به نام خدای

فهرست

فصل ۶ موتورهای سنکرون مخصوص

۶-۱- مقدمه ۳
۶-۲- موتورهای رلوکتانسی تک فاز ۴
۶-۲-۱- اصول کار موتور رلوکتانسی تک فاز ۸
۶-۳- موتورهای زیر سنکرون رلوکتانسی ۱۳
۶-۴- موتورهای رلوکتانسی سه فاز ۱۵
۶-۴-۱- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورها ۱۹
۶-۴-۲- فرآیند راه اندازی موتور رلوکتانسی سه فاز با راه انداز القایی ۲۱
۶-۵- موتورهای هیسترزیس ۲۳
۶-۵-۱- اصول کار ۲۳
۶-۵-۲- ساختمان موتور هیسترزیس ۲۳
۶-۵-۳- اصول عملکرد موتور هیسترزیس ۲۴
۶-۶- ماشین های سنکرون مغناطیس دائم ۲۷
۶-۶-۱- ماشین سنکرون مغناطیس دائم با شار شعاعی ۳۰
۶-۶-۲- ماشین سنکرون مغناطیس دائم با شار محوری ۳۲
۶-۶-۳- مقایسه ماشین های سنکرون شار محوری و شار شعاعی ۳۳
۶-۶-۴- مقایسه موتورهای PSMS و BLDC ۳۳
۶-۶-۴-۱- تفاوت ماشین های PSMS و BLDC ۳۳
۶-۶-۴-۲- تفاوت ماشین های PSMS و BLDC ۳۳
۶-۷- موتورهای DC بدون جاروبک BLDC ۳۵
۶-۷-۱- موتور DC بدون جاروبک سه فاز سه پالسه (یا نیم موج) ۳۶
۶-۷-۲- اصول کار موتور DC بدون جاروبک ۳۶
۶-۷-۳- کاربردهای موتور BLDC ۳۷

فصل ۶
موتورهای سنکرون مخصوص

۶-۱- مقدمه

موتورهای سنکرون معمولی

- دارای یک سیم پیچ AC (معمولا روی استاتور)
- دارای یک سیم پیچ DC (معمولا روی روتور)
- قفس سنجابی روی DC برای ایجاد گشتاور راه اندازی و رساندن به سرعت سنکرون

معایب: این موتورها به دو منبع DC و AC و وجود سیستم جاروبک - حلقه لغزان نیازمند هستند

در موتورهای سنکرون کم قدرت در سیستم های کنترل دستگاه های الکتریکی کوچک این عوامل به طور کامل یا نسبی حل شده اند.

درکاربرد های توان پایین سرعت ثابت با رفع این معایب موتورهای سنکرون تک فاز بسیار مناسب است.

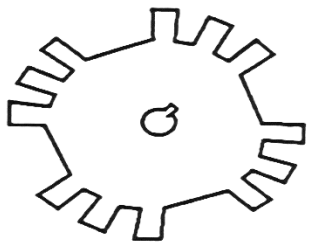
۳نوع موتور تک فاز پرکاربرد

- موتورهای سنکرون رلوکتاسی
- موتورهای زیر سنکرون
- موتورهای هیسترزیس

تمام موتورهای سنکرون تک فاز، ماشین های تک تحریکه محسوب میشوند.

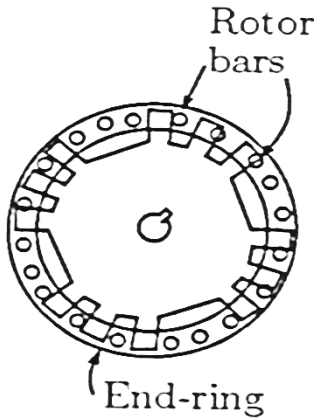
۶-۲- موتورهای رلوکتانسی تک فاز

- ❖ شبیه موتورهای تک فاز القایی اند با این تفاوت که در ساختمان رتور، مقداری عدم تقارن ایجاد میشود تا با حرکت رتور رلوکتانس دیده شده از دید شار میدان استاتور تغییر کند.
- ✓ عدم تقارن با برداشتن چند دندانه از رتور ایجاد می شود. البته برداشتن دندانه ها باید طوری باشد که تعداد قطب های مطلوب به دست آید.



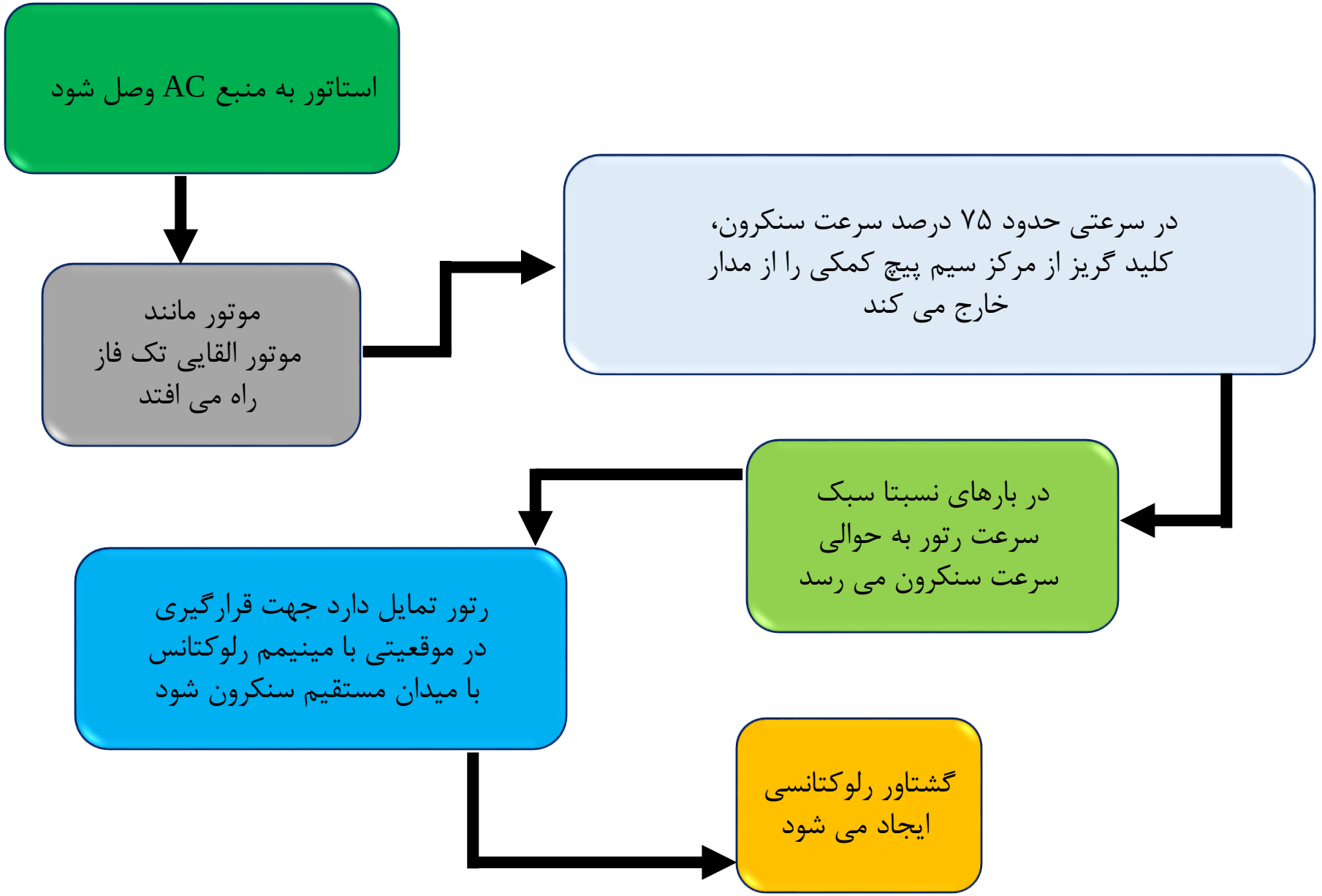
(الف)

- ❖ در شکل ب یک رتور چهار قطبی است، میله های رتور سنجابی و حلقه های انتهایی وجود دارند تا شبیه موتور القایی راه اندازی شوند. (شکل ب)
- ✓ استاتور موتورهای رلوکتانسی تک فاز حاوی سیم پیچ اصلی و کمکی است

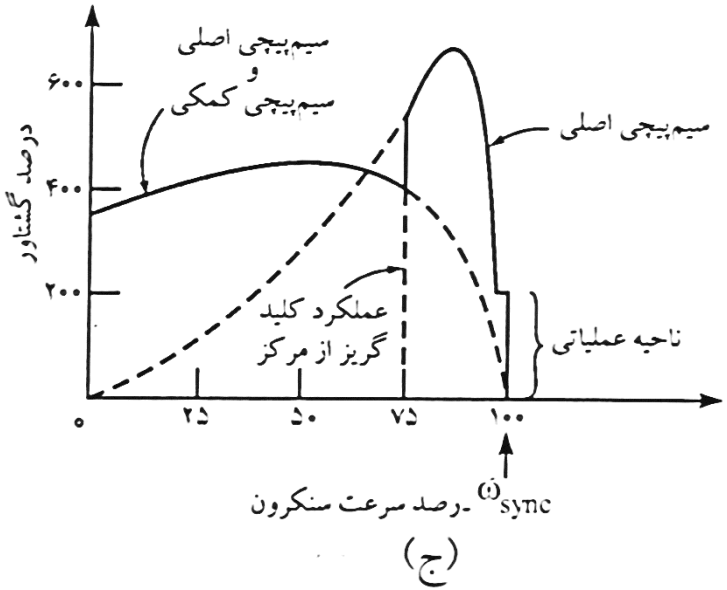


(ب)

➢ **شکل (۶-۱)**: الف) رتور سادهٔ موتور رلوکتانسی تک‌فاز، ب) رتور اصلاح شده قفس سنجابی با حلقه‌های انتهایی چهارقطبی ج) مشخصه گشتاور ـ سرعت. د) نوسانات گشتاور رلوکتانسی در لغزش کوچک


استاتور به منبع AC وصل شود
موتور مانند
موتور القایی تک فاز
راه می افتد
در سرعتی حدود ۷۵ درصد سرعت سنکرون،
کلید گریز از مرکز سیم پیچ کمکی را از مدار
خارج می کند
در بارهای نسبتا سبک
سرعت رتور به حوالی
سرعت سنکرون می رسد
رتور تمایل دارد جهت قرارگیری
در موقعیتی با مینیمم رلوکتانس
با میدان مستقیم سنکرون شود
گشتاور رلوکتانسی
ایجاد می شود

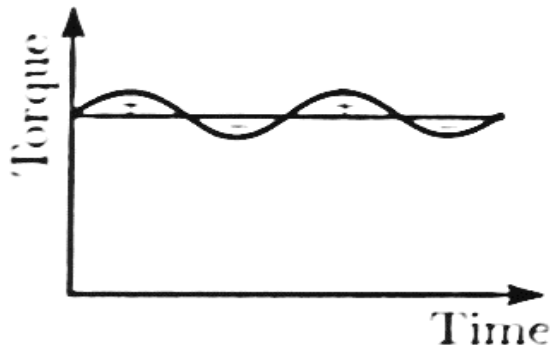
شکل ج مشخصه گشتاور - سرعت موتورهای تک فاز رلوکتانسی است. (شکل ج)



(ج)

شکل د در یک لغزش کوچک، گشتاور رلوکتانسی حاصل شامل: یک مولفه ثابت و یک مولفه نوسانی

- ✓ در طول نیم سیکل مثبت مولفه نوسانی ⟵ رتور شتاب
- ✓ در طول نیم سیکل منفی مولفه نوسانی ⟵ ترمز



(د)

- ❖ در شرایط مطلوب: رتور در طول نیم سیکل مثبت مولفه نوسانی گشتاور به سمت سنکرونیزاسیون (هل داده می شود) و با سرعت سنکرون به چرخش خود ادامه می دهد. اثر میدان دوار معکوس، کاهش گشتاور میدان مستقیم می باشد.
- ❖ موتورهای رلوکتانسی در مقایسه با موتورهای القایی تک فاز با ساختار رتور استوانه ای توان نامی حدود ۱/۳ الی ۱/۲ آنها را دارا می باشد.

➢ **شکل (۶-۱):** الف) رتور سادهٔ موتور رلوکتانسی تک‌فاز، ب) رتور اصلاح شده قفس سنجابی با حلقه‌های انتهایی چهارقطبی ج) مشخصه گشتاور ـ سرعت. د) نوسانات گشتاور رلوکتانسی در لغزش کوچک

❖ ضریب توان موتور رلوکتانسی کمتر القایی است، زیرا برای تحریک به جریان راکتیو زیادی نیاز ندارد.

❖ راندمان پایین ⟵ با این وجود در جاهایی که سرعت دقیق سنکرون مورد نیاز است همچون ساعت های الکتریکی و دیگر ابزارهای زمان سنجی کاربرد دارند.

❖ با توجه به برجستگی رتور گشتاور راه اندازی به طور چشم گیری به موقعیت رتور بستگی دارد.

✓ به نحوی که این نوع موتورها رفتار خاصی موسوم به cogging (درگیر شدن دندانه ها و شیارهای استاتور با برجستگی های رتور) از خود بروز می دهد.

❖ برای کمتر شدن این پدیده ⟵ میله های این رتور کج ساخته می شوند

شیارهای رتور مضرب درستی از تعداد قطب ها انتخاب نمی شود

✓ زیرا در موتورهای رلوکتانسی تحریک DC وجود ندارد ⟵ گشتاور max در مقایسه با سنکرون ⟵ با تحریک DC ⟵ کاهش می یابد.

✓ لذا: موتورهای رلوکتانسی به ازای یک توان معین، حجیم تر از موتورهای سنکرون با تحریک DC هستند اما نکته مثبت در رابطه با آن ها سادگی ساختمان، هزینه و سرویس و نگهداری کم می باشد.

۶-۲-۱- اصول کار موتور رلوکتانسی تک فاز

❖موتور رلوکتانسی نوعی موتور سنکرون است ← نیاز به سیم پیچ تحریک DC ندارد ← گشتاور ناشی از اختلاف رلوکتانس های طولی و عرضی فاصله هوایی است.

❖با توجه به فرمول می توان نشان داد هرگاه رلوکتانس فاصله هوایی تابعی از موقعیت زاویه ای رتور آن باشد. ایجاد یک میدان مغناطیسی می کند ← گشتاور رلوکتانسی ایجاد می شود.

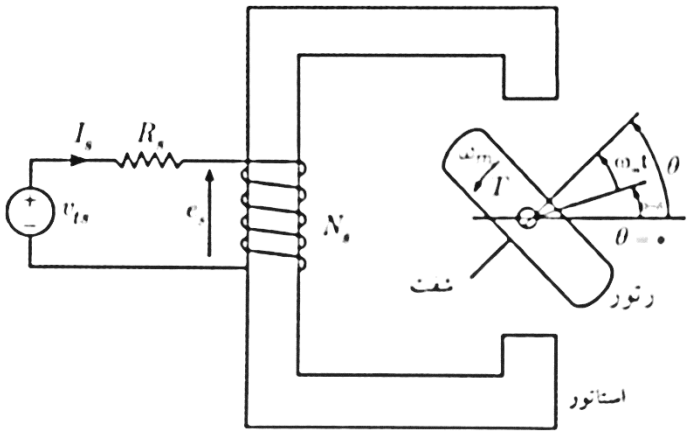
$$T_r = \frac{1}{2}\Phi^2\frac{dR}{d\theta} = -\frac{1}{2}\Phi^2\frac{P}{2}\frac{dR}{d\theta}$$

R = مقاومت مغناطیسی مدار θ = زاویه بین محور رتور و مبدا P = تعداد قطب Φ = شار

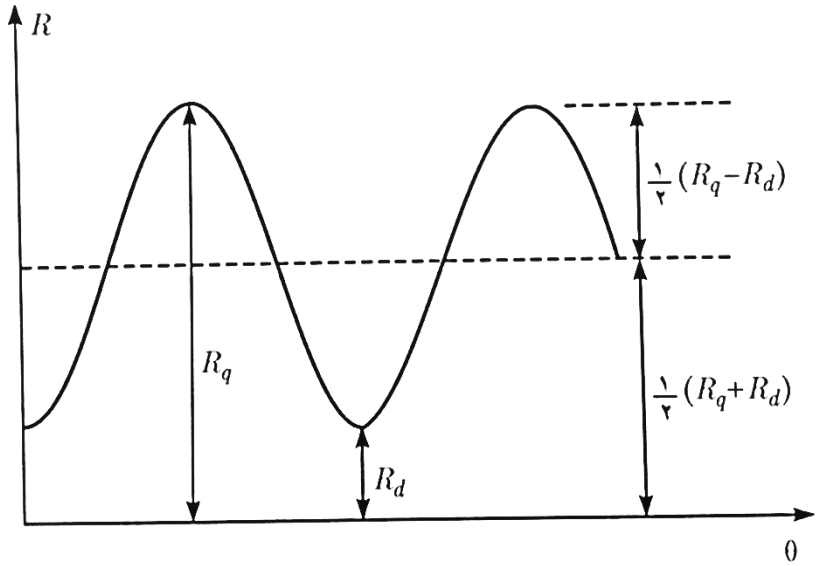
❖شکل (الف) ساده ترین ساختمان یک نوع موتور رلوکتانسی تک فاز دو قطبی (P = 2) را نشان می دهد.

❖R در حالت θ=0 حداقل و در $\theta = \pi/2$ حداکثر است.

