

Motor: Daten und Simulation

Wissensdokument

Inhalt

1	Einführung	1
2	maxon Motordaten	2
2.1	Erklär-Videos	2
2.2	BLDC / EC-Motoren (bürstenloses Design)	2
3	Konstanten	3
3.1	Kennliniensteigung $\Delta n / \Delta M$ [$\text{min}^{-1} / \text{mNm}$] (Katalog Zeile 14)	3
3.2	Motorkonstante K [$\text{NmW}^{-1/2}$]	3
3.3	Drehmomentkonstante k_M [mNm/A] (Katalog Zeile 12)	4
3.4	Drehzahlkonstante k_n [min^{-1}/V] (Katalog Zeile 13)	4
3.5	Back EMF (Gegen-EMK) Konstante oder Generatorkonstante k_G [V/min^{-1}]	4
4	Induktion	4
4.1	Anschlussinduktivität L [mH] (Zeile 11)	4
4.2	d- und q-Achsen Stator-Selbstinduktivität L_d / L_q [mH]	4
4.3	Streuinduktivität/Gegeninduktivität (Mutual) L_M [mH]	5
4.4	Zero-Sequence Induktivität L_0 [mH]	5
4.5	Statorinduktivitätsschwankung (inductance fluctuation) L_x [mH]	5
5	Rotordämpfung: Reibung und Eisenverluste	5

1 Einführung

Jede Simulation ist nur eine Annäherung an die Realität. Tests mit physischen Antriebssystemen sind daher vorzuziehen. Für gute Ergebnisse lohnt es sich, mehrere Antriebe parallel zu testen, da Toleranzen zu Abweichungen in den Ergebnissen führen.

maxon ist nicht auf die Simulation von Antrieben spezialisiert. Wir testen die physischen Antriebe (Motoren) direkt. Da wir jedoch immer mehr Anfragen zu Simulationen erhalten, haben wir dieses Dokument erstellt. Hier finden Sie Antworten auf häufig gestellte Fragen. Wenn Ihre Frage hier nicht beantwortet wird, suchen Sie bitte zuerst im Internet nach Lösungen, da wir Ihnen wahrscheinlich auch nicht helfen können.

Wenn Sie mit Simulationen vertraut sind und Fehler in diesem Dokument entdecken, melden Sie diese uns bitte. Wir haben das Dokument nach bestem Wissen erstellt, können jedoch Fehler nicht ausschliessen.

2 maxon Motordaten

Informationen zu den Motordaten finden Sie auf unserer Website (www.maxongroup.ch) oder im maxon-Katalog (<http://epaper.maxongroup.de>).

Motordaten unterliegen Toleranzen und hängen häufig von den Umgebungsbedingungen, der Art der Installation sowie den Parametern und Eigenschaften des Regelkreises ab. Ein warmer Motor unterscheidet sich von einem kalten.

Bitte beachten Sie auch die **maxon-Standardspezifikation 100** (Gleichstrommotor) **oder 101** (EC-Motor) im Katalog (Katalog 2020 auf Seite 68) und die **Erklärungen maxon Terminologie** zu Beginn jedes Kapitels im Katalog.

2.1 Erklär-Videos

Wir haben einige kurze Videos vorbereitet, in denen Sie erfahren, welche Motordaten wichtig sind und wie die Daten zu interpretieren sind. Die vollständige Liste aller Videos finden Sie unter academy.maxongroup.ch.

Ein Auszug in dieser Tabelle:

maxon Motordaten 1: Die Grenzen der Betriebsbereiche	YouTube	Vimeo
maxon Motordaten 2: Die Kennlinie	YouTube	Vimeo
maxon Motordaten 3: Die Wicklungen	YouTube	Vimeo
Kommutierung maxon DC Motor	YouTube	Vimeo
Blockkommutierung eines bürstenlosen maxon EC-Motors	YouTube	Vimeo
Kommutierung mehrpoliger maxon EC-Motor	YouTube	Vimeo
DC Motor mit oder ohne Bürsten?	YouTube	Vimeo
Motor und Antriebsauswahl	YouTube	Vimeo

2.2 BLDC / EC-Motoren (bürstenloses Design)

Ein BLDC-Motor ist nur zusammen mit der Kommutierungselektronik vollständig definiert. Die Daten im Katalog gelten bei einer einfachen Blockkommutierung.

Bei sinusförmiger Kommutierung oder FOC (Field Oriented Control) sind die Motorparameter anders.

- [Stärke eines BLDC \(EC\) Motors bei Sinuskommutierung](#)

3 Konstanten

Die Motorkonstanten beschreiben das allgemeine Verhalten. Sie haben Toleranzen von bis zu ca. 10% und ändern sich mit der Motortemperatur. Die im maxon-Katalog angegebenen Werte gelten für maxon-Standardbedingungen von 25°C (für BLDC-Motoren lesen Sie bitte Kapitel 2.2 in diesem Dokument).

