



فهرست

فصل هفتم : ماشین های AC کموتاتوردار-موتور تک فاز سری

۱-۷-مقدمه

۲-۷-انواع ولتاژهای القا شده در سیم پیچ های کموتاتور

۱-۲-۷-ولتاژهای القا شده توسط میدان ضربانی

۲-۲-۷-ولتاژهای القایی تولید شده توسط میدان دوار

۳-۷-بررسی گشتاور در موتور کموتاتوردار تک فاز

۴-۷-پدیده کموتاسیون

۱-۴-۷-ماشین های کموتاتوردار تک فاز

۲-۴-۷-روش های بهبود کموتاسیون

۳-۴-۷-تداخل رادیویی

۵-۷-موتورهای سری تک فاز

۱-۵-۷-موتور های سری AC جبران شده

۲-۵-۷-راه اندازی موتورهای سری

۳-۵-۷-کنترل دور موتورهای سری



فصل ۷

- ماشین های AC کموتاتور دار - موتور تک فاز سری



۷-۱- مقدمه

معمولا اولین و متداول ترین گزینه برای انتخاب موتور الکتریکی مناسب در یک کاربرد معین موتور القایی است. موتورهای القایی بواسطه راندمان بالا قیمت پایین، ساختار محکم، قابلیت اطمینان، عمر زیاد و حداقل نیاز به تعمیر نگهداری چنین جایگاه برجسته ای یافته اند.

اما موتورهای القایی دارای مشخصه سرعت-ثابت می باشند و ضریب قدرت آن ها بخصوص در سرعت های پایین، ضعیف است و لذا در کاربرد هایی که رنج وسیع سرعت مدنظر است گزینه مناسبی نیستند. از سوی دیگر، گرچه سرعت چرخش موتور های DC به راحتی در رنج وسیع قابل کنترل است اما به دلیل در دسترس نبودن شبکه توزیع DC استفاده از این نوع موتور ها تا حد زیادی منتفی شده است.

در این میان، ماشین های AC کموتاتورها که می توانند با شبکه توزیع AC موجود به سهولت و در بازه وسیعی از سرعت کار کنند انتخاب مناسبی خواهد بود به شرط آنکه به لحاظ اقتصادی توجیه پذیر باشد.

انواع متنوعی از ماشین های AC کموتاتوردار وجود دارند که از جمله آنها می توان به موتور سری تک فاز، موتور ریپالسیونی، موتور القایی از دو سو تغذیه شونده، موتور شراگ و ماشین شریوس اشاره نمود. واقعیت آن است که امروزه با پیشرفت چشمگیر مبدل های فرکانسی و ارائه ی تکنیک های کنترلی کارآمد، استفاده از اغلب این ماشین ها دیگر توجیه اقتصادی ندارد.

از این دیدگاه، در این فصل تنها به تشریح اصول عملکرد ماشین های کموتاتوردار تک فاز و به طور خاص، موتور سری تک فاز پرداخته می شود که در وسایل خانگی همچون جارو برقی و ... به صورت تجاری استفاده می شود.

۷-۲- انواع ولتاژهای القاء شده در سیم پیچ های کموتاتور

به طور کلی در سیم پیچ ارمیچر (روتور) ماشین کموتاتوردار AC دو نوع ولتاژ القاء می گردد:

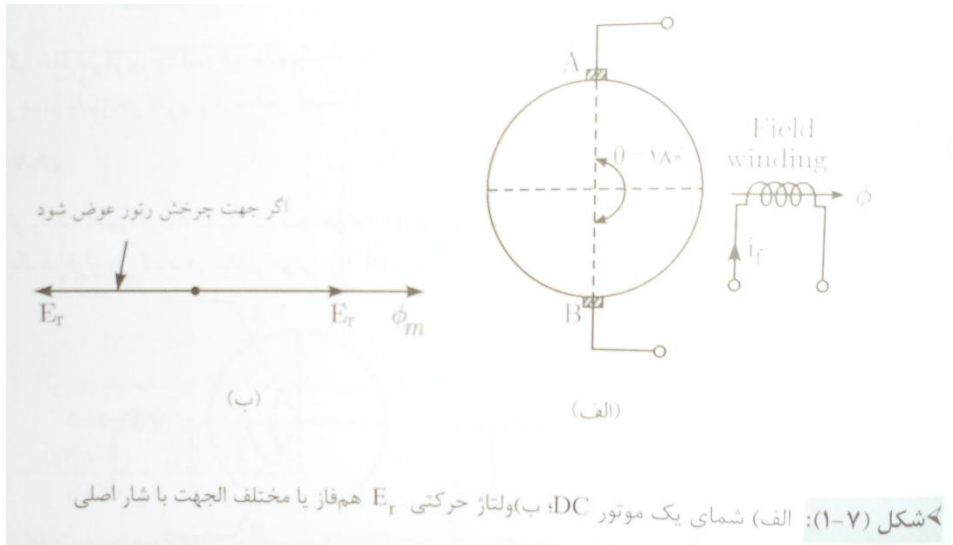
- ۱- ولتاژ حرکتی : ناشی از چرخش رتور در میدان اصلی, مشابه آنچه که در ماشین های DC اتفاق می افتد.
- ۲- ولتاژ ترانسفورماتوری: زیرا سیم پیچی ارمیچر با یک شار متناوب پیوند برقرار می کند. در بحث واتاژ ترانسفورماتوری, سیم پیچی های میدان و ارمیچر را می توان به ترتیب به عنوان سیم پیچ های اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور در نظر گرفت.

۷-۲-۱ ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

نوع میدان تولید شده در ماشین های کموتاتوردار تک فاز, ضربانی یا نوسانی است. لذا در این حالت ولتاژ های القاء شده حرکتی و ترانسفورماتوری متناظر با این نوع میدان ایجاد می شوند.

الف) ولتاژ حرکتی

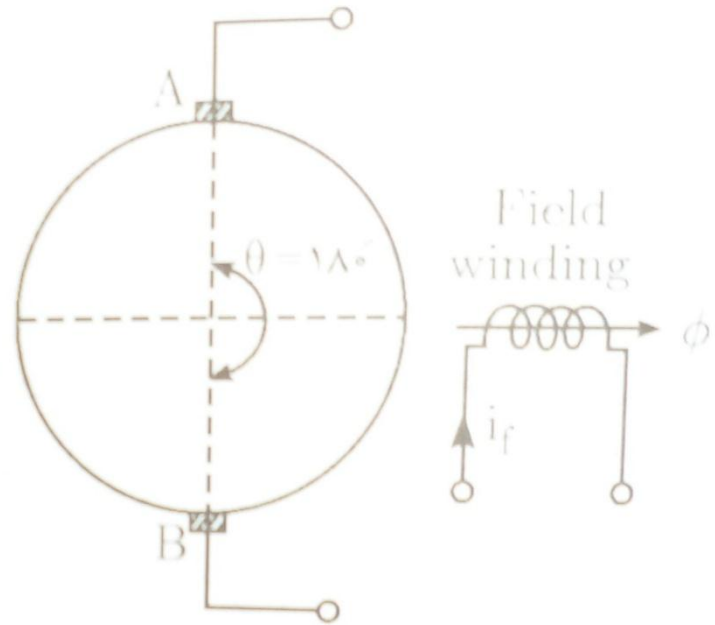
شکل (۷-۱-الف) شمای کلی یک موتور DC را به تصویر کشیده است. بواسطه چرخش ارمیچر در شار محور d و Φ مابین جاروبک های AB ولتاژ حرکتی E_r القاء می گردد.



اگر جهت چرخش رتور عوض شود



(ب)



(الف)

شکل (۷-۱): (الف) شمای یک موتور DC؛ (ب) ولتاژ حرکتی E_r هم فاز یا مختلف الجهدت با شار اصلی



ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

فرض می شود که شار میدان Φ در سرتاسر فاصله هوایی به صورت سینوسی توزیع شده است. همانگونه که می دانیم اندازه ولتاژ حرکتی E_r در یک ماشین DC به فرم زیر بیان می شود:

$$(1-7)$$

$$E_r = \frac{\Phi Z n P}{a}$$

که در آن n سرعت ارمیچر بر حسب دور در ثانیه، $Z (r.p.s)$ تعداد کل هادیهای ارمیچر، P تعداد قطب های میدان و a تعداد مسیر موازی در سیم پیچی ارمیچر می باشد.

به ازای یک سرعت ثابت و با صرف نظر از اشباع، چنانچه Φ کاهش یابد ولتاژ حرکتی E_r نیز متناسب با آن کاهش یابد؛ چنانچه Φ صفر گردد E_r نیز (با چشم پوشی از ولتاژ پسماند) صفر می شود و اگر شار معکوس گردد پلاریته ولتاژ نیز عکس می گردد. این بدان معناست که ولتاژ حرکتی E_r همهانگ با شار Φ تغییر می کند و لذا E_r و Φ به لحاظ زمانی هم فاز هستند.

اگر پلاریته شار میدان، ده بار در ثانیه معکوس گردد نگاه پلاریته E_r نیز ده بار در ثانیه عوض می شود. بنابراین اگر شار میدان Φ یک کمیت نوسانی یا متناوب با یک فرکانس مشخص باشد ولتاژ حرکتی E_r نیز متناوب و با همان فرکانس خواهد بود. فرض کنید که شار Φ کمیتی متناوب به صورت $\Phi_m \sin \omega t$ باشد. این شار متناوب ولتاژ حرکتی در دو سر جاروبک های Ab القاء می کند که مقدار لحظه ای آن براساس (1-7) برابر خواهد بود با:

$$e_r = \frac{Z n P}{a} \Phi_m \sin \omega t = E_{rm} \sin \omega t$$



ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

که در آن $E_{r_{rm}} = \frac{Znp}{a} \phi_m$ ولت می باشد. مقدار موثر این ولتاژ حرکتی عبارت است از

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{r_{rm}} = \frac{Z\phi_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{Pn}{a} = \sqrt{2} \cdot \frac{Z\phi_m}{a} \cdot \left(\frac{Pn}{2}\right) \quad (۲-۷)$$

اکنون $f_r = \left(\frac{Pn}{2}\right)$ را فرکانس حرکتی یا سرعتی می نامیم زیرا به سرعت چرخش ارمیچر بستگی دارد. به اختلاف بین f_r و f توجه نمائید؛ اولی فقط به سرعت ارمیچر بستگی دارد در حالی که دومی به فرکانس تغذیه سیم پیچی تحریک مربوط می شود. (۳-۷)

$$E_r = \sqrt{2} \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot \frac{Z}{a}$$

اگر N تعداد کلی هادی های ارمیچر باشد انگاه:

$$N = \frac{Z}{2}, E_r = 2\sqrt{2} \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot \frac{N}{a} \quad (۴-۷)$$

فرکانس ولتاژ حرکتی E_r معادل فرکانس f میدان نوسانی و مستقل از سرعت ارمیچر می باشد. به عبارت دیگر چنانچه سرعت ارمیچر تغییر کند، f_r و در نتیجه E_r مطابق رابطه (۳-۷) تغییر خواهد کرد اما فرکانس E_r معادل فرکانس F میدان نوسانی باقی می ماند.

