

Erläuterungsbericht zum Berechnungsblatt

Bearbeiter: Sascha Schiebler

Redaktionsschluss am 28. Juni 2022.

Der vorliegende Erläuterungsbericht enthält Berechnungsvorschriften und Überlegungen, die die Grundlage für die Erstellung der technischen Spezifikationen der Betriebsmittel bildeten.

1. Netzberechnungen

Anhand der Netz-Kurzschlussleistung, dem R/X -Verhältnis sowie dem Spannungsfaktor c können die Kenngrößen des 10-kV-Netzes bestimmt werden. Die Netzimpedanz berechnet sich mit

$$Z_N = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot (10 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{400 \cdot 10^6 \text{ MVA}} = \underline{0,275 \Omega}.$$

Die Netzresistanz ist wegen $Z_N \approx X_N$ und $R_N/X_N = 0,1$ näherungsweise

$$R_N \approx 0,1 \cdot Z_N = 0,1 \cdot 0,275 \Omega = \underline{27,5 \text{ m}\Omega}.$$

Daraus folgt für die Netzreaktanz

$$X_N = \sqrt{Z_N^2 - R_N^2} = \sqrt{(0,275 \Omega)^2 - (27,5 \cdot 10^{-3} \Omega)^2} = \underline{0,274 \Omega}$$

und für die Induktivität des Netzes

$$L_N = \frac{X_N}{2\pi f_n} = \frac{0,274 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}} = \underline{0,87 \text{ mH}}.$$

Der maximale Kurzschlussstrom, der bei einem dreipoligen Kurzschluss am Netzanschlusspunkt (PCC) zu erwarten ist, wird abgeschätzt mit

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} = \frac{1,1 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,275 \Omega} = \underline{23,09 \text{ kA}}.$$

Diese Angabe stellt ein wichtiges Bemessungsmerkmal des auszuwählenden Leistungsschalters dar, mit dem der SVC geschaltet wird. Es wird ein Leistungsschalter mit genormtem Ausschaltvermögen 25 kA gewählt.

2. Berechnungen zur Gleichstrommaschine

a) Berechnung der elektrischen Leistungen

Bei Abgabe der Nennleistung nimmt die Maschine die elektrische Leistung

$$P_{el} = \frac{P_n}{\eta_A} = \frac{12000 \text{ kW}}{0,95} = \underline{12631,58 \text{ kW}}$$

auf. Diese Leistung entspricht der ideellen Gleichstromleistung:

$$P_{di} = S = P_{el}.$$

c) Betriebsdaten der Maschine

Die Maschine wird an einem gesteuerten Brückengleichrichter B6C in zwei Arbeitspunkten betrieben. Der vom Netz gelieferte Nennstrom des Antriebs auf der Drehstromseite beträgt unkompensiert

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{12631,58 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = \underline{729,28 \text{ A}}.$$

Auf der Gleichstromseite fließt der Strom

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_n = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot 729,28 \text{ A} = \underline{893,19 \text{ A}}.$$

Arbeitspunkt 1

Der Brückengleichrichter arbeitet mit einem Steuerwinkel $\alpha_1 = 25^\circ$.

Die Ankerspannung beträgt

$$U_{A1} = 1,35 \cdot U_n \cdot \cos(\alpha_1) = 1,35 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \cos(25^\circ) = \underline{12235,16 \text{ V}}.$$

Die elektrischen Leistungsverhältnisse stellen sich wie folgt dar:

- Wirkleistung $P_1 = S \cdot \cos(\alpha_1) = 12631,58 \text{ kW} \cdot \cos(25^\circ) = \underline{11448,1 \text{ kW}},$
- Blindleistung $Q_1 = S \cdot \sin(\alpha_1) = 12631,58 \text{ kW} \cdot \sin(25^\circ) = \underline{5338,34 \text{ kvar}},$
- Leistungsfaktor $\cos(\varphi_1) = \cos(\alpha_1) = \cos(25^\circ) = \underline{0,91}.$

Um den angestrebten Leistungsfaktor $\cos(\varphi_{soll}) = 0,98$ ind. einzustellen, wäre eine Kompensationsleistung von

$$Q_{c1} = P_1 (\tan(\alpha_1) - \tan(\varphi_{soll})) = 11448,1 \text{ kW} \cdot (\tan(25^\circ) - \tan(11,48^\circ)) = \underline{3013,7 \text{ kvar}}$$

erforderlich.

