

بنام خدا

# موتورهای خطی

## مطالب کلی



✓ مقدمه

✓ قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

✓ ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

✓ شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

✓ آنالیز میدان

✓ موتور القائی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت

✓ بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوایی

✓ پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد موتور خطی

✓ پارامترهای موتور القائی

✓ مدار معادل موتور القائی خطی

✓ نتیجه گیری



**مقدمه**

---

سیستمهای الکترومغناطیسی را از نظر کاربرد به بخشهای زیر تقسیم نمود.

- ۱) ماشین های نیرو (فشار)
- ۲) ماشین های توان
- ۳) ماشینهای انرژی



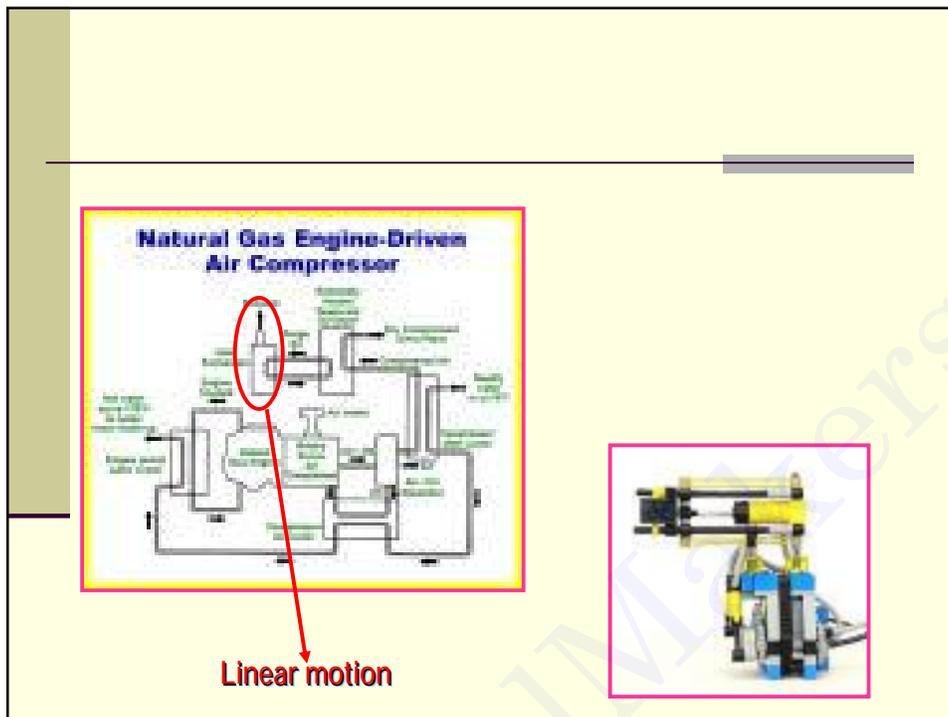
**مقدمه**

---

**ماشین های نیرو**، ماشینهای با زمان کارکرد کوتاه مدت میباشند که اساساً در حالت سکون با سرعتهای خیلی پائین کار می کنند. و در مقایسه با کارکرد و پاسخ کلی مسئله، راندمان چندان مهم نمی باشد.

**ماشین های توان** اغلب در سرعتهای متوسط یا بالا کار می کنند و ماشین های با زمان کارکرد پیوسته می باشند. این گونه ماشین ها در اندازه های کوچک خیلی مفید می باشند.

**ماشین های انرژی** ماشین هایی هستند با زمان کارکرد کوتاه و به عنوان شتاب دهنده کاربرد پیدا کرده اند.



**مقایسه موتورهای خطی و دوار**

Linear Motor	Rotary/Linear Conversion
Direct thrust	Rotary to linear mechanism required
Minimal maintenance	More maintenance
No internal moving parts	More wear
Virtually silent operation	Noisy
Very low inertia	Higher inertia

Linear Electric Motors provide direct thrust for the Advantages of linear motors

- Simple mechanical arrangement, minimum number of moving parts.
- Direct thrust motors, no backlash, no wear.
- Wide speed range, from microns / sec to >10m/s.
- High acceleration, high motor force to weight ratio 20G peak.
- Smooth, virtually silent motion.
- Maintenance-free motor, no internal moving parts.

