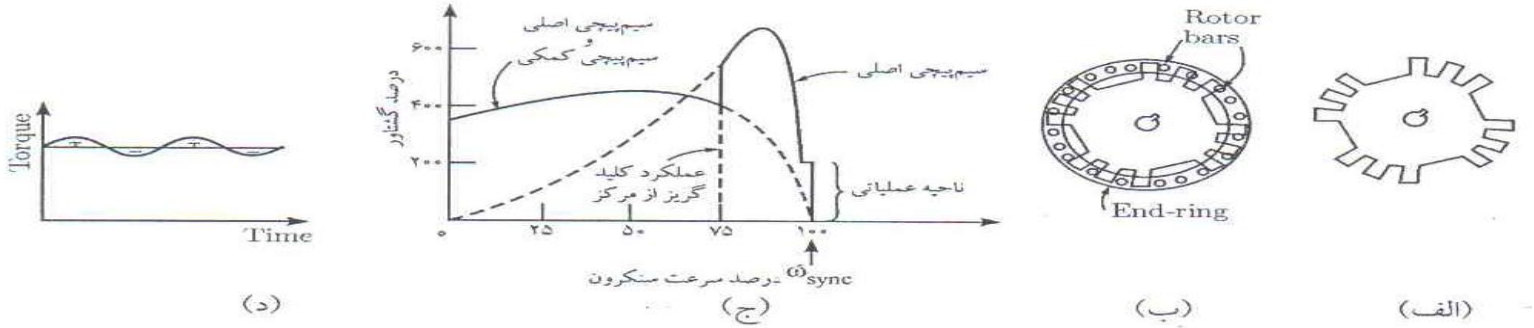
ماشین های الکتریکی مخصوص

دکتر جعفر سلطانی
(استاد تمام دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر حسین ابوترابی زارچی
(استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد)
دکتر شاهرخ شجاعیان
(استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر اصفهان)

- فصل ششم : موتورهای سنکرون مخصوص
- ۱-موتورهای رلوکتانسی تک فاز
- ۲- اصول کار موتور رلوکتانسی تک فاز
- ۳- موتورهای زیر سنکرون رلوکتانسی
- ۴- موتورهای رلوکتانسی سه فاز
- ۵- مقایسه موتور سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورها
- ۶- فرآیند راه اندازی موتور رلوکتانسی سه فاز با راه اندار القایی
- ۷- موتورهای هیسترزیس
- ۸- اصول کار
- ۹- ساختمان موتور هیسترزیس
- ۱۰- اصول عملکرد موتور هیستر زیس
- ۱۱- ماشین های سنکرون مغناطیس دائم
- ۱۲- ماشین سنکرون مغناطیس دائم با شار شعائی
- ۱۳- ماشین های سنکرون مغناطیس دائم با شار محوری
- ۱۴- مقایسه ی ماشین های سنکرون شار محوری و شار شعایی
- ۱۵- مقایسه موتورهای PMSM و BLDC
- ۱۶-تفاوت های ماشین های PMSM و BLDC
- ۱۷- موتورهای DC بدون جاروبک(BLDC)
- ۱۸- موتور DC بدون جاروبک سه فاز سه پالسه (یا نیم وحج)
- ۱۹-اصول کار موتور DCبدون جاربک
- ۲۰-کاربرده ای موتور BLDC

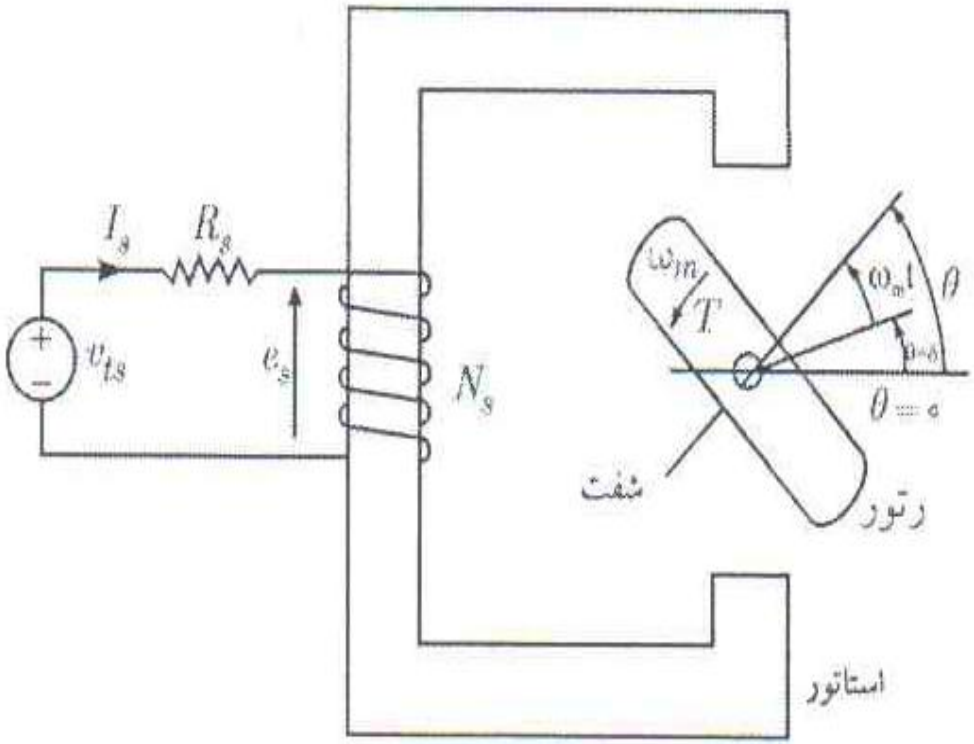


- ۶-۲-۱- اصول کارموتور رلوکتانسی تک فاز
- همان گونه که اشاره شد موتور رلوکتانسی نوعی موتور سنکرون است که نیازی به سیم پیچ تحریک DCدر رتور ندارد و گشتاور آن ناشی از اختلاف رلوکتانس های طولی و عرضی فاصله هوایی است.
- گشتاور با فرض یک مدار مغناطیسی خطی به صورت زیر است :

$$T_r = \frac{۱}{۲}\phi^۲ \frac{d\mathscr{R}}{d\theta} = -\frac{۱}{۲}\phi^۲ \frac{P}{۲}\frac{d\mathscr{R}}{d\theta_e}$$

که در Φشار ، Rمقاومت مغناطیسی مدار و θزاویه بین محور رتور و مبدا است. Pنیز تعداد قطب می باشد.

شکل(۶-۲) ساده ترین ساختمان یک نوع متور رلوکتانسی تک فاز دو قطبی (p=2) را نشان می دهد.



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

معادله این شکل موج به فرم زیر است:

$$\mathscr{R} = a - b\cos 2\theta$$

همانگونه که از روی شکل (۶-۳) مشخص است دوره تناوب تغییرات R برابر π رادیان است. اگر مقادیر حداقل و حداکثر R به ترتیب R(d) و R(q) فرض شوند آنگاه:

$$\left.\begin{aligned}\mathscr{R}_d &= \mathscr{R}\big|_{\theta=0} = a-b\\ \mathscr{R}_q &= \mathscr{R}\big|_{\theta=\pi/2} = a+b\end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{cases} a = \frac{1}{2}\left(\mathscr{R}_q + \mathscr{R}_d\right)\\ b = \frac{1}{2}\left(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d\right)\end{cases}$$

و شکلی کلی رابطه (۶-۲) به صورت زیر تغییر می یابد:

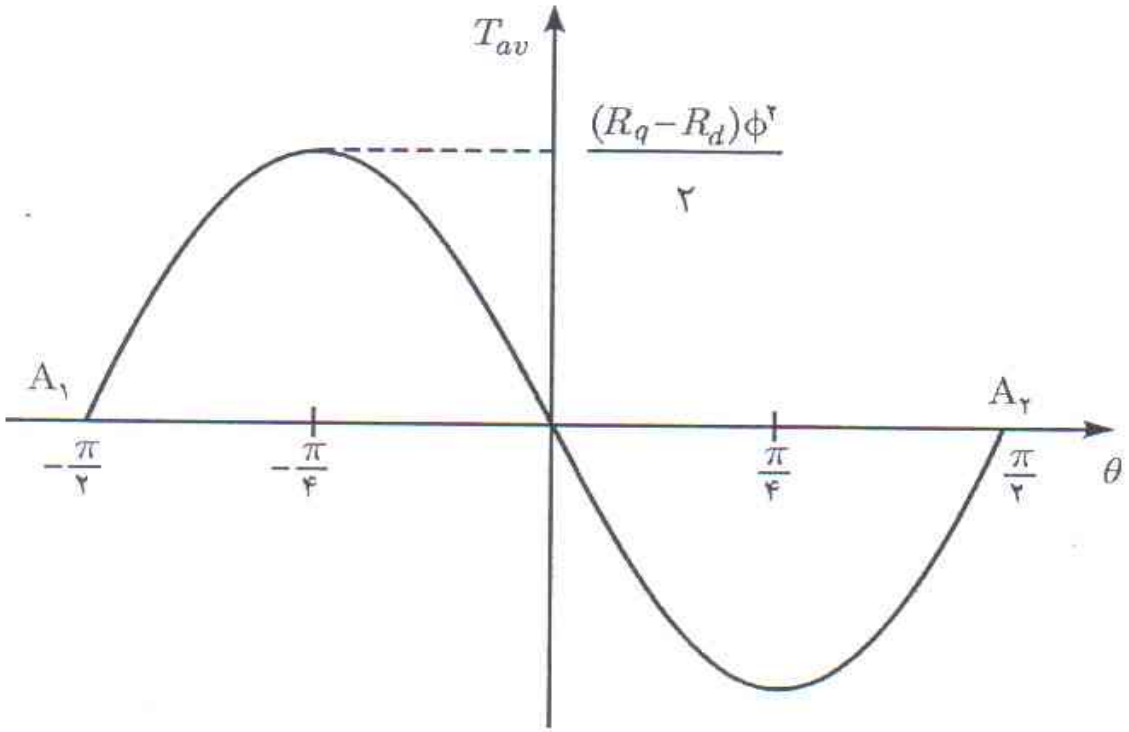
(۶-۴)

$$\mathscr{R} = \frac{1}{2}(\mathscr{R}_q + \mathscr{R}_d) - \frac{1}{2}(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_b)\cos 2\theta$$

با جایگذاری مقدار R در معادله (۶-۱) شکل کلی معادله گشتاور به فرم زیر حاصل می آید:

$$T_r = -\frac{1}{4}\phi^2(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d)\sin 2\theta \qquad (۵-۶)$$

مطابق شکل (۶-۴) ، گشتاور تولیدی در نقطه $\theta=0$ و $\theta=\pm\pi/2$ صفر است و به همین دلیل چنین نقاطی را می توان نقاط تعادل سیستم نامید.



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

اگر سیم پیچی شکل (۶-۲) از یک منبع سینوسی با ولتاژ V(t) تغذیه می گردد ، در این صورت:

$$v = Ri + e \quad ; \quad v(t) = \sqrt{2}V\cos\omega t \tag{۶-۶}$$

در رابطه فوق ، R، i ، e ب هترتیب مقاومت اهمی سیم پیچی ، جریان گذرنده از آن و نیروی محرکه القاء شده در سیم پیچی است . با چشم پوشی از R مقدار e نیز سینوسی است و در نتیجه یک فلوی سینوسی در مدار مغناطیسی برقرار می گردد.

$$\phi(t) = \phi_m \sin\omega t \tag{۶-۷}$$

بر اساس رابطه (۶-۵) ، معادله گشتاور لحظه ای تولیدی برابر است با:

$$T_r = -\frac{1}{2}\phi_m^2 \sin^2\omega t(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d)\sin 2\theta$$

$$= -\frac{1}{4}\phi_m^2(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d)(\sin 2\theta - \sin 2\theta\cos 2\omega t) \tag{۶-۸}$$

چنانچه رتور با سرعت زاویه ای ثابت ωm در جهت مثبت θ در حال چرخش باشد آنگاه:

$$\theta = \omega_m t + \delta \qquad (۹-۶)$$

که در آن δ =($t=۰$) θ می باشد . پس از جایگذاری θ در رابطه (۶-۸) داریم:

$$T_r = -\frac{۱}{۴}\phi_m^۲ \left(R_q - R_d\right)\{\sin ۲(\omega_m t + \delta) - \frac{۱}{۲}\sin ۲\left[(\omega_m + \omega)t + \delta\right] - \frac{۱}{۲}\sin ۲\left[(\omega_m - \omega)t + \delta\right]\} \qquad (۱۰-۶)$$

طبق رابطه (۶-۱۰) ، گشتاور تولیدی در یک موتور رلوکتانسی تک فاز را می توان با استفاده از تئوری میدان های گردان نیز توجیه کرد.

