F5: Vektorer (Appendix B)
och
Vektormodulation (Kap PE 2)

Trefasig växelriktare
- Normalt ansluts inte neutralledaren

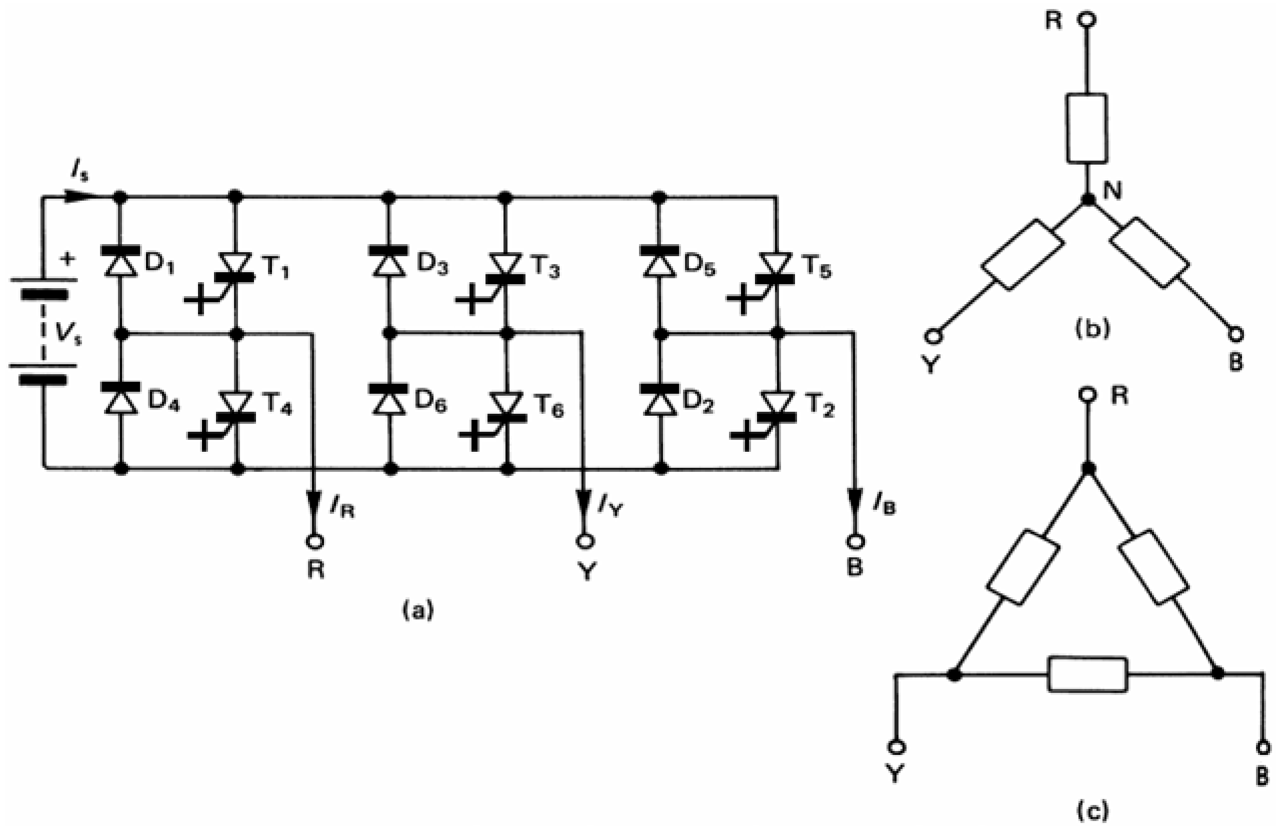
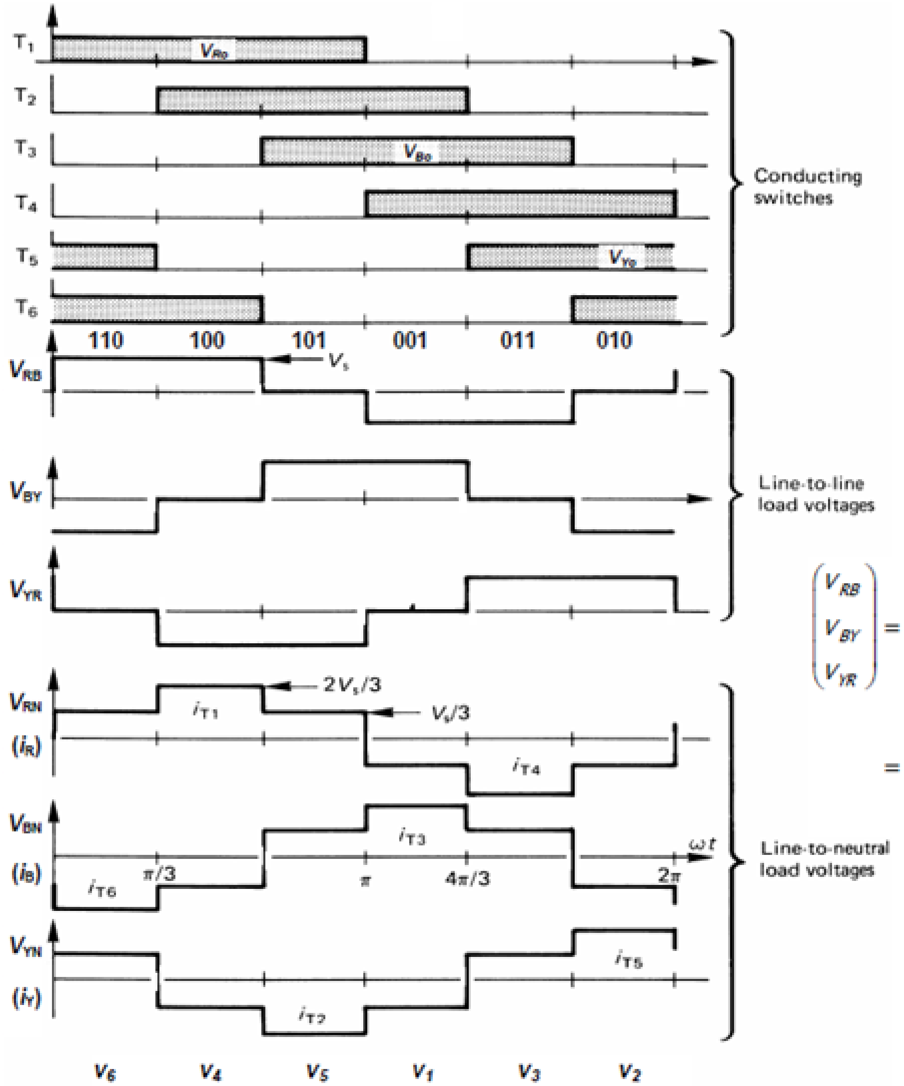
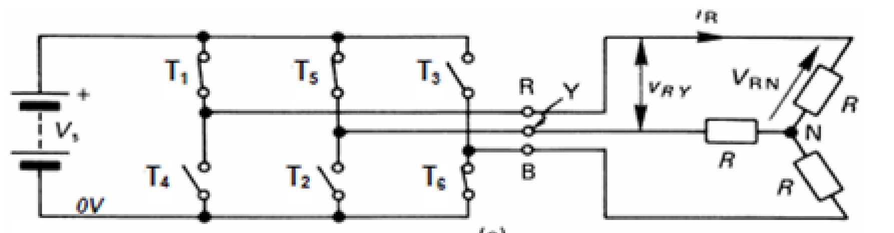