❖نحوه تغییرات R بستگی به فرم هندسی فاصله ی هوایی دارد و نزدیک به فرم سینوسی است. (شکل ب)



➢ **شکل (۶-۲)**: ساده‌ترین ساختمان یک نوع موتور رلوکتانسی تک‌فاز دوقطبی



➢ **شکل (۶-۳)**: تغییرات رلوکتانس فاصلهٔ هوایی بر حسب موقعیت رتور

$R = a - b\,Cos2\theta$

تغییرات $\theta = \pi$ رادیان

$R_d = R\big|_{\theta=0} = a-b$

$R_q = R\big|_{\theta=\pi/2} = a+b$

R حداقل = Rd

R حداکثر = Rq

$a = 1/2\,(Rq + Rd)$

$b = 1/2\,(Rq - Rd)$

$R = 1/2\,(Rq + Rd) - 1/2\,(Rq - Rd)\,Cos2\theta$

جایگزینی مقدار R در معادله

$$T_r = -\frac{1}{4}\,\Phi^2\,(Rq - Rd)Sin2\theta$$

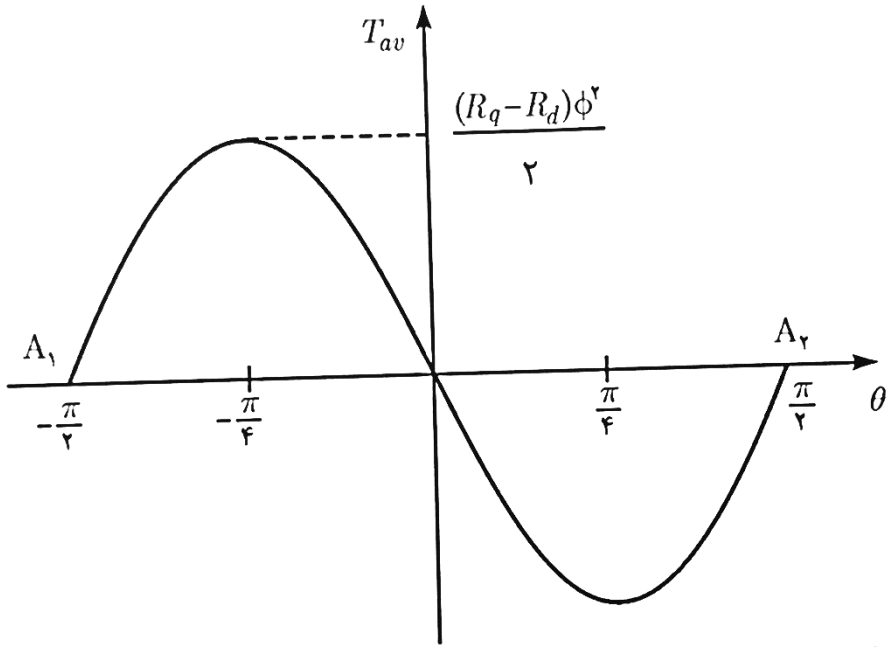
❖گشتاور رلوکتانسی با مجذور شار گذرنده از مدار مغناطیسی متناسب است.

❖با ↑ اختلاف رلوکتانس های طولی و عرضی ← گشتاور رلوکتانسی ↑

❖گشتاور تولیدی در نقاط $\theta = 0$ و $\theta = \pm\frac{\pi}{2}$ صفر است ← این نقاط را نقاط تعادل سیستم نامند.

❖$\theta = 0$ ← نقطه تعادل پایدار سیستم، محدوده ی $-\frac{\pi}{4} < \theta < +\frac{\pi}{4}$ محدوده ی پایدار نسبت به آن نقطه ← گشتاور به وجود آمده در خلاف جهت، سعی در برگرداندن رتور به حالت اول از انحراف دارد.

❖بر عکس نقاط متناظر با $\theta = \pm\frac{\pi}{2}$ نقاط تعادل ناپایدارند← شیب منحنی $T(\theta)$ مثبت و به محض انحراف رتور از چنین نقطه ای در هر جهت، گشتاور در همان جهت تولید ، رتور را به نقطه تعادل پایدار $\theta = 0$ بچرخاند.



➢ **شکل (۶-۴): تغییر گشتاور رلوکتانسی برحسب زاویهٔ θ**

❖فرض ← مدار شکل (۶-۲) با جریان DC تحریک شود ← فلوی میدان DC و گشتاور در جهت کاهش R عمل می کند،

❖ و محور رتور را به تعادل پایدار خود در $\theta = 0$ بچرخاند ← اگر گشتاور مخالفی (گشتاور بار) نباشد، رتور به $\theta = 0$ می رسد و متوقف می شود.

❖ ← با وجود گشتاور مخالف محور در زاویه ای متوقف می شود که گشتاور تولیدی = برابر باگشتاور مخالف

❖در نتیجه ← ساختار مغناطیسی تک تحریک، با تحریک منبع DC نمی تواند به عنوان یک مبدل الکترومکانیکی پیوسته عمل کند.

❖در صورتی که تحریک AC ← با ایجاد گشتاور مداوم به صورت یک مبدل الکترومکانیکی پیوسته کار می کند.

اگر یک منبع تغذیه سینوسی با ولتاژ $V(t)$باشد $V = Ri + e$; $V(+) = \sqrt{2}\ V\cos\omega t$

R = مقاومت اهمی i = جریان گزرنده e = نیروی محرکه القا شده

با صرف نظر کردن از R ← مقدار e سینوسی است ← فلوی سینوسی در مدار مغناطیسی $\Phi(t) = \Phi_m \sin\omega t$

معادله گشتاور لحظه ای تولیدی:

$$T_r = -\frac{1}{2}\,\Phi_m{}^2\, Sin^2\,\omega t\left(R_q - R_d\right) Sin2\theta$$

$$= -\frac{1}{4}\,\Phi_m{}^2\,(R_q - R_d)(Sin2\theta - Sin2\theta\, Cos2\omega t)$$

اگر رتور با سرعت زاویه ای ثابت ω_m در جهت θ در حال چرخش باشد:

$$\theta = \omega_m\, t + \delta$$

$$\theta(t=0) \triangleq \delta$$

$$T_r = -\frac{1}{4}\,\Phi_m{}^2\left(R_q - R_d\right)\{\mathrm{Sin2}\,(\omega_m\, t + \delta) - \frac{1}{2}\, Sin2[(\omega_m + \omega)t + \delta]$$

$$-\frac{1}{2}\, Sin2\,[(\omega_m - \omega)t + \delta]\}$$

مولفه های f وb میدان ضربانی تولید شده توسط تحریک AC با فرکانس ω رتور با سرعت سنکرون میچرخد

گشتاور لحظه ای دارای ۳ مولفه با تغییرات سینوسی است و مقدار آن در $\omega_m = \pm\omega$ مخالف صفر است

$$T_{r,av} = +\frac{1}{8}\,\Phi_m{}^2\,\left(R_q - R_d\right) Sin2\delta$$

چنانچه Rd = Rq باشد کوپل رلوکتانسی صفر است. همچنین موتور فاقد گشتاور راه اندازی است.

گشتاور متوسط تابعی از $Sin2\delta$ است و به δ زاویه گشتاور بار گفته می شود.

$$\Phi_m = \frac{V}{4.44Nf} = \frac{\sqrt{2}\ V}{2\pi f}$$

$$T_{r,av} = \frac{1}{4}\frac{V^2}{\omega}\left(\frac{R_q}{\omega N^2} - \frac{R_d}{\omega N^2}\right)\ Sin2\delta; 2\pi f = \omega$$

برای هر سیم $L = \frac{N^2}{R}$

$$X_{qq} = \omega L_{qq} = \omega\ {}^{N^2}/_{R_q}$$

$$X_{dd} = \omega L_{dd} = \omega\ {}^{N^2}/_{R_d}$$

در حالت رتوربا یک جفت قطب $\omega_{syn} = \omega$

$$T_{r,av} = \frac{1}{4}\frac{V^2}{\omega_{syn.}}\left(\frac{1}{X_{qq}} - \frac{1}{X_{dd}}\right)Sin2\delta$$

که در آن X_{qq} و X_{dd} به ترتیب راکتانس های سیم پیچی استاتور به ازای $\theta = 0$ و $\theta = \pi/2$

❖از آنجا که گشتاور متوسط موتورهای رلوکتانسی در هر سرعتی جز سنکرون صفر است پس موتورها باید به نحوی به سرعت سنکرون برسند،

این عمل با گذاشتن یک قفس سنجابی بر روی رتور ممکن می شود. ولی موتورهای القایی فاقد گشتاور راه اندازی است.

❖ بنابراین باید مثل موتورهای القایی راه اندازی شوند و سرعت آن باید نزدیک سرعت سنکرون شود و در صورت لزوم به سرعت سنکرون برسد و باقی بماند.

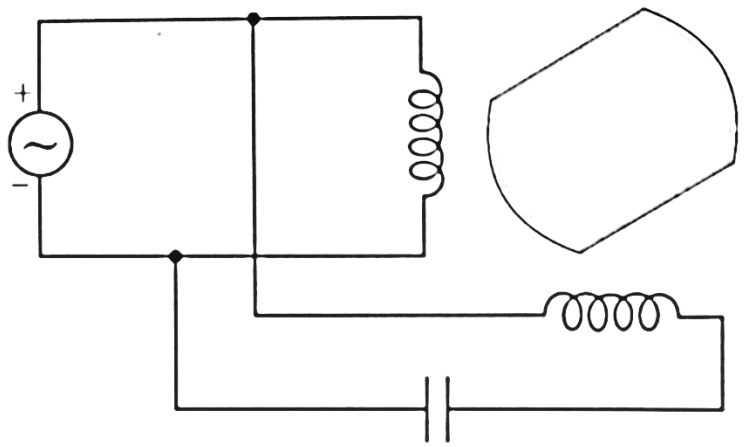
در شکل (۶-۵) موتور رلوکتانسی تک فاز با راه اندازی خازنی (دائم) با قرار دادن قفس سنجابی و سیم پیچ راه انداز، دو مولفه ی گشتاور تولید می شود

که ناشی از میدان های معکوس و مستقیم است. بعد از رسیدن به سرعت سنکرون مولفه مستقیم صفر و مولفه معکوس به صورت یک بار مکانیکی بر رتور تحمیل

می شود و گشتاور خروجی را کاهش می دهد.

معایب: دارای سر و صدای زیاد به علت وجود گشتاورهای

ضربانی با فرکانس ۲ و ۴ برابر، در موارد خاص مناسب نیست.



شکل (۶-۵): شمای یک موتور رلوکتانسی تک فاز با راه‌اندازی خازنی

۶-۳- موتورهای زیر سنکرون رلوکتانسی

شامل دو قطب استاتور ، تعداد زیاد زوج قطب (۸قطب) روی روتور و فاقد گشتاور راه اندازی و با چرخاندن با دست به سرعت سنکرون می رسد و میدان استاتور افزایش می یابد (این میدان دو قطب روبروی هم از رتور را جذب می‌کند)

به واسطه‌ی اینرسی، قطب های رتور بالای قطبهای استاتور قرار می‌گیرند ← شار استاتور= صفر ← معکوس می‌شود ← در حال افزایش در جهت معکوس ← جفت قطب‌های بعدی رتور را جذب می‌کنند ←

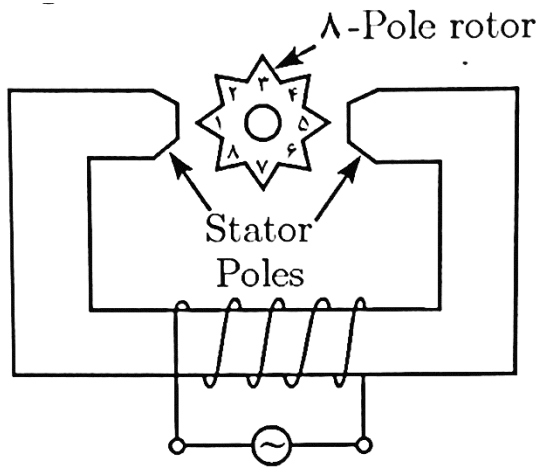
قطب های رتور و استاتور با هم قفل شده ← سرعت سنکرون به دست می آید.

در هر نیم سیکل یک جفت قطب رتور از جلوی دو قطب استاتور عبور می کند ← سرعت موتور توسط تعداد قطب های رتور تعیین می شود.

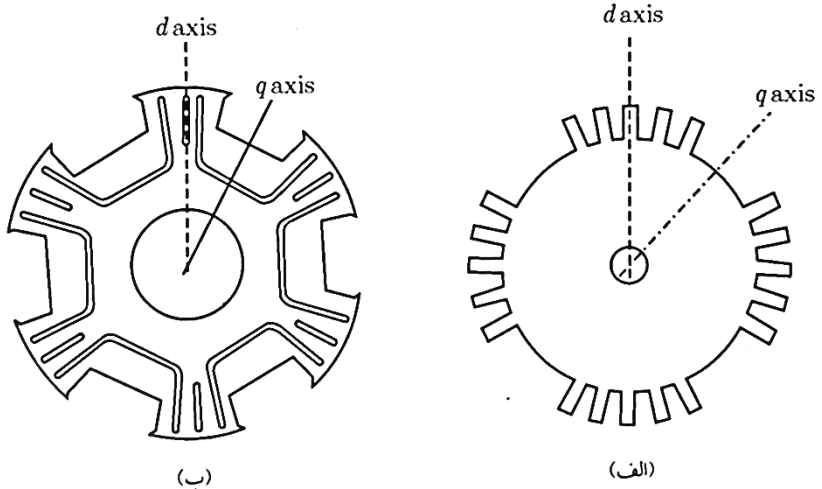
$$\text{سرعت رتور} = \frac{\text{فرکانس تغذیه} \times 120}{\text{تعداد قطب های رتور}}$$

چون سرعت رتور از سرعت سنکرون متناظر (با قطب استاتور) کمتر است ← موتور رلوکتانسی زیر سنکرون نامیده می شود.

در رتور ۸ قطبی ← سرعت چرخش به ازای فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز، ۷۵۰ rpm است.



➢ **شکل (۶-۶)**: شمای یک موتور رلوکتانسی زیر سنکرون



➢ **شکل (۶-۷)**: دو نمونه رتور برای موتور رلوکتانسی با سرعت زیر سنکرون

هنگامی که رتور سنکرون دارای P قطب باشد ⟵ دوره تناوب تغییرات مغناطیسی از π به $\frac{2\pi}{P}$ کاهش می یابد.

$$R = \frac{1}{2}(R_q + R_d) - \frac{1}{2}(R_q - R_d)\cos P\theta_m$$

$$T_r = -\frac{1}{2}\Phi^2 \frac{dR}{d\theta_m}, \quad \theta_m = \omega_m t + \delta_m$$

$$T_r = -\frac{1}{4}\Phi_m{}^2 \frac{P}{2}(R_q R_d)\{Sin(P\omega_m t + P\delta_m)$$

$$-\frac{1}{2}[Sin((P\omega_m + 2\omega)t + P\delta_m) + Sin((P\omega_m - 2\omega)t + P\delta_m)]$$

ω: فرکانس زاویه ای تغذیه $\omega_m = \pm\omega$ یا $\omega_m = \pm\frac{2\omega}{P}$

$$T_{r,av} = \frac{1}{8}\frac{PV^2}{\omega}\left(\frac{1}{X_{qq}} - \frac{1}{X_{dd}}\right) Sin(P\delta_m)\delta = \frac{P}{2}\delta_m$$

$\delta = \frac{P}{2}\delta_m$ گشتاور موتور P قطب در شرایط X_{dd} و X_{qq} غیر یکسان، p/2 برابرموتور رلوکتانسی با دو قطب باشد.

$$T_{r,av} = \frac{1}{8}\frac{PV^2}{\omega}\left(\frac{1}{X_{qq}}\frac{1}{X_{dd}}\right)Sin2\delta = \frac{1}{4}\frac{V^2}{\omega_{syn.}}\left(\frac{1}{X_{qq}}\frac{1}{X_{dd}}\right)Sin2\delta$$

۶-۴- موتورهای رلوکتانسی سه فاز

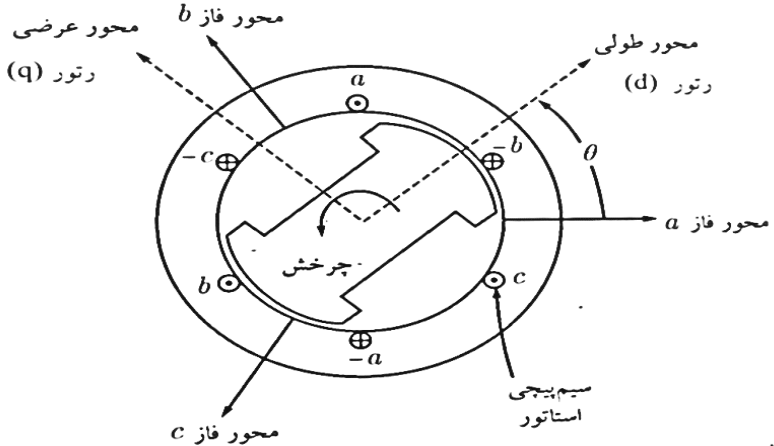
یک ساختار مغناطیسی ساده مانند شکل (۶-۲) ← می تواند یک مبدل الکترومکانیکی پیوسته کار کند ← مشروط بر اینکه از یک منبع متناوب تحریک گردد و قبلا به سرعت سنکرون رسیده باشد

به عبارت دیگر چنین ماشین ساده ای علاوه بر آنکه محور مغناطیسی میدان استاتور در آن ساکن است مانند یک موتور سنکرون عمل می کند.