3.1 Kennliniensteigung $\Delta n/\Delta M$ [min⁻¹/mNm] (Katalog Zeile 14)

Die Kennliniensteigung gibt an, wie viel Drehzahl mit zunehmendem Drehmoment verloren geht. Je kleiner der Wert, desto leistungsstärker ist der Motor und desto weniger ändert sich die Motordrehzahl bei Lastschwankungen. Die Kennliniensteigung ist für die meisten Motoren konstant und kann anhand des Quotienten aus idealer Leerlaufdrehzahl und idealem Anhaltmoment berechnet werden. Je heißer der Motor wird, desto schwächer wird der Motor und der Wert steigt.

$$\text{Kennliniensteigung } \frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{R}{K_M^2}$$

$\Delta n/\Delta M$: Kennliniensteigung [min⁻¹/mNm] (Zeile 14)
 R : Anschlusswiderstand [Ω] (Zeile 10)
 K_M : Drehmomentkonstante [mNm/A] (Zeile 12)

Bei Motoren **mit Eisenkern** (maxon flat, EC-i, frameless und ECX TORQUE) ist die Drehzahlkennlinie keine gerade Linie. Die Kennliniensteigung ist nicht konstant und hängt von der Drehzahl ab. Im Dauerbetriebsbereich kann die Kennliniensteigung mit folgender Formel angenähert werden:

$$\text{Kennliniensteigung } \frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0 - n_N}{M_N}$$

$\Delta n/\Delta M$: Kennliniensteigung [min⁻¹/mNm] (nicht Zeile 14)
 n₀ : Leerlaufdrehzahl n₀ [min⁻¹] (Zeile 2)
 n_N : Nenn Drehzahl n_N [min⁻¹] (Zeile 4)
 M_N : Nennmoment M_N [min⁻¹] (Zeile 5)

3.2 Motorkonstante K [NmW^{-1/2}]

In der Literatur findet man häufig die Motorkonstante K anstelle der Kennliniensteigung. Die Motorkonstante gibt das Drehmoment pro Quadratwurzel des Leistungsverlusts an. Die Beziehung zwischen den beiden Parametern ist (in geeigneten Einheiten)

$$K = \frac{1}{\sqrt{\frac{\Delta n}{\Delta M}}} = \frac{M}{\sqrt{P_R}} = \frac{k_M}{\sqrt{R}}$$

K : Motorkonstante [NmW^{-1/2}]
 R : Anschlusswiderstand [Ω] (Zeile 10)
 K_M : Drehmomentkonstante [mNm/A] (Zeile 12)
 P_R : Resistive Verlustleistung [W]
 $\Delta n/\Delta M$: Kennliniensteigung [min⁻¹/mNm]

Die Motorgleichung, d.H. die Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit ω vom Drehmoment M, kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$\omega = \frac{U}{K\sqrt{R}} - \frac{M}{K^2}$$

3.3 Drehmomentkonstante k_M [mNm/A] (Katalog Zeile 12)

Die Drehmomentkonstante gibt die proportionale Beziehung zwischen Eingangsstrom und Abgangsdrehmoment an. Die Drehmomentkonstante ist ein Konstruktionsparameter, einschließlich der Geometrie und der Magnetfelddichte sowie der Wicklung. Die Physik dahinter ist die der Kraft, die ein stromführender Draht in einem externen Magnetfeld erfährt (Lorentzkraft).

Drehmoment und Strom sind bei eisenlosen maxon Motoren streng proportional. Grundsätzlich kann man sagen, dass die beiden Parameter für einen bestimmten Motor gleichwertig sind. Dies ermöglicht die Verwendung eines Motors als Drehmomentmessgerät - alles was Sie tun müssen, ist den Strom zu messen.

Bei Motoren mit Eisenkern gilt die Proportionalität weiterhin für realistische Stromwerte. Nur bei extrem hohen Strömen (die kaum jemals erreicht werden) wäre das erzeugte Drehmoment aufgrund von Sättigungseffekten im Eisenkern geringer.

3.4 Drehzahlkonstante k_n [min⁻¹/V] (Katalog Zeile 13)

Die Drehzahlkonstante ist die Umkehrung der Generatorkonstante. Beide beschreiben die Proportionalität zwischen Motordrehzahl und induzierter Spannung (back EMF). Die Drehzahlkonstante wird meistens verwendet, um die ideale Leerlaufdrehzahl für eine gegebene Eingangsspannung zu berechnen, wobei Reibungsverluste nicht berücksichtigt werden.