رابطه (۶-۱۰) نشان می دهد که گشتاور لحظه ای موتور رلوکتانسی دارای سه مولفه با تغییرات زمانی سینوسی است . با این وجود مقدار متوسط آن در صورتی که $\omega m = \pm\omega$ باشد مخالف صفر است. در نتیجه چنانچه موتور با سرعت زاویه ای ω در هر یک از و جهت بچرخد مقدار متوسط گشتاور تولیدی منطبق بر رابطه زیر خواهد بود.

$$T_{r,av} = +\frac{۱}{۸}\phi_m^۲ \left(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d\right)\sin ۲\delta \qquad (۱۱-۶)$$

از رابطه(۶-۱۰) می توان نتیجه گرفت که چنانچه R(q) = R(d) باشد کوپل رلوکتانسی صفر است. همچنین موتور رلوکتانسی فاقد گشتاور راه اندازی در لحظه راه اندازی ω = ۰ و لذا ωm ≠ ω می باشد. از آنجا که مقدار ϕm عملا ثابت است گشتاور متوسط طبق رابطه (۶-۱۱) تابعی از sin۲δ است. به همین خاطر δ زاویه گشتاور بار گفته می شود . با توجه به این که با جایگذاری در (۶-۱۱) و اعمال اندکی تغییر داریم:

$$\phi_m = \frac{V}{۴/۴۴Nf} = \frac{\sqrt{۲}V}{۲\pi f}$$

(۶-۱۲)

$$T_{r,av} = \frac{۱}{۴}\frac{V^۲}{\omega}\left(\frac{\mathscr{R}_q}{\omega N^۲} - \frac{\mathscr{R}_d}{\omega N^۲}\right)\sin ۲\delta; ۲\pi f = \omega$$

از آنجا که برای هر سیم پیچ $L=N^2/R$ ، پس:

$$X_{qq} = \omega L_{qq} = \omega N^۲ / \mathscr{R}_q$$
$$X_{dd} = \omega L_{dd} = \omega N^۲ / \mathscr{R}_d$$

(۶-۱۳)

و در نتیجه ، شکل جدید معادله گشتاور رلوکتانسی متوسط عبارت است از(در حالت رتور با یک جفت قطب (ω =sin):

$$T_{r,av} = \frac{۱}{۴}\frac{V^۲}{\omega_{syn.}}\left(\frac{۱}{X_{qq}} - \frac{۱}{X_{dd}}\right)\sin ۲\delta$$

(۱۴-۶)

که در آن ، X qq وX dd به ترتیب راکتانس های سیم پیچی استاتور به ازای $\theta=\pi/۲$ و $\theta=۰$ است.

از آنجا که گشتاور متوسط موتور های رلوکتانسی در هر سرعتی جز سنکرون صفر است ، لذا این موتورها باید به نحوی به سرعت سنکرون برسند. این عمل با گذاشتن یک قفس سنجابی بر روی رتور انجام می گیرد ، ولی موتور القایی تک فاز نیز فاقد گشتاور راه اندازی است. لذا موتور مذکور باید با یکی از روش های اندازه گیری موتور های القایی تک فاز راه اندازی شود و سرعت آن تا نزدیکی های سرعت سنکرون بالا آید و در صورت وجود شرایط لازم ، سرعت موتور به سنکرون رسد و در آن سرعت باقی ماند.

شکل (۶-۵) یک موتور رلوکتانسی تک فاز را با راه انداز خازنی (دائم) نشان می دهد. قرار دادن قفس سنجابی و سیم پیچ راه انداز ، دو مولفه گشتاور در دو جهت مختلف تولید می کند که ناشی از وجود میدان های معکوس و مستقیم است. پس از رسیدن دور موتور به سرعت سنکرون ، اندازه مولفه مستقیم صفر می گردد و مولفه معکوس به صورت یک بار مکانیکی بر رتور تحمیل می شود و مقدار گشتاور خروجی آن را کاهش می دهد.

به علت وجود گشتاور های ضربانی با فرکانس دو و چهار برابر ، این موتور ها دارای سر و صدای زیادی هستند و ممکن است در موارد خاصی مناسب نباشند.

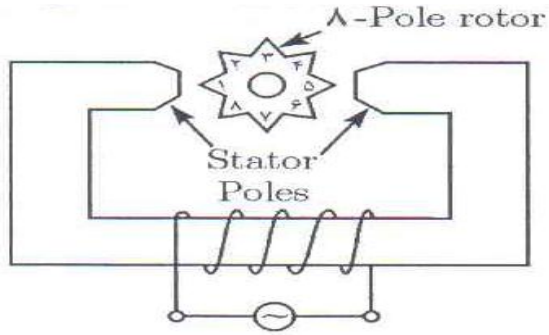
۶-۳- موتور های زیر سنکرون رلوکتانسی :

نمایی از موتور زیر سنکرون رلوکتانسی در شکل (۶-۶) به تصویر کشیده شده است که شامل دو قطب بر روی استاتور و تعداد زیادی زوج قطب (اینجا هشت قطب) بر روی رتور است. این موتور نیز فاقد گشتاور راه اندازی است و بنابران با چرخاندن آن با دست به سرعت سنکرون خود رسانده می شود.

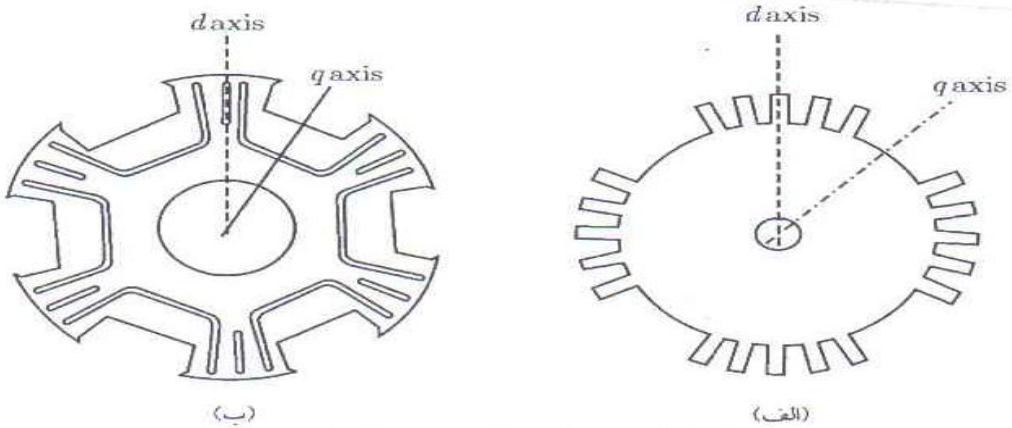
سرعت موتور توسط تعداد قطب های رتور تعیین می گردد و برابر است با:

$$\text{سرعت رتور} = \frac{\text{فرکانس تغذیه} \times ۱۲۰}{\text{تعداد قطب‌های رتور}}$$

چون سرعت رتور از سرعت سنکرون متناظر ب اقطب های استاتورکمتر است ، به این موتور ، موتور رلوکتانسی زیر ستکرون گویند . در رتور هشت قطبی شکل (۶-۶) ، سرت چرخش به ازای فرکانس تغذیه ۵۰ هرتز ، ۷۵۰rmp می باشد. دو نمونه دیر از رتور های این نوع موتور در شکل (۶-۷) آمده 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 زیر سنکرون دارای P قطب باشد آنگاه دوره تناوب تغییرات مقاومت مغناطیسی از π به π/P ۲ کاهش می یابد و معادله آن به صورت زیر در می آید:

$$R = \frac{1}{2}(\mathscr{R}_q + \mathscr{R}_d) - \frac{1}{2}(\mathscr{R}_q - \mathscr{R}_d)\cos P\theta_m \qquad (۱۵-۶)$$

که در آن θm زاویه مکانیکی است . در چنین حالتی ، پس از انجام عملیاتی مشابه آنچه گذشت و با توجه به این که :

$$T_r = -\frac{1}{2}\phi^2 \frac{d\mathscr{R}}{d\theta_m} \quad , \quad \theta_m = \omega_m t + \delta_m$$

خواهیم داشت:

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

$$-\frac{1}{2}\left[\sin((P\omega_m + 2\omega)t + P\delta_m) + \sin((P\omega_m - 2\omega)t + P\delta_m)\right] \qquad (۱۶-۶)$$

ملاحظه می شود که برای داشتن گشتاور متوسط غیر صفر ، باید موتور در سرعت های زیر بچرخد:

$$\frac{P}{2}\omega_m = \pm\omega \quad \text{یا} \quad \omega_{syn} = \pm\frac{2\omega}{P} \qquad \omega: \text{فرکانس زاویه‌ای تغذیه}$$

(۱۷-۶)

نهایتا با اندکی محاسبات ، مقدار متوسط گشتاور برابر خواهد شد با:

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

(۱۸-۶)

از آنجا که مقدارδ بر حسب رادیان الکتریکی برابر با δ= p/۲ δm می باشد لذا رابطه فوق به صورت زیر در می آید:

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

(۱۹-۶)

موتور رلوکتانسی تک فاز ۲ قطب و موتور زیر سنکرون رلوکتانسی در چنین شرایطی تقریبا ثابت می ماند.

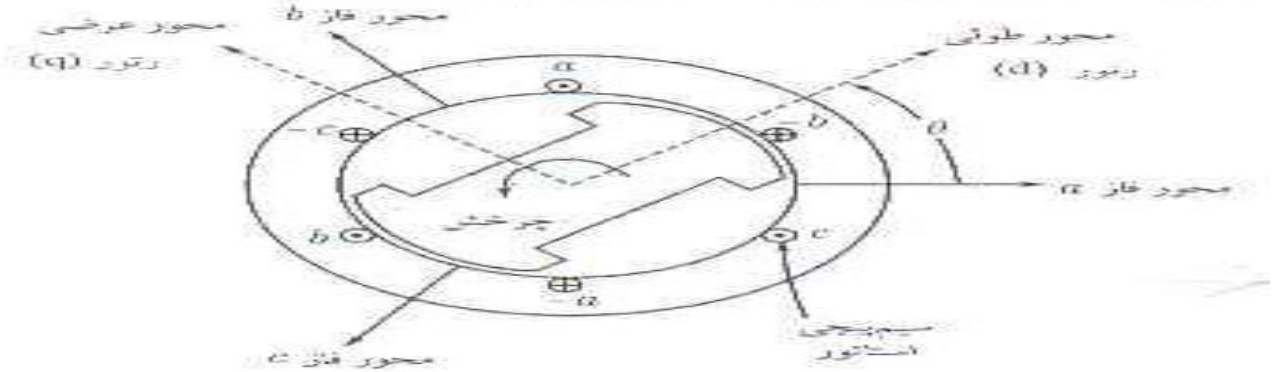
۶-۴- موتور های رلوکتانسی سه فاز

یک ساختار مغناطیسی ساده مانند آنچه در شکل (۶-۲) نشان داده شد به می تواند به عنوان یک مبدل التکرومکانیکی 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 علیرغم آنکه محور مغناطیسی میدان استاتور در آن ساکن است مانند یک موتور سنکرون عمل می کند.

شکل (۶-۸) نمایی از سطح مقطع موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز را نشان می دهد که دارای رتوری قطب برجسته۸ از مواد فرومغناطیس می باشد و استاتوری شبیه موتور القایی دارد.

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 طبیعتا گشتاور الکترومغناطیسی در این نوع موتور تنها شامل مولفه رلوکتانسی است زیرا مولفه گشتاور تداخلی ناشی از عکس العمل دو میدان تولید نمی شود.

در شکل(۶-۸) ، سیم پیچ های تک حلقه روی استاتور نماینده سیم پیچی های گسترده ای با محور مغناطیسی نشان داده شده می باشد. میدان دوار با سرعت سنکرون در فاصله هوایی می چرخد. وقتی رتور به طور سنکرون با میدان گردان فاصله هوایی می چرخد گشتاور تولیدی تلاش می کند تا مسیر رلوکتانس مینیمم را با میدان گردان فاصله هوایی هم امتداد سازد.



