Principles of Mechatronic Systems
مبانی سیستم های مکاترونیکی
موتورهای گامی (پله ای)

By: Reza Tikani
Mechanical Engineering Department
Isfahan University of Technology

عملگر

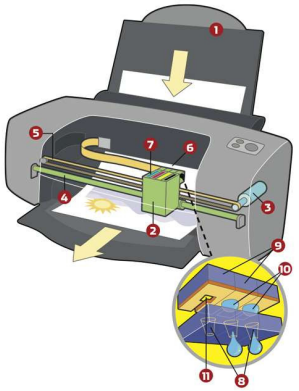
عملگر (Actuator): عامل حرکت در سیستمهای مکاترونیکی

- ✓ عملگرهای گامی (موتورهای پله ای Stepper Motor)
  - موتورهای پله ای رلوکتانس متغیر (VB)
  - موتورهای پله ای آهنربا دائم (PM)
  - موتورهای پله ای هیبرید (HB)
- ✓ عملگرهای پیوسته:
  - موتورهای DC
  - موتورهای القایی
  - موتورهای هیدرولیکی و نیوماتیکی
  - عملگرهای سیلندر پیستون

عملگرهای گامی

کاربردهای موتورهای پله ای:

- ✓ پرینترها (حرکت منبع جوهر)



http://www.computershopper.com

عملگرهای گامی

کاربردهای موتورهای پله ای:

- ✓ پرینترها (تغذیه کاغذ)

http://www.howstuffworks.com

عملگرهای گامی

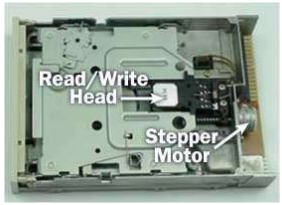
کاربردهای موتورهای پله ای:

- ✓ ماشینهای کنترل عددی

عملگرهای گامی

کاربردهای موتورهای پله ای:

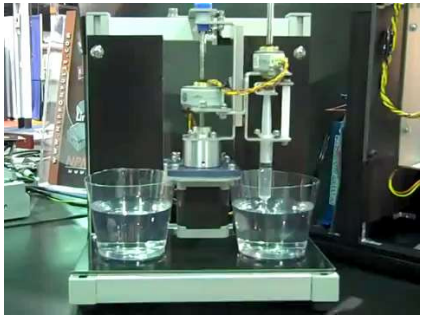
- ✓ درایوهای فلاپی دیسک



http://www.howstuffworks.com

عملگرهای گامی

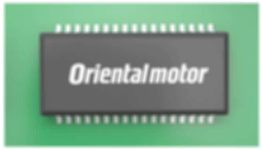
کاربردهای موتورهای پله ای:



عملگرهای گامی

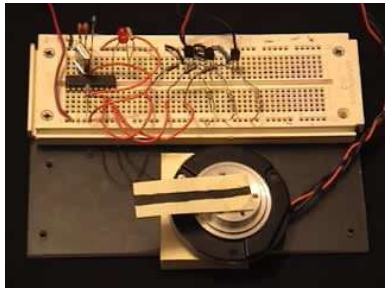
کاربردهای موتورهای پله ای:

Camera Positioning



عملگرهای گامی

موتورهای پله ای



عملگرهای گامی

موتورهای پله ای (Stepper Motor):

موتور پله ای از عملگرهای مورد استفاده و مرسوم در سیستم های مکاترونیکی است. این موتورها معمولاً به صورت حلقه باز به منظور کنترل موقعیت و سرعت استفاده می شود.

این موتورها به صورت گام به گام (Step by Step) عمل می کنند و حرکت آنها محدود به گامهای زاویه ای خاص است.

هر گام چرخش موتور، پاسخ به یک ورودی پالس است. به عبارت دیگر با یک ردیف سیگنالهای پالس می توان موتور پله ای را به صورت حلقه باز کنترل نمود (به شرط آنکه بار وارده بر موتور در حد ظرفیت آن باشد.)

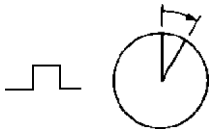


Figure 1. One Pulse Equals One Step

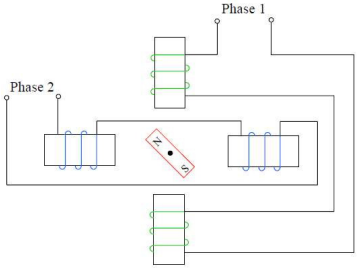
Figure 2: Pulse Count Equals Step Count

عملگرهای گامی

موتورهای پله ای آهنربا دائم:

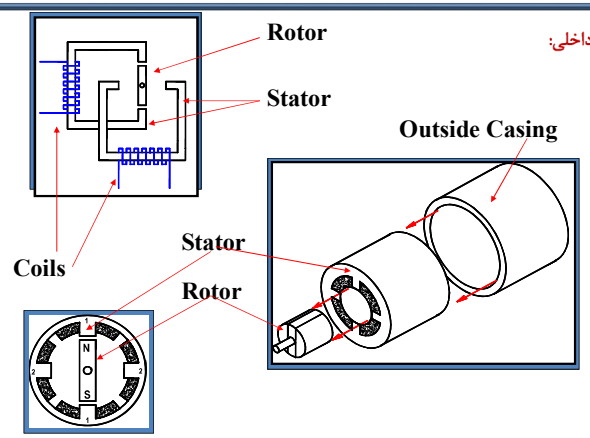
در شکل روبرو که موتور پله ای به صورت شماتیک نشان داده شده است، استاتور دارای دو دسته سیم پیچ است که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته اند. به این صورت ۴ قطب مغناطیسی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به قطب مجاور تشکیل می شود.