Die Drehzahlkonstante ist der invertierte Wert der Drehmomentkonstante.

$$k_n \cdot k_M = \frac{30000}{\pi} \left[\frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}} \cdot \frac{\text{mNm}}{\text{A}} \right] = 1$$

3.5 Back EMF (Gegen-EMK) Konstante oder Generatorkonstante k_G [V/min⁻¹]

Daher ist die back EMF Konstante identisch mit der Drehmomentkonstante (Zeile 12 im Katalog). Nur in anderen Einheiten angegeben ($\text{Nm/A} \cdot \pi/30 = \text{V/min}^{-1}$). Oder man nimmt den Kehrwert der Drehzahlkonstanten.

4 Induktion

Die Induktivität ist definiert als das Verhältnis der induzierten Spannung zur Änderungsrate des Stroms, der sie verursacht. Dies ist ein Proportionalitätsfaktor, der von der Geometrie der Leiter und der magnetischen Permeabilität benachbarter Materialien abhängt. Die Induktivität ist daher abhängig vom Stromsignal (Sinus, Block, Trapez) und der jeweiligen Frequenz.

4.1 Anschlussinduktivität L [mH] (Zeile 11)

Der Katalogwert ist die Wicklungsinduktivität im Stillstand und gemessen bei 1 kHz, sinusförmig. Die effektive Motorinduktivität bei quadratischer PWM-Erregung beträgt nur ca. 30-80% des Katalogwerts.

4.2 d- und q-Achsen Stator-Selbstinduktivität L_d / L_q [mH]

Für fast alle maxon EC-Motoren gilt: $L_d = L_q = 1/2 L_{ph-ph}$
(wobei L_{ph-ph} der Katalogwert von Phase zu Phase ist)

Ausnahmen sind die EC-i High Torque und die ECX TORQUE Motoren, bei denen $L_d < L_q$. Der Unterschied ist jedoch gering (ca. 10%) und muss bei der feldorientierten Steuerung (FOC) nicht berücksichtigt werden, da das Ziel darin besteht, die Feldstrom I_d zu minimieren.

4.3 Streuinduktivität/Gegeninduktivität (Mutual) L_M [mH]

Die Gegeninduktivität entsteht durch den in einer Wicklung fließenden Strom, der eine Spannung in einer benachbarten Wicklung induziert. Der Einfachheit halber nehmen wir den perfekten Motor an. Dort entspricht die Gegeninduktivität der Hälfte der Selbstinduktivität. Die genaue Berechnung ist kompliziert. Im Internet finden Sie Möglichkeiten, wie Sie sie ohne weitere Informationen von maxon berechnen können.

4.4 Zero-Sequence Induktivität L_0 [mH]

Gemäss der Gleichung $L_0 = L - 2 L_M$, hat ein idealer Motor eine ZS-Induktivität von Null ($L_0 = 0$).

4.5 Statorinduktivitätsschwankung (inductance fluctuation) L_x [mH]

Dieser Wert ist die Schwankung der Selbstinduktivität und der Gegeninduktivität bei sich änderndem Rotorwinkel.
 $L_x = 0.5 \cdot (L_d - L_q)$

5 Rotordämpfung: Reibung und Eisenverluste

Die Rotordämpfung in den Motoren beruht auf Reibung in den Lagern und an den Bürsten sowie auf Eisenverlusten (Hysterese und Wirbelströme). Im maxon-Katalog wird die Dämpfung als Leerlaufstrom (Toleranz $\pm 50\%$) angegeben, der einem Reibungsmoment ($M_R = I_0 \cdot k_M$) bei Leerlaufdrehzahl entspricht. Die Rotordämpfung wird durch zwei Parameter angenähert, ein konstantes Dämpfungsdrehmoment und einen drehzahlabhängigen Dämpfungsparameter (viskos).

- M_{VA} [mNm] konstanter Faktor (statische Dämpfung)
- c_5 [nNm/rpm] drehzahlabhängiger Faktor (viskose Dämpfung)

Bei maxon DC Motoren ist der drehzahlabhängige Faktor (c_5) eher gering. Für die meisten praktischen Zwecke können wir die Drehzahlabhängigkeit des Leerlaufstroms vernachlässigen. Bei EC-Motoren kann c_5 aufgrund der starken Drehzahlabhängigkeit des Wirbelstromverlust-Reibungsmoments ($M_R = I_0 \cdot k_M$) bei Leerlaufdrehzahl einen grösseren Einfluss haben.

Die Werte für M_{VA} und c_5 sind nicht in der maxon Katalogspezifikation enthalten, sondern nur der kombinierte Leerlaufstromwert. Wenn Sie statische und viskose Dämpfungsparameter benötigen, öffnen Sie ein Support-Ticket mit der Artikelnummer des Motors (support.maxongroup.com).