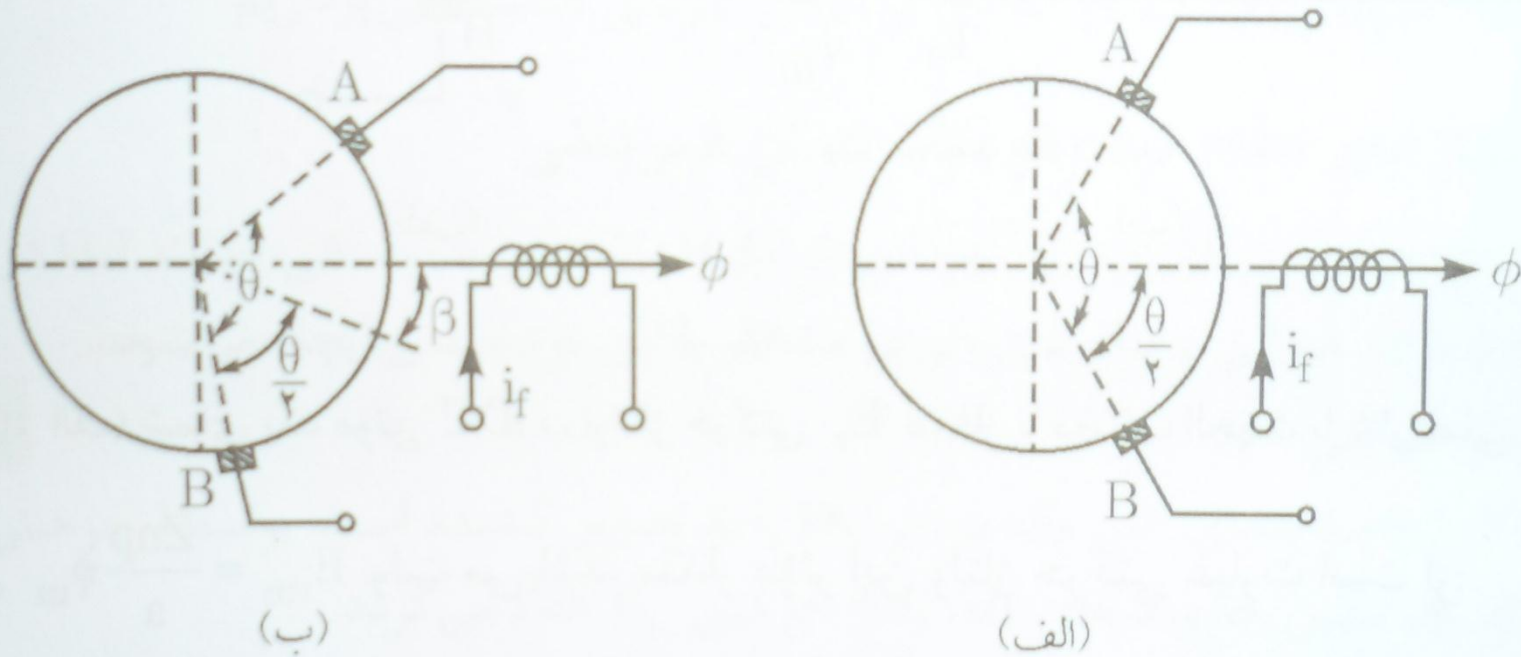
همچنین E_r با شار میدان بوجود آورده اش در حوزه زمان، مطابق شکل (۱-۷-ب) همفاز است.

بدون تغییر در جریان میدان با تغییر جهت چرخش رتور، E_r نسبت به ϕ_m ۱۸۰ درجه اختلاف فاز خواهد داشت که در شکل (۱-۷-ب) دیده می شود.

زاویه جداسازی جاروبک ها، θ در شکل (۱-۷-الف) برابر با ۱۸۰ درجه است. در صورتی که این زاویه کمتر از ۱۸۰ درجه باشد اما همچنان خط مرکزی جداسازی جاروبک ها مطابق شکل (۲-۷-الف) با محور شار همراستا باشد مقدار موثر ولتاژ حرکتی E_r برابر خواهد بود با:

$$E_r = \sqrt{2} \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot \frac{Z}{a} \cdot \sin\frac{\theta}{2} \quad (۵-۷)$$

ولتاژهای القاء شده توسط میدان ضربانی



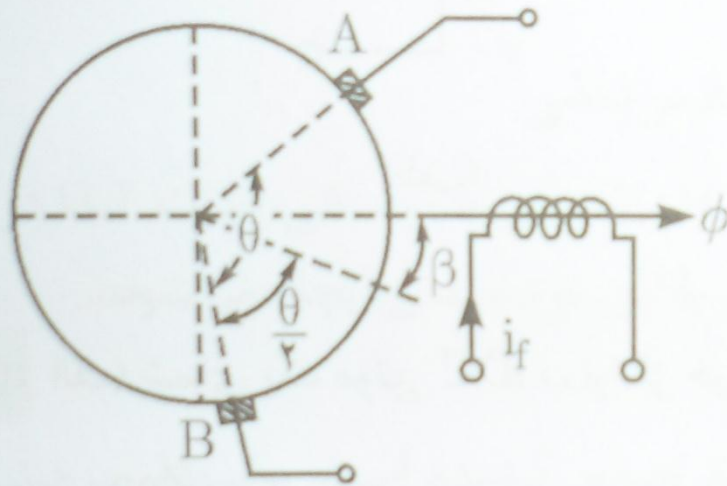
شکل (۷-۲): خط مرکزی جداسازی جاروبک‌ها؛ الف) همراستا با شار، ب) جابه‌جا به اندازه زاویه β

ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

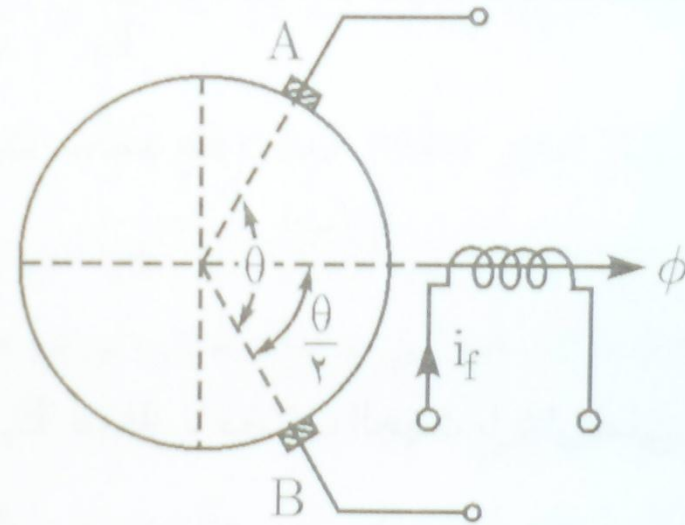
اگر خط مرکزی جداسازی جاروبک ها ، مطابق شکل (۷-۲) به اندازه زاویه β جا به جا گردد انگاه مقدار موثر ولتاژ حرکتی E_r معادل است با :

$$E_r = \sqrt{2} \cdot f_r \cdot \phi_m \cdot \frac{Z}{a} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \beta \quad (۶-۷)$$

در رابطه اخیر ، توجه کنید که تنها مولفه $\phi_m \cdot \cos \beta$ از شار که در راستای خط مرکزی جداسازی جاروبک ها قرار می گیرد در مقدار موثر E_r تاثیر دارد.



(ب)



(الف)

شکل (۷-۲): خط مرکزی جداسازی جاروبک ها؛ (الف) همراستا با شار، (ب) جابه جا به اندازه زاویه β

ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

ب) ولتاژ ترانسفورماتوری

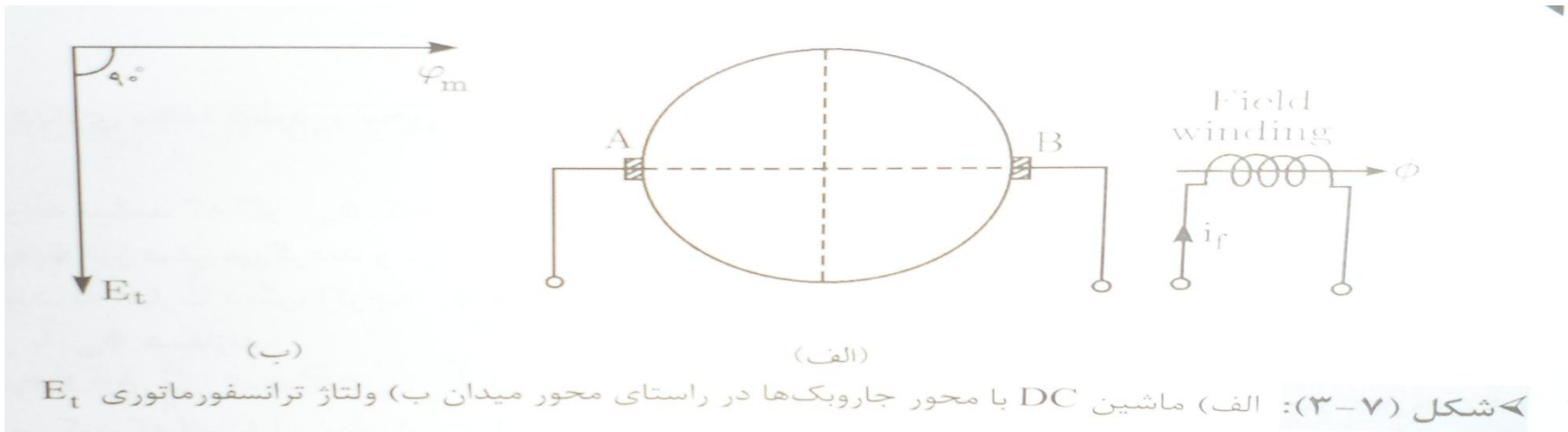
تصور نمائید که جاروبک های AB در شکل (۷-۱-الف) به میزان ۹۰ درجه شیفت داده شوند به گونه ای که مطابق شکل (۷-۳-الف) در راستای محور مغناطیسی میدان قرار گیرند. در این حالت، ولتاژ ترانسفورماتوری E_t با فرکانسی معادل فرکانس f میدان نوسانی دو سر جاروبک های شکل (۷-۳-الف) القاء می شود در حالی که ولتاژ حرکتی E_r صفر است. ولتاژ ترانسفورماتوری E_t همواره مستقل از سرعت رتور یا ارمیچر است. رابطه ی دامنه ولتاژ القایی در سیم پیچی ترانسفورماتور عبارت است از:

$$E_t = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_m \cdot N \quad \text{ولت}$$

در یک ماشین دوار تعداد دور های سیم پیچی ارمیچر بطور بطور متقارن پیرامون محیط آن توزیع می شوند. از این دیدگاه ضریب سیم پیچی K_w باید در ولتاژ القایی ترانسفورماتوری ظاهر شده در دو سر جاروبک های AB شکل (۷-۳-الف) تعریف گردد. علاوه بر این N در معادله ولتاژ ترانسفورماتوری باید با تعداد دور های سری شده کلاف ها $\frac{N}{a}$ مابین جاروبک های AB در ارمیچر جایگزین گردد. بنابراین، اندازه ولتاژ ترانسفورماتوری E_t در دوسر جاروبک ها معادل خواهد بود با:

$$E_r = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_m \cdot \frac{N}{a} \cdot K_w$$

که در آن $K_w = K_p \cdot K_d$ برای سیم بندی با گام کامل ضریب گام برابر است با $K_p = 1$.





ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

برای سیم پیچی با توزیع یکنواخت ، ضریب توزیع K_d به قرار زیر است:

$$K_d = \frac{\sin(\frac{\sigma}{2})}{\sigma/2} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2})}{\pi/2} = \frac{2}{\pi}$$

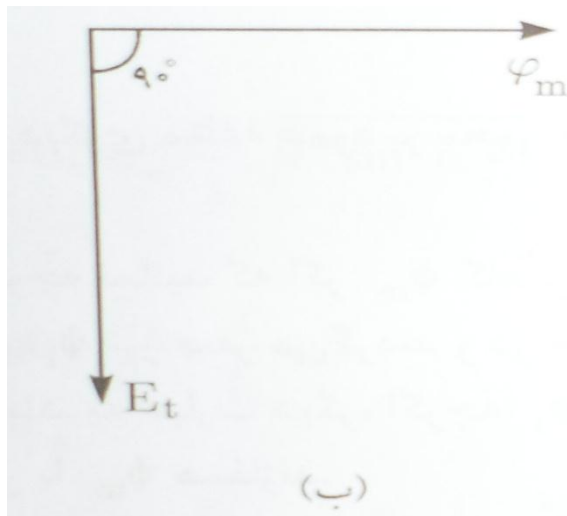
لازم به یادآوری است که در ماشین های کموتاتور دار با قرارگیری جاروبک ها به صورت قطری پخش فاز π رادیان است. بنابراین ولتاژ ترانسفورماتوری دو سر جاروبک های AB برابر است با

$$E_r = \sqrt{2} \pi f \phi_m \frac{N}{a} \cdot \frac{2}{\pi} = 2\sqrt{2} f \phi_m \frac{N}{a} \quad (7-7)$$

از آنجا که $Z = \frac{N}{2}$ رابطه (7-7) را می توان چنین نوشت:

$$E_r = \sqrt{2} f \phi_m \frac{Z}{a} \quad (8-7)$$

ولتاژ ترانسفورماتوری E_t مطابق شکل (7-3-ب) به میزان ۹۰ درجه از شار به وجود آورنده ان عقب تر است.





ولتاژهای القاء شده توسط میدان ضربانی

شایان توجه است که از مقایسه معادلات (۳-۷) و (۸-۷) یا روابط (۴-۷) و (۷-۷) معلوم می‌گردد که تنها تفاوت اندازه ولتاژ E_t با ولتاژ حرکتی E_r در فرکانس است؛ اندازه ولتاژ ترانسفورماتوری E_t به فرکانس تغذیه f وابسته است در حالی که اندازه ولتاژ حرکتی E_r به فرکانس چرخش F_r بستگی دارد.

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{f}{f_r} = \frac{\text{فرکانس شار میدان}}{\text{فرکانس حرکتی}} = \frac{n_s}{n} = \frac{\text{سرعت سنکرون}}{\text{سرعت چرخش رتور}}$$



ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

ج) حالت کلی

چنانچه محور جاروبک به اندازه α نسبت به محور خنثی جا به جا گردد هر دو نوع ولتاژ حرکتی و ترانسفورماتوری نمایان می شود.

