فهرست

فصل۱ انواع گشتاور الکتریکی و میدان مغناطیسی در ماشین های الکتریکی
۱-۱-مقدمه.....۳
۱-۲-اصول فیزیکی تولید گشتاور الکتریکی.....۳
۱-۲-۱-گشتاور الکترومغناطیسی(تداخلی).....۴
۱-۲-۲-گشتاور رلوکتانسی.....۶
۱-۲-۳-گشتاور هیسترزیس.....۷
۱-۲-۳-۱-حلقه هیسترزیس.....۷
۱-۲-۳-۲-چگونگی ایجاد گشتاور هیسترزیسی.....۷
۱-۳-انواع میدان های مغناطیسی.....۹
۱-۳-۱ میدان مغناطیسی ساکن ثابت.....۹
۱-۳-۲ میدان مغناطیسی ساکن متغییر (ضربانی).....۱۰
۱-۴- نمایش کمیت‌های الکترومغناطیسی با بردار فضایی.....۱۳
۱-۴-۱- مفهوم فازور زمانی.....۱۳

فصل ۱
انواع گشتاور الکتریکی و میدان مغناطیسی در ماشین های الکتریکی

۱-۱-مقدمه

اصول عملکرد ماشینهای الکتریکی AC, DC یکسان است و اختلاف در شکل نهایی و روابط گشتاور تولیدی می باشد و نوع میدان مغناطیسی ایجاد شده به شکل ساختمان و نحوه تحریک سیم بندی وابسته می باشد.

۱-۲-اصول فیزیکی تولید گشتاور الکتریکی

در حالت کلی گشتاور تولیدی ماشین های دوار به سه طریق مختلف تولید می شود:

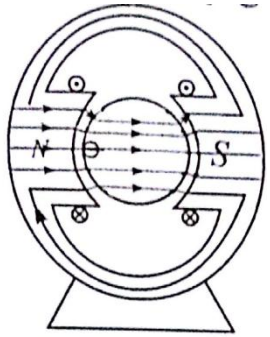
۱- تداخل دو میدان مغناطیسی مجزا از هم که نسبت به یکدیگر ساکن بوده و دارای قطب های یکسان باشند.در این حالت گشتاور تولیدی را گشتاور الکترومغناطیسی تداخلی یا تقابلی می نامند.

۲- متغییر بودن رلوکتانس دیده شده توسط شار عمل کننده با حرکت رتور که گشتاور به وجود آورنده را گشتاور رلوکتانسی می نامند.

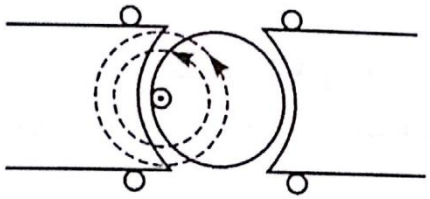
۳- تاخیر فاز مابین چگالی شار القا شده در هسته رتور و شدت میدان به وجود آورنده آن ، این نوع گشتاور که منشا تولید آن وجود تلف هیسترزیس در رتور است را گشتاور هیسترزیسی گویند.

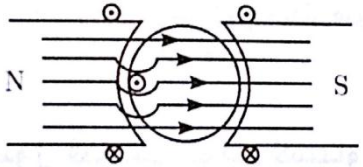
۱-۲-۱-گشتاور الکترومغناطیسی (تداخلی)

در شکل الف یک استاتور قطب برجسته با دو قطب و یک رتور استوانه ای با یک هادی نشان داده شده است. مسیرهای شار مغناطیسی حاصل از تغذیه جداگانه استاتور و رتور و تغذیه هم زمان استاتور و رتور در شکلهای الف و ب و ج نشان داده شده است.



(الف)

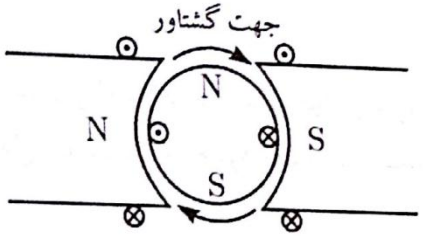

(ب)



(ج)

