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
- موتورالقائی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت
- بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوائی
- پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد موتور خطی
- پارامترهای موتور القائی
- مدار معادل موتور القائی خطی
- نتیجه گیری

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## مقدمه

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

- ***ماشین های نیرو (فشار)***
- ***ماشین های توان***
- ***ماشینهای انرژی***

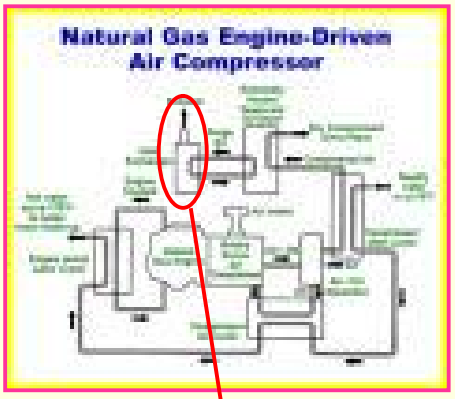
## مقدمه

**ماشین های نیرو**، ماشینهای با زمان کارکرد کوتاه مدت می‌باشند که اساساً درحالت سکون با سرعتهای خیلی پائین کار می‌کنند. و در مقایسه با کارکرد و پاسخ کلی مسئله، راندمان چندان مهم نمی‌باشد.

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

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

@ElectricalDistribution
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور




Linear motion

## مقایسه موتورهای خطی و دوار

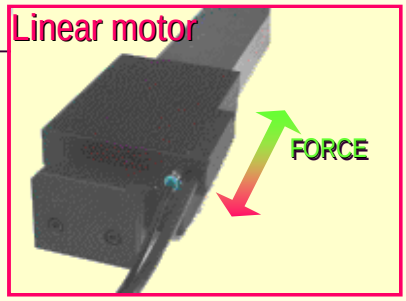
| Linear Motor | Rotary/Linear Conversion |
|---|---|
| Direct thrust | Rotary to linear mechanism required |
| Minimal maintenance | More maintenance |
| No internal moving parts | More wear |
| Virtually silent operation | Noisy |
| Very low inertia | Higher inertia |

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

**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.**




| | | |
|---|---|---|
| Angular velocity | ω | radian / sec |
| Torque | T | N.m |

Controling the torque

$T=Kt * I$

**where:**

**Kt = torque constant**

| | | |
|---|---|---|
| Linear velocity | V | m / sec |
| Force | F | N |

Controling the forces

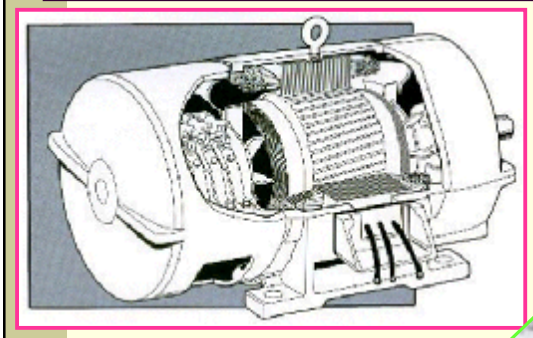
$F=Kf * I$

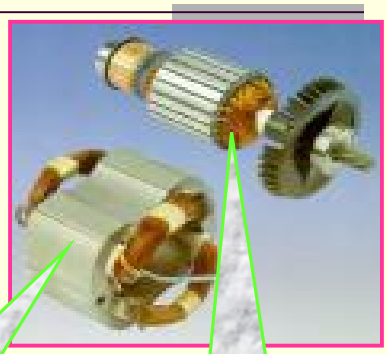
**Kf = force constant**

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

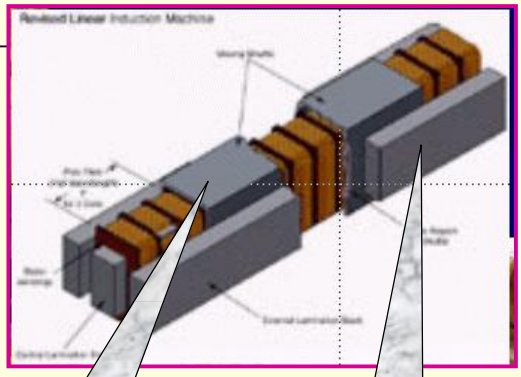
## A rotating machin is consist of:





Stator fixed part

Rotor moveable part



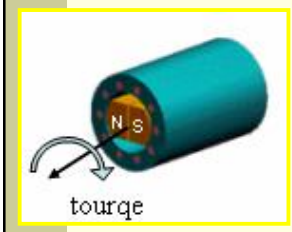
Slider moveable part

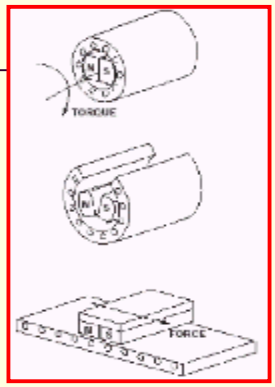
Stator fixed part

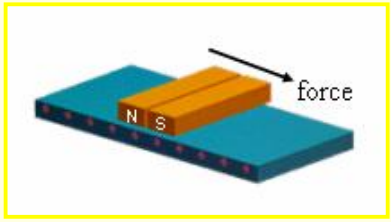
@ElectricalDistribution

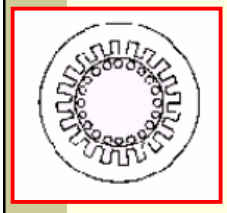
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

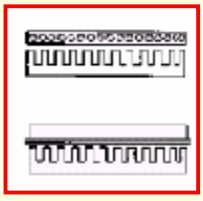
## Fundumental of linear synchronous motors

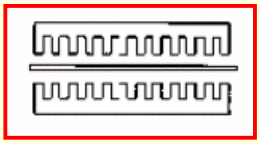


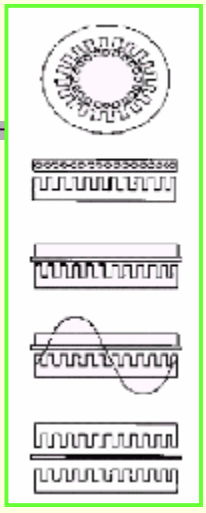


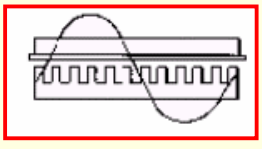







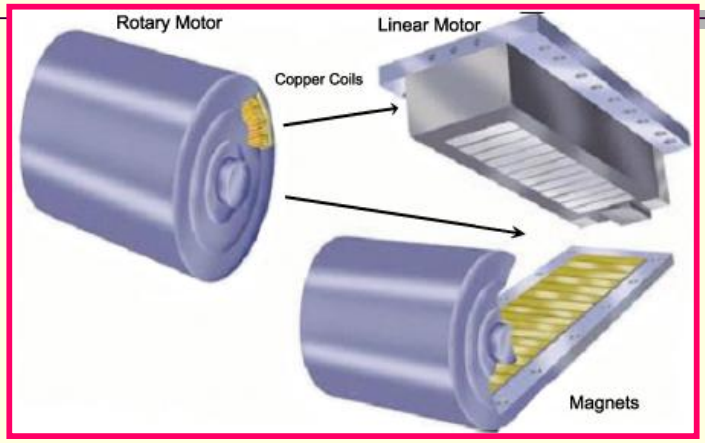


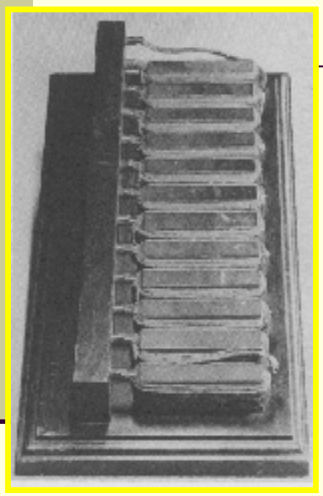


**Basically all types of electrical motors can be built as rotating or linear motors.**

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور



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

- **Electromagnetic Linear Motors are based on the same physical laws as rotating motors.**
- **Basically all types of electrical motors can be built as rotating or linear motors.**
- **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.**

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## مقدمه

موتورهای خطی لزوما بهترین انتخاب برای هرکاری 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.