در این صورت شار میدان Φ_m که با فرکانس f نوسان می کند:

$$\Phi_t = \Phi_m \sin \alpha$$

(هم راستا با محور)

$$\Phi_r = \Phi_m \cos \alpha$$

(عمود بر محور)

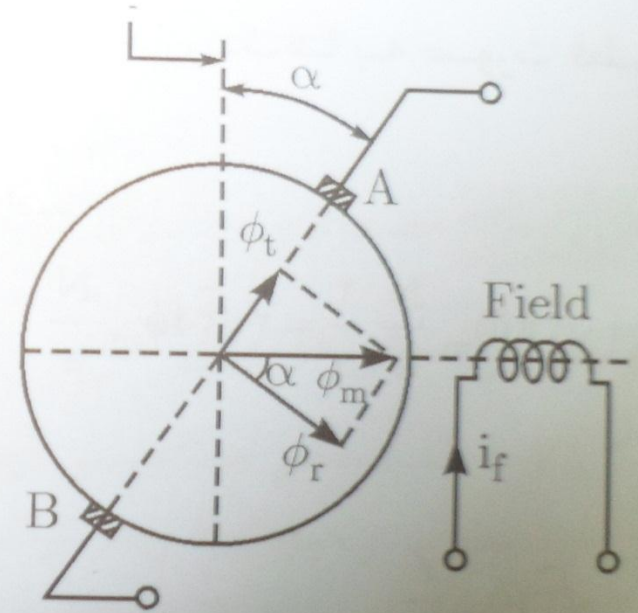
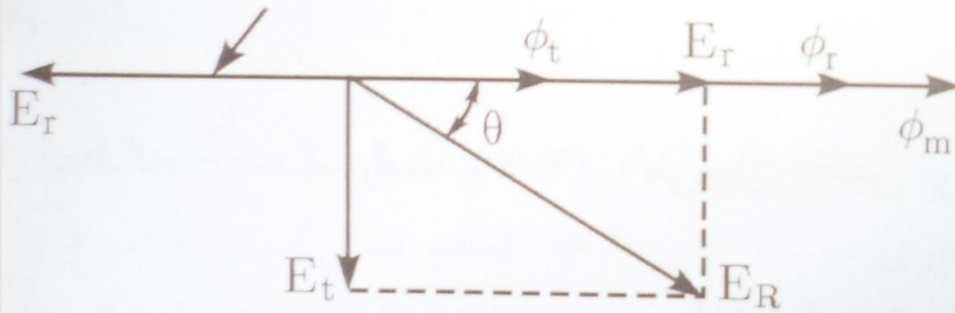
اگر Φ_m کاهش یابد و صفر شود و افزایش پیدا کند به ترتیب

Φ_r و Φ_t کاهش و صفر و افزایش می یابند.

Φ_m و Φ_t همفاز هستند و به علت عمل ترانسفورماتوری ولتاژ دو سر جاروبک القاء می شود.

$$E_t = \sqrt{2} f \Phi_m \frac{z}{a} \sin \alpha$$

اگر جهت چرخش عوض شود





ولتاژ های القاء شده توسط میدان ضربانی

اگر ولتاژ ترانسفورماتوری به لحاظ زمانی ۹۰ درجه عقب تر از ϕ و فرکانس همان فرکانس میدان باشد داریم :

$$E_r = \sqrt{2} f_r \Phi_m \frac{Z}{a} \cos\alpha$$

چنانچه جهت چرخش رتور عوض گردد ولتاژ حرکتی با شار مختلف الجهد خواهد بود و فرکانس ولتاژ حرکتی با فرکانس شار میدان یکی است. بنابراین فرکانس ولتاژهای حرکتی و ترانسفورماتوری یکسان می باشد.

برآیند این دو ولتاژ برابر است با :

$$E_R = \sqrt{2} \Phi_m \frac{Z}{a} \sqrt{f^2 (\sin\alpha)^2 + f_r^2 (\cos\alpha)^2}$$

$$E_R = 2\sqrt{2} \Phi_m \frac{N}{a} \sqrt{f^2 (\sin\alpha)^2 + f_r (\cos\alpha)^2}$$

زاویه فازور زمانی و زاویه مابین دو بردار برابر است با :

$$\text{tg}\theta = \frac{E_t}{E_r} = \frac{f}{f_r} \text{tg}\alpha$$

اگر آرمیچر با سرعت سنکرون بچرخد :

$$E_R = \sqrt{2} \Phi_m f \frac{Z}{a} = 2\sqrt{2} \Phi_m f \frac{N}{a}$$

$(\alpha = \theta)$



۷-۲-۲- ولتاژهای القایی تولید شده توسط میدان دوار

در ماشین DC شار کلی زیر هر قطب ثابت و ساکن است.

ولتاژ حرکتی دارای فرکانس صفر می باشد. اگر شار میدان در همان جهت چرخش روتور دوران کند سرعت نسبی آنگاه بین هادی ها و میدان برابر است با :

$$\text{سرعت روتور } n \quad \text{سرعت میدان } n_s \quad \text{دور در ثانیه) } n_s - n$$

این سرعت نسبی عامل ایجاد ولتاژ القایی در هادی های روتور است که مقدار موثر این ولتاژ از روی معادله زیر بدست می آید :

$$f = \frac{n_s P}{2} \quad \text{فرکانس تغذیه} \quad f_r = \frac{n P}{2} \quad \text{فرکانس چرخش روتور}$$

$$E_{RT} = \sqrt{2} \frac{z \Phi_m}{2a} P(n_s - n) = \sqrt{2} (f - f_r) \Phi_m \frac{z}{a}$$

$$f - f_r$$

فرکانس ولتاژ القا شده در هادی های آرمیچر که به سرعت نسبی بین هادی و میدان گردان بستگی دارد.

اگر شار میدان Φ_m خلاف جهت روتور بچرخد داریم :

$$n + n_s \quad \text{دور در ثانیه)$$



ولتاژهای القایی تولید شده توسط میدان دوار

مقدار موثر ولتاژ القایی :

$$E_{RT} = \sqrt{2} \frac{z\phi_m}{2a} P(n_s + n) = \sqrt{2} (f + f_r) \Phi_m \frac{z}{a}$$

معادلات قبلی را با هم ترکیب میکنیم :

$$E_{RT} = \sqrt{2} (f \pm f_r) \Phi_m \frac{z}{a}$$

در حالتی که زاویه جداسازی جاروبک ها کمتر از ۱۸۰ درجه باشد خواهیم داشت :

$$E_{RT} = \sqrt{2} (f \pm f_r) \Phi_m \frac{z}{a}$$

$$\sin \frac{\theta}{2}$$

اگر روتور با سنکرون در جهت میدان دوار بچرخد سرعت نسبی صفر است بنابراین ولتاژ القایی نخواهیم داشت.

علامت مثبت زمانی در دو فرمول گذشته استفاده می شود که روتور خلاف جهت میدان در حال گردش باشد و علامت منفی برای حالتی است که رتور و

میدان در یک جهت بچرخند.

در ماشین کموتاتور دار AC چه با میدان ضربانی و چه دوار هر دو نوع ولتاژ القایی اعم از حرکتی و ترانسفورماتوری ایجاد می شود.



مثال ۱:

در یک ماشین کموتاتوردار که استاتور تکفاز آن توسط ولتاژ ۵۰ هرتز تغذیه شده است داریم :

$$n_r = 1200 \text{ rpm} \quad P=4 \quad Z=60 \quad a=4 \quad \alpha=30 \quad \Phi_m=10\text{mwb}$$

مطلوبست تعیین :

الف) فرکانس ولتاژ سیم پیچ رتور و فرکانس ولتاژ دو سر جاروبک ها و مقدار موثر ولتاژ حرکتی و ترانسفورماتوری و بر آیند.

ب) اگر استاتور توسط ولتاژ DC تغذیه گردد با همان شار و سایر شرایط :

حال خواسته های فرض (الف) را در این حالت بدست آورید.

حل:

$$f_r = \frac{Pn}{2} = \frac{4 \cdot 1200}{2 \cdot 60} = 40 \text{ Hz}$$

(الف)

$$E_r = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{60 \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot 2} = 7.35 \text{ V}$$

$$E_t = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 0.5 = 5.3 \text{ V}$$

$$E_R = E_t^2 + E_r^2 = 82.5 \rightarrow E_R = 9.06 \text{ V}$$

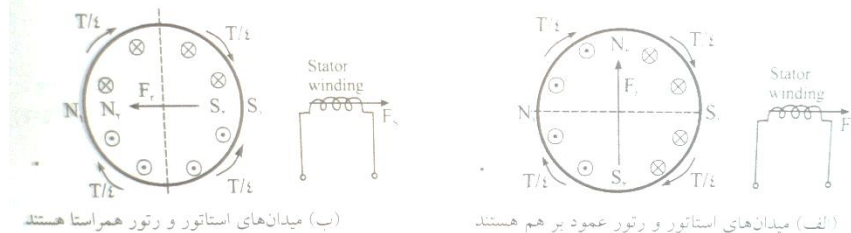
(ب)

$$f=0 \rightarrow E_t=0 \quad , \quad E_r=7.35 \text{ V} \quad , \quad f_r=40 \text{ Hz} \quad \rightarrow \quad E_r=7.35 \text{ v}$$

۷-۳- بررسی گشتاور در موتور کموتاتوردار تک فاز

شکل (۷-۶-الف) سیم پیچی استاتوری را نشان می دهد که نیروی محرکه مغناطیسی آن، F_S ، و بالطبع شار آن دارای توزیع سینوسی در فاصله هوایی است. با فرض جریان های مطابق رتور شکل (۷-۶-الف)، نیروی محرکه مغناطیسی رتور، F_r ، شار متناظر آن بر F_S عمود خواهند بود. براساس قانون دست چپ، تقابل این دو میدان، منجر به تولید گشتاور $\frac{T}{4}$ در هر ربع از رتور می گردد. لذا، گشتاور برآیند T به رتور اعمال و موجب چرخش آن می گردد. روشی دیگر برای توصیف این مسأله آن است که میدان استاتور دو قطب N_1S_1 بر روی استاتور و میدان F_r باعث بوجود آمدن دو قطب N_2S_2 بر روی رتور می گردد که در شکل (۷-۶-الف) به خوبی دیده می شود. تقابل بین قطب های استاتور و تور موجب تولید گشتاور T در جهت عقربه های ساعت می گردد.

در شکل (۷-۶-ب) جریان های فرضی در میله های رتور، میدان F_r را در راستای F_S تولید می کند و گشتاور برآیند برابر با صفر خواهد بود. به بیان دیگر، قطب های تولید شده N_1S_1 بر روی استاتور و N_2S_2 بر روی رتور، هم محورند و لذا، زاویه گشتاور، 180° بوده و هیچ گشتاوری تولید نمی گردد.

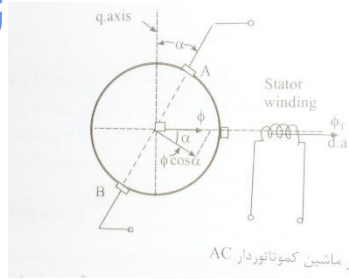


شکل (۷-۶): نحوه تولید گشتاور الکترو مغناطیسی

از بحث فوق می توان چنین نتیجه گیری کرد که چنان چه دو سیم پیچ، یکی بر روی استاتور و دیگری روی رتور، میدانهای (یا شارهای) آنها یا مولفه هایی از این دو میدان یا شار بر هم عمود باشند گشتاور الکترومغناطیس تولید می گردد.

آرایش ساده ای از ماشین کموتاتوردار AC را مطابق شکل (۷-۷) در نظر بگیرید که در آن محور AB جاروبکها به اندازه زاویه α از محور q فاصله دارد. شار Φ ، به صورت سینوسی در فضا توزیع می شود و دارای تغییرات زمانی سینوسی می باشد (دارای تغییرات زمانی و مکانی سینوسی می باشد).

همانگونه که در بالا گفته شد فقط مولفه $\Phi \cos \alpha$ از شار Φ در تولید گشتاور نقش دارد زیرا این مولفه از شار استاتور بر محور مغناطیسی شار رتور یعنی محور جاروبک ها عمود است.