Figure 15.7. *Three-phase VSI inverter circuit:*
(a) GCT thyristor bridge inverter; (b) star-type load; and (c) delta-type load.

Trefasig växelriktare
- Six-step



(b)



(a)

Figure 15.8. *A three-phase bridge inverter employing 180° switch conduction with a resistive load: (a) the bridge circuit showing T_1, T_5, and T_6 conducting (leg state* $\mathbf{v_6}$:= 110*); (b) circuit voltage and current waveforms with each of six sequential output voltage vectors identified; and (c) phase voltage to line voltage conversion matrix.*

$$\begin{pmatrix} V_{RB} \\ V_{BY} \\ V_{YR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{RN} - V_{BN} \\ V_{BN} - V_{YN} \\ V_{YN} - V_{RN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{RN} \\ V_{BN} \\ V_{YN} \end{pmatrix}$$

(c)

Trefasig växelriktare
- PWM

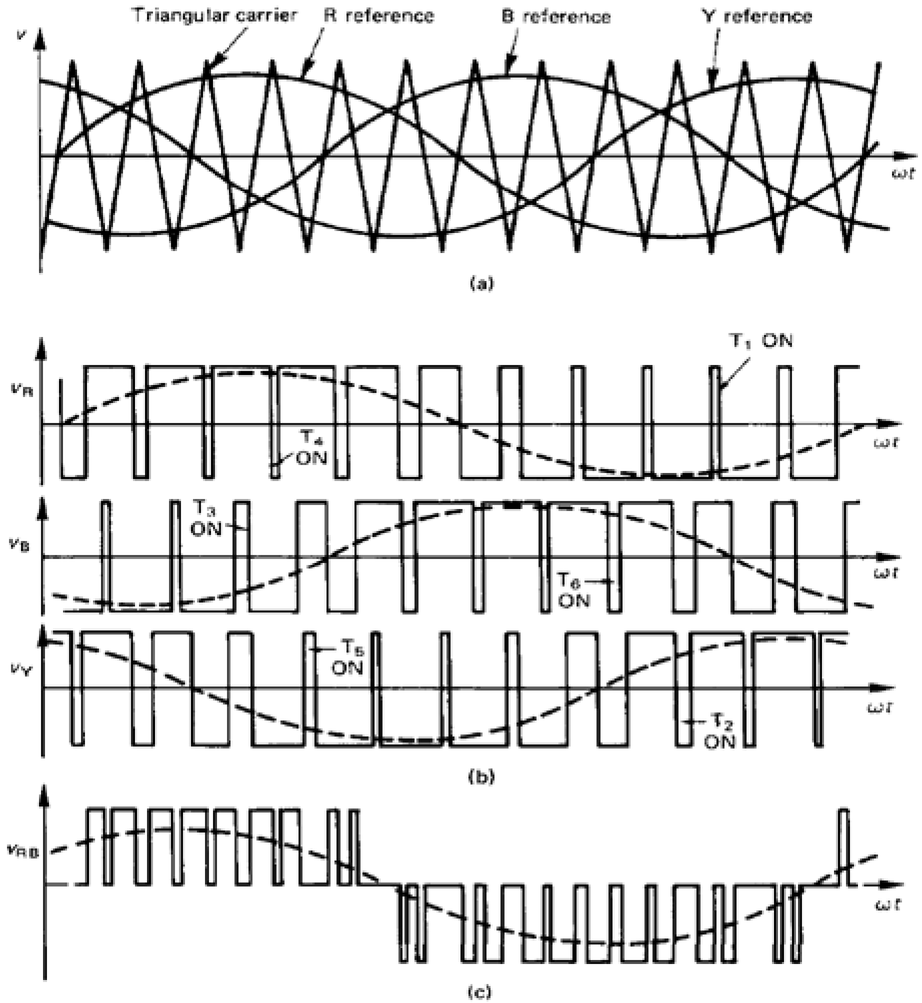


Figure 15.17. *Naturally sampled pulse-width modulation waveforms suitable for a three-phase bridge inverter: (a) reference signals; (b) conducting devices and fundamental sine waves; and (c) one output line-to-line voltage waveform.*

Modulation av trefasomvandlare

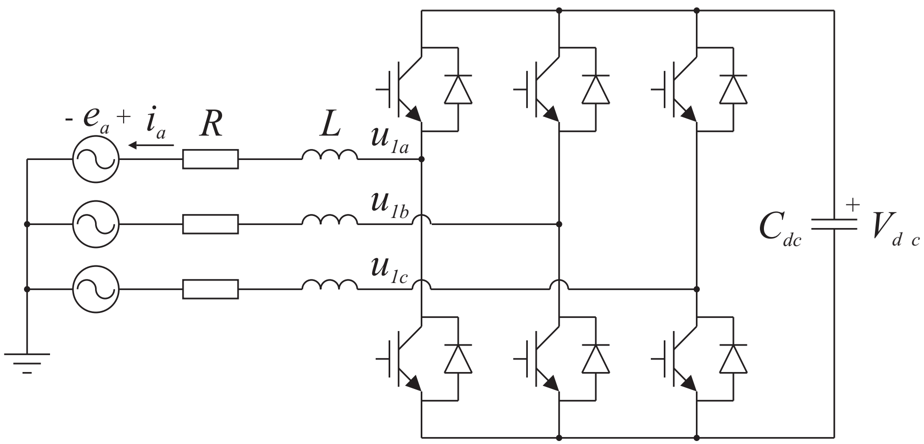


Figure 2.18: Den undersökta omvandlaren (styrd likriktare ansluten till trefasnätet)

