

$$U_{nq} := 20 \cdot kV$$

Netzennspannung

$$c_{nq} := 1.1$$

Spannungsfaktor **max Kurzschluss**

$$I''_{k3max} := 7.45 \cdot \exp(-1j \cdot 72.67^\circ) \cdot kA$$

Anfangskurzschlusswechselstrom 3polig max:

$$-I''_{k3max} = (7.45 \angle 107.33^\circ) kA$$

Kurzschlussleistung 3polig max :

$$S''_{k3max} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3max}$$

$$S''_{k3max} = (258.1 \angle -72.7^\circ) MVA$$

$$Z1_Q := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}^2}{S''_{k3max}} = (0.508 + 1.628j) \Omega$$

komplexe Netzzinnenimpedanz

$$Z1_Q = (1.705 \angle 72.67^\circ) \Omega$$

$$\frac{\operatorname{Re}(Z1_Q)}{\operatorname{Im}(Z1_Q)} = 0.3120$$

Verhältnis R1/X1

$$I''_{k3max} := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q} = (2.2 - 7.1j) kA$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom

$$I''_{k3max} = (7.450 \angle -72.670^\circ) kA$$

$$I''_{k2max} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q}$$

$$I''_{k2max} = (6.45 \angle -72.67^\circ) kA$$

$$I''_{k1max} := 5.99 \cdot \exp(-1j \cdot 57.21^\circ) kA$$

$$I''_{k1max} = (5.99 \angle -57.21^\circ) kA$$

$$-I''_{k1max} = (5.99 \angle 122.79^\circ) kA$$

$$S''_{k1max} := \frac{U_{nq} \cdot I''_{k1max}}{\sqrt{3}}$$

$$S''_{k1max} = (69.2 \angle -57.2^\circ) MVA$$

Kurzschlussleistung 1polig max :

$$Z0_Q := \frac{U_{nq} \cdot c_{nq} \cdot \sqrt{3}}{I''_{k1max}} - 2 \cdot Z1_Q$$

$$Z0_Q = (2.429 + 2.093j) \Omega$$

$$Z0_Q = (3.207 \angle 40.743^\circ) \Omega$$

$$\frac{\operatorname{Re}(Z0_Q)}{\operatorname{Im}(Z0_Q)} = 1.161$$

Verhältnis R0/X0

$$\left| \frac{Z0_Q}{Z1_Q} \right| = 1.881$$

Verhältnis Z0/Z1

$$c_{nq} := 1.0$$

Spannungsfaktor **minimaler Kurzschluss**

$$I''_{k3min} := 5.35 \cdot \exp(-1j \cdot 68.2^\circ) \cdot kA$$

Anfangskurzschlusswechselstrom 3polig max:

$$-I''_{k3min} = (5.35 \cdot 10^3 \angle 111.8^\circ) A$$

$$S''_{k3min} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3min}$$

Kurzschlußleistung 3polig max :

$$S''_{k3min} = (185.33 \angle -68.2^\circ) MVA$$

$$Z1_Q := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}^2}{S''_{k3min}} = (0.802 + 2.004j) \Omega$$

$$Z1_Q = (2.158 \angle 68.2^\circ) \Omega$$

komplexe Netzzinnenimpedanz

$$\frac{\operatorname{Re}(Z1_Q)}{\operatorname{Im}(Z1_Q)} = 0.4000$$

Verhältnis R1/X1

$$I''_{k3min} := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q} = (1.987 - 4.967j) kA$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom

$$I''_{k3min} = (5.35 \angle -68.20^\circ) kA$$

$$I''_{k2min} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q}$$

$$I''_{k2min} = (4.63 \angle -68.2^\circ) kA$$

$$I''_{k1min} := 4.42 \cdot \exp(-1j \cdot 52.2^\circ) kA$$

$$-I''_{k1min} = (4.42 \angle 127.8^\circ) kA$$

$$S''_{k1min} := \frac{U_{nq} \cdot I''_{k1min}}{\sqrt{3}}$$

$$S''_{k1min} = (51.04 \angle -52.2^\circ) MVA$$

$$Z0_Q := \frac{U_{nq} \cdot c_{nq} \cdot \sqrt{3}}{I''_{k1min}} - 2 \cdot Z1_Q$$