هر یک از سیم پیچ ها می توانند دارای جریان (در دو جهت) و یا بدون جریان باشند



عملگرهای گامی

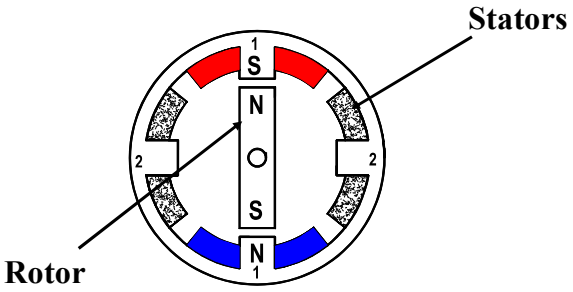
اجزای داخلی:



عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

1. Full Stepping (90 degrees) 2. Half Stepping (45 degrees)

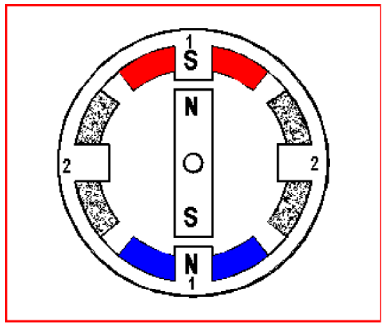


www.t4.ie

عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

1. Full Stepping (90 degrees) 2. Half Stepping (45 degrees)



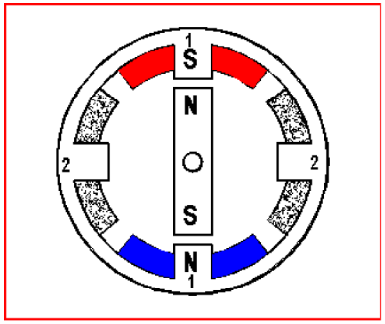
Four Steps per revolution i.e. 90 deg. steps.

www.t4.ie

عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

1. Full Stepping (90 degrees) **2. Half Stepping (45 degrees)**



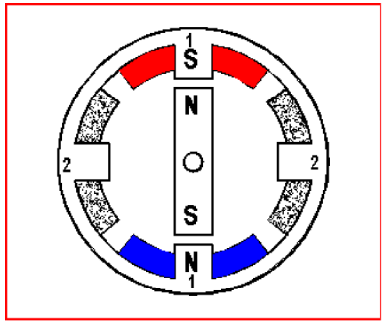
Eight steps per. revolution i.e. 45 deg. steps.

www.t4.ie

عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

1. Full Stepping (90 degrees) **2. Half Stepping (45 degrees)**



Eight steps per. revolution i.e. 45 deg. steps.

www.t4.ie

عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

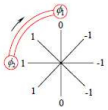
منطق و تغییر جریان در هر دو فاز مشابه است، فقط فاز ۲ به اندازه دو گام از فاز ۱ عقبتر است.

برای ایجاد این ترتیب تنها نیاز به ذخیره سازی ۸ عدد می باشد.

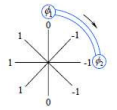
وظیفه انرژی دهی متوالی و به نوبت به فازها و تغییر جریان در سیم پیچ ها بر عهده درایو (Drive) می باشد.

Step No.	ϕ_1	ϕ_2
1	1	1
2	0	1
3	-1	1
4	-1	0
5	-1	-1
6	0	-1
7	1	-1
8	1	0

CCW ↑ CW ↓



For CW rotation



For CCW rotation

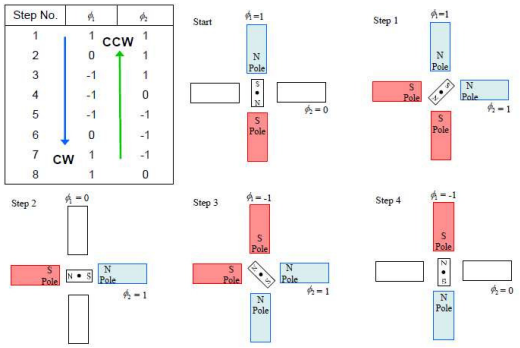
عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

با تغییر مناسب جریان در سیم پیچها در دو فاز استاتور می توان چرخش دلخواه (CW یا CCW) را ایجاد نمود.

Step No.	ϕ_1	ϕ_2
1	1	1
2	0	1
3	-1	1
4	-1	0
5	-1	-1
6	0	-1
7	1	-1
8	1	0

CCW ↑ CW ↓

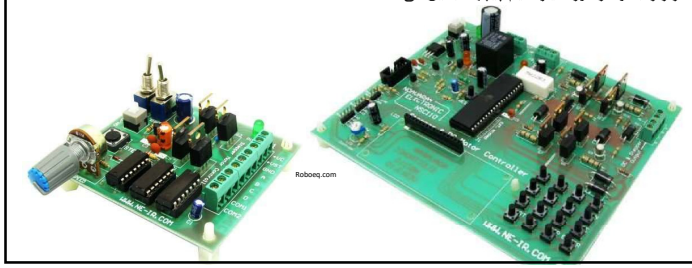


عملگرهای گامی

درایو موتور گامی:

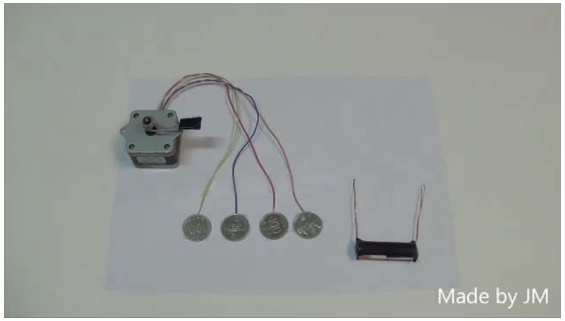
امکان فعال کردن سیم پیچها به وسیله کامپیوتر، میکروکنترلر و PLC موجود می باشد اما رایجترین کار استفاده از یک مدار منطقی است که به آن translator یا indexer و یا به طور کلی درایو می گویند.

کنترلر تعداد و جهت گامهای مورد نیاز را مشخص می کند. ایجادکننده توالی پالس (translator) درخواست کنترلر را به ولتاژ مورد نیاز سیم پیچها تبدیل می کند.



عملگرهای گامی

درایو موتور گامی:

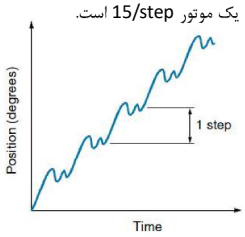


عملگرهای گامی

حالتهای عملکردی:

موتورهای پله ای در دو حالت می توانند کار کنند:

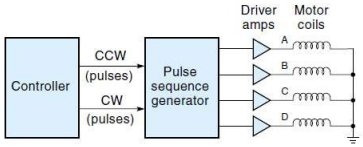
۱- حالت تک گام: در این حالت فرکانس گامها به گونه ای است که امکان توقف بین هر دو گام وجود دارد. مزیت این حالت مستقل بودن هر گام از گام بعدی است که می تواند موتور یا ساکن بماند یا تغییر جهت دهد. در این حالت عملکردی کنترلر موقعیت موتور را گم نخواهد کرد. نرخ معمول سرعت در این حالت ۵ گام در ثانیه است که معادل 12.5 rpm برای یک موتور 15/step است.