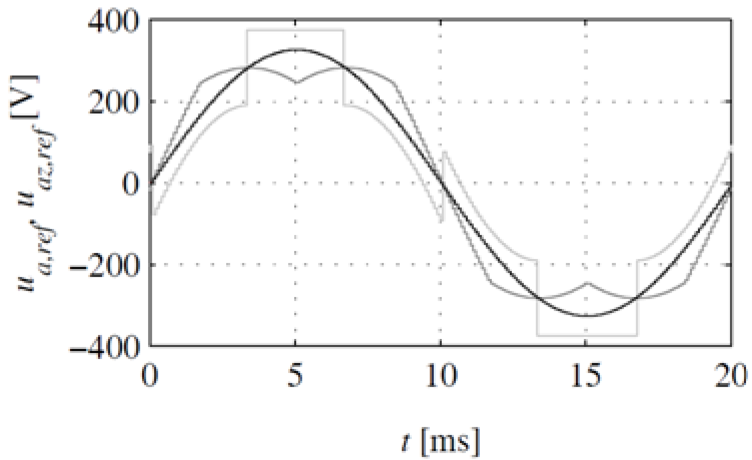


Figure 2.19: Bärvågsmodulation med sinusformiga (*svart*), symmetriska (*grå*) och bus-clamp (*ljusgrå*) spänningsreferenser.

Modulationsindex:

$$m_a = \frac{u_{i,ref}}{V_{dc}/2} \quad \text{där} \quad i = a,b,c$$

Spänningsgräns för övermodulation

För att undvika övermodulation: $$\left|m_a\right| = \frac{\left|u_{i,ref}\right|}{V_{dc}/2} \leq 1$$

Gräns för övermodulation vid sinusformiga referensspänningar:

$$u_{i,ref,max} = \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{där} \quad i = a,b,c$$

Gräns för övermodulation vid symmetriska referensspänningar:

$$u_{iz,ref,max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{dc} \quad \text{där} \quad i = a,b,c$$

Gräns för övermodulation vid bus-clamped referensspänningar:

$$u_{iz,ref,max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{dc} \quad \text{där} \quad i = a,b,c$$

DM Övertonsinnehåll i utspänningen

- Motsvarar övertonsinnehållet i huvudspänningarna

$$u_{ij} = u_{iz} - u_{jz} \quad \text{där} \quad i, j = a, b, c$$

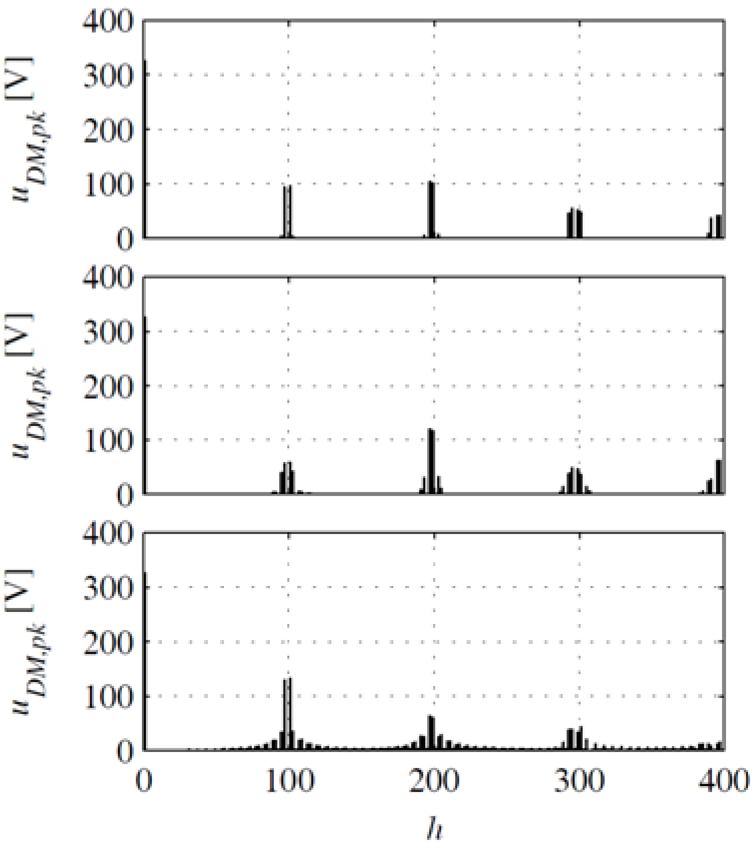


Figure 2.20: DM utspänningsspektrum för sinusformiga (*överst*), symmetriska (*mitten*) och bus-clamped (*nederst*) referensspänningar vid bärvågsmodulation. Grundtonsfrekvensen är 50 Hz och spektrum visas som funktion av övertonsordning, *h*, där 1 betecknar grundtonsfrekvensen.