$$Z0_Q = (3.2 + 2.185j) \Omega$$

$$Z0_Q = (3.875 \angle 34.319^\circ) \Omega$$

$$\frac{\operatorname{Re}(Z0_Q)}{\operatorname{Im}(Z0_Q)} = 1.465$$

Verhältnis R0/X0

$$\left| \frac{Z0_Q}{Z1_Q} \right| = 1.795$$

Verhältnis Z0/Z1

$$U_{nq} := 33 \cdot kV$$

Netznominalspannung

$$c_{nq} := 1.1$$

Spannungsfaktor max Kurzschluss

$$I''_{k3max} := 3.4946 \cdot kA$$

$$S''_{k3max} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3max} = 199.7 \text{ MVA}$$

Kurzschlußleistung Sk" 3polig max :

$$S''_{k3max} = 199.7 \text{ MVA}$$

$$R1_X1 := \frac{1}{2.653} = 0.377$$

$$X1_Q := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}^2}{S''_{k3max} \cdot \sqrt{1 + R1_X1^2}}$$

Netzzinnenreaktanz

$$R1_Q := R1_X1 \cdot X1_Q$$

Netzzinnenresistenz

$$Z1_Q := R1_Q + 1j \cdot X1_Q = (2.115 + 5.612j) \Omega$$

komplexe Netzzinnenimpedanz

$$Z1_Q = (5.997 \angle 69.347^\circ) \Omega$$

$$-Z1_Q = (5.997 \angle -110.653^\circ) \Omega$$

$$I''_{k3max} := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q} = (1.233 - 3.27j) \text{ kA}$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom

$$|I''_{k3max}| = 3.495 \text{ kA}$$

$$I''_{k3max} = (3.5 \cdot 10^3 \angle -69.3^\circ) \text{ A}$$

$$S''_{k3max} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3max} = (70.5 - 186.9j) \text{ MVA}$$

$$|S''_{k3max}| = 199.7 \text{ MVA}$$

$$S''_{k3max} = (199.7 \angle -69.3^\circ) \text{ MVA}$$

$$I''_{k2max} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q}$$

$$|I''_{k2max}| = 3.03 \text{ kA}$$

$$c_{nq} := 1.0$$

Spannungsfaktor **min Kurzschluss**

$$I''_{k3min} := 2.7682 \cdot kA$$

$$S''_{k3min} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3min} = 158.2 \text{ MVA}$$

Kurzschlußleistung Sk" 3polig max :

$$S''_{k3min} = 158.2 \text{ MVA}$$

$$R1_X1 := \frac{1}{2.458} = 0.407$$

$$X1_Q := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}^2}{S''_{k3min} \cdot \sqrt{1 + R1_X1^2}}$$

Netzinnenreaktanz

Netzinnenresistenz

$$R1_Q := R1_X1 \cdot X1_Q$$

$$Z1_Q := R1_Q + 1j \cdot X1_Q = (2.594 + 6.375j) \Omega$$

$$Z1_Q = (6.883 \angle 67.862^\circ) \Omega \quad |Z1_Q| = 6.883 \Omega \quad \text{komplexe Netzinnenimpedanz}$$

$$-Z1_Q = (6.883 \angle -112.138^\circ) \Omega$$

$$I''_{k3min} := \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q} = (1.043 - 2.564j) \text{ kA}$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom

$$|I''_{k3min}| = 2.768 \text{ kA}$$

$$I''_{k3min} = (2.8 \cdot 10^3 \angle -67.9^\circ) \text{ A}$$

$$S''_{k3min} := \sqrt{3} \cdot U_{nq} \cdot I''_{k3min} = (59.6 - 146.6j) \text{ MVA}$$

$$|S''_{k3min}| = 158.2 \text{ MVA}$$

$$S''_{k3min} = (158.2 \angle -67.9^\circ) \text{ MVA}$$

$$I''_{k2min} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{c_{nq} \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot Z1_Q}$$