با اضافه کردن دو امتداد ممغناطیسی دیگر در موقعیت های فضایی مناسب و تحریک آنها با سه فاز متقارن مقدار گشتاور تولیدی ↑ و کیفیت کار موتور ↑ می یابد. ← استاتوری کاملا شبیه استاتور ماشین سنکرون و القایی، رتور قطب برجسته (اما بدون سیم پیچ تحریک DC) را احاطه می کند. شکل (۶-۸) نمایی از سطح مقطع موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز ← که دارای رتوری قطب برجسته از مواد فرومغناطیس می باشد و استاتوری شبیه موتور القایی دارد که با پخش فضایی سینوسی هادی ها در سطح آن یک میدان مغناطیسی دوار در فاصله ی هوایی به وجود می آورد. محور مستقیم d ← مسیری است که کمترین رلوکتانس و محور q ← مسیری با ماکزیمم رلوکتانس می باشد.

اصول کار موتور سنکرون رلوکتانسی مشابه موتور سنکرون قطب برجسته معمولی می باشد با این تفاوت که سیم پیچ تحریکی بر روی رتور وجود ندارد و طبیعتاً گشتاور الکترومغناطیسی در این نوع موتور تنها شامل مولفه ی گشتاور تداخلی ناشی از عکس العمل دو میدان تولید نمی شود. لذا، عوامل موثر در تولید هرچه بیشتر گشتاور رلوکتانسی همچون تفاضل اندوکتانس های دو محوری یا ضریب برجستگی بزرگتر در طراحی بهینه این ماشین حائز اهمیت ویژه اند. از آنجا که مقدار اندوکتانس مغناطیس کنندگی با مجذور تعداد جفت قطب نسبت عکس دارد مقدار گشتاور رلوکتانسی تولیدی صرفاً برای تعداد زوج قطب های کوچک (۱ الی۳) قابل توجه است.

در شکل (۶-۸) سیم پیچ های تک حلقه روی استاتور نماینده سیم پیچ های گسترده ای با محورهای مغناطیسی است میدان دوار با سرعت سنکرون در فاصله ی هوایی می چرخد. وقتی رتور به طور سنکرون با میدان گردان فاصله ی هوایی می چرخد گشتاور تولیدی تلاش می کند تا مسیر رلوکتانس مینیمم را با میدان گردان فاصله ی هوایی هم امتداد سازد. زمانی که بار بر روی موتور قرار گیرد رتور از میدان فاصله ی هوایی عقب می افتد و دیگر مسیر رلوکتانس مینیمم با میدان فاصله ی هوایی هم امتداد نیست. در این لحظه، گشتاور الکترومغناطیسی سعی می کند هم امتدادی مسیر رلوکتانس مینیمم و میدان گردان فاصله ی هوایی را برقرار سازد. این گشتاور، معادل و مخالف جهت گشتاور بار است و موجب می شود رتور سرعت سنکرون خود را بازیابد.شکل (۶-۸): اساس ساختمان موتور سنکرون رلوکتانسی دو قطبی سه فاز



۶-۸): اساس ساختمان موتور سنکرون رلوکتانسی دو قطبی سه فاز

❖ در یک ماشین سنکرون با قطب برجسته هم مولفه ی گشتاور تداخلی و هم مولفه ی گشتاور رلوکتانسی وجود دارد:

$$T = \left(\frac{3V_t\,E_f}{X_d}\,\mathrm{Sin}\delta + 3\,\frac{X_d - X_q}{2X_d\,X_q}\,V_t{}^2\mathrm{Sin}2\delta\right)\Big/\omega_{syn.}$$

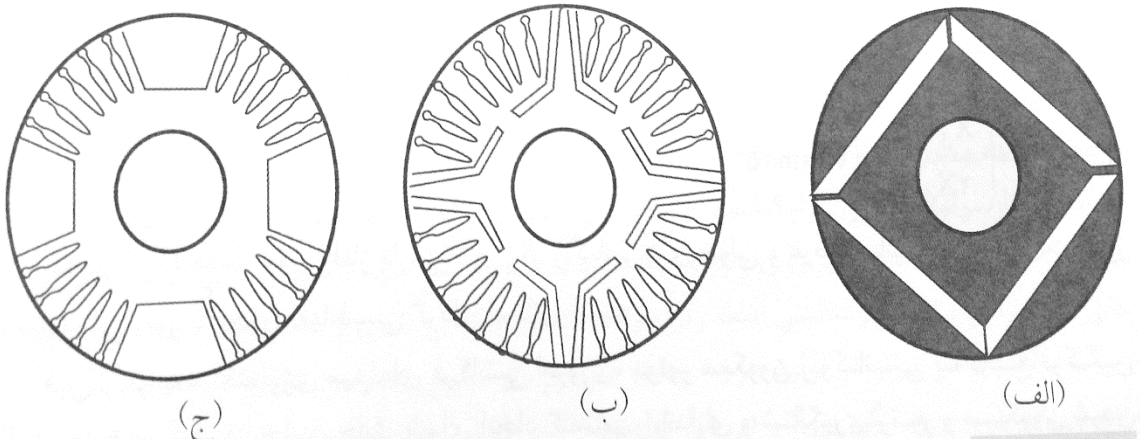
❖ ولی در موتور رلوکتانسی به علت نبودن جریان تحریک در رتور ($E_f = 0$) گشتاور تداخلی صفر است و فقط کوپل رلوکتانسی وجود دارد.بنابراین:

$$T_r = \frac{3}{\omega_{syn.}}\left(\frac{X_d - X_q}{2X_d\,X_q}\right)V^2 Sin2\delta$$

❖ که در آن،v مقدار موثر ولتاژ فاز X_d و X_q راکتانس های طولی و عرضی ماشین و δ زاویه محور مغناطیسی رتور با محور مغناطیسی گردان استاتور است.

قبل از توسعه تکنولوژی مبدل های فرکانسی امروزی، موتور سنکرون رلوکتانسی با منبع فرکانس ثابت تغذیه می شد. در چنین حالتی ← برای ایجاد گشتاور راه اندازی و شتابگیری رتور و سنکرون شدن آن با میدان دوار فاصله هوایی،وجود یک قفس سنجابی بر روی رتور اجتناب ناپذیر است. ↑ استحکام مکانیکی رتور، میراکنندگی نوسانات سرعت و حفظ سنکرونیزاسیون تحت گشتاور بارهای ضربه ای، ↑ سرعت تغییر گشتاور و تسهیل در کنترل سرعت موتور در حالت های گذرا با وجود نوسان در گشتاور بار از دیگر مزایای وجود قفس بر روی رتور می باشد. اما در طرح های اولیه رتور- که اغلب با حذف چندین دندانه از رتور موتور القایی معمولی به دست می آمدند وصرفاً برای توان های خروجی نسبتاً کم کاربرد داشتند - وجود قفس مانع از دستیابی به ضریب اندوکتانس بالا گردیده و عملکرد ضعیفی از این نوع موتور ارائه می نمود. موتور سنکرون رلوکتانسی با راه اندازی خط در دهه ۱۹۶۰ مقارن با رشد صنایع ریسندگی و بافندگی توسعه یافت.

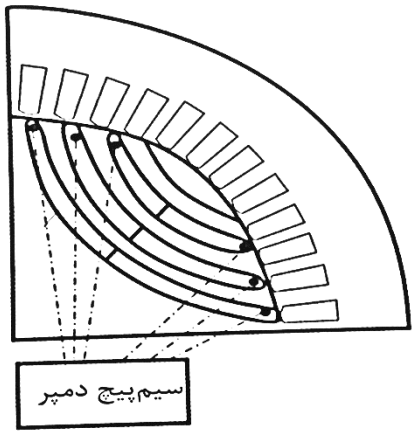
شکل(۶-۹)،نمونه هایی از رتورهای اولیه را نشان می دهدکه مبتنی بر تغییر در رتور قفس سنجابی موتور القایی با هدف ایجاد عدم تقارن رلوکتانسی درآن می باشد در شکل(۶-۱۰) رتوری با ضریب برجستگی بالا مبتنی بر چند لایه سد شار طراحی و سپس قفس یا سیم پیچ دمپر در حفره های سد جاسازی شده است هنگام تغذیه این موتور با کانورتر، محتوای هارمونیک های زمانی جریان استاتور، هارمونیک های فضایی نیروی محرکهٔ الکتریکی استاتور و تغییرات رلوکتانسی فاصلهٔ هوایی، جریانی را در دمپر القاء می کنند.



➢ **شکل (۶-۹):** نمونه‌ای از طرحهای رتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی با راه‌اندازی خط، الف) رتور صلب با یک سد شار؛ ب و ج) رتور مورق تغییر یافته موتور القایی

توجه : بزرگ بودن ضریب برجستگی،ضریب توان بهتر و راندمان بالاتر را برای موتور سنکرون رلوکتانسی به ارمغان میآورد سبب شده محققین طرح های رتور را با هدف دستیابی به حداکثر نسبت اندوکتانس ها تکامل بخشند.طرح مقدماتی شکل (۶-۱۱) به واسطهٔ فاصلهٔ هوایی بزرگ اندوکتانس کوچکی در راستای q ایجاد می کند اما در عین حال اندوکتانس محور d کوچک باقی می ماند و در نتیجه نسبت اندوکتانس در رنج ۲ الی ۳ قرار می گیرد. بدیهی است که این نوع رتو، نتایج رضایت بخشی که بتواند موتور سنکرون رلوکتانسی را قابل مقایسه با موتور القایی نماید در پی ندارد. برای دستیابی به ضریب برجستگی بزرگ، دو طرح تکامل یافته رتور پیشنهاد شده که از لحاظ فرایند ساخت متفاوتند:

۱-روتور مورق شده در راستای شعاع (TLA)　　۲- رتور مورق شده در راستای محور (ALA)



➢ **شکل (۶-۱۰):** رتوری با ضریب برجستگی بالا مبتنی بر چند لایه سد شار و قفس یا سیم‌پیچ دمپر جاسازی شده در حفره‌های سد

❖ رتورهای نوع TLA از صفحات صاف استاندارد فرومغناطیسی ساخته می شوند شکل (۶ـ۱۱ـ ب) بخش هایی ازآن برداشته یا سوراخ شده اند تا مسیرهای خاصی برای شار بوجود آید.

❖ در رتور نوع ALA، ورقه ای فرومغناطیسی و غیر فرومغناطیس به شکل U و V خم می شوند و به موازات شافت رتور در میان هم قرار می گیرند.

✓ باریکه های فرومغناطیسی اتصال دهندهٔ بخش های سوراخ شده در رتور نوع TLA که وظیفه حفظ مقاومت مکانیکی رتور را در قبال نیروی گریز از مرکز در سرعت های بالا بر عهده دارند رلوکتانس محور q را می کاهند و بدین ترتیب این نوع رتور در قیاس با نوع ALA که نیازی به باریکه ها ندارد ضریب برجستگی پائین تری دارد. باریکه های مغناطیسی در دور تا دور هر ورق این مزیت را دارند که سطح رتور را هموار سازند و در نتیجه میزان هارمونیک های شار فاصلهٔ هوایی کاهش می یابد. سدها، شار محور q را کاسته و بالطبع ضریب برجستگی را افزایش می دهند.

✓ روتور نوع TLA می تواند با استفاده از تکنیک های تولید انبوه رتور قفس سنجابی موتور های القایی ساخته شود. برای این منظور ورقه های فولادی، استوانه مورقی را تشکیل می دهند و سپس سدهای شار با آلومینیوم یا یک ماده غیر فرومغناطیس پر می شوند. اختلاف این ساختار با رتور قفس سنجابی در عدم وجود حلقه های انتهایی می باشد.

❖ با توجه به تلفات سطح رتور ناشی از هارمونیک های فضایی فاصله هوایی، استفاده از ورق های نازک در رتور نوع TLA موثر است. اما دستیابی به بالاترین ضرائب برجستگی ممکن با این نوع رتور مقدور نمی باشد.

✓ ساختار نوع ALA این مکان را فراهم می کند که از تعداد بی شماری سد شار استفاده شود و هیچ گونه باریکه داخلی یا مماسی در پیرامون رتور به کار گرفته نشود و لذا دستیابی به حداکثر ضریب برجستگی امکان پذیر باشد (شکل ۶ـ۱۱ـج). تعداد خیلی زیاد سد شار، محتوای هارمونیک های فضایی فاصلهٔ هوایی و ریپل گشتاور و تلفات آهن را می کاهد. دهانه های شیارهای استاتور باعث تغییرات چگالی شار فاصلهٔ هوایی شده و جریان های فوکو را در ساختار ALA القاء می کنند. بنابراین ورقه ها باید نازک و با مقاومت الکتریکی بالا باشند. با این وجود، ساختار رتور ALA به واسطهٔ لزوم خمکاری دقیق و مونتاژ پیچیده، پرهزینه است و تا کنون صرفاً برای تحقیقات و به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است.

✓ در سال ۱۹۹۹ آقای Bomela با اُریب ساختن رتور موتور سنکرون رلوکتانسی به اندازه یک گام قطب، ریپل گشتاور را به طور چشمگیری کاهش داد. این راهکار تاثیر اندکی بر روی گشتاور متوسط موتور دارد. اُریب ساختن رتورTLA به مراتب از نوع ALA راحت تر است.

❖ در تعداد قابل توجهی از این مقالات،راندمان synRM بهتر از موتور القایی گزارش شده است در حالیکه ضریب توان آن کمتر است.

ضریب توان synRM با افزایش اندوکتانس محور d یا کاهش اندوکتانس محور q و یا در مجموع با افزایش ضریب برجستکی بهبود می یابد.

برای افزایش اندوکتانس مغناطیس کنندگی محور d و ارتقاء ضریب توان به مقدار قابل قبول،لازم است تا فاصلهٔ هوایی موتور سنکرون رلوکتانسی از موتور القایی کوچکتر باشد.اما کاهش طول فاصلهٔ هوایی تبعات زیر را در پی دارد:

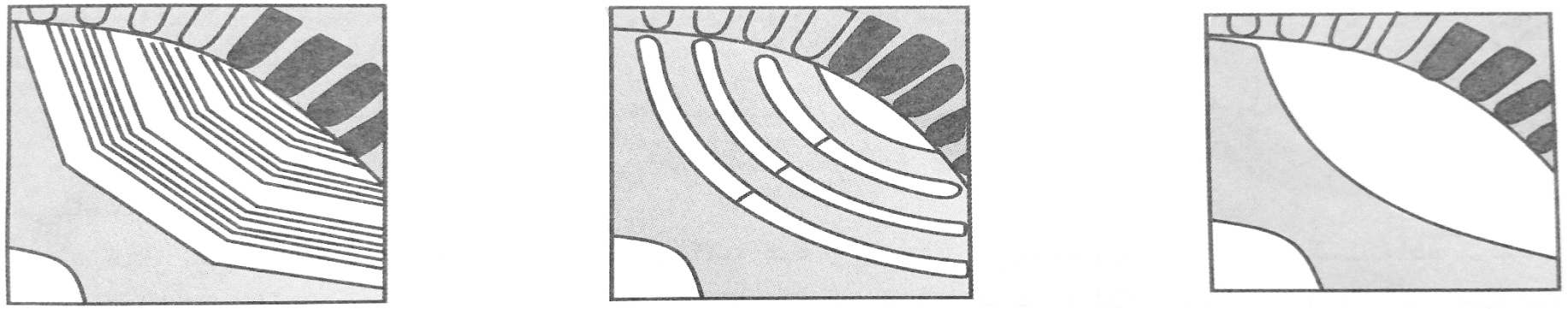
۱) ساخت synRM باید با دقت بیشتری انجام پذیرد و این مساله احتمالاً هزینه تولید را بالاتر از ساخت موتور القایی می برد.

۲) در عین حال که فاصله هوایی کاسته شده است تلفات سطح رتور ناشی از هارمونیک های فضایی فاصلهٔ هوایی افزایش می یابد.این امر،استفاده از مواد با کیفیت بالاتر برای مدار مغناطیسی و قیمت تمام شده بیشتر را در پی دارد.همچنین نیاز به شیارهای گوه مانند یا روشهای دیگر جهت هموارسازی چگالی شار فاصلهٔ هوایی می باشد.

چنانچه اندوکتانس محور q خیلی کوچک گردد بعضی مشکلات در مدار الکترونیک قدرت پیش می آید.به عنوان مثال،به منظور اجتناب از ریپل زیاد در جریان محور q باید فرکانس کلیدزنی را بالا برد.

اگر چه تلفات اهمی رتور موتور القایی از تلفات آهن سطح رتور موتور سنکرون رلوکتانسی بیشتر است اما ممکن است تلفات کلی synRM معادل و یا حتی بیشتر از تلفات موتور القایی گردد زیرا کوچکتر بودن ضریب توان در موتور سنکرون رلوکتانسی، تلفات اهمی استاتور این موتور را می افزاید. لذا،پیشنهاد میگردد مدار مغناطیسی رتور از مواد آهنی بهتری ساخته شود.

شکل (۶-۱۱):ساختارهای مختلف رتور؛الف)رتور اولیه،ب)رتور نوع TLA ج)رتور نوعALA



➢ شکل (۶-۱۱): ساختارهای مختلف رتور؛ الف) رتور اولیه، ب) رتور نوع TLA، ج) رتور نوع ALA

۶-۴-۱ مقایسهٔ موتور سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورها

نتایج نشان می دهند که در دمای نامی سیم پیچ ها، موتور سنکرون رلوکتانسی بطور پیوسته گشتاور بیشتر و توان بیشتری تحویل می دهد اما موتور القایی از نقطه نظر قابلیت تضعیف شار دارای مزیت است بدین معنا که رنج سرعت آن در ناحیه توان ثابت وسیعتر است. به علاوه، موتور القایی دارای ضریب توان نامی بالاتری است.

مقادیر نامی موتور سنکرون رلوکتانسی ساخته شده است. به ازای سیستم تهویه یکسان، فقدان تلفات ژولی رتور در موتور سنکرون رلوکتانسی، جریان پیوسته نامی بالاتری را در مقایسه با موتور القایی متناظر مجاز می شمارد و در نتیجه گشتاور و یا توان بیشتری تولید می شود .این موضوع به خوبی در جدول ۶ـ۱ دیده می شود.

