Principles of Mechatronic Systems
مبانی سیستم های مکاترونیکی (جلسه یازدهم)

By: Reza Tikani

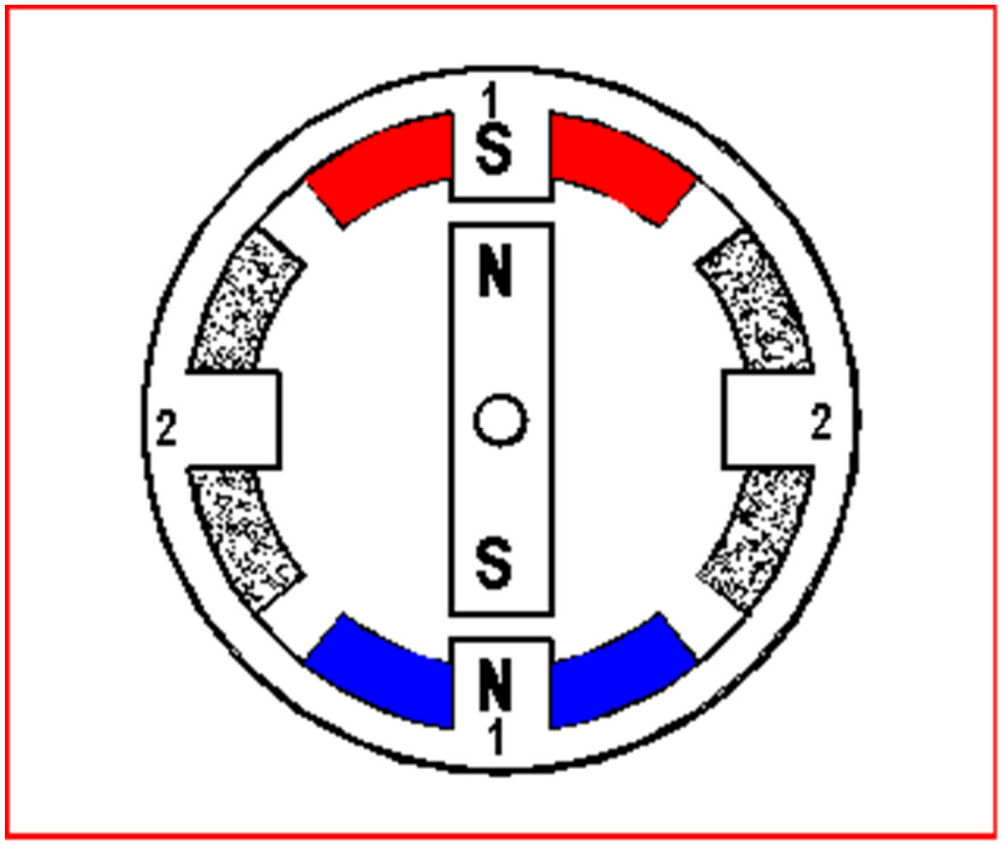
Mechanical Engineering Department

Isfahan University of Technology

عملگرهای گامی

نحوه عملکرد:

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



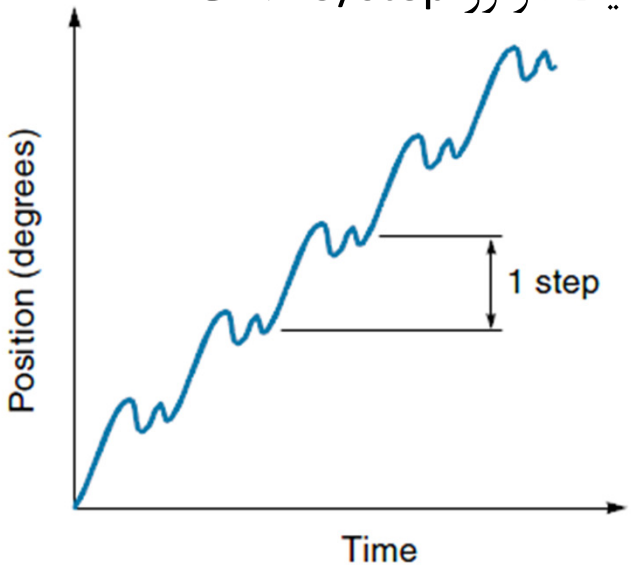
Eight steps per. revolution i.e. 45 deg. steps.

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.



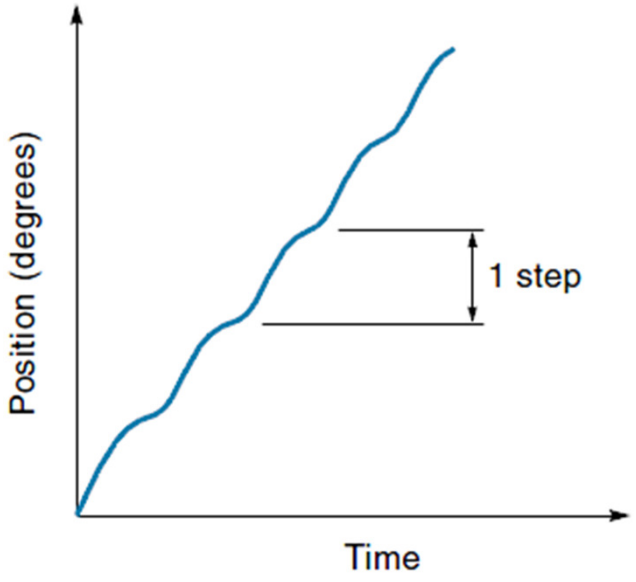
Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

عملگرهای گامی

حالتهای عملکردی:

موتورهای پله ای در دو حالت می توانند کار کنند:

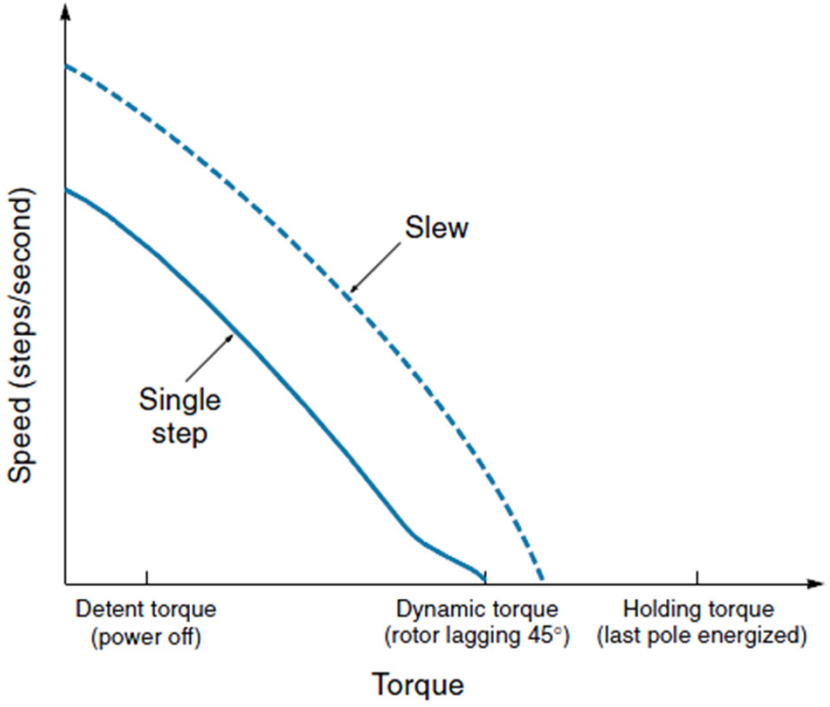
۲- حالت گردش سریع: در این حالت فرکانس موتور به حدی است که امکان توقف بین هر دو گام وجود ندارد. (این حالت شبیه سایر موتورهای الکتریکی است). همانگونه که از شکل مشخص است حالت انتهای هر گام در شکل قابل تشخیص است ولی حرکت هموارتر اتفاق می افتد. در این حالت موتور نمی تواند بلافاصله توقف کند یا تغییر جهت دهد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



Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

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.

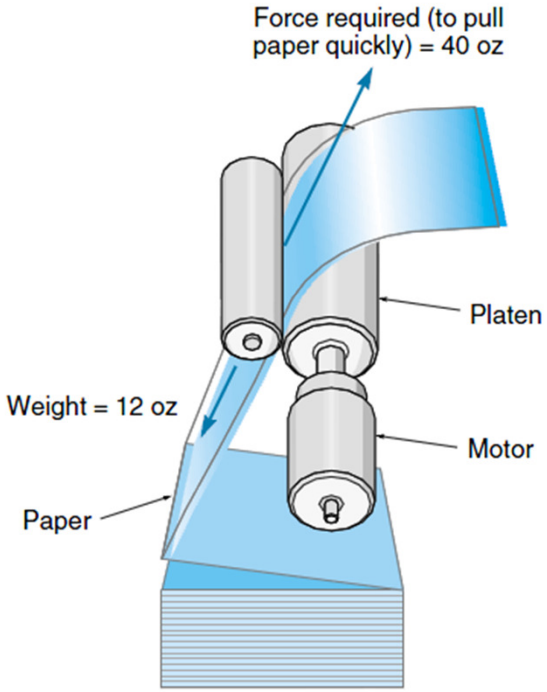
عملگرهای گامی

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

Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

عملگرهای گامی

مثال:

گشتاور لازم در هنگام چرخیدن استوانه:

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

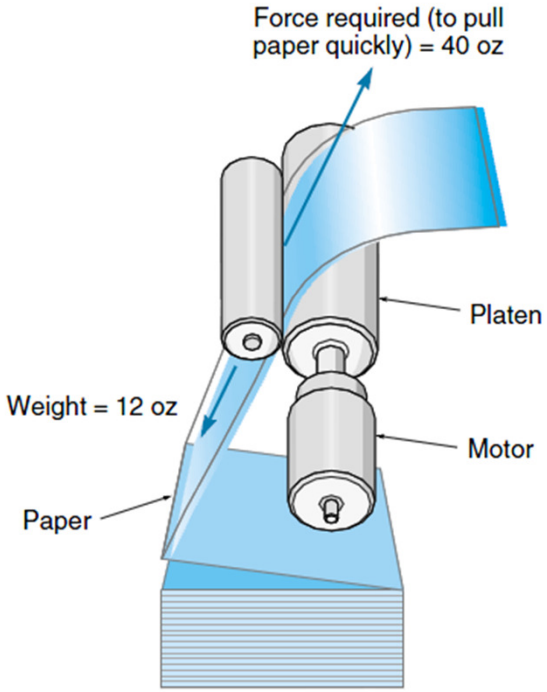
با توجه به اندازه گشتاور دینامیکی موتور، موتور به اندازه کافی توانایی این کار را دارد.

