

maxon Motoren als Generatoren



(mint, Urs Kafader, Revision Okt. 2022)

Einleitung

maxon Motoren sind sehr effizient. Dies gilt auch, wenn sie als Generatoren betrieben werden. Die grundlegenden Berechnungen sind sehr einfach, nicht zuletzt aufgrund des linearen Verhaltens von Motoren mit eisenlosen Wicklungen (maxon DC und lange zylindrische maxon EC).

Für Motoren mit genuteten Wicklungen (EC-Flachmotoren und EC-i-Motoren) gelten die Ergebnisse ebenfalls, solange sie innerhalb der Grenzen des Dauerbetriebsbereichs betrieben werden. Bei hohen Drehzahl- und Drehmomentwerten können Abweichungen von dieser einfachen Betrachtungsweise auftreten.

Inhalt

Einleitung.....	1
Inhalt.....	2
1. Gleichstrommotor als Generator	3
1.1 Grundlegende Gleichungen.....	3
Generatorgleichung.....	3
Kurzgeschlossene Klemmen: Maximaler Strom.....	4
Offene Klemmen: Ohne Last	4
Drehzahl und Spannung	5
Laststrom.....	5
Drehmoment und Strom	5
1.2 Leistungsaspekte	6
Maximale Leistung bei gegebener Geschwindigkeit.....	6
1.3 Generatorwirkungsgrad.....	7
Optimaler Generatorbetrieb	8
2 EC-Motoren als Generatoren	9
2.1 EC-Motor als AC-Generator	9
Induzierte Spannung in einer Phase.....	9
Induzierte Spannung in zwei Phasen.....	9
Eigenschaften des AC-Generators.....	10
2.2 EC-Motor als DC-Generator.....	11
DC-Signalcharakteristik	11
Praktische Aspekte	12
Kontroller als Gleichrichter	12
Allgemeine Bemerkungen zu Steuerungen im "Generator" Mode	13
3 Auswahl des Generators	14
3.1 Strategien zur Suche nach geeigneten maxon Motoren.....	14
Gleich- oder Wechselspannung?.....	14
Drehzahlkonstante	14
Widerstand.....	15
3.2 Leistungsbeschränkungen	15
Drehmoment- und Drehzahlbeschränkungen	15
Strom- und Spannungsbegrenzungen.....	15
3.3 Getriebe-Motor-Kombinationen	17
3.4 Sonderfall: DC-Motor als DC-Tacho.....	18

1. Gleichstrommotor als Generator

Bürstenbehaftete Gleichstrommotoren können als DC-Generatoren verwendet werden. Das zugrunde liegende physikalische Prinzip ist das Gesetz der Induktion. Durch Drehen der Motorwelle wird das Wicklungssegment durch den sinusförmig variierenden magnetischen Fluss im Luftspalt bewegt. Dementsprechend wird in jedem Segment eine sinusförmige Spannung induziert. Die Bürsten gleichen die induzierten Spannungen quasi aus, was zu einer Gleichspannung an den Motorklemmen führt. In der Realität zeigt die DC-Klemmenspannung je nach Anzahl der Kollektorsegmente eine leichte Welligkeit von einigen Prozent (siehe z.B. die technischen Daten des maxon DC Tacho DCT 22).

1.1 Grundlegende Gleichungen

Durch den Antrieb der Motorwelle wird im Motor eine Spannung erzeugt, die proportional zur Drehzahl ist

$$U_{ind} = \frac{n}{k_n} = k_g \cdot n$$

wobei

- U_{ind} Induzierte Spannung (V)
- k_n Drehzahlkonstante des Motors (min^{-1}/V)
- k_g Generatorkonstante des Motors (V/min^{-1}), d.h. der Kehrwert von k_n
- n Drehzahl (min^{-1})

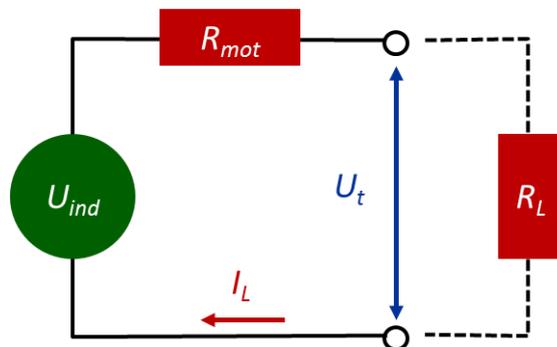


Abbildung 1 Gleichstrommotor als Generator: Elektrisches Layout.

Generatorgleichung

Für den unbelasteten Generator erhält man U_{ind} als Gleichspannung an den Motorklemmen. Wird der Generator mit Strom belastet, reduziert sich die Klemmenspannung U_t aufgrund des Spannungsabfalls am Motorwiderstand (Widerstand von Wicklung und Bürstensystem). Für einen gegebenen Laststrom I_L erhält man

$$U_t = \frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L$$

wobei

- U_t Spannung an den Klemmen des Motorgenerators (V)
- R_{mot} Klemmenwiderstand des Motors (Ω)
- I_L Laststrom (A)

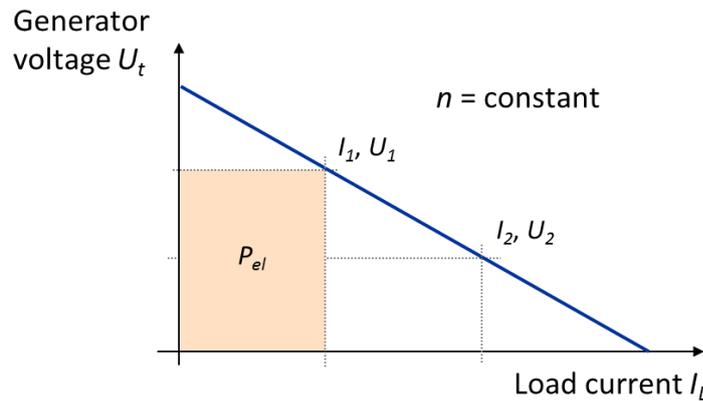


Abbildung 2 Die Spannungs-Strom-Kennlinie des Generators.
Die elektrische Leistung in jedem Punkt der Kennlinie entspricht der Fläche des Rechtecks unter der Linie.