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

همانطور که می دانیم در یک ماشین سنکرون با قطب برجسته هم مولفه گشتاور تداخلی و هم مولفه گشتاور رلوکتانسی وجود دارد:

$$T = \left(\frac{3V_t E_f}{X_d}\sin\delta + 3\frac{X_d - X_q}{2X_d X_q}V_t^2 \sin 2\delta\right) / \omega_{syn.} \qquad (۲۰-۶)$$

ولی در موتور رلوکتانسی به علت نبودن جریان تحریک در رتور (Ef=۰) گشتاور تداخلی صفر است و فقط کوپل رلوکتانسی وجود دارد . بنابراین:

$$T_r = \frac{3}{\omega_{syn.}}\left(\frac{X_d - X_q}{2X_d X_q}\right)V^2 \sin 2\delta \qquad (۲۱-۶)$$

که در آن ، V مقدار موثر ولتاژ فاز ، Xd و Xq راکتانس های طولی و عرضی ماشین و δ زاویه محور مغناطیسی رتور با محور مغناطیسی گردان استاتور است.

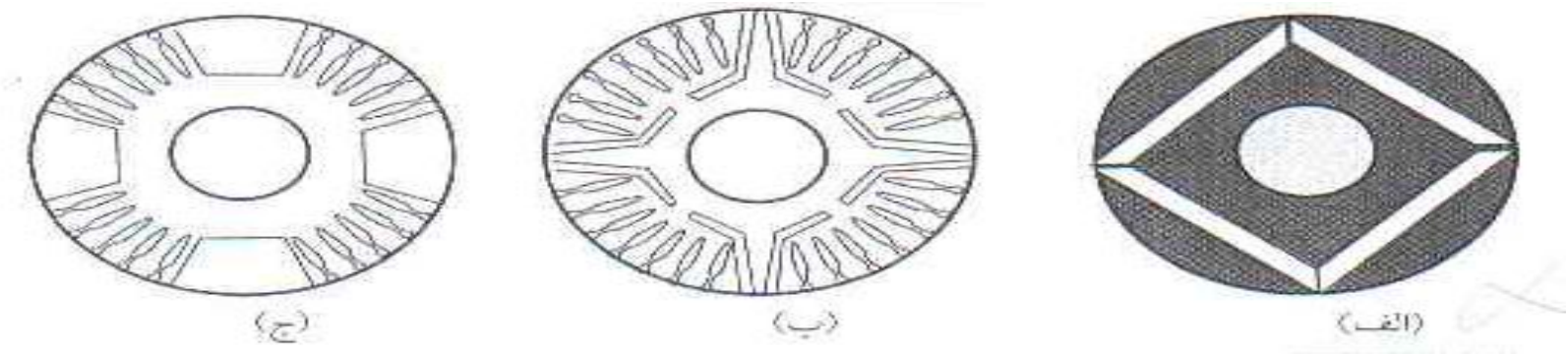
برای ایجاد گشتاور راه اندازی و شتابگیری رتور و سنکرون شدن آن با میدان دوار فاصله هوایی ، وجود یک قفس سنجابی بر روی رتور اجتناب پذیر است . افزایش استحکام مکانیکی رتور ، میراکنندگی نوسانات سرعت و حفظ سنکرونیزاسیون تحت گشتاور بارهای ضربه ای ، افزایش سرعت تغییر گشتاور و تسهیل در کنترل سرعت رتور در حالت های گذرا با وجود نوسان در گشتاور بار از دیگر مزایای وجود قفس بر روی رتور می باشد.

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

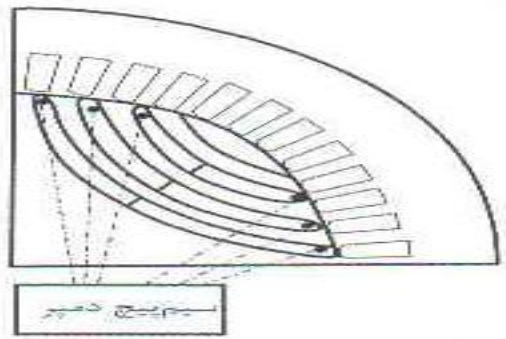
القایی نمایند در پی ندارند. برای دستیابی به ضریب برجستگی بزرگ ، دو طرح تکامل یافته رتور پیشنهاد شده که از لحاظ فرآیند ساخت متفاوتند:

۱-رتور مورق شده در راستای شعاع(TLA)

۲- رتور مورق شده در راستای محور(ALA)



شکل(۶-۹) : نمونه از طرح های رتور موتور های سنکرون رلوکتانسی با راه اندازی خط ، الف) رتور صلب با یک سد شار: ب) و ج) رتور مورق تغییر یافته موتور القایی



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

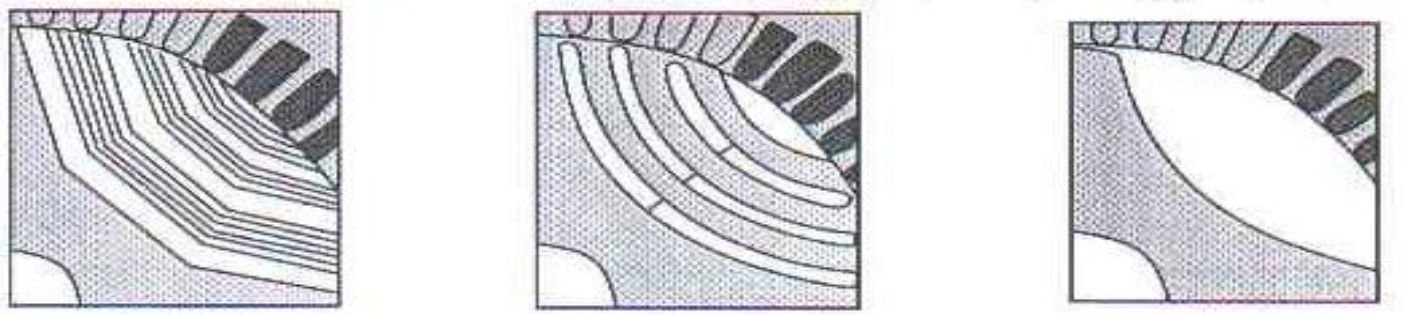
رتور های نوع TLA از صفحات صاف استاندارد فرومغناطیسی ساخته می شوند که مطابق شکل (۶-۱۱-ب) بخشهایی از آن برداشته یا سوراخ شده اند تا مسیر های خاصی برای شار بوجود آید. در رتور نوع ALA ، ورقه ای فرومغناطیسی و غیر فرومغناطیس به شکل U و V خم می شوند و به موازات شافت رتور در میان هم قرار می گیرند.

رتور 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 حلق ههای انتهایی می باشد.

با توجه به تلفات سطح رتور ناشی از هارمونیک های فضایی فاصله هوایی ، استفاده از ورقه های نازک در رتور های نوع TLA موثر است .

شکل (۶-۱۱-ج) ، تعداد خیلی زیاد سد شار ، محتوای هارمونیک های فضایی فاصله هوایی و ریپل گشتاور و تلفات آهن را می کاهد . دهانه های شیارهای استاتور باعث تغییرات چگالی شار فاصله هوایی شده و جریان های فوکو را در ساختار ALA القاء می کنند . بنابراین ورقها باید نازک و با مقاومت الکتریکی بالا باشند. با این وجود ، ساخت رتور ALA به واسطه لزوم خمکاری دقیق و مونتاژ پیچیده ، پر هزینه است و تا کنون صرفا برای تحقیقات و به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است.

اریب ساختن رتور TLA به مراتب از نوع ATA راحت تر است.



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

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

نتایج علمی به دست آمده نشان می دهند که در دمای نامی سیم پیچ ها ، موتور سنکرون رلوکتانسی بطور پیوسته گشتاور بیشتر و بالطبع توان بیشتری تحویل می دهد اما در موتور های 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 و موتور القایی مشابه برای مقایسه در جدول ۶-۱ آورده شده است.

به طور خلاصه ، مزایای موتور سنکرون رلوکتانسی در مقایسه با سایر موتورها را می توان به صورت زیر برشمرد:

۱-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 پایین و حتی صفر بر موتور القایی رجحان دارد.

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	

حذف سنسور موقعیت یا سرعت، هزینه درایو را کاهش داده و قابلیت اطمینان آن را می‌افزاید.

حذف سنسور موقعیت یا سرعت ، هزینه درایو را کاهش داده و قابلیت اطمینان آن را می افزاید.

۲- موتور های سنکرون رلوکتانسی دارای ساختار رتور ساده ای هستند و اساسا در کاربردهای یا درایوهای اینورتری ، نیازی به قفس راه انداز ندارند. لذا ، عموما از تلفات رتور به واسطه عدم حضور قفس صرف نظر می گردد. در نتیجه دمای موتور صرفا به واسطه تلفات استاتور بالا می رود و انتقال حرارت از طریق بدنه موتور به محیط اطراف صورت می گیرد.

۳- استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی کاملا 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- هنگامیکه 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 پایین ، موتور سنکرون رلوکتانسی از نقطه نظر راندمان در جایگاه بالاتر و برجسته تری از موتور القایی قراردارد.

۶-موتور های 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 واسه پخش فضایی سینوسی هادی ها در سطح استاتور دارای نیروی محکره مغناطیسی گردان در فاصله هوایی می باشد و لذا با مشکل ضربان های شدید گشتاور و نویز صوتی زیاد که از معایب عمده موتور های 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 آهنربای دائم بکار رفته در ماشین های سنکرون مغناطیس دائم گردد. به علاوه سرعت بیش از حد رتور ممکن است باعث جدا شدن آهنربا ها از روی رتور به واسطه نیروی گریز از مرکز می 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 آنجا که رتور موتور سنکرون رلوکتانسی فاقد هر گونه مغناطیس دائم بوده و دارای استحکام مکانیکی بالایی است در مقایسه با موتور های سنکرون مغناطیس دائم برای کاربرد های 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.

- با به کار گیری آهن ربای دائم در رتور موتور سنکرون رلوکتانسی (PMASynRM) ، ضریب قدرت موتور بهبود و نتیجاتا جریان استاتور کاهش می یابد. این امر به نوبه خود تلفات اهمی استاتور را میکاهد و بدین ترتیب ، راندمان SynRM نیز ارتقاء می یابد.

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

۱ – در مقایسه با موتور های مغناطیس دائم و رلوکتانس سوئیچ شده ، در سرعت های پایین گشتاور و نسبت گشتاور به اینرسی کمتری دارند. به علاوه برای اطمینان از ورود موتور به حالت سنکرونیزم ، میبایست بار مکانیکی روی شافت در لحظه راه اندازی به اندازه کافی کمتر از بار نامی باشد.