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

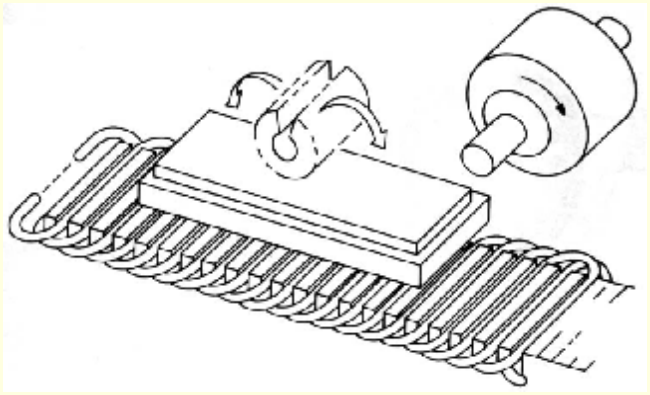
## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

موتورهای خطی به انواع مختلفی قابل تقسیم هستند:

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

## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

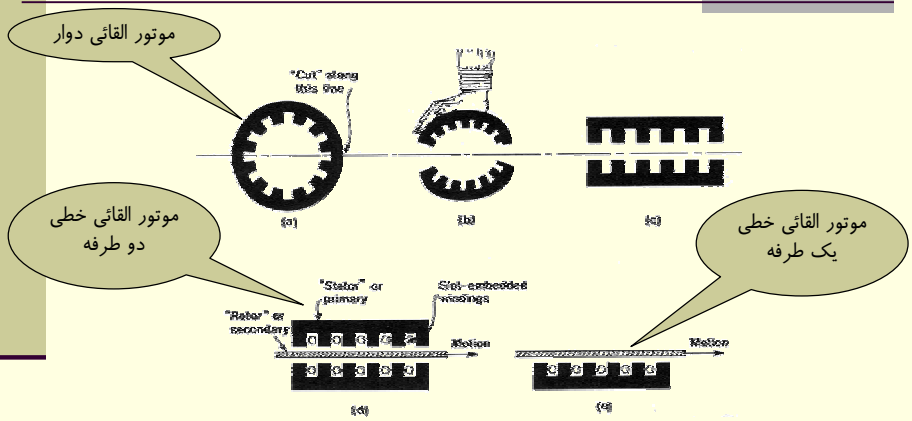
تجسم یک موتور القائی خطی با باز کردن یک موتور القائی و مسطح کردن آن بهتر صورت میپذیرد.



@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی




## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

با بازکردن 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 هوائی بسیار زیاد میشود.

۳. اثر لبه یا اثر انتها خواهیم داشت.

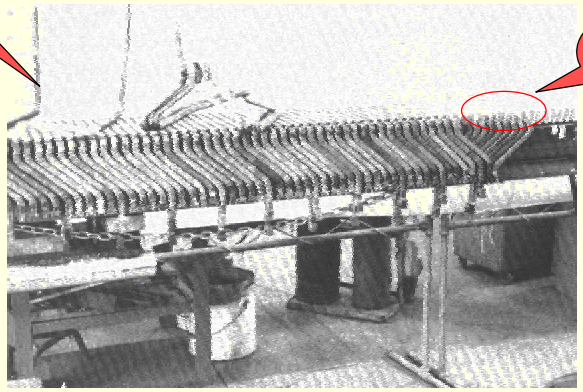
۴. افزایش مقدار مقاومت موثر ثانویه در موتور خطی.