Rotating motor



Angular velocity  $\omega$  radian / sec

Torque T N.m

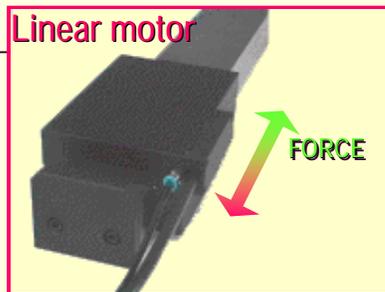
Controlling the torque

$$T = K_t * I$$

where:

**$K_t$  = torque constant**

Linear motor



Linear velocity V m / sec

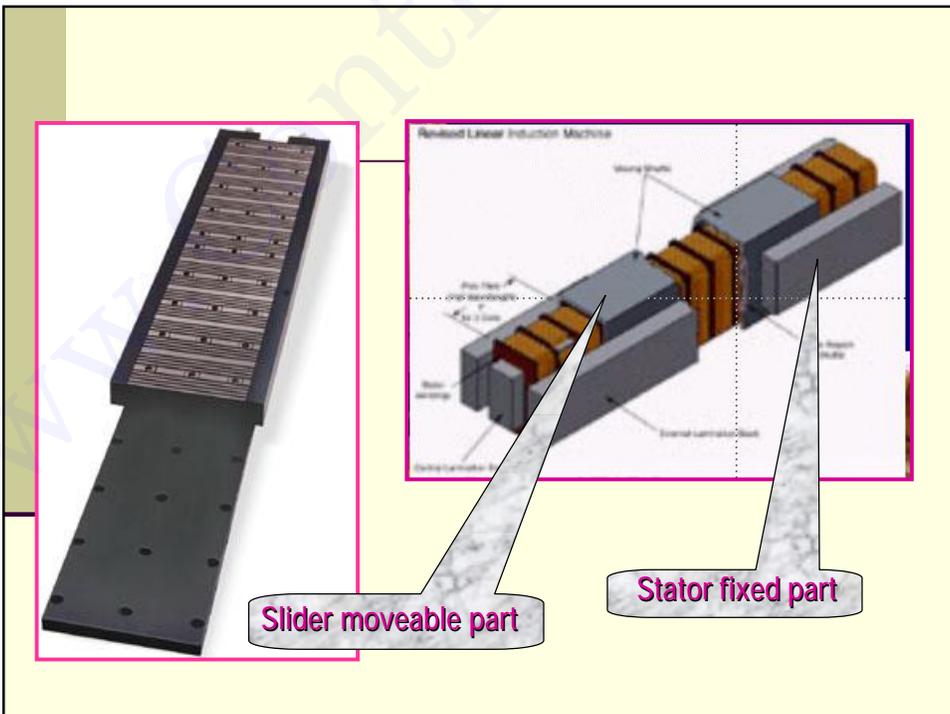
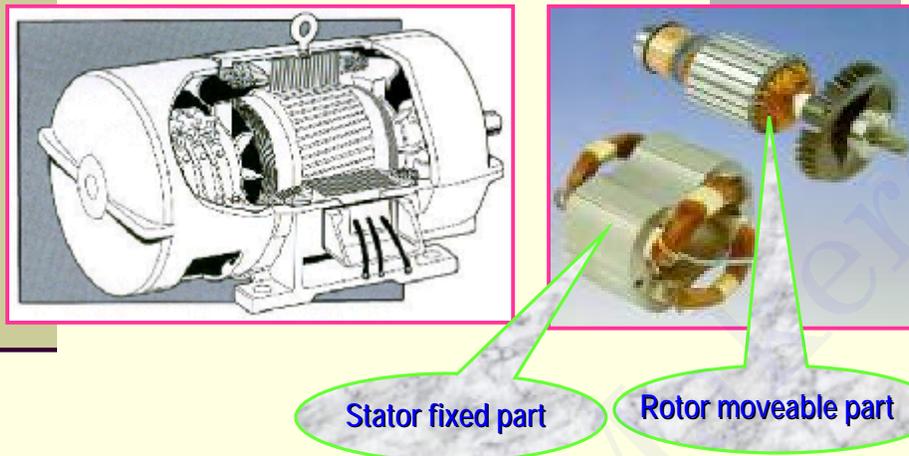
Force F N

Controlling the forces

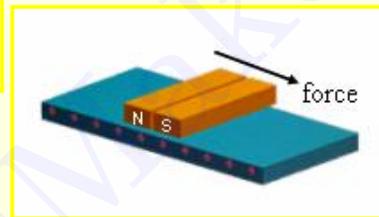
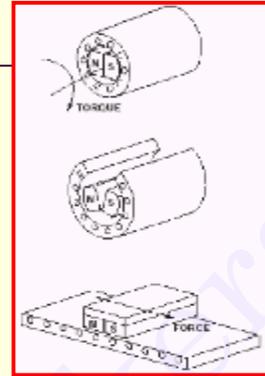
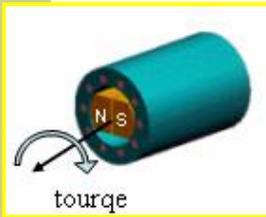
$$F = K_f * I$$

