5 Leistungsberechnung in Stromrichterschaltungen

Die hier verwendeten Bezeichnungen und Berechnungen sind allgemein gültig und entsprechen der Norm DIN 40110.

5.1 Grundbegriffe

5.1.1 Sinusförmige Netzspannungen

Allgemein kann bei Stromrichteranwendungen angenommen werden, dass die Netzspannungen einen nahezu sinusförmigen Verlauf haben.

Frequenz der Grundschwingung: f

Effektivwert der Netzspannung: U_L

5.1.2 Sinus- und nichtsinusförmige Netzströme

Die Netzströme sind in den meisten Stromrichteranwendungen nicht rein sinusförmig, sondern enthalten Oberschwingungen. Die Oberschwingungen verursachen eine Verzerrung der Netzströme.

Frequenz der Grundschwingung: f

Effektivwert der Grundschwingung: I_{1L}

Effektivwert der n-ten Oberschwingungen I_{nL}

Frequenzen der Oberschwingungen
bei Schaltungen mit der Pulszahl p: $f_n = n \cdot f$ wobei für n gilt:

$n = (k \cdot p \pm 1)$ mit $k = 1, 2, 3, \ldots \infty$

Gesamter Effektivwert: $I_L = \sqrt{I_{1L}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nL}^2}$

Der Zusammenhang zwischen den Strömen der Grundschwingung und den Strömen der Oberschwingungen lautet:

$$\frac{I_{nL}}{I_{1L}} = \frac{f}{f_n} \quad \text{mit} \quad f_n = n \cdot f \ \text{und}$$

$$n = (k \cdot p \pm 1) \quad \text{mit} \quad k = 1, 2, 3, \ldots \infty$$

Grundschwingungsgehalt: $g_i = \frac{I_{1L}}{I_L}$

Der Wert des Grundschwingungsgehalts kennzeichnet die Kurvenformverzerrung.

Der Grundschwingungsgehalt berechnet sich in Stromrichterschaltungen folgendermaßen:

$$g_i = \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} & \text{für } p = 2 \\ \frac{p}{\pi} \cdot \sin\frac{\pi}{p} & \text{für } p > 2 \end{cases}$$

Oberschwingungsgehalt: $d_i = \frac{\sqrt{I_L^2 - I_{1L}^2}}{I_L}$

Der Oberschwingungsgehalt wird auch als Klirrfaktor bezeichnet.

5.2 Leistungsberechnung

5.2.1 Allgemein

Die Augenblicksleistung berechnet sich allgemein zu jedem Zeitpunkt mit der folgenden Gleichung: $p(t) = u(t) \cdot i(t)$

5.2.2 Wirkleistung

Definitionsgleichung der Wirkleistung, welche auch als mittlere Leistung bezeichnet wird:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \cdot i(t)\, dt$$

Bei sinusförmiger Netzspannung wird nur mit der Grundschwingung der nichtsinusförmigen Netzströme Wirkleistung übertragen:

$$P = P_1 = c \cdot U_L \cdot I_{1L} \cdot \cos\varphi$$

Hierbei: $c = 1$ einphasige Systeme

$c = \sqrt{3}$ dreiphasige Systeme

In Stromrichterschaltungen berechnet sich die aufgenommene Wirkleistung aus dem gleichstromseitigen Ersatzschaltbild nach folgender Gleichung:

$$P = \left(U_{di} \cdot \cos\alpha - Z_x \cdot I_d\right) \cdot I_d = c \cdot U_L \cdot I_{1L} \cdot \cos\varphi$$

Wichtig ist hierbei, dass in Z_x keine Wirkleistung umgesetzt wird.

5.2.3 Blindleistung

Grundschwingungsblindleistung: $Q_1 = c \cdot U_L \cdot I_{1L} \cdot \sin\varphi = P \cdot \tan\varphi$

Die Ursache der Grundschwingungsblindleistung liegt in der Phasenverschiebung zwischen der Grundschwingung des Stromes und der Spannung.

Induktive Blindleistung: $\varphi > 0$

Kapazitive Blindleistung: $\varphi < 0$

Verzerrungsblindleistung: $Q_D = c \cdot U_L \cdot \sqrt{I_L^2 - I_{1L}^2} = c \cdot U_L \cdot \sqrt{\sum_{\nu=2}^{\infty} I_{\nu L}^2}$

Gesamte Blindleistung: $Q = \sqrt{Q_1^2 + Q_D^2}$

Die Ursache der Verzerrungsblindleistung liegt in den Oberschwingungen der Netzströme.

Bei Stromrichtern gibt es zwei Arten von Blindleistungen, die auftreten können:

1. Die induktive Steuerblindleistung wird durch einen Zündverzögerungswinkel von $\alpha > 0°$ hervorgerufen.
2. Der Kommutierungsvorgang im Stromrichter benötigt induktive Kommutierungsblindleistung.

Netzgeführte Stromrichter nehmen also grundsätzlich induktive Blindleistung auf.

5.2.4 Scheinleistung

Gesamte Scheinleistung: $S = c \cdot U_L \cdot I_L = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Grundschwingungsscheinleistung: $S_1 = c \cdot U_L \cdot I_{1L} = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$

$$S_1 = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{Q_1}{\sin\varphi}$$

5.2.5 Verschiebungs- und Leistungsfaktor

Der in der Wechselstromtechnik bei sinusförmigen Größen eingeführte Leistungsfaktor λ ist bei nichtsinusförmigem Strom nur für die Grundschwingung definiert. Er wird Grundschwingungsleistungsfaktor λ_1 genannt.

Verschiebungsfaktor: $\cos\varphi = \frac{P}{S_1} = \lambda_1$

In Stromrichterschaltungen: $\cos\varphi = (\cos\alpha - \frac{Z_X \cdot I_d}{U_{di}}) \cdot \frac{1}{\cancel{\psi}_{\approx 1}}$

Der Verschiebungswinkel φ beschreibt die Phasenlage zwischen der sinusförmigen Netzspannung und der Grundschwingung des Netzstromes.

Der gesamte Leistungsfaktor bei nichtsinusförmigem Strom ergibt sich somit als allgemein gültige Gleichung zu:

$$\lambda = \frac{P}{S} = g_i \cdot \cos\varphi$$

5.2.6 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Schaltung berechnet sich immer aus den Wirkleistungen. Hierbei ist das Verhältnis der von der Schaltung abgegebenen Leistung P_{ab} zu der von der Schaltung aufgenommenen Leistung P_{auf}, als Wirkungsgrad definiert:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} \leq 1$$