Mittelpunkt– und Brückenschaltungen

1. Zeitverläufe: siehe Bilder

2. Gleichspannungs–Mittelwert:

Wechselspannung: $\mathrm{u(t)} = \hat{\mathrm{U}} \cdot \cos(\omega \mathrm{t}) = \sqrt{2} \cdot \mathrm{U} \cdot \cos(\omega \mathrm{t})$

Natürlicher Zündzeitpunkt ($\alpha = 0$) bei $-\dfrac{\pi}{\mathrm{p}}$ (bezogen auf den $\cos \omega \mathrm{t}$)

Allgemein gilt bei p–pulsigen Schaltungen und <u>nicht–lückendem</u> Laststrom $\mathrm{i_d}$ für den Gleichspannungs–Mittelwert (Integral über eine Pulsperiode $\dfrac{2\pi}{\mathrm{p}}$):

$$\mathrm{U_{di\alpha}} = \frac{\mathrm{p}}{2\pi} \cdot \int_{-\frac{\pi}{\mathrm{p}}+\alpha}^{+\frac{\pi}{\mathrm{p}}+\alpha} \hat{\mathrm{U}} \cdot \cos(\omega \mathrm{t}) \cdot \mathrm{d}(\omega \mathrm{t}) = \frac{\mathrm{p}}{2\pi} \cdot \hat{\mathrm{U}} \cdot \left[\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{\mathrm{p}}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{\mathrm{p}}\right)\right]$$

$$\mathrm{U_{di\alpha}} = \hat{\mathrm{U}} \cdot (\frac{\mathrm{p}}{\pi}) \cdot \sin(\frac{\pi}{\mathrm{p}}) \cdot \cos\alpha = \mathrm{U_{di0}} \cdot \cos\alpha \quad \text{(Steuerkennlinie)}$$

$$\hat{\mathrm{U}} = \sqrt{2} \cdot \mathrm{U_s} = \sqrt{2} \cdot \mathrm{U_N} \quad \text{bei M2, M3, M6, B2}$$
$$\hat{\mathrm{U}} = \sqrt{2} \cdot \mathrm{U_v} = \sqrt{6} \cdot \mathrm{U_N} \quad \text{bei B6}$$

M2: $\mathrm{U_{di0}} = \dfrac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \mathrm{U_s} = 0{,}90 \cdot \mathrm{U_s} = 0{,}90 \cdot \mathrm{U_{s1}} \quad (\mathrm{U_s} = \mathrm{U_{s1}})$

M3: $\mathrm{U_{di0}} = \dfrac{3\sqrt{6}}{2\,\pi} \cdot \mathrm{U_s} = 1{,}17 \cdot \mathrm{U_s}$

M6: $\mathrm{U_{di0}} = \dfrac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \mathrm{U_s} = 1{,}35 \cdot \mathrm{U_s}$

B2: $\mathrm{U_{di0}} = \dfrac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \mathrm{U_s} = 0{,}90 \cdot \mathrm{U_s} = 1{,}80 \cdot \mathrm{U_{s1}} \quad (\mathrm{U_s} = 2 \cdot \mathrm{U_{s1}})$

B6: $\mathrm{U_{di0}} = \dfrac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \mathrm{U_v} = 1{,}35 \cdot \mathrm{U_v} = 2{,}34 \cdot \mathrm{U_s} \quad (\mathrm{U_v} = \sqrt{3} \cdot \mathrm{U_s})$

3. Maximale Sperr– bzw. Blockierspannung der Ventile:

$$\textbf{M2:}\quad \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}} = 2\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s}} = 2\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s1}} = \pi\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} = 3,14\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}}$$

$$\textbf{M3:}\quad \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}} = \sqrt{3}\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s}} = \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{v}} = \frac{2\pi}{3}\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} = 2,09\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}}$$

$$\textbf{M6:}\quad \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}} = 2\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s}} = \frac{2\pi}{3}\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} = 2,09\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}}$$

$$\textbf{B2:}\quad \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}} = \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s}} = 2\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s1}} = \frac{\pi}{2}\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} = 1,57\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}}$$

$$\textbf{B6:}\quad \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{T}} = \sqrt{3}\cdot\hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{s}} = \hat{\mathrm{U}}_{\mathrm{v}} = \frac{\pi}{3}\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} = 1,05\cdot\mathrm{U}_{\mathrm{di0}}$$

4. Zündfolge und Leitdauer der Ventile:

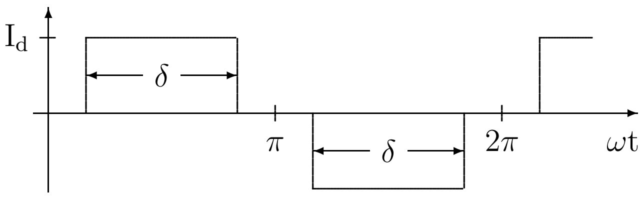
	Zündfolge (1 Netzperiode)						Pulsperiode	Leitdauer
M2:	T_1			T_2			$\frac{360°}{p} = 180°$	180°
M3:	T_1		T_2		T_3		$\frac{360°}{p} = 120°$	120°
M6:	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	$\frac{360°}{p} = 60°$	60°
B2:	$\frac{T_1}{T_4}$			$\frac{T_3}{T_2}$			$\frac{360°}{p} = 180°$	180°
B6:	$\frac{T_1}{(T_6)}$	$\frac{(T_1)}{T_2}$	$\frac{T_3}{(T_2)}$	$\frac{(T_3)}{T_4}$	$\frac{T_5}{(T_4)}$	$\frac{(T_5)}{T_6}$	$\frac{360°}{p} = 60°$	120°