**$K_f$  = force constant**

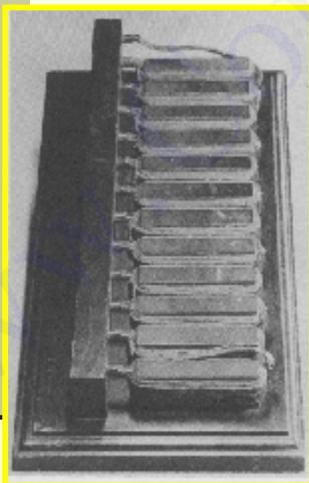
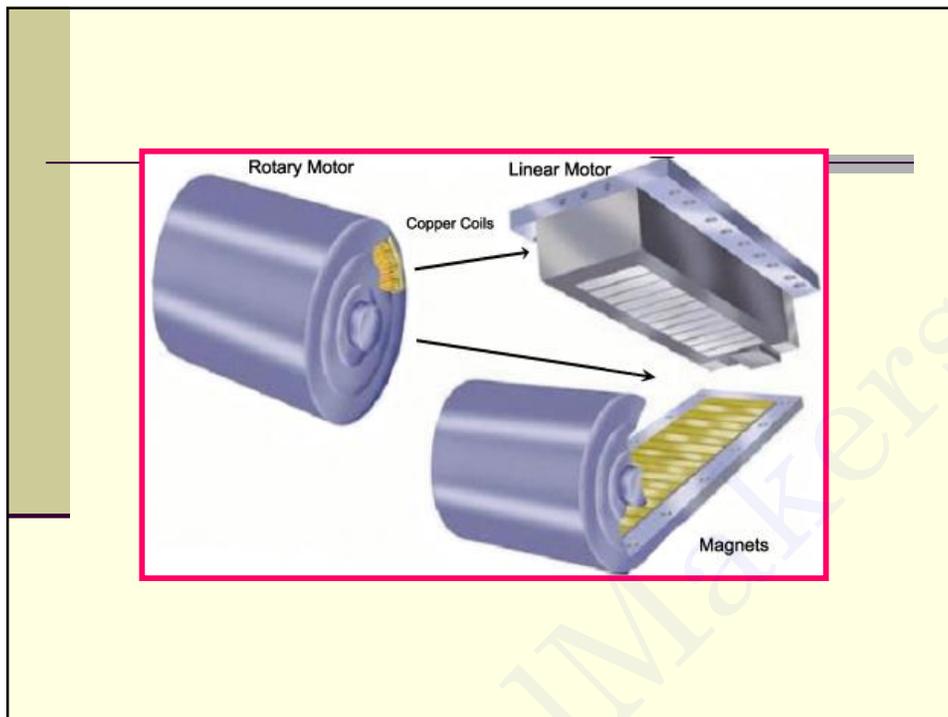
**A rotating machin is consist of:**



### Fundamental of linear synchronous motors



Basically all types of electrical motors can be built as rotating or linear motors.



First picture of a linear motor (Mr. Wheatstone 1845)

q Electromagnetic Linear Motors are based on the same physical laws as rotating motors.

q Basically all types of electrical motors can be built as rotating or linear motors.

q Because of the outstanding performance of power and control most of the linear motors used for industrial applications are based on the principle of the brushless synchronous motors with permanent magnets.



**مقدمه**

---

موتورهای خطی لزوماً بهترین انتخاب برای هر کاری که دارای حرکت خطی است، نمی باشند

از دلایل این امر میتوان موارد زیر را برشمرد:

- از زمان اختراع تا پیشرفت این موتورها زمان زیادی میگذرد و گمان نمیرود تکنولوژی آن پیشرفتهای داشته باشد.
- راندمان نسبتاً کمی دارند.
- ذاتاً فاصله هوایی بزرگی دارند.
- کاربردهای خاصی دارند و ممکن است به درد کار خطی استفاده کننده نخورد.



**مقدمه**

---

دلایلی که موجب میشود با این همه عیوب ما باز به طرف موتورهای القایی خطی برویم:

- بی سرو صدایی این موتورها.
- ارزان بودن این موتورها.



## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

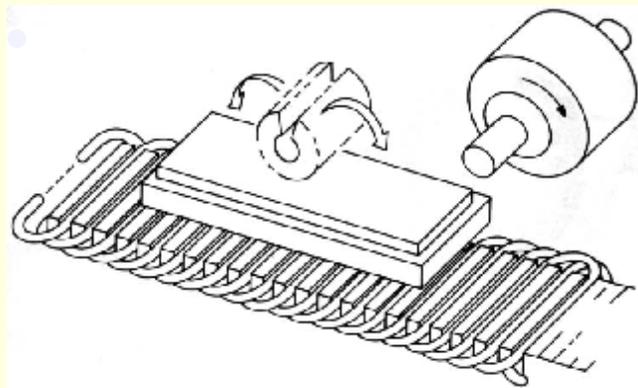
موتورهای خطی به انواع مختلفی قابل تقسیم هستند:

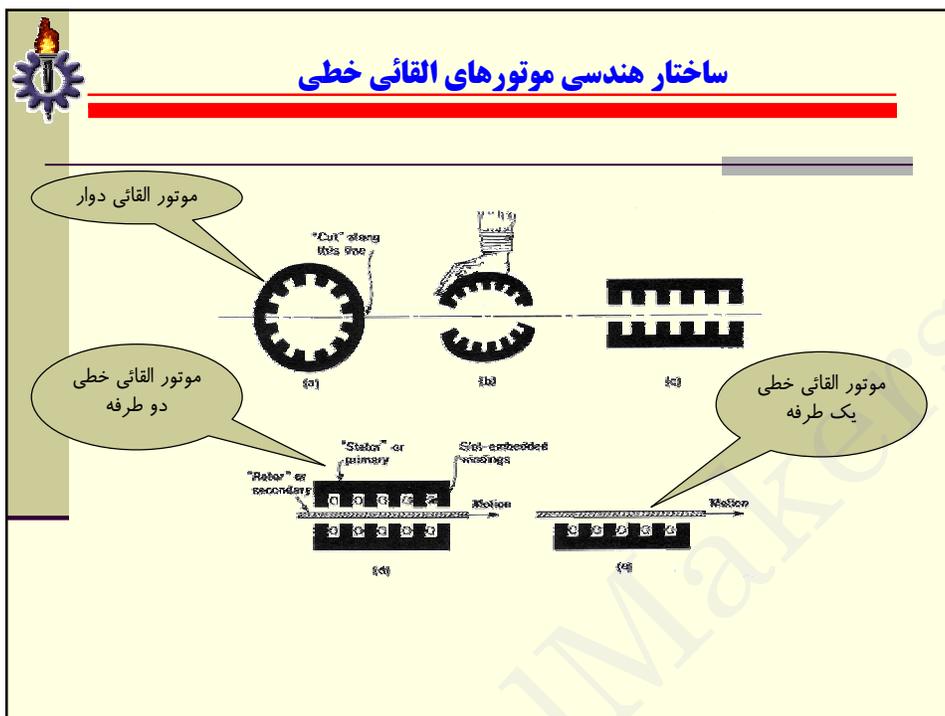
- موتورهای القایی خطی
- موتورهای سنکرون خطی
- موتورهای DC خطی
- موتورهای پله ای خطی



## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تجسم یک موتور القایی خطی با باز کردن یک موتور القایی و مسطح کردن آن بهتر صورت میپذیرد.





### ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

با باز کردن موتور کلیه مشخصه های کاری، طراحی، و خصوصیات مداری و مغناطیسی موتور تغییر می کند. از این موارد میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

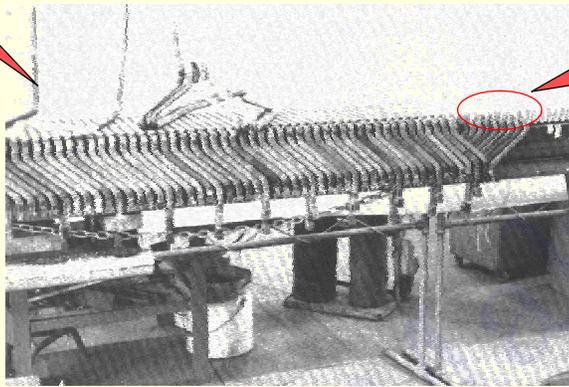
۱. نیروی گردشی موتور دوار تبدیل به نیروی رانشی در موتور خطی میشود.
۲. فاصله هوایی بسیار زیاد میشود.
۳. اثر لبه یا اثر انتها خواهیم داشت.
۴. افزایش مقدار مقاومت موثر ثانویه در موتور خطی.



## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

شکل روبرو ساختار واقعی سیم پیچی هسته استاتور را نشان می دهد:

هادی های استاتور



شیارهای استاتور



## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

در عمل ساختارهای متفاوتی برای سیم پیچی استاتور موتورهای القائی خطی پیشنهاد می شود. اکثراً این سیم پیچی ها به هم شبیه هستند و گاهی هم اندازه هستند. در میان انواع مختلف سیم پیچی ها چهار نوع بیشتر مورد توجه هستند:

۱. سیم پیچی یک لایه با تعداد قطبهای زوج ( شکل ۳-۲ )
۲. سیم پیچی سه لایه با تعداد قطبهای زوج ( شکل ۳-۳ )
۳. سیم پیچی دولایه با تعداد قطبهای فرد و شیارهای انتهائی با نیمه پر ( شکل ۳-۴ )
۴. سیم پیچی اقتصادی برای هر موتور القائی خطی با قدرت کم ( شکل ۳-۵ )

### ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

شکل ساده ای از یک استاتور موتور القائی خطی

شماره‌های مستطیل شکل موتور القائی خطی

سیم پیچی نوع اول

زوج قطب  $2p=4$

$k_w = 1$

سیم پیچی گام کامل

Figure 3-2

### ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

سیم پیچی نوع دوم

زوج قطب  $2p=4$

لایه اول

لایه دوم

لایه سوم

Figure 3-3

### قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تشریح قانون مسیر شار مغناطیسی:

انرژی ذخیره شده در میدان

$$W_m = \frac{B^2}{2\mu_0} (Ax)$$

نیروی منتهجه

$$F_e = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad \text{N}$$

نیروی بالا برنده الکترومغناطیسی

$$f_e = \frac{F_e}{A} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad \text{N/m}^2$$

### قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تشریح قانون مسیر شار مغناطیسی:

دیده میشود اگر چگالی شار برابر یک تسلا باشد نیروئی برابر  $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  تولید میشود.

تشریح قانون نیروی آمپر:

اگر یک هادی به طول ۲۵ سانتیمتر یک جریان ۲۰ آمپر را حمل کند و در یک میدان ۰/۴ تسلا قرار بگیرد از قانون آمپر داریم:

$$F_e = I l B \sin(\theta) = 20 \times 0.25 \times 0.4 \times \sin(90^\circ) = 2 \text{ N}$$



### شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

- موتور خطی بر خلاف موتور دوار در مسیر حرکتش یک ابتدا و یک انتها دارد. این خصوصیت تولید اثر دو انتها خواهد کرد.
- اغلب موتورهای خطی روتورهایشان فاقد میله های هادی یا سیم پیچهای الکتریکی است و عضو متحرک در یک موتور خطی تقریباً همیشه از صفحه یا ورقه های یکپارچه ساخته می شود.
- فاصله هوایی در موتور خطی نسبتاً بزرگ می باشد. که جزء لاینفک موتور خطی می باشد. در یک موتور دوار فاصله هوایی تا حد امکان کوچک می باشد بعلاوه جریان مغناطیسی نسبتاً خوبی دارد. فاصله هوایی اثر نامطلوبی روی رفتار موتور خطی می گذارد.



### شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابه دوارش

- در موتورهای خطی ثانویه یا روتور پهن تر از اولیه می باشد. این خصوصیت که ویژه موتورهای خطی می باشد، تاثیر مهمی روی عملکرد موتور دارد.
- در موتورهای خطی یک طرفه نیروی عمودی (نیروی نرمال) وجود دارد، که این نیرو ممکن است جاذبه یا دافعه باشد. این نوع نیرو در موتورهای دوار وجود دارد ولی دیده نمی شود. این نیروهای نرمال بر سطح استاتور نیروهای متعادل کننده برونسو هستند که در موتورهای دوار در محیط پیرامون فاصله هوایی قرار دارند بطوری که اگر موتور دارای شکل متعادل هندسی باشد. این نیروهای عمود بر سطح یکدیگر را خنثی می کنند و اگر موتور متعادل مرکز نباشد، موتور دوار حاوی نیروی نرمال خالص خواهد بود.