جدول ۶-۱: مقایسه مقادیر نامی موتور سنکرون رلوکتانسی ساخته شده و موتور القایی متناظر (سال ۲۰۰۹)

	Continuous Power [kW]	Speed range [rpm]	Rated Voltage [V]-line	Rated Curent [A]	Power factor at 1000 rpm	notes
SynRM motor	۲۳۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۳۸۰	۲۰۰	۰/۷۵	3 pole pairs Star connected
Induction Motor	۲۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۳۸۰	۲۲۰	۰/۸۵	

مزایای موتور سنکرون رلوکتانسی در مقایسه با سایر موتورها را میتوان به صورت زیر برشمرد:

۱ـ به واسطه چرخش با سرعت سنکرون و برجسته بودن رتور موتور سنکرون رلوکتانسی امکان تولید درایوهای بدون حسگر مکانیکی با دقت بالا وجود دارد.موتور سنکرون رلوکتانسی از نقطه نظر دقت و سهولت کنترل بدون حسگر بخصوص در سرعت های خیلی پائین و حتی صفر بر موتور القایی رجحان دارد. حذف سنسور موقعیت یا سرعت،هزینه درایو را کاهش داده و قابلیت اطمینان آن را می افزاید.

۲- موتور سنکرون رلوکتانسی دارای ساختار رتور ساده ای هستند و اساساً در کاربرد های با درایوهای اینورتری،نیازی به قفس راه انداز ندارند.لذا،عموماً از تلفات رتور به واسطه عدم حضور قفس صرف نظر می گردد.در نتیجه دمای موتور صرفاً به واسطهٔ تلفات استاتور بالا می رود و انتقال حرارت از طریقه بدنه موتور به محیط اطراف صورت می گیرد.در نتیجه بر روی بدنه این نوع موتورها می توان حفاظت مطمئن در قبال اضافه بار قرار داد زیرا دمای قسمت تولید کننده گرما به طور مستقیم قابل اندازه گیری و کنترل است.به علاوه به ازای یک دمای معین برای سیم پیچهای استاتور،بین ۱۰تا ۲۵ درصد (بسته به توان نامی موتور و میزان اهمیت تلفات اهمی رتور موتور القایی)گشتاور بیشتری می توان از موتور سنکرون رلوکتانسی در مقایسه با موتور القایی به دست آورد.

۳- استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی کاملاً مشابه استاتور ماشین القایی است و از این جنبه نیازی به خط تولید جداگانه نمی باشد.

۴- برخلاف موتور القایی در مورد موتور سنکرون رلوکتانسی نیازی به محاسبه لغزش نیست و دینامیک رتور و ثابت زمانی آن دخالتی در کنترل این نوع موتور ندارند.در نتیجه،کنترل درایو موتور سنکرون رلوکتانسی ساده تر از نوع القایی است.

۵- هنگامی که فرکانس موتور القایی تغذیه شونده با مبدل کاسته می گردد مقدار پریونیتی لغزش افزایش می یابد و راندمان موتور را تضعیف می کند. در این حالت، چرخش سنکرون یک مزیت است. این بدان معناست که در کاربردهای سرعت پائین، موتور سنکرون رلوکتانسی از نقطه نظر راندمان در جایگاه بالاتر و برجسته تری از موتور القایی قرار دارد.

۶- موتورهای سنکرون رلوکتانسی فاقد قفس راه انداز دارای اینرسی کم و نسبت گشتاور به اینرسی بالایی می باشند و بالطبع برای کاربردهای سرو مناسبند.

۷- موتور سنکرون رلوکتانسی به واسطهٔ پخش فضایی سینوسی هادی ها در سطح استاتور دارای نیروی محرکه مغناطیسی گردان در فاصلهٔ هوایی می باشد و لذا با مشکل ضربان های شدید گشتاور و نویز صوتی زیاد که از معایب عمده موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شونده است مواجه نیست.

۸- حالت های گذرای شدید در هنگام اعمال گشتاور بار و نیز دمای بیش از حد موتور می تواند موجب از بین رفتن خاصیت مغناطیسی آهن ربای دائم بکار رفته در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم گردد. به علاوه سرعت بیش از حد رتور ممکن است باعث جدا شدن آهن رباها از روی رتور به واسطه نیروی گریز از مرکز شود.همچنین مونتاژ نمودن رتور آهنربادار و جاسازی آن در داخل استاتور به خاطر جاذبه شدید بین رتور و بدنه داخلی استاتور،کار دشواری است.

✓ از انجایی که روتور موتور سنکرون رلوکتانسی فاقد هرگونه مغناطیس دائم بوده و دارای استحکام مکانیکی بالایی است در مقایسه با موتور های سنکرون مغناطیس دائم برای کاربردهای سرعت بالا و محیط های با دمای زیاد ارجح می باشد. همچنین، تضعیف شار این موتور در مقایسه با PMSM به مراتب آسانتر محقق می شود.به علاوه،به خاطر عدم وجود آهنربا بر روی رتور موتور سنکرون رلوکتانسی،قیمت تمام شده این نوع موتور کمتر از موتور سنکرون مغناطیس دائم مشابه خواهد بود.

۹- با به کارگیری آهنربای دائم در رتور موتور سنکرون رلوکتانسی (PMASynRM)، ضریب قدرت موتور بهبود و نتیجتاً جریان استاتور کاهش می یابد. این امر به نوبهٔ خود تلفات اهمی استاتور را می کاهد و بدین ترتیب، راندمان SynRM نیز ارتقاء می یابد.از طرف دیگر، وجود مولفهٔ گشتاور رلوکتانسی قابل توجه در این موتور، مقدار آهن ربای گرانبهای مورد نیاز را جهت حصول یک گشتاور معین می کاهد و در نتیجه راه حل ارزانتری در مقایسه با موتور مغناطیس دائم ارائه می دهد.

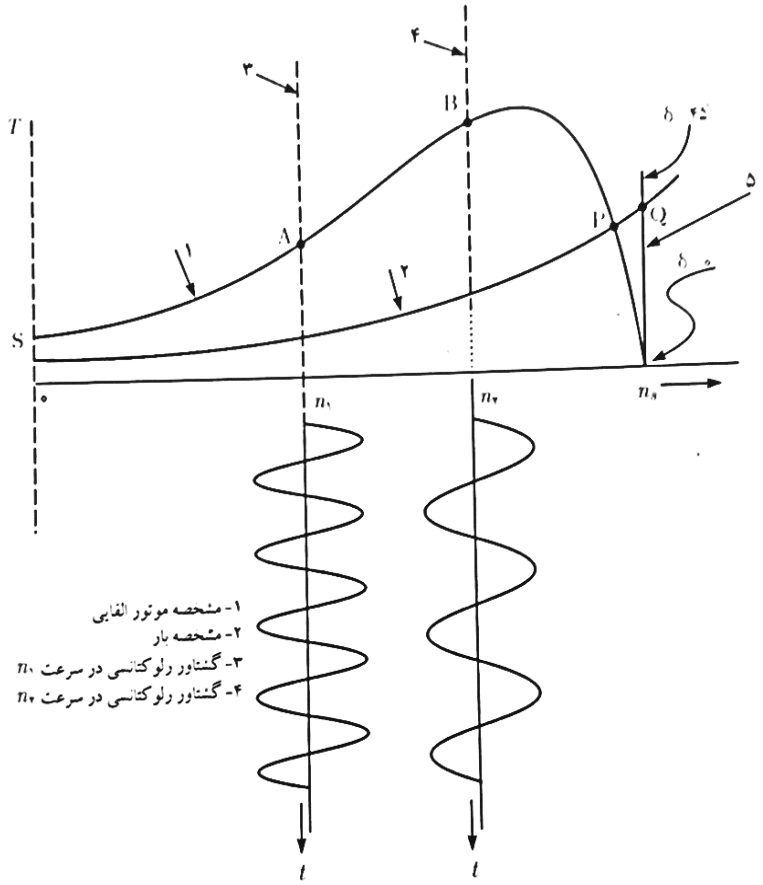
از جمله معایب موتورهای سنکرون رلوکتانسی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در مقایسه با موتور های مغناطیس دائم و رلوکتانس سوئیچ شونده،در سرعت های پائین گشتاور و نسبت گشتاور به اینرسی کمتری دارند.به علاوه،برای اطمینان ازورود موتور به حالت سنکرونیزم،می بایست بار مکانیکی روی شافت در لحظه راه اندازی به اندازه کافی کمتر از بار نامی باشد.
- گشتاور و بازده آنها در بار کامل و ناحیه توان ثابت نسبت به ماشین های مغناطیس دائم کمتر است.
- ضریب توان موتور سنکرون رلوکتانسی در بار نامی کمتر از موتور القایی است.اما در بارهای کمتر،این اختلاف کاهش می یابد و این امکان وجود دارد که در بعضی بارهای جزیی،موتور سنکرون رلوکتانسی ضریب توان بهتری نسبت به موتور القایی ارائه دهد.

۶-۴-۲- فرآیند راه اندازی موتور رلوکتانسی سه فاز با راه انداز القایی

موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز فاقد گشتاور راه اندازی است.به علاوه قبل از آنکه بتواند به صورت مستقل گشتاور رلوکتانسی تولید نماید باید سرعت آن به سرعت سنکرون رسانده شود.فرایند راه اندازی و رساندن به مود سنکرون معمولاً با تعبیهٔ یک قفس سنجابی بر روی رتور امکان پذیر است. با فرض سینوسی بودن تغییرات R بر حسب زاویه و به هنگام چرخش رتور با سرعت ω_m ،اندازهٔ گشتاور لحظه ای به صوت زیر خواهد بود: $T = -K \sin(2(\omega_s \pm \omega_m)t + 2\delta)$ که مشابه هر یک از جملات دوم یا سوم معادلهٔ (۶-۱۰) است.در این موتور چون استاتور شکل استوانه ای دارد جملهٔ متناظر با جملهٔ اول رابطه (۶-۱۰) ظاهر نمی گردد.به علاوه بر حسب جهت چرخش میدان گردان،تنها یکی از دو جمله دوم یا سوم ظاهر می شود و در نتیجه مقدار گشتاور لحظه ای این موتور در سرعت سنکرون فاقد ضربان های هارمونیک های دوم و چهارم است و بسیار کم سر و صداتر از ماشین رلوکتانسی نوع تکفاز کار می کند.

با توجه به معادله (۶-۲۲) تا قبل از رسیدن سرعت به $\omega_m = \omega_s$ رلوکتانسی با فرکانس $۲(\omega_m = \omega_s)$ نوسان می کند و در نتیجه فرکانس نوسان در لحظه راه اندازی حداکثر می باشد و با دور گرفتن موتور کاهش می یابد. بنابراین گشتاور رلوکتانسی تولید شده در این محدوده سرعت، دارای یک مولفه - نوسانی با مقدار متوسط صفر است. شکل (۶-۱۲) نمونه ای از مشخصه کلی گشتاور – سرعت یک موتور سنکرون رلوکتانسی ۳ فاز با راه انداز القایی ر ا نشان می دهد.



➢ **شکل (۶-۱۲):** : نمونه‌ای از مشخصهٔ کلی گشتاور ـ سرعت یک موتور رلوکتانسی سه فاز با راه‌انداز القایی

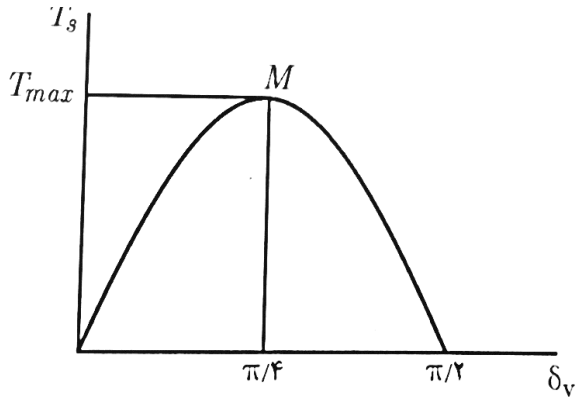
در این شکل نوسانات گشتاور در سرعت های صفر، n1 و n2 متانظر با نقاط A و B با خط چین مشخص شده اند. با توجه به شکل (۶-۱۲) چنانچه گشتاور رلوکتانسی وجود نمی داشت نقطه کار موتور در P تثبیت می شد و موتور دارای بار سرعت n به حالت ماندگار خود می رسید؛ ولی از آنجا که فرکانس نوسانات گشتاور رلوکتانسی در این سرعت بسیار کم است چنین حالتی پیش نمی آید. در چنین سرعتی، گشتاور بار و گشتاور القایی همدیگر را خنثی میکنند و گشتاور رلوکتانسی به عنوان گشتاور شتاب دهنده (اعم از مثبت و منفی) روی محور باقی میماند. لذا این گشتاور در نیمه مثبت سیکل تغییرات خود، به افزایش سرعت موتور اقدام میکند در حالی که در نیمه منفی در جهت عکس عمل می کند. بنابراین میتوان یک نوسان سرعت در حالی n انتظار داشت. اگر معادله ی دینامیکی حرکت قسمت گردان (اعم از رتور، بار و ...) به صورت خلاصه با فرض :

$T_a = Jd\omega/dt$ می توان تغییر سرعت در هر نیم سیکل گشتاور رلوکتانسی را به صورت زیر به دست آورد: $\Delta\omega = \int_{t_1}^{t_1+\frac{T}{2}} T_a \ dt/J$

در روابط فوق، j ممان اینرسی قسمت گردان و Ta گشتاور شتاب دهنده است. اگر سرعت رتور در یکی از نوسانات خود در جهت مثبت به ns برسد مولفه القایی گشتاور صفر می شود و به علت صفر شدن لغزش، نوسانات گشتاور رلوکتانسی نیز متوقف می گردد. بدین ترتیب موتور به سرعت سنکرون می رسد و با گشتاور رلوکتانسی و در نقطه کار Q به چرخش خود ادامه می دهد. چگونگی به سنکرون رسیدن سرعت این موتور، بیانگر این واقعیت است که شرایط لازم فراهم نگردد این موتور هرگز به سرعت سنکرون نخواهد رسید.

به عنوان مثال، اگر موتور زیر بار سنگینی را ه اندازی شود به طوری که لغزش متناظر با نقطه کار P در شکل(۶-۱۲) زیاد باشد، علاوه بر آن که اندازه $\Delta\omega$ لازم، برای رسیدن به دور سنکرون افزایش می یابد، به علت بالا رفتن لغزش، فرکانسهای نوسانات گشتاوررلوکتانسی نیز افزایش می یابد و مدت زمان T در رابطه (۶-۲۴) نیز کاهش می یابد. طبق رابطه فوق مقدار اینرسی قسمت گردان نیز در این مورد نقش مهمی دارد.لذا برای آنکه احتمال رسیدن موتور به سرعت سنکرون افزایش یابد ترجیحا در حالت بی باری راه اندازی می شود.

شکل (۶-۱۳) مشخصه گشتاور موتور سنکرون رلوکتانسی را پس از رسیدن به سرعت سنکرون بر حسب تغییرات زاویه ی بار δ نشان میدهد.

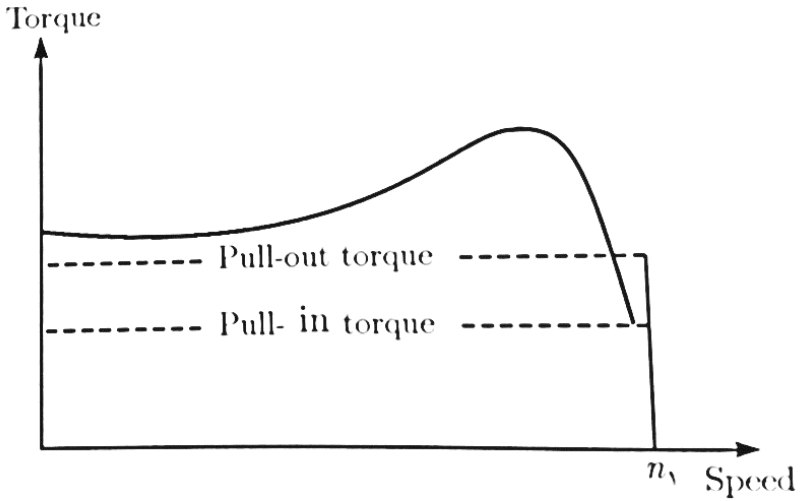


➢ **شکل (۶-۱۳):** مشخصهٔ گشتاور ـ زاویه بار در موتور سنکرون رلوکتانسی

این مشخصه متناظر با سرعت ns طبق شکل (۶-۱۳) است. چنانچه ملاحظه می شود با افزایش گشتاور بار، زاویه بار نیز آنقدر زیاد می شود تا ماشین گشتاور رلوکتانسی لازم را تولید کند اگر گشتاور بار از حداکثر گشتاور رلوکتانسی تجاوز کند موتور از حالت سنکرون خارج میشود و به صورت موتور القایی به کار خود ادامه میدهد.در این هنگام نوسانات گشتاور رلوکتانسی نیز مجددا پدیدار شده و موجب نوسانات سرعت و سر و صدای موتور میشود. این عمل همچنین نوسانات شدید جریان الکتریکی را به همراه می آورد که در مجموع مانع از کارکرد رضایت بخش موتور می گردد

موتور به طور پیوسته به عملکرد خود به طور سنگین ادامه می دهد مشروط بر اینکه گشتاور بار از گشتاور خروج از سنکرون تجاوز نکند.