عملگرهای گامی

درایو موتور گامی:

موتور حرکت گام به گام خود را با سلسله پالسهای ورودی هماهنگ می کند. کامپیوتر و یا شاخص گذار (Indexer) سیگنالهای پالس مورد نیاز حرکت را ایجاد می کند (قطار پالس موقعیت و قطار پالس جهت). پس از ارسال پالس وظیفه تفسیر و ترجمه پالس ارسالی (تشخیص اینکه کدام فازها باید قطع و یا وصل شود) توسط درایو انجام می شود تا انرژی دهی متوالی به فاز داده شود. با تقویت سیگنال سطح انرژی مورد نیاز برای انرژی دهی به فازها صورت می پذیرد.



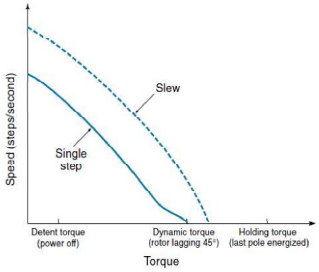
عملگرهای گامی

نمودار سرعت-گشتاور:

گشتاور ضامن(Detent torque): گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر نیروی آهنربا در حالت غیرفعال بودن سیم پیچها.

گشتاور دینامیکی (Dynamic torque): ماکزیمم گشتاور محرک در حالتی که روتور به تبع تغییر میدان مغناطیسی می چرخد.

گشتاور نگهدارنده (Holding torque): حداکثر گشتاوری که در حالت فعال بودن سیم پیچ می توان به روتور اعمال نمود بدون آنکه از حالت توقف خارج شود.

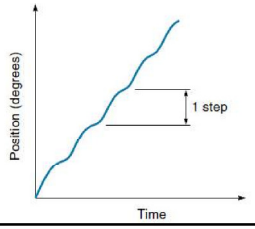


عملگرهای گامی

حالتهای عملکردی:

موتورهای پله ای در دو حالت می توانند کار کنند:

۲- حالت گردش سریع: در این حالت فرکانس موتور به حدی است که امکان توقف بین هر دو گام وجود ندارد. (این حالت شبیه سایر موتورهای الکتریکی است). همانگونه که از شکل مشخص است حالت انتهای هر گام در شکل قابل تشخیص است ولی حرکت هموارتر اتفاق می افتد. در این حالت موتور نمی تواند بلافاصله توقف کند یا تغییر جهت دهد و به خاطر وجود اینرسی معمولاً در چند گام بعد این اتفاق می افتد



عملگرهای گامی

مثال:

گشتاور لازم در هنگام چرخیدن استوانه:

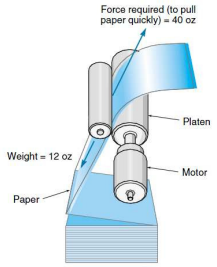
$$\text{Torque} = \text{force} \times \text{radius} = 40\ \text{oz} \times 0.5\ \text{in.} = 20\ \text{in.} \cdot \text{oz}$$

با توجه به اندازه گشتاور دینامیکی موتور، موتور به اندازه کافی توانایی این کار را دارد.
گشتاور لازم در حالت سکون:

$$\text{Torque} = \text{force} \times \text{radius} = 12\ \text{oz} \times 0.5\ \text{in.} = 6\ \text{in} \cdot \text{oz}$$

با توجه به اندازه گشتاور نگهدارنده، در حالت روشن موتور امکان نگهداری کاغذ را دارد ولی در حالت خاموش کاغذ باعث چرخش معکوس موتور می گردد و بنابراین موتور برای این حالت کاربرد ندارد، مگر آنکه از یک ترمز یا چرخ ضامن دار برای جلوگیری از برگشت موتور استفاده شود.

Holding torque:	50 in. · oz
Dynamic torque:	30 in. · oz
Detent torque:	5 in. · oz

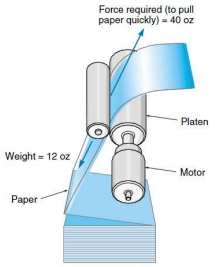


عملگرهای گامی

مثال:

یک موتور پله ای دارای مشخصات روبرو است:

Holding torque:	50 in. · oz
Dynamic torque:	30 in. · oz
Detent torque:	5 in. · oz



این موتور برای چرخاندن یک استوانه به قطر 1 in به کار می رود. نیروی لازم برای کشیدن کاغذ بیشتر از 40 oz. نمی باشد. وزن کاغذ نیز برابر 12 oz. می باشد. آیا این موتور قادر به استفاده در این کاربرد می باشد؟

1 oz.in= 0.0071 N.m

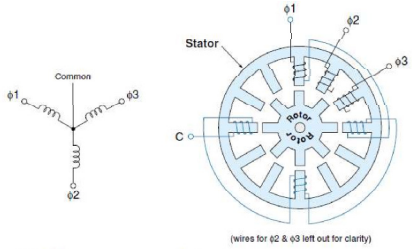
عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

در این نوع موتور به جای استفاده از آهنربا در روتور از آهن نرم برای ساخت روتور استفاده شده است.

حسن استفاده از آهن نرم به جای آهنربا امکان ساخت روتور به هر شکل دلخواه می باشد.

وجود آهن در روتور باعث می شود که با فعال شدن هر سیم پیچ دندانه های روتور به سمت سیم پیچ فعال شده جذب شود (ولی نه با همان نیرو در موتورهای آهنربا دائم)



(a) Symbol (b) Construction

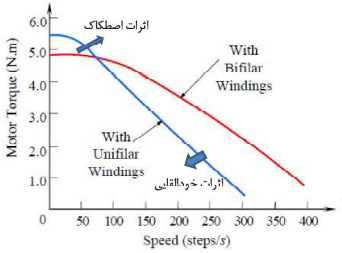
عملگرهای گامی

معکوس کردن قطبیت:

در همه موتورهای پله ای استاتور شامل سیم پیچ هایی است که می توان بگونه ای محل قطبهای S و N را تغییر داد. این کار به دو شیوه صورت می گیرد:

۱- با معکوس کردن جهت جریان (Unifilar winding): در این حالت فقط یک دسته سیم پیچ برای هر قطب وجود دارد و نیاز به سیستم راه انداز پیچیده تری است.

۲- با عوض کردن سیم پیچ در سیم پیچهای دورشته ای (Bifilar winding): با قرار دادن یک جفت سیم پیچ به شکلی که هر یک از آنها وقتی انرژی به آن داده شود، قطبهایی مخالف سیم پیچ دیگر ایجاد می کنند. حسن این روش این است که تنها با بکارگیری یک on/off ساده می توان به هدف مورد نظر رسید.