Arbeitspunkt 2

Der Brückengleichrichter arbeitet mit einem Steuerwinkel $\alpha_2 = 70^\circ$.

Die Ankerspannung beträgt

$$U_{A2} = 1,35 \cdot U_n \cdot \cos(\alpha_2) = 1,35 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \cos(70^\circ) = \underline{4617,27 \text{ V}}.$$

Die elektrischen Leistungsverhältnisse stellen sich wie folgt dar:

- Wirkleistung $P_2 = S \cdot \cos(\alpha_2) = 12631,58 \text{ kW} \cdot \cos(70^\circ) = \underline{4320,25 \text{ kW}},$
- Blindleistung $Q_2 = S \cdot \sin(\alpha_2) = 12631,58 \text{ kW} \cdot \sin(70^\circ) = \underline{11869,8 \text{ kvar}},$
- Leistungsfaktor $\cos(\varphi_2) = \cos(\alpha_2) = \cos(70^\circ) = \underline{0,34}.$

Um den angestrebten Leistungsfaktor $\cos(\varphi_{\text{soll}}) = 0,98$ ind. einzustellen, wäre eine Kompensationsleistung von

$$Q_{c2} = P_2 (\tan(\alpha_2) - \tan(\varphi_{\text{soll}})) = 4320,25 \text{ kW} \cdot (\tan(70^\circ) - \tan(11,48^\circ)) = \underline{10992,54 \text{ kvar}}$$

erforderlich.

3. Filterkreis (Harmonic Filter)

a) Nenndaten

Gemäß Aufgabenstellung ist der Filterkreis auf die 5. Harmonische (250 Hz) abzustimmen. Er soll darüber hinaus eine Blindleistungskompensation auf den Ziel-Leistungsfaktor $\cos(\varphi_{\text{soil}}) = 0,98$ ind. gewährleisten.

Damit der angestrebte Leistungsfaktor *in allen möglichen Arbeitspunkten* erzielt werden kann, muss der Filterkreis für denjenigen Arbeitspunkt dimensioniert werden, in dem der höchste Bedarf an induktiver Blindleistung am Verbraucher besteht. Dies ist in Arbeitspunkt 2 der Fall; es werden 10.992,54 kvar kapazitiver Blindleistung benötigt, um den Ziel-Leistungsfaktor am PCC einzustellen (vgl. Abschnitt 2 Buchstabe c).

Für die Dimensionierung des Filterkreises wird daher eine Nennleistung von

$$Q_{\text{FC,r}} = 11000 \text{ kvar}$$

angesetzt. Der Filterkreis wirkt wegen der fehlenden Regelungsmöglichkeit wie eine lastunabhängige Festkompensation, sodass sich in Arbeitspunkt 1 zunächst eine Überkompensation ergibt. Der Ziel-Leistungsfaktor wird mithilfe des TCR durch Regelung des Drosselstroms eingestellt, sodass die Überkompensation durch induktive Gegenkompensation beseitigt wird.

b) Bemessung des Filterkreises

Der Filterkreis ist für die 5. Harmonische ($f_{\text{FC}} = f_5 = 250 \text{ Hz}$) zu bemessen. Es wird die Abstimmfrequenz

$$f_{0\text{R}} = 240 \text{ Hz}$$

gewählt, um durch leichte kapazitive Verstimmung mögliche Bauteiltoleranzen zu kompensieren und sicherzustellen, dass nicht die Parallelresonanzfrequenz $f_{0\text{P}}$ des Parallelschwingkreises, der aus vorgelagertem Netz und Filterkreis besteht, auf die Frequenz der fünften Harmonischen verschoben wird.

