

# Vermogenselektronica II

dc-lab.org

Peter van Duijsen - - - dc-lab.org

22 april 2020

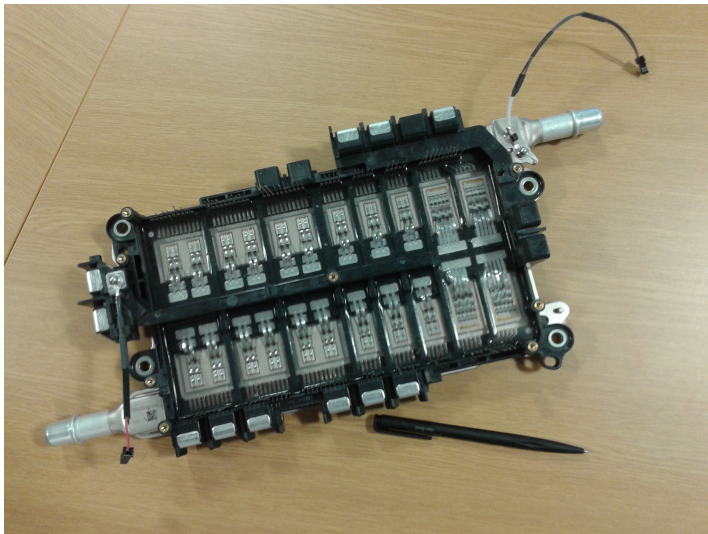
# Table of contents

- 1 Inleiding
- 2 Inverter hoe en waarom
- 3 VSI en CSI
- 4 DC link
- 5 Basisschakelingen
- 6 Hoe maak je AC?
- 7 Blokgolf inverter
- 8 PWM inverter
- 9 Inverter-leg

# Wat is toch een inverter?

Van DC naar AC.

# IGBT Inverter

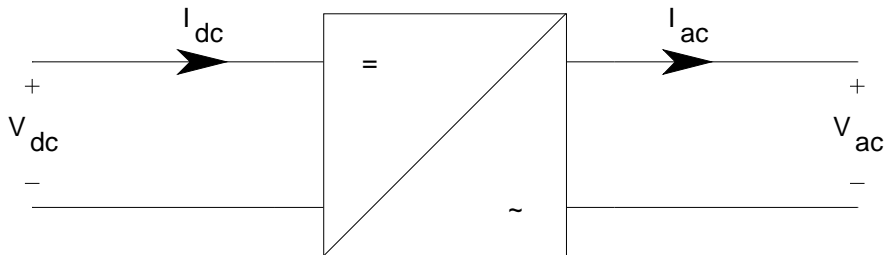


# Inverter

- 1 Aandrijven van elektrische machines.
- 2 Leveren energie van een zonnepaneel aan het openbare AC net.
- 3 Koppeling HVAC aan een HVDC transport leiding.
- 4 UPS, een AC noodstroomvoorziening.

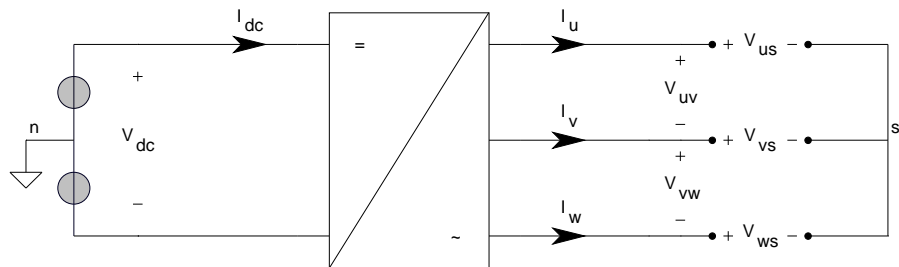
# Symbol

Het meest bekende symbool is gegeven in figuur 1



**Figuur:** Symbool voor de éénfase inverter

# Driefasen



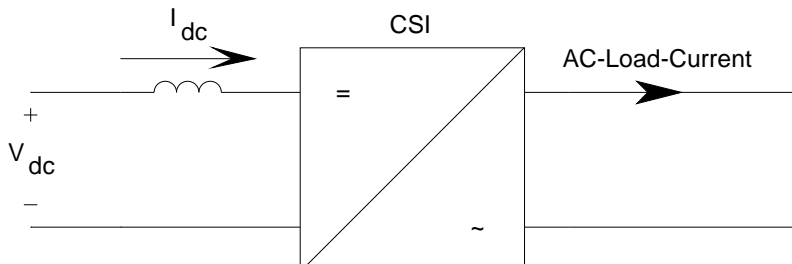
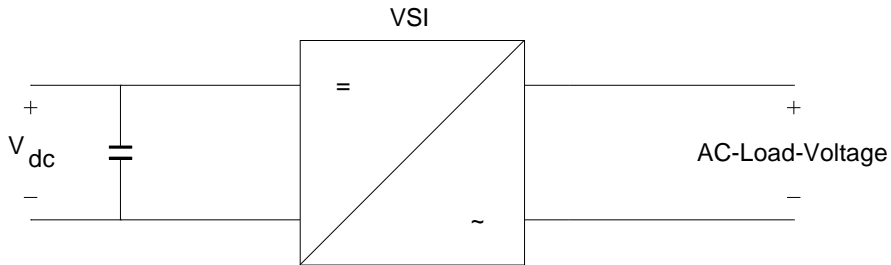
Figuur: Symbool voor de driefase inverter

# VSI CSI

- 1 VSI: Je kan er een wisselspanning mee maken, waarbij de stroomvorm door de belasting wordt gegeven.
- 2 CSI: Je kan er een wisselstroom mee maken, waarbij de spanningsvorm door de belasting wordt gegeven.



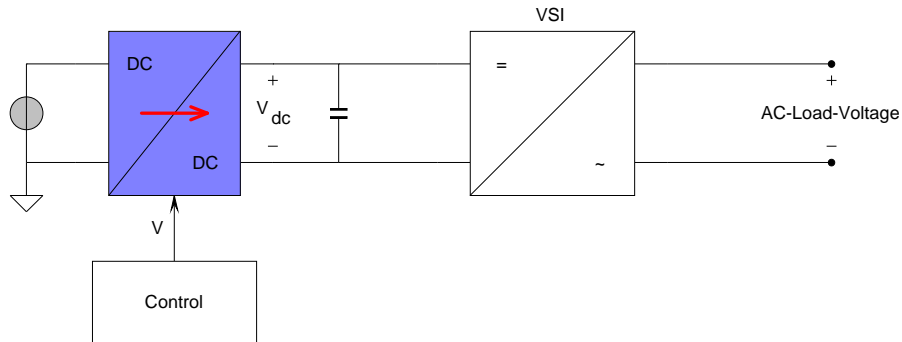
## VSI CSI



# Afkorting CSI VSI

- ① VSI: Voltage Source Inverter (Spanningsbron inverter)
- ② CSI: Current Source Inverter (Stroombron inverter)
  
- ① VSI: Voltage Stiff Inverter
- ② CSI: Current Stiff Inverter

# Variable DC link



**Figuur:** Spanningsbron inverter met variabele amplitude van de uitgangsspanning

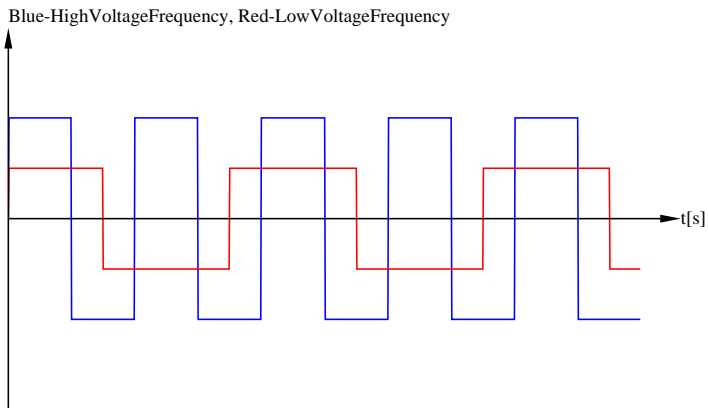
# Nadelen variable DC link

De belangrijkste nadelen:

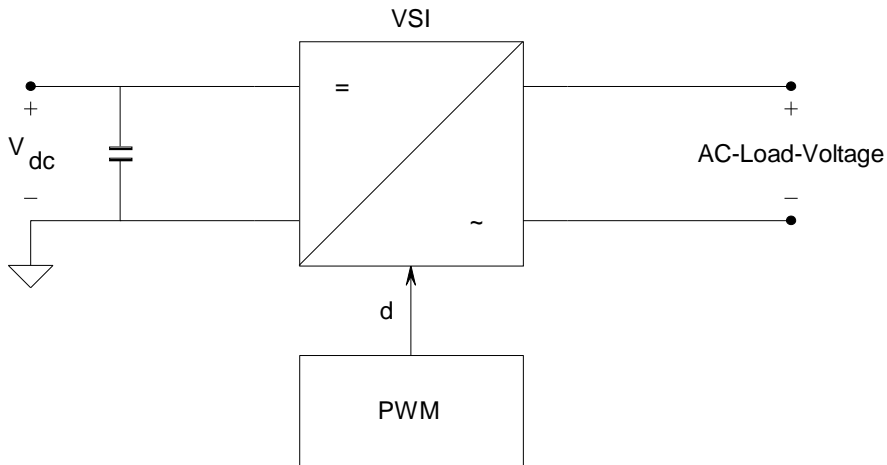
- 1 De uitgangsspanning is afhankelijk van de DC link spanning.
- 2 Er is een extra DCDC omvormer nodig om de variabele D link spanning te maken.
- 3 De blokgolf heeft veel harmonischen.

# PAM

De methode van de variabele DC link spanning staat ook wel bekend onder de naam Puls Amplitude Modulatie [PAM].



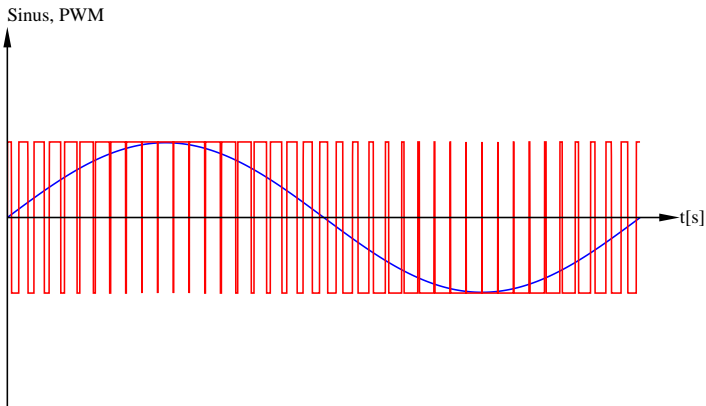
## Fixed DC link



Figuur: Spanningsbron inverter met constante amplitude van de uitgangsspanning

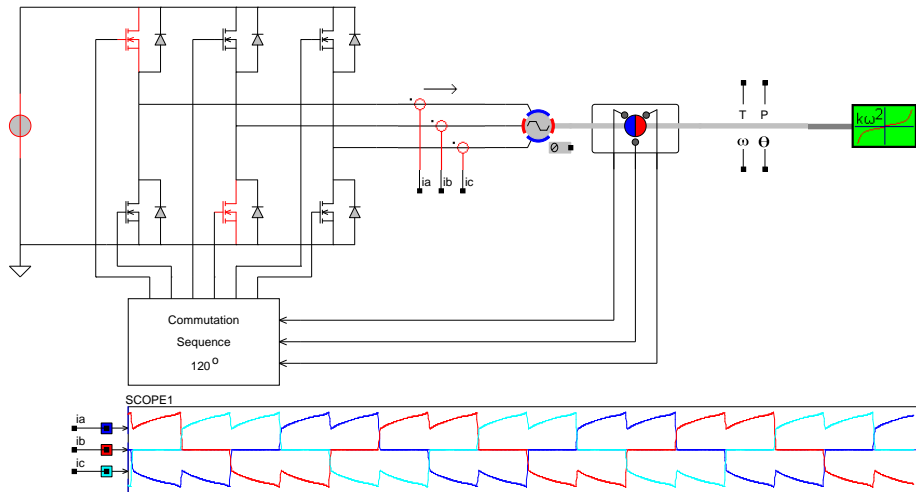
# PWM

De methode van de constante DC link spanning staat ook wel bekend onder de naam Pulsbreedte Modulatie, afgekort tot [PWM] wat staat voor Puls Width Modulation.



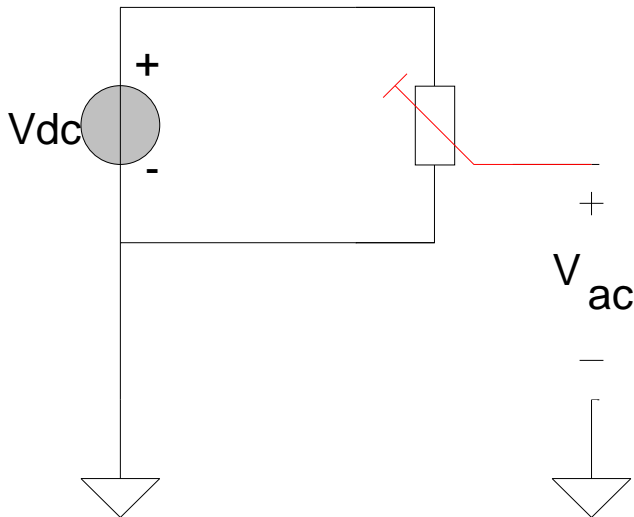
# Inverter

## Het schema van de inverter



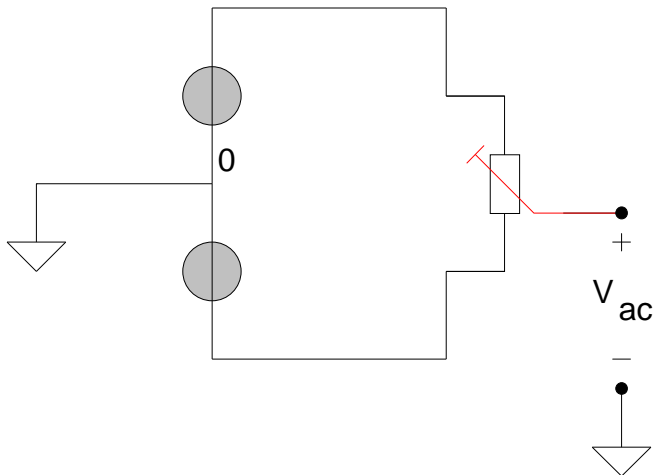


## Inverter



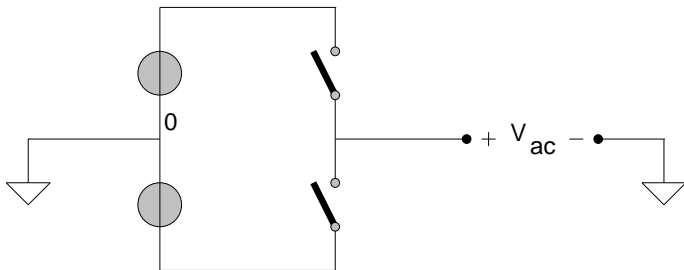
Figuur: Variabele AC uitgangsspanning

# Inverter



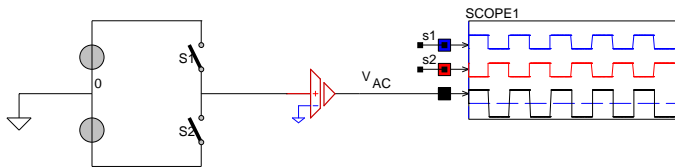
**Figuur:** Variabele AC uitgangsspanning die zowel positief als negatief kan worden