CM Övertonsinnehåll i utspänningen

- Motsvarar övertonsinnehållet i nollföljdskomponenten $\boldsymbol{u_z}$

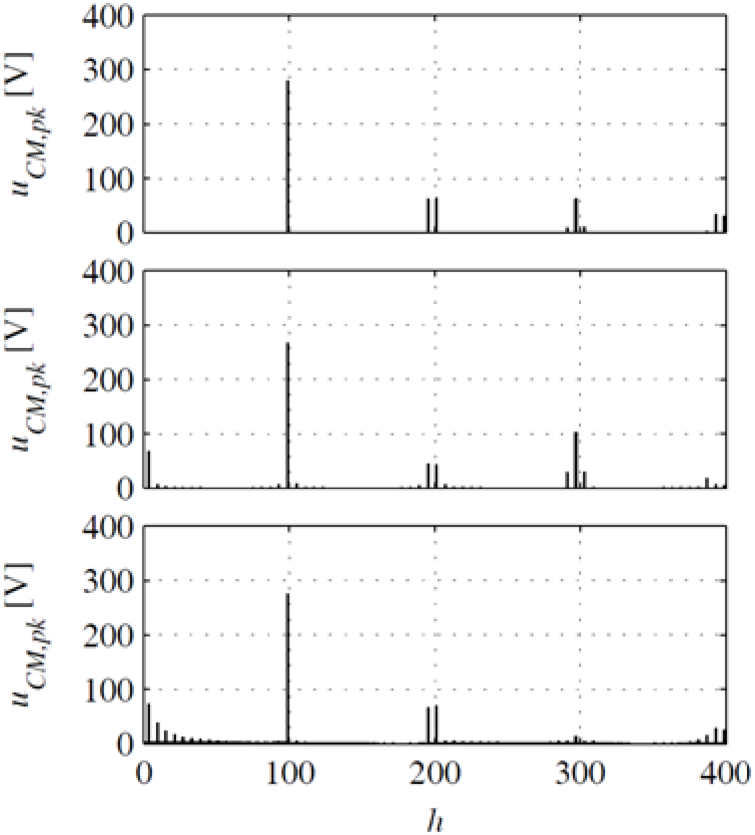
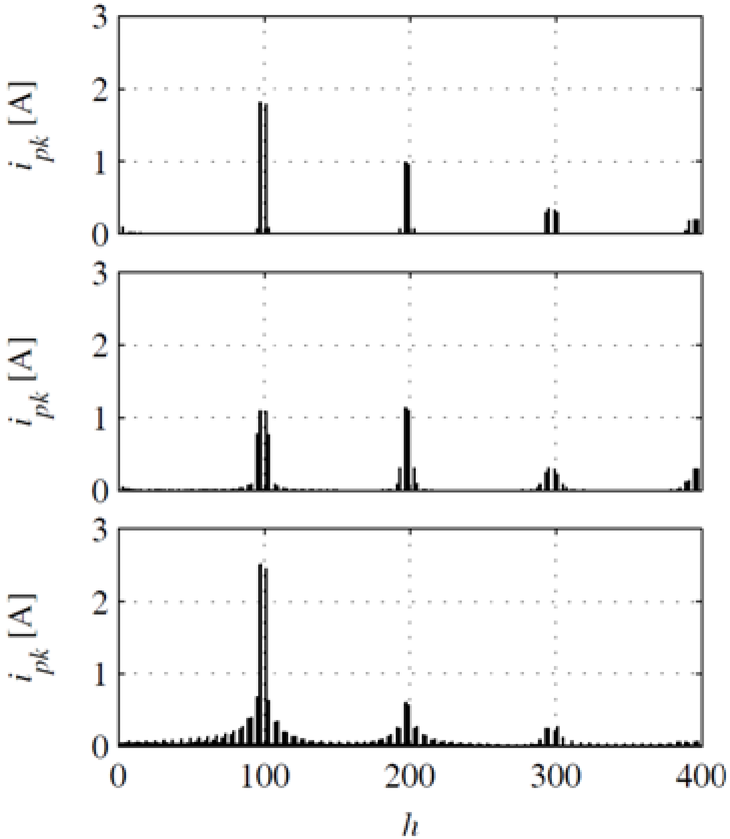


Figure 2.21: CM utspänningsspektrum för sinusformiga (*överst*), symmetriska (*mitten*) och bus-clamped (*nederst*) referensspänningar vid bärvågsmodulation. Grundtonsfrekvensen är 50 Hz och spektrum visas som funktion av övertonsordning, *h*, där 1 betecknar grundtonsfrekvensen.

Övertonsinnehåll i utströmmen

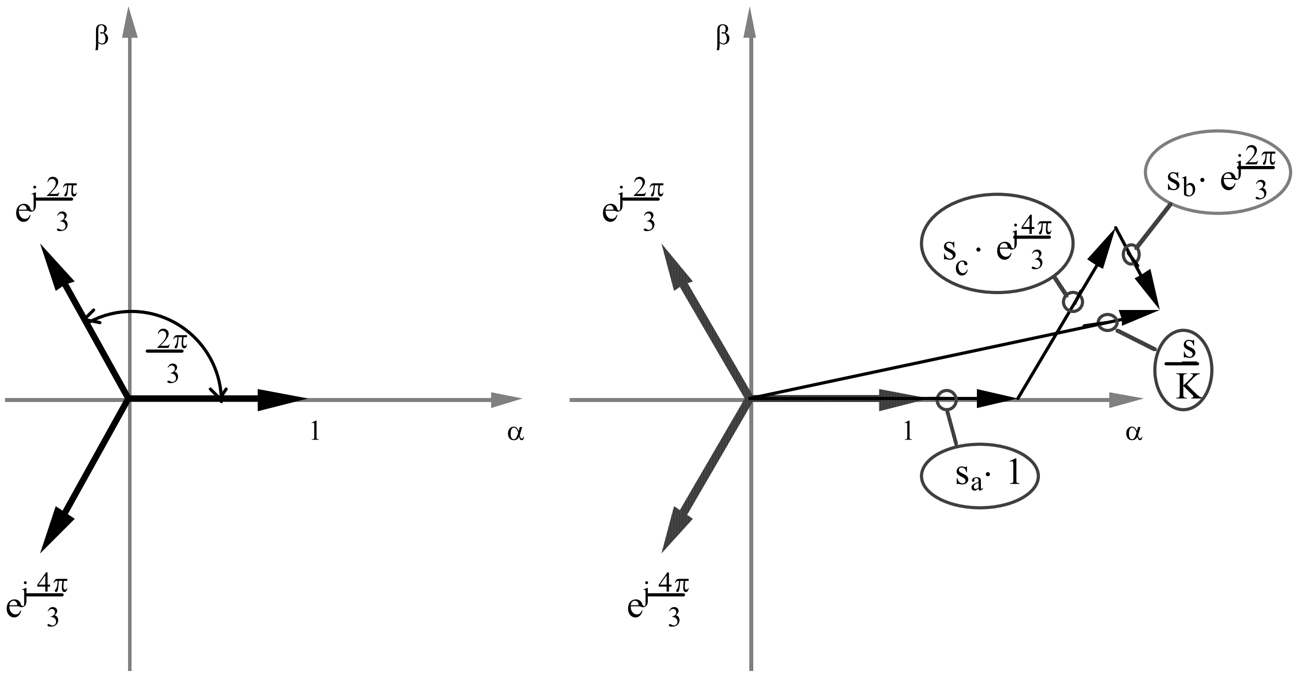


Om omvandlaren har oändlig impedans till jord (nollföljdsimpedans) så får man strömspektrat genom att skala DM utspänningsspektrat med impedansen

$$Z_L = j\omega_1 hL$$

Figure 2.22: Utströmsspektrum för sinusformiga (*överst*), symmetriska (*mitten*) och bus-clamped (*nederst*) referensspänningar vid bärvågsmodulation. Grundtonsfrekvensen är 50 Hz och spektrum visas som funktion av övertonsordning, *h*, där 1 betecknar grundtonsfrekvensen.

