)$$

Zero Point Shift

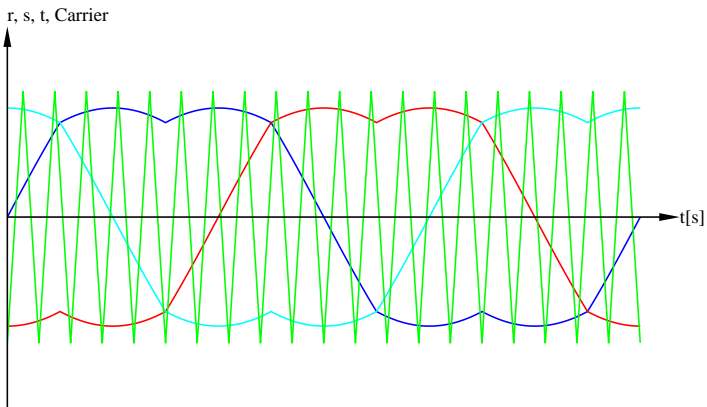


Figuur: Drie-fasen implementatie van de Pulsbreedte modulator met behulp van de driehoek carrier, comparator en Zero-Point-Shift.

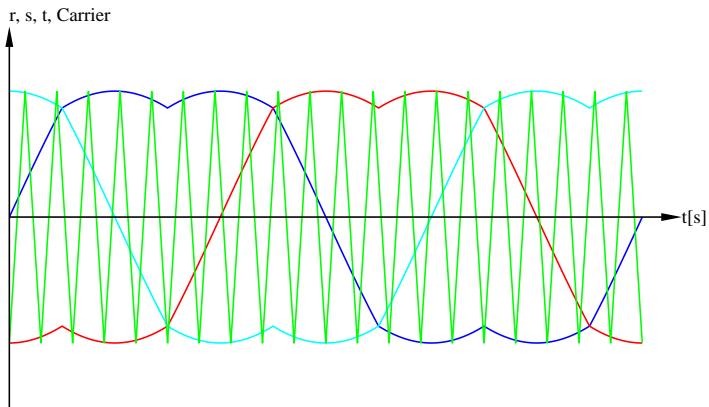
Bereik ZPS



Figuur: Spanningsvectoren met sinus-driehoek Pulsbreedtemodulatie en Zero-Point-Shift.

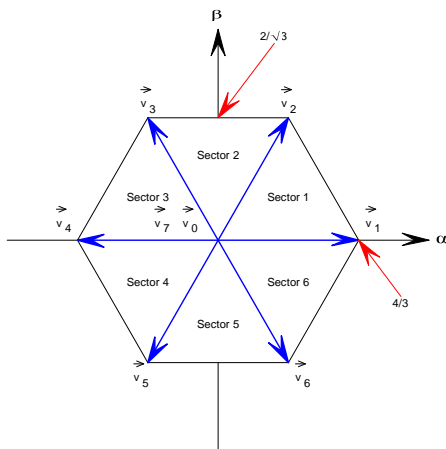
$m=1$ 

Figuur: Pulsbreedte modulatie signaal met Zero-Point-Shift en met modulatie index $m = 1$.

$m=1.5$


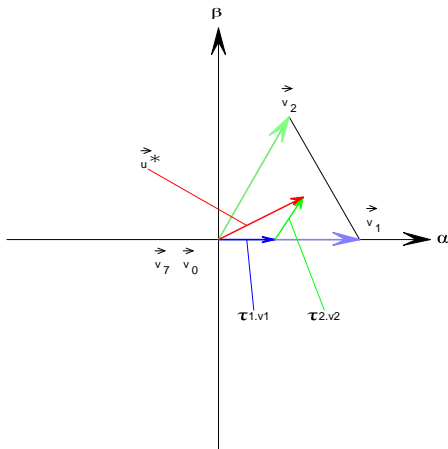
Figuur: Pulsbreedte modulatie signaal met Zero-Point-Shift en met modulatie index $m = 1.15$.

Space Vector Modulation zeshoek



Figuur: Space Vector Modulatie met de basis vectoren.

SVM combinatie



Figuur: Space Vector Modulatie, u^* is een combinatie van v_0 , v_1 en v_2 .