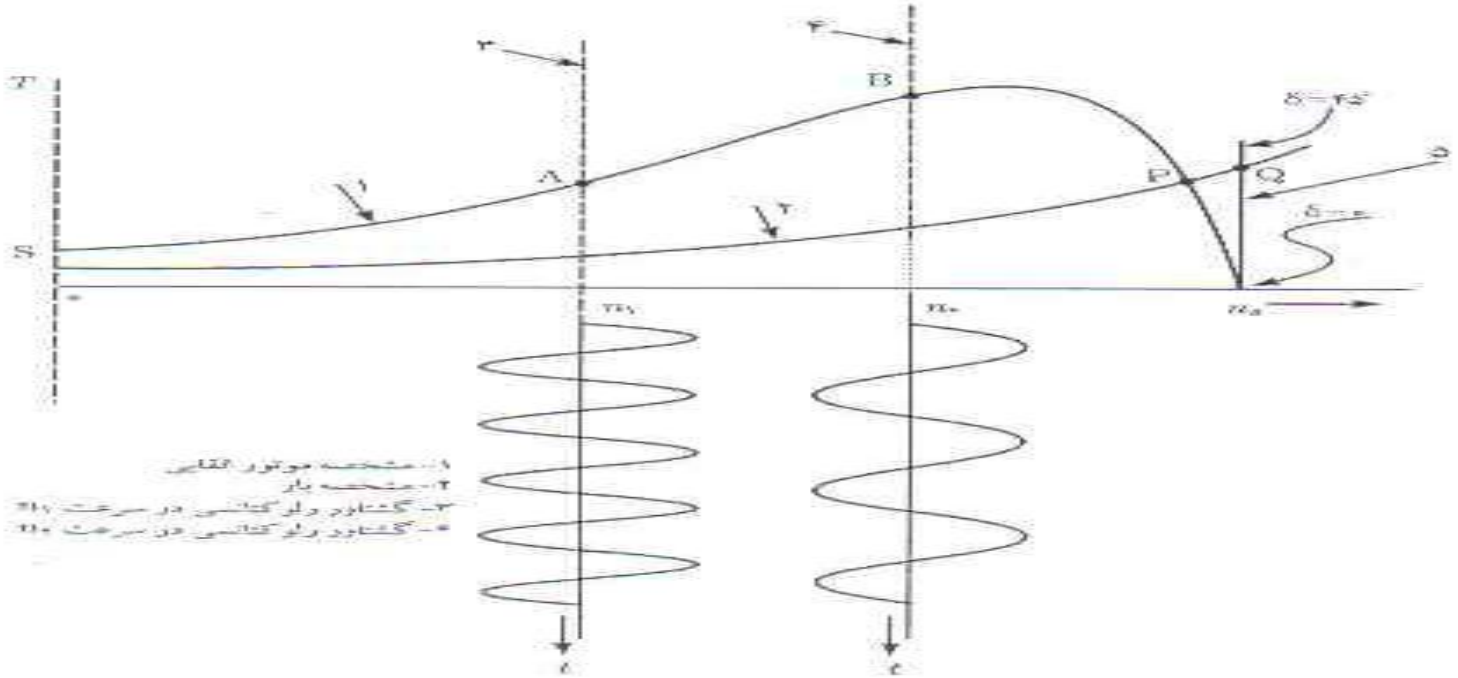
۲- گشتاور و بازده آنها در بار کامل و ناحیه توان ثابت نسبت به ماشین های مغناطیس دائم کمتر است.

۳- ضریب توان موتور سنکرون رلوکتانسی در بار نامی 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 بهترین نسبت به موتور القایی ارائه دهد.

۶-۴-۲- فرایند 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 . فرآیند راه اندازی و رساندن به مود سنکرون معمولا با تعبیه یک قفس سنجابی بر روی رتور امکان پذیر است.در ادامه ، نحوه اینکار تشریح می گردد . با فرض سینوسی بودن تغییرات R بر حسب زاویه و به هنگام چرخش رتور با سرعت ωm ، اندازه گشتاور لحظه ای به صورت زیر خواهد بود:

$$T = -K\sin(۲(\omega_s \pm \omega_m)t + ۲\delta) \qquad (۶-۲۲)$$



شکل(۶-۱۲) نمونه ای از مشخصه کلی گشتاور- سرعت یک موتور رلوکتانسی سه فاز با راه انداز القایی

شکل (۶-۱۲) نمونه ای از مشخصه کلی گشتاور- سرعت یک موتور رلوکتانسی سه فاز با راه انداز القایی را نشان می دهد.

در این شکل نوسانات گشتاور در سرعت های صفر ، n۱ و n۲ متناظر با نقاط A و B با خط چین مشخص شده اند. همچنین تغییرات زمانی گشتاور ها در سرعت های n۱ و n۲ زیر نقاط متناظر و یا مقیاس های زمانی مشابه رسم 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 اید. در چنین سرعتی ، گشتاور بار و گشتاور القایی همدیگر را خنثی می کنند. گشتاور رلوکتانسی به عنوان گشتاور شتاب دهنده (اعم از مثبت و منفی) روی محور باقی می ماند.

لذا این گشتاور در نیمه مثبت سیکل تغییرات خود ، افزایش سرعت موتور اقدام می کند در حالی که درنیمه منفی در جهت عکس عمل می کند. بنابراین می توان یک نوسان سرعت در حوالی n انتظار داشت.

اگر معادله دینامیکی حرکت قسمت گردان(اعم از رتور ، بار و ...) به صورت خلاصه زیر فرض شود:

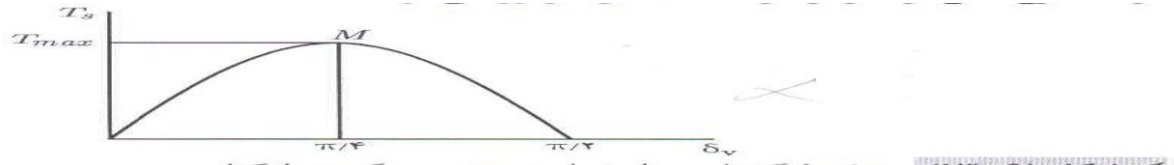
$$T_a = J\, d\omega/dt \qquad (۲۳-۶)$$

می توان تغییر سرعت در هر نیم سیکل گشتاور رلوکتانسی را به صورت زیر درآورد:

$$\Delta\omega = \int_{t_1}^{t_1+\frac{T}{2}} T_a\, dt / J \qquad (۲۴-۶)$$

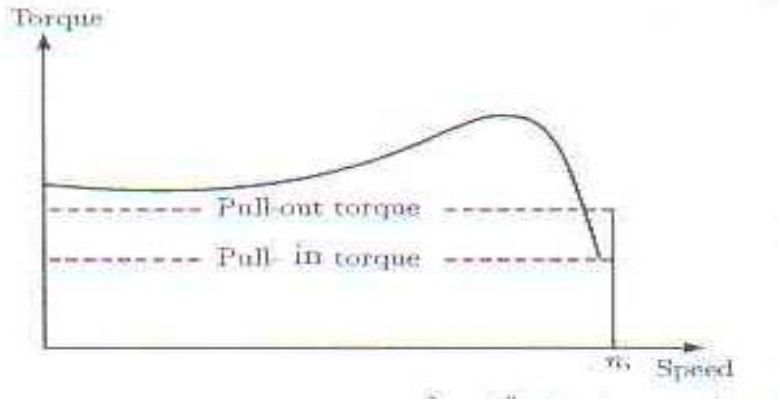
در روابط فوق ، J ممان اینرسی قسمت گردان و Ta گشتاور شتاب دهنده است. اگر سرعت رتور در یکی از نوسانات خود در جهت مثبت به ns برسد مولفه القایی گشتاور صفر می شود و به علت صفر شدن لغزش ، نوسانات گشتاور رلوکتانسی و در نقطه کار Q به چرخش خود ادامه می دهد.

شکل(۶-۱۳) مشخصه گشتاور موتور سنکرون رلوکتانسی را پس از رسیدن به سرعت سنکرون بر حسب تغییرات زاویه بار δ نشان می دهد. این مشخصه متناظر با خط عمودی رسم شده 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 می شود و به صورت موتور القایی به کارخود ادامه می دهد. در این هنگام نوسانات گشتاور رلوکتانسی نیز مجددا پدیدار شده و موجب نوسانات سرعت و سر و صدای موتور می شود.



شکل (۶-۱۳): مشخصهٔ گشتاور – زاویه بار در موتور سنکرون رلوکتانسی

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.



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

۶-۵- موتورهای هیسترزیس

۶-۵-۱ اصول کار

از طرف رتور ، گشتاور بر میدان استاتور وارد می اید که در جهت خلاف چرخش میدان است. عکس العمل همین گشتاور بر خود رتور وارد می گردد و نهایتا کوپلی روی رتور ظاهر می شود که در جهت چرخش میدان است : به عبارت ساده تر ، گشتاوری که ناشی از تلف انرژی (ناشی از سطح حلقه هیسترزیس) به وجود می اید رتور را در جهت چرخش میدان به حرکت در می آورد.پدیده فوق اساس کار موتور هیسترزیس است . از مشخصه های مهم این نوع موتور آن است که گشتاور آن از سرعت صفر تا سرعت سنکرون مقدار تقریبا ثابتی است و چنانچه گشتاور بار در حین دورگرفتن از گشتاور تولیدی موتور تجاوز نکند سرعت محور را بدون توجه به اینرسی قسمت گردان ، قطعاتا مقدار سنکرون بالا می برد . با توجه به این که این گشتاور ناشی از مقدار انرژی لازم برای تامین تلفات هیسترزیس است ، می توان انتظار داشت که هر چه هیسترزیس ماده سازنده رتور " چاق تر" باشد گشتاور تولیدی نیز بیشتر می گردد.

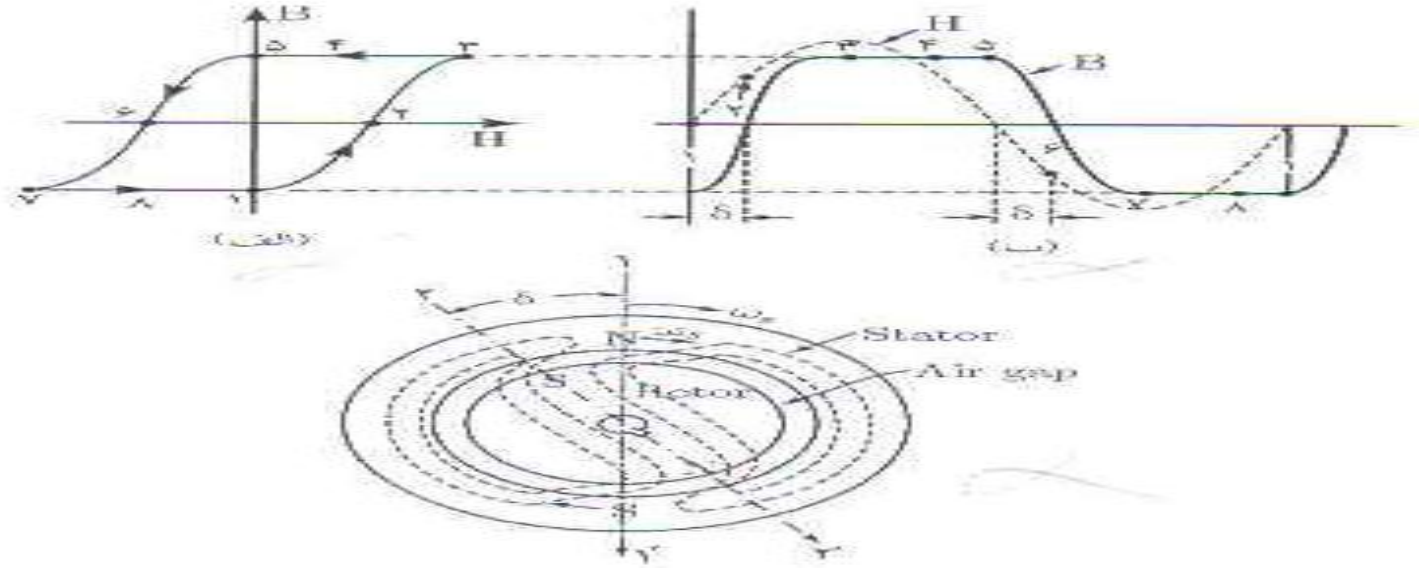
۶-۵-۲- ساختمان موتور هیسترزیس

این موتور ممکن است از منبع تغذیه تک فاز یا سه فاز برای عملکرد استفاده کنند.در یک موتور هیسترزیس تک فاز استاتور دارای دو سیم پیچ با زاویه فضایی ۹۰ درجه الکتریکی است که جریان های گذرنده از آن ها دارای اختلاف فاز زمانی می باشند. این اختلاف فاز توسط یک خازن دائم سری شده با یکی از سیم پیچ ها (و یا با ساختار قطب چاکدار در موتورهای هیسترزیس خیلی موچک) تامین میگردد. قسمت اصلی رتور از یک حلقه استوانه ای از جنس کروم ، کبالت یا فولاد سخت ساخته شده است که مطابق شکل(۶-۱۵-الف) دارای حلقه هیسترزیس خیلی بزرگی است.پیرامون رتور هیچ گونه شیاری وجود ندارد و بنابراین فاقد هر گونه سیم پیچی است.

۶-۵-۳- اصول عملکرد موتور هیسترزیس

اصول عملکرد موتور هیسترزیس مبتنی بر حلقه B-H ماده مغناطیسی می باشد. مطابق شکل ،هنگامی که H صفر است B دارای مقداری منفی در لحظه ۱ می باشد و موقعی که H در لحظه ۲ مثبت است B صفر می باشد. 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 می توان به روش نقطه یابی از حلقه هیسترزیس مربوطه استخراج کرد.

بر اساس شکل (۶-۱۵-ب) می توان پدیده هیسترزیس را به صورت پدیده ای تعریف کرد که موجب تاخیر فاز چگالی شار القاء شده B نسبت به شدت میدان به وجود آورنده آن ،H می گردد. در واقع همین اختلاف فاز زمانی که با δ نشان داده می شود منشا ایجاد گشتاور در موتور هیسترزیس است.