5. Strom auf der Netzseite:

Phasenverschiebung der Netzstrom–Grundschwingung $i_{N(1)}$: $\varphi_1 = \alpha$

Bei ideal glattem Strom I_d gilt für den Netzstrom i_N (Trafo 1:1, d.h. $U_N = U_s$):

M2, B2:	180°–Stromblöcke, Amplitude I_d,
M3:	abhängig von Trafo–Schaltung (s. Bd. 4, S. 68–70)
M6:	60°–Stromblöcke, Amplitude I_d,
B6:	120°–Stromblöcke, Amplitude I_d.



Für blockförmige Netzströme der Länge δ und der Amplitude I_d gilt:

Grundschwingungs–Effektivwert: $I_{N(1)} = I_d \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sin\frac{\delta}{2} = I_d \cdot 0,90 \cdot \sin\frac{\delta}{2}$

Gesamt–Effektivwert: $I_N = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_d^2(\omega t)\cdot d(\omega t)} = I_d \cdot \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$

M2, B2: $I_{N(1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\cdot I_d = 0,900 \cdot I_d\,;\qquad I_N = I_d$

M3: $I_{N(1)} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi}\cdot I_d = 0,390 \cdot I_d\,;\qquad I_N = \frac{\sqrt{2}}{3}\cdot I_d = 0,471 \cdot I_d$

M6: $I_{N(1)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\cdot I_d = 0,450 \cdot I_d\,;\qquad I_N = \frac{1}{\sqrt{3}}\cdot I_d = 0,577 \cdot I_d$

B6: $I_{N(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\cdot I_d = 0,780 \cdot I_d\,;\qquad I_N = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\cdot I_d = 0,816 \cdot I_d$

6. Leistungen (netzseitig):

Wirkleistung allgemein: $\mathrm{P} = \dfrac{1}{\mathrm{T_p}} \displaystyle\int_0^{\mathrm{T_p}} \mathrm{u(t) \cdot i(t)\, dt}$

Für glatten Strom $\mathrm{I_d}$ gilt mit $\varphi_1 = \alpha$:

Wirkleistung:

$$\mathrm{P_d} = \mathrm{P_N} = \mathrm{P_{N(1)}} = \mathrm{U_{di\alpha}} \cdot \mathrm{I_d} = \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} \cdot \cos\alpha = \mathrm{S_{N(1)}} \cdot \cos\varphi_1$$

Grundschwingungs–Schein– bzw. Blindleistung (Faktor 3 bei Drehstromnetz):

$$\mathrm{S_{N(1)}} = (3) \cdot \mathrm{U_N} \cdot \mathrm{I_{N(1)}} = \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} \qquad \text{(unabhängig von } \alpha\text{)}$$

$$\mathrm{Q_{N(1)}} = \mathrm{S_{N(1)}} \cdot \sin\varphi_1 = \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} \cdot \sin\alpha$$

Gesamt–Scheinleistung bzw. –Blindleistung (Faktor 3 bei Drehstromnetz):

$$\mathrm{S_N} = (3) \cdot \mathrm{U_N} \cdot \mathrm{I_N} \qquad \text{(unabhängig von } \alpha\text{)}$$

$$\mathrm{Q_N} = \sqrt{\mathrm{S_N^2} - \mathrm{P_N^2}}$$

Leistungsfaktor:

$$\lambda = \frac{\mathrm{P_N}}{\mathrm{S_N}} = \frac{\mathrm{I_{N(1)}}}{\mathrm{I_N}} \cdot \cos\alpha$$

M2, B2: $\mathrm{S_N} = \dfrac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} = 1{,}11 \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d}\,;$ $\qquad \lambda = 0{,}900 \cdot \cos\alpha$

M3: $\mathrm{S_N} = \dfrac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} = 1{,}21 \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d}\,;$ $\qquad \lambda = 0{,}827 \cdot \cos\alpha$

M6: $\mathrm{S_N} = \dfrac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} = 1{,}28 \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d}\,;$ $\qquad \lambda = 0{,}780 \cdot \cos\alpha$

B6: $\mathrm{S_N} = \dfrac{\pi}{3} \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d} = 1{,}05 \cdot \mathrm{U_{di0}} \cdot \mathrm{I_d}\,;$ $\qquad \lambda = 0{,}955 \cdot \cos\alpha$