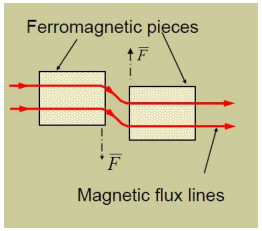


عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

قاعده هم تراز شدن:

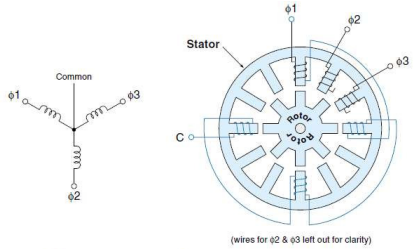
Pieces of highly permeable materials such as iron, situated in an ambient medium of low permeability such as air in which magnetic field is established, experience mechanical forces that tend to align them in such a way to minimize the reluctance of the system.



عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

این دسته از موتورها دارای سه یا چهار فاز هستند. موتور نشان داده شده در شکل دارای ۱۲ قطب میدان است. هر مدار ۴ سیم پیچ را فعال می کند.



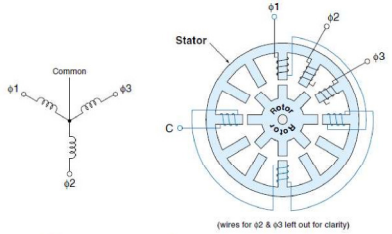
(a) Symbol (b) Construction

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

این دسته از موتورها دارای سه یا چهار فاز هستند. موتور نشان داده شده در شکل دارای ۱۲ قطب میدان است. هر مدار ۴ سیم پیچ را فعال می کند.

قابل توجه است که روتور دارای ۸ دندانه و استاتور دارای ۱۲ دندانه است. تعداد دندانه های روتور نبایستی با تعداد دندانه های ستاتور یک به یک باشد. چرا که امکان ایجاد نیروی کششی به وجود نمی آید.

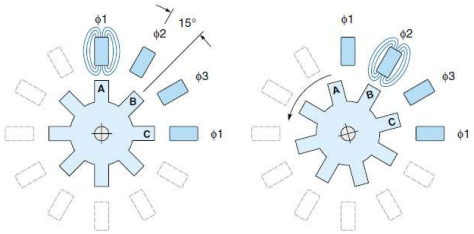


(a) Symbol (b) Construction

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

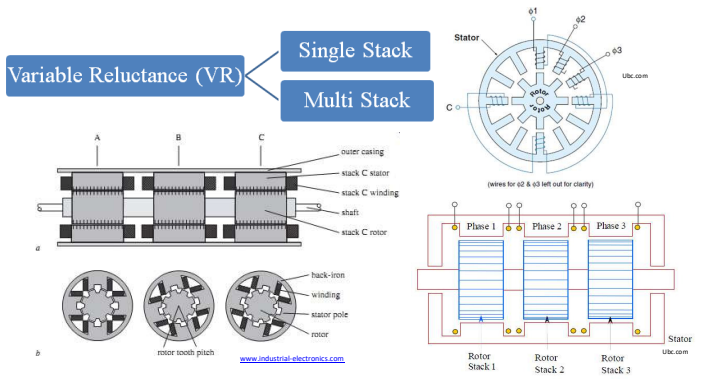
با فعال نمودن سیم پیچ $\varphi 1$ روتور در حالت نشان داده شده در شکل a قرار می گیرد. پس از آن با فعال نمودن سیم پیچ $\varphi 2$ روتور ۱۵ درجه می چرخد و به شکل b در می آید.



(a) Pole Ø1 energized (b) Pole Ø2 energized

عملگرهای گامی

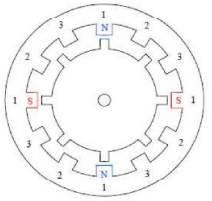
موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):



عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR):

تعداد فاز و تعداد قطب



- Three phases of winding
  - ➡ p = 3
- Eight rotor teeth
  - ➡ $n_r = 8$
- Twelve stator teeth
  - ➡ $n_s = 12$

Stator pitch $\theta_s = \frac{360^\circ}{n_s}$ Rotor pitch $\theta_r = \frac{360^\circ}{n_r}$

For one-phase-on excitation $\Delta\theta = \theta_r - r\theta_s$ $(\text{for } \theta_r > \theta_s)$

$\Delta\theta = \theta_s - r\theta_r$ $(\text{for } \theta_s > \theta_r)$

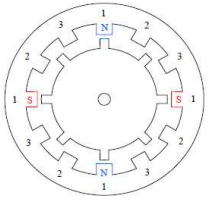
where r is the largest positive integer such that $\Delta\theta$ is positive

Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR):

تعداد فاز و تعداد قطب



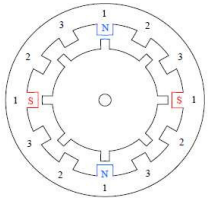
- Three phases of winding
  - ➡ p = 3
- Eight rotor teeth
  - ➡ $n_r = 8$
- Twelve stator teeth
  - ➡ $n_s = 12$

For our example $\theta_r = \frac{360^\circ}{8} = 45^\circ$ $\theta_s = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$ $\Delta\theta = 15^\circ$

Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)



نحوه چرخش موتور با فعال شدن فازها:

- If phase 1 is turned off and phase 2 is turned on, the rotor will turn 15° CCW
- If phase 3 is turned on instead of phase 2, the rotor will turn 15° CW
- If phase 2 is turned on while phase 1 is on, the rotor will turn 7.5° CCW

Full Stepping	CCW	1-2-3-1
	CW	1-3-2-1
Half Stepping	CCW	1-12-2-23-3-31-1
	CW	1-31-3-23-2-12-1

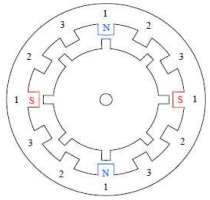
Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

در حالت **Full Stepping**، اگر تعداد فازها برابر **p** باشد، بعد از انرژی دهی به ترتیب همه فازها، زاویه طی شده برابر است با:

$$\theta_r = p.\Delta\theta$$



در مثال روبرو:

$$\Delta\theta = 15^\circ$$

از جایگذاری روابط داریم:

$$\theta_r = r\theta_s + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_r > \theta_s) \qquad \theta_s = r\theta_r + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_s > \theta_r)$$

Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

از جایگذاری روابط داریم:

$$\theta_r = r\theta_s + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_r > \theta_s) \qquad \theta_s = r\theta_r + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_s > \theta_r)$$

روابط فوق نشان می دهد که دندانه های روتور و استاتور هیچگاه نبایستی با هم همراستا شوند، زیرا عامل ایجاد نیروی مورد نیاز برای چرخاندن روتور انحراف دسته ای از دندانه های روتور است.

Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

$$\theta_r = r\theta_s + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_r > \theta_s) \qquad \theta_s = r\theta_r + \frac{\theta_r}{p} \quad (\text{for } \theta_s > \theta_r)$$

$$\text{Stator pitch } \theta_s = \frac{360^\circ}{n_s} \qquad \text{Rotor pitch } \theta_r = \frac{360^\circ}{n_r}$$

$$\frac{360^\circ}{n_r} = r\frac{360^\circ}{n_s} + \frac{360^\circ}{pn_r} \quad (\text{for } \theta_r > \theta_s)$$

$$n_s = rn_r + \frac{n_s}{p} \quad (\text{for } n_s > n_r)$$

$$n_r = rn_s + \frac{n_s}{p} \quad (\text{for } n_r > n_s)$$

Number of steps per revolution

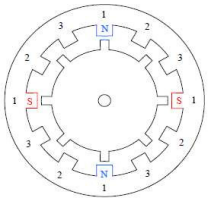
$$n = \frac{360^\circ}{\Delta\theta}$$

Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

در مثال روبرو بر اساس روابط استخراج شده داریم:



n_s = 12 and p = 3

$$12 = rn_r + \frac{12}{3}$$

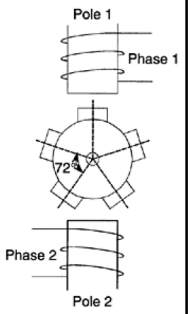
$$rn_r = 8$$

Ubc.com

عملگرهای گامی

مثال:

Consider a stepper motor with n_r=5, n_s=2, and p=2. A schematic representation is given in Figure.



In this case, θr=360°/5=72° and θs=360°/2=180°. Δθ=180°-r×72°. Here, the largest feasible value for r is 2, which corresponds to a step angle of Δθ =180°-2×72°=36°. This is further confirmed by another equation, which gives Δθ =72°/2=36°.

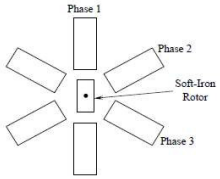
unstable equilibrium position

Mechatronics: An integrated approach, D.Silva

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

مثال: هدف در اینجا تعیین زاویه گام موتور پله ای روبرو است؛



$$\theta_s = \frac{360^\circ}{n_s} = 60^\circ \qquad \theta_r = \frac{360^\circ}{n_r} = 180^\circ$$

$$\Delta\theta = 180 - r60$$

$$r = 2$$

$$\Delta\theta = 60$$

$$\text{Also, } \Delta\theta = \frac{\theta_r}{p} = \frac{180^\circ}{3} = 60^\circ$$

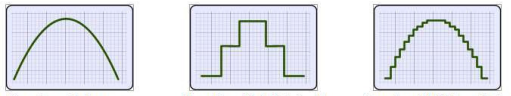
Ubc.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

Microstepping:

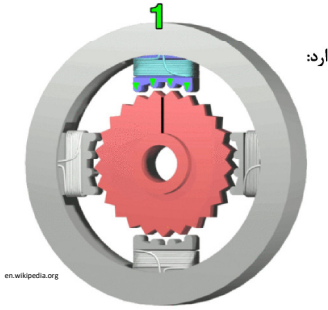
با ایجاد تغییرات مناسب در میزان جریان فازها (به جای تغییرات پالسی روشن و خاموش) می توان به گامهای ریزتر دست پیدا کرد.



عملگرهای گامی

دستیابی به زاویه گام کوچکتر با قطب دندانه دار:

به دلیل محدودیت در افزایش تعداد قطب بر روی استاتور و تعداد دندانه های رتور، برای کاهش زاویه گام از این روش استفاده می شود.



استفاده از قطب دندانه دار (Toothed pole) دو مزیت دارد:

۱- بهبود رزولوشن حرکت

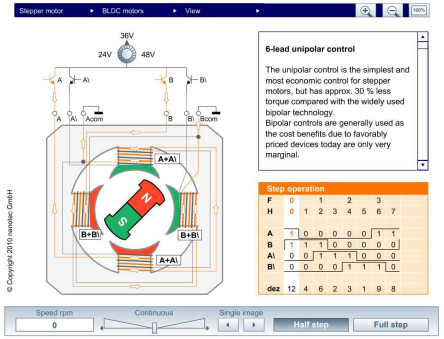
۲- بهبود تمرکز میدان مغناطیسی

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

معرفی سایت:

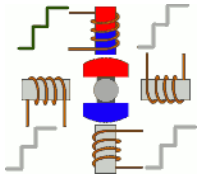
http://en.nanotec.com/main_en.swf



عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

Microstepping:



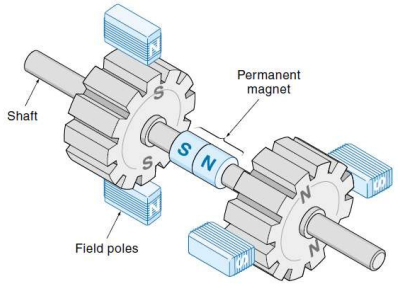
زاویه گام در این حالت یکسان نمی باشد زیرا میدان مغناطیسی با جریان رابطه خطی ندارد.

www.ecbheaven.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای هیبرید:

The **hybrid stepper motor** combines the features of the PM and VR stepper motors and is the type in most common use today. The rotor is toothed, which allows for very small step angles (typically 1.8°), and it has a permanent magnet providing a small detent torque even when the power is off.

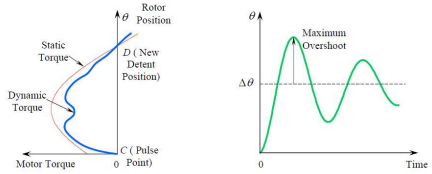


Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

عملگرهای گامی

مشخصه های گشتاور موتور:

- Consider a response of a stepper motor to a single pulse. Ideally the stepper motor should instantaneously start, rotate, and instantaneously come to a stop



- Pulse is applied at C and the corresponding winding is energized (single phase). Torque is generated, rotor turns to the detent position (minimum reluctance)
- This is the static torque – In normal operations, a finite time is needed for current to build up - mutual and self inductions, eddy currents – Dynamic Torque
- There are oscillations at D due to its kinetic energy (velocity) at that position
- For stepper analysis we assume the static torque curve

www.ubc.com

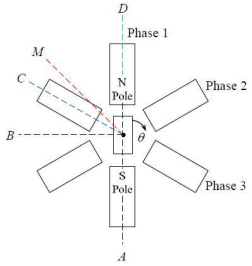
عملگرهای گامی

مشخصه های گشتاور موتور:

Suppose that we turn the rotor clockwise from this stable equilibrium position, using an external rotating mechanism (e.g., by hand). At position C, which is the previous detent position where Phase 1 would have been energized under normal operation, there is a positive torque that tries to turn the rotor to its present detent position D.