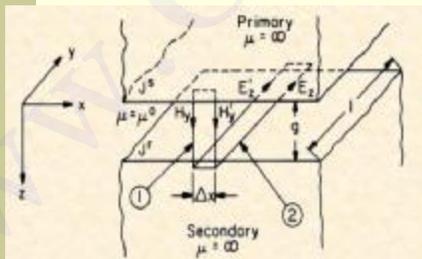
## شباهتها، تفاوت‌های میان یک موتور القائی خطی و مشابهِ دوارش

- شتابگیری و کاستن از سرعت موتورهای خطی به نحو مطلوبی امکان پذیر است.
- حفاظت مکانیکی و الکتریکی و قابلیت تحمل شرایط محیطی نامتقارن نسبت به مشابهِ دوارش بهتر صورت می‌پذیرد.
- نگهداری، تعمیر و تعویض موتورهای خطی ساده می‌باشد.
- توانائی اعمال نیرو در ثانویه بدون اینکه نیازی به کنتاکت مکانیکی باشد. و نیز کنترل مناسب و راحت نیرو و سرعت نیز از مزایای این نوع موتورها می باشد



## آنالیز میدان

۱- به جای جریان جاری در سیم پیچهای اولیه، یک لایه جریان بی نهایت نازک در هر طرف فرض می کنیم ( $J_S/2$ ). همچنین به جای جریان القائی جاری در صفحه ثانویه یک لایه جریان بی نهایت کوچک در نظر می گیریم ( $J_I$ ).



۲- با توجه به شکل مقابل فرض می کنیم اولیه و ثانویه در امتداد X از دو طرف تا بی نهایت ادامه یافته باشند. و نیز فرض می کنیم ثانویه تا بی نهایت از دو طرف در امتداد Z ادامه یافته باشد.

۳- اولاً آهن دارای پرمابیلیته بی نهایت باشد تا به اشباع نرود. ثانیاً هسته های اولیه نیز از ورقه های نازک در نظر می گیریم.

۴- فاصله هوایی را به اندازه کافی کوچک فرض می کنیم به طوری که اندوکسیون فاصله هوایی فقط در امتداد Z باشد.



## آنالیز میدان

۵- ثانویه را به اندازه کافی نازک فرض می‌کنیم طوری که اثر پوستی در آن قابل صرف نظر باشد.

$$H'_y = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Delta x + H_y \quad E'_z = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Delta x + E_z \quad j_r = \sigma' E_z$$

$$\oint H \cdot dl = \oint j \cdot ds \quad g_c \frac{\partial H_y}{\partial x} = j_s + j_r \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad \sigma' = \sigma d$$

$$g_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0} \frac{\partial j_s}{\partial x} \quad \leftarrow \text{معادله درجه دوم میدان معروف}$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma' U_x}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial x} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0} \frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0} \frac{\partial j_s}{\partial x} \quad U_x \text{ سرعت نسبی اولیه و ثانویه}$$



## موتور القایی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت

- $\vec{u}$  ورقه های تشکیل دهنده هسته اولیه در جهت  $Y$  تا بی نهایت امتداد داده شده اند.
- $\vec{u}$  ثانویه در جهت  $Y$  تا بی نهایت امتداد دارد.
- $\vec{u}$  سیم پیچی تحریک جاسازی شده در شیارهای اولیه برای راحتی ساختمان مسطح شده تا تحریک ماشین را مثل یک صفحه جریان با ضخامت ناچیز و پهنای بی نهایت فرض می‌کنیم.
- $\vec{u}$  حرکت ثانویه فقط در جهت  $X$  است.
- $\vec{u}$  ثابتهای فیزیکی لایه ها هم جنس، هم شکل و خطی اند.
- $\vec{u}$  مواد فرو مغناطیسی به کار رفته هیچ وقت به اشباع نمی‌روند.
- $\vec{u}$  از تغییرات در جهت  $Z$  صرف نظر می‌شود
- $\vec{u}$  تمام جریانها فقط در جهت  $Z$  جاری می‌شوند.
- $\vec{u}$  ساختمان اولیه از آهنهای مورق تشکیل شده تا قابلیت هدایت در جهت  $Z$  را قابل صرف نظر کند.
- $\vec{u}$  تغییرات مکان و زمان به صورت سینوسی می‌باشد.



### آنالیز موتور القائی خطی ایده آل

نتایج زیر را می توان در مورد فرضهای اخیر نتیجه گرفت:

- ✓ یک نقطه شروع برای تحلیل را مهیا می سازند.
- ✓ امکان تحلیل به صورت ریاضی وجود دارد.
- ✓ ثانویه از یک هادی صلب تشکیل شده که فقط در یک جهت حرکت می کند.
- ✓ مسئله به دو بعد کاهش می دهند و به صورت میدان دو بعدی بیان می کنند.
- ✓ هسته اولیه مورق می باشد. این امر موجب می شود که تلفات هسته را صفر در نظر بگیریم.