Vektorer i trefassystem (I)

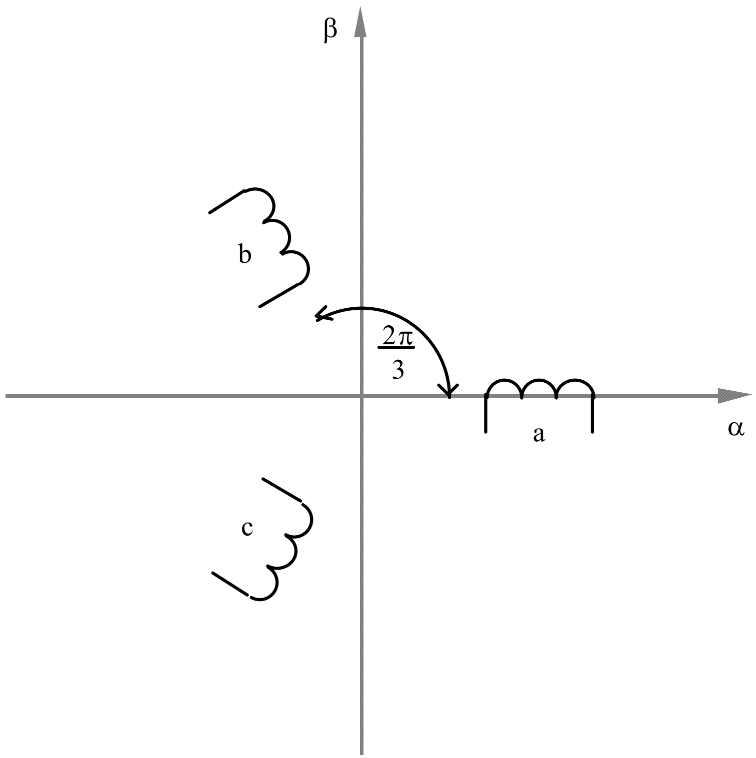


Figur B.16. Referensriktningar och enhetsvektorer (*vänster*)
Vektorn $\vec{s}$ och dess komponenter (*höger*).

$$\vec{s} = s_\alpha + js_\beta = k\left[s_a + s_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + s_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right]$$

k=2/3 kallas Park-transformation (amplitudinvariant)

Vektorer i trefassystem (II)



Figur B.17. Stiliserad bild av lindningarnas fördelning i en tvåpolig trefas växelströmsmaskin.

$$\vec{s} = s_\alpha + js_\beta = k\left[s_a + s_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + s_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right]$$

k=2/3 kallas Park-transformation (amplitudinvariant)

Vektorer i trefassystem (III)
- Effektinvarians

Konstanten k kan väljas godtyckligt!

Effekten tecknas:

$$p(t) = u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)$$

Där

$$\vec{s} = s_\alpha + js_\beta = k\left[s_a + s_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + s_c e^{j\frac{4\pi}{3}}\right]$$

ger:

$$\begin{cases} u_\alpha = k\dfrac{3}{2}u_a \\ u_\beta = k\dfrac{\sqrt{3}}{2}(u_b - u_c) \end{cases} \quad \text{och} \quad \begin{cases} i_\alpha = k\dfrac{3}{2}i_a \\ i_\beta = k\dfrac{\sqrt{3}}{2}(i_b - i_c) \end{cases}$$

Vektorer i trefassystem (IV)
- Effektinvarians

Föregående gäller förutsatt symmetri, dvs

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0$$

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$$

Effekten blir:

$$p(t) = k^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)\right)$$

För att man ska slippa skalfaktor på effekten (dvs transformationen ska vara effektinvariant) så gäller ska k väljas:

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Vektorer i trefassystem (V)
- Effektinvarians

Alltså gäller för effektinvariant transformation:

$$\vec{s} = s_\alpha + js_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}}\left[s_a + s_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + s_c e^{j\frac{4\pi}{3}}\right] = \sqrt{\frac{3}{2}}s_a + j\frac{1}{\sqrt{2}}(s_b - s_c)$$

Effektinvariant

trefas $\Rightarrow$ tvåfasomvandling

$$\begin{cases} s_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}}s_a \\ s_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(s_b - s_c\right) \end{cases}$$

Effektinvariant

tvåfas $\Rightarrow$ trefasomvandling

$$\begin{cases} s_a = \sqrt{\frac{2}{3}}s_\alpha \\ s_b = -\frac{1}{\sqrt{6}}s_\alpha + \frac{1}{\sqrt{2}}s_\beta \\ s_c = -\frac{1}{\sqrt{6}}s_\alpha - \frac{1}{\sqrt{2}}s_\beta \end{cases}$$

Vektorer i trefassystem (VI)
- Amplitudinvarians

För amplitudinvariant transformation (k=2/3) gäller:

$$\vec{s} = s_\alpha + js_\beta = \frac{2}{3}\left[s_a + s_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + s_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] = s_a + j\frac{1}{\sqrt{3}}(s_b - s_c)$$

Amplitudinvariant

trefas ⇒ tvåfasomvandling

$$\begin{cases} s_\alpha = s_a \\ s_\beta = \dfrac{1}{\sqrt{3}}(s_b - s_c) \end{cases}$$