At position B, the static torque is zero, because the force from the N pole of Phase 1 exactly balances that from the S pole. This point, however, is an unstable equilibrium position.

The maximum static torque occurs at position M, which is located approximately halfway between positions B and D.

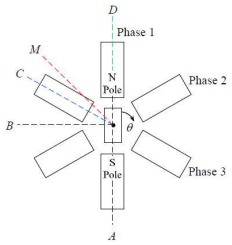


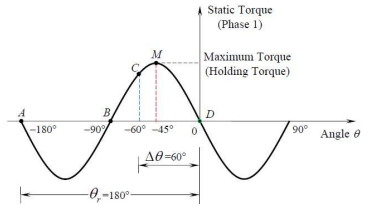
عملگرهای گامی

مشخصه های گشتاور موتور:

- The torque curve can be considered sinusoidal

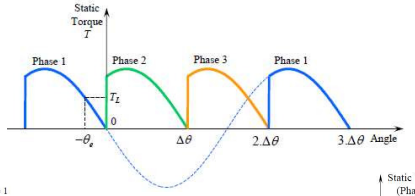
$$T_1 = -T_{\max} \sin n_r \theta$$

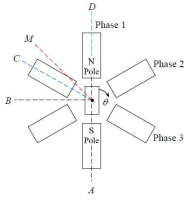


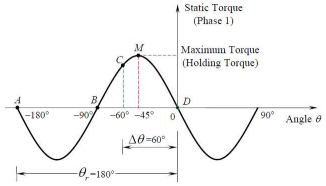


عملگرهای گامی

مشخصه های گشتاور موتور:

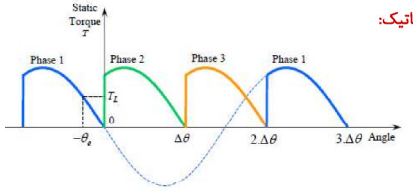


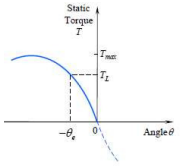




عملگرهای گامی

خطای موقعیت استاتیک:





$$T = -T_{\max} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{p \cdot \Delta\theta}\right) \qquad T_L = -T_{\max} \sin\left[\frac{2\pi(-\theta_e)}{p \cdot \Delta\theta}\right]$$

$$\theta_e = \frac{p \cdot \Delta\theta}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{T_L}{T_{\max}}\right) \qquad \theta_e = \frac{p}{n} \sin^{-1}\left(\frac{T_L}{T_{\max}}\right)$$

عملگرهای گامی

مثال:

Consider a three-phase stepping motor with seventy-two steps per revolution. If the static load torque is 10% of the maximum static torque of the motor, determine the static position error.

$$\frac{T_L}{T_{\max}} = 0.1, \quad p = 3, \quad n = 72$$

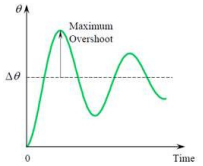
$$\theta_e = \frac{3}{72}\sin^{-1} 0.1 = 0.0042 \text{ rad} = 0.24°$$

Note that this is less than 5% of the step angle.

عملگرهای گامی

استهلاک در موتورهای گامی:

- Damping of stepper motors to suppress overshoot and reduce settling time can be achieved in several ways.
- Straightforward conventional techniques are mechanical and electrical damping
  - Mechanical damping – torsional damper attached to the motor shaft
  - Electrical damping
- Electronic damping can overcome the shortcomings of above techniques – heat generation and reduction in output torque



عملگرهای گامی

استهلاک مکانیکی در موتورهای گامی

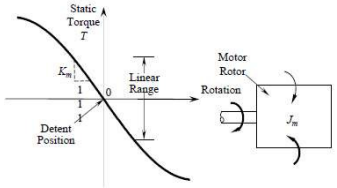
معادله حاکم بر موتور بدون مستهلک کننده خارجی:

$$T = -K_m\theta$$

$$J_m\frac{d\omega}{dt} = -C_m\omega - K_m\theta$$

$$J_m\ddot{\theta} + C_m\dot{\theta} + K_m\theta = 0$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_m}{J_m}} \qquad \zeta = \frac{C_m}{2\sqrt{K_m J_m}}$$

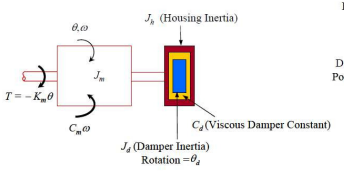


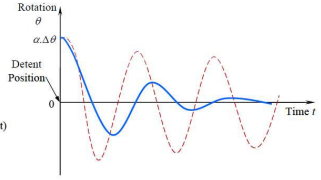
عملگرهای گامی

استهلاک مکانیکی در موتورهای گامی

معادله حاکم بر موتور با اضافه شدن مستهلک کننده خارجی:

A stepper motor with a Houdaille damper:





$$(J_m + J_h)\ddot{\theta} = -C_m\dot{\theta} - K_m\theta - C_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d)$$

$$J_d\ddot{\theta}_d = C_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d)$$

A Lanchester damper is similar to a Houdaille damper except that the former depends on nonlinear (Coulomb) friction instead of viscous damping.

عملگرهای گامی

استهلاک الکتریکی در موتورهای گامی

These direct techniques of damping have undesirable side effects, such as excessive **heat generation**, **reduction of the net output torque** of the motor, and **decreased speed of response**. **Electronic damping** methods have been developed to overcome such shortcomings.

Three common methods:

1.The pulse turn-off method: Turn off the motor (all phases) for a short time.

2.The pulse reversal method: Apply a pulse in the opposite direction (i.e., energize the reverse phase) for a short time.

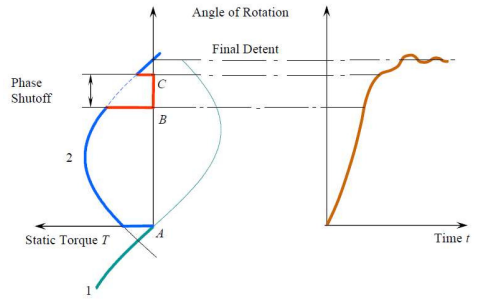
3.The pulse delay method: Maintain the present phase beyond its detent position for a short time.

www.ubc.com

عملگرهای گامی

استهلاک الکتریکی در موتورهای گامی

1.The pulse turn-off method: Turn off the motor (all phases) for a short time.