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



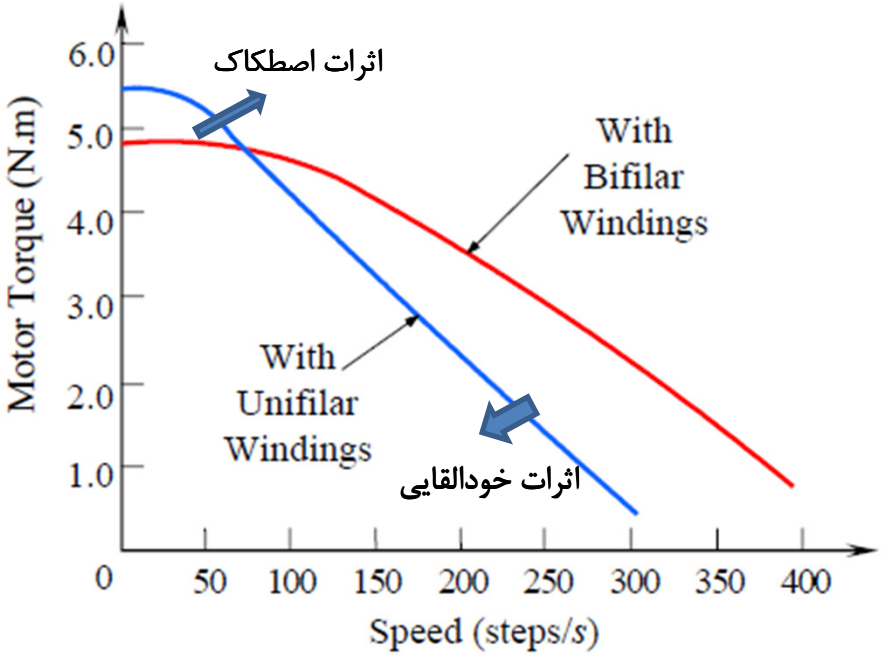
Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

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.

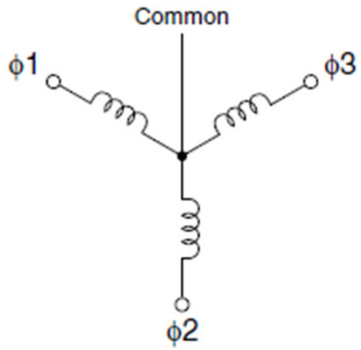
عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

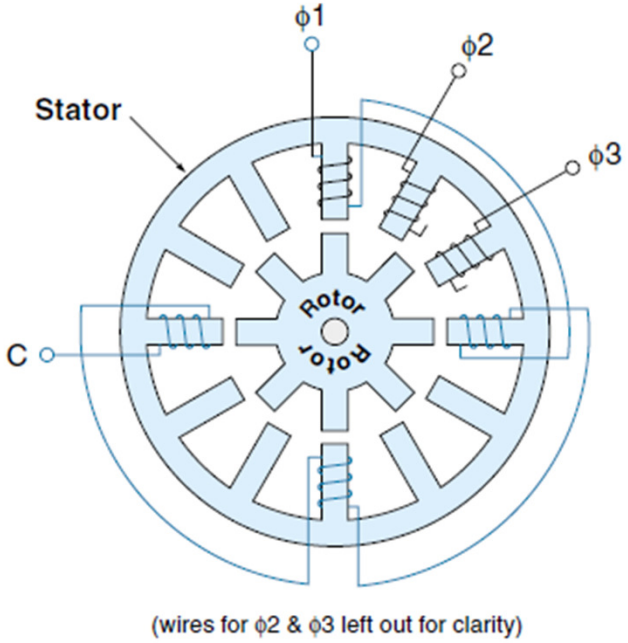
در این نوع موتور به جای استفاده از آهنربا در روتور از آهن نرم برای ساخت روتور استفاده شده است.

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



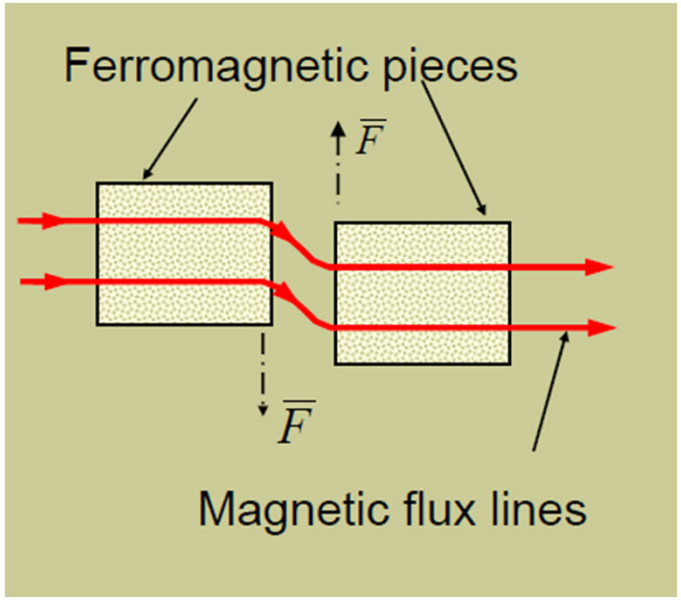
(b) Construction

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):

قاعده هم تراز شدن:

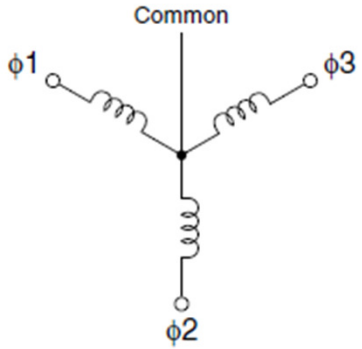
Pieces of highly permeable materials such as iron, situated in an ambient medium of low permeability such as air in which magnetic field is established, experience mechanical forces that tend to align them in such a way to minimize the reluctance of the system.