شکل (۷-۷): تولید گشتاور در ماشین کموتاتوردار AC

این گشتاور لحظه ای $T_{e,inst}$ ، متناسب با $i\phi\cos\alpha$ می باشد که در آن i ، جریان آرمیچر (رتور) است در ماشین DC، گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده برابر است با :

$$T_e = \frac{\text{توان الکتریکی تولیدی}}{\omega_r} = \frac{E_a I_a}{\omega_r} = \frac{\phi Z n P}{2\pi n. a} \cdot I_a$$

$$= \frac{ZP}{2a\pi} \phi I_a = k\phi I_a \quad (۱۶-۷)$$

که در آن $K = \frac{ZP}{2a\pi}$ و I_a جریان رتور، E_a ولتاژ حرکتی ماشین و ϕ شار استاتور می باشد. برای ماشین کموتاتوردار AC نشان داده شده در شکل (۷-۷)، گشتاور لحظه ای عبارتست از :

$$T_{e,inst} = k(\phi\cos\alpha)(i) \quad (۱۷-۷)$$

با فرض اینکه شار ϕ به صورت $\phi(t) = \phi_m \sin\omega t$ و جریان آرمیچر به فرم $i(t) = I_m \sin(\omega t - \psi)$ باشد (که ψ اختلاف فاز زمانی بین شار و جریان می باشد؛ علامت + مبین پیش فازی و علامت - حاکمی از پس فازی نسبت به شار و علامت - حاکمی از پس فازی نسبت به شار می باشد) آنگاه با جایگذاری i و ϕ در رابطه (۱۷-۷) داریم :

$$T_{e,inst} = K \cdot \phi_m \sin\omega t \cdot I_m \sin(\omega t \pm \psi) \quad (۱۸-۷)$$

$$= K \cdot \phi_m \cdot I_m \cdot (\sin\omega t \cdot \sin(\omega t \pm \psi))$$

$$T_{e,inst} = K \cdot \frac{1}{2} \cdot \phi_m \cos\alpha \cdot \sqrt{2} I [\cos\Psi - \cos(2\omega t \pm \psi)] \quad \text{چون } \sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)] \text{ لذا داریم :}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot K \cdot \phi_m \cdot I \cdot \cos\alpha \cdot [\cos\psi - \cos(2\omega t \pm \psi)]$$



معادله اخیر نشان می دهد که گشتاور لحظه ای شامل یک ترم ثابت و یک ترم نوسانی با فرکانس دو برابر منبع می باشد که میانگین آن صفر است . بنابراین ، گشتاور متوسط برای موتور کموتاتوردار AC نشان داده شده در شکل (۷-۷) برابر است با :

$$T_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot K \cdot \phi_m \cdot I \cdot \cos\alpha \cdot \cos\psi = K \cdot \phi \cdot I \cdot \cos\alpha \cos\psi$$

که در آن ، ϕ و I مقادیر موثر شار استاتور و جریان رتور می باشد .

لذا ، این گشتاور هنگامی ماکزیمم است که $\psi = 0$ باشد یعنی زمانیکه شار و جریان همفاز باشند . به علاوه ، گشتاور هنگامی ماکزیمم است که $\alpha = 0$ باشد یعنی وقتی محور مغناطیسی آرمیچر بر محور مغناطیسی استاتور عمود باشد .

۴-۷- پدیده کموتاسیون

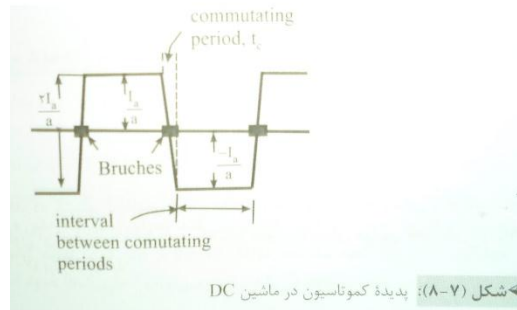
یک لحظه قبل از رسیدن پیچک آرمیچر به جاروبک ، این پیچک حامل جریان $\frac{I_a}{a}$ در یک جهت می باشد و به مجرد اینکه این پیچک عرض جاروبک را طی نماید جریان آن مقدار $\frac{-I_a}{a}$ و جهت آن معکوس می گردد . این پدیده معکوس شدن جریان در پیچک آرمیچر توسط جاروبک و تیغه های کموتاتور را فرآیند کموتاسیون می نامند . در اینجا ، I_a جریان آرمیچر و a تعداد مسیر های موازی می باشد .

در ماشین های DC ، جریان در پیچک آرمیچر که با خود آرمیچر در حال حرکت است - مطابق شکل (۷-۸) می باشد . کل تغییرات جریان در پریود کموتاسیون t_c برابر با $\frac{2I_a}{a}$ می باشد . اگر L_c ، اندوکتانس خودی پیچک در حال کموتاسیون باشد آنگاه ولتاژ القا شده e_c که به ولتاژ القایی راکتانسی مشهور است در پیچک ایجاد می گردد

$$e_c = L_c \cdot \frac{1}{t_c} \cdot \left(\frac{2I_a}{a} \right)$$

که مقدار آن برابر است با :

چنانچه تمهیدات لازم اندیشیده نشود این ولتاژ راکتانسی ، معکوس شدن جریان در پیچک مذکور را به تاخیر می اندازد . در نتیجه ، معکوس شدن جریان در طول بازده پریود کموتاسیون t_c به طور کامل انجام نمی شود و جرقه زنی حاصله نشانگر پدیده کموتاسیون ضعیفی است . در ماشین های کموتاتوردار AC ، فرایند کموتاسیون در مقایسه با ماشین های DC پیچیده تر است ؛ زیرا علاوه بر ولتاژ راکتانسی ، ولتاژهای القایی دیگری نیز در پیچک اتصال کوتاه شدن ایجاد می گردند .



۷-۴-۱ ماشین های کموتاتور دار تک فاز

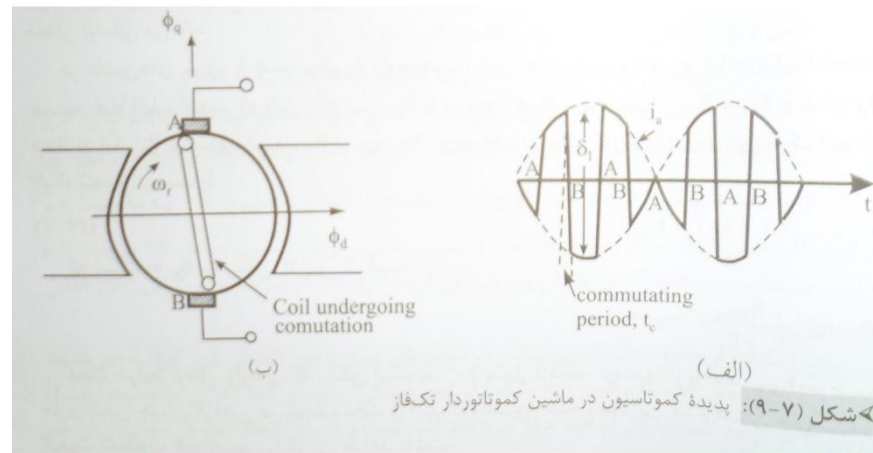
در این نوع ماشین ها ، علاوه بر ولتاژ راکتانسی دو ولتاژ های حرکتی و ترانسفورماتوری نیز در پیچک اتصال کوتاه شده القاء می گردد . در این بخش به بررسی این سه ولتاژ القایی می پردازیم .

الف (ولتاژ راکتانسی E_1

مطابق شکل (۷ - ۹ - الف) فرض می گردد که جریان متناوب i_a عبوری از آرمیچر بفرم سینوسی با زمان تغییر می کند . پدیده کموتاسیون جریانی ممکن است در هر لحظه از شکل موج جریان شروع شود . پریود کموتاسیون t_c در مقایسه با زمان نیم سیکل جریان عموماً بسیار کوچک است و در نتیجه ، چندین بار معکوس شدن جریان در داخل یک نیم سیکل جریان عموماً اتفاق می افتد که در شکل (۷ - ۹ - الف) قابل رویت است . موقعیت جاروبکها که در آنجا پدیده کموتاسیون اتفاق می افتد با A و B مشخص گردیده است . شکل (۷ - ۹ - الف) بخوبی نشان می دهد که دامنه جریانی که باید منتقل یا جابجا گردد به لحظه ای که فرایند کموتاسیون آغاز می شود بستگی دارد . این تغییر جریان هنگامی که $\omega t = \pi/2$ است ماکزیمم و زمانی که $\omega t = 0$ می باشد صفر است . از آنجا که زمان کموتاسیون t_c ثابت است ولتاژ راکتانسی هنگامیکه $\omega t = \pi/2$ است ماکزیمم و زمانی که $\omega t = 0$ صفر است . لذا می توان چنین نتیجه گیری نمود که ولتاژ راکتانسی e_1 هم فاز با جریان آرمیچر است . مقدار ولتاژ e_1 در ماشین های AC کموتاتور برابر است با :

$$e_1 = L_c \frac{\delta i}{t_c} \quad (۷-۲۰)$$

که در آن L_c ، اندوکتانس خودی پیچک اتصال کوتاه شده ، δi تغییرات دامنه جریان در حین پریود کموتاسیون که در شکل (۷ - ۹ - الف) دیده می شود و t_c ، پریود کموتاسیون می باشد که با پهنای جاروبک ، رابطه مستقیم و با سرعت آرمیچر رابطه عکس دارد .

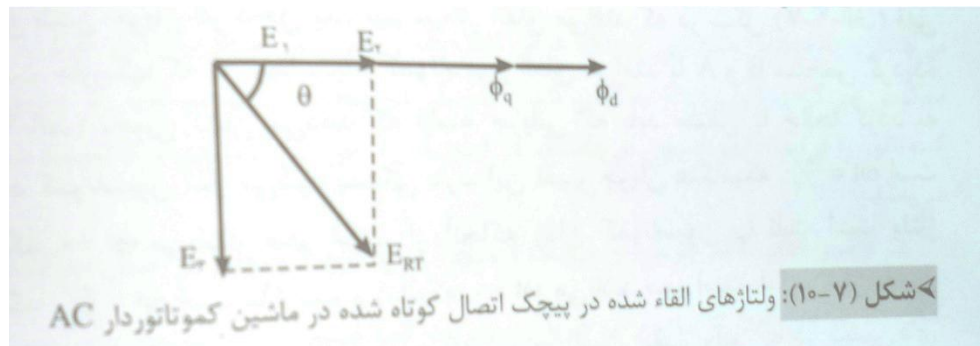


ب) ولتاژ حرکتی E_2

در شکل (۹-۷ ب)، ϕ_q ، شار عکس العمل آرمیچر در منطقه کموتاسیون در راستای محور جاروبک می باشد / گردش پیچک اتصال کوتاه شده در این شار ϕ_q موجب القاء ولتاژ حرکتی E_2 در این پیچک می شود. توجه کنید که E_2 همفاز ϕ_q می باشد. همچنین فرکانس E_2 همان فرکانس شار متناوب ϕ_q خواهد بود. اگر چه شارهای محورهای d و q و ϕ_d و ϕ_q مکاناً برهم عمودند اما مطابق شکل (۱۰-۷) به لحاظ زمانی، همفاز می باشند. دامنه این ولتاژ حرکتی در پیچک اتصال کوتاه شده برابر است با:

$$E_2 = \sqrt{2}\pi f_r N_c \phi_q \quad (۲۱-۷)$$

که در آن f_r فرکانس چرخش و N_c تعداد دور موثر پیچک مزبور می باشد.





ج) ولتاژ ترانسفورماتوری E_3

در شکل (۷-۹-ب) محور مغناطیسی پیچک تحت فرآیند کموتاسیون با محور شار ضربانی ϕ_d همراستا می باشد. لذا، ولتاژ ترانسفورماتوری E_3 توسط شار نوسانی اصلی ϕ_d در پیچک مورد نظر القاء می گردد.

این ولتاژ، مطابق شکل (۷-۱۰)، از شار ϕ_d ، ۹۰ درجه عقب تر است / دامنه این ولتاژ عبارتست از:

$$E_3 = \sqrt{2}\pi f N_c \phi_{dm} \quad (۷-۲۲)$$

که در آن f فرکانس میدان نوسانی، ϕ_d و N_c تعداد دور موثر پیچک مزبور و ϕ_{dm} ماکزیمم دامنه میدان نوسانی می باشد. در ماشین های سری، با چشم پوشی از زاویه هیستریزس، هر دو شار ϕ_d و ϕ_q با جریان I همفاز هستند. قبلا اشاره گردید که ولتاژ رأکتانسی E_1 با جریان I همفاز است. بنابراین E_1 و E_2 با شار ϕ_d همفازند اما ولتاژ ترانسفورماتوری E_3 از ϕ_d ، ۹۰ درجه عقب تر است. کل ولتاژ برآیند در پیچک اتصال کوتاه شده برابر است با:

$$E_{RT} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 + E_3^2} \quad (۷-۲۳)$$

که نسبت به ϕ_d به میزان θ پس فاز است.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_3}{E_1 + E_2}$$

تحت شرایط نرمال، زاویه θ ممکن است به 90° بسیار نزدیک گردد. ولتاژ برآیند E_{RT} موجب جاری شدن جریان گردشی در پیچک تحت فرآیند کموتاسیون شده و بنابراین گرم شدن جاروبک و کیفیت نامطلوب کموتاسیون را در پی خواهد داشت.