شکل(۶-۱۵) موتور هیسترزیس ، الف) حلقه هیسترزیس (B-H) ، ب) تاخیر زمانی B نسبت به H به میزانδ ،

ج)توزیع میدان مغناطیسی در استاتور ، فاصله هوایی و رتور یک موتور دو قطب.

کل گشتاور راه اندازی از دو بخش تشکیل می شود : یکی گشتاور هیسترزیس که در بالا تشریح شد و دیگری گشتاور القایی که توسط جریان های فوکر در آهن رتور حادث می گردد.

چنانچه گشتاور تولیدی(گشتاور هیسترزیس – گشتاور جریان فوکو) بیشتر از گشتاور بار باشد ، رتور از حالت سکون شتاب می گیرد.

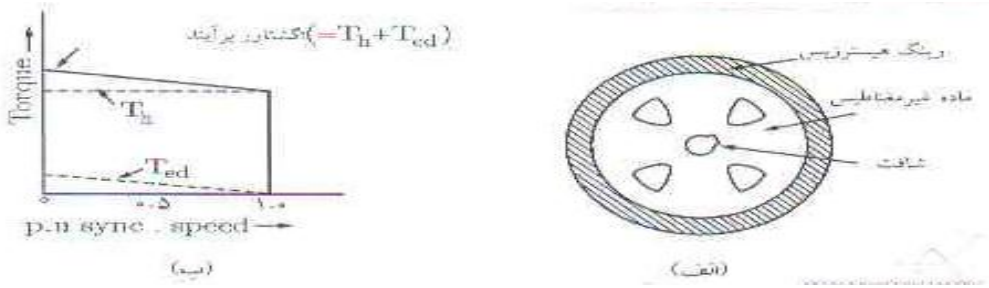
تلفات هیسترزیس در هر فرکانس لغزش sf برابر است با:

$$P_h = sP_{ho}$$ (۲۵-۶)

در یک موتور القایی چند فازه ، تلف اهمی رتور موجب تولید گشتاور الکترومغناطیسی می گردد . به طور مشابه ، تلف هیسترزیس رتور منجر به گشتاور هیسترزیس می شود که عبارت است از:

$$T_h = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{\text{تلف هیسترزیس رتور}}{s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sP_{ho}}{s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot P_{ho}$$ (۲۶-۶)

همانگونه که مشاهده می گردد لغزش s در رابطه Th ظاهر نمی گردد . بنابراین به ازای یک آمپر دور ثابت استاتور ، P ho ثابت می باشد و در نتیجه گشتاور هیسترزیس از حالت سکون تا سرعت سنکرون مطابق شکل(۶-۱۶- ب) ثابت خواهد ماند.



شکل(۶-۱۶) الف) رتور موتور هیسترزیس ، ب) مشخصه گشتاور سرعت موتور هیسترزیس

تلفات فوکو به شکل زیر باعث تولید گشتاور جریان فوکو می گردد:

$$T_{ed} = \frac{1}{\omega s} \frac{\text{تلف جریان فوکو}}{s} = \frac{1}{\omega_S} \cdot \frac{s^2 P_{eo}}{s} = \frac{1}{\omega_s} sP_{eo}$$ (۲۷-۶)

در حالت سکون ، تلف فوکو و در نتیجه گشتاور جریان فوکو بیشترین مقدار خود را دارد زیرا S = ۱ می باشد.

در طول مدت شتاب گیری رتور ، هر دو گشتاور هیسترزیس و فوکو وجود دارند اما در سرعت سنکرون تنها گشتاور هسترزیس وجود دارد و به همین خاطر به موتور هیسترزیس معروف است . مشخصه گشتاور – سرعت موتور هیسترزیس در شکل (۶-۱۶- ب) آمده است.

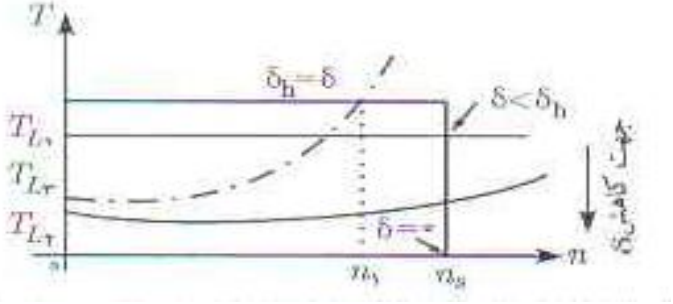
درک اختلاف بین موتور های رلوکتانسی و هیسترزیس حائز اهمیت است. در موتورهای رلوکتانسی ، موتور به عنوان یک موتور القایی تک فاز راه اندازی می شود و رتور تحت شرایط خاصی وارد مود سنکرون می گردد.اما در یک موتور هیسترزیس ، هر باری می تواند با قطب های استاتور سنکرون شود مشروط بر این که گشتاور هیسترزیس قادر به شتاب دهی به آن باشد.

از آنجا که پیرامون رتور هیچ گونه شیاری وجود ندارد و کاملا صاف است موتور در معرض ارتعاشات مکانیکی و مغناطیسی قرار ندارد و لذا کاملا بی سر و صدا است. متداول ترین استفاده از آن در ساعت های الکتریکی و دیگر تجهیزات زمان سنجی می باشد.

ازآنجا که این نوع موتور ها بدون نویز هستند برای ثبت صدا و تجهیزات تولید صدا همچون ضبط صوت ها ریال ثبات های نواری و ... به کار می روند.

یکی از مزایای عمده موتور های هیسترزیس ، زیاد بودن گشتاور راه اندازی آن است.

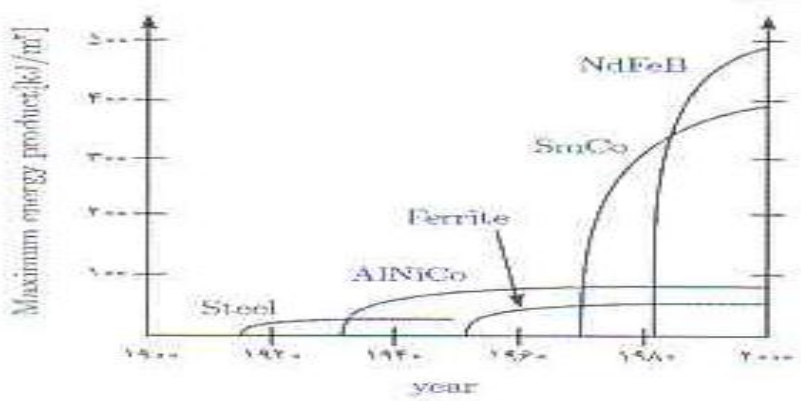
شکل(۶-۱۷) نمونه هایی از مشخصه های بار را به همراه مشخصه موتور در حالت ایده آل(صرف نظر از گشتاور فوکو) نشان می دهد. این موتور ، بارهای با مشخصه ۱ و ۲ را به سرعت سنکرون می رساند در حالی که بار با مشخصه ۳ با سرعت n۱ چرخانده می شود.



۶-۶- ماشین های 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 آسانی قابل انجام است. به واسطه ضرورت 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 سرعت های متوسط و پایین می باشد . به عنوان یک جایگزین مناسب ، ماشین های مغناطیس دائم می توانند با اندازه کوچکتر ، وزن کمتر ، نویزهای پایین تر و نگهداری اسان و به ویژه بازده خیلی بالاتر در سرعت های پایین بر ماشین DC ترجیح داده شوند.

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



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

بسته به چگونگی پخش فضایی فلوی مغناطیسی فاصله هوایی ، ماشین هایسنکرون مغناطیس دائم به دو دسته تقسیم بندی می شوند: ماشین های سنکرون مغناطیس دائم با فلوی سینوسی (PMSM) و ماشین های سنکرون مغناطیس دائم با فلوی ذوزنقه ای که به ماشین DC بدون جاروبک (BLDC) معروف است.

ساختار PMSM از جایگزینی تحریک ماشین سنکرون رتور سیم پیچی شده که شامل یک سیم پیچ میدان ، جاروبک ها و حلقه های لغزان است با یک کغناطیس دائم حاصل می شود.

ساختارBLDC از تلاش برای دگرگون کردن ماشین DC جاروبک دار برای حدف نیاز به کموتاتور و ادوات جاروبک حاصل می شود.

از جمله این مزایا می توان به عدم وجود جاروبکهای مکانیکی و ادوات مربوط به آن اشاره کرد که از این رو به ماشین DC بدون جاروبک مشهور شده است.

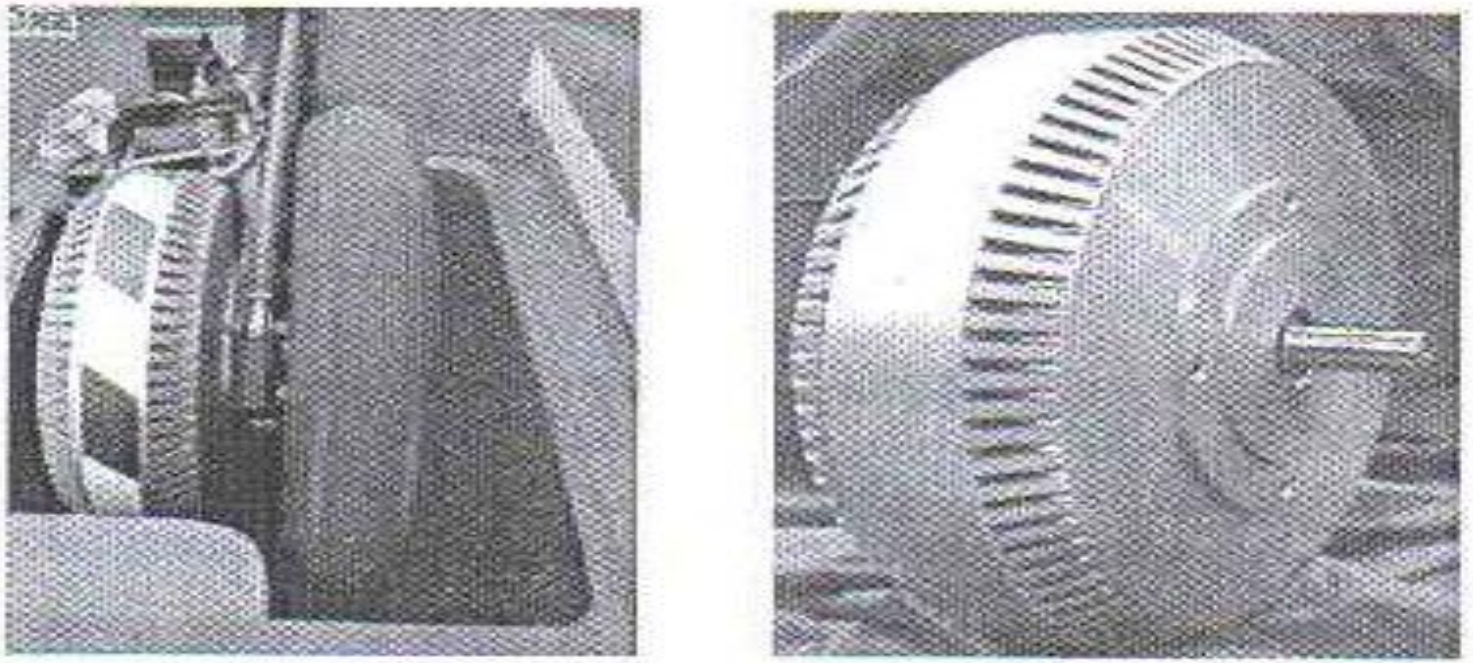
در PMSM ، با ایجاد فضایی سینوسی هادی ها در سطح استاتور سعی می شود تا چگالی فلوی فاصله هوایی به فرم سینوسی نزدیکتر شود : در حالیکه نوع BLDC با سیم بندی متمرکز موجب تولید چگالی فلوی ذوزنقه ای خواهد شد.

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 مولفه مجزای مغناطیس کننده و تولید کننده گشتاور می باشد. استفاده از مغناطیس دائم بر روی رتور موجب می شود که نیازی به تامین جریان مغناطیس کنندگی از طریق سیم پیچی استاتور نباشد و جریان استاتور صرفا برای تولید گشتاور التکرومغناطیسی صرف می شود.