Diese Gleichung stellt das Verhältnis zwischen der erzeugten Spannung U_t und dem Laststrom des Generators bei gegebener Drehzahl n dar, d.h. bei fester intern erzeugter Spannung $U_{ind.}$

Grafisch können wir dies als die *Spannungs-Strom-Kennlinie* des Generators bezeichnen. Sie gleicht der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Motors, aber...

- ... der Strom übernimmt die Rolle des Drehmoments und umgekehrt.
- ... die Spannung übernimmt die Rolle der Geschwindigkeit und umgekehrt.
- ... der Widerstand übernimmt die Rolle des Drehzahl-Drehmoment-Gradienten

$$R_{mot} = \frac{\Delta U_t}{\Delta I_L}$$

Daher hat jede Wicklung für einen bestimmten Motortyp einen anderen Gradienten (siehe bei „Abbildung 9 Die Spannungs-Strom-Kennlinien der verschiedenen Wicklungen des RE 40 mit Edelmetallbürsten bei 500 U/min. Man beachte die verschiedenen Steigungen der Wicklungen.

- “).

Kurzgeschlossene Klemmen: Maximaler Strom

Der maximal mögliche Laststrom tritt bei kurzgeschlossenen Klemmen auf. Der einzige aktive Widerstand ist der interne Motorwiderstand und der maximale Strom beträgt

$$I_{L,max} = \frac{n}{k_n \cdot R_{mot}}$$

Diese Situation entspricht dem unteren rechten Ende der Spannungs-Strom-Kennlinie, wo die Klemmenspannung verschwindet.

Offene Klemmen: Ohne Last

Wenn die Motorklemmen nicht angeschlossen bleiben, kann kein Strom fließen und die Klemmenspannung U_t entspricht der erzeugten internen Spannung $U_{ind.}$, d.h. die Klemmenspannung ist proportional zur Motordrehzahl. Diese Situation entspricht dem linken Ende der Spannungs-Strom-Kennlinie. Typischerweise arbeitet ein DC-Tacho nahe an diesen Bedingungen (siehe Kapitel 3.4) entsprechend einem sehr hohen Lastwiderstand.

Drehzahl und Spannung

Durch die Erhöhung der Generatordrehzahl n wird die Spannungs-Strom-Leitung parallel zu höheren Spannungen verschoben; wenn die Geschwindigkeit reduziert wird, geht die parallele Verschiebung in Richtung niedrigerer Spannungen über.

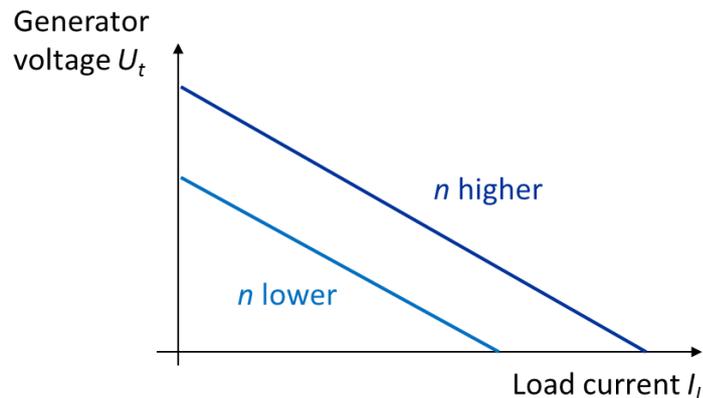


Abbildung 3 Die Abhängigkeit der Spannungs-Strom-Kennlinie von der Motordrehzahl.

Laststrom

Bei gegebener Drehzahl und Lastwiderstand beträgt der Laststrom

$$I_L = \frac{U_{ind}}{R_{tot}} = \frac{n}{k_n \cdot (R_{mot} + R_L)}$$

Drehmoment und Strom

Um einen bestimmten Laststrom zu erhalten, muss der Generator mit einem ausreichenden Drehmoment angetrieben werden. Das Antriebsmoment teilt sich in Drehmoment auf, um die internen Verluste (Reibung, magnetische Verluste) zu überwinden, und in Drehmoment, um den Laststrom zu erzeugen. Die Motordrehmomentkonstante k_M gibt die Proportionalität zwischen Laststrom und Drehmoment an.

$$M = k_M \cdot I_L + M_R = k_M \cdot (I_L + I_0)$$

wobei

- k_M Drehmomentkonstante des Motors (mNm/A)
- M_R Reibmoment (mNm)
- I_0 Leerlaufstrom des Motors (A), entsprechend dem Verlustmoment
- M Total benötigte Antriebsmoment (mNm)

1.2 Leistungsaspekte

Die elektrische Ausgangsleistung (in W) des Generators beträgt

$$P_{el} = U_t \cdot I_L = \left(\frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L \right) \cdot I_L$$

Das braune Rechteck unterhalb der Spannungs-Strom-Linie in Abbildung 2 (weiter vorne) stellt diese elektrische Leistung dar.