۷-۴-۲- روش های بهبود کموتاسیون

جریان پیچک اتصال کوتاه معادل $\frac{E_{RT}}{Z_{SC}}$ می باشد که در آن E_{RT} ، ولتاژ القایی برآیند و Z_{SC} امپدانس پیچک مورد نظر است. این معادله می گوید که کموتاسیون در

ماشین های AC با کاهش E_{RT} یا افزایش مقاومت بین جاروبک و تیغه های کوتاتور بهبود می یابد. در ادامه، به اختصار به بعضی از روش های بهبود کموتاسیون در ماشین AC کموتاتوردار اشاره می گردد.

الف) ملاحظات طراحی

همانگونه که قبلا اشاره شد ولتاژ رأکتانسی متناسب با سلف خودی L_C پیچک تحت کموتاسیون می باشد. از آنجا که L_C متناسب با مجذور تعداد دور پیچک می باشد لذا ولتاژ رأکتانسی می تواند با انتخاب پیچک های تک دوری کاهش داده شود.

هر دو ولتاژ حرکتی و ترانسفورماتوری به شار زیر قطب و تعداد دور موثر هر پیچک بستگی دارند. لذا، استفاده از شار زیر قطب کمتر و تعداد دور کمتر در پیچک ها می تواند این دو نوع ولتاژ را کاهش دهد.

ب) استفاده از قطب های کمکی

در ماشین های DC، ولتاژ رأکتانسی می تواند با تعبیه قطب های کمکی همراستا با محور جاروبک ها خنثی گردد. بطور مشابه، قطب های کمکی متصلشده به صورت سریدر محور q می تواند جهت خنثی سازی بخشی از اثرات ولتاژهای رأکتانسی و ترانسفورماتوری در موتورهای سری تک فاز استفاده شوند.

ج) افزایش Z_{SC}

هنگامی که یک پیچک در حین فرآیند کموتاسیون توسط یک جاروبک اتصال کوتاه می شود جریان های گردشی ناشی از ولتاژ القایی برآیند می تواند کاهش داده شود با (۱) استفاده از جاروبک های با سختی بالا که دارای مقاومت اتصال بزرگی هستند و

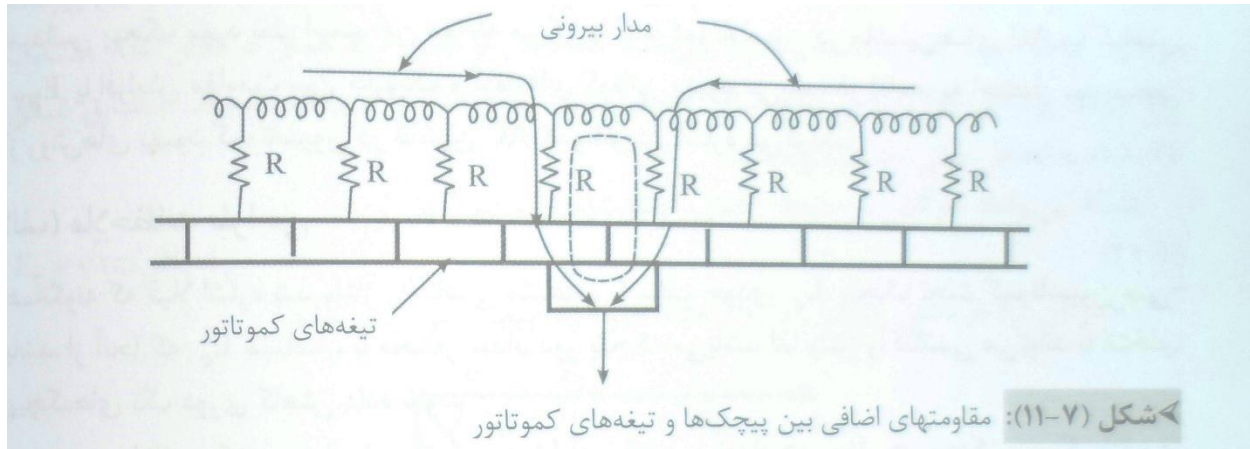
(۲) اتصال مقاومت های اضافی که مطابق شکل (۷-۱۱) بین پیچک ها و تیغه های کموتاتور قرار میگیرند. این مقاومت ها در همان شیار های سیم پیچی آرمیچر جاسازی

می شوند. از دید مدار بیرونی، هر یک از مقاومت های R با هر جاروبک موازی است بگونه ای که در مجموع $\frac{1}{2}R$ به مقاومت هر جاروبک اضافه می گردد. اما افزایش در

مقاومت در مسیر داخلی جریان گردشی معادل $2R$ می باشد که به طور چشمگیری موجب کاهش جریان پارازیتی می گردد. لازم به ذکر است که این روش، ولتاژ القایی برآیند E_{RT} را کاهش نمی دهد.



روش استفاده از مقاومت های اضافی بیشتر در موتورهای حمل و نقل تک فاز بکار گرفته می شود . زیرا این تکنیک قابل اطمینان است و به سرعت آرمیچر بستگی ندارد . از آنجا که این مقاومت ها صرفاً جریان را در پریود کموتاسیون از خود عبور می دهند لذا ، تلفات و گرمای ایجاد شده در آنها بیش از حد نیست . در حالتی که این موتور مرتباً راه اندازی و متوقف می گردد جریان اضافی عبوری از مقامتهای مذکور ممکن است باعث داغ شدن بیش از حد و سوختن آنها شود . با وجود این عیب ، این روش هنوز در ماشین های حمل و نقل تک فاز استفاده می شود .



۷-۴-۳ تداخل رادیویی

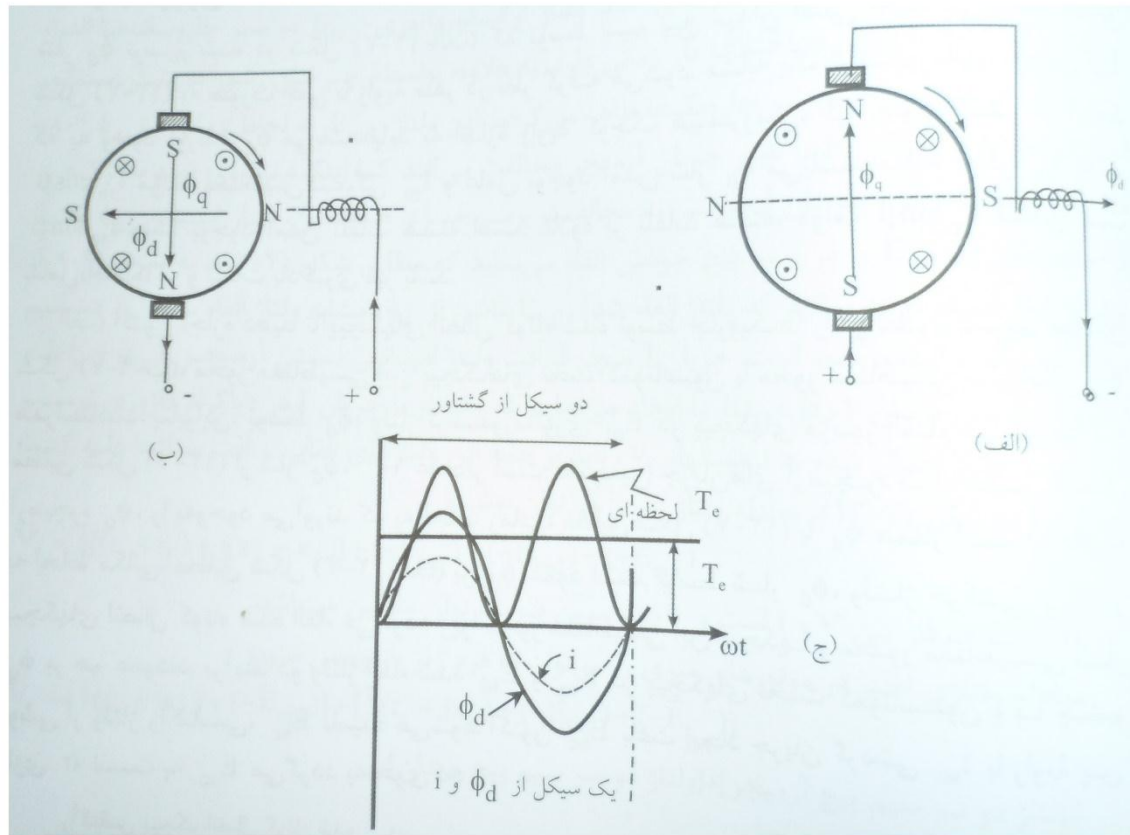
عموماً بازه زمانی (پریود) کموتاسیون t_c ، در ماشین های کموتاتوردار بسیار کوچک است . معکوس شدن سریع جریان در این بازه و جرقه زنی در جاروبک ها ممکن است باعث ظاهر شدن ولتاژهای فرکانس بالا در ترمینالهای آرمیچر گردد . این ولتاژهای با فرکانس تصادفی ، جریانهای فرکانس بالایی را در خطوط تغذیه ارسال می کنند و آنها را به آنتن های فرستنده تبدیل می کنند . گیرنده های رادیویی مجاز ممکن است این سیگنال های با فرکانس رندم را دریافت کنند و عملکردشان نویزی شود .

تداخل رادیویی می تواند بطور موثری با اتصال کوتاه نمودن ولتاژهای فرکانس بالا مهار گردد . این موضوع با وصل نمودن یک خازن کوچک (۵ الی ۵۰ نانو فاراد) به موازات ترمینالهای خروجی تحقق می یابد . می توان نشان داد که بهترین نتیجه با موازی نمودن دو خازن سری شده به دو خازن سری شده به دو سر جاروبک ها به دست می آید در حالیکه نقطه ی وسط دو خازن به بدنه ی موتور که به نحو مناسبی زمین شده است وصل گردد . موتورهای کموتاتوردار AC کوچک بکار رفته در وسایل خانگی جهت غلبه بر تداخل رادیویی باید با خازنهای مناسب تجهیز شوند .



۵-۷ موتورهای سری تک فاز

چنانچه یک ولتاژ متناوب به موتور سری DC معمولی اعمال گردد آنگاه در نیم سیکل ، شار میدان ϕ_d و شار آرمیچر ϕ_q ممکن است مطابق وضعیت نشان داده شده در شکل (۷-۱۲ الف) باشد . تقابل این دو میدان باعث ایجاد گشتاوری در جهت عقربه های ساعت می گردد . برای نیم سیکل بعدی ، جهت جریان به بطور همزمان در میدان و آرمیچر عوض می شود چرا که این دو سیم پیچ با هم سری هستند . در نتیجه ، مطابق شکل (۷-۱۲ ب) ، هر دو شار میدان و آرمیچر عکس می گردند و لذا ، مجدداً گشتاور در جهت عقربه های ساعت تولید می شوند . بنابراین ، چنانچه یک موتور سری DC معمولی به منبع تغذیه AC وصل گردد گشتاوری یک جهته تولید خواهد نمود و رتور خواهد چرخید .



شکل (۷-۱۲): نمایش نحوه تولید گشتاور در ماشین سری DC، هنگامیکه با منبع AC تغذیه می شود .



گشتاور الکترو مغناطیسی T_e ، متناسب با حاصلضرب شار میدان ϕ_d و جریان آرمیچر i ، بر اساس معادله (۷-۱۹) یک جهته است و مطابق شکل (۷-۱۲ج) با دو برابر فرکانس منبع تغذیه نوسان می کند. در اینجا، زاویه فاز زمانی بین ϕ_d و i صفر فرض می شود. متوسط گشتاور، مثبت است و موتور می چرخد. اما، در صورت تغذیه یک موتور DC معمولی با منبع AC، عملکرد آن بواسطه کموتاسیون ضعیف، ضریب توان پائین و افزایش تلفات آهن در قطب ها و یوغ استاتور - که معمولاً موق نیستند - کارآمد نخواهد بود.

از مطالب فوق الذکر می توان چنین جمع بندی نمود که موتور های سری تک فاز مشابه موتور های سری DC هستند با این تفاوت که قطب ها و یوغ آنها از ورقه های نازک با خاصیت مغناطیسی بهتر ساخته می شوند. موتورهای سری AC با توان ((کسر - کیلووات)) از ساختار قطب برجسته استفاده می نمایند اما موتورهای سری با توان بالا و اندازه بزرگ با فاصله هوایی یکنواخت ساخته می شوند. معمولاً شیار های رتور، آریب طراحی می شوند تا مواتورهای سری تک فاز عملکردی آرام و بی صدا داشته باشند. عملکرد موتورهای سری AC با در نظر گرفتن دیاگرام فازوری بهتر درک می گردد.