گشتاور خروج از سنکرون، گشتاور بار مورد نیاز برای خارج کردن موتور از حالت سنکرون است. گشتاور ورود به سنکرون، توانایی موتور در وارد شدن به حالت سنکرون به هنگام تغییر از حالت کار موتور القایی به موتور سنکرون را نشان می دهد. بدیهی است در صورتی که گشتاور بار از گشتاور ورود به سنکرون بیشتر باشد سرعت موتور به سرعت سنکرون نخواهد رسید. مفهوم این دو گشتاور، بر روی مشخصه گشتاور-سرعت نوعی یک موتور رلوکتانسی در شکل(۶-۱۴) به تصویر کشیده شده است.



➢ **شکل (۶-۱۴):** مفهوم خروج و ورود به حالت سنکرون

۶-۵- موتور هیسترزیس

۶-۵-۱- اصول کار

موتور القایی را در حالت سکون فرض کنید که سیم پیچی رتور آن مدار باز است. در اثر چرخش نسبی میدان ناشی از استاتور پدیده هیسترزیس در هسته رتور رخ میدهد که باعث میشود رتور برای جذب انرژی مورد نیاز برای طی حلقه هیسترزیس درصدد ترمز کردن میدان مزکور برآید. یعنی از طرف روتور گشتاوری برمیدان رتور وارد می آید که در جهت خلاف چرخش میدان است. عکس العمل این کشتاور بر روی خود رتور است که در نهایت کوپلی روی روتور ظاهر میشود که در جهت چرخش میدان است.

- ❖ گشتاور این موتور از سرعت صفر تا سرعت سنکرون مقدار تقریبا ثابتی است.
- ❖ اگر گشتاور بار در همین دور گرفتن از گشتاور تولیدی موتور تجاوز نکند سرعت محور را بدون توجه به اینرسی قسمت گردان تا مقدار سنکرون بالا میبرد.
- ❖ از آن جایی که این گشتاورد ناشی از مقدار انرژی لازم برای تعیین تلفات هیسترزیس است،هرچه حلقه یسترزیس ماده سازنده رتور چاق تر باشد،گشتاور نیز بیشتر است.

۶-۵-۲- ساختمان موتور هیسترزیس

این موتور یک میدان دوار در فاصله هوایی توسط استاتور با منبع تغذیه تک فاز یا سه فاز تولید میکند.در یک موتور هیسترزیس تک فاز استاتور دارای دو سیم پیچ با زاویه فضایی ۹۰ درجه الکتریکی است که جریان های گذرنده از آنها دارای اختلاف فاز زمانی میباشند. این اختلاف فاز توسط یک خازن دایم سری شده با یکی از سیم پیچها (و یا با ساختار قطب چاکدار در موتور هیسترزیس خیلی کوچک) تامین میگردد. معمولا مقدار خازن به گونه ای تعیین میگردد که باعث عملکردی مشابه موتور۲ فاز متعادل در سرعت سنکرون گردد.

قسمت اصلی رتور از یک حلقه استوانه ای از جنس کروم، کبالت یا فولاد سخت که دارای حلقه هیسترزیس (این حلقه توسط یک ماده غیرمغناطیسی دیگر مثل آلومنیوم روی شافت موتور قرار می گیرد تا در مجموع رتور سبک باشد) خیلی بزرگ است، ساخته شده است.

پیرامون رتور هیچ گونه شیاری وجود ندارد و بنابراین فاقد هرگونه سیم پیچی است.

۶-۵-۳-اصول عملکرد موتور هیسترزیس

اصول عملکرد موتور هیسترزیس مبتنی بر حلقه B-H ماده مغناطیسی میباشد(شکل ۶-۱۵-الف). با توجه به تغذیه سینوسی استاتور، چنانچه فرض شود که تغییرات H در هر نقطه بر حسب زمان سینوسی است، تغییرات زمانی B در همان نقطه را میتوان به روش نقطه یابی از حلقه هیسترزیس مربوطه استخراج کرد.

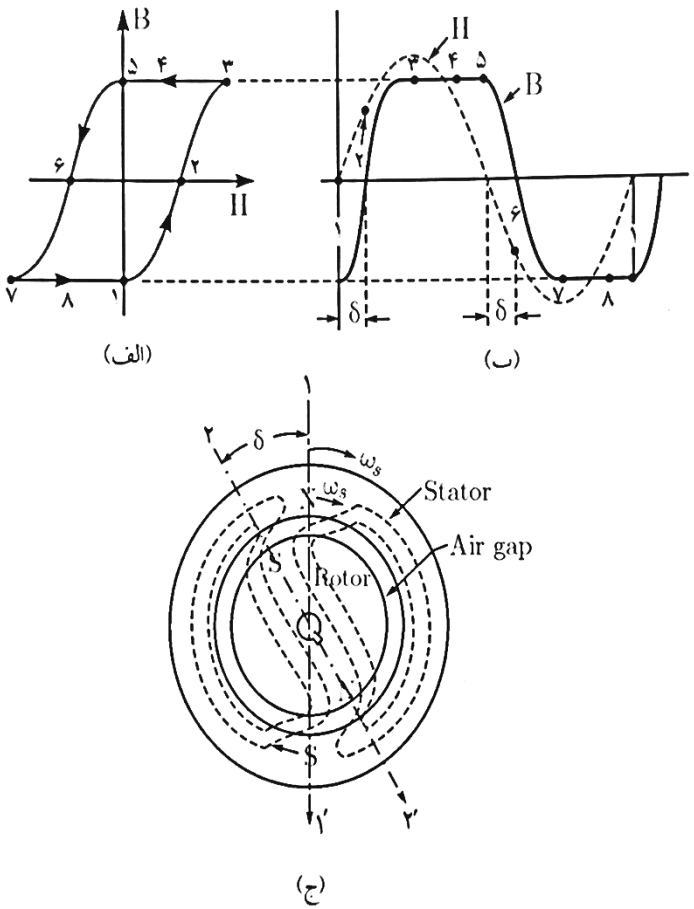
تصور کنید موج mmf القاکننده Fs ناشی از سیم پیچ استاتور با سرعت سنکرون Ws رادیان بر ثانیه در حال چرخش باشد.

در شکل(۶-۱۵-ج)، محور Fs در راستای عمود ۱۱نشان داد شده است. این Fs مطابق شکل، موجب ایجاد قطب های NوS روی استاتور میگردد.

اکنون چنانچه حلقه هیسترزیس را در نظر بگیریم باید یک قطب S بر روی رتور، دقیقا مقابل قطب N استاتور القا شود.

اما به واسطه حلقه هیسترزیس، قطب S القا شده بر روی رتور به میزان زاویه هیسترزیسی δ نسبت به N استاتور عقب تر است.

همین مطلب در مورد قطب N القا شده روی رتور صادق است.



➢ **شکل (۶-۱۵):** موتور هیسترزیس، الف) حلقهٔ هیسترزیس (B-H)، ب) تأخیر زمانی B نسبت به H به میزان δ، ج) توزیع میدان مغناطیسی در استاتور، فاصلهٔ هوایی و رتور یک موتور دو قطب

زاویه δ به سرعت رتور یا فرکانس حرکت بر روی حلقه بستگی ندارد.گشتاور تولیدی توسط موتور هیسترزیس از حالت سکون تا سرعت سنکرون ثابت میباشد. کل گشتاور راه اندازی از دو بخش تشکیل میشود، گشتاور هیسترزیس و گشتاور القایی(توسط جریان های فوکو در آهن رتور به وجود می آید. گشتاور تولیدی(گشتاور هیسترزیس- گشتاور جریان فوکو) بیشتر از گشتاور بار باشد، رتور از حالت سکون شتاب میگیرد.

هنگامی گه سرعت رتور به نزدیکی سرعت سنکرون برسد، قطب های رتور با قطب های استاتور قفل میگرد و عملکرد سرعت سنکرون موتور یسترزیس محقق میگردد.در سرعت سنکرون سرعت نسبی بین میدان استاتور و رتور صفر است بنابراین جریان فوکویی در رتور القا نمی شود و سرعت سنکرون گشتاور جریان فوکو صفر میگردد. در سرعت سنکرون عملکرد موتور به گشتاور هیسترزیس مربوط است.

گشتاور تولید شده توسط موتور هیسترزیس ثابت است.در حالت سکون،آهن رتور در معرض حلقه B-H با فرکانس f میباشد.تصور کنید Pho بیانگر تلفات هیسترزیس رتوردر حالت سکون باشد.هنگامی که رتور شتاب میگیرد فرکانس طی نمودن حلقه هیسترزیس کاهش می یابد. از آنجا که تلف هیسترزیس متناسب با فرکانس سیکل هیسترزیسی است که رتور در معرض آن قرار دارد،لذا تلف هیسترزیس در هر فرکانس لغزش sf برابر است با: $P_h = s\,P_{ho}$

❖ در یک موتور القایی چند فازه، تلف اهمی رتور موجب تولید گشتاور الکترومغناطیسی میگردد.

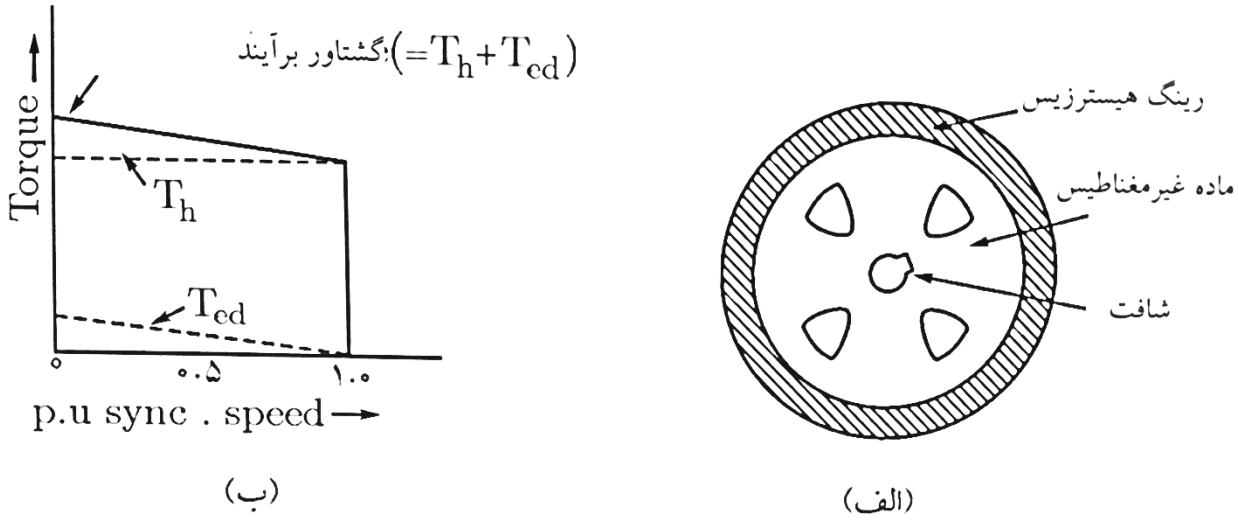
به طور مشابه تلف هیسترزیس رتور منجر به گشتاور هیسترزیس می شود که عبارت است از:

$$T_h = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{\text{تلف هیسترزیس رتور}}{s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sP_{ho}}{s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot P_{ho}$$

❖ گشتاور جریان فوکو نیز به خاطر تلف فوکوی رتور ظاهر می شود .اگر تلف فوکو در آهن رتور در فرکانس fرتور در حالت سکون Peo باشد، هنگامی که رتور شتاب می گرد این فرکانس به فرکانس لغزش sf کاهش کاهش میابد. چون تلف فوکو متناسب با مجذور فرکانس است، تلف جریان فوکو در فرکانس لغزش معادل (معادله ص ۱۵۲) خواهد شد. تلف فوکو به شکل زیر باعث گشتاور تولید جریان فوکو میگردد:

$$T_{ed} = \frac{1}{\omega s} \frac{\text{تلف جریان فوکو}}{s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{S^2\,P_{eo}}{S} = \frac{1}{\omega_s} SP_{eo}$$

❖ به ازای یک آمپر دور ثابت استاتور، Pho ثابت می باشد و در نتیجه گشتاور هیسترزیس ازحالت سکون تا سرعت سنکرون شکل (۶-۱۶ب)ثابت خواهد ماند.



➢ **شکل (۶-۱۶):** الف) رتور موتور هیسترزیس، ب) مشخصهٔ گشتاور سرعت موتور هیسترزیس

در حالت سکون، چون s=1 است تلف فوکو و در نتیجه گشتاور جریان فوکو بیشترین مقدار خود را دارد.هنگامی که رتور شتاب میگیرد sکاهش میابد و متناظراً Ted نیز کاسته میگردد. در سرعت سنکرون ،این این گشتاور صفر است، یعنی در طول مدت شتاب گیری رتور گشتاور هیسترزیس و فوکو وجود دارند اما در سرعت سنکرون تنها گشتاور هیسترزیس وجود دارد و به همین خاطر به موتور هیسترزیس معروف است.مشخصه گشتاور-سرعت موتور هیسترزیس در شکل (۶-۱۶ب) آمده است.

در موتورهای رلوکتانسی، موتور به عنوان یک موتور القایی تک فاز راه اندازی میشود و رتور تحت شرایط خاصی وارد مود سنکرون میگردد.به ویژه اینکه در صورت بالا بودن اینرسی قسمت های گردان، احتمال رسیدن به سرعت سنکرون کاهش میابد. علاوه بر این گشتاور راه اندازی این گونه موتورها نسبتا کم است. اگر گشتاور هیسترزیس قادر به شتاب‌دهی به آن باشد،هر باری میتوند با قطب‌های استاتور سنکرون شود.

❖ در یک موتور رلوکتانسی رتور قبل از سنکرون شدن تمایل به نوسان دارد، اما در یک موتور هیسترزیس، قطب های رتور و استاتور بدون هیچگونه نوسانی قفل میشوند.

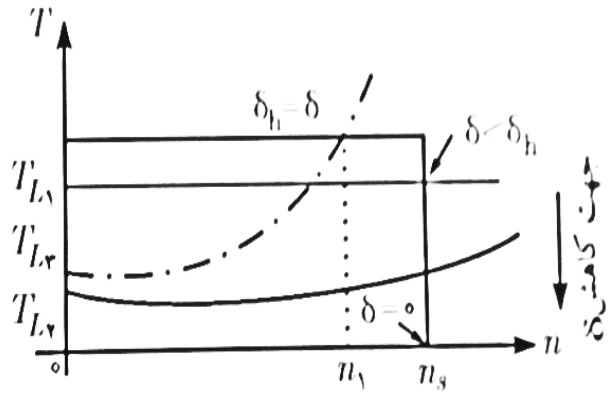
❖ از آنجا که پیرامون رتور هیچگونه شیاری وجود ندارد و کاملا صاف است موتور در معرض ارتعاشات مکانیکی و مغناطیسی قرار ندارد و لذا کاملا بی‌سروصدا است. متداول ترین استفاده از آن در ساعت‌های الکتریکی و دیگر تجهیزات زمان سنجی میباشد.

از آن جا که این نوع موتورها بدون نویز هستند برای ثبت صدا و تجهیزات تولید صدا همچون ضبط صوت‌ها، ثبات‌های نواری و... به کار می روند. چنانچه استاتور با چندین سیم‌پیچ با قابلیت تغییر قطب پیچیده شود موتور می تواند در چند ساعت کار کند.

❖ یکی از مزایای عمده موتورهای هیسترزیس، زیاد بودن گشتاور راه‌اندازی آن است. چون مقدار گشتاور تا سرعت سنکرون تقریبا ثابت میماند، این نوع موتور قادر است زیر بارهای با اینرسی زیاد نیز به طور قطعی به سرعت سنکرون برسد مشروط بر آن که گشتاور مورد نیاز در حد مجاز موتور باشد.

شکل(۶-۱۷) نمونه‌هایی از مشخصه‌های بار را به همراه مشخصه موتور در حالت ایده‌آل (صرف نظر از گشتاور فوکو) نشان میدهد. این موتور، بارهای با مشخصه ۱و۲ را به سرعت سنکرون میرساند در حالی که بار با مشخصه ۳ با سرعت n1 چرخانده میشود.

به محض آنکه سرعت موتور به سنکرون برسد لغزش صفر می شود و رتور دیگر در معرض تغییرات زمانی شار قرار ندارد. در معرض تغییرات زمانی شار قرار ندارد. در اینصورت چنانچه گشتاور تولیدشده توسط موتور با زاویه δ بین B رتور و میدان استاتور بیشتر از گشتاور بار باشد شتاب رتور مثبت خواهد بود و رتور به افزودن سرعت خود تمایل خواهد داشت. در نتیجه محور مغناطیسی رتور نسبت به محور مغناطیسی استاتور به طرف جلو حرکت میکند و اندازه زاویه هیسترزیس (δ h) شروع به کاهش میکند.همزمان با این عمل گشتاور تولیدی موتور نز کاسته میشود و پس از کاهش زاویه بین دو محور مغناطیسی به اندازه‌ای که گشتاور بار تامین گردد زاویه رور ثابت میماند و موتور با سرعت سنکرون به حرکت خود ادامه میدهد.



➢ شکل (۶-۱۷): نمونه‌هایی از گشتاور بار به همراه مشخصهٔ موتور هیسترزیس در حالت ایده‌آل

۶-۶- ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم

تنظیم جداگانه ولتاژ آرمیچر و جریان تحریک ماشین الکتریکی DC، کنترل مستقل سرعت و شار را به طور ذاتی ممکن ساخته است. لذا کنترل دور این ماشین به آساتی قابل انجام است.

به واسطه ضرروت استفاده از جاروبک و کموتاتور الکتریکی، موتور DC دارای معایبی از جمله پیچیدگی ساختار، حجم زیاد، وزن سنگین، قیمت بالا، نگهداری و تعمیر و سرویس مداوم و بازده کم بویژه در سرعت‌های متوسط و پایین میباشد.

به عنوان جایگزین مناسب، ماشین‌های مغناطیس دائم میتوانند با اندازه کوچکتر، وزن کمتر، نویز پایین و نگهداری آسان و به ویژه بازدهی خیلی بالاتر در سرعت های پایین بر ماشین DC ترجیح داده میشود.