جدول(۲-۶): مشخصات فنی انواع موتورهایPERMASYN ساخت شرکت زیمنس آلمان مختص زیر دریایی ها

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]
1FW6134	1700	120	28	380 - 500	< 4000	2080	3240	1590
1FW6132	3300	150	50	520 - 820	< 6300	2500	3940	2310
1FR6430	2900	150	54	520 - 820	< 6000	2500	3940	2310
1FR6838	5000	150	71	660 - 820	< 9000	2700	4000	2500

موتور های محرک چرخ های خودرو و موتور آسانسوراز ماشین های با شار محوری عموما در سیستم های مجتمع با گشتاور های بالا استفاده شده اند.
در شکل(۶-۱۹) نمونه ای از کاربرد موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری به عنوان محرکه چرخ یک خودرو خورشیدی نشان داده شده است.



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

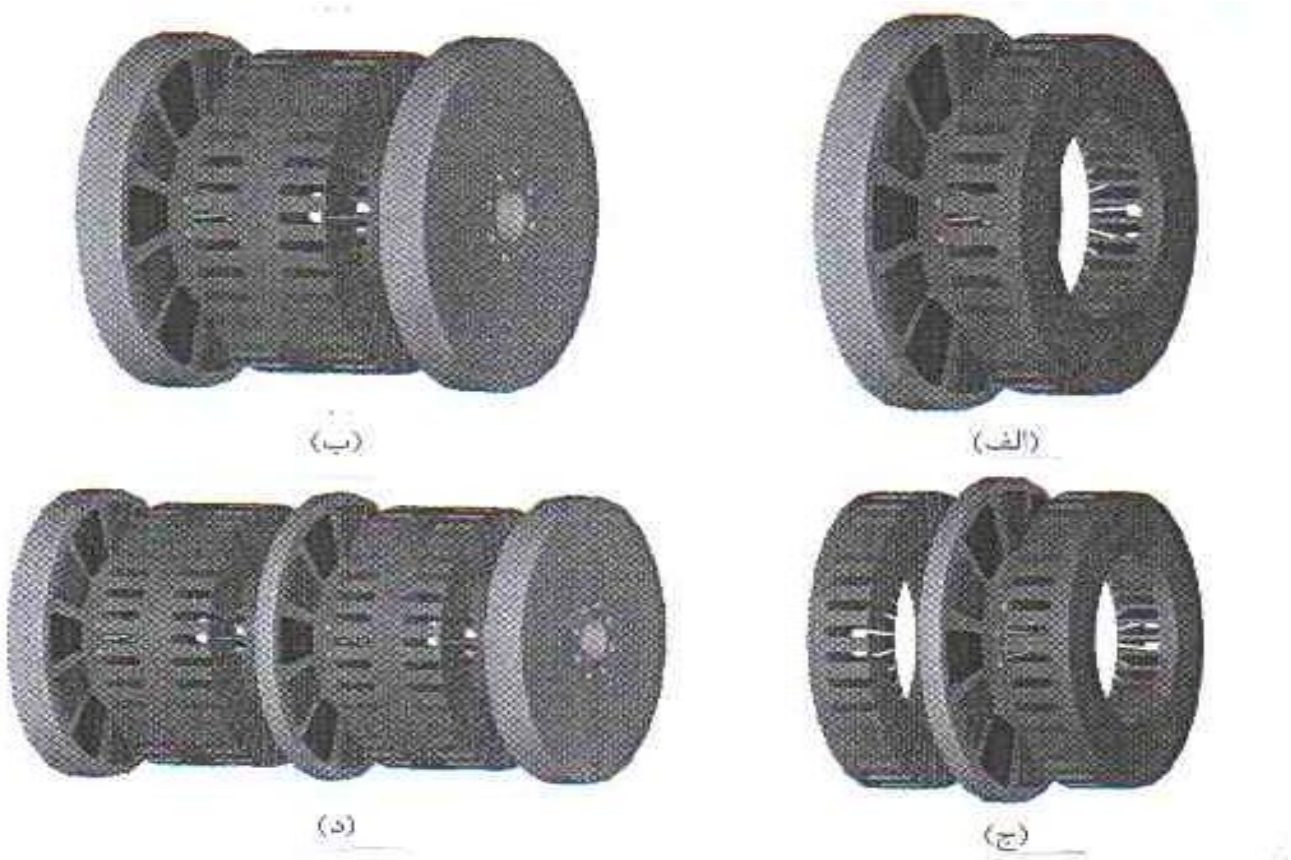
شکل(۶-۱۹) : موتور سنکرون مغناطیس دائم شار محوری به عنوان محرکه چرخ یک خودرو خورشیدی

شکل(۶-۲۰):ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم۳ مگاوات ساخت شرکت زیمنس سال ۲۰۰۴ جهت استفاده در توربین بادی.

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

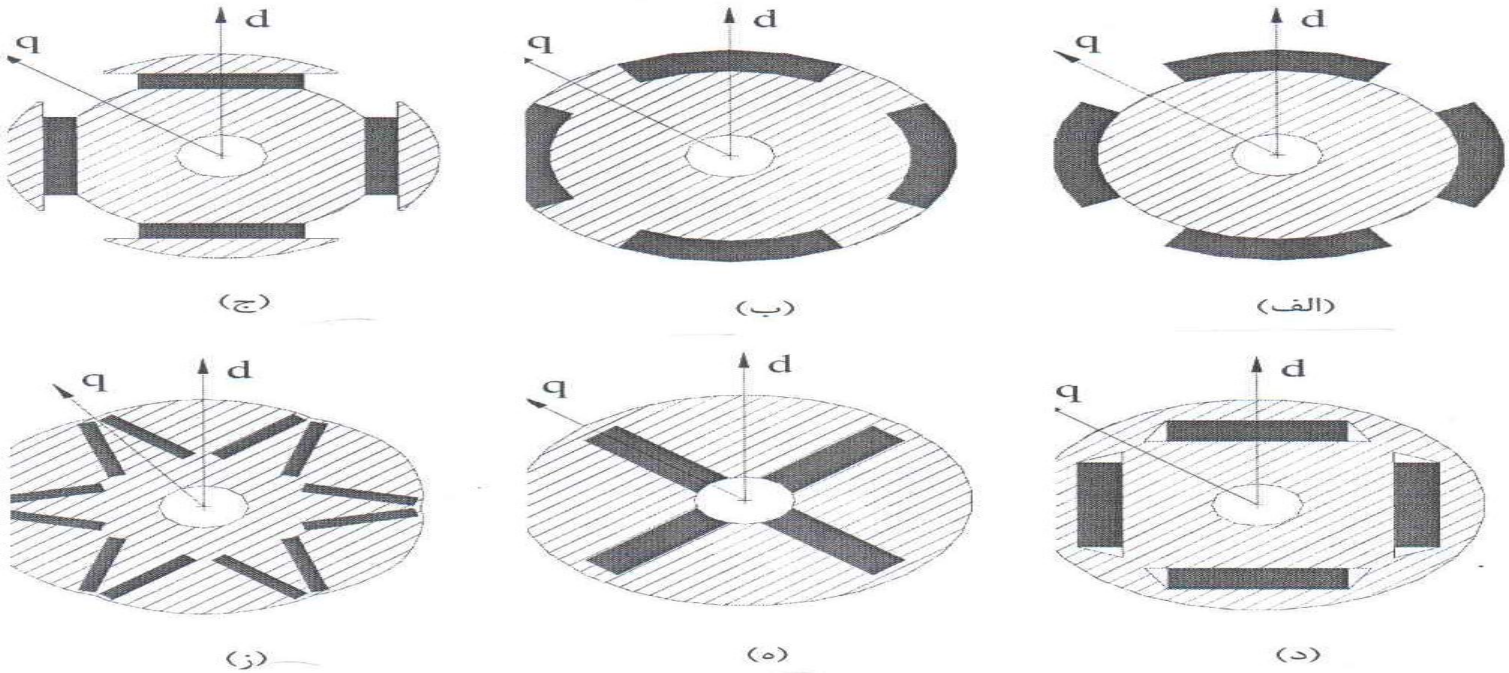
شکل(۶-۲۱- الف و ب) ساختار دو موتور مغناطیس دائم شعاعی را نشان می دهد که اولی دارای رتور سطحی و دومی از نوع رتور داخلی می باشد . در این ساختار ، استاتور خارج و رتور داخل آن قرار می گیرد . ساختاری که رتور خارج و استاتور داخل قرار گیرد درام نامیده می شود.(شکل ۶-۲۱- ج) این نوع موتور مناسب کاربردهایی است که رتور مستقیما در کاربرد درگیر می شود. به طور مثال چرخهای موتور خودرو برقی یا غلطکهای تسمه نقاله از این ساختار استفاده می کنند. اخیرا موتورهایی وارد بازار شده اند که دو رتور و یک استاتور دارند.

(شکل۶-۲۱- د). ساختار مذکور هنوز صنعتی نشده است و بیرون بردن گرما از آن به مقدار زیادی هوا احتیاج دارد اما این ساختار باعث افزایش ظرفیت تولید گشتاور ماشین شده و در جاهایی که محدودیت حجم دارد کارایی خود را نشان داده است.



شکل(۶-۲۱) : ساختار های متنوع موتور های 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.

در شکل(۶-۲۱- الف) بدلیل رلوکتانس بالای مغناطیس ها می توان ماشین را با فاصله هوایی موثر بزرگ در نظر گرفت.



شکل(۶-۲۲) :ساختار های گوناگون رتور و معرفی محور های مستقیم (d) و عمود (q) . الف و ب و ج) : مگنتها بر روی سطح ، د ، ه ، ز) مگنتها مدفون شده

موتور مغناطیس دائم رتور داخلی انواع گوناگونی دارد که در شکل (۶-۲۲) مشاهده می شود. با اینکه ساختار رتور نوع داخلی پیچیده تر از نوع سطحی است و ساختن آن مشکل تر است ولی مزایای زیادی نسبت به نوع سطحی دارد از جمله اینکه مغناطیس دائم مورد نیاز آن مستطیل شکل است و لذا شکل دهی آن راحت تر است. علاوه بر آن ساختار رتور به اندازه کافی مستحکم است و نیاز به ادوات نگه دارنده اضافه ندارد.

در موتور های سنکرون مغناطیس دائم دو نوع گشتاور می تواند ایجاد شود : گشتاور تداخلی که از تقابل میدان های دوار استاتور و رتور تولید می شود و دیگری گشتاور رلوکتانسی ناشی از برجستگی (غیر یکنواخت بودن فاصله هوایی) رتور. هر چه تفاضل اندوکتانس های دو محوری بیشتر باشد سهم گشتاور رلوکتانسی چشمگیر تر خواهد بود.

افزایش استحکام مکانیکی رتور ، میراکنندگی نوسانات سرعت و حفظ سنکرونیزاسیون تحت گشتاور بارهای ضربه ای 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.

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

ساختار مختلف موتور سنکرون مغناطیس دائم با شار محوری

با توجه به موقعیت استاتور (ها) نسبت به رتور(ها) و نحوه سیم بندی می توان چندین پیکربندی برای ماشین AFPM در نظر گرفت.