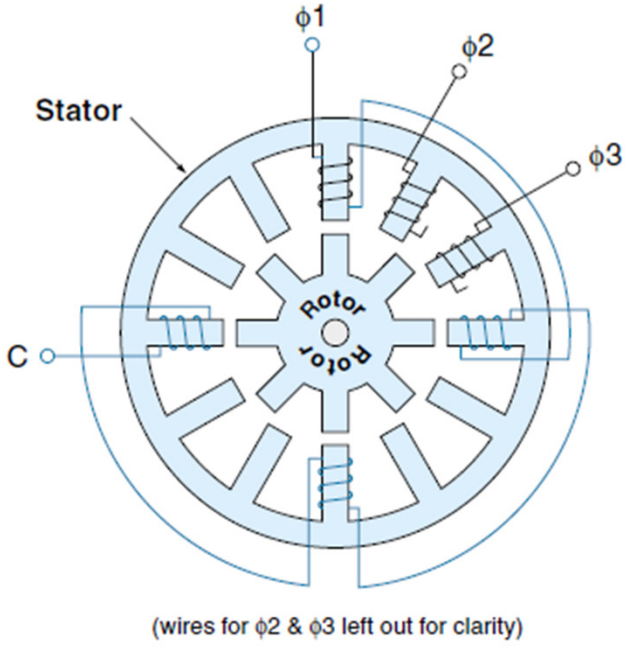
عملگرهای گامی

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



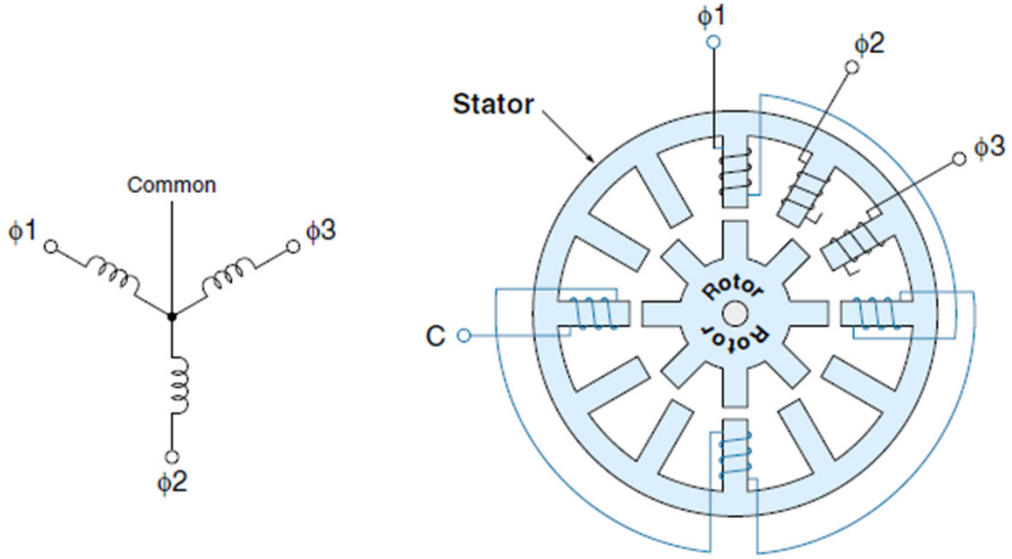
(b) Construction

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 استاتور یک به یک باشد. چرا که امکان ایجاد نیروی کششی به وجود نمی آید.



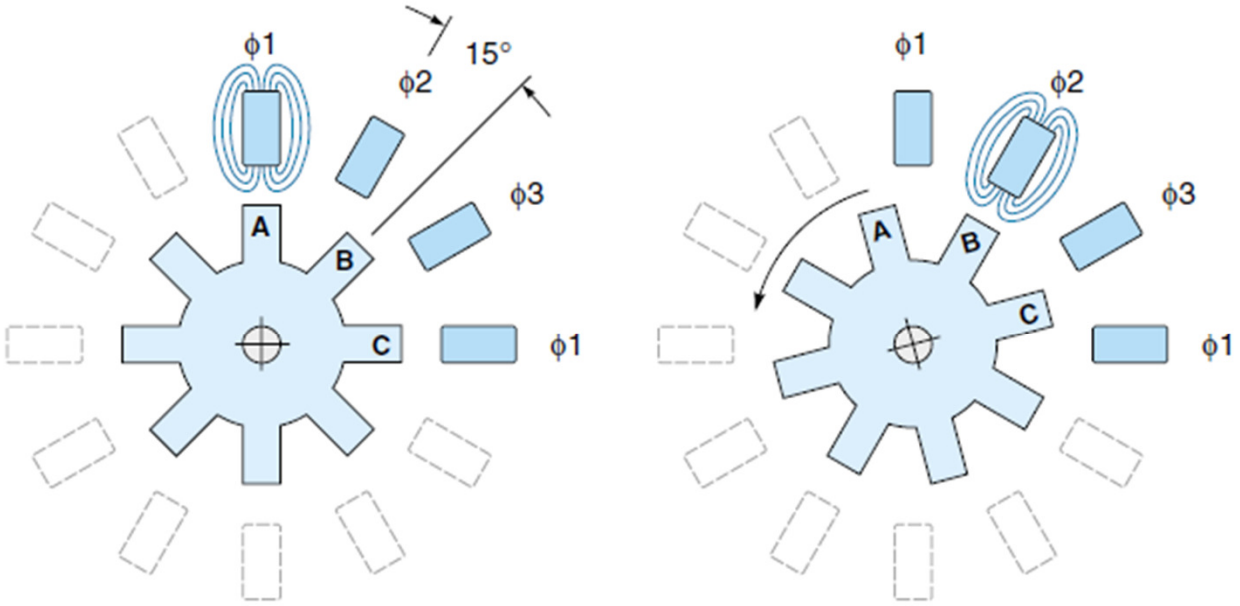
(a) Symbol (b) Construction

Modern Control Technolog: Component and Systems, Kilian

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.