# Inverter



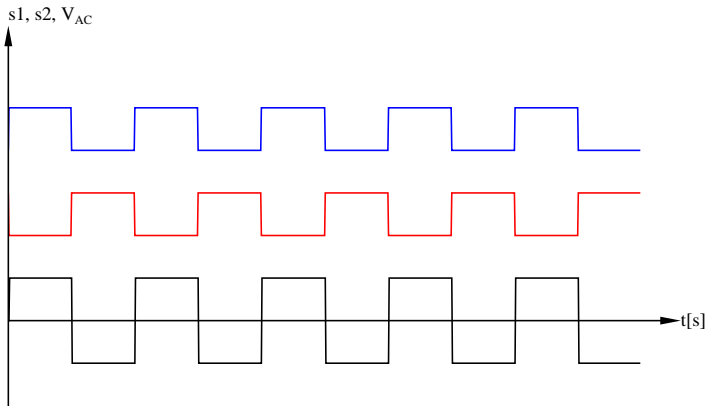
Figuur: Variabele AC uitgangsspanning d.m.v. schakelaars

# Inverter



Figuur: Variabele AC uitgangsspanning: Blokolf

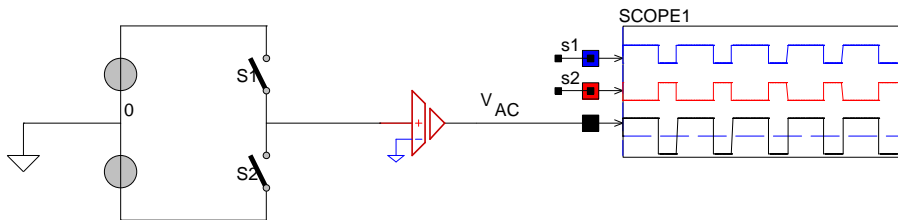
# Inverter



Figuur: Schakelaar S1 en S2 en de blok golf

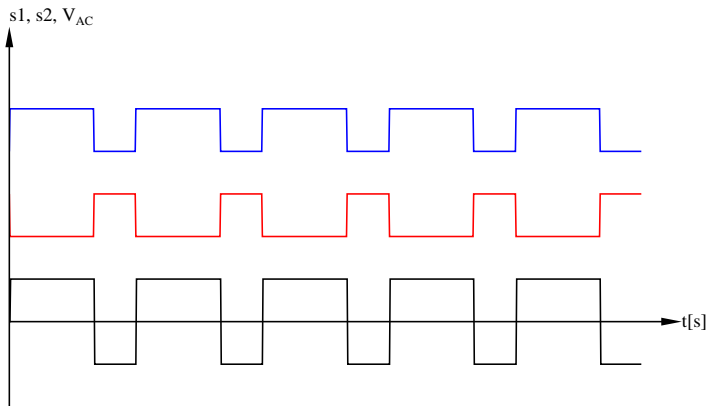
# Inverter

Als eerste gaan we de bovenste schakelaar 2 keer langer dicht houden dan de onderste.



Figuur: PWM met  $d = \frac{2}{3}$

# Inverter



Figuur: Uitgangsspanning  $V_0 = \frac{1}{3} V_{dc}$  voor  $d = \frac{2}{3}$

# Inverter

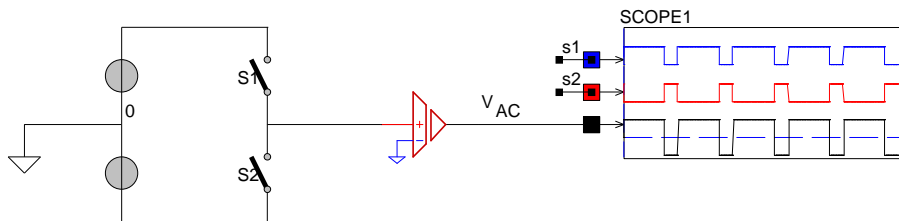
Nu is de gemiddelde spanning groter dan nul en wel gelijk aan:

$$\frac{\frac{2}{3}T \cdot V_{dc} + \frac{1}{3}T \cdot -V_{dc}}{T} = \frac{1}{3}V_{dc} \quad (1)$$



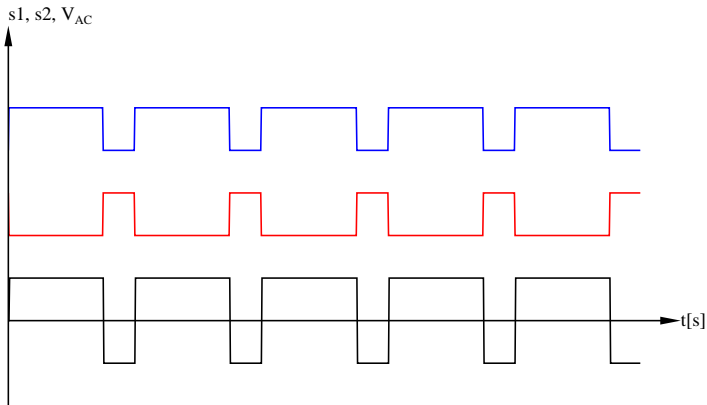
# Inverter

Verhogen van de aantijd van de bovenste schakelaar heeft tot gevolg dat de uitgangsspanning groter wordt.



Figuur: PWM met  $d = \frac{3}{4}$

# Inverter



Figuur: Uitgangsspanning  $V_0 = \frac{1}{2} V_{dc}$  voor  $d = \frac{3}{4}$

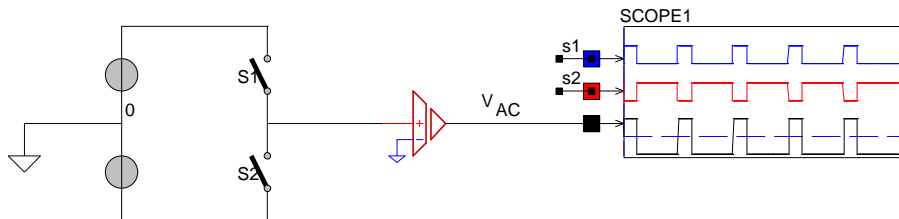
# Inverter

Nu is de gemiddelde spanning groter dan nul en wel gelijk aan:

$$\frac{\frac{3}{4}T \cdot V_{dc} + \frac{1}{4}T \cdot -V_{dc}}{T} = \frac{2}{4}V_{dc} \quad (2)$$

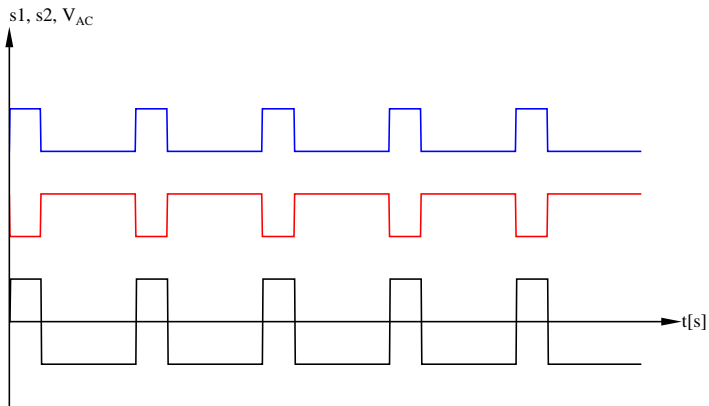
# Inverter

Verkleinen van de aantijd van de bovenste schakelaar heeft tot gevolg dat de uitgangsspanning kleiner wordt.