Die erforderliche Impedanz des Filterkreises wird mit der unter Buchstabe a bemessenen Kompensationsleistung bestimmt:

$$Z_{\text{FC}} = \frac{U_{\text{n}}^2}{Q_{\text{FC}}} = \frac{(10 \text{ kV})^2}{11000 \text{ kvar}} = 9,09 \Omega.$$

Daraus ergeben sich die Kapazität des Filterkreiskondensators mit

$$C_{\text{FC}} = -\frac{1}{Z_{\text{FC}}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{n}}}{\omega_{0\text{R}}^2} - \frac{1}{\omega_{\text{n}}} \right) = -\frac{1}{Z_{\text{FC}}} \cdot \left(\frac{2\pi f_{\text{n}}}{(2\pi f_{0\text{R}})^2} - \frac{1}{2\pi f_{\text{n}}} \right) = 334,94 \mu\text{F}$$

und die Induktivität der Filterkreisdrossel mit

$$L_{\text{FC}} = \frac{1}{\omega_{0\text{R}}^2 C_{\text{FC}}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 240 \text{ s}^{-1})^2 \cdot 334,94 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 1,313 \text{ mH}.$$

Die resultierende Parallelresonanz mit der Netzimpedanz

$$f_{0\text{P}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(L_{\text{FC}} + L_{\text{N}}) \cdot C_{\text{FC}}}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(1,313 \cdot 10^{-3} \text{ H} + 0,87 \cdot 10^{-3} \text{ H}) \cdot 334,94 \cdot 10^{-6} \text{ F}}} = 186,09 \text{ Hz}$$

liegt unkritisch, da keine harmonischen Ströme dritter oder vierter Ordnung zu erwarten sind.

Die Verdrosselung des Kondensators durch die Filterkreisinduktivität wird mit dem Verdrosselungsfaktor ausgedrückt:

$$p = \omega_{\text{n}}^2 L_{\text{FC}} C_{\text{FC}} = (2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1})^2 \cdot 1,313 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot 334,94 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 4,34 \%.$$

c) Bemessung des Filterkondensators

Aufgrund der Verdrosselung hebt sich die Spannung über dem Kondensator an auf

$$U_{C,d} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1-p} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1-0,0434} = \underline{6035,46 \text{ V}}.$$

Die maximale Spannung für Betriebsmittel beträgt

$$U_m = c \cdot U_{C,d} = 1,1 \cdot 6035,46 \text{ V} = \underline{6639 \text{ V}}.$$

Die Belastung des Filterkondensators setzt sich zusammen aus der Grundswingungsbelastung

$$U_{1,C} = \frac{\nu_{FC}^2}{\nu_{FC}^2 - 1} \cdot c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{5^2}{5^2 - 1} \cdot 1,1 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = \underline{6615,47 \text{ V}}$$

und der Oberschwingungsbelastung

$$U_{\nu,C} = \frac{1}{2\pi f_n C_{FC}} \cdot \sum_{\nu_{typ}} \frac{I_\nu}{\nu} = \underline{582,99 \text{ V}}$$

zu

$$U_{C,ges} = U_{1,C} + U_{\nu,C} = \underline{7198,46 \text{ V}}.$$

Die vom Brückengleichrichter eingepprägten Oberschwingungen rufen die Verzerrungsblindleistung

$$Q_d = \sqrt{\sum_{\nu_{typ}} \left(I_{\nu,FC} \cdot (Z_{FC}(\nu))^2 \right)^2} \approx \underline{31 \text{ kvar}}$$

hervor, wobei Harmonische der Ordnung $\nu > 13$ ohne signifikanten Einfluss auf das Rechenergebnis vernachlässigt werden. Die Mindestleistung $Q_{C,r}$ des Filterkondensators berechnet sich aus der Summe der Grundswingungs- und Verzerrungsblindleistung. Der Nennstrom des Filterkondensators ist mit

$$I_{C,r} = \frac{Q_{C,r}}{3 \cdot U_{C,r}}$$

zu ermitteln. Hierzu addiert sich geometrisch der Teil der in der Oberschwingungsanalyse ermittelten Oberschwingungsströme, die den Filterkreis durchfließen. Der sechspulsige Brückengleichrichter des Antriebs prägt die typischen Oberschwingungen der Ordnungen $\nu_{typ} = \{6n \pm 1\}$ in die Parallelschaltung aus Netzimpedanz und Filterkreisimpedanz ein. Gemäß Stromteilerregel gilt für die Oberschwingungsströme im Filterkreis

$$I_{\nu,FC} = \frac{I_\nu}{Z_{FC}(\nu)} \cdot Z_{ers}$$

$$I_{\nu,FC} = \frac{I_\nu}{\left| 2\pi f_n \nu L_{FC} - \frac{1}{2\pi f_n \nu C_{FC}} \right|} \cdot \frac{1}{\left| 2\pi f_n \nu L_{FC} - \frac{1}{2\pi f_n \nu C_{FC}} \right| + \sqrt{R_N^2 + (\nu \cdot X_N)^2}}.$$