دیاگرام فازوری :

شار ϕ_d ترسیم شده در شکل (۷-۱۲الف) که توسط سیم پیچ میدان اصلی تولید می گردد، مطابق شکل (۷-۱۳) به صورت افقی با زاویه صفر در نظر گرفته می شود. مشابه یک ترانسفورمانور، جریان I_m که بوجود آورنده ϕ_d می باشد باید به اندازه زاویه کوچک هیستریزیس، β ، جلوتر باشد. در اینجا، مولفه مغناطیس کنندگی I_m و عامل بوجود آمدن شار ϕ_d می باشد. مولف دیگر I_m یعنی $I_m \sin \beta$ منشأ بوجود آمدن تلفات هسته است. علاوه بر تلفات هسته، مولفه $I_m \sin \beta$ ممکن است شامل اصطکاک و تلفات بادگیری نیز باشد.

الف) اکنون اجازه دهید تا پیچک های اتصال کوتاه شده توسط جاروبک ها را در نظر بگیریم. مطابق شکل (۷-۹ب)، محور مغناطیسی این پیچک های تحت کموتاسیون با محور مغناطیسی شار اصلی ϕ_d همراستا است. بنابراین، توسط ϕ_d ، ولتاژ ترانسفورماتوری E_{td} در پیچک های مزبور القاء میگردد که مطابق شکل (۷-۱۳) از شار ϕ_d ، 90° عقب تر است. همچنین جریان های آرمیچر، شار عکس العمل آرمیچر، ϕ_q ، را بوجود می آورند که به لحاظ زمانی، مطابق شکل (۷-۱۳) با ϕ_d همفاز است در حالیکه به لحاظ مکانی، مطابق شکل (۷-۱۲الف) بر ϕ_d عمود است. توسط شار ϕ_d ، ولتاژ حرکتی E_{rq} در پیچک های اتصال کوتاه شده القاء می گردد زیرا محور مغناطیسی این پیچک ها و محور مغناطیسی شار ϕ_q بر هم عمودند. برآیند دو ولتاژ القاء شده E_{td} و E_{rq} در پیچک های تحت کموتاسیون و با چشم پوشی از ولتاژ راکتانسی، E_{sc} نامیده می شود. اکنون E_{sc} باعث ایجاد جریان گردشی I_{sc} بازایه پس فازی σ نسبت به E_{sc} می گردد به نحوی که:

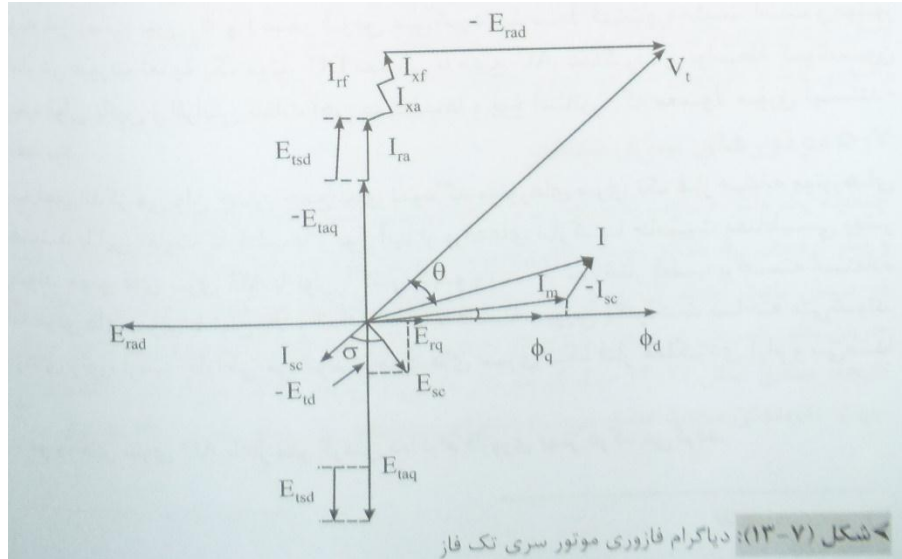


$$I_{sc} = \frac{E_{sc}}{\text{امپدانس پیچک اتصال کوتاه شده}}$$

و

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{\text{رأكتانس پیچک اتصال کوتاه شده}}{\text{مقاومت پیچک اتصال کوتاه شده}}$$

جریان اصلی منبع باید مولفه ای برای خنثی نمودن اثر I_{sc} داشته باشد؛ از این دیدگاه، مطابق شکل (۷-۱۳) جریان اصلی معادل است با: $\bar{I} = (\bar{I}_m - \bar{I}_{sc})$



ب) اکنون اجازه دهید تا توجه خود را به ولتاژ ظاهر شده دو سر جاروبکها معطوف نمائیم. شار عکس العمل آرمیچر ϕ_q با طبیعت نوسانی خود، ولتاژ ترانسفورماتوری E_{taq} دو سر جاروبکها القا می نماید که 90° با شار ϕ_q اختلاف فاز زمانی دارد. به علاوه بواسطه چرخش رتور در شار استاتور ϕ_d ، ولتاژ حرکتی E_{rad} دو سر جاروبکها ظاهر می گردد. این ولتاژ E_{rad} به لحاظ زمانی با ϕ_d و 180° اختلاف فاز دارد زیرا E_{rad} با عبور جریان آرمیچر به مخالفت می کند کما اینکه نیروی ضد محرکه در ماشین DC با عبور جریان آرمیچر به مخالفت بر میخیزد. همچنین، شار استاتور ϕ_d ولتاژ ترانسفورماتوری E_{tsd} را در سیم پیچ خودش القا می نماید که مطابق شکل (۷-۱۳)، به میزان 90° از ϕ_d عقب تر است. توجه نمائید که ولتاژ القا شده E_{tsd} ناشی از ϕ_d ، مشابه ولتاژ القاء شده E_1 در سیم پیچ اولیه یک ترانسفورماتور است. جریان آرمیچر I ، آفت ولتاژ امپدانس نشتی آرمیچر $I(r_a + jx_a)$ و آفت ولتاژ نشتی میدان $I(r_f + jx_f)$ را ایجاد می نماید که متناظر با جریان I در دیاگرام فازوری ترسیم شده است. ولتاژ اعمال شده به ترمینالها، V_t ، بیاد بر همه ای ولتاژهای القایی و آفت ولتاژها غلبه کند؛ با مراجعه به شکل (۷-۱۳)، معادله ولتاژ زیر را می توان نوشت:



$$\bar{V}_t = \bar{I}[(r_a + r_f) + j(X_a + X_f)] + (-\bar{E}_{taq}) + (-\bar{E}_{rad}) + (-\bar{E}_{tsd})$$

θ ، اختلاف فاز بین V و I است و $\cos\theta$ مبین ضریب توان ماشین می باشد .

معادله ولتاژی اخیر در موتورهای سری را می توان به فرم زیر بازنویسی نمود :

$$\bar{V}_t = [\bar{I}(r_f + jX_f) + (-\bar{E}_{tsd})] + [\bar{I}(r_a + jX_f) + (-\bar{E}_{taq}) + (-\bar{E}_{rad})]$$

[ولتاژ دو سر سیم پیچ آرمیچر] + [ولتاژ دوسر سیم پیچ میدان] =

ضریب توان :

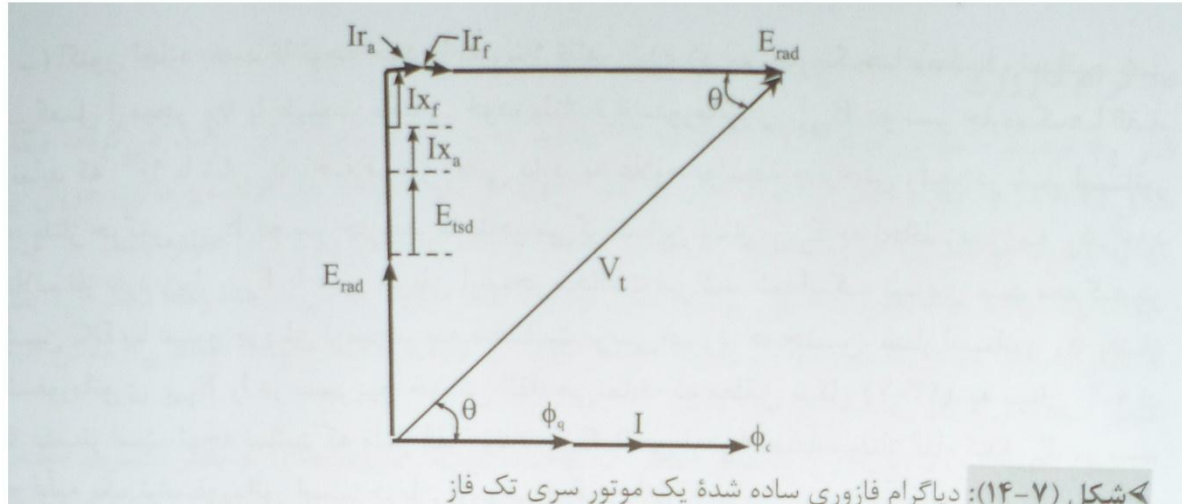
-- از روی دیاگرام شکل (۷-۱۳) می توان ملاحظه نمود که مولفه ناخواسته جریان یعنی I_{sc} باعث بهبود ضریب توان موتوری گردد . اما این امر به قیمت جریان و توان بیشتر کشیده شده از منبع ، راندمان پائین و کموتاسیون خراب تر صورت می پذیرد .

در لحظه راه اندازی ، E_{rad} صفر است ؛ لذا زاویه θ بزرگ بوده و ضریبتوان موتور مینیمم می باشد . بنابراین عملکرد موتور در راه اندازی بسیار ضعیف است . همچنانکه سرعت افزایش می یابد ، E_{rad} بیشتری ساخته و ضریب توان ماشین بهتر می شود . هرچه سرعت آرمیچر بیشتر ، ضریب توان بزرگتر ، از این دیدگاه ، موتورهای سری AC معمولاً به گونه ای طراحی می شوند که در سرعت های بالا (۱۵۰۰ الی ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه) کار کنند تا ضریب توان بهتری داشته باشند . به علاوه ، ضریب توان با متصل نمودن موتور به یک منبع تغذیه با فرکانس پائین می تواند بهبود داده شود زیرا این کار ، ولتاژهای ترانسفورماتوری E_{tsd} و E_{taq} و افتهای راکتانسهای نشستی را کاهش خواهد داد .



دیاگرام فازوری ساده شده :

اگر دیاگرام فازوری شکل (۷-۱۳) ساده سازی شود تحلیل عملکرد موتور می تواند ساده تر انجام گیرد. دیاگرام فازوری ساده سازی شده در شکل (۷-۱۴) به تصویر کشیده شده است که در آن علائم منفی E_{tsd} ، E_{taq} و E_{rad} نشان داده نشده است. اثر I_{SC} و تلفات هسته صرف نظر شده است.