$$|I''_{k2min}| = 2.4 \text{ kA}$$

$$I''_{k2min} = (2.4 \angle -67.86^\circ) \text{ kA}$$

Generatordaten

$S_{rG} := 17.943 \cdot \text{MVA}$	Bemessungsleistung eines Generators
$U_{rG} := 11 \cdot \text{kV}$	Bemessungsspannung des Generators
$U_m := 11 \cdot \text{kV}$	Bemessungsspannung des Netzes
$x_d'' := 15.14\%$	Subtransiente Reaktanz
$x_2 := 17.13\%$	Gegenreaktanz
$x_0 := 6.94\%$	Nullreaktanz
$\cos\phi := 0.8$	Leistungsfaktor
$c := 1.1$	Spannungsfaktor nach EN60909-0 Tabelle 1
$I_G := \frac{S_{rG}}{\sqrt{3} \cdot U_{rG}} = 942 \text{ A}$	full load current
$\varphi := \arccos(\cos\phi)$	

Berechnung der Kurzschlußimpedanzen

$$X''_d := x_d'' \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 1.021 \ \Omega$$

$$R_{Gn} := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } U_{rG} > 1 \cdot \text{kV} \wedge S_{rG} \geq 100 \cdot \text{MVA} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{Gn} \leftarrow 0.05 \end{array} \right. \\ \text{if } U_{rG} > 1 \cdot \text{kV} \wedge S_{rG} < 100 \cdot \text{MVA} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{Gn} \leftarrow 0.07 \end{array} \right. \\ \text{if } U_{rG} \leq 1 \cdot \text{kV} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{Gn} \leftarrow 0.15 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$R_G := R_{Gn} \cdot X''_d = 0.071 \ \Omega$$

$$Z_G := R_G + 1j \cdot X''_d = (0.071 + 1.021i) \ \Omega$$

$$\sin\phi_{rG_-} := \sin(\varphi) = 0.6$$

$$K_G := \frac{U_m}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + x_d'' \cdot \sin\phi_{rG_-}} = 1.008 \quad \text{gilt für den Korrekturfaktor nach EN60909-0 Abschn. 3.6.1}$$

$$Z_{GK} := K_G \cdot Z_G = (0.07207 + 1.02955i) \ \Omega \quad \text{korrigierte subtransiente Impedanz des Generators}$$

$$X_2 := \frac{x_2 \cdot U_m^2}{S_{rG}} = 1.155 \ \Omega$$

$$X_0 := \frac{x_0 \cdot U_m^2}{S_{rG}} = 0.468 \ \Omega$$

Berechnung der 3 poligen Kurzschlussströme

$$I''_{k3Gmax} := \frac{1.1 \cdot U_m}{\sqrt{3} \cdot Z_{GK}} = (0.473 - 6.752i) \text{ kA}$$

$$I''_{k3Gmax} = \langle 6.769 \angle -85.996^\circ \rangle \text{ kA}$$

$$I''_{k3Gmin} := \frac{1 \cdot U_m}{\sqrt{3} \cdot Z_{GK}} = (0.43 - 6.138i) \text{ kA}$$

$$I''_{k3Gmin} = \langle 6.154 \angle -85.996^\circ \rangle \text{ kA}$$

Berechnung der 2 poligen Kurzschlussströme

$$I''_{k2Gmax} := \frac{1.1 \cdot U_m}{2 \cdot K_G \cdot R_G + 1j \cdot K_G \cdot (X''_d + X_2)} = (0.361 - 5.49i) \text{ kA}$$

$$I''_{k2Gmax} = \langle 5.502 \angle -86.242^\circ \rangle \text{ kA}$$

$$I''_{k2Gmin} := \frac{1 \cdot U_m}{2 \cdot K_G \cdot R_G + 1j \cdot K_G \cdot (X''_d + X_2)} = (0.328 - 4.991i) \text{ kA}$$