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

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




## 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 ۲-۳ )

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 ۴-۳ )

۴. سیم پیچی اقتصادی برای هر موتور القائی خطی با قدرت کم ( شکل ۵-۳ )

@ElectricalDistribution
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

شکل ساده ای از یک استاتور موتور القائی خطی

شیارهای مستطیل شکل موتور القائی خطی

سیم پیچی نوع اول

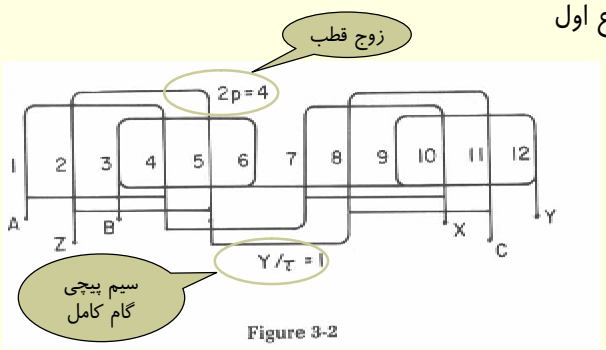



Figure 3-2

## ساختار هندسی موتورهای القائی خطی

سیم پیچی نوع دوم

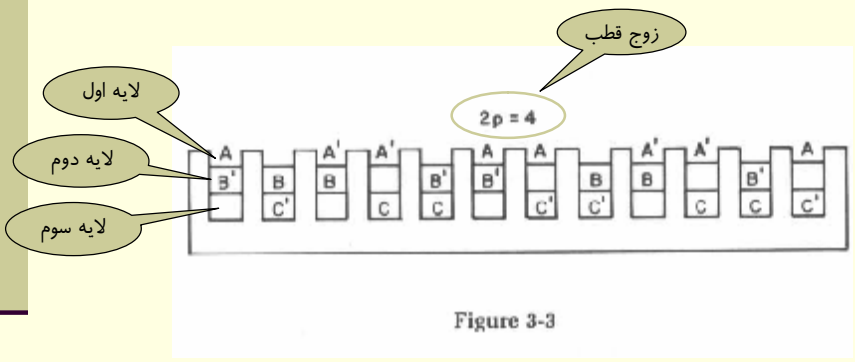
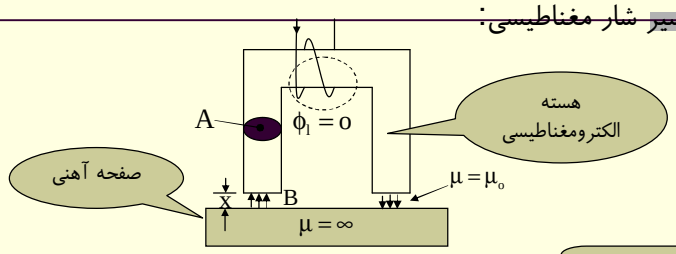



Figure 3-3

## 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 منتجه

نیروی بالا برنده الکترومغناطیسی

$$\begin{cases} F_e = \dfrac{B^2 A}{2\mu_0} \quad N \\ f_e = \dfrac{F_e}{A} = \dfrac{B^2}{2\mu_0} \quad N/m^2 \end{cases}$$

## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

تشریح قانون مسیر شار مغناطیسی:

دیده میشود اگر چگالی شار برابر یک تسلا باشد نیروئی برابر $N/m^2$ $۴\times۱۰^۵$ 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:

$$F_e = IlB\sin(\theta) = ۲۰\times۰/۲۵\times۰/۴\times\sin(۹۰^o) = ۲N$$

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

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

- موتورخطی 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 پیچیهـای الکتریکـی اسـت و عضو متحرک در یک موتورخطی تقریبا همیشه از صفحه یا ورقه های یکپارچه ساخته می شود.

- فاصله هوائی در موتورخطی نسبتا بزرگ می‌باشد. که جزء لاینفک موتورخطی می‌باشـد. در یـک موتور دوار فاصله هوائی تا حد امکان کوچک می‌باشد بعلاوه جریان مغناطیسی نسبتاً خـوبی دارد. فاصله هوائی اثر نامطلوبی روی رفتار موتورخطی 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 می‌باشد، 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 درموتورهای دوار وجود دارد ولی دیده نمی‌شود. ایـن نیروهای نرمال بر سطح استاتور نیروهای متعادل کننده برونسو هستند که در موتورهـای دوار درمحیط پیرامون فاصله هوائی قراردارند بطوری که اگر موتور دارای شـکل متعـادل هندسـی باشد. این نیروهای عمود بر سطح یکدیگر را خنثی می‌کنند و اگر موتـور متحـدالمرکز نباشـد، موتور دوار حاوی نیروی نرمال خالص خواهد بود.