Amplitudinvariant

tvåfas ⇒ trefasomvandling

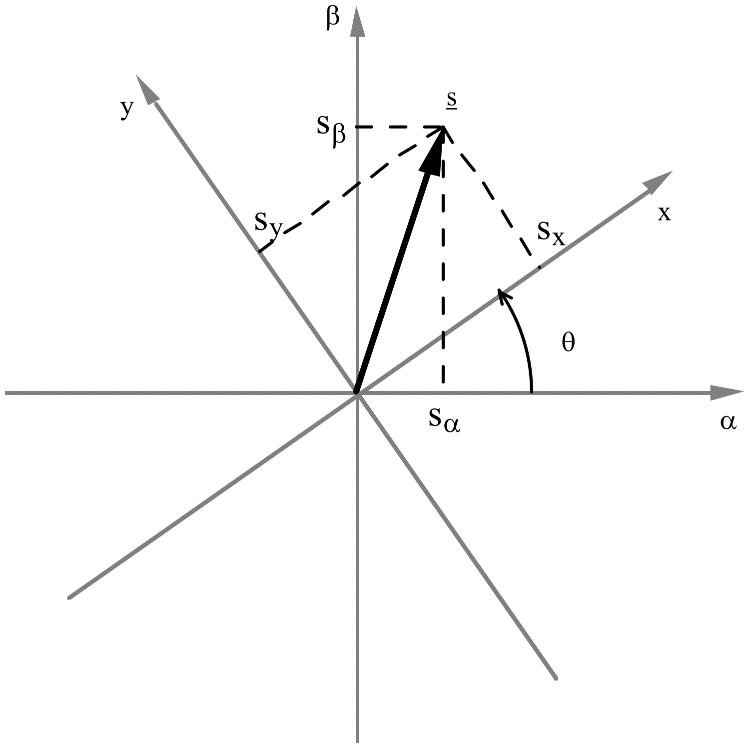
$$\begin{cases} s_a = s_\alpha \\ s_b = -\dfrac{1}{2}s_\alpha + \dfrac{\sqrt{3}}{2}s_\beta \\ s_c = -\dfrac{1}{2}s_\alpha - \dfrac{\sqrt{3}}{2}s_\beta \end{cases}$$

$$p(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = \frac{3}{2}\cdot\left(u_\alpha(t)i_\alpha(t) + u_\beta(t)i_\beta(t)\right)$$

Vektorer i trefassystem (VII)

- Koordinattransformation

En vektor $\vec{s}$ som uttrycks i t.ex $\alpha\beta$-koordinater enligt ovan kan uttryckas i vilket annat koordinatsystem som helst (x,y) genom att utföra en koordinattransformation, se nedan.



Figur B.18. Vektorn $\vec{s}$ i olika koordinatsystem.

Vektorer i trefassystem (VIII)
- Koordinattransformation

Antag att vinkelskillnaden mellan de båda koordinatsystemen är θ. Då kan vektorn $\vec{s}$ uttryckas i $\alpha\beta$- eller xy-koordinater, markerat med överindex, genom följande arrangemang:

$$\vec{s}^{\,xy} = s_x + js_y = \vec{s}^{\,\alpha\beta} e^{-j\theta} =$$

$$= (s_\alpha + js_\beta)(\cos\theta - j\sin\theta) =$$

$$= (s_\alpha \cos\theta + s_\beta \sin\theta) + j(s_\beta \cos\theta - s_\alpha \sin\theta)$$

dvs

$$\begin{cases} s_x = s_\alpha \cos\theta + s_\beta \sin\theta \\ s_y = -s_\alpha \sin\theta + s_\beta \cos\theta \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_\alpha \\ s_\beta \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} s_\alpha \\ s_\beta \end{bmatrix}$$

Vektorer i trefassystem (IX)
- Koordinattransformation

Omvänt gäller:

$$\begin{cases} s_\alpha = s_x \cos\theta - s_y \sin\theta \\ s_\beta = s_x \sin\theta + s_y \cos\theta \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} s_\alpha \\ s_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix}$$

Vektorrepresentation (I)

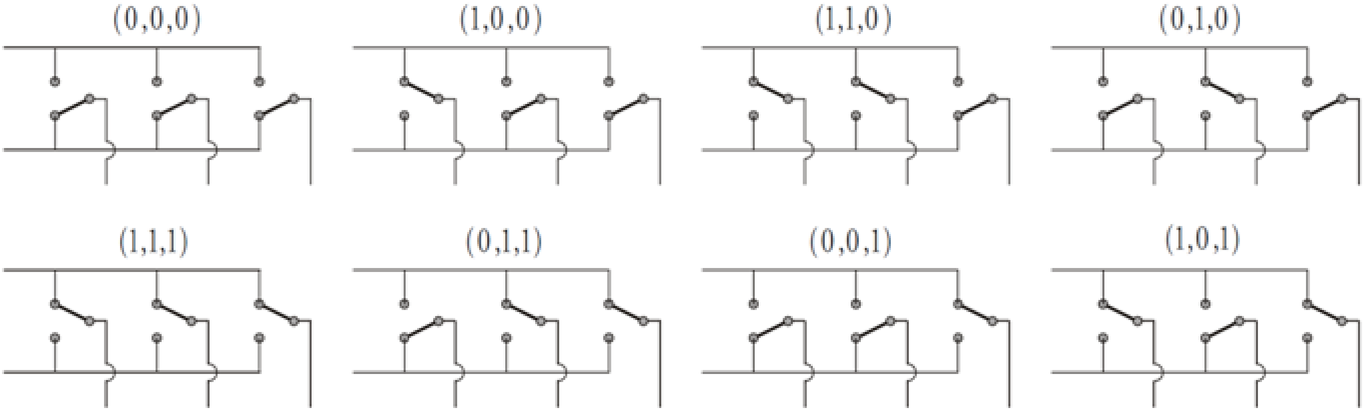
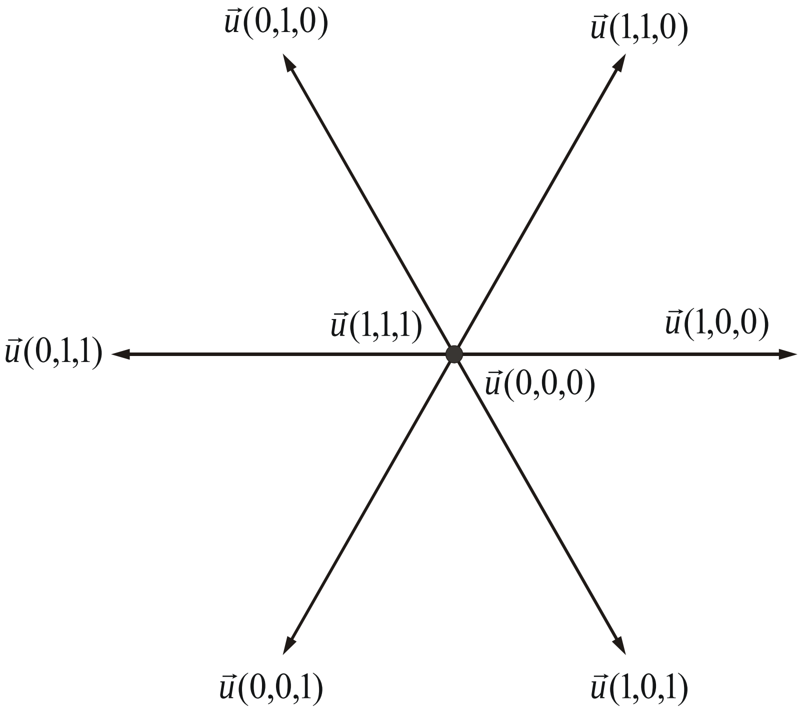