Figuur: PWM met  $d = \frac{1}{4}$

# Inverter



Figuur: Uitgangsspanning  $V_0 = -\frac{1}{2}V_{dc}$  voor  $d = \frac{1}{4}$

# Inverter

Nu is de gemiddelde spanning kleiner dan nul en wel gelijk aan:

$$\frac{\frac{1}{4}T \cdot V_{dc} + \frac{3}{4}T \cdot -V_{dc}}{T} = -\frac{1}{2}V_{dc} \quad (3)$$

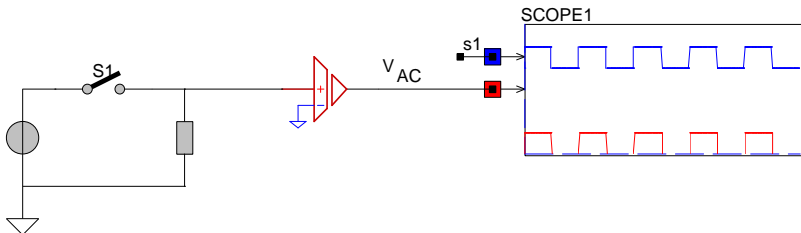
# Modulatie index

$$V_{Uitgang} = m \cdot V_{Ingang} \quad (4)$$

waarbij

$$d = \frac{m + 1}{2} \quad (5)$$

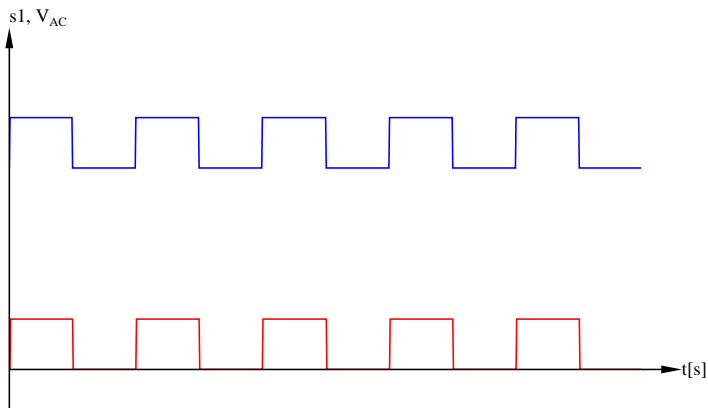
# Inverter



Figuur: Geschakelde voeding met  $d = 0.5$

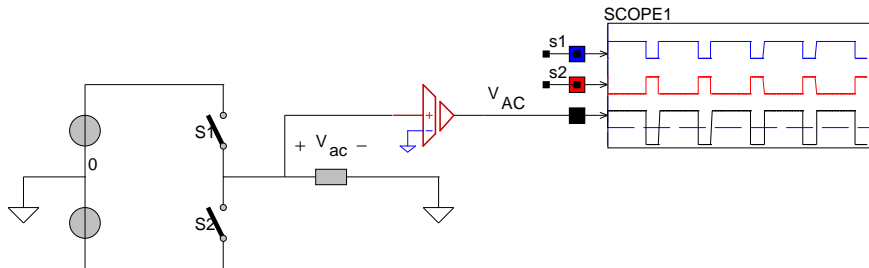


# Inverter



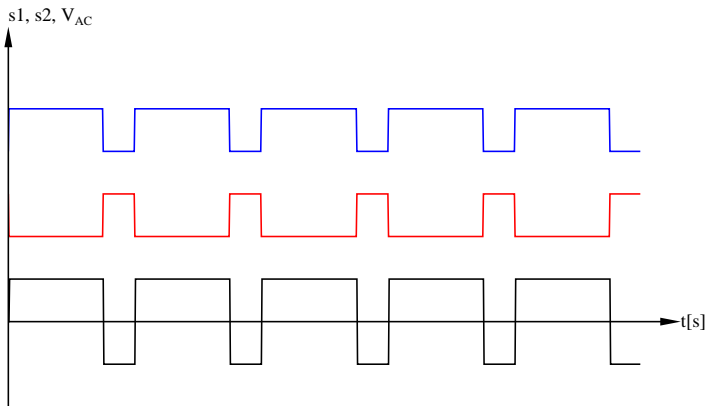
Figuur: Uitgangsspanning is nu tussen  $+V_{dc}$  en 0

# Halve brug



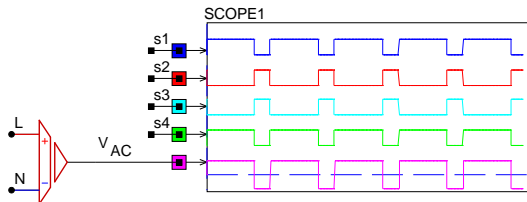
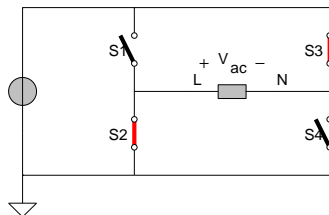
Figuur: Halve brug

# Amplitude



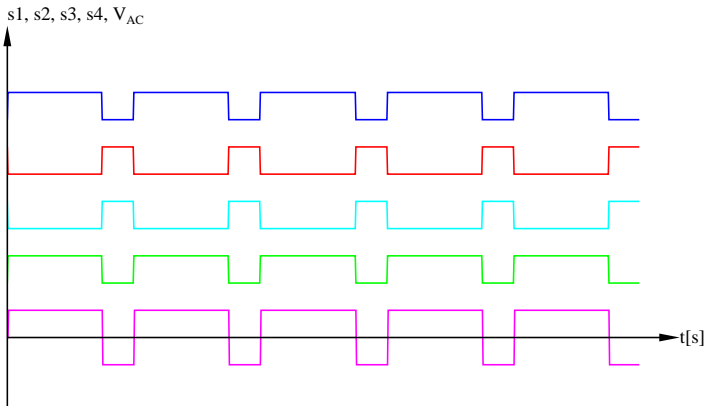
Figuur: Uitgangsspanning is nu tussen  $+\frac{V_{dc}}{2}$  en  $-\frac{V_{dc}}{2}$

# Vier schakelaars



Figuur: Volle brug

# Volle brug

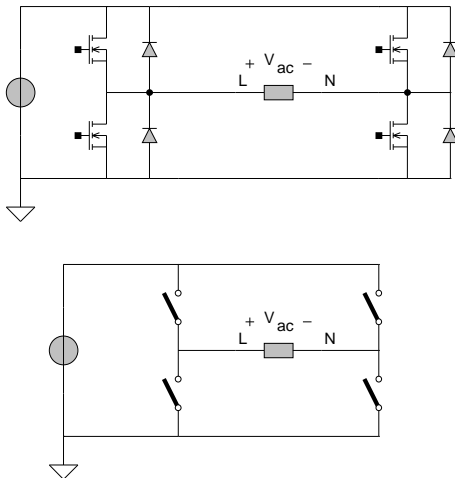


**Figuur:** Variabele AC uitgangsspanning van de volle brug schakeling

# Modulatie

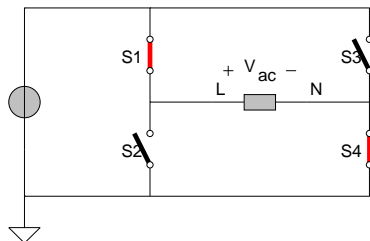
- 1 Blokgolf waar we de grondharmonische van gebruiken
- 2 Pulsbreedte modulatie waardoor we de grondharmonische van de blokgolf versterken en de hogere harmonischen verzwakken.