Die mechanische Eingangsleistung (in mW, wenn das Drehmoment in mNm angegeben ist) beträgt

$$P_{mech} = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot k_M \cdot (I_L + I_0)$$

Maximale Leistung bei gegebener Geschwindigkeit

Die höchste elektrische Ausgangsleistung bei gegebener Geschwindigkeit ergibt sich auf halbem Weg entlang der Spannungs-Strom-Linie. Dort ist das Leistungsrechteck am größten, d.h. bei einem Wert der Klemmenspannung, der die Hälfte der intern erzeugten Spannung beträgt.

$$P_{el,max} = \frac{1}{4} \cdot U_{ind} \cdot I_{L,max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{R_{mot}} \cdot \left(\frac{n}{k_n} \right)^2 = \frac{\pi}{30\,000} \cdot \frac{n^2}{4} \cdot \left(\frac{\Delta n}{\Delta M} \right)^{-1}$$

wobei $\frac{\Delta n}{\Delta M}$ die Kennliniensteigung des Motors (in $\text{min}^{-1}/\text{mNm}$) ist.

Der Wirkungsgrad liegt in diesem Betriebspunkt immer leicht unter 50%; Damit ist die mechanische Eingangsleistung etwa doppelt so hoch. Wir beobachten folgendes:

- Die maximale Leistung steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit; Es ist schwierig, bei niedriger Geschwindigkeit eine hohe Leistung zu erzielen.
- Die maximale Leistung ist proportional zur Umkehrung des Kennliniensteigung des Motors. Sie ist unabhängig vom Drehmoment oder der Drehzahlkonstante und kann nicht durch ein benutzerdefiniertes Wicklungslayout für einen bestimmten Motortyp beeinflusst werden. (Alle Wicklungen haben ungefähr die gleiche Kennliniensteigung.)

1.3 Generatorwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen nutzbarer Ausgangsleistung und mechanischem Input.

$$\eta_{gen} = \frac{P_{el}}{P_{mech}} = \frac{\left(\frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L\right) \cdot I_L}{\frac{\pi}{30000} \cdot n \cdot k_M \cdot (I_L + I_0)}$$

Eine grafische Darstellung dieser Gleichung finden Sie in Abbildung 4 (unten). Die wichtigsten Beobachtungen sind:

- Die allgemeine Form des Generatorwirkungsgrades bei konstanter Drehzahl sieht dem Motorwirkungsgrad bei konstanter Spannung sehr ähnlich.
- Je höher die Generatordrehzahl, desto höher der Wirkungsgrad. Dies ist ähnlich wie bei der motorischen Effizienz.
- Der maximale Wirkungsgrad tritt bei eher geringem Laststrom auf; typischerweise innerhalb des Dauer-Betriebsbereichs des Motor-Generators.

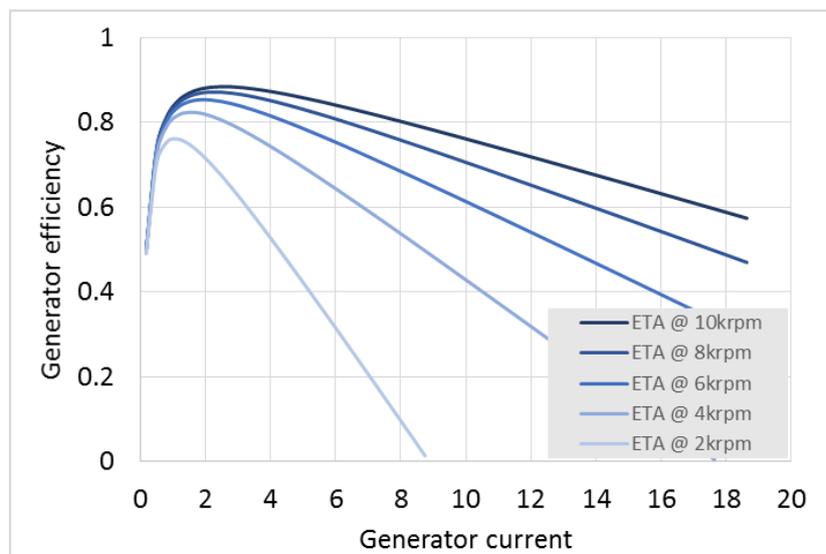


Abbildung 4 Die Abhängigkeit des Wirkungsgrads des Generators vom erzeugten Strom bei unterschiedlichen gegebenen Geschwindigkeiten.

Beachten Sie, wie der maximale Wirkungsgrad steigt und einen breiteren Strombereich abdeckt, wenn die Generatordrehzahl höher ist.

Dieses Diagramm wurde für einen RE 30 mit einem Nennstrom von 3.5 A berechnet.

Optimaler Generatorbetrieb

Unter der Annahme, dass wir den Wirkungsgrad für eine gegebene elektrische Leistung maximieren wollen, was sind die erforderliche Geschwindigkeit und der erforderliche Laststrom?

Mathematisch ist dies gleichbedeutend mit der Suche nach dem Extremum des Wirkungsgrades mit der Nebenbedingung konstanter Leistung. Wir überspringen hier die recht komplizierte Mathematik, geben aber die ungefähren Ergebnisse an.

Der optimale Generatorbetrieb liegt bei einem Laststrom von ca.

$$I_L \approx \sqrt[3]{\frac{P_{el} \cdot I_0}{2 \cdot R_{mot}}}$$

und bei einer Drehzahl von

$$n = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot R_{mot} \cdot I_L \cdot (I_L + I_0)}{I_0 \cdot k_M}$$

Um ein Gefühl für die Zahlen zu bekommen, betrachten wir den RE30-Motor, der für Abbildung 4 herangezogen wurde.

- Um die zugewiesene Leistung von 60W zu erhalten, ist eine Drehzahl von $12'000 \text{ min}^{-1}$ bei einem Laststrom von 2 A erforderlich. Das ist etwas mehr als die Hälfte des Dauerstroms (= spezifizierten Motor-Nennstroms) von 3,5 A.
- Bei 30 W Ausgangsleistung tritt das Optimum bei einem Laststrom von 1,6 A bei einer Drehzahl von 7650 min^{-1} auf.
- Bei 20 W Leistung beträgt der optimale Laststrom 1,4 A und die optimale Drehzahl 5900 min^{-1} .