Sampling interval

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad (14)$$

$$u^*(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} u(t) dt \quad (15)$$

$$= \frac{1}{T_s} (t_0 v_0 + t_1 v_1 + t_2 v_2 + t_3 v_3 + t_4 v_4 + t_5 v_5 + t_6 v_6 + t_7 v_7) \quad (16)$$

$$= \tau_0 v_0 + \tau_1 v_1 + \tau_2 v_2 + \tau_3 v_3 + \tau_4 v_4 + \tau_5 v_5 + \tau_6 v_6 + \tau_7 v_7 \quad (17)$$

....waarin:

$$\tau_i = \frac{t_i}{T_s} \sum_i \tau_i = 1, \tau_i \geq 0 \quad (18)$$

Spanningsvectoren

$$\tilde{u}^*(k) = \frac{u^*(k)}{u_{dc}/2} \quad (19)$$

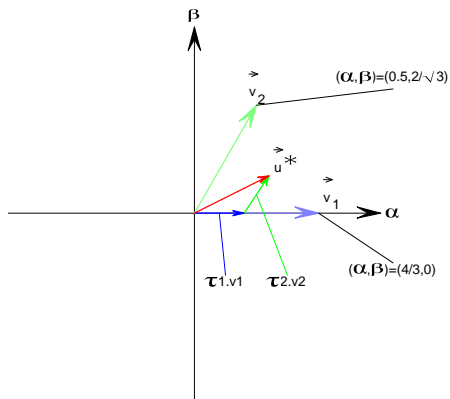
$$\tilde{v}_i = \frac{v_i}{u_{dc}/2} \quad (20)$$

...zodat we de genormaliseerde spanning kunnen schrijven als:

$$\tilde{u}^*(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} \tilde{u}(t) dt \quad (21)$$

$$= \tau_0 \tilde{v}_0 + \tau_1 \tilde{v}_1 + \tau_2 \tilde{v}_2 + \tau_3 \tilde{v}_3 + \tau_4 \tilde{v}_4 + \tau_5 \tilde{v}_5 + \tau_6 \tilde{v}_6 + \tau_7 \tilde{v}_7 \quad (22)$$

SVM spanningsvector



Figuur: Space Vector Modulatie, u^* is afhankelijk van α en β .

Sektor 1

$$u^*(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} u(t) dt \quad (23)$$

$$= \frac{1}{T_s} (t_0 v_0 + t_1 v_1 + t_2 v_2) \quad (24)$$

$$= \tau_0 v_0 + \tau_1 v_1 + \tau_2 v_2 \quad (25)$$

Tijden voor sektor 1

$$\tau_1 = \frac{3}{4} \tilde{u}_\alpha^* - \frac{\sqrt{3}}{4} \tilde{u}_\beta^* \quad (26)$$

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \tilde{u}_\beta^* \quad (27)$$

want.....

$$\tilde{u}^* = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \tau_1 \cdot \tilde{v}_1 + \tau_2 \cdot \tilde{v}_2 \quad (28)$$

$$\tilde{v}_1 = \begin{pmatrix} \frac{4}{3} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (29)$$

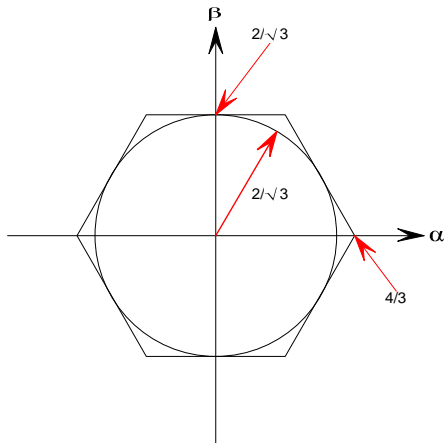
$$\tilde{v}_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \quad (30)$$

Invullen geeft:

$$\tilde{u}^* = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \tau_1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{4}{3} \\ 0 \end{pmatrix} + \tau_2 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \quad (31)$$

Hierin is als eerste τ_2 uit te rekenen:

Vectoren



Figuur: Space Vector Modulatie, iedere spanningsvector u^* binnen de cirkel is te realiseren.