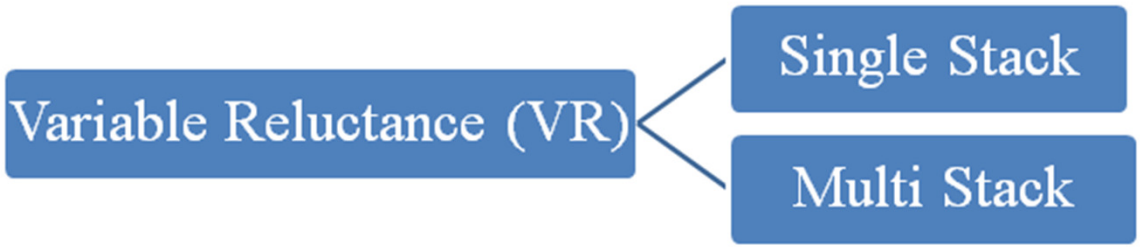


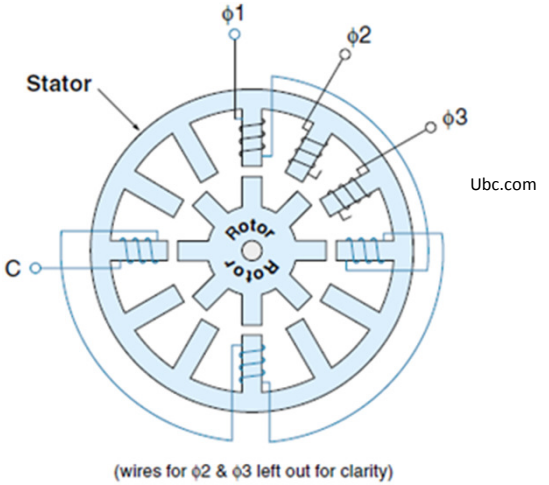
(a) Pole Ø1 energized

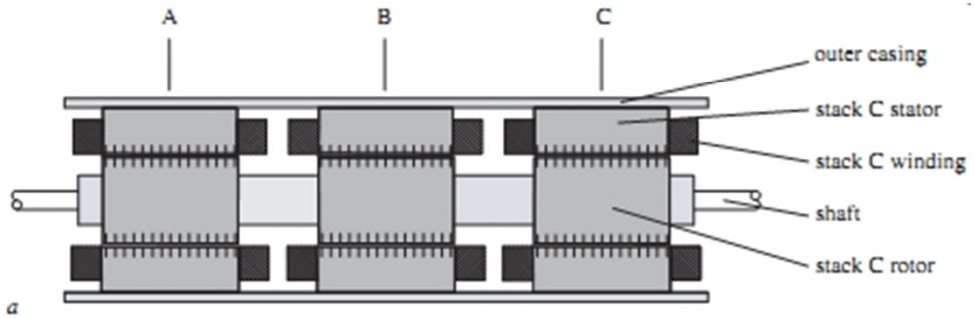
(b) Pole Ø2 energized

عملگرهای گامی

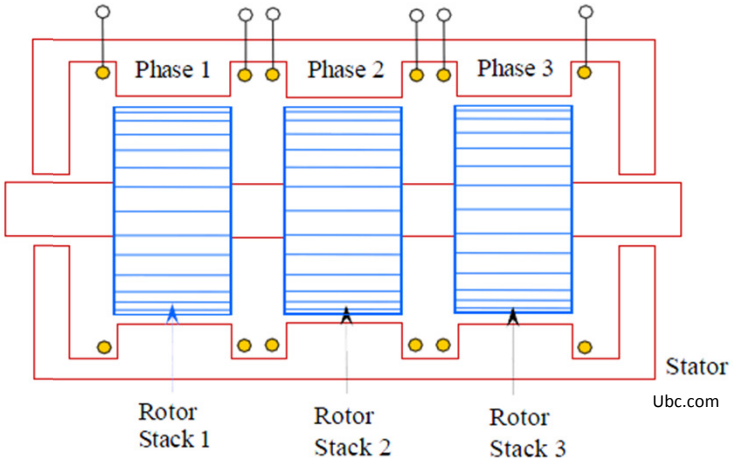
موتور پله ای رلوکتانس متغیر (VR):