7. Betriebsbereiche, Zündwinkelbereiche:

theoretisch (bei allen Schaltungen): $\alpha = 0 \ldots 180°$
praktisch: Begrenzung durch die Art der Last,
bei aktiver Last (Gegenspannung U_0) durch die WR–Trittgrenze

<u>Zündwinkelbereiche für lückenden bzw. nicht–lückenden stationären Betrieb:</u>

Last	p	nicht–lückend	nicht–lückend/lückend (abh. von $T = \frac{L}{R}$ und U_0)	lückend
R	p = 2:	0°	– – –	0° ... 180°
	p = 3:	0° ... 30°	– – –	30° ... 150°
	p = 6:	0° ... 60°	– – –	60° ... 120°
L	p = 2:	90°	– – –	90° ... 180°
	p = 3:	90°	– – –	90° ... 150°
	p = 6:	90°	– – –	90° ... 120°
RL	p = 2:	0°	0° ... 90°	90° ... 180°
	p = 3:	0° ... 30°	30° ... 90°	90° ... 150°
	p = 6:	0° ... 60°	60° ... 90°	90° ... 120°
RL, U_0	p = 2:	– – –	0° ... 150° (180°)	– – –
	p = 3:	– – –	0° ... 150° (180°)	– – –
	p = 6:	– – –	0° ... 150° (180°)	– – –

Lückbetrieb, Lückgrenze:

Lückgrenze allgemein: $\alpha_{\mathrm{LG}} = \mathrm{f}(\mathrm{U}_0, \mathrm{T}, \mathrm{p})$ mit $\mathrm{T} = \dfrac{\mathrm{L}}{\mathrm{R}}$

$$\alpha_{\mathrm{LG}} = \arctan(\omega_{\mathrm{N}}\mathrm{T}) + \arctan\left[\cot(\frac{\pi}{\mathrm{p}}) \cdot \tanh(\frac{\pi}{\mathrm{p}\omega_{\mathrm{N}}\mathrm{T}})\right]$$
$$- \arcsin\left[\frac{\mathrm{U}_0}{\hat{\mathrm{U}}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\omega_{\mathrm{N}}\mathrm{T})^2}{\cos^2(\frac{\pi}{\mathrm{p}}) + \sin^2(\frac{\pi}{\mathrm{p}}) \cdot \coth^2(\frac{\pi}{\mathrm{p}\omega_{\mathrm{N}}\mathrm{T}})}}\right]$$

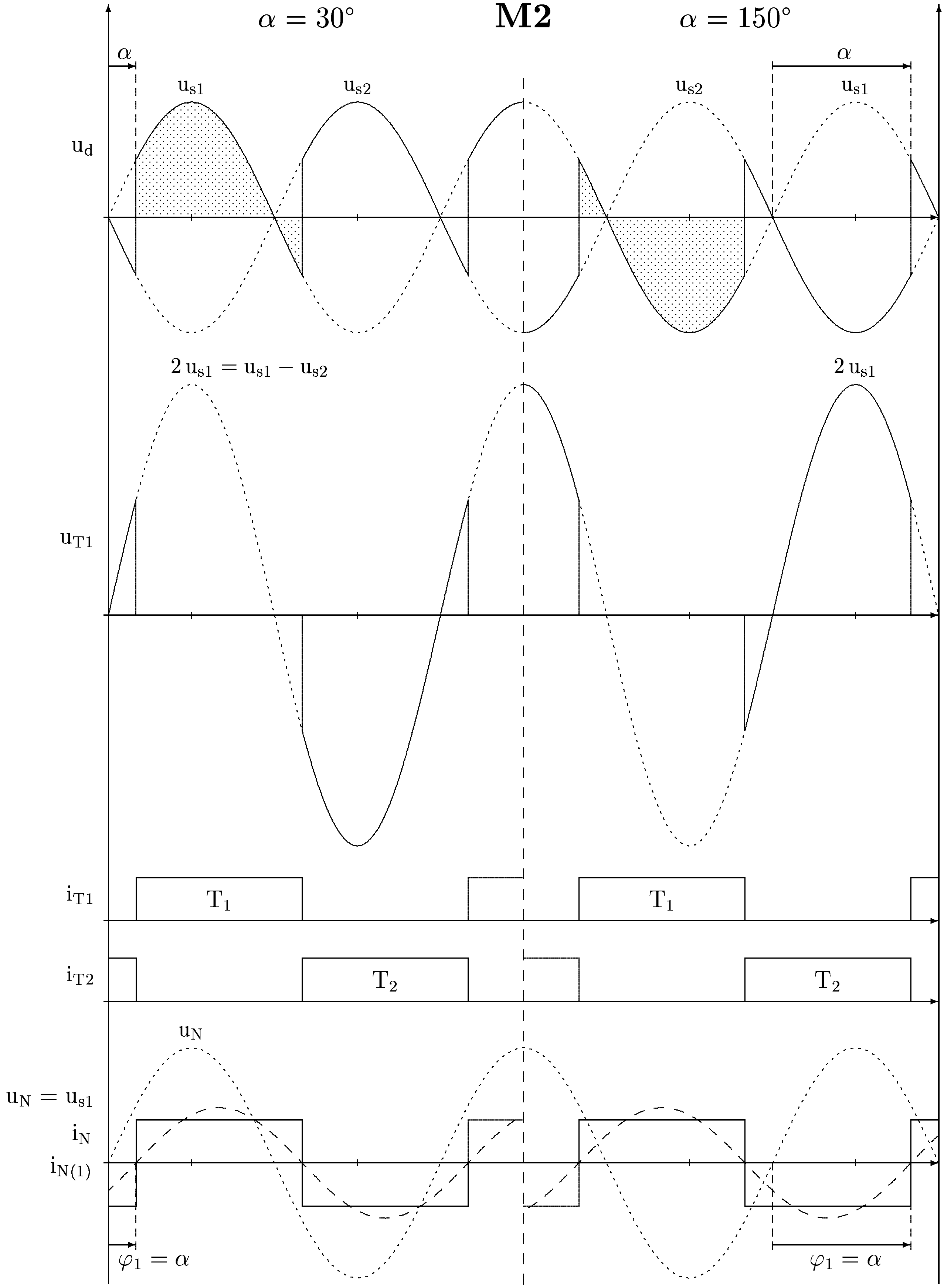
Gleichstrom–Mittelwert an der Lückgrenze:

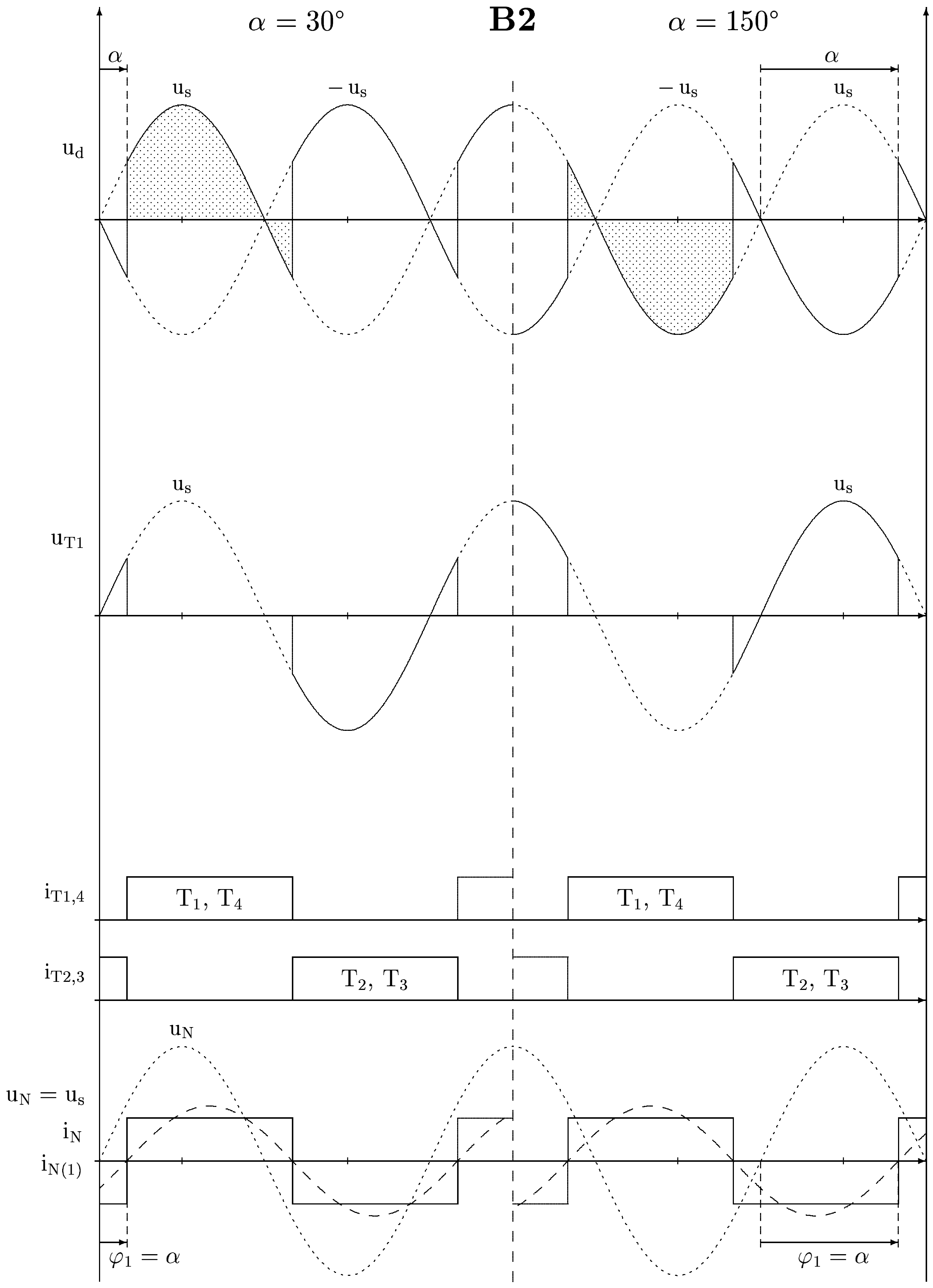
$$\mathrm{I}_{\mathrm{LG}} = \frac{\mathrm{U}_{\mathrm{di0}} \cdot \cos\alpha_{\mathrm{LG}} - \mathrm{U}_0}{\mathrm{R}}$$