اکنون ولتاژ ترانسفورماتوری $E_{taq} = \sqrt{2} f \phi_q \max \frac{Z}{a}$ به لحاظ زمانی عمود بر ϕ_q می باشد. از آنجا که ϕ_q متناسب و همفاز با I می باشد، E_{taq} نیز با I متناسب و بر آن عمود است. این حقیقت، اجازه می دهد تا تعریف نمائیم $\bar{E}_{taq} = j \bar{I} X_{mg}$ ، که در آن X_{mg} طبیعت راکتانسی دارد و می توان آن را راکتانس مغناطیس کنندگی محور q نامید. بطور مشابه می توان نوشت $\bar{E}_{tsd} = j \bar{I} X_{md}$ ، که در آن X_{md} راکتانس مغناطیس کنندگی محور d نامیده می شود. به علاوه، ولتاژ حرکتی $E_{rad} = \sqrt{2} f_r \phi_d \max \frac{Z}{a}$ همراستا با ϕ_d ترسیم می شود.

$$\phi_{dmax} = \frac{I_{max} \times N_f \text{ موثر}}{\text{رلوکتانس}} = \frac{N_f(\sqrt{2}I)}{\text{رلوکتانس}}$$

$$E_{rad} = \sqrt{2} \cdot \frac{Pn}{2} \cdot \frac{N_f(\sqrt{2}I)}{\text{رلوکتانس}} \cdot \frac{Z}{a} = \frac{PN_f Z}{a} \cdot \frac{1}{\text{رلوکتانس}} \cdot I.n = CIn$$

در نتیجه :

$$C = \frac{PN_f Z}{a \cdot \text{رلوکتانس}}$$

که در آن ثابت C برابر با $\frac{PN_f Z}{a \cdot \text{رلوکتانس}}$



اکنون معادله ولتاژ، از روی شکل (۷-۱۴)، معادل خواهد بود با:

$$\bar{V}_t = \bar{I}[(r_a + r_f) + j(X_a + X_f)] + (\bar{E}_{taq}) + (\bar{E}_{rad}) + (\bar{E}_{tsd})$$

با جایگذاری \bar{E}_{rad} ، \bar{E}_{taq} و \bar{E}_{tsd} داریم:

$$\bar{V}_t = \bar{I}[(r_a + jX) + j(X_{md} + X_{mq})] + (c\bar{I}n) = \bar{I}[(r + j(x + X))] + c\bar{I}n \quad (۷-۲۴)$$

که در آن $X = X_{mq} + X_{md}$ ، $r = r_a + r_f$ و $x = x_a + x_f$ ، سرعت n برابر است با:

$$n = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\left(\frac{V_t}{I}\right)^2 - (x + X)^2} - r \right] \quad (۷-۲۵)$$

توان الکترومغناطیسی تولیدی = ولتاژ حرکتی آرمیچر × جریان آرمیچر $E_{rad} \cdot I$
وات $\rightarrow p_e = cI^2n$

$$T_e = \frac{cI^2n}{2\pi n} = \frac{c}{2\pi} \cdot I^2 = KI^2$$

در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی عبارتست از:

معادله (۷-۲۵) می تواند بر حسب T_e بازنویسی شود:

$$n = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\frac{KV_t^2}{T_e} - (x + X)^2} - r \right] \quad (۷-۲۶)$$

یا

$$T_e = \frac{kV_t^2}{(r + cn)^2 + (x + X)^2}$$

از روی معادله اخیر می توان دریافت که مطابق شکل (۷-۱۵) با افزایش گشتاور، سرعت آفت می کند. به ازای یک گشتاور بار T_L (برابر با T_e) معین، یا جریان I مشخص، معادله (۷-۲۵) یا (۷-۲۶) نشان می دهد که سرعت موتور در فرکانسهای عملکرد پائین تر، مقدار بزرگتری است. سرعت ماشین در حالت DC برابر می شود با (در معادله ۷-۲۵) $(x+X=0)$:

$$n = \frac{1}{c} \frac{V_t - rI}{I} \quad (۷-۲۷)$$

همچنین، از روی شکل (۷-۱۴) می توان گفت:

$$V_t \cos\theta - I \cdot r = E_{rad} = cIn$$

$$\cos\theta = \frac{I(cn+r)}{V_t} \quad (۷-۲۸)$$

معادله اخیر تایید می نماید که همانگونه که قبلاً اشاره گردید با افزایش سرعت، ضریب توان بهبود می یابد.

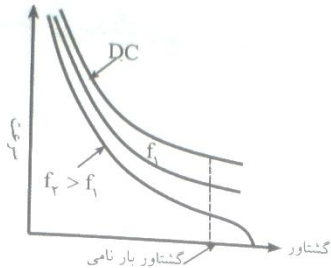
$$T_{e.st} = \frac{kV_t^2}{r^2 + (x+X)^2}$$

گشتاور راه اندازی با قرار دادن $n=0$ در معادله (۷-۲۷) می تواند به دست آید: (۷-۲۹)

معادله فوق نشان می دهد که مطابق شکل (۷-۱۵)، گشتاور راه اندازی در فرکانسهای کار بالاتر، کوچکتر است.



موتورهای جبران نشده سری عموماً در اندازه های کسر - کیلوواتی ساخته می شوند . موتورهای سری تک فاز کوچک می توانند به خوبی با برق DC یا AC کار کنند ((موتورهای اونیورسال)) نامیده می شوند . اما ، امروزه اصطلاح ((اونیورسال)) نام مناسبی به نظر نمی رسد زیرا منبع DC به ندرت در دسترس است . این موتورها تا رنج توانی ۲۰۰ وات ساخته می شوند و به وفور در دریل های قابل حمل ، جاروبرقی ها ، مخلوط کن و چرخ خیاطی و ... مورد استفاده قرار می گیرند . هنگامی که این موتور ها در وسایل خانگی بکار می روند بر اساس آنچه که قبلاً تشریح گردید باید خازن هایی برای حذف تداخلات ، اده - د . تعسه شده .

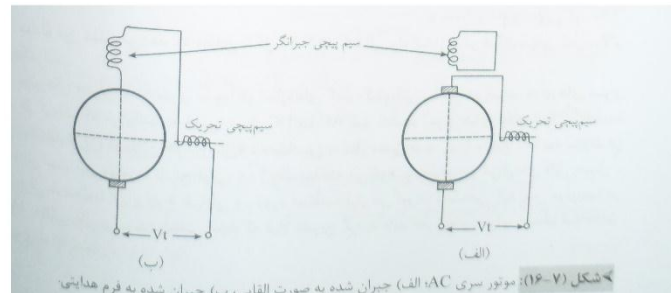


شکل (۷-۱۵): مشخصه های گشتاور-سرعت یک موتور سری تک فاز

۷-۵-۱ موتورهای سری AC جبران شده

در موتور های سری AC کوچک ، مشکلات مربوط به کموتاسیون چندان مهم و جدی نیست زیرا این موتورها در جریان های پائینی کار می کنند . به علاوه ، این موتورها در سرعت های بالا کار می کنند و در نتیجه ، ضریب توان نسبتاً خوبی دارند . لذا ، موتورهای سری AC کوچک عموماً جبران سازی نمی شوند . اما در موتورهای سری AC و بزرگتر ، یک سیم پیچ جبرانگر برای دستیابی به ضریب توان بهتر ، مشخصه گشتاور-سرعت مناسب تر و بهبود کموتاسیون ضروری می باشد . عملکرد سیم پیچی های جبرانگر در موتورهای سری AC و DC مشابه است . دیاگرام فازوری موتور سری جبران نشده در شکل (۷-۱۳) مبین آن است که ضریب توان پائین تا حدی ناشی از ولتاژ ترانسفورماتوری E_{taq} می باشد که بوسیله شار محور q آرمیچر بوجود آمده است .

این ولتاژ E_{taq} می تواند به کمک یک سیم پیچ جبرانگر که به صورت مناسبی در شیارهای استاتور توزیع شده باشد کاسته و یا حتی حذف گردد . چنانچه آمپر دور سیم پیچی جبرانگر ، نیروی محرکه مغناطیسی عکس العمل آرمیچر را خنثی نماید آنگاه ϕ_q صفر خواهد شد و E_{taq} حذف می شود و منجر به بهبود ضریب قدرت می گردد .



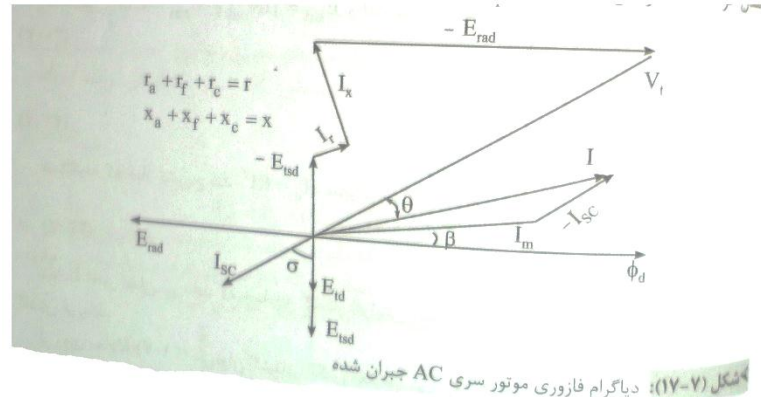
شکل (۷-۱۶): موتور سری AC، الف) جریان شده به صورت القایی، ب) جدا: شده به فرم هدایتی



۷-۵-۱ موتورهای سری AC جبران شده

دو روش برای اتصال سیم پیچی جبرانگر وجود دارد. در شکل (۷-۱۶-الف) سیم پیچی جبرانگر بطور سری با آرمیچر وصل می شود که این آرایش ((ماشین جبران شده هدایتی)) نامیده می شود. ترکیب دیگری موسوم به ((ماشین جبران شده به صورت القایی)) در شکل (۷-۱۶-ب) نشان داده شده است که در آن سیم پیچ جبرانگر به مدار اصلی متصل نیست بلکه دو سر آن به هم اتصال کوتاه شده است. در این حالت، سیم پیچ جبرانگر به عنوان ثانویه اتصال کوتاه شده یک ترانسفورماتور و سیم پیچ آرمیچر در نقش اولیه آن رفتار می کند.

در یک موتور سری جبران شده، چنانچه شار ϕ_q به طور کامل خنثی گردد آنگاه ولتاژ ترانسفورماتوری E_{taq} صفر می گردد. علاوه بر این، مقدار صفر ϕ_q ، ولتاژ حرکتی E_{rq} دو سر پیچکهای تحت کموتاسیون را نیز حذف می نماید. با صفر شدن مقادیر E_{taq} و E_{rq} ، دیاگرام فازوری شکل (۷-۱۳) به فرم نشان داده شده در شکل (۷-۱۷) تغییر می یابد. توجه کنید که ولتاژ دو سر پیچک های اتصال کوتاه شده در این حالت صرفاً E_{tq} می باشد که به تنهایی جریان I_{sc} را به راه می اندازد.



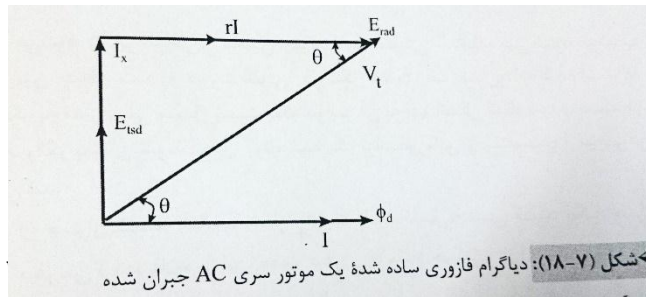
در دیاگرام فازوری شکل (۷-۱۷)، مقاومت و راکتانس نشست سیم پیچ جبرانگر باید در نظر گرفته شود. برای موتور جبران شده به صورت القایی، مقاومت r_c و راکتانسی نشست x_c باید مشابه یک ترانسفورماتور به سمت آرمیچر ارجاع یابند.

دیاگرام فازوری ساده شده موتور سری جبران شده در شکل (۷-۱۸) به تصویر کشیده شده است که همچون گذشته علامت منفی قبل از E_{tsd} و E_{rad} برداشته شده است.

چنانچه تعریف نمائیم:

$$r = r_a + r_f + r_c$$

$$x = x_a + x_f + x_c$$



آنگاه از روی شکل (۷-۱۸) داریم :

که اکنون $\bar{E}_{rad} = C\bar{I}n$ و $\bar{E}_{tsd} = j\bar{I}X_{md}$ و لذا ، می توان نوشت :

$$\bar{V}_t = \bar{I}(r + Cn) + j\bar{I}(x + X_{md}) \quad (۷-۳۰)$$

$$n = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\left(\frac{V_t}{I}\right)^2 - (x + X_{md})^2} - r \right] \quad \text{یا: (۷-۳۱)}$$

$$n = \frac{1}{c} \left[\sqrt{\frac{KV_t^2}{T_e} - (x + X_{md})^2} - r \right] \quad \text{همانگونه که قبلاً تشریح شد } T_e = kI^2 \text{ ، بنابراین: (۷-۳۲)}$$

معادله اخیر نشان می دهد که چنانچه گشتار افزایش یابد دوباره مشابه مشخصه موتور سری ، سرعت کاهش می یابد .

از روی معادله (۷-۳۱) می توان گشتار الکترومغناطیسی T_e را چنین نوشت :

$$T_e = \frac{kV_t^2}{(r+cn)^2 + (x+X_{md})^2} \quad (۷-۳۳)$$

$$T_{e.st} = \frac{kV_t^2}{r^2 + (x+X_{md})^2} \quad \text{گشتاور راه اندازی با مساوی صفر قرار دادن } n \text{ در معادله فوق به دست می آید:}$$

(۷-۳۴) با مقایسه معادلات (۷-۲۷) و (۷-۳۳) می توان دریافت که به ازای یک سرعت n و ولتاژ V_t معین ، گشتاور تولیدی موتور سری جبران شده بزرگتر است (زیرا

$x > X_{md}$ است) و بالطبع مشخصه گشتاور - سرعت بهتری دارد .