2 EC-Motoren als Generatoren

Die relativ einfache Betrachtung von bürstenbehafteten Gleichstrommotoren wird bei EC-Motoren dadurch erschwert, dass drei Phasen zu berücksichtigen sind. Ein zusätzlicher Stromkreis muss das Gleichrichtungsverhalten des Bürstensystems ersetzen, wenn eine Gleichspannung erreicht werden soll. Auf der anderen Seite bieten bürstenlose EC-Motoren die Möglichkeit, Wechselspannungen zu erzeugen.

2.1 EC-Motor als AC-Generator

Induzierte Spannung in einer Phase

Wir beginnen die Untersuchung, indem wir die erzeugte Spannung in einem Wicklungssegment betrachten. Der magnetische Fluss des Permanentmagneten auf dem Rotor variiert in guter Näherung sinusförmig. Dementsprechend variiert die induzierte Spannung im Wicklungssegment auch in einem sinusförmigen Modus. Jedes magnetische Polpaar führt zu einer vollen Sinuswelle.

Dadurch können wir die induzierte Spannung in einem Wicklungssegment schreiben als

$$U_{ind,seg}(\varphi) = U_{ind,ampl} \cdot \sin \varphi$$

wobei

- $U_{ind,seg}$ Induzierte Spannung pro Wicklungssegment (V)
- $U_{ind,ampl}$ Amplitude der induzierten Spannung pro Wicklungssegment (V)
- φ Elektrischer Winkel, d.h. 360° entspricht 1 magnetischem Polpaar.

Die allgemeine Formulierung des Induktionsgesetzes besagt, dass die induzierte Spannung proportional zur Geschwindigkeit der magnetischen Flussvariation ist. Daher ist die Amplitude der induzierten Spannung proportional zur Motordrehzahl. Auch hier kann sie aus der Drehzahlkonstanten des EC-Motor erhalten werden.

Induzierte Spannung in zwei Phasen

In einem EC-Motor gibt es selten die Möglichkeit, nur ein einziges Wicklungssegment (Phase) zu kontaktieren. Stattdessen erhalten wir die induzierte Spannung zwischen zwei der drei Motorphasen ("Phase-Phase"). In einem EC-Motor mit Wicklungen in Sternkonfiguration ist die induzierte Spannung, die von Phase zu Phase gemessen wird, die Summe der Spannungen, die in zwei durch 120° elektrisch getrennten Wicklungssegmenten erzeugt werden.

$$U_{ind,ph-ph}(\varphi) = U_{ind,ampl} \cdot \sin \varphi + U_{ind,ampl} \cdot \sin(\varphi - 120^\circ)$$

Wenn wir etwas Trigonometrie anwenden, finden wir

$$U_{ind,ph-ph}(\varphi) = U_{ind,ampl} \cdot \sin(\varphi - 60^\circ)$$

Abbildung 5 zeigt die grafische Darstellung dieser Gleichung. Abgesehen von einer 60° -Phasenverschiebung ist das Ergebnis identisch mit der induzierten Spannung einer Phase. Insbesondere ist die Amplitude die gleiche. Das gleiche Ergebnis (wieder mit einer unwichtigen Phasenverschiebung) ergibt sich, wenn die Wicklung im Dreieck statt im Stern verschaltet ist.

Wenn man also nur zwei beliebige Phasen eines EC-Motors anschließt, entsteht ein AC-Generator.

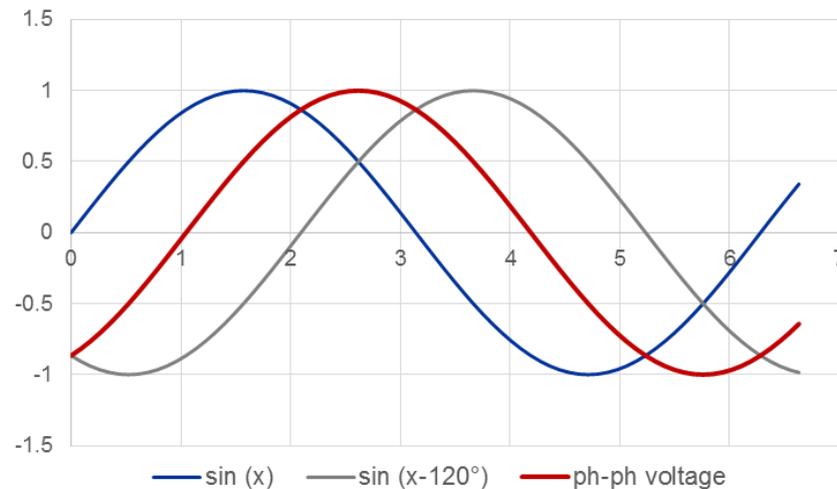


Abbildung 5 Die Summe zweier um 120° versetzter Sinus (blaue und graue Kurven) ergibt eine weitere Sinuskurve gleicher Amplitude (rote Kurve).

Eigenschaften des AC-Generators

Wir fassen die Ergebnisse in der Gleichung für die Wechselstromgeneratorspannung zusammen:

$$U_{ind,AC}(t) = U_{ind,ampl} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{n}{k_n} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{30} n \cdot p \cdot t\right)$$

wobei

- $U_{ind,ampl}$ Amplitude der induzierten Spannung pro Wicklungssegment (V)
- k_n Drehzahlkonstante des Motors (min^{-1}/V) (siehe Kapitel 0)
- f AC-Frequenz (Hz).
- n Motordrehzahl (min^{-1})
- p Anzahl der magnetischen Polpaare.