# Blok golf Inverter

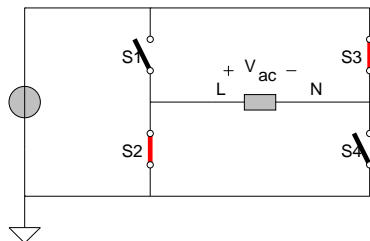


Figuur: Blok golf inverter met Mosfets en vervangschema met schakelaars.

# Vac en Vdc



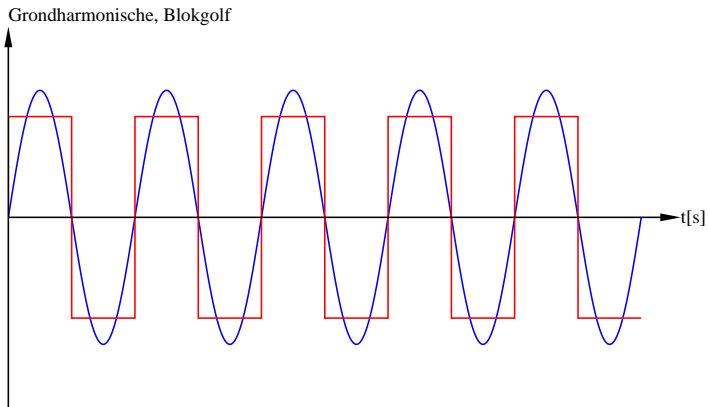
Figuur:  $V_{ac} = V_{dc}$



Figuur:  $V_{ac} = -V_{dc}$

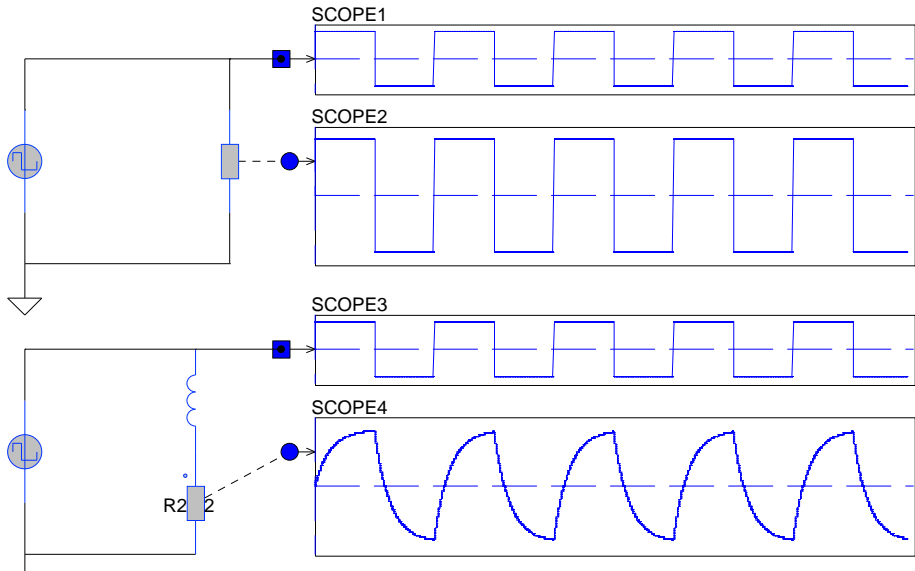


# Grondharmonische

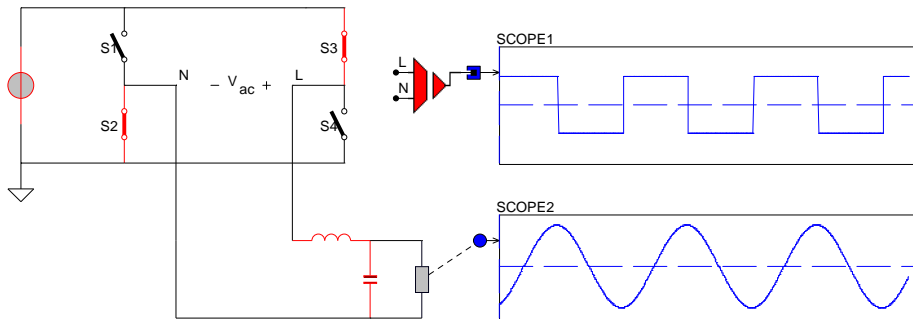


Figuur: Blok golf met grondharmonische.

# Laststroom

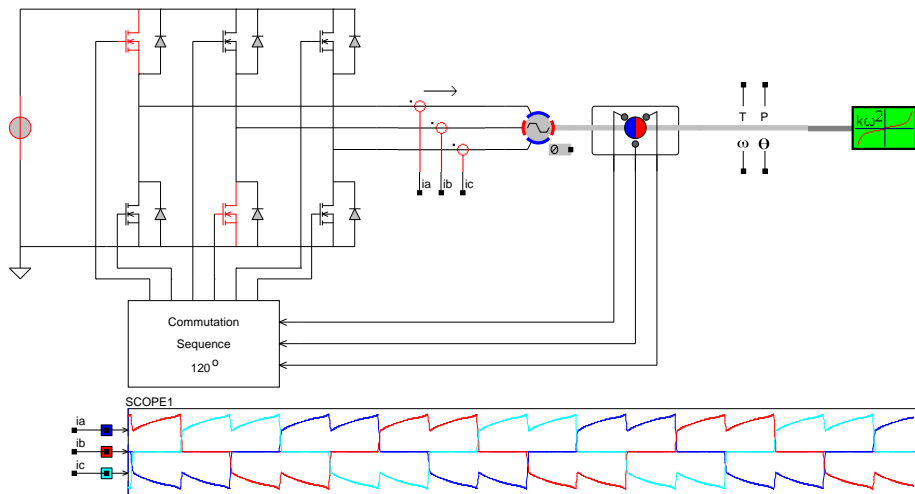


## Filter



**Figuur:** Ohmse belasting aangesloten op volle brug met uitgangsfiler.

# Borstelloze motor



**Figuur:** Ohms-inductieve belasting van een elektrische machine bepaalt de stroomvorm bij een blok golf spanning.

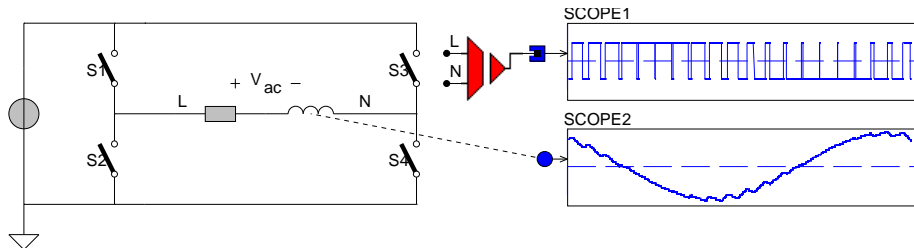
# Kanttekeningen

- In een blok golf inverter is de amplitude van de uitgangsspanning altijd gelijk aan de DC link spanning. Van deze spanning kan je de amplitude niet veranderen.
- De harmonischen van de uitgangsspanning zijn altijd de derde, vijfde, zevende, etc, dus de oneven harmonischen zitten er altijd in.
- De hogere harmonischen zijn weg te filteren met een laag-doorlaatfilter. Echter is de kantelfrequentie constant, waardoor het niet inzetbaar is bij een variabele uitgangsfrequency. Het volume van het filter is ook evenredig met de Volt-Ampere ratings van de inverter, waardoor ze in een AC noodstroomvoorziening nogal groot en zwaar kunnen zijn.