۱ – ساختار تک رتوره – تک استاتوره (شکل ۶-۲۳-الف)

۲- ساختاری که در آن استاتور مابین دو رتور قرار دارد (شکل ۶-۲۳- ب)

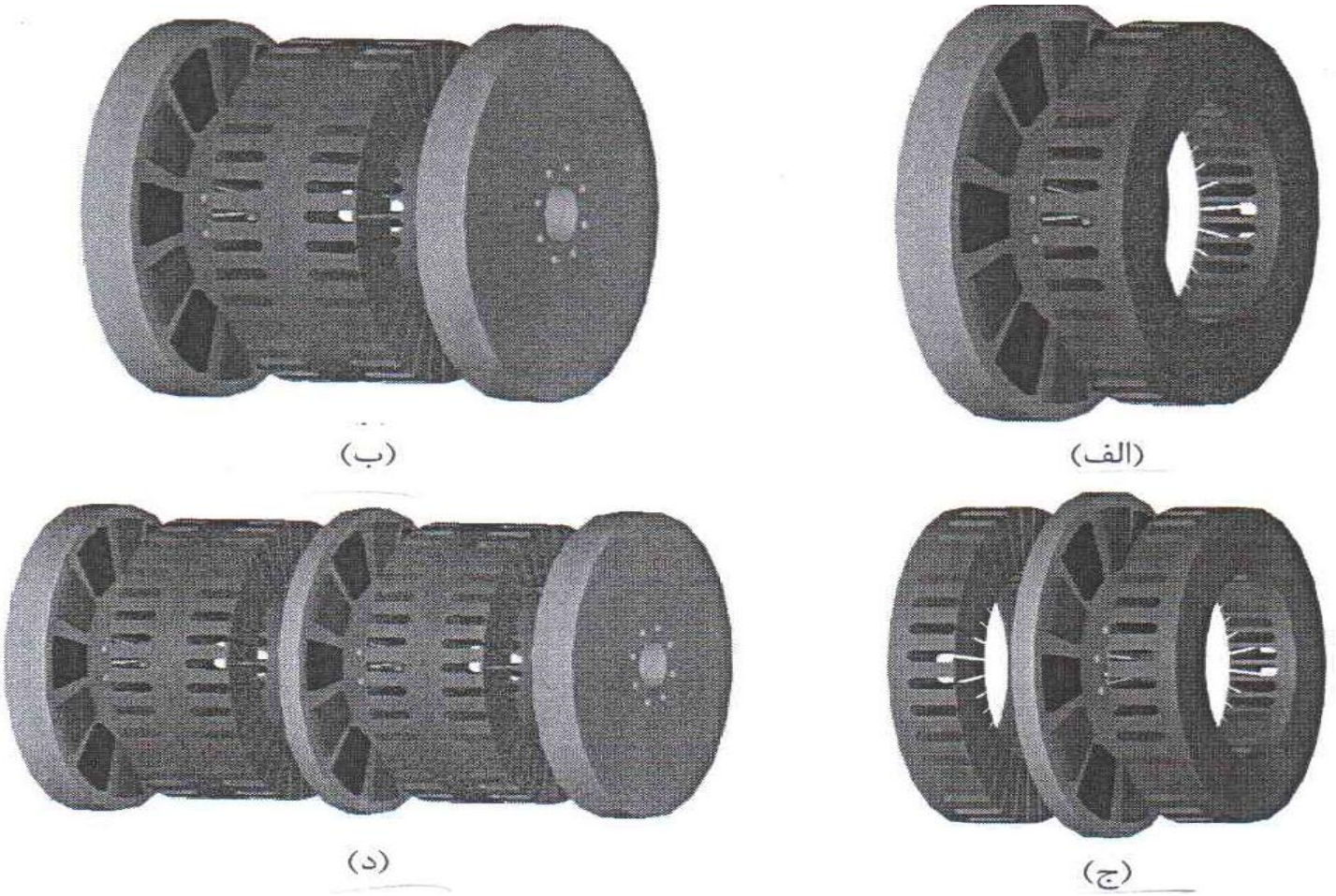
۳- ساختاری که در آن رتور مابین دو استاتور قرار دارد (شکل ۶-۲۳- ج)

۴- ساختار چند طبقه ای مشتمل بر چندین استاتور و رتور که پشت سر هم قرار دارند (شکل ۶-۲۴- د)

ساختار تک رتور – تک استاتور نشان داده شده در شکل(۶-۲۳- الف) ساده ترین ساختار موتور مغناطیس دائم AF می باشد. اما این ساختار از یک نیروی محوری نا متعادل بین استاتور و رتور رنج می برد و در نتیجه در مقایسه با ساختارهایی که در آنها نیروهای محوری متعادلند به آرایش پیچیده تری از بلبرینگ ها احتیاج دارد و به رتور ضخیم تری نیازمند است.

ساختار دو رتور- تک استاتور نشان داده شده در شکل(۶-۲۳- ب) که به نام "ToRus" مشهور است دارای سیم بندی فازها پیرامون استاتور شیاردار و یا بدون شیار می باشد.

ثابت نگه داشتن استاتور در فریم سخت است و در مقیاس با ساختاری که رتور مابین دو استاتور قرار می گیرد فضای کمتری برای سیم بندی وجود دارد.مطابق شکل(۶-۲۳-د) یک ماشین چند طبقه AF را تشکیل می دهد . یک چنین ماشین هایی می توانند برای سیستم محرکه کشتی، پمپ ها و ژنراتورهای PM با سرعت بالا و اهداف تحقیقاتی بکار گرفته شوند.



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

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

بازدهی یک ماشین شار محوری عموما ضعیف تر از نوع شعاعی است.

ماشین های شار محوری حجم کمتری از ماشین های شار شعاعی دارند.

انتخاب زوج قطب محدود شده است. با اینکه در ماشین RF هر تعداد زوج قطب قابل استفاده است ، در ماشین شار محوری بعضی زوج قطب های خاص ، امکان طراحی ندارند چون ماشین شار محوری دارای محدودیت در ابعاد و هندسه است.

به دلیل سبکی رتور AFPM اینرسی رتور کمتر بوده و سریعتر شتاب می گیرد.

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 می شود.

با ساختار بیش از یک استاتور در AFPM ها ، قابلیت اطمینان سیستم بالا می رود.

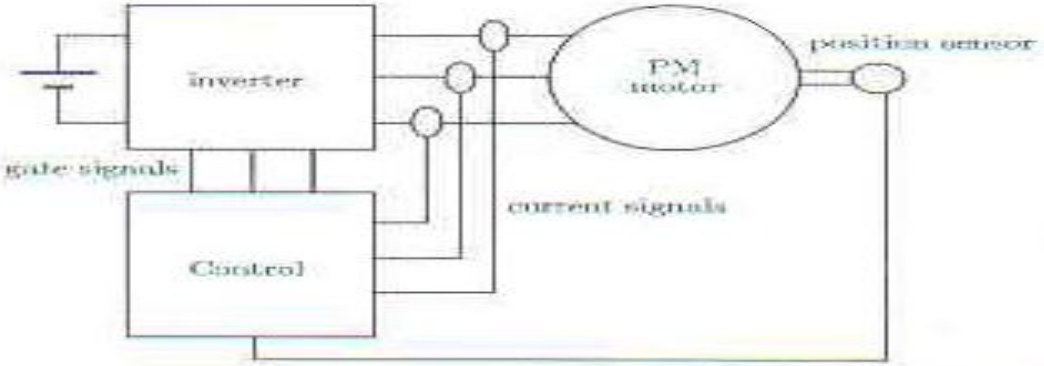
۶-۴-۶- مقایسه موتورهای PMSM و BLDC

شباهتهای زیادی بین PMSM و BLDC وجود دارد. به عنوان مثال در هر دوی آنها PM بر روی رتور قرار می گیرند و برای تولید گشتاور پایدار، نیازمند جریان های استاتور متناوب می باشند. هماهنگونه که قبلا اشاره گردید مگنت ها در ماشین های PMSM و BLDC می توانند سطحی یا درونی باشند. ماشین های با PM درونی مقاوم تر بوده و عموما در سرعتهای بالا استفاده می شوند بعلاوه، اندوکتانس های محورهای افقی و عمودی در ماشین های PM سطحی تقریبا برابرند در حالیکه در ماشین های با PM درونی ، اندوکتانس محور عمودی می تواند خیلی بزرگتر از اندوکتانس محور طولی باشد.لذا ماشین های با PM مدفون ، علاوه بر گشتاور الکترومغناطیسی ، دارای گشتاور رلوکتانسی هم می باشند. تفاوت این دو ماشین در شکل موج نیوری ضد محرکه ی الکتریکی آنها می باشد. در PMSM این نیروی ضد محرکه ، سینوسی و در BLDC ذوزنقه ای می باشد.

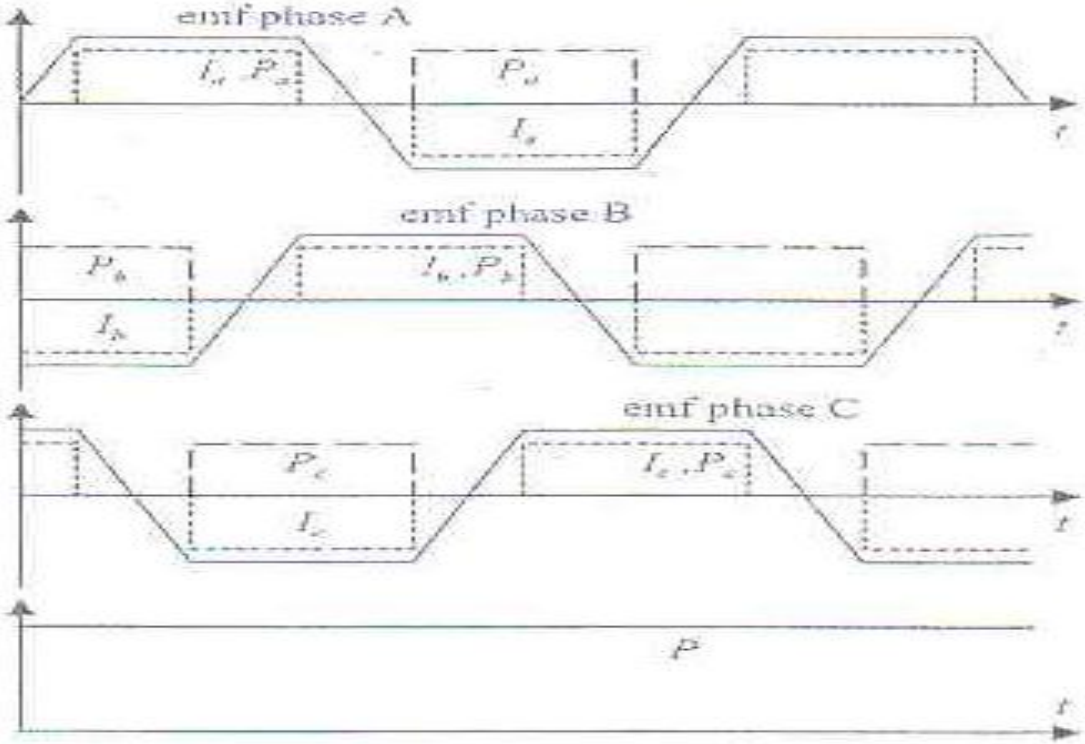
۶-۴-۶-۱ تفاوت های ماشین های PMSM و BLDC

موتورهای PM سنکرون (PMSM) دارای نیروی ضد محرکه سینوسی هستند در حالیکه BLDC ها دارای نوع ذوزنقه ای می باشند. با اینکه هر دو دارای رتوری با مغناطیس دائم باشند اما چیدمان سیم پیچی استاتور و شکل دهی مگنتها متفاوتند.

PMSM ها بر جریان استاتور سینوسی برای تولید گشتاور پایدار نیاز دارند در حالیکه BLDC ها دارای نیازمند جریان های مستطیلی شکل برای تولید گشتاور می باشند. بلوک دیاگرام کلی درایو موتورهای PM سنکرون در شکل (۶-۲۴) به تصویر کشیده شده است.



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



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

مزایای این نوع موتور ، ریپل گشتاور کم ، کارایی عالی در سرعت های پایین و کاهش تلفات به خاطر کمی هارمونیک ها است . نیاز به سنسور های پیچیده و گران قیمت نصب شده روی محور موتور PMSM ، از معایب آن محسوب می شود.

شکل(۶-۲۵) نمونه ای از شکل موج ها را در این نوع ماشین نشان می دهد . همانگونه که ملاحظه می گردد در هر لحظه فقط دو فاز از سه فاز دارای انرژی است . یکی از مزایای مهم این نوع ماشین استفاده از سنسورهای بسیار ساده تری برای اندازه گیری موقعیت رتور است چرا که فقط لحظاتی که جریان از یک فاز به فاز بعدی سوئیچ می شود باید آشکار سازی شود. دامنه جریان ها به وسیله یک طرح PWM کنترل می شود . یکی از عیب های آن مشکل بودن عملکرد در ناحیه تضعیف شار می باشد.

در یک موتور مغناطیس دائم ، دندانه های استاتور در هنگام چرخش رتور می توانند 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. بنابراین گشتاور دندانه ای به مکان وابسته است . اما ریپل گشتاور ، نتیجه کموتاسیون جریان آرمیچر و هارمونیک هایی است که گشتاور ثابتی تولید نمی کنند.

کاربرد این موتور ها در جاهایی نظیر سیستم محرکه کشتی ، وسایل نقلیه هیبرید ، کاربرد های هوا فضا و پر توان رو به افزایش است.