Ähnlich wie beim DC-Motorgenerator wird die Klemmenspannung $U_{t,AC}$ durch den Spannungsabfall aufgrund des Phasen-zu-Phasen-Motorwiderstands R_{mot} reduziert. Für einen gegebenen Laststrom I_L erhält man

$$U_{t,AC}(t) = \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{30} n \cdot p \cdot t\right)$$

Man beachte, dass diese Gleichung den Einfluss der Motorinduktivität vernachlässigt; d.h. es gibt keine Phasenverschiebung zwischen Strom und induzierter Spannung.

2.2 EC-Motor als DC-Generator

Ein externer Drehstromgleichrichter in Kombination mit einem bürstenlosen Motor führt im Wesentlichen zu dem gleichen DC-Tachoverhalten wie in Kapitel 1.

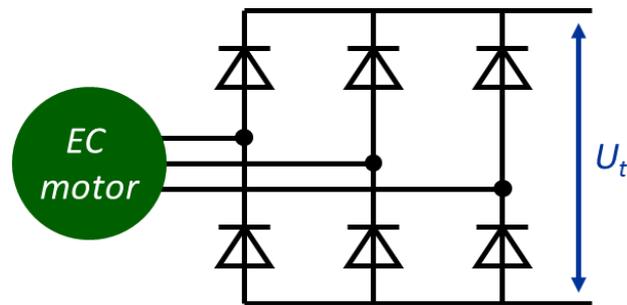


Abbildung 6 Der Schaltplan eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit Drehstromgleichrichter aus 6 Dioden.

DC-Signalcharakteristik

Das gleichgerichtete Signal zeigt eine Welligkeit von etwa 15% (entsprechend $1 - \cos 30^\circ$) und mit einer Frequenz (in Hz) von

$$f_{DC} = 6 \cdot p \cdot \frac{n}{60} = \frac{p \cdot n}{10}$$

Die Frequenz hängt von der Anzahl der magnetischen Polpaare p ab und ist proportional zur Geschwindigkeit n .

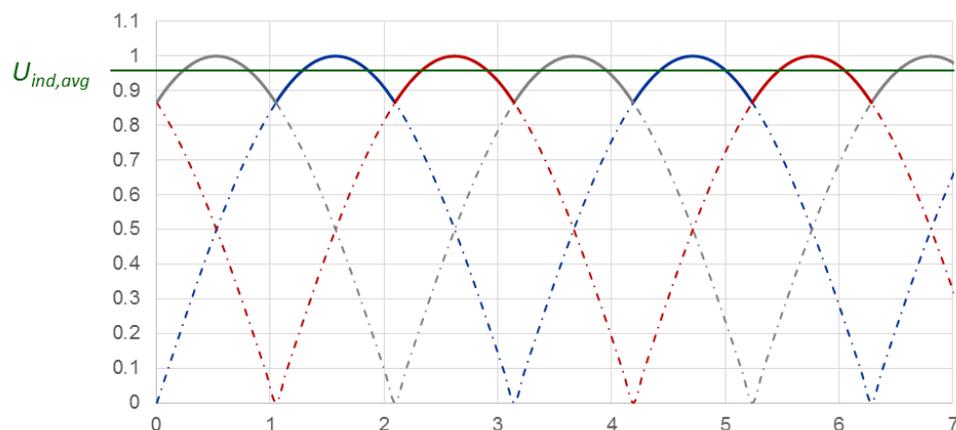


Abbildung 7 Das Signal der gleichgerichteten induzierten Spannung. Die blauen, roten und grauen Linien zeigen die darunterliegenden Sinuskurven. Die grüne horizontale Linie ist die durchschnittlich erzeugte Gleichspannung. Man beachte die Spannungswelligkeit von 15%.

Die Amplitude des erzeugten Signals entspricht der AC-erzeugten Spannung. Der mittlere Gleichspannungswert $U_{ind,avg}$ kann aus der zugrunde liegenden Sinusspannung berechnet werden

$$U_{ind,avg} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{ind,ampl} = \frac{3}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{3} \cdot \frac{n}{k_n} \right) = \frac{n}{k_n}$$

Dies ist die gleiche Gleichung wie im Fall des Gleichstrommotors.

Diese einfache Gleichung spiegelt die Definition der Drehzahlkonstante von maxon EC-Motoren wider. Sie ist definiert als Mittelwert der induzierten Gleichspannung pro Geschwindigkeit. Die Drehzahlkonstante ist die Umkehrung der Drehmomentkonstante, die wiederum als das durchschnittlich erzeugte Drehmoment bei der Blockkommutierung angegeben wird.

Praktische Aspekte

Die reale Gleichspannung eines bestimmten Motors wird höchstwahrscheinlich niedriger sein. Sie müssen etwaige Spannungsabfälle ΔV in den verwendeten elektronischen Komponenten, z.B. den Dioden (bis 1V), berücksichtigen. ΔV kann durch eine Abhängigkeit des Spannungsabfalls vom Strom je nach konkret verwendeten Komponenten noch komplizierter werden.

Unter Last haben wir den zusätzlichen Spannungsabfall durch Motor- und Lastwiderstand:

$$U_{t,avg} = U_{ind,avg} - \Delta V = \frac{n}{k_n} - \Delta V(I)$$

Kontroller als Gleichrichter

Die Leistungsbrücke eines 4-Q-Verstärkers (z.B. ESCON) kann als Gleichrichter fungieren. Schließt man den EC-Motor an den Kontroller an, kann man die gleichgerichtete Spannung am Eingang der Kontroller-Stromversorgung erhalten. Beachten Sie jedoch, dass die Spannung aufgrund des Spannungsabfalls (von etwa 0.8 V) in der Elektronik niedriger ist als die erzeugte.

Interessanterweise zeigt das gleichgerichtete Signal eine glatte Gleichspannung ohne Welligkeit. Dies liegt an Induktivitäten von eingebauten Motorfiltern und Motordrosseln, sowie integrierten Pufferkondensatoren am Spannungsanschluss.