### آنالیز موتور القائی خطی ایده آل

مقدار متوسط نیروی محوری

$$F_x = \frac{SB_m^2 \delta V_s \lambda L}{4|\Delta^2| \text{Re}(\alpha)}$$

$$\Delta = \cosh \beta g + \frac{d\mu_0}{\beta\mu} \sinh \beta g$$

$$b = \frac{2p}{l} = \frac{p}{t}$$

$$\alpha^2 = \beta^2 + jS\omega\mu_0\sigma_s$$

### بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوائی

$$(j\beta)^2 \beta_y - \frac{1}{g} (j\omega s \mu_0 \sigma') \beta_y = \frac{1}{g} (-j\beta) j_m$$

$$\beta_y = \frac{j \mu_0 j_m \frac{\beta}{g}}{\beta^2 + j\omega s \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0}} = \frac{\mu_0 j_m}{g\beta(sG - j)}$$

**G: ضریب مرغوبیت ماشین نامیده می شود**

$$G = \omega \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0 \beta^2} = \frac{2f \mu_0 \sigma d \tau^2}{g_0 \pi} = \frac{\mu_0 U_s d \sigma}{g_0 \pi}$$

### پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد موتور خطی

اثرات تغییرات برخی از پارامترها را بر روی پارامترهای دیگر در موتورهای خطی		
پارامتر مورد نظر	اثرات افزایش	اثرات کاهش
فاصله هوائی	زیاد شده جریان مغناطیسی افزایش تلفات نهائی	افزایش ضریب مرغوبیت، افزایش راندمان زیاد شدن تعداد قطبها
گام قطبی	زیاد شده ضریب مرغوبیت کاهش ضخامت آهن پشتیبان	زیاد شدن تعداد قطبها
تعداد قطبها	کاهش اثر دو انتها	افزایش راکتانس نشتی ثانویه
ضخامت ثانویه	افزایش ضریب مرغوبیت افزایش جریان راه اندازی	افزایش راکتانس پراکنندگی
قابلیت مقامتی ثانویه	کاهش اثر دو انتها	افزایش ضریب مرغوبیت کاهش تلفات در ثانویه
پهنای دندانها	افزایش راکتانس نشتی	افزایش نیرو و راندمان



## پارامترهای موتور القائی

### سرعت سنکرون

سرعت سنکرون موتور خطی معادل سرعت موج سیار ناشی از سیم پیچ اولیه نسبت به آن است مانند حالت موتور گردان موج سیار در هر سیکل منبع جریان متناوب دو گام قطب حرکت میکند. سرعت سنکرون موتور القائی خطی عبارتند از:

$$v_s = 2\tau f \quad (\text{m/s})$$

که  $\tau$  گام قطب و  $f$  فرکانس منبع میباشد.

سرعت روتور  $V$  و کمتر از سرعت سنکرون میباشد. لغزش عبارتند از:

$$s = \frac{v_s - V}{v_s}$$



## پارامترهای مدار موتور القائی

### مدار معادل موتور القائی خطی

یک موتور القائی خطی چند قطب را میتوان با تقریب خوب توسط مدار معادلی همانند مدار معادل موتور القائی معمولی نمایش داد. اما دارای تفاوتی زیر میباشد:

۱. به علت فاصله هوایی زیاد **مقاومت مغناطیس کننده کم** است.
۲. مقاومت موثر ثانویه بعلت توزیع جریان در ثانویه و اثر لیه نسبتاً بالاست.
۳. ضریب القاء پراکندگی ثانویه بعلت توزیع جریان ثانویه تمایل دارد **زیاد** باشد.
۴. به علت فاصله هوایی زیاد شار فاصله هوایی کم است و **تلفات هسته کم** است.