@ElectricalDistribution

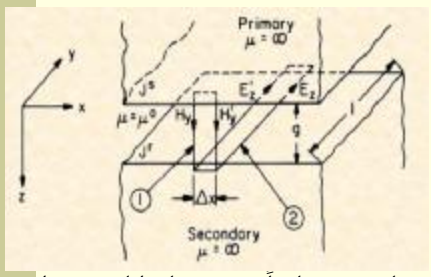
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## شباهتها، تفاوتهای میان یک موتور القائی خطی و مشابه 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 مشابه دوارش بهترصورت 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($JS/2$ ). همچنین به جای جریان القائی جاری در صفحه ثانویه یک لایه جریان بی نهایت کوچک در نظر می گیریم($Jr$).




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 هوائی را به اندازه کافی کوچک فرض می کنیم به طوری که اندوکسیون فاصله هوائی فقط در امتداد $Z$ باشد.

@ElectricalDistribution
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## آنالیز میدان

۵- ثانویه را به اندازه کافی نازک فرض می کنیم طوری که اثرپوستی در آن قابل صرف نظر باشد.

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

$$\sigma' = \sigma d$$

$$\oint H.dl = \oint_s j.ds \qquad g_c \frac{\partial H_y}{\partial x} = j_s + j_r \qquad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

معادله درجه دوم میدان معروف

$$g_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0}\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0}\frac{\partial j_s}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} - \mu_0 \frac{\sigma' U_x}{g_0}\frac{\partial B_y}{\partial x} - \mu_0 \frac{\sigma'}{g_0}\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\mu_0}{g_0}\frac{\partial j_S}{\partial x}$$

$U_x$ سرعت نسبی اولیه و ثانویه

## موتورالقائی خطی ایده آل با یک ثانویه به ضخامت بی نهایت

- ورقه های تشکیل دهنده هسته اولیه در جهت تا بی نهایت امتداد داده شده اند.
- ثانویه در جهت $Y$ تا بی نهایت امتداد دارد.
- 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 می کنیم.
- حرکت ثانویه فقط در جهت $X$ است.
- ثابتهای فیزیکی لایه ها هم جنس، هم شکل و خطی اند.
- مواد فرو مغناطیسی به کار رفته هیچ وقت به اشباع نمی روند.
- از تغییرات در جهت $Z$ صرف نظر می شود
- تمام جریانها فقط در جهت $Z$ جاری می شوند.
- ساختمان اولیه از آهنهای مورق تشکیل شده تا قابلیت هدایت در جهت $Z$ را قابل صرف نظر کند.
- تغییرات مکان و زمان به صورت سینوسی می باشد.

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## آنالیز موتورالقائی خطی ایده آل

نتایج زیر را می توان در مورد فرضهای اخیرنتیجه 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 نظربگیریم.

## آنالیز موتورالقائی خطی ایده آل

**مقدار متوسط نیروی محوری**

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

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

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

$$\alpha^2 = \beta^2 + jSw\mu_0\sigma_s$$

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## بدست آوردن اندوکسیون فاصل هوائی

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

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

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<br>افزایش تلفات نهائی | افزایش ضریب مرغوبیت، افزایش راندمان زیاد شدن تعداد قطبها |
| گام قطبی | زیاد شده ضریب مرغوبیت<br>کاهش ضخامت آهن پشتیبان | زیاد شدن تعداد قطبها |
| تعداد قطبها | کاهش اثر دو انتها | افزایش راکتانس نشتی ثانویه |
| ضخامت ثانویه | افزایش ضریب مرغوبیت<br>افزایش جریان راه اندازی | افزایش راکتانس پراکندگی |
| قابلیت مقاومتی ثانویه | کاهش اثر دو انتها | افزایش ضریب مرغوبیت<br>کاهش تلفات در ثانویه |
| پهنای دندانه ها | افزایش راکتانس نشتی | افزایش نیرو و راندمان |

@ElectricalDistribution
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## 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 هرسیکل منبع جریان متناوب دو گام قطب حرکت میکند، سرعت سنکرون موتور القائی خطی عبارتند از:

$$\nu_s = 2\tau f \qquad (m/s)$$

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

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

$$s = \frac{\nu_s - \nu}{\nu_s}$$

## 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 تفاوتهای زیر میباشد:

۱. به علت فاصله هوائی زیاد مقاومت مغناطیس کننده کم است.