شکل (۶-۱۸) سیر افزایش چگالی انرژی را با دستیابی به انواع مواد مغناطیس در قرن بیستم میلادی را نشان میدهد.

❖ در سال ۱۹۸۳ اختراع ماده مغناطیس دائم نیودیوم-آهن- بور (Nd - Fe - B) ماشین سنکرون مغناطیس دائم وارد مرحله نوینی شد. به ویژه کاربردهای صنعتی سرعت پایین و سرعت متغیر زمینه‌های کاری بالقوه‌ای برای ماشین PMSM مهیا نمود.

❖ از سال ۱۹۳۰ یک دسته از آلیاژهایی که آلنیکو (AlNiCo) نامیده میشوند در ساخت آهنربا به کار رفته اند.(آلنیکو مرکب از آهن، نیکل، کبالت و آلومینیوم میباشد)

❖ از سال ۱۹۵۰ آهنربا از جنس فریت به کار بسته شد که در آنها چگالی شار پس‌ماند کمتر از آلنیکو بوده اما نیروی ضدمغناطیسی قابل آن قابل ملاحضه‌تر است.

❖ از سال ۱۹۶۰ یک گروه جدید از آهنربا به نام آهنربای دائم کمیاب ساخته شده است که دارای چگالی شار پس ماند زیاد (مثل آلنیکو) و نیروی ضد مغناطیسی قابل ملاحضه (مثل فریت) می باشد.(این آهنربا شامل ترکیب‌هایی از آهن، نیکل، کبالت و یک یا چند عنصر کمیاب است که متداولترین آنها ترکیب کبالت با ساماریوم میباشد.

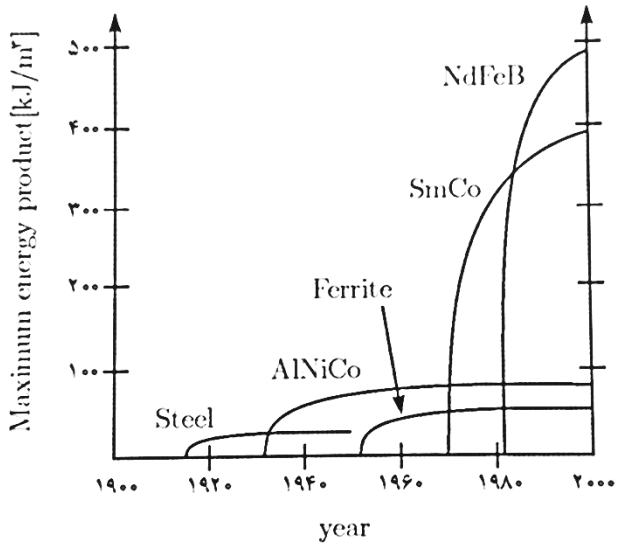
مشابه همه ماشین‌های AC ،استاتور موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به صورت مورق ساخته میشود. رتور بسته به نحوه قرارگیری آهنربا در دو نوع قطب صاف یا برجسته طراحی میگردد. چنانچه مواد مغناطیسی بر روی لایه ی خارجی رتور به صورت سطحی قرار گیرند ماشین را مغناطیس دائم رتور سطحی می نامند و در صورتی که آهنربا در داخل رتور جاسازی (مدفون) گردد به ماشین مغناطیس دائم رتور داخلی مشهور است.

❖ ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم بسته به چگونگی پخش فضایی مغناطیسی فاصله هوایی به دو دسته اصلی تقسیم میشوند:

۱- ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با فلوی سینوی (PMSM)

۲- ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با فلوی ذوزنقه‌ای که به ماشین DC بدون جاروبک (BLDC) معروف است.

ساختار PMSM از جایگزینی تحریک ماشین سنکرون رتور سیچ‌پیچی شده که شامل یک سیم‌پیچ میدان، جاروبک ها و حلقه‌های لغزان است با یک مغناطیس دائم حاصل میشود. این نوع ماشین همانند موتور القایی یا سنکرون رتور سیچ‌پیچی شده، نیروی ضد محرکه سینوسی تولید مینماید. در واقع، استاتور PMSM کاملا مشابه موتور القایی است.



➢ **شکل (۶-۱۸):** سیر افزایش چگالی انرژی با دستیابی به انواع مواد مغناطیس در قرن بیستم میلادی

ساختار BLDC از تلاش برای دگرگون کردن ماشین DC جاروبک دار برای حذف نیاز به کموتاتور و ادوات جاروبک حاصل می شود. کموتاتور در ماشین‌های DC جاروبک دار، جریان DC ورودی را به جریان های شبه مستطیلی با فرکانس متغیر تبدیل میکند. با اعمال مستقیم این جریان‌های مشتطیل شکل به استاتور BLDC و انتقال تحریک میدان رتور به صورت PM، شکل دگرگون شده ماشین DC جاروبکدار حاصل میشود که مزایای زیادی دارد. از جمله این مزایا میتوان به عدم وجود جاروبکهای مکانیکی و ادوات مربوط به آن اشاره کرد که از این رو به ماشین DC بدون جاروبک معروف است.

در PMSM با ایجاد پخش فضای سینوسی هادی‌ها در سطح استاتور سعی میشود تا چگالی فلوی فاصله هوایی به فرم سینوسی نزدیکتر شود، در حالیکه نوع BLDC با سیم‌بندی متمرکز موجب تولید چگالی فلوی ذوزنقه‌ای خواهد شد.چگالی فلوی سینوسی، ریپل کمتر در گشتاور و عملکرد نرم و بدون سر و صدای ماشین را در پی دارد و طراحی ماشین با سیم‌بندی متمرکز منجر به افزایش نسبت گشتاور بر کیلوگرم آهن بکار رفته است.

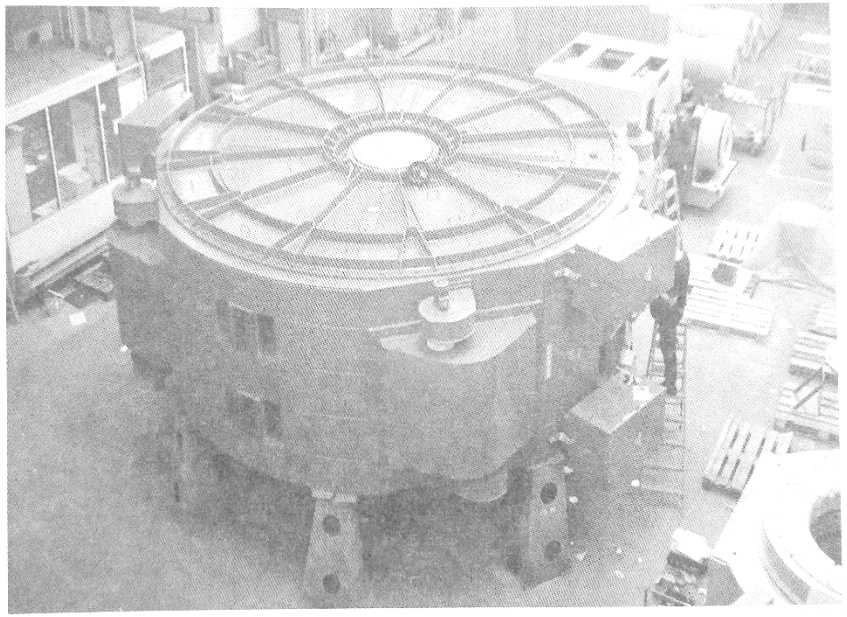
❖ ماشین های سنکرون مغناطیس دائم نسبت به سایر ماشین های AC نیز دارای برتری هایی است. از جمله اینکه جریان استاتور موتور القایی شامل دو مؤلفه مجزای مغناطیس کننده و تولید کننده گشتاور می باشد. استفاده از مغناطیس دائم بر روی رتور موجب میشود که نیازی به تامین جریان مغناطیس کنندگی از طریق سیم پیچ استاتور نباشد و جریان استاتور صرفاً برای تولید گشتاور الکترومغناطیسی صرف شود.بنابراین برای یک توان خروجی یکسان، ماشین مغناطیس دائم در ضریب توان بالاتری عمل خواهد کرد. از سوی دیگر نوع معمول ماشین های سنکرون رتور سیم پیچی شده. نیازمند اعمال تحریک DC به سیم پیچ رتور هستند که اغلب از طریق رینگ لغزان و جاروبک تغذیه میشوند. این ساختار تلفات رتور و نگهداری و سرویس منظم جاروبک ها را در پی خواهد داشت.

اولین تلاش ها برای وارد نمودن موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با به کار گیری مگنت های ساماریم - کبالت جهت ساخت. یک موتور سنکرون PM با قدرت ۱,۵ MW صورت پذیرفت. ایده اصلی در بکارگیری موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در مراحل اولیه افزایش راندمان از طریق تحریک PM بود اما افزایش راندمان برای مشتری ها چندان قانع کننده نبود و تلاش ها برای وارد نمودن آنها به بازار صنعتی با شکست مواجه شد.

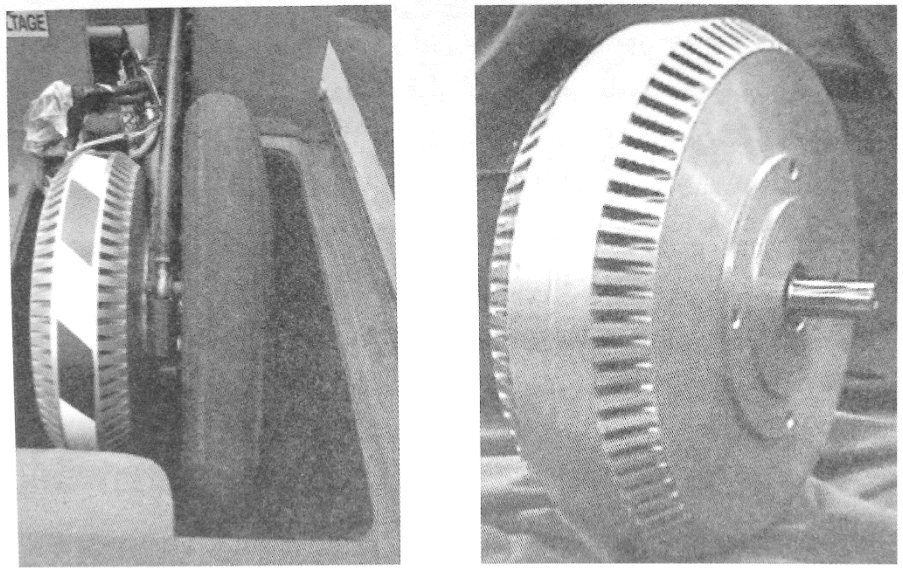
شرکت فرانسوی jeumont - Schneider در سال ۱۹۹۰ یک موتور سنکرون با قدرت ۱,۸ مگاوات، ۱۳ فازه و سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه با شار شعاعی تولید نمود. شرکت زیمنس آلمان نیز در قرن اخیر موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با شارشعاعی موسوم به PERMASYN مختص پیشران زیردریایی تولید نموده است. جدول(۲-۶) مشخصات فنی این نوع موتور را نشان میدهد

جدول (۲-۶) : مشخصات فنی انواع موتورهای PERMASYN ساخت شرکت زیمنس آلمان مختص زیردریایی‌ها

Rating	Operating values at rated output							
Type	Rated output	Rated speed	Net weight approx.	Operating voltage ranges	Rated current approx.	R approx.	G approx.	K approx.
	[kW]	[rpm]	[t]	[V]	[A]	[mm]	[mm]	[mm]
1FR6134-...	1700	120	28	300 - 560	< 6000	2080	2240	1590
1FR6439-...	3300	150	50	520 - 830	< 6700	2500	3340	2310
1FR6439-...	3900	150	54	520 - 830	< 8000	2500	3340	2310
1FR6839-...	5000	150	71	550 - 830	< 9600	2700	4000	2800



شکل (۶-۲۰): ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۳ مگاوات ساخت شرکت زیمنس سال ۲۰۰۴ جهت استفاده در توربین بادی



(الف) نمای موتور (ب) اتصال موتور مغناطیس دائم به چرخ خودرو

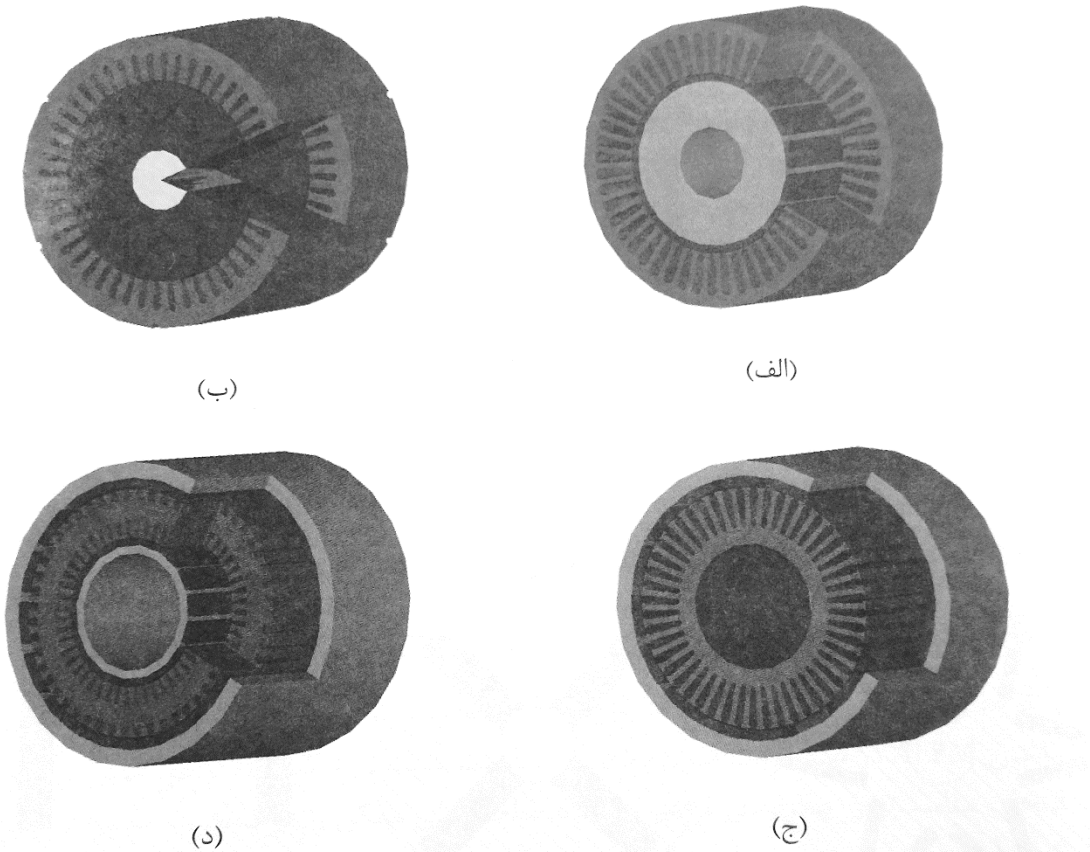
شکل (۶-۱۹): موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری به عنوان محرکه چرخ یک خودرو خورشیدی

۶ -۶ -۱- ماشین سنکرون مغناطیس دایم با شار شعاعی

ساختار رتور سطحی و رتور داخلی

در این ساختار استاتور خارج و رتور داخل آن قرار میگیرد. در شکل الف به دلیل رلوکتانس بالای مغناطیس ها میتوان ماشین را با فاصله ی هوایی موثر بزرگ در نظر گرفت بنابراین میتوان فرض کرد که اندوکتانس های محوری مستقیم (d) و عمودی (q) یکسانند؛هم چنین به دلیل فاصله هوایی نسبتابزرگ اندوکتانس سنکرون کوچک است پس عکس العمل آرمیچر قابل صرف نظراست امادر شکل ب مقدار این دو اندوکتانس اندکی باهم فرق ارد.

درموتورهای نوع سطحی سرعت چرخش موتور محدود میشودزیرادر سرعت های بالا نیروی گریزازمرکز اتصالات را خواهدشکست.



شکل (۶-۲۱): ساختارهای متنوع موتورهای مغناطیس دائم شعاعی؛ (الف) رتور سطحی و (ب) رتور داخلی که هر دو در درون استاتور قرار دارند. (ج) اصطلاحا "درام" گفته می شود. (د) یک ساختار با دو رتور و یک استاتور

❖ شکل (۶ -۲۱- الف و ب) ساختار درام: دراین ساختار رتور داخل و استاتور خارج قرار میگیرد.

برای مثال چرخ های موتور خودرو برقی یا غلطک های تسمه نقاله.

❖ شکل (۶ -۲۱- ج) اخیرا موتورهایی وارد بازارشده اند که دو رتور و یک استاتور دارند.برای بیرون بردن گرما ازاین ساختار مقدارزیادی هوانیاز است اما این ساختار باعث افزایش ظرفیت تولید گشتاور ماشین میشود.