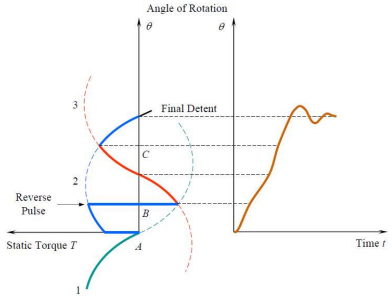


www.ubc.com

عملگرهای گامی

استهلاک الکتریکی در موتورهای گامی

2.The pulse reversal method: Apply a pulse in the opposite direction (i.e., energize the reverse phase) for a short time.

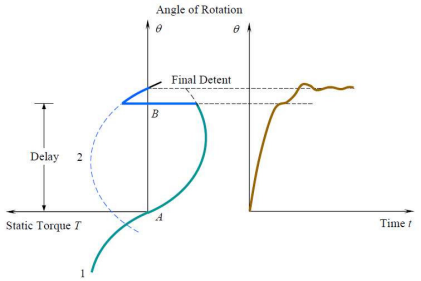


www.ubc.com

عملگرهای گامی

استهلاک الکتریکی در موتورهای گامی

3.The pulse delay method: Maintain the present phase beyond its detent position for a short time.



www.ubc.com

عملگرهای گامی

انتخاب موتورهای گامی

- Selection of a stepper motor for a particular application depends on the torque and speed consideration and geometric properties.

- ***Step 1:*** List the main requirements for the particular application – speed, acceleration, accuracy, resolution, load characteristics
- ***Step 2:*** Compute the operating torque and stepping rate requirements for the particular application

$$T = T_R + J_{eq}\frac{\omega_{\max}}{\Delta t}$$

T_R = net resistance torque
J_{eq} = equivalent moment of inertia (including rotor, load, gearing, dampers, etc.)
$\omega_{\max}$= maximum operating speed
Δt = time taken to accelerate the load to the maximum speed, starting from rest

عملگرهای گامی

انتخاب موتورهای گامی

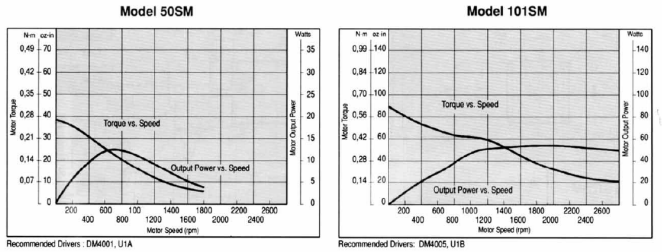
- ***Step 3:*** Using the torque versus stepping rate curves (pull-out curves) for a group of commercially available stepper motors, select a suitable stepper motor.
- ***Step 4:*** If a stepper motor that meets the requirements is not available, modify the basic design.

- The most important information in selecting a stepper motor is the torque versus stepping rate curve.

عملگرهای گامی

انتخاب موتورهای گامی

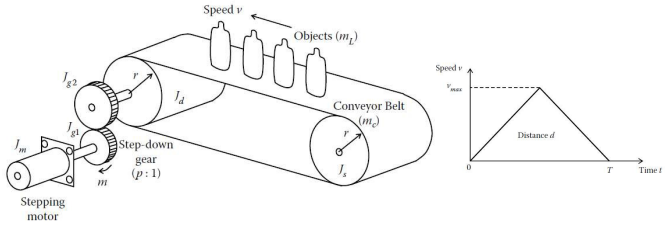
- The most important information in selecting a stepper motor is the torque versus stepping rate curve.



عملگرهای گامی

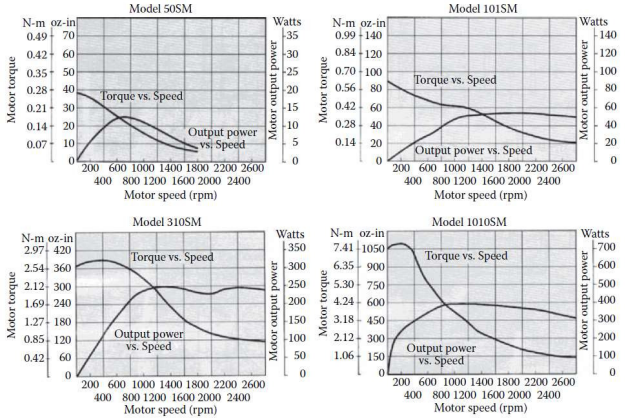
مثال:

A schematic diagram of an industrial conveyor unit is shown in the figure. In this application, the conveyor moves intermittently at a fixed rate, thereby indexing the objects on the conveyor through a fixed distance d in each time period T. A triangular speed profile is used for each motion interval, having an acceleration and a deceleration that are equal in magnitude. The conveyor is driven by a stepper motor. A gear unit with step-down speed ratio p:1, where p >1, may be used if necessary, as shown in the figure.



عملگرهای گامی

مثال:



عملگرهای گامی

مثال:

Stepper Motor Data

Model		50SM	101SM	310SM	1010SM
NEMA Motor frame size		23		34	42
Full step angle	degrees		1.8		
Accuracy	percent		±3 (noncumulative)		
Holding torque	oz-in	38	90	370	1050
	N-m	0.27	0.64	2.61	7.42
Detent torque	oz-in	6	18	25	20
	N-m	0.04	0.13	0.18	0.14
Rated phase current	Amps	1	5	6	8.6
Rotor inertia	oz-in-sec^2	1.66×10^{-3}	5×10^{-3}	26.5×10^{-3}	114×10^{-3}
	kg-m^2	11.8×10^{-6}	35×10^{-6}	187×10^{-6}	805×10^{-6}
Maximum radial load	lb	15		35	40
	N	67		156	178
Maximum thrust load	lb	25		60	125
	N	111		267	556
Weight	lb	1.4	2.8	7.8	20
	kg	0.6	1.3	3.5	9.1
Operating temperature	°C		−55 to +50		
Storage temperature	°C		−55 to +130		

Source: Aerotech, Inc. With permission.

عملگرهای گامی

مثال:

a. Explain why the equivalent moment of inertia J_e at the motor shaft, for the overall system, is given by:

$$J_e = J_m + J_{g1} + (V/p^2)(J_{g2} + J_d + J_s) + (r^2/p^2)(m_c + m_L)$$

where J_m, J_{g1}, J_{g2}, J_d, and J_s are the moments of inertia of the motor rotor, drive gear, driven gear, drive cylinder of the conveyor, and the driven cylinder of the conveyor, respectively; m_c and m_L are the overall masses of the conveyor belt and the moved objects (load), respectively; and r is the radius of each of the two conveyor cylinders.

b. Four models of stepping motor are available for the application. Their specifications are given in Table 12.2 and the corresponding performance curves are given in Figure 12.16. The following values are known for the system:

$d = 10$ cm, $T = 0.2$ seconds, $r = 10$ cm, $m_c = 5$ kg, $m_L = 5$ kg, $J_d = J_s = 2.0\times10^{-3}$ kg m^2.