Für die Summe der nach DIN EN IEC 61000-2-4 relevanten Oberschwingungsströme folgt

$$I_{\nu,ges} = \sqrt{\sum_{\nu \in \nu_{typ}}^{40} I_{\nu,FC}^2}$$

und damit für den thermischen Effektivstrom des Kondensators

$$I_{th,ges} = \sqrt{I_{C,r}^2 + I_{\nu,ges}^2}.$$

In der Spezifikation weiterhin anzugeben ist die Impedanz des Kondensators im Resonanzfall:

$$Z_{C,\text{res}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{FC}} C_{\text{FC}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 250 \text{ Hz} \cdot 334,94 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = \underline{1,90 \Omega}.$$

Beim Einschalten des Filterkreises mittels rückzündungsfreiem Leistungsschalter kann eine Schaltüberspannung von

$$U_S = 2\sqrt{2} \cdot U_{C,d} = \underline{17,07 \text{ kV}}$$

auftreten. Da beim Schalten Netz- und Kondensatorspannung in Phasenopposition liegen können, muss der Leistungsschalter mindestens für die doppelte höchste Spannung für Betriebsmittel (12 kV im 10-kV-Netz) bemessen sein.

d) Auswirkung der Blindleistungskompensation auf die Stromaufnahme der Maschine

Wird der Ziel-Leistungsfaktor $\cos(\varphi_{\text{soll}}) = 0,98$ ind. erzielt, so verringert sich die vom Netz bereitzustellende Blindleistung und somit die Scheinleistung:

• Arbeitspunkt 1:
$$S_{1,\text{komp}} = \frac{P_1}{\cos(\varphi_{\text{soll}})} = \frac{11480,1 \text{ kW}}{0,98} = \underline{11681,73 \text{ kVA}},$$

$$Q_{1,\text{komp}} = P_1 \tan(\varphi_{\text{soll}}) = 11480,1 \text{ kW} \cdot \tan(11,48^\circ) = \underline{2324,64 \text{ kvar}},$$

• Arbeitspunkt 2:
$$S_{2,\text{komp}} = \frac{P_2}{\cos(\varphi_{\text{soll}})} = \frac{4320,25 \text{ kW}}{0,98} = \underline{4408,42 \text{ kVA}},$$

$$Q_{2,\text{komp}} = P_2 \tan(\varphi_{\text{soll}}) = 4320,25 \text{ kW} \cdot \tan(11,48^\circ) = \underline{877,27 \text{ kvar}}.$$

Der Netzstrom, der quadratisch in die Verlustleistung P_V eingeht, verringert sich ebenfalls:

• Arbeitspunkt 1:
$$I_{1,\text{komp}} = \frac{S_{1,\text{komp}}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{11681,73 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = \underline{674,45 \text{ A}},$$

• Arbeitspunkt 2:
$$I_{2,\text{komp}} = \frac{S_{2,\text{komp}}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{4408,42 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = \underline{254,52 \text{ A}}.$$

Die Reduktion der vom Netz zu liefernden Blindleistung bzw. des vom Netz zu liefernden Stroms durch Blindleistungskompensation auf einen Leistungsfaktor von 0,98 induktiv beträgt:

• Arbeitspunkt 1:
$$\Delta Q_1 = Q_1 - Q_{1,\text{komp}} = \underline{3013,70 \text{ kvar}},$$

$$\Delta I_1 = I_n - I_{1,\text{komp}} = \underline{54,84 \text{ A}},$$

• Arbeitspunkt 2:
$$\Delta Q_2 = Q_2 - Q_{2,\text{komp}} = \underline{10992,54 \text{ kvar}},$$

$$\Delta I_2 = I_n - I_{2,\text{komp}} = \underline{474,76 \text{ A}}.$$

5. Oberschwingungsanalyse

a) unkompensiert

Es wird eine Oberschwingungsanalyse nach DIN EN IEC 61000-2-4 durchgeführt, um festzustellen, ob die Spannungsqualität am PCC durch Oberschwingungen unzulässig beeinträchtigt wird. Es werden die Grenzwerte für Netze der EMV-Umgebungsklasse 2 (öffentliche Netze) nach DIN EN IEC 61000-2-2 unter Berücksichtigung des vorgegebenen Netzebenenfaktors $k_{n,MS} = 0,4$ angewendet.