۲. مقاومت موثر ثانویه بعلت توزیع جریان در ثانویه و اثرلبه نسبتاً بالاست.

۳. ضریب القاء پراکندگی ثانویه بعلت توزیع جریان ثانویه تمایل دارد زیاد باشد.

۴. به علت فاصله هوائی زیاد شار فاصله هوائی کم است و تلفات هسته کم است.

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## پارامترهای مدار معادل موتور القائی

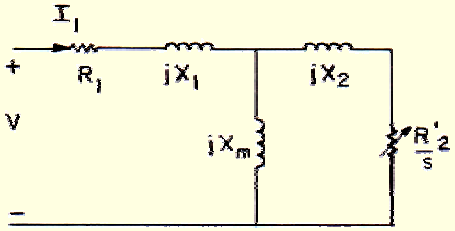
$$\lambda_S = \frac{h_s}{12}(1+3\beta_1), \lambda_d = \frac{5\left(\frac{g_{ei}}{w_s}\right)}{5+4\left(\frac{g_a}{w_s}\right)}, \lambda_e = 0.3(3\beta_1 - 1)$$

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

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

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

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




## پارامترهای موتور القائی

$$F_x = \frac{3I_2'^2 R_2'\left(\frac{1-s}{s}\right)}{U_s(1-s)} = \frac{3I_2' R_2'}{SU_s} = \frac{3I_1^2 R_2'}{2stf\left(1+(\frac{1}{sG_{ei}})^2\right)}$$

نیروی رانش

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

نیروی نرمال

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

راندمان

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

ضریب قدرت

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## پارامترهای مدار موتور القائی

توان مکانیکی

$$P_{ma} = \frac{R'_{۲}}{s}\left(I'_a\right)^{۲} + \left(\frac{۱-s}{s}\right)R'_{۲}\left(I'_a\right)^{۲} \quad W$$

قدرت خروجی هر فاز

$$P_{mech} = F\nu = \frac{۳(۱-s)}{s}R'_{۲}\left(I'_a\right)^{۲} \quad W$$

## نتیجه گیری

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

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

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

بر مبنای قوانین مسیر شار مغناطیسی و قانون نیروی آمپرمیتوان انـواع مختلفـی از موتورهـای خطی را گسترش داد:

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

این موتورهای خطی حرکاتی همچون دوار، پله ای، ضربه ای، خطی در یک جهت، نوسـانی را تولید میکنند. این دو قانون یا هر دو یا یکی از آنها بـه طریقـی در ایـن موتورهـا مـورد استفاده قرار میگیرند.

## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

کلیه موتورهای خطی بر اساس دو قانون زیر توسعه داده شده اند و اصول کلیه ایـن موتورهـا 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 خطـی از طریـق قـانون همیلتـون 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 سیـستم بـه وجـود میآیـد را میتـوان توسـط معادلات زیر نمایش داد:

@ElectricalDistribution
کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور

## قوانین عملکردی پایه موتورهای خطی

شار پیوندی یک متغییر وابسته است و داریم:

$$\begin{cases} F_e = \dfrac{\partial W_m}{\partial x}(\lambda, x) & N \\ F_e = -\dfrac{\partial W_m}{\partial x}(i, x) + i\dfrac{\partial \lambda}{\partial x}(i, x) & N \end{cases}$$

$W_m$ 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:

$$\{\overline{F}_e = I\bar{l} \times \overline{B} \quad N$$

@ElectricalDistribution

کانال تلگرام مهندسان برق و کنترل کشور