$$I''_{k2Gmin} = \langle 5.002 \angle -86.242^\circ \rangle \text{ kA}$$

Berechnung der 1 poligen Kurzschlussströme

$$I''_{k1Gmax} := \frac{\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot U_m}{3 \cdot K_G \cdot R_G + 1j \cdot K_G \cdot (X''_d + X_2 + X_0)}$$

$$I''_{k1Gmax} = (0.633 - 7.809i) \text{ kA}$$

$$|I''_{k1Gmax}| = \langle 7.834 \angle 0^\circ \rangle \text{ kA}$$

$$I''_{k1Gmin} := \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot U_m}{3 \cdot K_G \cdot R_G + 1j \cdot K_G \cdot (X''_d + X_2 + X_0)}$$

Berechnung der Stosskurzschlussströme

$$K_b := 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_G}{X''_d}} = 1.814$$

$$i_{pb} := \text{if} \left(\frac{R_G}{X''_d} > 0.3, 1.5 \cdot K_b \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3Gmax}, K_b \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3Gmax} \right)$$

$$i_{pb} = \langle 17.368 \angle -85.996^\circ \rangle \text{ kA}$$

nach Impedanzverhältnis: Methode (b) IEC602909-0

$$R_X := \frac{R_G \cdot 20 \text{ Hz}}{X''_d \cdot 50 \text{ Hz}}$$

$$K_c := 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot R_X}$$

$$i_{pc} := K_c \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3Gmax}$$

$$i_{pc} = \langle 18.389 \angle -85.996^\circ \rangle \text{ kA}$$

nach 20 Hz Ersatzfrequenz: Methode (c) IEC602909-0

Berechnung nach dem Überlagerungsverfahren

$$n := 0.0, 0.1 \dots 1$$

$$E''(n) := \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} + I_G \cdot n \cdot (\cos(\varphi) - \sin(\varphi) \cdot 1j) \cdot (R_G + X''_d \cdot 1j)$$