Lückbetrieb: einfache Rechnung nur für den Spezialfall R–Last:
(obere Grenze des Integrals jetzt $\dfrac{\pi}{2}$ statt $\dfrac{\pi}{\mathrm{p}} + \alpha$)

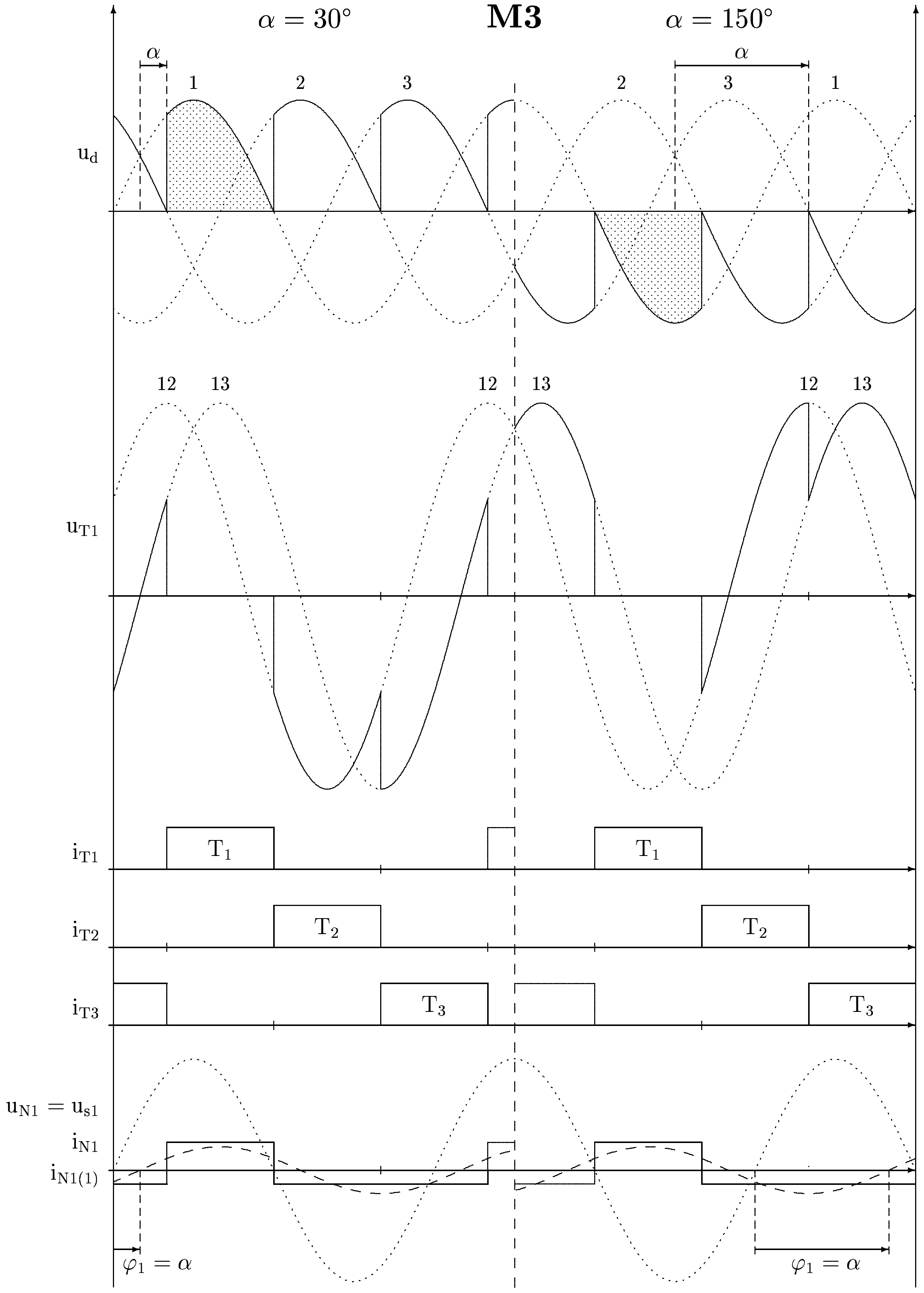
$$\mathrm{U}_{\mathrm{di}\alpha} = \frac{\mathrm{p}}{2\pi} \cdot \int_{-\frac{\pi}{\mathrm{p}}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \hat{\mathrm{U}} \cdot \cos(\omega \mathrm{t}) \cdot \mathrm{d}(\omega \mathrm{t}) = \hat{\mathrm{U}} \cdot \frac{\mathrm{p}}{2\pi} \cdot \left[1 - \sin(\alpha - \frac{\pi}{\mathrm{p}})\right]$$

$$\mathrm{U}_{\mathrm{di}\alpha} = \mathrm{U}_{\mathrm{di0}} \cdot \frac{1 - \sin(\alpha - \frac{\pi}{\mathrm{p}})}{2 \cdot \sin(\frac{\pi}{\mathrm{p}})}$$