# Kanttekeningen

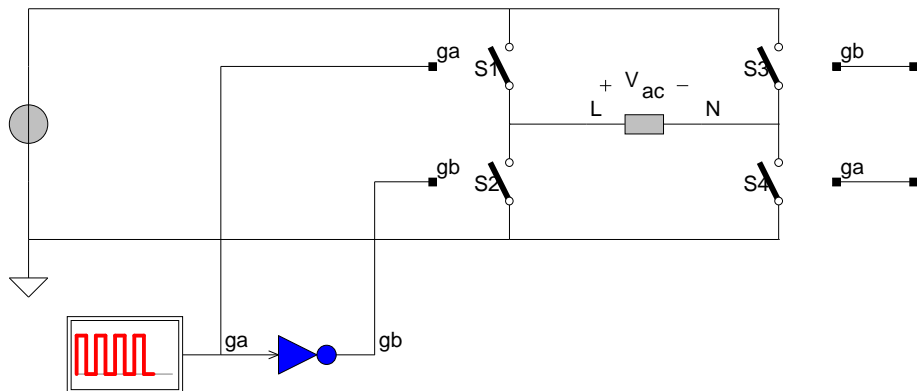
- Om de hogere harmonischen te reduceren met een kleiner laag-doorlaatfilter, moet de blok golf gemoduleerd worden, bijvoorbeeld door notches (inkepingen) in de golfvorm toe te voegen of door de pulsbreedte korter dan de halve periode van de blok golf te maken.
- Door modulatie van de blok golf worden de harmonischen naar hogere frequenties "gedrukt". Hierdoor kan de kantelfrequentie van het laag-doorlaatfilter hoger worden en daardoor neemt het volume van het laag-doorlaatfilter af.

## PWM



**Figuur:** Variabele AC uitgangsspanning met behulp van Pulsbreedte modulatie geeft een bijna sinusvormige uitgangsstroom in Scope2 voor het PWM spanning uit Scope1

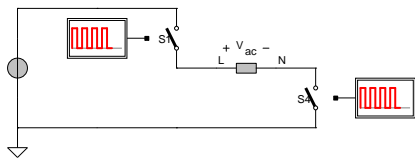
## AC amplitude



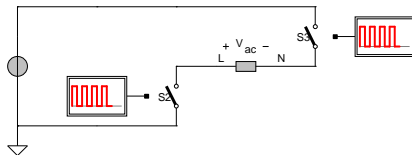
Figuur: Variabele AC uitgangsspanning



# Bipolar en unipolar

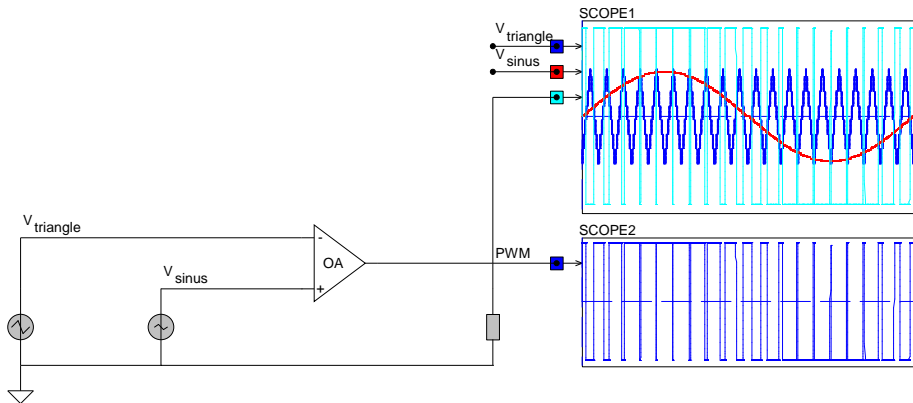


Figuur:  $V_{ac} = 0..V_{dc}$



Figuur:  $V_{ac} = 0..-V_{dc}$

# Sinus-driehoek modulatie



**Figuur:** Vergelijking van een zaagtandspanning met een sinusvormige spanning geeft de PWM spanning

# Modulatie index

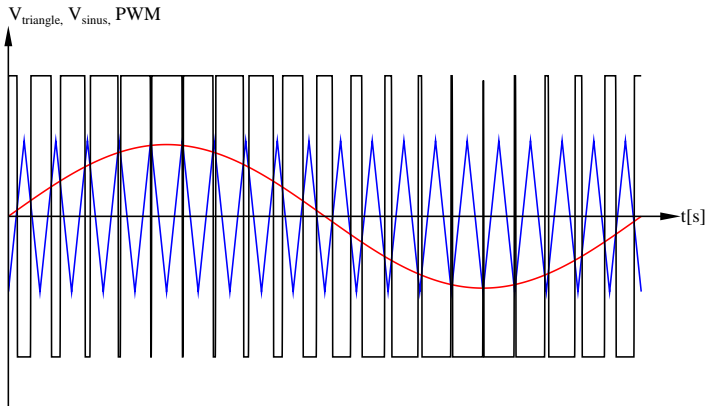
$$m = \frac{\hat{V}_{\text{sinus}}}{\hat{V}_{\text{triangle}}} \quad (6)$$

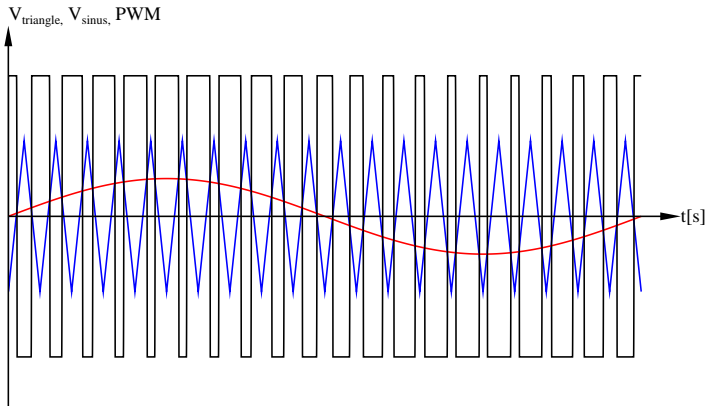
# Modulatie ratio

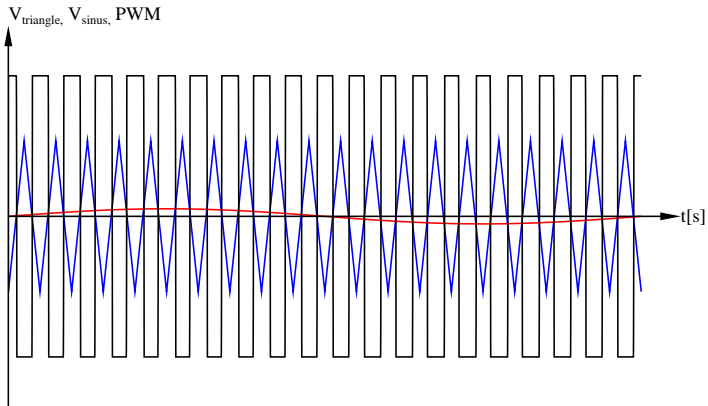
$$m_r = \frac{f_{triangle}}{f_{sinus}} \quad (7)$$