Abbildung 8 *Verwenden einer ESCON als Gleichrichter. Schließen Sie die 3 Motorphasen an. Eine Stromversorgung muss nicht(!) angeschlossen werden. Am ESCON-Spannungseingang kann die vom Generator erzeugte Spannung gemessen werden.*

Allgemeine Bemerkungen zu Steuerungen im "Generator" Mode

- Falls die am Motoranschluss einer Steuerung (z. B. J2 des „ESCON 50/5“) anliegende erzeugte Spannung des Motors im Generator-Betrieb die minimale Betriebsspannung der Steuerung überschreitet (z. B. ESCON 50/5: 7V oder 8V), wird deren Funktionalität aktiviert. Die LEDs leuchten und der Prozessor und die Steuerungsfunktionen können genutzt werden. Die Endstufe wird ebenfalls auch aktiv, falls diese mit einem "Enable"-Signal oder entsprechenden Konfiguration frei gegeben ist.
maxon Steuerungen sind für diese Art von Betrieb nicht ausgelegt und nicht spezifiziert. Ein einfacher 6-Dioden-Gleichrichter kann die gleiche Aufgabe auch erledigen.
Der einzige Vorteil ist, dass eine Motor-Steuerung (z. B. ESCON) in der Lage ist, den Strom zu begrenzen und den Motor und periphere Mechanik je nach Konfiguration des Controllers und externen Signalen vor zu hohen Drehzahlen zu schützen.
- Beachten Sie, dass eine Minimaldrehzahl (und daraus resultierende Motorspannung) erforderlich ist, bevor der Controller vollständig aktiviert wird.
Wenn die erzeugte Spannung immer knapp um die minimal erforderliche Versorgungsspannungsgrenze der Steuerung liegt, kann dessen Verhalten instabil und unvorhersehbar sein und zwischen ein- und ausgeschaltetem Zustand schwanken.
Ob die erzeugte Spannung schließlich ausreicht damit die Steuerung, inkl. aller Schutzfunktionen und Ausgänge korrekt funktioniert, hängt von dem internen Hardware-Design und Konfiguration der Steuerung ab.
- Die Verwendung einer Motor-Steuerung als Bestandteil in "Generator"-Systemen kann in Abhängigkeit von der Konfiguration und den Generator-Drehzahlen funktionieren.
maxon kann keine generelle Empfehlung für den Einsatz von maxon Steuerungen als Gleichrichter von Motoren in Generator-Anwendungen abgeben.
maxon Steuerungen sind nicht unter dem Gesichtspunkt des "Generator"-Anwendungsfalls entwickelt und hierfür auch nicht spezifiziert oder getestet.

3 Auswahl des Generators

Bei der Auswahl von maxon Motoren als Generatoren sollten einige Regeln beachtet werden. Der Sonderfall des DC-Tachos wird in Kapitel 3.4 beschrieben.

3.1 Strategien zur Suche nach geeigneten maxon Motoren

Gleich- oder Wechselspannung?

Regel #1 folgt direkt aus der Theorie der vorherigen Kapitel.

Regel #1

Zur Erzeugung von Gleichspannung wählen Sie einen bürstenbehafteten Gleichstrommotor oder verwenden Sie einen bürstenlosen EC-Motor mit Spannungsgleichrichter.

Für die Erzeugung von Wechselspannung wählen Sie einen bürstenlosen EC-Motor und schließen Sie nur 2 Phasen an.

Hall-Sensoren werden bei bürstenlosen Motoren als Generator nicht benötigt.

Drehzahlkonstante

Die meisten Generatoren werden mit Drehzahlen von 1000 min^{-1} oder weniger betrieben. Das ist eine niedrige Drehzahl für maxon-Motoren, die für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt sind. Die Erzeugung von 10 V oder mehr bei 1000 min^{-1} erfordert eine Drehzahlkonstante von $100 \text{ min}^{-1}/\text{V}$ oder weniger. Solche Wicklungen sind im maxon-Portfolio schwer zu finden. Es gibt nur wenige hochohmige Wicklungen bei größeren Motoren, die diese Anforderung erfüllen. Kleinere Motoren haben höhere Drehzahlkonstanten.

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Motoren mit niedriger Drehzahlkonstante (oder hoher erzeugter Spannung pro Drehzahl). Normalerweise ist es nur die Motorwicklung mit dem höchsten Widerstand, die zu Drehzahlkonstanten von weniger als $100 \text{ min}^{-1}/\text{V}$ führt.

Motortype	Drehzahlkonstante kn	Spannung pro 1000 min ⁻¹	Anschluss-Widerstand	Bemerkung
DCX 32 L	97.9 min ⁻¹ /V	10.2 V	4.1 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
DCX 26 L EB	111 min ⁻¹ /V	9.0 V	11.6 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
RE 60 GB	38.9 min ⁻¹ /V	26.0 V	1.4 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
RE 50 GB	39.5 min ⁻¹ /V	25.3 V	3.9 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
RE 40 GB	56.2 min ⁻¹ /V	17.8 V	10.2 Ω	tiefere kn möglich
RE 25 GB	97.8 min ⁻¹ /V	10.2 V	36.8 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC 60	65 min ⁻¹ /V	15.4 V	1.0 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-max 40	76.1 min ⁻¹ /V	13.1 V	7.2 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-i 40 HT 70W	104 min ⁻¹ /V	9.6 V	2.0 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-i 40 HT 100W	104 min ⁻¹ /V	9.5 V	0.9 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-flat 45 50W	95 min ⁻¹ /V	10.5 V	7.5 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-flat 45 70W	72.7 min ⁻¹ /V	13.7 V	6.9 Ω	Wicklung mit kleinstem kn
EC-flat 60 100W	83.4 min ⁻¹ /V	12.0 V	1.1 Ω	Wicklung mit kleinstem kn

Tabelle 1 Auswahl von maxon Motoren mit niedriger Drehzahlkonstante.