❖ شکل (۶ -۲۱- د) ساختار دو استاتور – تک رتور

مزایای رتور نوع داخلی نسبت به رتور نوع سطحی:

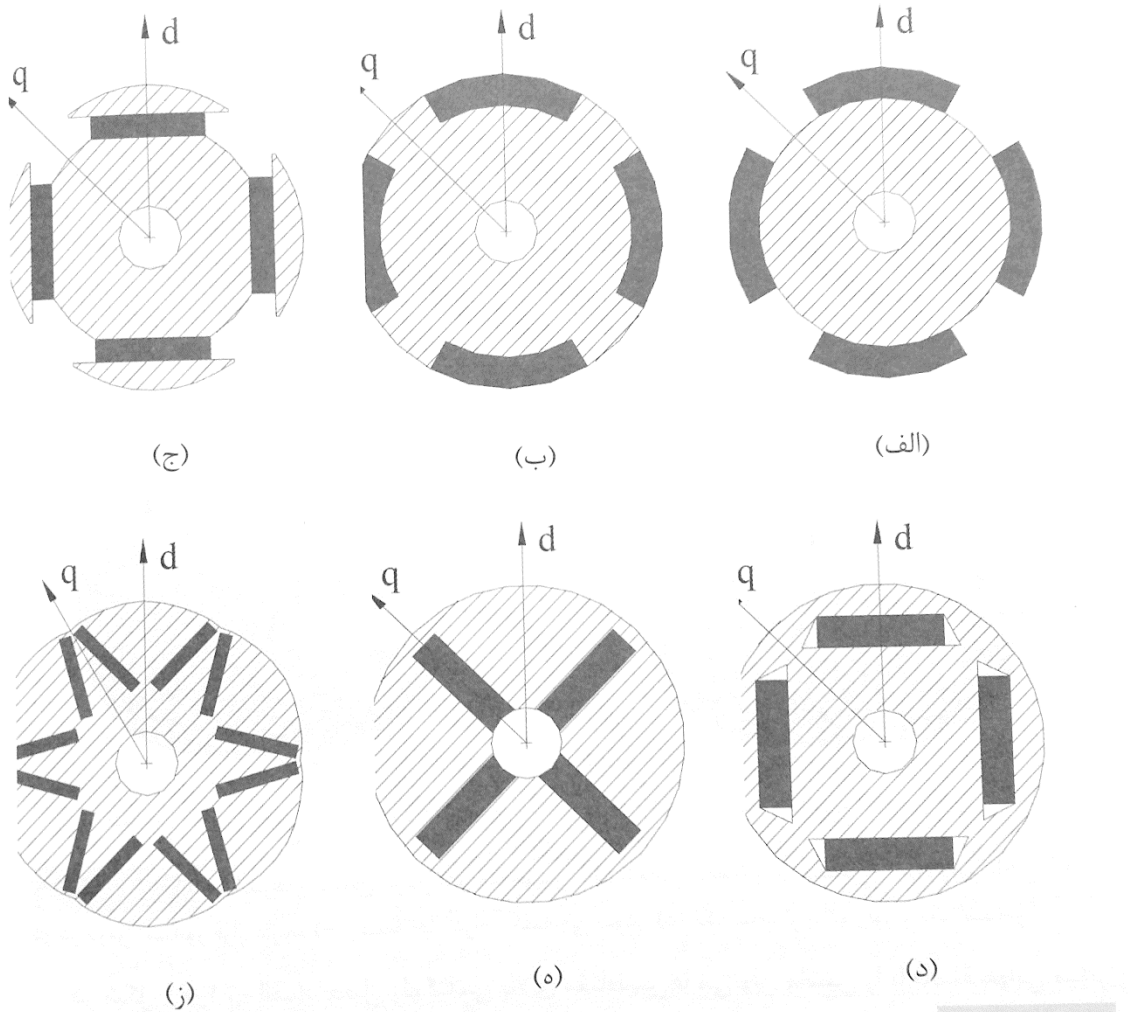
۱- مغناطیس دایم موردنیاز آن مستطیل شکل است و لذا شکل دهی آن راحت تر است .

۲- ساختار رتور به اندازه کافی مستحکم است ونیاز به ادوات نگه دارنده اضافه ندارد.

۳- دستیابی به شار فاصله هوایی سینوسی و ریپل گشتاور کم,نیز دور از دسترس نیست.

۴- هسته آهنی,آن را از ضربات مکانیکی وسایش حفظ میکند بااین حال شار نشتی در قسمت انتهایی مغناطیس دایم افزایش میابد.

شکل(۲۲-۶)



➢ **شکل (۶-۲۲)**: ساختارهای گوناگون رتور و معرفی محورهای مستقیم (d) و عمود (q). الف، ب و ج): مگنتها بـر روی سطح، د، ه، ز) مگنتهای مدفون شده

درموتورهای سنکرون مغناطیس دایم دو نوع گشتاور میتواند ایجاد شود:

۱-گشتاور تداخلی که از تقابل میدان های دوار استاتور و رتور تولید میشود.

۲-گشتاور رلوکتانسی ناشی از برجستگی(غیر یکنواخت بودن فاصله هوایی)رتور.

۶ -۶ -۲- ماشین های سنکرون مغناطیس دایم با شار محوری

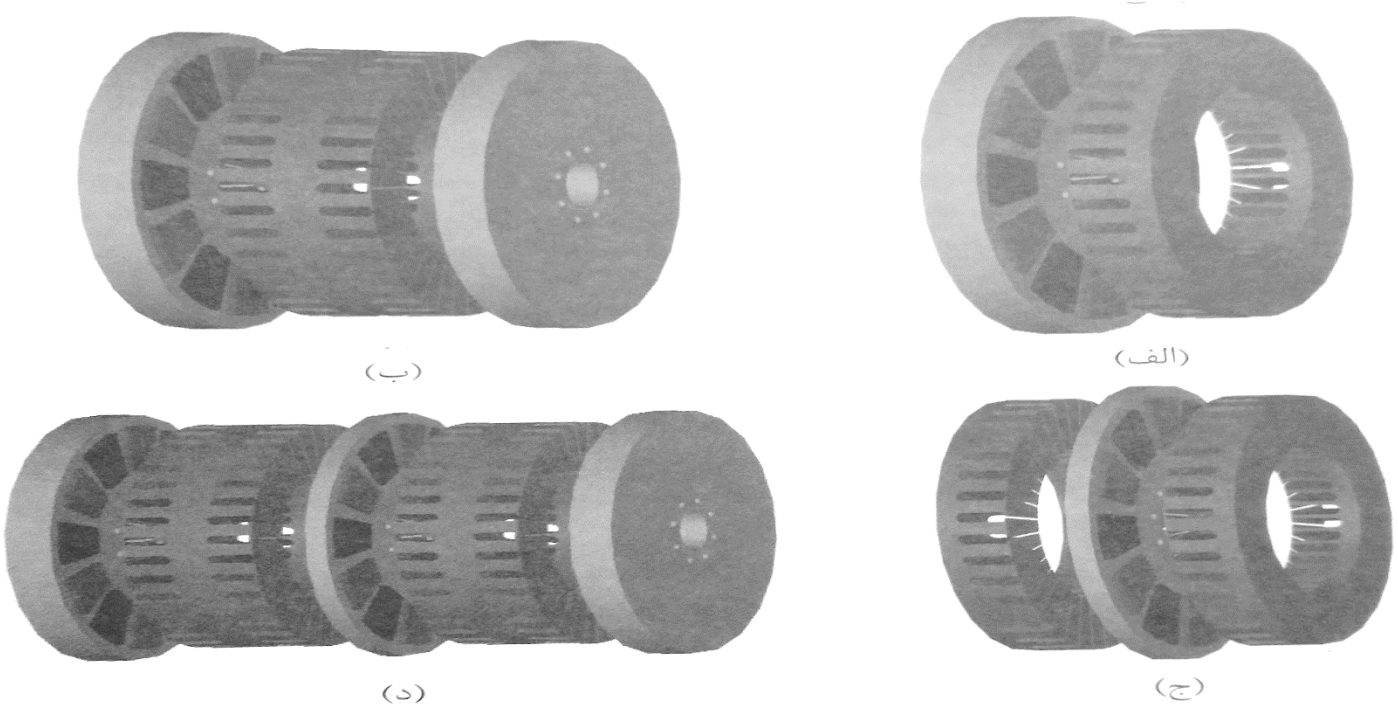
❖ ساختار تک رتوره – تک استاتوره: ساده ترین ساختار موتور مغناطیس دایم AF میباشد اما این ساختار از یک نیروی محوری نامتعادل بین استاتور و رتوذ رنج میبرد و در نتیجه به آرایش پیچیده تری از بلبرینگ و رتور ضخیم تری نیازمند است. (شکل ۶ -۲۳- الف)

❖ ساختار دو رتور – تک استاتور: این ساختار دارای سیم بندی فازها پیرامون استاتور شیار دار و یا بدون شیار میباشد.در نوع سیم بندی فاز با شیار اثر انتهایی کمی دارد که باعثبهبود راندمان ماشین و افزایش چگالی توان میشود (شکل ۶ -۲۳- ب)

❖ ساختار دو استاتور – تک رتور: (شکل ۶ -۲۳- ج)

❖ ساختار چندطبقه شامل چندین استاتور و چندین رتور: چنین ماشین هایی میتوانند برای سیستم مرکه کشتی،پمپ ها و ژنراتورهای PM با سرعت بالا و اهداف تحقیقاتی به کار گرفته میشوند.این ماشین ها یک راه حل معقول برای دستیابی به گشتاور های بزرگ به جای بزرگ نمودن قطر موتور میباشد.

شکل ۶ -۲۳- د



➢ شکل (۶-۲۳): ساختارهای متنوع ماشین AF، الف) ساختار تک رتور- تک استاتور ب) ساختار دو رتور- تک استاتور ج) ساختارتک رتور- دو استاتور د) ساختار چند طبقه شامل دو بلوک استاتور و سه بلوک رتور

۶-۶-۳- مقایسه ماشین های سنکرون شار محوری و شار شعاعی

- بازدهی یک ماشین شارمحوری عموما ضعیف تر از نوع شعاعی است.
- ماشین های شار محوری حجم کمتری از ماشین های شار شعاعی دارند.
- به دلیل سبکی رتور AFPM، اینرسی رتور کمتر بوده و سریع تر شتاب میگیرد.
- انتخاب زوج قطب محدود شده است با این که در ماشین RF هر تعداد زوج قطب قابل استفاده است.در ماشین شار محوری بعضی زوج قطب های خاص امکان طراحی ندارند چون ماشین شارمحوری دارای محدودیت در ابعاد و هندسه است.
- ساخت و قرار دادن اجزای Af در فریم خیلی ساده تر است.در حالت شعاعی به دلیل جاذبه زیادی که بین سطح رتور و سطح داخلی استاتور وجود دارد مانع بزرگی برای قرار دادن رتور در استاتور ایجاد میشود.
- با ساختارهای بیش از یک استاتور در AFPM ها قابلیت اطمینان سیستم بالا میرود.

۶-۶-۴- مقایسه موتورهای PMSM و BLDC

شباهت های زیادی دارند برای مثال در هردوی آن ها PM بر روی رتور قرار میگیرد و برای تولد گشتاور پایدار نیازمند جریان های استاتور متناوب می باشد.مگنت های درون این موتور ها میتوانند سطحی یا درونی باشند که ماشین ها با PM درونی مقاوم تر بوده و عموما در سرعت های بالا استفاده میشوند به علاوه اندوکتانس های محور های افقی و عمودی در ماشین های PM سطحی تقریبا برابرند درحالی که در ماشین های با PM درونی اندوکتانس محور عمودی میتواند خیلی بزرگتر از اندوکتانس محور طولی باشد.

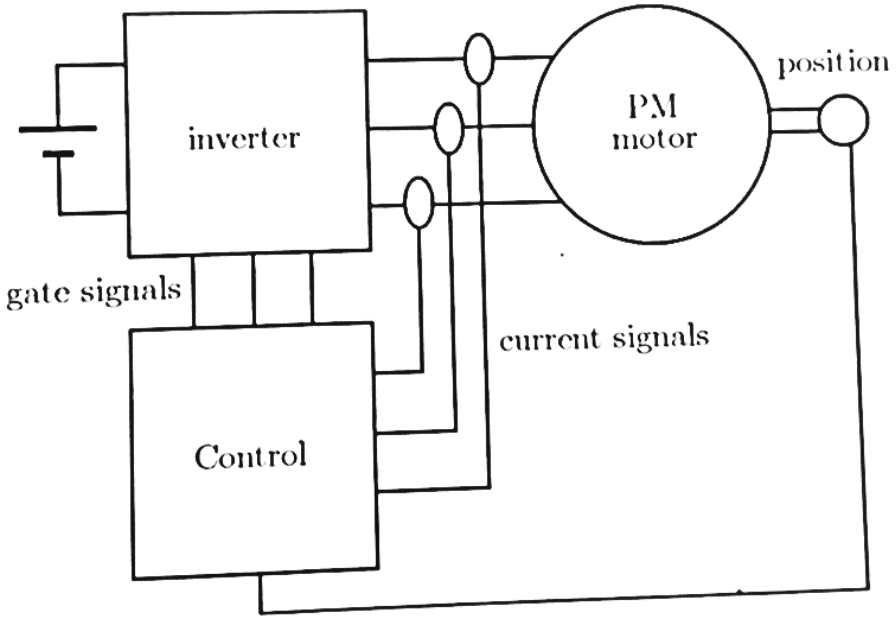
۶-۶-۴-۱- تفاوت ماشین های PMSM و BLDC

تفاوت این دو ماشین در شکل موج نیروی ضد محرکه الکتریکی میباشد در PMSM به شکل سینوسی و در BLDC به شکل ذوزنقه ای میباشد.PMSM ها به جریان استاتور سینوسی برای تولید گشتاور پایدار نیاز دارند درحالی که BLDC ها نیازمند جریان های مستطیلی شکل برای تولید گشتاور میباشند.

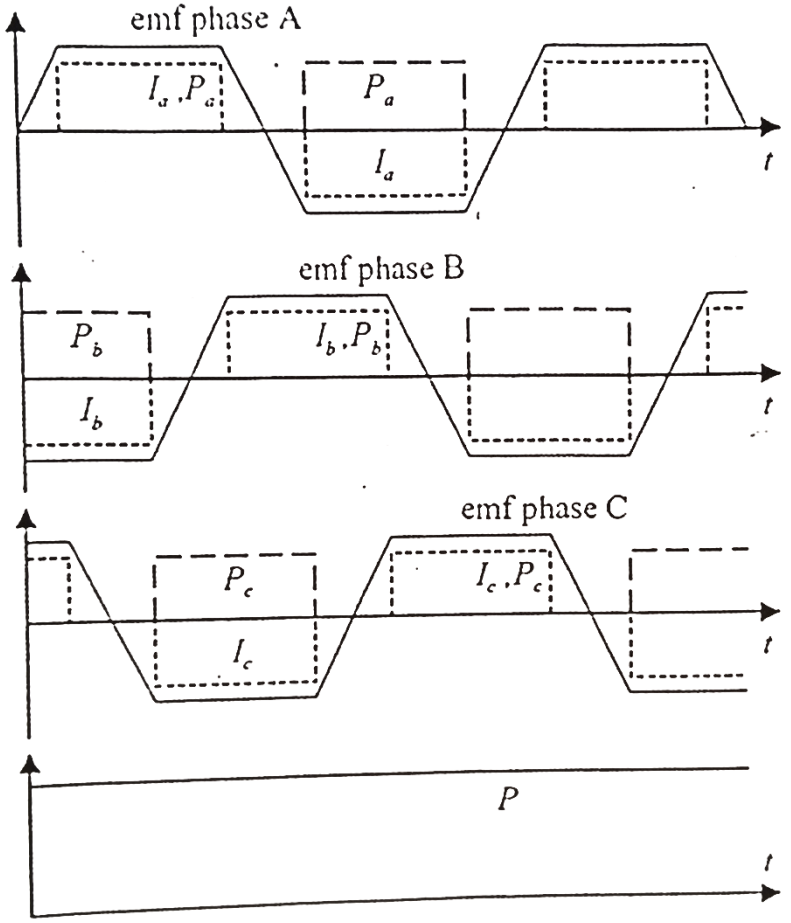
در ماشین های BLDC در هر لحظه فقط دو فاز از سه فاز دارای انرژی است اگر ولتاژالقایی به صورت ذوزنقه ای با ۱۲۰ درجه سطح صاف باشد توان و گشتاور ثابت تولید میشود.یکی از مزایای مهم این ماشین استفاده از سنسورهای بسیار ساده برای اندازه گیری موقعیت رتور است ویکی از عیب های آن مشکل بودن عملکرد در ناحیه تضعیف شارمیباشد.

در یک موتور مغناطیس دایم ,دندانه های استاتور درهنگام چرخش رتور میتوانند گشتاور رلوکتانسی متغیری تولید کنند.این گشتاور رلوکتانسی که به موقعیت رتور بستگی دارد و در غیاب جریان آرمیچر به وجود می آید اصطلاحا گشتاور دندانه ای گفته می شود بنابر این گشتاور دندانه ای به مکان وابسته است اما ریپل گشتاور، نتیجه کموتاسیون جریان آرمیچر و هارمونیک هایی است که گشتاور ثابتی تولید نمی کنند پس ریپل گشتاور مستقل ازگشتاور دندانه ای است.

موتور های چند فازه مزایای زیادی نظیر کاهش دامنه ومیزان ضربانات گشتاور,کاهش دامنه جریان هرفاز بدون کاهش ولتاژ آن ,کاهش هارمونیک های جریان لینک dc و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به موتورهای سه فاز دارند. با افزایش تعداد فازها میتوان نسبت گشتاور به جریان موثر را به طور چشمگیری افزایش داد. کاربرد این موتورها در سیستم محرکه کشتی و وسایل نقلیه هیبرید و کاربردهای هوا وفضا رو به افزایش است.



شکل (۶-۲۴): بلوک دیاگرام کلی درایو موتورهای PM



شکل (۶-۲۵): شکل موج‌های ایده‌آل موتور BLDC

به اندازه یک گام شیار، گشتاور دندانه ای را به ۱ تا ۲ درصد گشتاور نامی کاهش میدهد. بنابراین در مورد گشتاور دندانه ای تفاوت محسوسی مابین PMSM و BLDC نمیباشد در حالیکه ریپل گشتاور در BLDC به مراتب از PMSM بیشتر است و این امر نویز بیشتری تولید می کند. برای حل این مشکل نیز استفاده از BLDC های چند فازه پیشنهاد گردید.