### پارامترهای مدار معادل موتور القائی

---

$$\lambda_s = \frac{h_s}{12} (1 + 3\beta_1), \lambda_d = \frac{5 \left( \frac{g_{ei}}{w_s} \right)}{5 + 4 \left( \frac{g_a}{w_s} \right)}, \lambda_e = 0.3(3\beta_1 - 1)$$

$$X_1 = \frac{2\mu_0 \omega}{p} \left[ \lambda_s \left( 1 + \frac{3}{2p} \right) + \lambda_d \frac{2a}{q} + \lambda_e L_{ce} \right] W_1^2 = K_1 W_1^2$$

$$X_m = \frac{12\mu_0 \omega a_e K_{w1} W_1^2 \tau}{\pi^2 p g_{ei}} = K_m W_1^2$$

$$R_1 = \frac{1}{2\sigma_c} \frac{4a + 2L_{ce}}{W_1 I_1} j_c^2 W_1^2 = K_{R1} W_1^2$$

$$R_2' = \frac{X_m}{G_{ei}} = \frac{12a_e K_{w1} W_1^2}{d p \tau \sigma_{ei}} = K_{R2}' W_1^2$$

### پارامترهای موتور القائی

---

$$F_x = \frac{3I_2'^2 R_2' \left( \frac{1-s}{s} \right)}{U_s (1-s)} = \frac{3I_2' R_2'}{S U_s} = \frac{3I_1'^2 R_2'}{2s t f \left( 1 + \left( \frac{1}{s G_{ei}} \right)^2 \right)}$$

$$F_n = 2a_e \frac{p t^3}{p^2} \frac{m_0 j_m^2}{g_{ei}^2 (1 + G_{ei}^2)} \left[ 1 - \left( \frac{p}{t} g_{ei} s G_{ei} \right)^2 \right]$$

$$h = \frac{3I_2'^2 R_2' \left( \frac{1-s}{s} \right)}{3I_1'^2 R_1 + 2I_2'^2 \frac{R_2'}{s}} = \frac{F_x U_s (1-s)}{3I_1'^2 R_1 + F_x U_s}$$

$$\cos f = \frac{3I_1'^2 R_1 + F_x U_s}{3VI}$$

نیروی رانش ←

نیروی نرمال ←

راندمان ←

ضریب قدرت ←



### پارامترهای مدار موتور القائی

---

$$P_{ma} = \frac{R'_r}{s} (I'_a)^2 + \left( \frac{1-s}{s} \right) R'_r (I'_a)^2$$

← توان مکانیکی W

$$P_{mech} = Fv = \frac{2(1-s)}{s} R'_r (I'_a)^2$$

← قدرت خروجی هر فاز W



### نتیجه گیری

---

برای تحلیل موتورهای القائی خطی کلیه روابط موجود برای موتورهای القائی گردان معتبر هستند، تنها مهمترین تغییر لازم در تحلیل، سرعت سنکرون میباشد.

ولی روابط ها همان روابط میباشد. نمودارهای عملکردی مشابه ای نیز دارند.



## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

بر مبنای قوانین مسیر شار مغناطیسی و قانون نیروی آمپر متوان انواع مختلفی از موتورهای خطی را گسترش داد:

- موتورهای القایی خطی
- موتورهای سنکرون خطی
- موتور های DC خطی
- موتورهای پله ای خطی

این موتورهای خطی حرکاتی همچون دوار، پله ای، ضربه ای، خطی در یک جهت، نوسانی را تولید میکنند. این دو قانون یا هر دو یا یکی از آنها به طریقی در این موتورها مورد استفاده قرار میگیرند.



## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

کلیه موتورهای خطی بر اساس دو قانون زیر توسعه داده شده اند و اصول کلیه این موتورها بر اساس این دو قانون میباشد:

- مسیر شار مغناطیسی ( *Alignment of magnetic flux* )
- قانون نیروی آمپر یا معادله نیروی لورنتز

یک راه کار مناسب جهت درک فرایند تولید نیرو در موتور خطی از طریق قانون همپلتون میباشد. نتیجه ای که میتوان از این قانون گرفت این است که حرکت تولید شده ناشی از نیرو باعث مینیمم شدن میزان انرژی ذخیره شده مغناطیسی در سیستم میشود. این نتیجه با مسیر شار مغناطیسی سازگار است.

نیروای که از تغییر میزان انرژی ذخیره شده در سیستم به وجود میآید را میتوان توسط معادلات زیر نمایش داد:



### قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

$$F_e = \frac{\partial W_m}{\partial x}(\lambda, x) \quad N$$

شار پیوندی یک متغیر وابسته است و داریم:

$$F_e = -\frac{\partial W_m}{\partial x}(i, x) + i \frac{\partial \lambda}{\partial x}(i, x) \quad N$$

$W_m$  میزان انرژی ذخیره شده در سیستم میباشد،

$F_e$  نیروی الکتریکی میباشد،

نیروی به وجود آمده از واکنش میان جریان  $i$  عبور

کننده از یک هادی به طول  $l$  در یک میدان

مغناطیسی  $B$  به صورت زیر میباشد:

$$\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B} \quad N$$