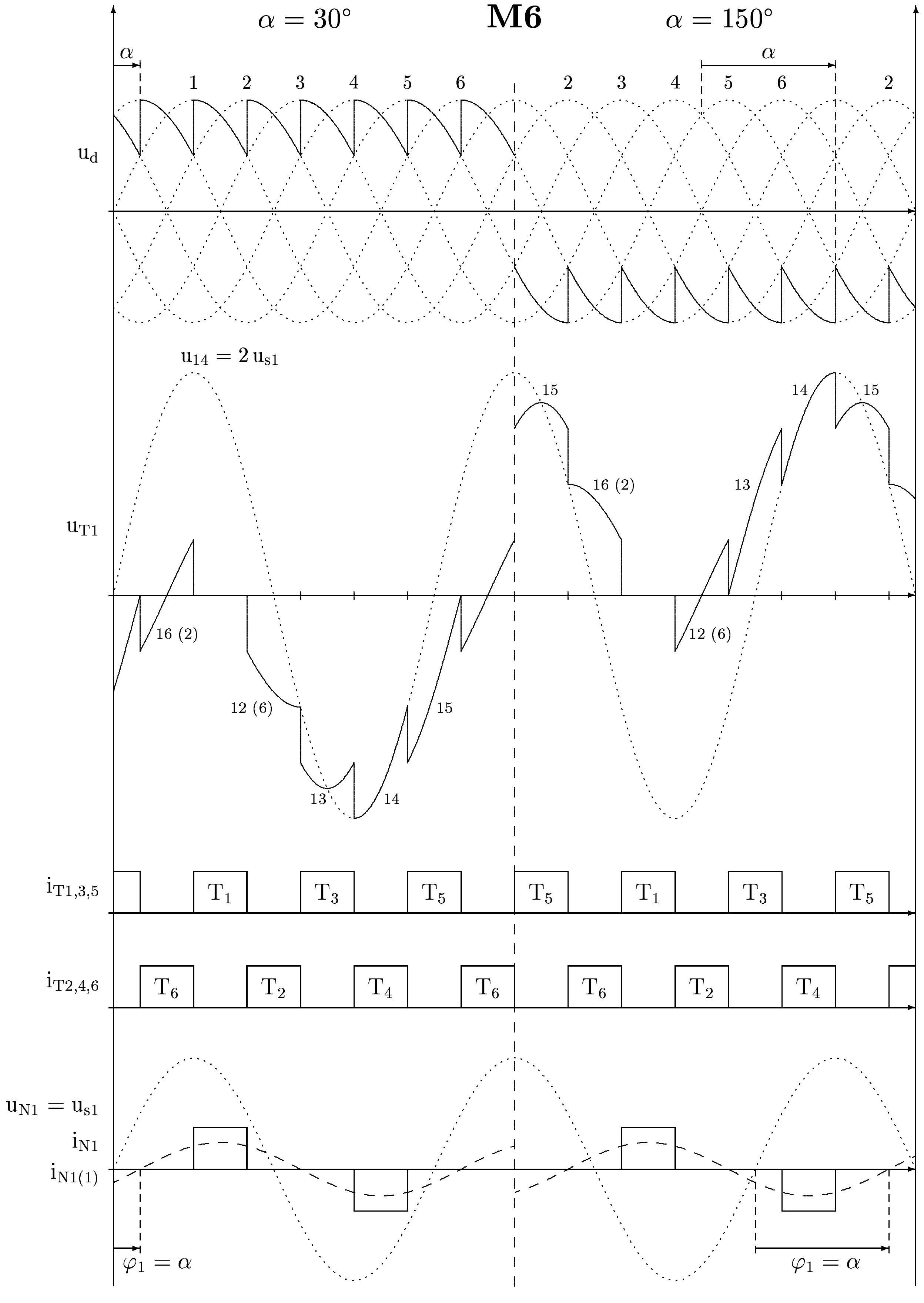

$\alpha = 30°$
M2
$\alpha = 150°$
α
α
u_{s1}
u_{s2}
u_{s2}
u_{s1}
u_d
$2\,u_{s1} = u_{s1} - u_{s2}$
$2\,u_{s1}$
u_{T1}
i_{T1}
T_1
T_1
i_{T2}
T_2
T_2
u_N
$u_N = u_{s1}$
i_N
$i_{N(1)}$
$\varphi_1 = \alpha$
$\varphi_1 = \alpha$