Lengte spanningsvektor

$$|\tilde{u}^*| \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (40)$$

Welke sektor

Sector	α	$\sqrt{3}\alpha + \beta$	$\sqrt{3}\alpha - \beta$
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	-
4	-	-	-
5	-	-	+
6	-	+	+

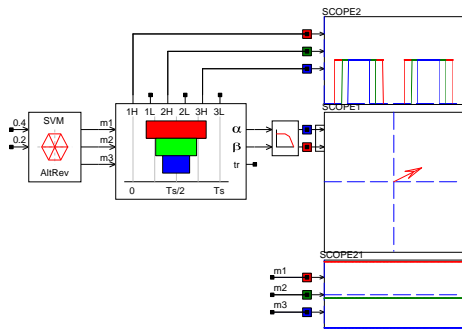
Tabel: Bepaling van de sector bij space vector modulatie

Tijden per sektor

Sector	τ_i	τ_{i+1}	Zero voltage vector
1	$\tau_1 = +\frac{3}{4}\alpha - \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_2 = +\frac{\sqrt{3}}{2}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_1 - \tau_2$
2	$\tau_2 = +\frac{3}{4}\alpha + \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_3 = -\frac{3}{4}\alpha + \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_2 - \tau_3$
3	$\tau_4 = -\frac{3}{4}\alpha - \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_3 = +\frac{\sqrt{3}}{2}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_3 - \tau_4$
4	$\tau_4 = -\frac{3}{4}\alpha + \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_5 = -\frac{\sqrt{3}}{2}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_4 - \tau_5$
5	$\tau_6 = +\frac{3}{4}\alpha - \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_5 = -\frac{3}{4}\alpha - \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_6 - \tau_5$
6	$\tau_1 = +\frac{3}{4}\alpha + \frac{\sqrt{3}}{4}\beta$	$\tau_6 = -\frac{\sqrt{3}}{2}\beta$	$\tau_0 + \tau_7 = 1 - \tau_6 - \tau_1$

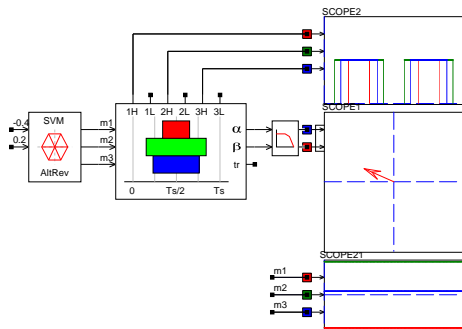
Tabel: Schaalfactoren voor de space vector modulatie

Opbouw spanningsvektor



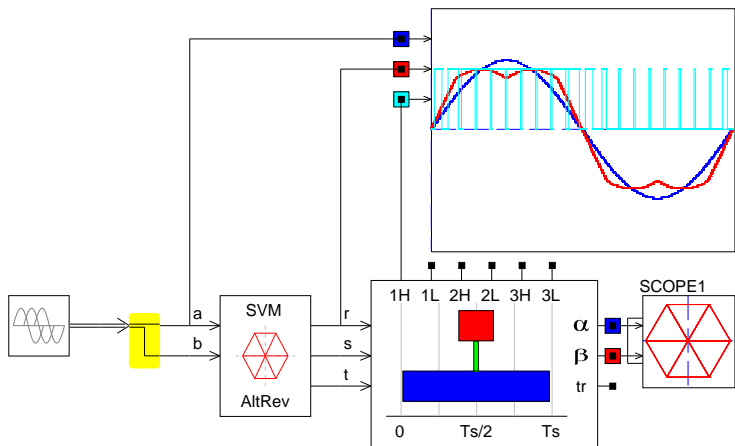
Figuur: Space Vector Modulatie, $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix}$. Van boven naar beneden in de scopes zijn de aan-tijden, de vector $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ en de drie modulatie indexen te zien.

Schakeltijden



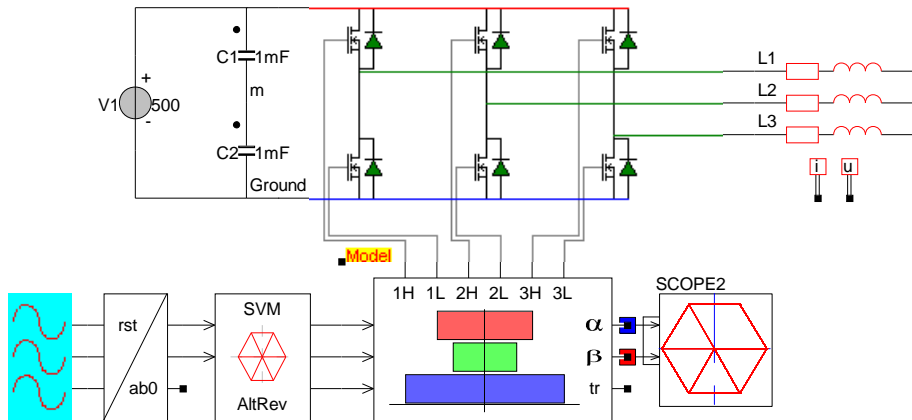
Figuur: Space Vector Modulatie, $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.4 \\ 0.2 \end{pmatrix}$. Van boven naar beneden in de scopes zijn de aan-tijden, de vector $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ en de drie modulatie indexen te zien.