$$E''(1) = (6.982 + 0.729i) \text{ kV}$$

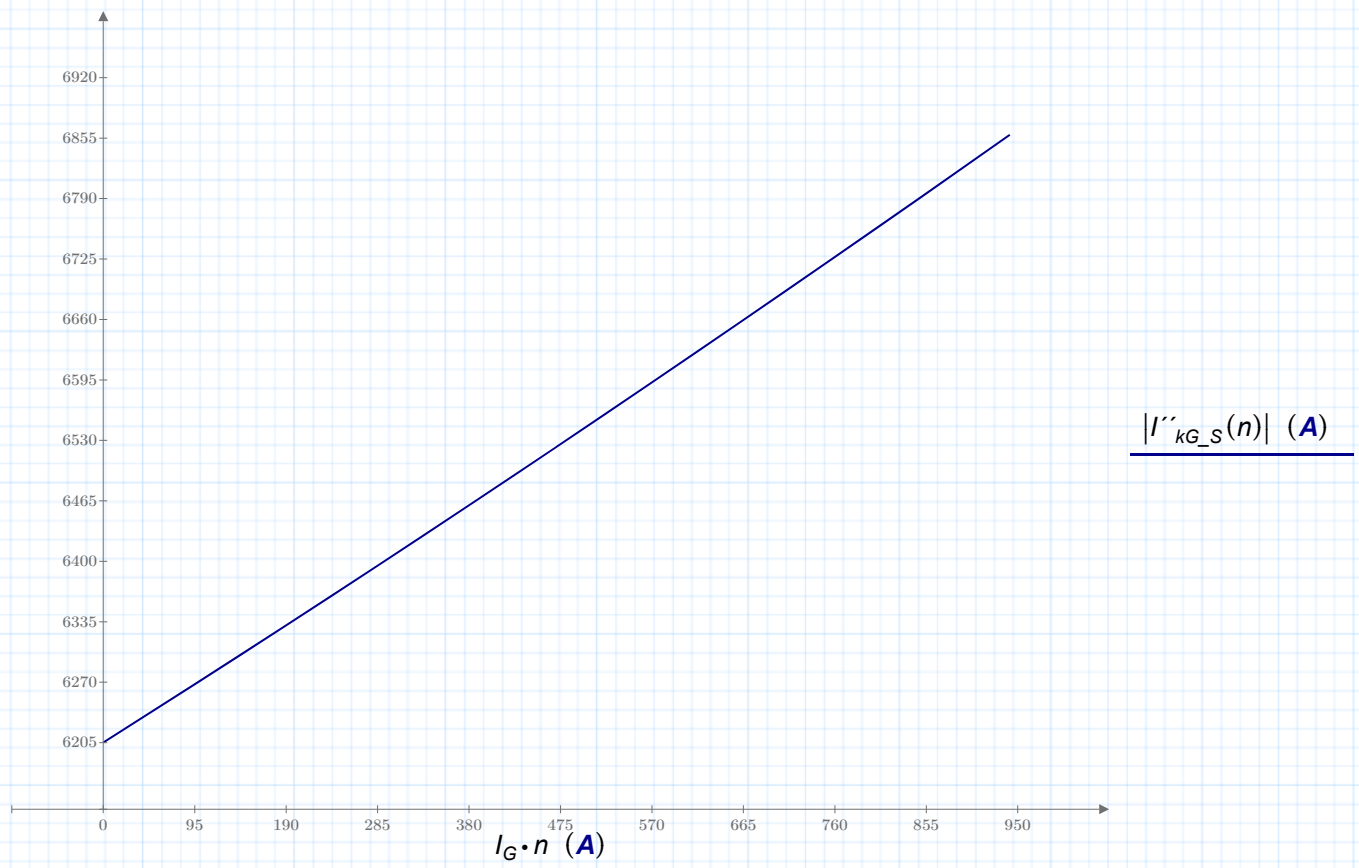
$$|E''(1)| = 7.02 \text{ kV}$$

$$I''_{kG_S}(n) := \frac{E''(n)}{R_G + X''_d \cdot 1j}$$

$$I''_{kG_S}(1) = (1.187 - 6.755i) \text{ kA}$$

$$|I''_{kG_S}(0)| = 6.205 \text{ kA}$$

$$|I''_{kG_S}(1)| = 6.859 \text{ kA}$$



Generatordaten

$$S_{rG} := 17.943 \cdot \text{MVA}$$

Bemessungsleistung eines Generators

$$U_{rG} := 11 \cdot \text{kV}$$

Bemessungsspannung des Generators

$$U_{rN} := 11 \cdot \text{kV}$$

Bemessungsspannung des Netzes

$$\cos\phi := 0.8$$

Leistungsfaktor

$$\sin\phi_{rG} := \sin(\arccos(\cos\phi)) = 0.6$$

$$x''_d := 15.14\%$$

Subtransient Reactance

$$T''_d := 0.0328 \text{ s}$$

Subtransient Short Circuit Time Constant

$$x'_d := 20.59\%$$

Transient Reactance

$$T'_d := 0.5282 \text{ s}$$

Transient Short Circuit Time Constant

$$T_a := 0.1489 \text{ s}$$

$$x_2 := 17.13\%$$

Negative Sequence Reactance

$$x_0 := 6.94\%$$

Zero Sequence Reactance

$$x_d := 192.31\%$$

Synchronous Reactance

$$I_n := \frac{S_{rG}}{\sqrt{3} \cdot U_{rG}} = 941.8 \text{ A}$$

zeitlichen Verlauf der Kurzschlussströme am Generator nach DIN EN 60909-0 Blb 3

$$E1'' := \left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot x''_d \cdot \sin\phi_{rG} + x''_d{}^2} = 6.97 \text{ kV}$$

$$X''_d := 1i \cdot x''_d \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = (1.021 \angle 90^\circ) \Omega$$

$$I''_k := \frac{E1''}{X''_d} = (6.827 \angle -90^\circ) \text{ kA}$$

$$E1' := \left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot x'_d \cdot \sin\phi_{rG} + x'_d{}^2} = 7.212 \text{ kV}$$

$$X'_d := 1i \cdot x'_d \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = (1.389 \angle 90^\circ) \Omega$$