Figure 2.23: Åtta kombinationer …



$$\vec{u}(1,0,0) = \sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc} = -\vec{u}(0,1,1)$$

$$\vec{u}(0,1,0) = \sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc} \cdot e^{j\frac{2\cdot\pi}{3}} = -\vec{u}(1,0,1)$$

$$\vec{u}(0,0,1) = \sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc} \cdot e^{j\frac{4\cdot\pi}{3}} = -\vec{u}(1,1,0)$$

$$\vec{u}(0,0,0) = 0 = \vec{u}(1,1,1)$$

Figure 2.24: Spänningsvektorer från en trefas, tvånivåomvandlare

Vektorrepresentation (II)

Rymdvektor:

$$\vec{x}^{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[x_a \cdot e^{j0} + x_b \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + x_c \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] = x_\alpha + jx_\beta$$

$$x_a + x_b + x_c = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} x_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot x_a \\ x_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(x_b - x_c\right) \end{cases}$$

$$x_a + x_b + x_c \neq 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} x_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot x_a - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot x_b - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot x_c \\ x_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(x_b - x_c\right) \end{cases}$$

Exempel:

$$\begin{cases} e_a = \hat{e} \cdot \cos\left(\omega_1 t\right) \\ e_b = \hat{e} \cdot \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \hat{e} \cdot \cos\left(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} e_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot e_a = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \hat{e} \cdot \cos\left(\omega_1 t\right) \\ e_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(e_b - e_c\right) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \hat{e} \cdot \sin\left(\omega_1 t\right) \end{cases}$$

Vektorrepresentation (III)

Table 2.1: Voltage vectors used at $\omega_1 t = \pi/4$.

Switch state	u_α	u_β
000	0	0
100	$\sqrt{2/3}\cdot V_{dc}$	0
110	$1/\sqrt{6}\cdot V_{dc}$	$1/\sqrt{2}\cdot V_{dc}$
111	0	0

Table 2.2: Converter specification.

DC link voltage	V_{dc}	750 V
Grid peak voltage	$\hat{e}$	325 V
Grid frequency	f_1	50 Hz
Switching frequency	f_{sw}	5000 Hz
Line filter inductance	L	1.7 mH

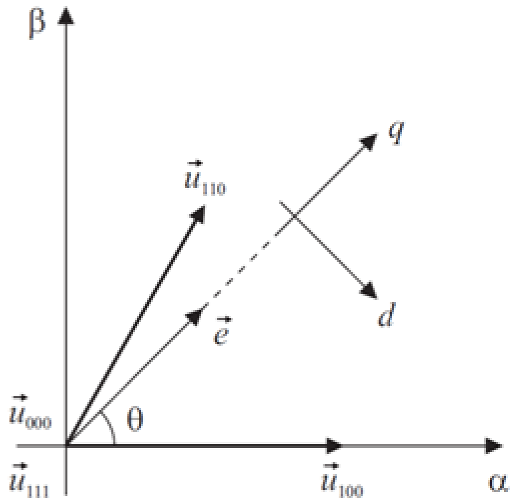


Figure 2.25: The grid voltage vector and the converter output voltage vectors applied at $\omega_1 t = \pi/4$.

$$u_{i,ref} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{T_s}\cdot t_i \quad \Leftrightarrow \quad t_i = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{i,ref}}{V_{dc}}\right)\cdot T_s$$

$$\vec{u}^{\alpha\beta} - L\frac{d}{dt}\vec{i}^{\alpha\beta} - R\vec{i}^{\alpha\beta} - \vec{e}^{\alpha\beta} \approx \vec{u}^{\alpha\beta} - L\frac{d}{dt}\vec{i}^{\alpha\beta} - \vec{e}^{\alpha\beta} = 0$$

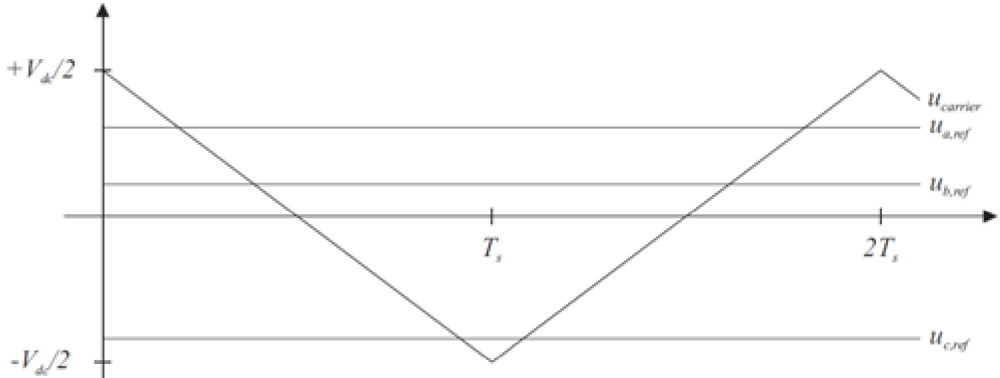
$$\begin{cases} \dfrac{\Delta i_\alpha}{\Delta t} = \dfrac{1}{L}(u_\alpha - e_\alpha) \\ \dfrac{\Delta i_\beta}{\Delta t} = \dfrac{1}{L}(u_\beta - e_\beta) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta i_\alpha = \dfrac{1}{L}(u_\alpha - e_\alpha)\Delta t \\ \Delta i_\beta = \dfrac{1}{L}(u_\beta - e_\beta)\Delta t \end{cases}$$

Vektorrepresentation (IV)

Modulation med sinusformiga referensvärden

$$\omega_1 t = \pi/4 \quad \Rightarrow$$

$$\begin{cases} u_{a,ref} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\hat{e} = 229.8\ \text{V} \\ u_{b,ref} = \dfrac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}\hat{e} = 84.1\ \text{V} \\ u_{c,ref} = -\dfrac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}}\hat{e} = -313.9\ \text{V} \end{cases}$$



s_a	0	1	1	1	1	1	1	0	
s_b	0	0	1	1	1	1	0	0	
s_c	0	0	0	1	1	0	0	0	

Figure 2.26: Modulationsbärvåg och faspotential referenser vid $\omega_1 t=\pi/4$ vid sinusformiga referenser. Den nedre delen visar de applicerade switch-tillstånden.