همچنین از روی معادلات (۷-۲۹) و (۷-۳۴) ملاحظه می گردد که در موتور سری جبران شده ، گشتاور راه اندازی نیز بیشتر است .

$$= \frac{r+cn}{(r+cn)^2 + (x+X_{md})^2} \quad \text{ضریب قدرت موتور جبران شده برابر است با:}$$



۷-۵-۱ موتورهای سری AC جبران شده

$$= \frac{r+cn}{(r+cn)^2+(x+X)^2}$$

و ضریب قدرت موتور جبران نشده عبارت است از :

$$\sin\theta = \frac{I(x+X_{md})}{V_t}$$

به علاوه ، با توجه به شکل (۷-۱۸) داریم :

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{I(x+X_{md})}{V_t}\right)^2}$$

در نتیجه ، ضریب قدرت موتور جبران شده معادل است با :

$$= \sqrt{1 - \left(\frac{I(x+X)}{V_t}\right)^2}$$

و ضریب قدرت موتور جبران نشده برابر است با :

روابط بیان شده در بالا گواه آن است که به ازای یک سرعت معین ، موتور جبران شده ، ضریب قدرت بهتری دارد زیرا X_{md} و کوچکتر از x می باشد . مشابه موتور DC ، توان

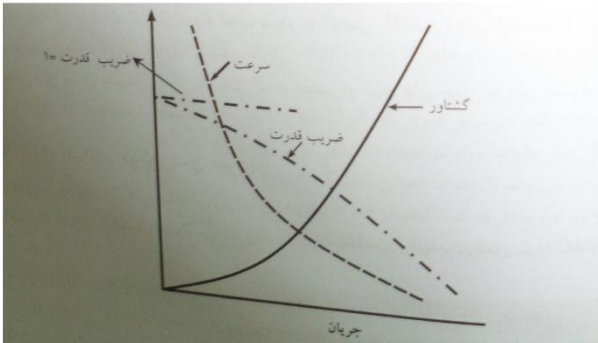
$$P_a = IE_{rad}$$

مکانیکی تولید شده در موتور سری AC برابر است با :

$$P_{sh} = P_a - (\text{تلف مکانیکی} + \text{تلف هسته})$$

لذا ، توان خروجی شافت (محور) برابر است با :

برای موتور سری تک فاز ، مشخصه های سرعت ، گشتاور و ضریب قدرت بر حسب جریان موتور به صورت نمونه وار در شکل (۷-۱۹) آورده شده است . همانگونه که ملاحظه می گردد با بارگذاری موتور ، سرعت و ضریب قدرت کاهش می یابند در حالیکه گشتاور الکتریکی افزایش می یابد .



شکل (۷-۱۹) : مشخصه های نمونه وار موتور سری تک فاز

در پیچک های تحت کموتاسیون ، I_{SC} در مورد موتورهای جبران شده کوچکتر است زیرا می باشد (شکل های (۷-۱۳) و (۷-۱۷) را ملاحظه نمایید) . این امر باعث کموتاسیون بهتر در موتورهای سری جبران شده می شود .

بنابراین در مقایسه با موتوره ای سری جبران نشده ، موتورهای سری مجهز به سیم پیچ جبران دارای مشخصه گشتاور-سرعت بهتر ، ضریب قدرت بالا تر و کموتاسیون اصلاح شده میباشد .



برای ماشین های جبران شده هدایتی تعداد دور موثر N_e سیم پیچ جبرانگر به صورت زیر میتوان محاسبه کرد.
در ماشین جبران شده به صورت کامل داریم

در ماشین جبران شده بصورت القایی هر تعداد مقدور سیم پیچ جبرانگر میتوان استفاده نمود و لذا طراحی آن ساده تر است.

چنانچه امپدانس نشتی $(r+jx)$ در شکل (۷-۱۸) صرف نظر گردد نگاه :

$$tg\theta = \frac{E_{tsd}}{E_{rad}} = \frac{\pi f N_f \phi_{d.max} \sqrt{2}}{f_r \frac{Z}{a} \phi_{d.max} \sqrt{2}}$$

از رابطه اخیر چنین استنباط میگردد که برای دستیابی به θ کوچکتر متناظر با عملکرد در ضریب قدرت بهتر، فرکانس تغذیه پایین تر، تعداد دور کمتر N_f میدان استاتور، فرکانس چرخش بالا بر F_r و مقادیر بزرگتر $\frac{Z}{a}$ مطلوبست .

برای بهبود کموتاسیون و ولتاژ ترانسفورماتوری در پیچک تحت کموتاسیون باید کاهش داده شود .

از آنجا که متناسب با تعداد دور پیچک ارمیچر و شار میدان می باشد ، مقادیر کوچکتری از با استفاده از پیچک های تک دوری ارمیچر و افزایش تعداد قطب بدست می آید.

این امر شار زیر قطب که برابر با $\left(\frac{\text{کل شار}}{\text{تعداد قطب}} \right)$ میباشد ، کاهش میدهد.



لازم به ذکر است که افزایش تعداد قطب منجر به راکتانس ناشی X_f میدان میگردد، لذا تا حدی بر روی بهبود ضریب قدرت اثر منفی دارد. موتورهای سری تکفاز جبران شده بزرگ در بعضی از کشورهای جهان به طور وسیع در سیستم حمل و نقل ریلی استفاده میشوند.

۲-۵-۷ راه اندازی موتورهای سری

موتورهای سری به روش های متنوعی راه انزی میشوند:

الف) راه اندازی با اتصال مستقیم به برق شبکه AC مناسب برای موتورهای سری AC با رنج توانی کسر-کیلو وات (ب) راه اندازی مقاومتی مشابه آنچه که در موتورهای سری DC استفاده میشوند. (ج) اتوترانس با تعدادی انشعاب بروی سیم پیچ ان. (این روش در موتورهای سری بزرگ کاربرد دارد)

۳-۵-۷ کنترل دور موتورهای سری

ماشین سنکرون در سرعت ثابتی که توسط تعداد قطبها و فرکانس تغذیه f مشخص میگردد، میچرخد. سرعت **موتور القایی** به تعداد قطب، فرکانس و لغزش بستگی دارد. اما سرعت **ماشینهای الکتریکی** دارای کموتاتور و جاروبک از تعداد قطبها و فرکانس تبعیبت نمیکند، زیرا ارایش کموتاتور و جاروبک میتواند برای ولتاژ و جریانهای ورودی و خروجی به عنوان یک مبدل فرکانسی عمل نماید. در نتیجه، **ماشینهای کموتاتور دار** میتوانند در رنج وسیعی از سرعت کار کنند.



کنترل دور موتورهای سری

برای مثال: ولتاژ جاروبک در موتور DC دارای فرکانس صفر است. این ولتاژ فرکانس صفر بوسیله کموتاتور و جاروبکها در قبال هر سرعت رتور n دور در ثانیه به ولتاژ حرکتی با فرکانس $(np/2)$ تبدیل میگردد. این مطلب عینا برای موتورهای AC صادق است و این بدان معناست که در موتورهای سری AC سرعت سنکرون اهمیتی ندارد.

هنگام حذف بار، سرعت در موتورهای AC بسیار بالا میرود اما در موتورهای کوچک اصطحکاک و تلفات سیم پیچ، سرعت بی باری را به مقدار ایمنی کاهش میدهد. حداکثر سرعت موتور سری AC تکفاز به کموتاسیون رضایت بخش آن محدود میشود.

روشهای کنترل دور موتورهای سری DC قابل تعمیم به نوع AC نیز میباشد. این روشها عبارتند از:

- الف) مقاومت ارمیچر یا کنترل راکتانس
- ب) کنترل شار میدان
- ج) کنترل ولتاژ ارمیچر

روش (الف) در مورد موتورهای کوچک استفاده میشود و در ماشین های بزرگ اغلب روش (ج) به کار میرود.

چنانچه جاروبکها در موتور سری تکفاز از محور خنثی جا به جا گردد، نگاه زاویه α در معادله (۷-۱۹) دیگر صفر نخواهد بود. در نتیجه گشتاور T_e و سرعت موتور کاسته میشود.



کنترل دور موتورهای سری

و این نشان میدهد که سرعت میتواند با جا به جا نمودن جاروبکها از محور خنثی در موتور تکفاز سری تغییر داده شود. (این روش منجر به افت کیفیت کموتاسیون میگردد و این روش برای کنترل دور موتورهای سری تکفاز مطاوب نیست)

مثال:

یک موتور سری اونیورسال هنگام کار با وتناز تغذیه 220 V DC، جریان 10 A میکشد و با سرعت 1400 دور در دقیقه میچرخد. سرعت جدید و ضریب قدرت ماشین را هنگام اتصال به برق 220 V ، 25 Hz بیابید. با این فرض که جریان موتور همان مقدار قبلی باقی بماند. موتور دارای مقاومت کل $1\ \Omega$ و اندوکتانس کل $1/10\text{ H}$ میباشد.

حل:

$$V_t = Ir + Cln \Rightarrow 220 = 10 \times 1 + Cl(1400)$$
$$Cl = \frac{210}{1400} = \frac{2}{20} \text{ V/rpm}$$

هنگام کار با DC داریم:

هنگام کار با AC داریم:

$$V_t = I(r + jx) + Cln$$

که در آن:



لذا :

$$X = \text{کل راکتانس موتور} = 2\pi(25)(0/1) = 15/7\Omega$$

$$220 = 10(1 + j15/7) + Cln$$

$$\Rightarrow (220)^2 = (Cln + 10^2) + (157)^2 \Rightarrow Cln = 154/11 - 10$$

$$= 144/11 \Rightarrow n = \frac{144/11}{Ic} = \frac{144/11}{3} \times 20 = 960/7 \text{ (rpm)}$$

$$\text{پس فاز} = \frac{Cln + Ir}{V_t} = \frac{154 / 11}{220} = 0/7$$

مثال :

یک موتور سری تکفاز ۲۲۰V و ۵۰۰w و ۴۰۰۰ rpm و ۵۰ Hz دارای مقاومت کلی ۳Ω و راکتانس کلی ۲۰Ω میباشد. با فرض تلفات توانی ۴۰ W (شامل تلفات هسته و تلفات مکانیکی) ، جریان و ضریب توان را تحت شرایط کار نامی بدست آورید.



حل :

توان مکانیکی تولید شده در ارمیچر برابر است با :

$$P_a = P_{sh} + (\text{تلفات هسته و مکانیکی}) = 500 + 40 = 540 \text{ W}$$

$$P_a = 540 \text{ W} = E_{rad} \cdot I \rightarrow E_{rad} = \frac{P_a}{I}$$

با توجه به شکل (۷-۱۸) میتوان نوشت :

$$V_t^2 = (XI)^2 + (rI + E_{rad})^2 = (IX)^2 + \left(rI + \frac{P_a}{I}\right)^2$$

$$\Rightarrow I^4(X^2 + r^2) - (V_t^2 - 2P_a r)I^2 + P_a^2 = 0$$

با جایگذاری مقادیر معلوم در رابطه اخیر داریم :

$$I^4(20^2 + 3^2) - (230^2 - 2 \times 540 \times 3)I^2 + 540^2 = 0$$

$$\Rightarrow I^4 - 121/42 I^2 + 712/96 = 0 \Rightarrow I^2 = 115/24 \text{ A}$$

$$I^2 = 6/19 \text{ A}$$

یا :



مقدار بزرگتری جریان قابل قبول نمیباشد و لذا جریان موتور معادل است با :

$$I = \sqrt{6/19} = 2/488 \text{ A}$$

$$\sin \theta = \frac{XI}{V_t} = \frac{2 / 488 \times 20}{230} \Rightarrow \cos \theta = 0/9763 \text{ پس فاز}$$

مثال :

یک موتور سری تکفاز هنگام اتصال به ولتاژ تغذیه 220 V ، 50Hz ، در ضریب قدرت 0.88 جریان نامی I میکشد و در سرعت نامی n میچرخد. چنانچه فرکانس تغذیه به $16\frac{2}{3}$ هرتز کاسته گردد ، مطلوبست محاسبه ولتاژ تغذیه و ضریب قدرت جدید به ازای همان جریان I و سرعت n .

حل :

به ازای یک جریان ثابت I و سرعت معین n $(rI + E_{rad}) = A$ در شکل (۷-۱۸) ثابت باقی میماند. با

توجه به شکل ملاحظه میگردد که :



$$V_t = 220V, P.F = 0.88 \Rightarrow \cos \theta = \frac{A}{V_t} = \frac{A}{220}$$

$$A = 220 \times 0.88 = 202.4$$

$$V_t^2 = A^2 + (IX)^2 \Rightarrow$$

همچنین :

$$(IX)^2 = 220^2 - (202.4)^2 = 11934.24$$

هنگامی که فرکانس منبع تغذیه به $16\frac{2}{3}$ هرتز کاهش داده میشود انگاه :

$$(افت راکتانسی جدید)^2 = \frac{1}{9}(IX)^2 = \frac{1}{9}(11934.24) = 1326.03$$

از روی شکل (۷-۱۸) داریم :

$$V_t = \sqrt{\frac{1}{9}(IX)^2 + A^2} = \sqrt{1326.03 + (202.4)^2} = 205.65 \text{ v}$$

$$P.F = \cos \theta = \frac{A}{V_t} = \frac{202.4}{205.65} = 0.9842 \text{ پس فاز}$$