Also two gear units with $p = 2$ and 3 are available, and for each unit $J_{g1} = 50\times10^{-6}$ kg m^2 and $J_{g2} = 200\times10^{-6}$ kg m^2.

Indicating all calculations and procedures, select a suitable motor unit for this application. You must not use a gear unit unless it is necessary to have one with the available motors.

What is the positioning resolution of the conveyor (rectilinear) for the final system?

Note: Assume an overall system efficiency of 80% regardless of whether a gear unit is used.

عملگرهای گامی

حل مثال:

Angular speed of the motor and drive gear $= \omega_m$.
Angular speed of the driven gear and conveyor cylinders $= (\omega_m/p)$.
Rectilinear speed of the conveyor and objects $v = (r\omega_m/p)$.

$$KE = \frac{1}{2}(J_m + J_{g1})\omega_m^2 + \frac{1}{2}(J_{g2} + J_d + J_s)\left(\frac{\omega_m}{p}\right)^2 + \frac{1}{2}(m_c + m_L)\left(\frac{r\omega_m}{p}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2}\left[J_m + J_{g1} + \frac{1}{p^2}(J_{g2} + J_d + J_s) + \frac{r^2}{p^2}(m_c + m_L)\right]\omega_m^2$$

$$= \frac{1}{2}J_e\omega_m^2$$

$$J_e = J_m + J_{g1} + \frac{1}{p^2}(J_{g2} + J_d + J_s) + \frac{r^2}{p^2}(m_c + m_L)$$

مثال:

Area of the speed profile is equal to the distance travelled. Hence:

$$d = \frac{1}{2} v_{max} T$$

Substitute numerical values: $0.1 = \frac{1}{2} v_{max} 0.2 \rightarrow v_{max} = 1.0$ m/s

The acceleration/deceleration of the system: $a = \frac{v_{max}}{T/2} = \frac{1.0}{0.2/2}$ m/s^2 $= 10.0$ m/s^2

Corresponding angular acceleration/deceleration of the motor:

$$\alpha = \frac{pa}{r}$$

مثال:

With an overall system efficiency of η, the motor torque T_m that is needed to accelerate/decelerate the system is given by:

$$\eta T_m = J_e \alpha = J_e \frac{pa}{r} = [J_m + J_{g1} + \frac{1}{p^2}(J_{g2} + J_d + J_s) + \frac{r^2}{p^2}(m_c + m_L)]\frac{pa}{r}$$

Maximum speed of the motor: $\omega_{max} = \frac{p v_{max}}{r}$

Without gears ($p = 1$) we have

$$\eta T_m = [J_m + J_d + J_s + r^2(m_c + m_L)]\frac{a}{r}$$

$$\omega_{max} = \frac{v_{max}}{r}$$

حل مثال:

Case 1: Without Gears

$$0.8T_m = [J_m + 2\times10^{-3} + 2\times10^{-3} + 0.1^2(5+5)]\frac{10}{0.1} \text{ N.m}$$

Or: $T_m = 125.0[J_m + 0.104]$ N.m

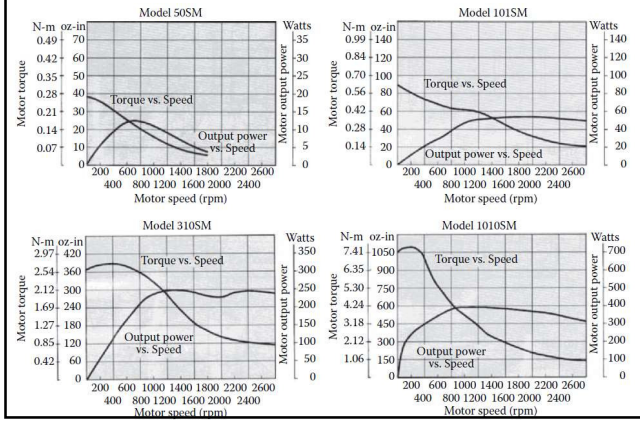
$$\omega_{max} = \frac{1.0}{0.1} \text{ rad/s} = 10 \times \frac{60}{2\pi} \text{ rpm} = 95.5 \text{ rpm}$$

Data for Selecting a Motor without a Gear Unit

Motor Model	Available Torque at ω_{max} (N.m)	Motor Rotor Inertia (kg.m^2)	Required Torque (N.m)
50 SM	0.26	11.8×10^{-6}	13.0
101 SM	0.60	35.0×10^{-6}	13.0
310 SM	2.58	187.0×10^{-6}	13.0
1010 SM	7.41	805.0×10^{-6}	13.1

Data for Selecting a Motor without a Gear Unit

Motor Model	Available Torque at ω_{max} (N.m)	Motor Rotor Inertia (kg.m^2)	Required Torque (N.m)
50 SM	0.26	11.8×10^{-6}	13.0
101 SM	0.60	35.0×10^{-6}	13.0
310 SM	2.58	187.0×10^{-6}	13.0
1010 SM	7.41	805.0×10^{-6}	13.1



عملگرهای گامی

مثال:

With full stepping, step angle of the rotor= 1.8°. Corresponding step in the conveyor motion is the positioning resolution.

With $p=2$ and $r=0.1$ m, the position resolution is $\frac{1.8^\circ}{2}\times\frac{\pi}{180^\circ}\times 0.1 = 1.57\times10^{-3}$ m.

عملگرهای گامی

مثال :

Case 2: With Gears

$$0.8T_m = \left[J_m + 50\times10^{-6} + \frac{1}{p^2}(200\times10^{-6} + 2\times10^{-3} + 2\times10^{-3}) + \frac{0.1^2}{p^2}(5+5)\right]p\times\frac{10}{0.1}\ \text{N.m}$$

$$\rightarrow T_m = 125.0\left[J_m + 50\times10^{-6} + \frac{1}{p^2}\times104.2\times10^{-3}\right]p\ \text{N.m}$$

$$\omega_{max} = \frac{1.0p}{0.1}\ \text{rad/s} = 10p\times\frac{60}{2\pi}\ \text{rpm} \rightarrow \omega_{max} = 95.5p\ \text{rpm}$$

Data for Selecting a Motor with a Gear Unit

Motor Model	Available Torque at ω_{max} (N.m)	Motor Rotor Inertia (kg.m²)	Required Torque (N.m)
50 SM	0.25	11.8×10^{-6}	6.53
101 SM	0.58	35.0×10^{-6}	6.53
310 SM	2.63	187.0×10^{-6}	6.57
1010 SM	7.41	805.0×10^{-6}	6.73