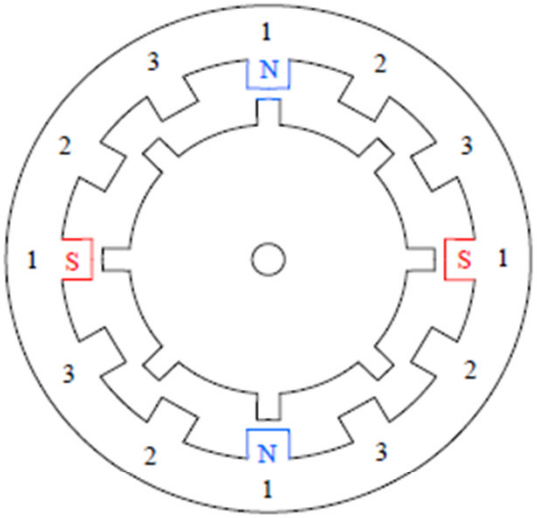
www.industrial-electronics.com



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
  - ➡ $n_s = 12$

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

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

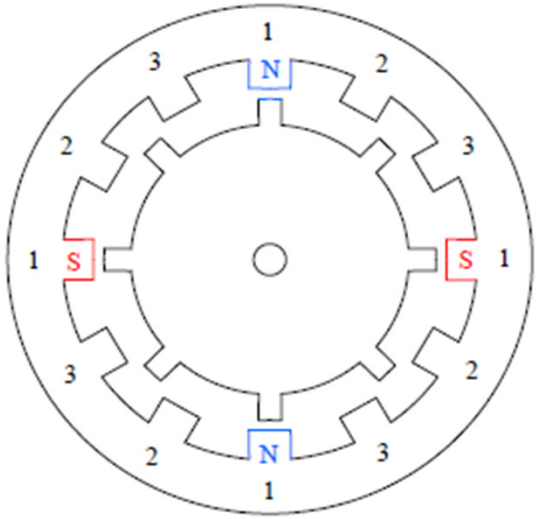
$\Delta\theta = \theta_s - r\theta_r$ $(\text{for } \theta_s > \theta_r)$

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

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR):

تعداد فاز و تعداد قطب

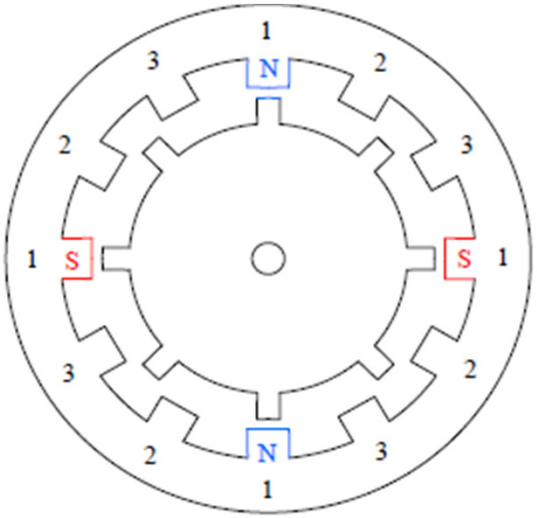


- Three phases of winding
  - ⇨ p = 3
- Eight rotor teeth
  - ⇨ $n_r = 8$
- Twelve stator teeth
  - ⇨ $n_s = 12$

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

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)



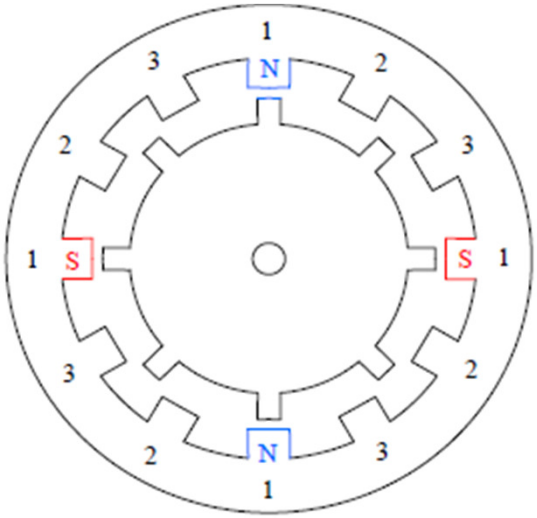
نحوه چرخش موتور با فعال شدن فازها:

- 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

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:

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

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

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.

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

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

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

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

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

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

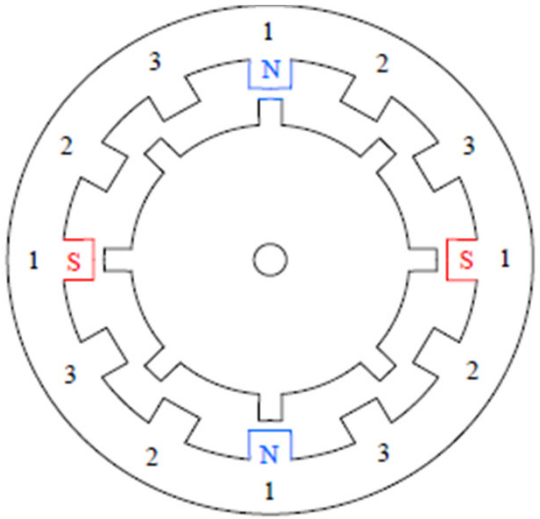
Number of steps per revolution

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

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

در مثال روبرو بر اساس روابط استخراج شده داریم:



$n_s = 12$ and $p = 3$

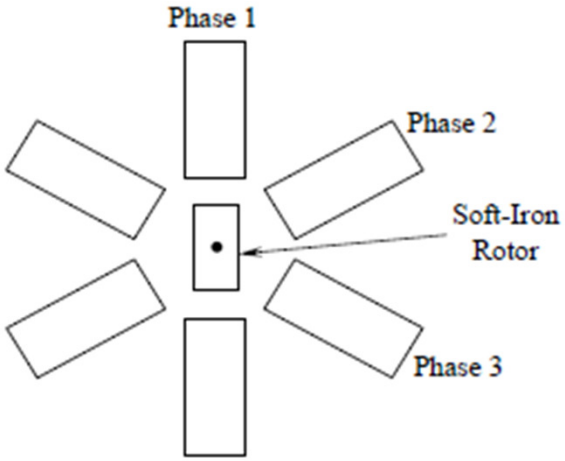
$$12 = rn_r + \frac{12}{3}$$

$$rn_r = 8$$

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

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



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

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

$$r = 2$$

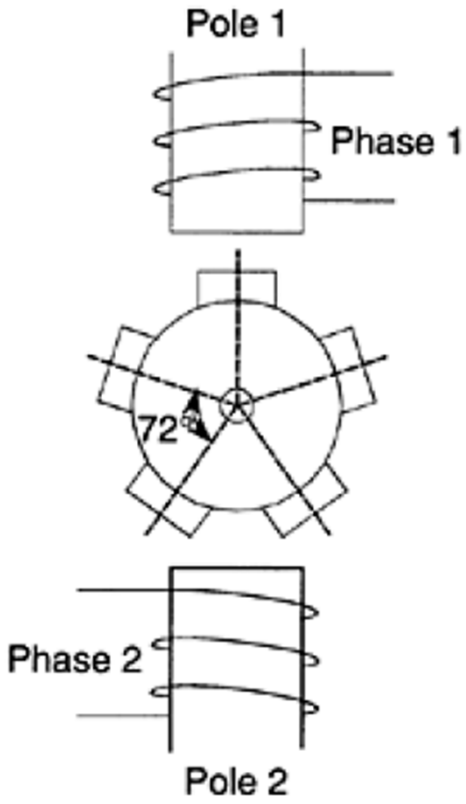
$$\Delta\theta = 60$$

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

عملگرهای گامی

مثال:

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



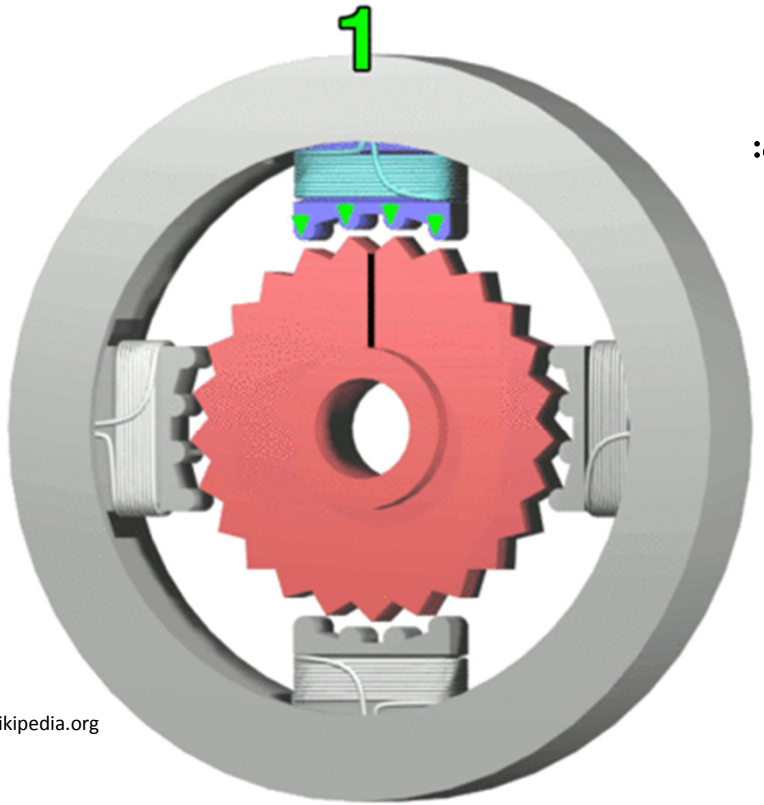
In this case, θr=360°/5=72° and θs=360°/2=180°. Δθ=180°-r×72°. Here, the largest feasible value for r is 2, which corresponds to a step angle of Δθ =180°-2×72°=36°. This is further confirmed by another equation, which gives Δθ =72°/2=36°.

unstable equilibrium position

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.



en.wikipedia.org

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

۱- بهبود رزولوشن حرکت

۲- بهبود تمرکز میدان مغناطیسی

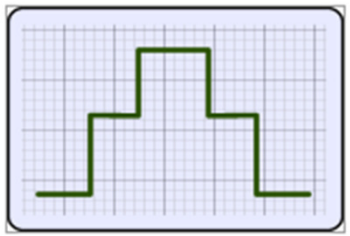
عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

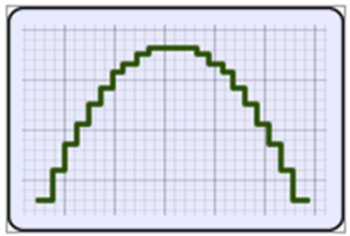
Microstepping:

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

Powering with sine wave



Powering with digital signal

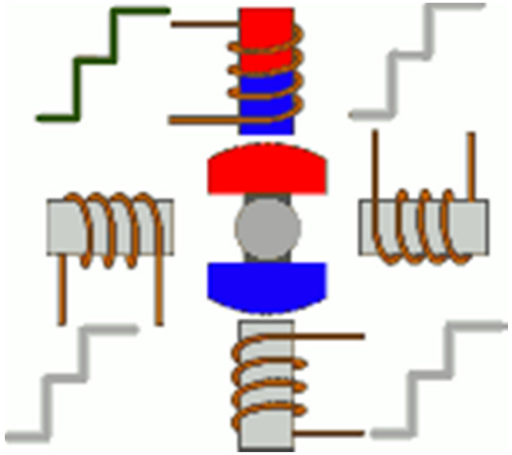


Powering with high resolution digital signal

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.