Der Grundswingungsanteil des verzerrten Stroms beträgt

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot 893,19 \text{ A} = \underline{696,42 \text{ A}}.$$

Das Oberschwingungsspektrum ist nicht kontinuierlich; vielmehr rufen Sechspuls-Brückengleichrichter charakteristische Harmonische der Ordnungen

$$\nu_{\text{typ}} = 6n \pm 1 \quad n \in \mathbb{N}$$

hervor. Von entsprechender Ordnung sind die Oberschwingungsströme I_ν , für deren Amplitude die charakteristische Gleichung

$$I_\nu = \frac{I_1}{\nu}$$

gilt. Diese Ströme bewirken an der Netzimpedanz harmonische Spannungsabfälle, die die Netzspannung überlagern und schließlich verzerren:

$$U_\nu = I_\nu \cdot Z_N(\nu) = I_\nu \cdot \sqrt{R_N^2 + (\nu X_N)^2}.$$

Da die Netzresistanz im Verhältnis zur Netzreaktanz sehr klein ist, wächst die frequenzabhängige Netzimpedanz nahezu linear. Die linear mit der Ordnung abnehmende Amplitude der Oberschwingungsströme führt dazu, dass sich der Betrag der Oberschwingungsspannung mit wachsender Ordnungszahl kaum ändert.

Bewertungsrelevant sind die Oberschwingungsspannungen bezogen auf die Spannungs-Grundschiwingung. Dies ist näherungsweise die Netzspannung am PCC:

$$u_\nu = \frac{U_\nu}{U_n}.$$

Überschreitet u_ν den nach DIN EN IEC 61000-2-2 zulässigen Grenzwert $u_{\nu, \max}$, so können in der Umgebung betriebene elektrische Verbraucher in ihrer Funktion gestört werden. Der Netzbetreiber gestattet den an das Mittelspannungsnetz angeschlossenen Netzkunden jedoch geringere Störpegel

$$u_{\nu, \text{zul}} = k_{n, \text{MS}} \cdot u_{\nu, \max},$$

die am Netzanschlusspunkt einzuhalten sind. Die Oberschwingungsanalyse zeigt, dass alle Verträglichkeitspegel der relevanten Oberschwingungen verletzt werden. Auch der zulässige Gesamtoberschwingungsgehalt

$$\text{THD} = \frac{1}{U_n} \sqrt{\sum_{\nu \in \nu_{\text{typ}}}^{40} U_\nu^2}$$

wird weit überschritten.

b) kompensiert

Zur Reduktion von Oberschwingungen in Kombination mit dynamischer Blindleistungskompensation soll ein SVC errichtet werden, dessen Filterkreis (Harmonic Filter) für die 5. Harmonische bemessen ist. Hierdurch wird Oberschwingungsströmen im Bereich der Abstimmfrequenz ein niederohmiger Pfad parallel zur Netzimpedanz angeboten, sodass ein Teil der Oberschwingungen nicht mehr in das Versorgungsnetz fließt. Die frequenzabhängige Ersatzimpedanz der Parallelschaltung aus Netzimpedanz und Filterkreisimpedanz berechnet sich mit

$$Z_{\text{ers}}(f) = Z_N(f) \parallel Z_{\text{FC}}(f) = \frac{1}{\frac{1}{Z_N(f)} + \frac{1}{Z_{\text{FC}}(f)}} = \frac{1}{\left| 2\pi f_n \nu L_{\text{FC}} - \frac{1}{2\pi f_n \nu C_{\text{FC}}} \right| + \sqrt{R_N^2 + (\nu \cdot X_N)^2}}.$$

Für die Oberschwingungsspannungen folgt

$$U_\nu = I_\nu \cdot Z_{\text{ers}}(\nu).$$

Die erneute Bewertung der Oberschwingungen zeigt, dass der projektierte 250-Hz-Filterkreis die Pegel der 5., 7., 11. und 13. Harmonischen in den zulässigen Bereich verschiebt. Erst ab der 17. Harmonischen treten wiederum Verletzungen der Grenzwerte auf, die durch zusätzliche Filterkreise behoben werden können. Der zulässige THD wird nur noch um 0,4 Prozentpunkte überschritten.