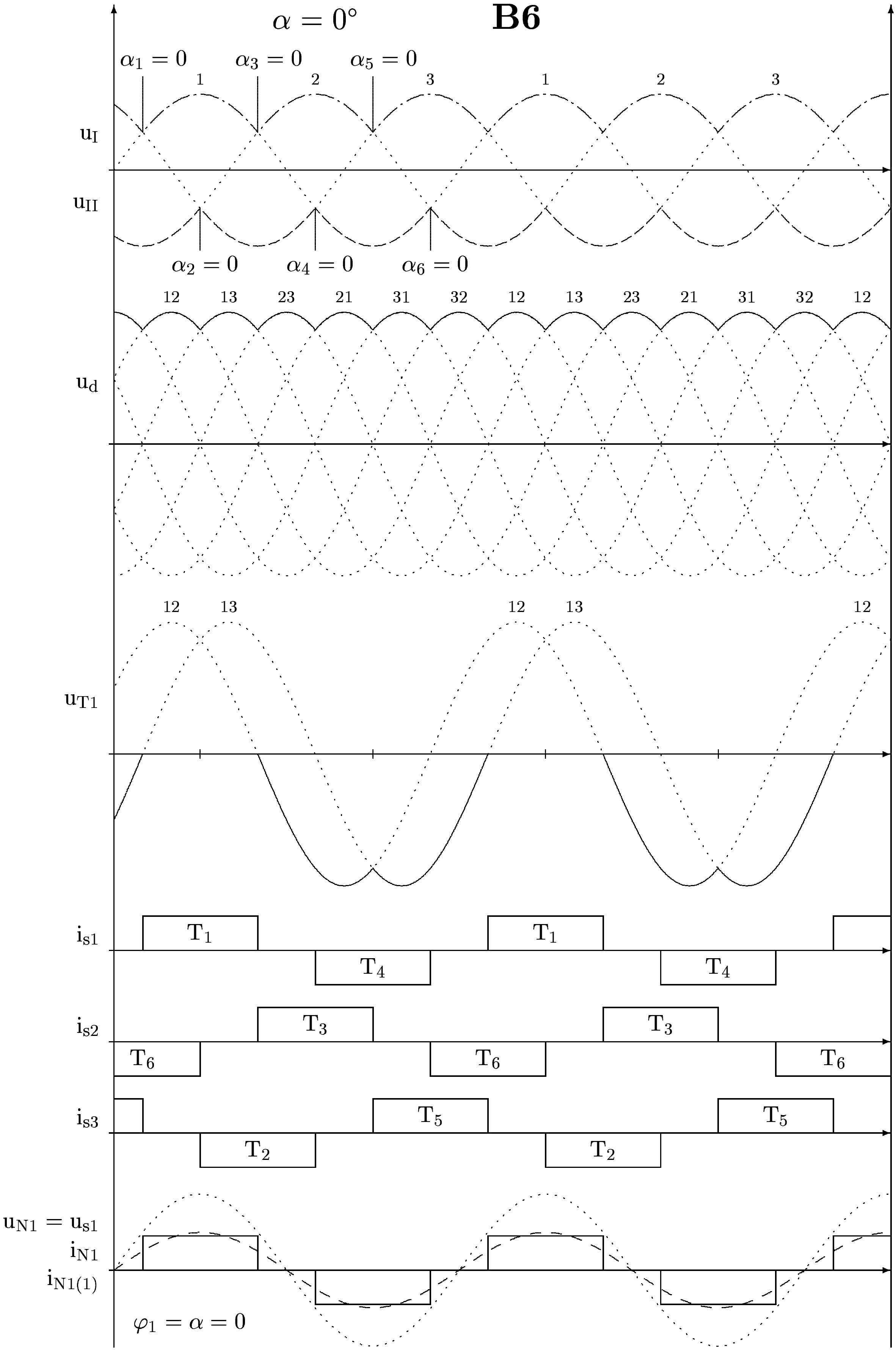
$\alpha = 30°$
B2
$\alpha = 150°$
α
α
u_s
$-u_s$
$-u_s$
u_s
u_d
u_s
u_s
u_{T1}
$i_{T1,4}$
$T_1,\ T_4$
$T_1,\ T_4$
$i_{T2,3}$
$T_2,\ T_3$
$T_2,\ T_3$
u_N
$u_N = u_s$
i_N
$i_{N(1)}$
$\varphi_1 = \alpha$
$\varphi_1 = \alpha$