$$\begin{cases} e_a = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\hat{e} \\ e_b = \dfrac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}\hat{e} \\ e_c = -\dfrac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}}\hat{e} \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} e_\alpha = \sqrt{\dfrac{3}{2}} \cdot e_a = \dfrac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{e} \\ e_\beta = \dfrac{1}{\sqrt{2}}(e_b - e_c) = \dfrac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{e} \end{cases}$$

Vektorrepresentation (V)
Modulation med sinusformiga referensvärden

$$u_{i,ref} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{T_s} \cdot t_i \quad \Leftrightarrow \quad t_i = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{i,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s \quad \Rightarrow$$

$$\begin{cases} u_{a,ref} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{e} = 229.8\text{V} \\ u_{b,ref} = \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}} \hat{e} = 84.1\text{V} \\ u_{c,ref} = -\frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}} \hat{e} = -313.9\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_a = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{a,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.194 \cdot T_s = 19.4\ \mu\text{s} \\ t_b = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{b,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.388 \cdot T_s = 38.8\ \mu\text{s} \\ t_c = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{c,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.919 \cdot T_s = 91.9\ \mu\text{s} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta t_{000} = t_a - 0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{a,ref}}{V_{dc}} \right) T_s = 19.4\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{100} = t_b - t_a = \left(\frac{u_{a,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{b,ref}}{V_{dc}} \right) T_s = 19.4\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{110} = t_c - t_b = \left(\frac{u_{b,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{c,ref}}{V_{dc}} \right) T_s = 53.1\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{111} = T_s - t_c = \left(\frac{1}{2} + \frac{u_{c,ref}}{V_{dc}} \right) T_s = 8.1\ \mu\text{s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta i_\alpha = \frac{1}{L} (u_\alpha - e_\alpha) \Delta t \\ \Delta i_\beta = \frac{1}{L} (u_\beta - e_\beta) \Delta t \end{cases}$$

Table 2.3: Current vector increase.

Switch state	Δi_α [A]	Δi_β [A]
000	-3.21	-3.21
100	3.78	-3.21
110	0.77	7.77
111	-1.34	-1.34

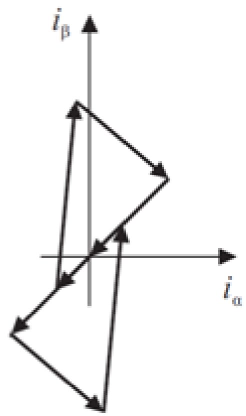


Figure 2.27: Strömvektorer.

Vektorrepresentation (VI)

Modulation med symmetriska referensvärden

$$u_{i,ref} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{T_s} \cdot t_i \quad \Leftrightarrow \quad t_i = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{i,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s \quad \Rightarrow$$

$$\begin{cases} u_{az,ref} = 271.85\text{V} \\ u_{bz,ref} = 126.15\text{V} \\ u_{cz,ref} = -271.85\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_a = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{az,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.138 \cdot T_s = 13.8\ \mu\text{s} \\ t_b = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.332 \cdot T_s = 33.2\ \mu\text{s} \\ t_c = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 0.863 \cdot T_s = 86.3\ \mu\text{s} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta t_{000} = t_a - 0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{az,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 13.8\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{100} = t_b - t_a = \left(\frac{u_{az,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 19.4\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{110} = t_c - t_b = \left(\frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 53.1\ \mu\text{s} \\ \Delta t_{111} = T_s - t_c = \left(\frac{1}{2} + \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}} \right) \cdot T_s = 13.8\ \mu\text{s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta i_\alpha = \frac{1}{L} (u_\alpha - e_\alpha) \Delta t \\ \Delta i_\beta = \frac{1}{L} (u_\beta - e_\beta) \Delta t \end{cases}$$

Table 2.4: Current vector increase.

Switch state	Δi_α [A]	Δi_β [A]
000	-2.28	-2.28
100	3.78	-3.21
110	0.77	7.77
111	-2.28	-2.28

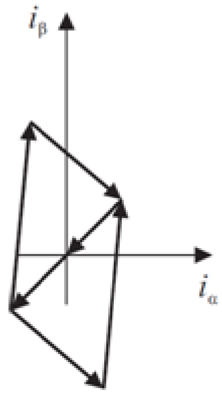


Figure 2.28: Strömvektorer.

Vektorrepresentation (VII)

Modulation med bus-clamped referensvärden

$$u_{i,ref} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{T_s} \cdot t_i \quad \Leftrightarrow \quad t_i = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{i,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s \quad \Rightarrow$$

$$\begin{cases} u_{az,ref} = 168.7\text{V} \\ u_{bz,ref} = 23.0\text{V} \\ u_{cz,ref} = -375.0\text{V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_a = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{az,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 0.275 \cdot T_s = 27.5\,\mu\text{s} \\ t_b = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 0.469 \cdot T_s = 46.9\,\mu\text{s} \\ t_c = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 1.000 \cdot T_s = 100.0\,\mu\text{s} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta t_{000} = t_a - 0 = \left(\frac{1}{2} - \frac{u_{az,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 27.5\,\mu\text{s} \\ \Delta t_{100} = t_b - t_a = \left(\frac{u_{az,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 19.4\,\mu\text{s} \\ \Delta t_{110} = t_c - t_b = \left(\frac{u_{bz,ref}}{V_{dc}} - \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 53.1\,\mu\text{s} \\ \Delta t_{111} = T_s - t_c = \left(\frac{1}{2} + \frac{u_{cz,ref}}{V_{dc}}\right) \cdot T_s = 0.0\,\mu\text{s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta i_\alpha = \frac{1}{L}(u_\alpha - e_\alpha)\Delta t \\ \Delta i_\beta = \frac{1}{L}(u_\beta - e_\beta)\Delta t \end{cases}$$

Table 2.5: Current vector increase.

Switch state	Δi_α [A]	Δi_β [A]
000	-4.55	-4.55
100	3.78	-3.21
110	0.77	7.77
111	0.0	0.0

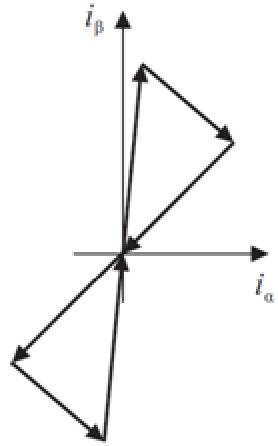


Figure 2.29: Strömvektorer.