$$I'_k := \frac{E1'}{X'_d} = (5.194 \angle -90^\circ) \text{ kA}$$

$$X_d := 1i \cdot x_d \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = (12.969 \angle 90^\circ) \Omega$$

$$\mu_{fmax} := 2$$

$$E1 := \mu_{fmax} \left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot x_d \cdot \sin\phi_{rG} + x_d{}^2} = 33.62 \text{ kV}$$

$$I_k := \frac{E1}{X_d} = (2.592 \angle -90^\circ) \text{ kA}$$

Berechnungsmethode zeitlicher Generatorkurzschluss

$t := 0.0 \text{ s}, 0.02 \text{ s} \dots 3 \text{ s}$

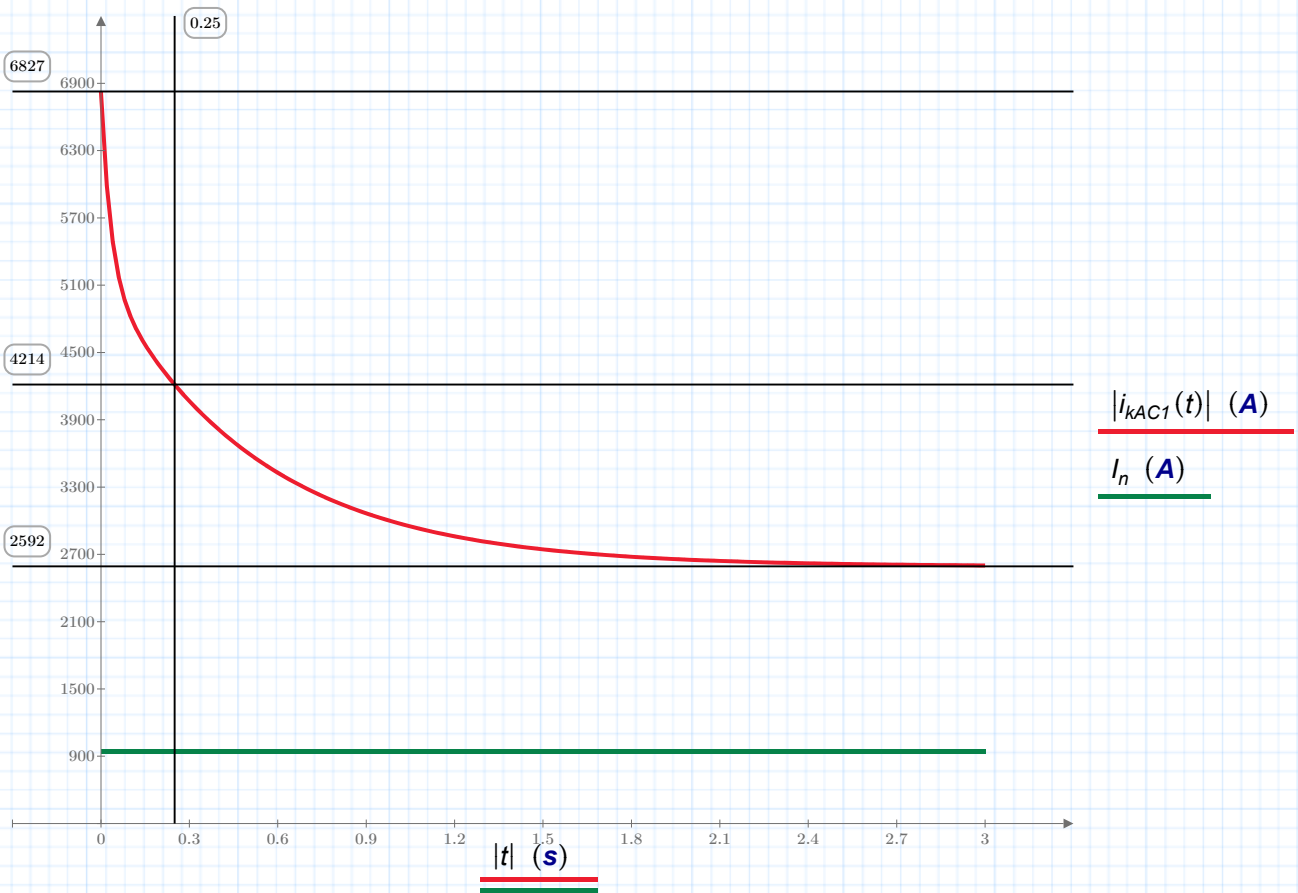
$t_{Aus} := 0.25 \text{ s}$

$$i_{kAC1}(t) := \left((I''_k - I'_k) \cdot e^{\frac{-t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) \cdot e^{\frac{-t}{T'_d}} + I_k \right) \cdot \cos(\omega \cdot t + 0^\circ)$$

$$i_{kAC1}(0 \text{ s}) = (6.827 \angle -90^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kAC1}(5 \text{ s}) = (2.593 \angle -90^\circ) \text{ kA}$$

$$i_{kAC1}(t_{Aus}) = (4.214 \angle 90^\circ) \text{ kA}$$



$$U_{rM} := 11 \cdot kV$$

Bemessungsspannung

$$\cos\phi := 0.83$$

Leistungsfaktor $\cos(\phi)$

$$\eta := 0.954$$

Wirkungsgrad bei Bemessungsbetrieb:

$$P_{rM} := 800 \cdot kW$$

Bemessungs-Wirkleistung

$$fI_a := 5.5$$

Verhältnis Anlaufstrom zu Bemessungsstrom

$$I_{rM} := \frac{P_{rM}}{\sqrt{3} \cdot \cos\phi \cdot \eta \cdot U_{rM}} = 53.0 \text{ A}$$

Bemessungsstrom

$$Z_M := \frac{1}{fI_a} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = 21.78 \text{ } \Omega$$