# Lineair bereik

$$\hat{V}_{AC} = m \cdot V_{dc} \quad (8)$$

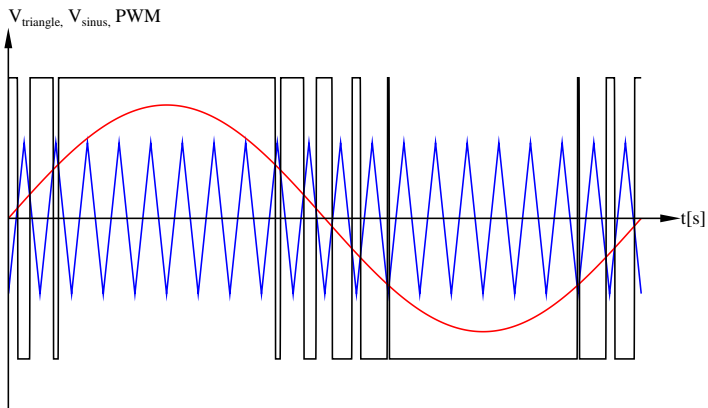
$m=1$ Figuur:  $m = 1$

$m=0.5$ Figuur:  $m = 0.5$

$m=0.1$ Figuur:  $m = 0.1$



# Overmodulatie



Figuur:  $m = 1.5$

# Grondharmonische

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)\} \quad (9)$$

waarin  $\theta = 2\pi \cdot f \cdot t$ .

# Fourier

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (10)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin(n\theta) d\theta \quad (11)$$

# Even en oneven termen

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\pi} V_{dc} \cos(n\theta) d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} -V_{dc} \cos(n\theta) d\theta \right] = 0 \quad (12)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\pi} V_{dc} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\pi}^{2\pi} -V_{dc} \sin(n\theta) d\theta \right] \quad (13)$$

# Uitwerking

$$b_n = \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[ -\cos(n\theta) \Big|_0^{\pi} + \cos(n\theta) \Big|_{\pi}^{2\pi} \right] \quad (14)$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[ (\cos(0) - \cos(n\pi)) + (\cos(n2\pi) - \cos(n\pi)) \right] \quad (15)$$

$$= \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[ (1 - \cos(n\pi)) + (1 - \cos(n\pi)) \right] \quad (16)$$

$$= \frac{2V_{dc}}{n\pi} (1 - \cos(n\pi)) \quad (17)$$

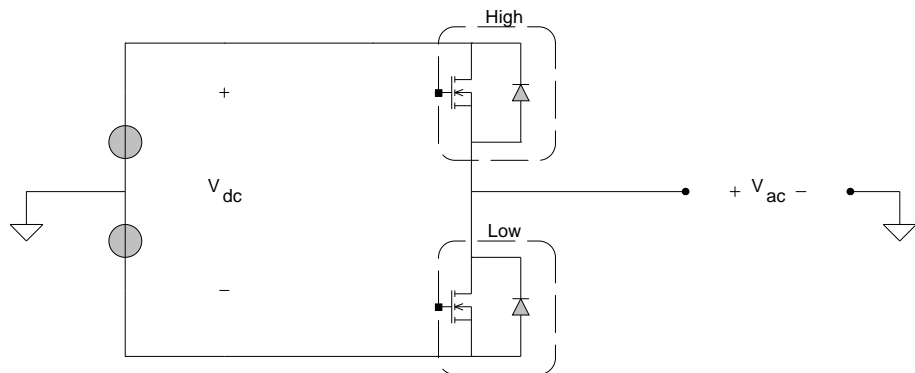
# Oneven componenten

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \quad (18)$$

Grondharmonische

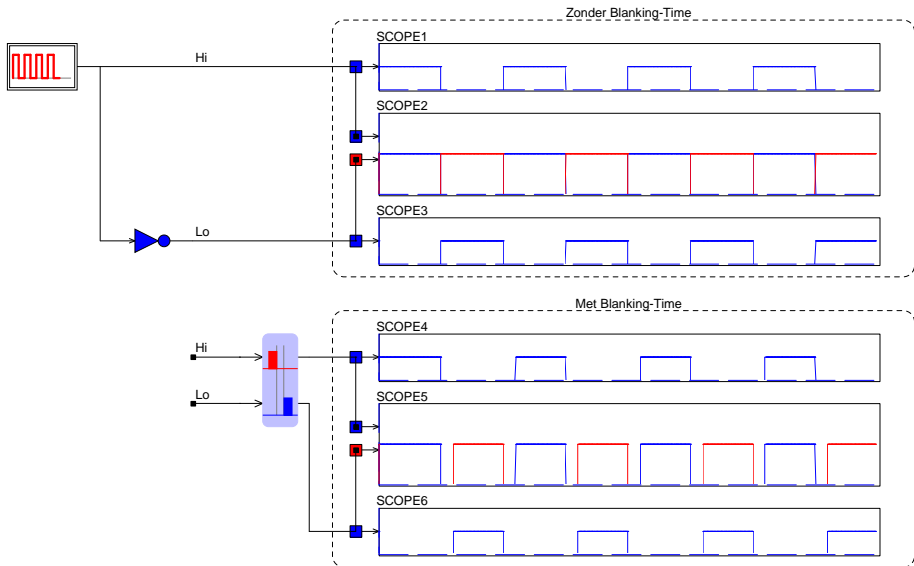
$$b_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} = 1.27 \cdot V_{dc} \quad (19)$$

# Inverter-leg



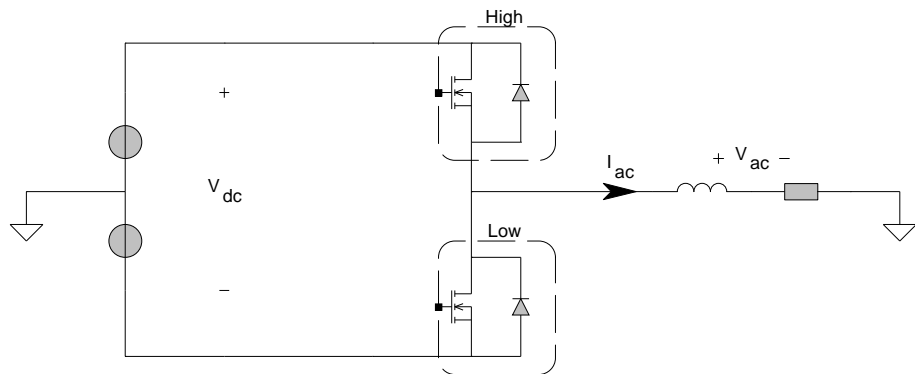
Figuur: Inverter-leg met 2 Mosfets en vrijlooptdiodes.

# Blanking time



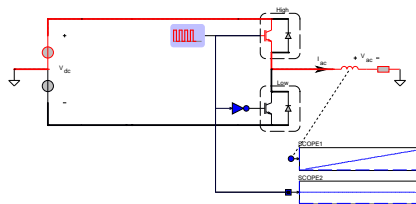


# Inverter-leg RL belasting

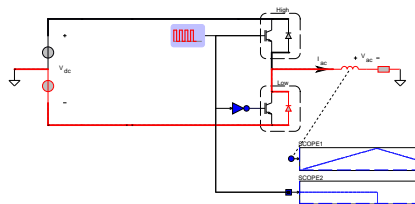


Figuur: Inverter-leg met R-L belasting.