Regel #2

Ohne Berücksichtigung der Belastung sollte die Wicklung eine Geschwindigkeitskonstante von $k_n = \frac{n}{U}$ oder kleiner haben.

Alternativ kann die Motordrehzahl durch den Einsatz eines Getriebes erhöht werden, siehe Kapitel 3.3 Getriebe-Motor-Kombinationen.

Widerstand

Regel #2 erfordert Motoren mit hoher Generatorkonstante. Leider haben diese Wicklungen auch den höchsten Widerstand. Daher ist die Ausgangsspannung sehr empfindlich gegenüber dem Laststrom.

In Tabelle 1 gibt es jedoch eine weitere Beobachtung:

Je größer der Motor, desto geringer ist der Widerstand für eine ähnliche Drehzahlkonstante.

Regel #3

Für eine stabile Ausgangsspannung über einen bestimmten Lastbereich wählen Sie lieber einen größeren Motor, bei dem der Widerstand auch bei Motoren mit hoher Generatorkonstante geringer ist.

Die EC-i 40 High Torque Motoren sind unter diesem Gesichtspunkt sehr interessant.

3.2 Leistungsbeschränkungen

Für Motoren, die als Generatoren verwendet werden, gelten die gleichen Drehzahl- und Drehmomentbeschränkungen wie bei der Motorauswahl. Man beachte den Dauer-Betriebsbereich des Motor-Generators.

Man wähle den Motor-Generator nicht nur aufgrund der Leistung aus. Um die Drehmomentanforderungen zu erfüllen, benötigt man möglicherweise einen Motor mit einer viel höheren Nennleistung als die zu erzeugende Leistung. Insbesondere, wenn die Generatordrehzahl im Vergleich zu typischen Motordrehzahlen eher niedrig ist (vgl. die Ergebnisse in Kapitel „1.3 Generatorwirkungsgrad“).

Drehmoment- und Drehzahlbeschränkungen

Die Höhe des Drehmoments auf dem Generator definiert die Größe und den Typ des Motorgenerators. Man wähle einen Motortyp mit einem Dauerdrehmoment, das höher ist als das Generatordrehmoment.

Bei der Berechnung des Drehmoments oder der aktuellen Last muss die Betriebsart berücksichtigt werden. Wird der Generator über lange Zeiträume oder in intermittierenden Betriebszyklen oder nur in kurzen Intervallen laufen? Dementsprechend muss eine Motorgröße mit ausreichendem Dauerdrehmoment oder Strom gewählt werden.

Man beachte auch die Maximaldrehzahl des Motortyps. Aufgrund der allgemein niedrigen Geschwindigkeiten ist dies jedoch fast nie ein Problem.

Strom- und Spannungsbegrenzungen

Die am besten geeignete Wicklung eines bestimmten Motortyps ergibt sich aus den Anforderungen an Strom und erzeugter Spannung. Die Wicklung muss auch unter Last die erforderliche Spannung U erzeugen können.

Unter der Annahme einer festen Generatordrehzahl n benötigen wir eine erzeugte Spannung der Wicklung, die größer als U ist

$$U_t = \frac{n}{k_n} - R_{mot} \cdot I_L > U$$

Erstmals ohne Berücksichtigung der Last wähle man die Drehzahlkonstante nach Regel #2, d.h. eine Wicklung mit ausreichend hohem Widerstand. Da die Stromkapazität mit zunehmendem Widerstand abnimmt, stelle man sicher, dass der Dauerstrom immer noch groß genug ist.

Abbildung 9 (unten) zeigt recht schön die gegenläufigen Effekte verschiedener Wicklungen:

- Je höher der Wicklungswiderstand, desto höher die erzeugte (Leerlauf-)Spannung.
- Je höher jedoch der Wicklungswiderstand, desto empfindlicher gegenüber Laststromänderungen wird die erzeugte Spannung.

Diese widersprüchlichen Effekte können bis zu einem gewissen Grad eliminiert werden, indem größere Motoren ausgewählt werden, die niedrigere Widerstände für die gleiche Generatorkonstante aufweisen (gemäß Regel #2).

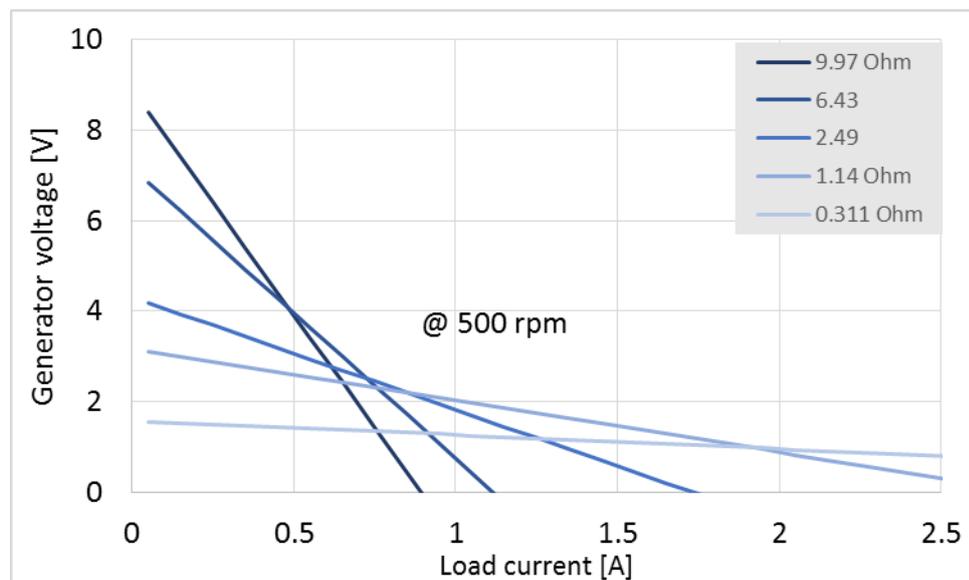


Abbildung 9 Die Spannungs-Strom-Kennlinien der verschiedenen Wicklungen des RE 40 mit Edelmetallbürsten bei 500 U/min. Man beachte die verschiedenen Steigungen der Wicklungen.