درایورهای چند فازه در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. موتورهای چند فازه مزایای زیادی نظیر کاهش دامنه و میزان ضربانات گشتاور، کاهش دامنه جریان هر فاز بدون کاهش ولتاژ آن،کاهش هارمونیک های جریان لینک DC و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به موترهای سه فاز دارند. با افزایش تعداد فازها همچنین می توان نسبت گشتاور به جریان موثر را به طور چشمگیری افزایش داد. به دلیل افزایش درجات آزادی در این موتورها می توان با تزریق هارمونیک های خاص جریان، ضربانات گشتاور را کم نمود و یا با یک سیستم درایو مشترک چندین موتور را تحریک نمود. کاربرد این موتورها در جاهایی نظیر سیستم محرکه گشتی، وسایل نقلیه هیبرید، کاربردهای هوافضا و پر توان رو به افزایش است.

میتوان نشان داد که با جریان فازها و سرعت چرخش یکسان، ریپل گشتاور در موتورهای BLDC شش فازه میتواند به ۵۰٪ موتورهای سه فاز کاهش یابد و مولفه اصلی ریپل گشتاور، هارمونیک دوازدهم فرکانس زاویه ای اصلی موتور می باشد. همچنین موتورهای با تعداد فاز بالا علاوه بر راندمان دارای قابلیت اطمینان بالاتری هستند، برای سیستم موتور BLDC شش فازه تحت شرایط خطا در موتور یا کانور تر، با نصف توان امکان پذیر است. این موضوع نشانگر قابلیت اطمینان بالای این درایو می باشد.

۶-۷- موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC)

همانگونه که قبلا اشاره شد موتور DC بدون جاروبک یک موتور سنکرون چند فازه با روتور دارای آهنربای دائم است که کار آن مستلزم یک کنترل کننده الکترونیکی است. به طور کلی می توان گفت که موتور DC بدون جاروبک، نوعی موتور الکتریکی است که از ترکیب یک موتور AC (موتور سنکرون)، یک اینورتر و یک حسگر موقعیت رتور به وجود می آید. حسگر موقعیت رتور، موقعیت محور را به مدار کنترل اطلاع می دهد و این مدار سیگنال های کنترلی با ترتیب مناسب برای روشن کردن اینورتر می فرستد.

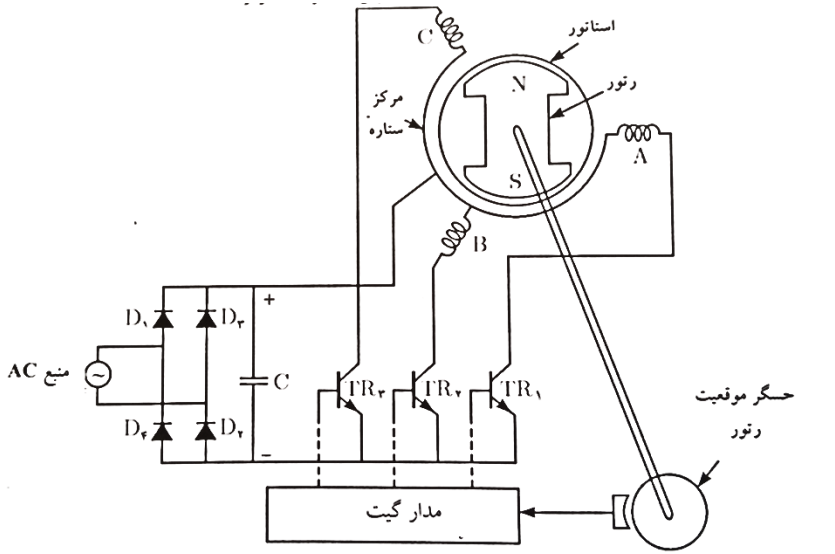
موتور DC بدون جاروبک به عنوان یک موتور DC وارونه نیز می تواند مطرح گردد زیرا ساختمان آن وارونه شده ساختمان یک موتور DC مرسوم است. قطب های میدان آهنربای دائم در یک موتور BLDC روی رتور و سیم پیچی آرمیچر جند فازه آن روی استاتور قرار دارد. عمل کموتاتور در موتور DC بدون جاروبک، توسط کموتاتور الکترونیکی انجام می شود. این موتور نسبت به موتور DC متعارف دارای مزایای زیر است:

- چون به کموتاتور مکانیکی و جاروبک نیازی نیست به موتور DC عمر طولانی تری دارد.
- مشکلات مربوط به فرکانس رادیویی و تداخل الکترومغناطیسی حداقل می شود.
- موتور DC بدون جاروبک می تواند در سرعت های بالاتری کار کند.
- راندمان موتور DC بدون جاروبک بیشتر است.

۶-۷-۱- موتور DC بدون جاروبک سه فاز سه پالسه (یا نیم موج)

شکل (۶-۲۶) صورت ابتدایی موتور DC بدون جاروبک سه پالسه سه فاز را به همراه کنترل کننده الکترونیکی آن نشان می دهد. استاتور حاوی یک سیم پیچی سه فاز که به صورت ستاره بسته شده و نقطه خنثی آن به ترمینال مثبت منبع DC متصل شده است. در مدار نشان داده شده مبدل دیودی تمام موج برای تبدیل ولتاژ AC به DC و خازن به عنوان فیلتر به کار رفته است.

هنگامی که ترانزیستور TR1، TR2 یا TR3 روشن میشوند فازهای A، B یا C به ترتیب تحریک میشوند. در این موتور تحریک سیم پیچ ها با ترتیب ABC موجب چرخش موتور در جهت حرکتهای عقربه های ساعت می شود. تغذیه فازها با ترتیب ACB موتور را در جهت خلاف عقربه های ساعت می چرخاند حسگر موقعیت رتور که بر روی شافت موتور سوار شده است اطلاعاتی از موقیت مکانی رتور فراهم آورده و سیگنال هایی به مدار درایو اینورتر میفرستد. در پاسخ به این سیگنال ها، اینورتر اجازه می دهد تا جریان در سیم پیچ های فازهای استاتور با ترتیب کنترل شده ای جاری شود بنحوی که موتور بتواند گشتاور و سرعت مورد نیاز را تولید کند.

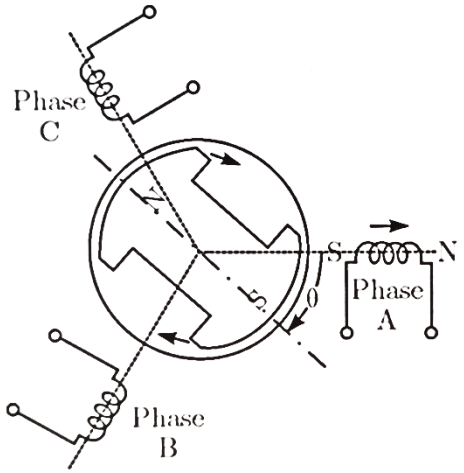


شکل (۶-۲۶): موتور DC بدون جاروبک سه پالسه سه فاز

۶-۷-۲- اصول کار موتور DC بدون جاروبک

شکل (۶-۲۷) شکل ابتدایی سیم پیچی سه فاز استاتور و روتور دو قطبی آهنربای دائم یک موتور DC بدون جاروبک را نشان می دهد. هنگامی که فاز A تحریک می شود قطب های N و S در استاتور به صورتی که نشان داده شده است تولید می شوند. قطب S استاتور قطب S روتور را دفع و قطب N رتور را جذب می کند و بنابراین گشتاوری در خلاف جهت مثاثاتی تولید می شود. مقدار این گشتاور معادل است با، $T_e = K_1 \Phi_s \Phi_r \sin\theta$

که در آن Φs فلوی استاتور، Φr فلوی میدان رتور و θ زاویه گشتاور، معادل زاویه بین محورهای فوق بوده و ثابت گشتاور است. با توجه به استفاده از آهنربای دائم در رتور، اندازه فلوی میدان رتور Φrثابت است در حالی که اندازه ی فلوی استاتور Φsتابعی از جریان استاتور است. هنگامی که جریان استاتور ثابت باشد مقدار این فلو هم میتواند ثابت در نظر گرفته شود. اگر مقدار مغناطیسی ماشین خطی فرض شود معادله (۶- ۲۸) به صورت زیر در می آید: $T_{ea} = K I_a \sin\theta$



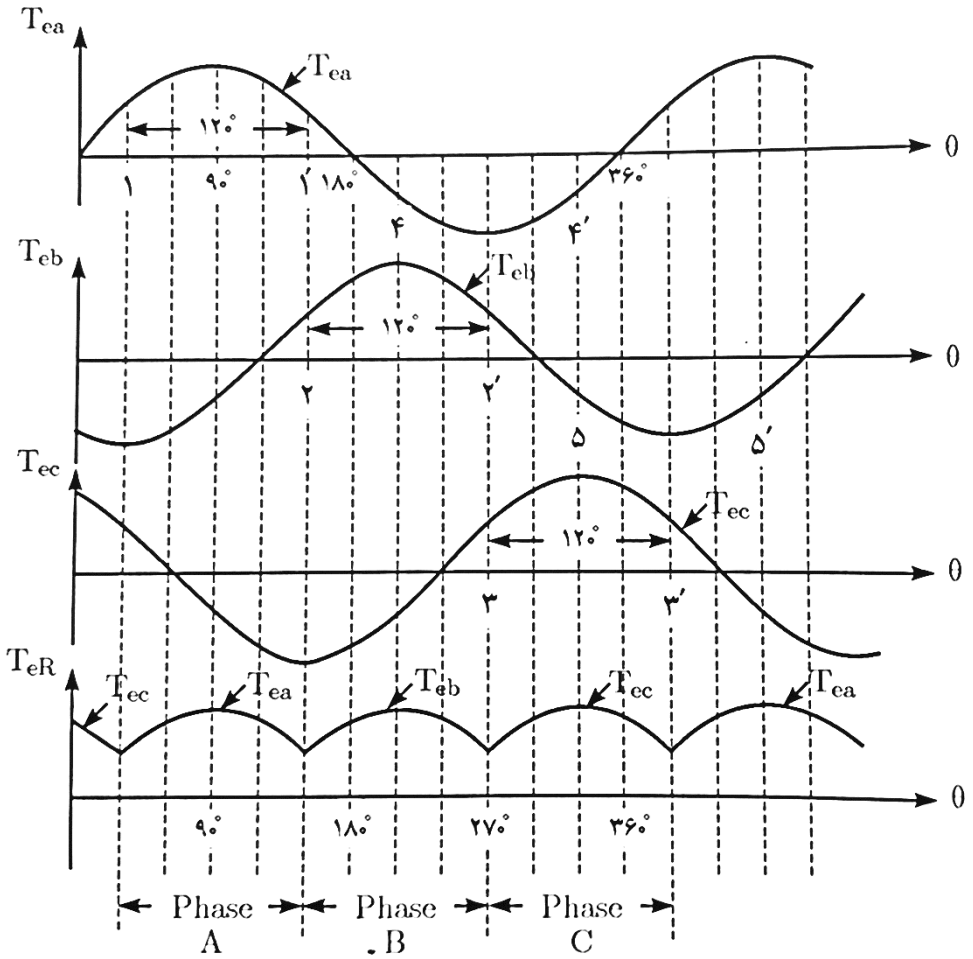
شکل (۶-۲۷): شکل ابتدایی موتور DC بدون جاروبک

که در آن Ia جریان ثابت استاتور در فاز A است. در موتور شکل (۶-۲۷) به ازای هر مقدار Ia ، مقدار گشتاور تولید شده طبق معادله ی (۶-۲۹) به صورت سینوسی با زاویه ی دستاور مطابق شکل (۶-۱۸-الف) تغییر می کند. چنانچه محور سیم پیچی فاز B در فاصله ی ۱۲۰° از محور فاز A فرض شود مشخصه گشتاور Teb تولید شده توسط فاز B، به همان اندازه نسبت به Tea جابه جایی دارد. شکل (۶-۲۸-ب) چگونگی این عمل را نشان می دهد. به همین ترتیب مشخصه ی گشتاور Tec تولید شده به وسیله ی فاز C که در شکل (۶-۲۸-ج) رسم شده است نسبت به Teb به اندازه ۱۲۰° جابه جا می شود

برای چرخش این موتور، به عنوان یک موتور DC بدون جاروبک، سیم پیچی فاز A از طریق ترانزیستور TR1 شکل (۶-۲۶) از لحظه ی ۱ ($\theta = ۳۰^\circ$) تا لحظه ی ۱′ ($\theta = ۱۵۰^\circ$) تحریک می شود به طوری که گشتاور مثبت Tea تولید شود (شکل (۶-۲۸-د). از لحظه ی ۲ ($\theta=۱۵۰^\circ$) تا لحظه ی ۲′ ($\theta =۲۷۰^\circ$) سیم پیچی فاز B از طریق ترانزیستور به مدت چرخش موتور به اندازه تحریک می شود تا گشتاور مثبت تولید شود. بعد از این، به منظور دوران پیوسته موتور BLDC در جهت حرکت عقربه های ساعت دوباره سیم پیچی فاز A و سپس B و C به ترتیب فوق تحریک میشوند. چنانچه ملاحظه میشود در یک موتور DC بدون جاروبک سه پالسه سه فاز، هر سیم پیچی به مدت ۱۲۰از هر سیکل ۳۶۰ ای جریان دار می شود.

❖ بررسی شکل های (۶-۲۷) و (۶-۲۸) نشان می دهد که اگر زمان هدایت ترانزیستورها به اندازه الکتریکی به تاخیر انداخته شود جریان دار شدن فاز A از لحظه ۴ تا ۴′ صورت می گیرد و عوض کردن جهت دوران موتور را ممکن می سازد. معکوس کردن جهت حرکت رتور با معکوس نمودن ترتیب روشن کردن سیم پیچی های استاتور نیز میسر است.

شکل (۶-۲۸) نشان می دهد که گشتاور موتوری تولید شده در یک موتور BLDC (با تغذیه معمولی) دارای ضربان است. استفاده از موتور DC بدون جاروبک ۶ پالسه سه فاز یا ۴ پالسه فاز مقدار ریپل تولید شده در گشتاور را کاهش می دهد. برای موتورهای ۴ پالسه فاز ۶ فاز و شش پالسه سه فاز، هر سیم پیچی به ترتیب در مدت هایی معادل ۹۰° و ۶۰° چرخش تحریک می شود.



شکل (۶-۲۸): مشخصه‌های گشتاور ـ زاویه برای یک موتور BLDC سه‌فاز

اگر سیم پیچی های فازها به طور هم زمان و با جریان های لحظه ای ia، ib و ic تحریک شوند مطابق معادله (۶ -۲۹) و شکل (۶ - ۲۸) معادله گشتاور لحظه ای تولید شده توسط هر یک از فازها، می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$T_{ea} = ki_a \sin\theta$$
$$T_{eb} = ki_b \sin(\theta - ۱۲۰)$$
$$T_{ec} = ki_c \sin(\theta - ۲۴۰)$$

با اندکی پیچیده تر کردن مدار کنترل، می توان شرایطی را فراهم آورد که جریان فازها نیز توسط اطلاعاتی که از خود حسگر موقعیت محور دریافت می شود به صورت توابعی از θتغییر کند. اگر فرض شود که جریان های فازها به صورت سینوسیθ با تغییر کند به طوری که:

$$i_a = I_m \sin\theta$$
$$i_b = I_m \sin(\theta - ۱۲۰)$$
$$i_c = I_m \sin(\theta - ۲۴۰)$$

معادلات گشتاور فازها به صورت زیر در می آید:

$$T_{ea} = KI_m \sin^۲\theta$$
$$T_{eb} = KI_m \sin^۲(\theta - ۱۲۰)$$
$$T_{ec} = KI_m \sin^۲(\theta - ۲۴۰)$$

و برای گشتاور منتجه خواهیم داشت:

$$T_{eR} = T_{ea} + T_{eb} + T_{ec}$$
$$= KI_m \left[\sin^۲\theta + \sin^۲(\theta - ۱۲۰) + \sin^۲(\theta - ۲۴۰)\right]$$
$$= KI_m \left[\frac{۱ - \cos ۲\theta}{۲} + \frac{۱ - \cos ۲(\theta - ۱۲۰)}{۲} + \frac{۱ - \cos ۲(\theta - ۲۴۰)}{۲}\right]$$
$$= \frac{۳}{۲} KI_m$$

۶-۷-۳- کاربردهای موتور BLDC

همانند یک موتور پله ای، سرعت موتورهای DC بدون جاروبک توسط فرکانس سیم پیچی های فاز تعیین می شود. اندازه گشتاور آن ها نیز می تواند با تنظیم دامنه جریان های سیم پیچی های فاز و نیز زاویه بین محور مغناطیسی رتور و محور مغناطیسی فاز تحریک شده کنترل شود. با توجه به امکان ایجاد شرایط مختلف تحریک توسط مدار کنترل، می توان مشخصه های کاری مختلفی از این موتور انتظار داشت. روند سریع رو به کاهش هزینه ی کنترل کننده های الکترونیکی و پیشرفت علم الکترونیک قدرت موجب کاربرد فزاینده BLDC شده است و آن را به عنوان یک رقیب جدی برای موتورهای DC مطرح ساخته است.

محرکه های اصلی چرخش نوار در ضبط صوت ها، محرکه های هار کامپیوترها، دستگاه های اندازه گیری کم هزینه، هواکش کوچک خنک کننده تجهیزات الکترونیکی از جمله کاربردهای موتورهای BLDC است. هم چنین انواع این موتورها ولی با توان نسبتا بزرگ تر در سیستمهای هواپیما و ماهواره، سیستم های حمل و نقل از جمله محرکه های کشتی ها و زیر دریایی ها و نیز بعنوان ژنراتور در توربین های بادی سرعت متغیر استفاده می گردند.