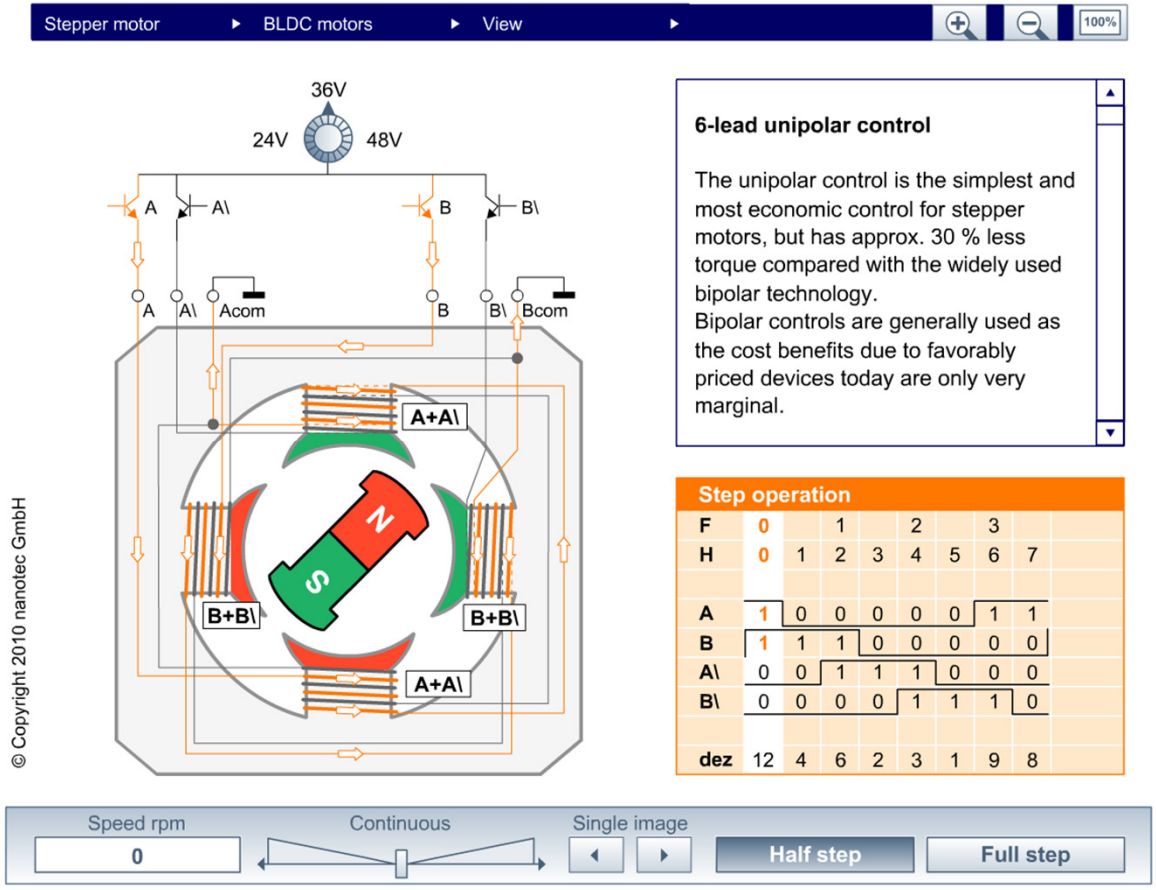
www.pcbheaven.com

عملگرهای گامی

موتور پله ای رلوکتانس متغیر تک قفسه (SSVR)

معرفی سایت:

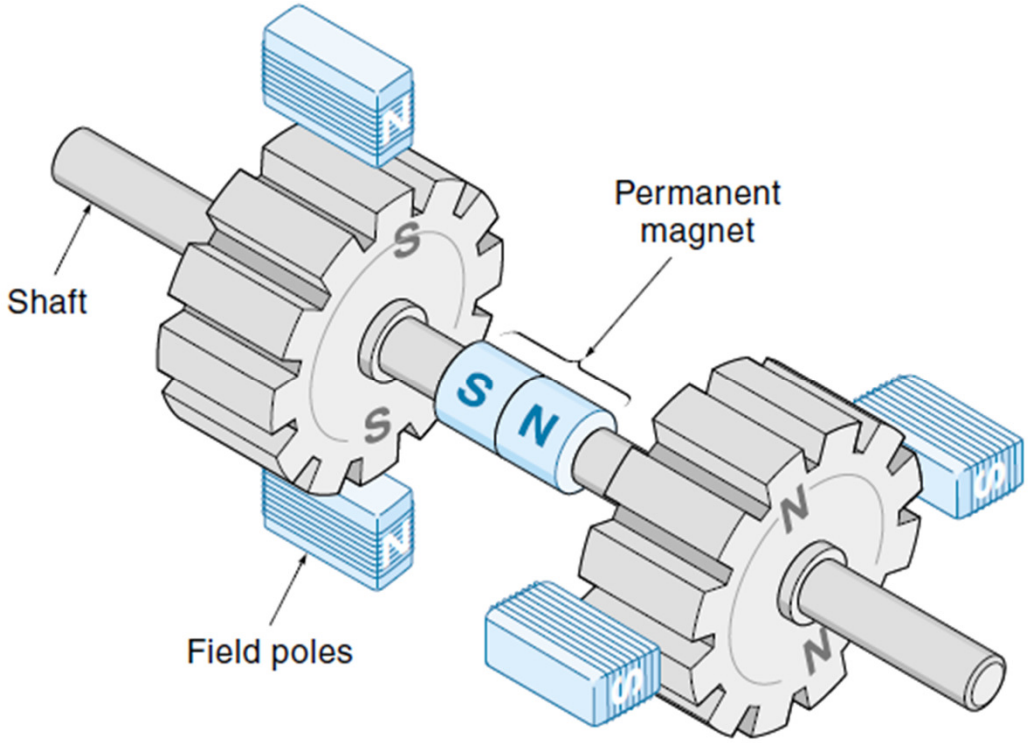
http://en.nanotec.com/main_en.swf



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