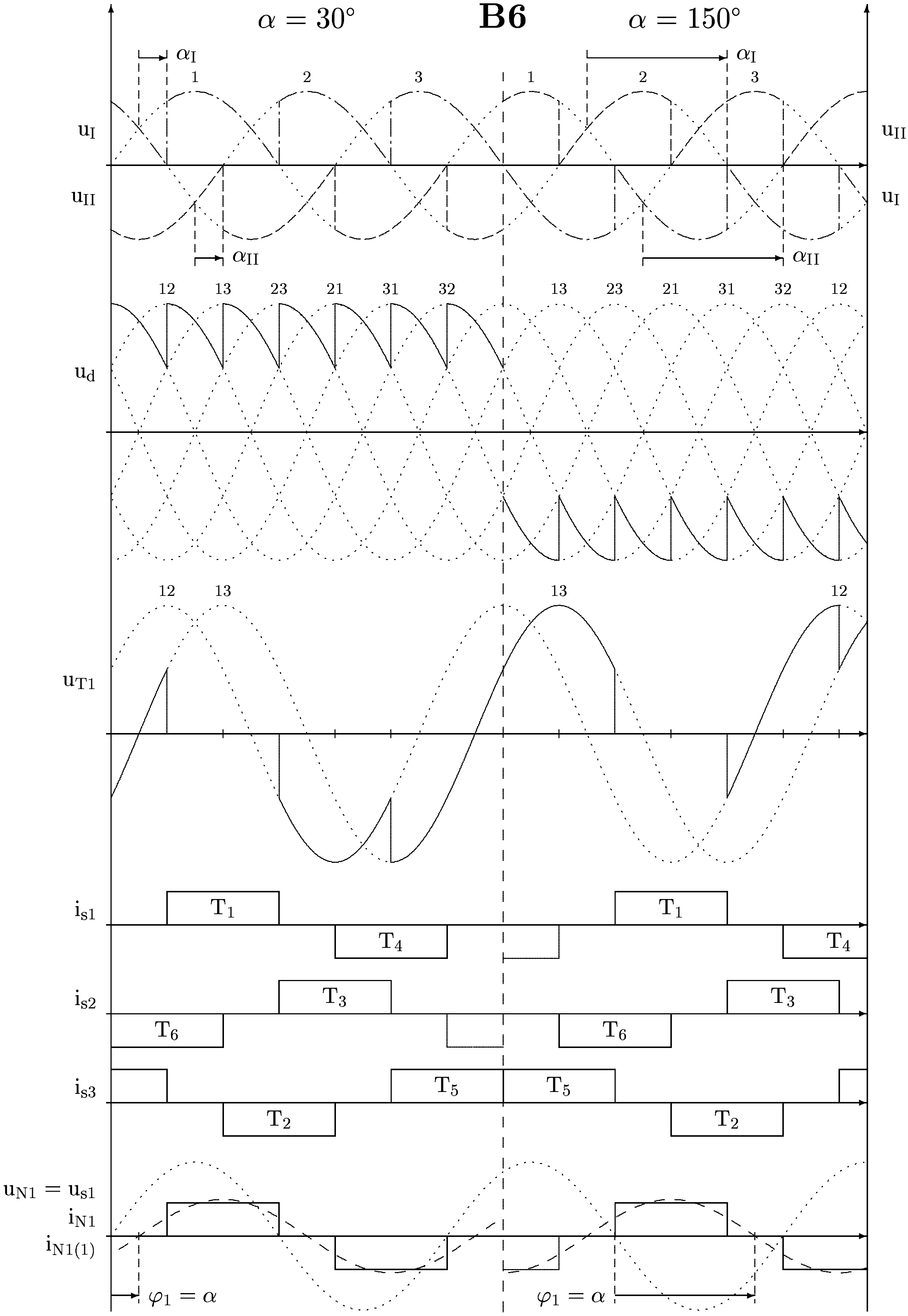
$\alpha = 30°$
M3
$\alpha = 150°$
α
α
1
2
3
2
3
1
u_d
12
13
12
13
12
13
u_{T1}
i_{T1}
T_1
T_1
i_{T2}
T_2
T_2
i_{T3}
T_3
T_3
$u_{N1} = u_{s1}$
i_{N1}
$i_{N1(1)}$
$\varphi_1 = \alpha$
$\varphi_1 = \alpha$



α = 30°
M6
α = 150°
α
α
1 2 3 4 5 6 2 3 4 5 6 2
u_d
u_14 = 2 u_s1
u_T1
15
14
15
16 (2)
13
16 (2)
12 (6)
12 (6)
15
13
14
i_T1,3,5
T_1 T_3 T_5 T_5 T_1 T_3 T_5
i_T2,4,6
T_6 T_2 T_4 T_6 T_6 T_2 T_4
u_N1 = u_s1
i_N1
i_N1(1)
φ_1 = α
φ_1 = α



$\alpha = 0°$
B6
$\alpha_1 = 0$
$\alpha_3 = 0$
$\alpha_5 = 0$
1 2 3 1 2 3
u_I
u_{II}
$\alpha_2 = 0$
$\alpha_4 = 0$
$\alpha_6 = 0$
12 13 23 21 31 32 12 13 23 21 31 32 12
u_d
12 13 12 13 12
u_{T1}
i_{s1}
T_1 T_1
T_4 T_4
i_{s2}
T_3 T_3
T_6 T_6 T_6
i_{s3}
T_5 T_5
T_2 T_2
$u_{N1} = u_{s1}$
i_{N1}
$i_{N1(1)}$
$\varphi_1 = \alpha = 0$



$\alpha = 30°$
B6
$\alpha = 150°$
α_I
α_{II}
u_I
u_{II}
u_d
u_{T1}
i_{s1}
i_{s2}
i_{s3}
T_1
T_2
T_3
T_4
T_5
T_6
$u_{N1} = u_{s1}$
i_{N1}
$i_{N1(1)}$
$\varphi_1 = \alpha$