## Vrijloop

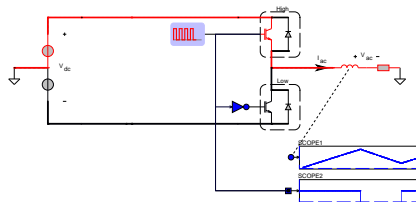


Figuur: Stroom via IGBT-High,  
 $0 < t < dT$

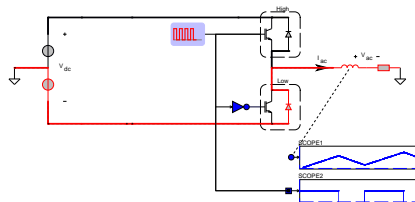


Figuur: Stroom via Diode-Low,  
 $dT < t < T$

## Vrijloop

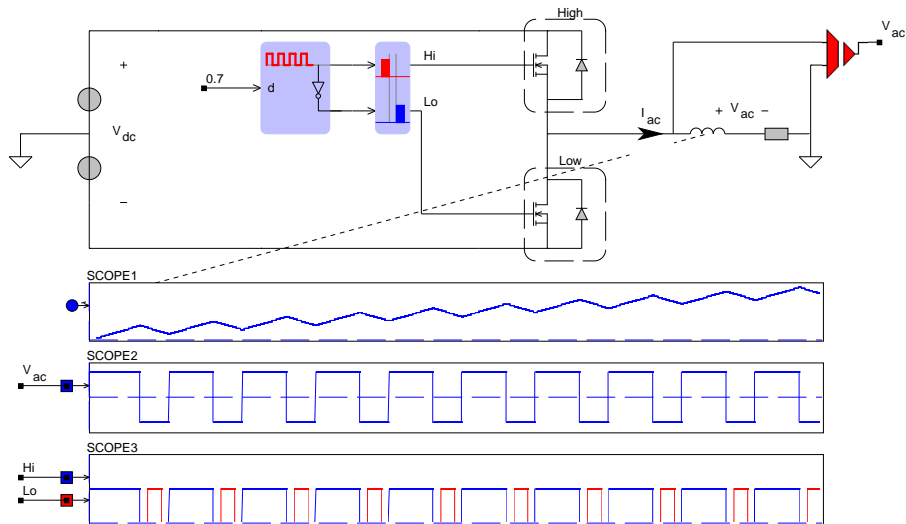


Figuur: Stroom via IGBT-High,  
 $T < t < T + dT$



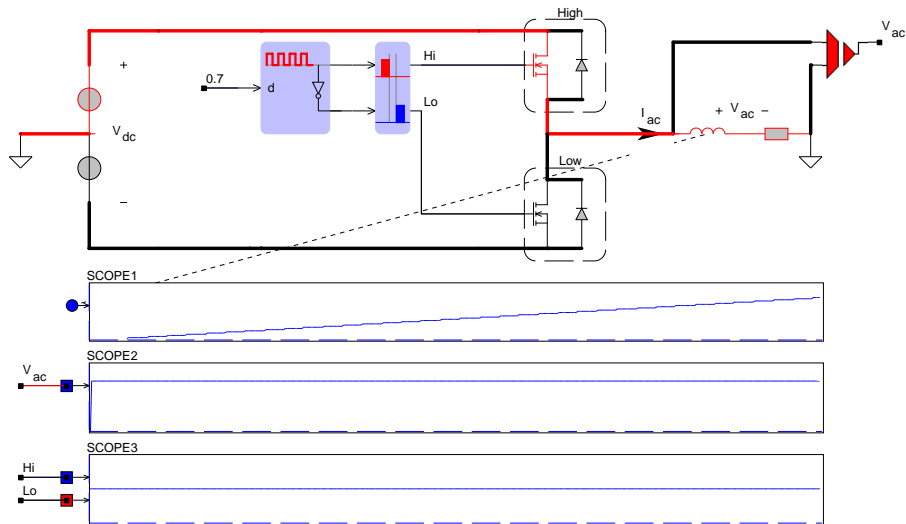
Figuur: Stroom via diode-Low,  
 $T + dT < t < 2T$

# Synchrone buck



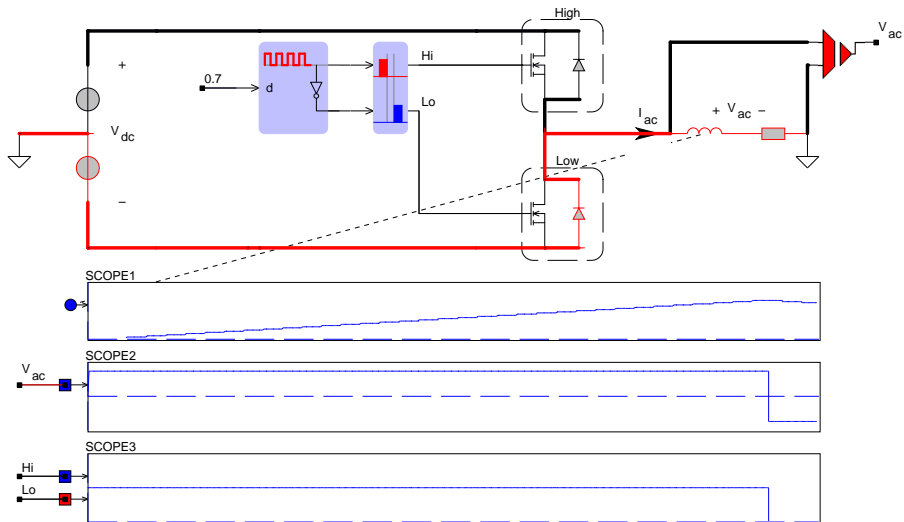
**Figuur:** Inverter-leg met Mosfets die in twee richtingen de stroom kunnen

# Mosfet is net een weerstand



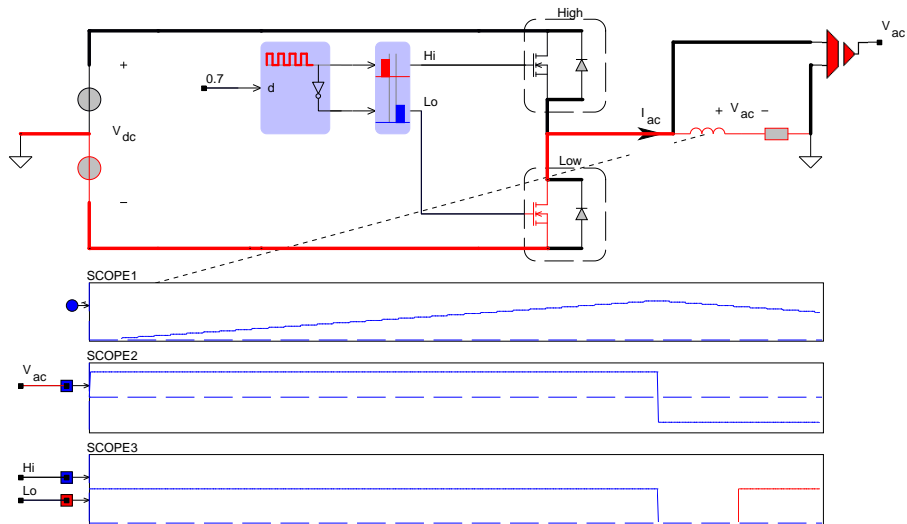
**Figuur:** Inverter-leg met Mosfets die in twee richtingen de stroom kunnen

# Vrijloop bij Mosfets



**Figuur:** Inverter-leg met Mosfets die in twee richtingen de stroom kunnen

## Vrijloop



**Figuur:** Inverter-leg met Mosfets die in twee richtingen de stroom kunnen