Sinusvormige modulatie



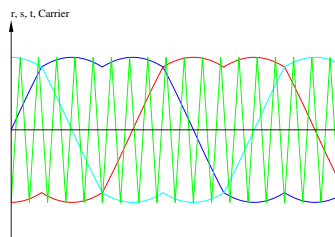
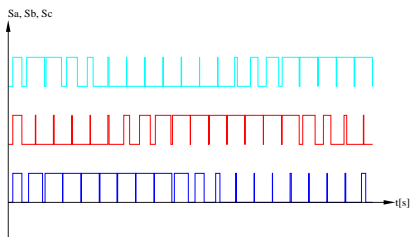
Figuur: Space Vector Modulatie.

Modulatie van de inverter



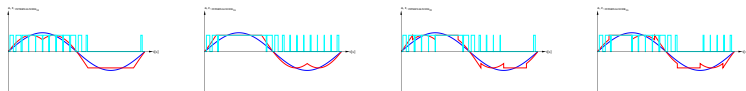
Figuur: Space Vector Modulatie voor de driefasen inverter.

SVM



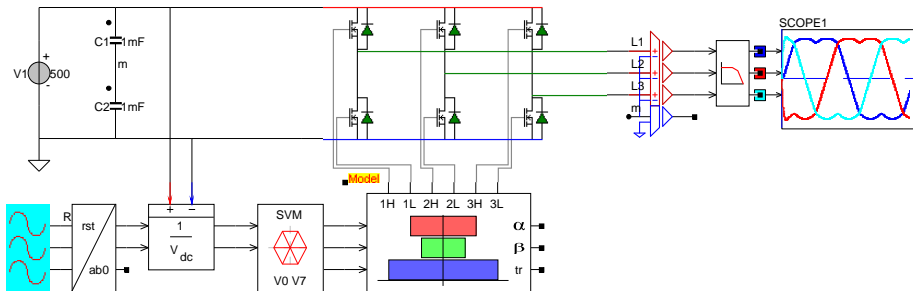
Figuur: Space Vector Modulation voor een gehele periode.

Discontinue SVM



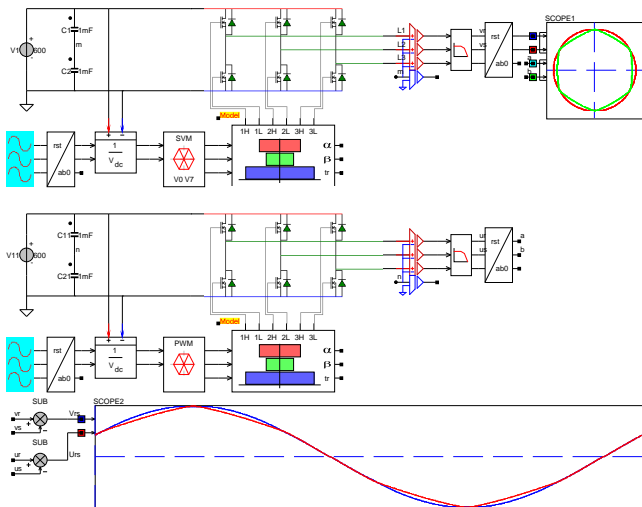
Figuur: Discontinue Space Vector Modulatie type 1, 2, 3 en 4.

Gefilterde spanning

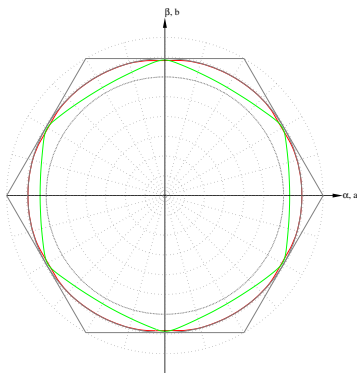


Figuur: Gefilterde spanning verkregen met Space Vector Modulatie.

Maximale spanning



SVM heet 15% meer spanningsbereik



Figuur: Groter spanningsbereik voor de space vector gemoduleerde spanning. Buitenste cirkel is de SVM gemoduleerde spanning, terwijl de spanning met PWM gemaakt een kleinere, ingedeukte cirkel maakt.