$$X_M := \begin{cases} \text{if } U_{rM} > 1 \cdot kV \wedge P_{rM} \geq 100 \cdot MW \\ \quad \parallel X_M \leftarrow 0.995 \cdot Z_M \\ \text{if } U_{rM} > 1 \cdot kV \wedge P_{rM} < 100 \cdot MW \\ \quad \parallel X_M \leftarrow 0.989 \cdot Z_M \\ \text{if } U_{rM} \leq 1 \cdot kV \\ \quad \parallel X_M \leftarrow 0.922 \cdot Z_M \end{cases}$$

Entsprechend EN 60909-0
Abschnitt 3.8.1

$$R_M := \begin{cases} \text{if } U_{rM} > 1 \cdot kV \wedge P_{rM} \geq 100 \cdot MW \\ \quad \parallel R_M \leftarrow 0.10 \cdot X_M \\ \text{if } U_{rM} > 1 \cdot kV \wedge P_{rM} < 100 \cdot MW \\ \quad \parallel R_M \leftarrow 0.15 \cdot X_M \\ \text{if } U_{rM} \leq 1 \cdot kV \\ \quad \parallel R_M \leftarrow 0.42 \cdot X_M \end{cases}$$

$$Z_{Mres} := R_M + 1j \cdot X_M = (3.23 + 21.536i) \text{ } \Omega$$

$$I''_{k3Mot} := \frac{1.1 \cdot U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot Z_{Mres}}$$

$$|I''_{k3Mot}| = 0.321 \text{ kA}$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom I"k 3 polig

$$\kappa := 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_M}{X_M}}$$

$$i_p := \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot (I''_{k3Mot})$$

$$|i_p| = 0.746 \text{ kA}$$

komplexer Stosskurzschlussstrom Ip 3 polig

$$I''_{k2} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1.1 \cdot U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot Z_{Mres}} = (0.041 - 0.275i) \text{ kA}$$

$$|I''_{k2}| = 0.278 \text{ kA}$$

komplexer Anfangskurzschlusswechselstrom I"k 2 polig

$$\kappa := 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_M}{X_M}}$$

$$i_p := \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2}$$

$$|i_p| = 0.646 \text{ kA}$$

komplexer Stosskurzschlussstrom Ip 2 polig