۶-۷- موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC)

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 محور را به مدار کنترل اطلاع می دهد و این مدار سیگنال های کنترلی با ترتیب مناسب برای روشن کردن اینورتر میفرستند.

عمل کموتاتور در موتور DC بدون جاروبک ، توسط کموتاتور الکترونیکی انجام می شود این موتور نسبت به موتور DC متعارف دارای مزایای زیر است:

الف) چون به کموتاتور مکانیکی و جاروبک نیازی نیست نسبت به موتور DCعمر طولانی تری دارد.

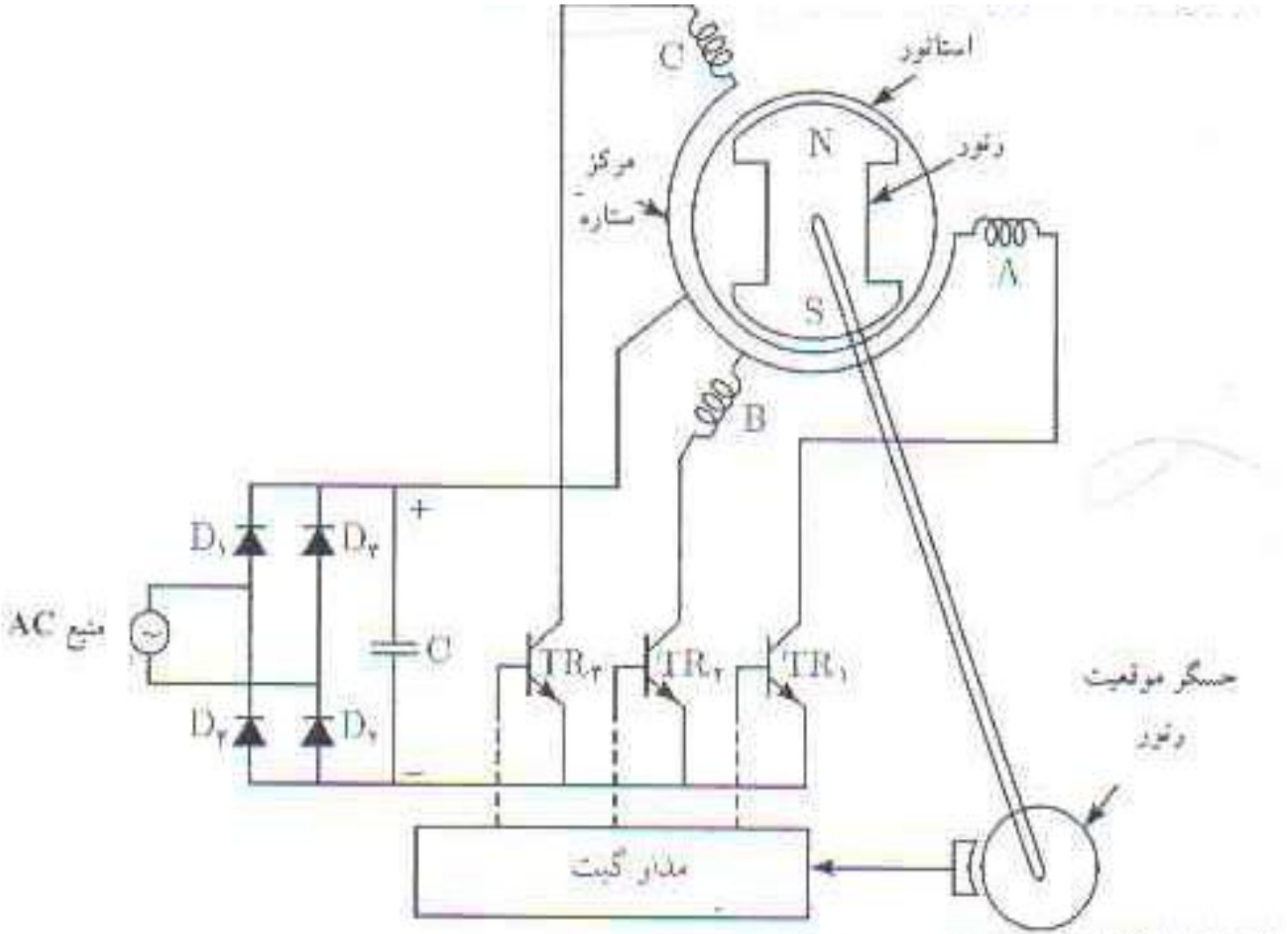
ب) مشکلات مربوط به فرکانس رادیویی و تداخل الکترومغناطیسی حداقل می شود.

ج) موتور DC بدون جاروبک می تواند در سرعت های بسیار بالاتری کار کند.

د) 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 فاز را به همراه کنترل کننده التکرونیکی آن نشان می دهد. استاتور حاوی یک سیم پیچی سه فاز است که به صورت ستاره بسته شده و تقطه 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.



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

"حسگر اثر هال" و نیز " حسگر های الکترونوری" از جمله سنسورهای مرسوم به کار رفته در حس کننده های موقعیت رتور هستند.

۶-۷-۲- اصول کار موتور DC بدون جاروبک

شکل(۶-۲۴) شکل ابتدایی سیم پیچی سه فاز و رتور دو قطبی آهنربای دائم یک موتور DC بدون جاروبک را نشان می دهد. قطب S رتور را دفع و قطب N رتور را جذب می کند و بنابراین گشتاوری در خلاف جهت مثلثاتی تولید می شود. مقدار این گشتاور معادل است با:

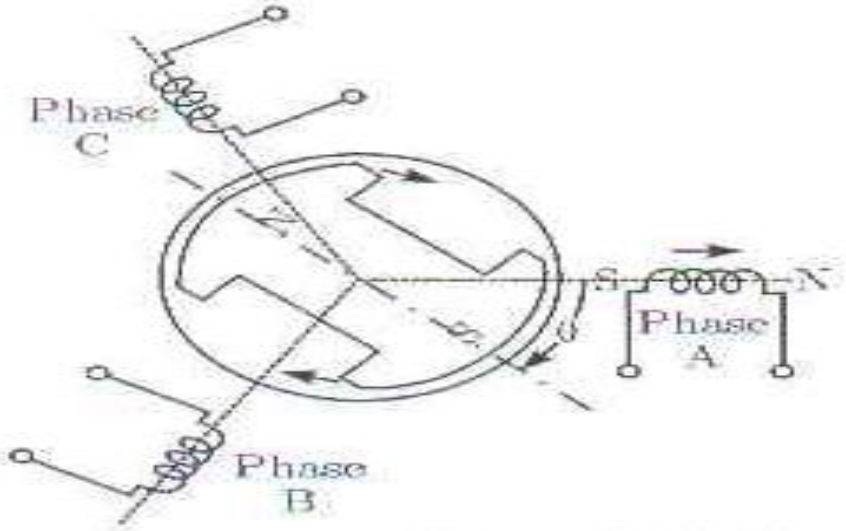
$$T_e = K_1 \phi_s \phi_r \sin\theta \qquad (۶-۲۸)$$

که در آن ϕs فلوی میدان استاتور ، ϕr فلوی میدان رتور و θ زاویه گشتاور ، معادل زاویه بین محور های فلوهای فوق بوده و K_1 ثابت گشتاور است.

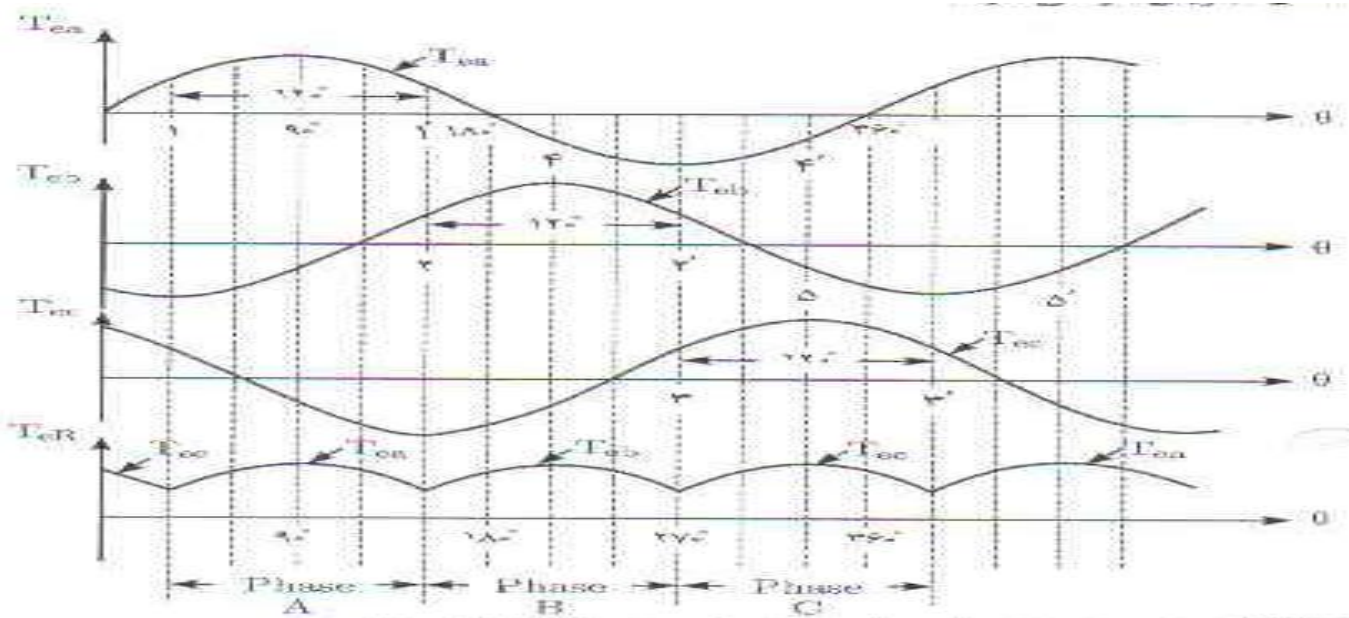
اگر مدار مغناطیسی ماشین خطی فرض شود معادله (۶-۲۸) به صورت زیر در می آید:

$$T_{ea} = K I_a \sin\theta \qquad (۶-۲۹)$$

که در آن Ia جریان ثابت استاتور در فاز A است . در موتور شکل(۶-۲۷) به ازای هر مقدار ثابت Ia ، مقدار گشتاور تولید شده طبق معادله (۶-۲۹) به صورت سینوسی با زاویه گشتاورθ مطابق شکل (۶-۲۸- الف) تغییر می کند.



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



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

اگر سیم پیچی های فاز ها 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:

$$T_{ea} = Ki_a \sin\theta$$
$$T_{eb} = Ki_b \sin(\theta - ۱۲۰) \qquad (۶-۳۰)$$
$$T_{ec} = Ki_c \sin(\theta - ۲۴۰)$$

اگر فرض شود که جریان فازها به صورت سیونسی با θ تغییر کند به طوری که:

$$i_a = I_m \sin\theta$$
$$i_b = I_m \sin(\theta - ۱۲۰) \qquad (۶-۳۱)$$
$$i_c = I_m \sin(\theta - ۲۴۰)$$

معادلات گشتاور فازها به صورت زیر در می آید:

$$T_{ea} = KI_m \sin^۲\theta$$
$$T_{eb} = KI_m \sin^۲(\theta - ۱۲۰) \qquad (۶-۳۲)$$
$$T_{ec} = KI_m \sin^۲(\theta - ۲۴۰)$$

و برای گشتاور منتجه خواهیم داشت:

$$
\begin{aligned}
T_{eR} &= T_{ea} + T_{eb} + T_{ec} \\
&= KI_m \left[\sin^2 \theta + \sin^2(\theta - 120) + \sin^2(\theta - 240) \right] \\
&= KI_m \left[\frac{1 - \cos 2\theta}{2} + \frac{1 - \cos 2(\theta - 120)}{2} + \frac{1 - \cos 2(\theta - 240)}{2} \right] \\
&= \frac{3}{2} KI_m
\end{aligned}
\qquad (۳۳-۶)
$$

۶-۷-۳- کاربردهای موتور BLDC

محرکه های اصلی چرخش نوار در ضبط صوت ها ، محرکه های هارد کامپیوتر ها ، دستگاه های اندازه گیری کم هزینه ، هواکش های کوچک خنک کننده تجهیزات الکترونیکی از جمله کاربردهای موتور های BLDCاست.

همچنین انواع این موتورها ولی با توان نسباتا بزرگ تر در سیستم های 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.