3.3 Getriebe-Motor-Kombinationen

Regel #4

Verwenden Sie Getriebe, um sehr niedrige Geschwindigkeiten zu erhöhen. maxon Getriebe sind jedoch nicht für den Generatorbetrieb ausgelegt, d.h. nicht vorgesehen um über die Abgangswelle angetrieben zu werden.

Verwenden Sie für abgangsseitig angetriebene Getriebe typischerweise Planetengetriebe bis zu zwei Stufen oder Stirnradgetriebe. Oder auch speziell entwickelte Getriebe mit hohem Wirkungsgrad wie die maxon „Ultra Performance“ UP-Getriebebaureihe.

Der Grund für die Verwendung von Getriebe-Motor-Kombinationen ist der sehr langsame Antriebsmechanismus in Generatoren; z.B. angetrieben von einer Wind- oder Wasserkraftanlage oder auch von Hand. Ein paar Beobachtungen und Empfehlungen:

- Die Getriebe werden im Generatorbetrieb abgangsseitig angetrieben. maxon Getriebe sind jedoch nicht für Rückdrehbarkeit (d.h. über die Abgangswelle) ausgelegt.
- Getriebe mit hoher Untersetzung (3 Stufen und höher) sind nur beschränkt rückdrehbar; d.h. sie drehen sich nicht, wenn sie mit dem maximal zulässigen Drehmoment über die Abgangswelle angetrieben werden. 1- oder 2-stufige Planetengetriebe sind besser geeignet.
- Man verwende besser Stirnradgetriebe anstelle von Planetengetrieben. Stirnradgetriebe sind leichter rückdrehbar.
- Die maxon Ultra Performance (UP) Planetengetriebe können aufgrund ihres sehr hohen Wirkungsgrades auch mit 4 Stufen abgangsseitig angetrieben werden.

3.4 Sonderfall: DC-Motor als DC-Tacho

Regel #5

Verwenden Sie für DC-Tachos Motoren mit Edelmetallbürsten.

Wählen Sie die Wicklung entsprechend der gewünschten Tachospannung und dem Drehzahlbereich in Ihrer Anwendung aus.

Machen Sie sich keine Sorgen um den Wicklungswiderstand, stellen Sie einfach sicher, dass ein Lastwiderstand von mehreren $k\Omega$ vorhanden ist, um die Ströme klein zu halten.

In einem DC-Tacho sollte die Ausgangsspannung so proportional wie möglich zur Drehzahl sein, d.h. sie sollte der erzeugten Spannung U_{ind} entsprechen. Wie bereits erwähnt, entspricht dies der Minimierung des $R_{mot} \cdot I_L$ Terms. Folgende Punkte sind zu beachten:

1. Den Laststrom I_L klein halten, indem man einen großen Lastwiderstand R_L verwendet. Typischerweise reduziert ein Lastwiderstand von mehreren $k\Omega$ die Differenz zwischen der intern erzeugten Spannung und der Ausgangstachospannung auf weniger als 1 Promille. Typische maximale Motor-Wicklungswiderstände liegen bei mehreren Ohm. Bei Verwendung eines Controllers, überprüfe man den Tacho-Eingangswiderstand. Zum Beispiel beträgt der analoge Eingangswiderstand bei der ESCON 100 $k\Omega$.
2. Edelmetallbürsten wählen, die einen kleinen und konstanten Übergangswiderstand haben. Dies gilt insbesondere bei den sehr geringen Strömen, die beim Einsatz von Motoren als DC-Tachos zu erwarten sind.
Achtung:
Graphitbürsten sind für den Betrieb als DC-Tacho und niedrige Ströme nicht geeignet. Der Bürsten-Kollektor-Kontaktwiderstand ist viel größer als bei Edelmetallbürsten. Zudem ist der Kontakt bei niedrigen Strömungen sehr schlecht definiert und der Widerstand variiert stark.
3. Die Wicklung entsprechend der erforderlichen Tachospannung für den Drehzahlbereich in der Anwendung auswählen. Wenn die Ausgangsspannung pro Drehzahl so hoch wie möglich sein soll, wähle man eine hohe Generatorkonstante, d.h. eine kleine Drehzahlkonstante (-> Motorwicklung ganz rechts bei den Katalog-Datenblättern). Welche Wicklung am besten passt, muss im Einzelfall entschieden werden.

maxon bietet einen Standard-DC-Tacho (DCT 22) an. Im Wesentlichen handelt es sich um einen Gleichstrommotor mit Edelmetallbürsten und AlNiCo-Magneten. AlNiCo-Magnete weisen den niedrigsten Temperaturkoeffizienten auf, wodurch sie sich perfekt für den Einsatz in einem Sensor (= Tacho) eignen. Der Rotor des DCT 22 ist ohne zusätzliche Lager direkt auf der Motorwelle montiert, wodurch eine mechanisch überdefinierte Welle mit vier Lagern vermieden. Die nominale Abgabespannung des DCT 22 von $0.52 \text{ V pro } 1000 \text{ min}^{-1}$ passt perfekt zu einem analogen 5V-Sensoreingang einer Elektronik für Drehzahlen von bis zu ca. $10'000 \text{ min}^{-1}$; entsprechend dem typischen Drehzahlbereich von bürstenbehafteten Motoren.

Ausser dem DC-Tacho DCT 22 wurden im Laufe der Jahre auch DC Motoren mit Edelmetallbürsten (meist aus der abgekündigten S-Motorbaureihe) als DC-Tacho eingesetzt.