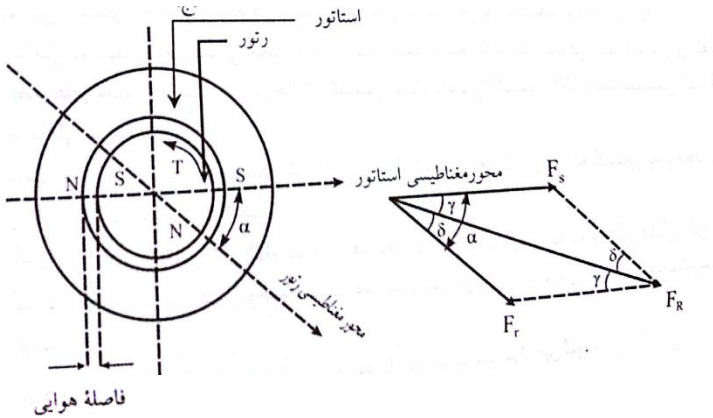
طبق قانون دست راست نیرویی به سمت بالا بر هادی رتور وارد می گردد . گشتاور راست گردی که در نتیجه تداخل میدان های استاتور و رتور تولید شده گشتاور الکترومغناطیسی یا گشتاور تداخلی نامیده می شود.

حال اگر رتور مطابق شکل مقابق حامل جریان باشد که وجود جریان سبب تولید شار رتور و دو قطب در رتور تولید می شود که قطب S استاتور قطب N رتور را جذب و قطب S رتور را دفع می کند که یک گشتاور راستگرد ایجاد می شود. قطب Nاستاتور قطب Sرتور را جذب و قطب Nرتور را دفع می کند که مجددا یک گشتاور راستگرد ایجاد می شود. گشتاور برآیندی که ایجاد می گردد را تداخلی می نامند.



گشتاور الکترومغناطیسی (تداخلی)

در شکل زیر یک قطعه مغناطیس دایم که میتواند آزادانه حول محوری دوران کند در میدان مغناطیسی یک آهنربای ساکن قرار گرفته است.تمایل دو میدان برای هم‌جهت شدن موجب ایجاد گشتاور تداخلی می شود و زاویه بین محورهای میدان های مغناطیسی استاتور و رتور زاویه گشتاور نامیده میشود.



اندازه گشتاور الکترو مغفناطیسی در تمام ماشین های گردان متناسب است با:

$$T_e \propto \text{شدت میدان استاتور} \times \text{شدت میدان رتور} \times \text{Sin}\delta$$

تمرین: یک ماشین گردان با استاتور دو قطبی و رتور چهار قطبی مفروض است. صابت کنید گشتاور الکترومغناطیسی برآیند در این ماشین برابر صفر است.

به طور کلی ۳ شرط برای ایجاد گشتاور تداخلی پایدار در ماشین های الکتریکی لازم است:

۱- دو میدان مغناطیسی ، یکی در رتور و دیگری در استاتور وجود داشته باشد.

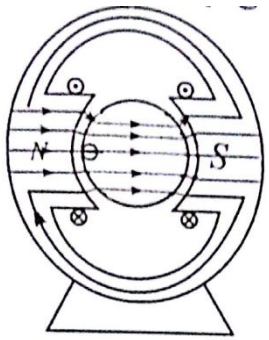
۲- این دو میدان نسبت به هم ساکن باشند.

۳- تعداد قطبهای استاتور و رتور با هم یکی باشد.

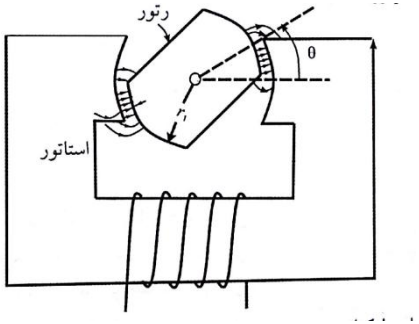
۱-۲-۲-گشتاور رلوکتانسی

در شکل الف مسیر شار مغناطیسی هنگامیکه پیچک های استاتور حامل جریان باشند نشان داده شده است. اگر یک رتور فرو مغناطیس را به صورت مناسبی در این میدان قرار دهیم مطابق شکل زیر مسیر شار استاتور به نحو قابل ملاحظه ای تحت تاثیر قرار می گیرد.

شار مغناطیسی تمایل به عبور از مسیری با حداقل رلوکتانس را دارد ، رتور تحت تاثیر یک گشتاور چپگرد قرار می گیرد که گشتاور رلوکتانسی نامیده میشود. اگر محور طولی رتور با محور قطبهای استاتور همسو شود اندازه گشتاور رلوکتانسی صفر می شود. گشتاور رلوکتانسی زمانی به وجود می آید که رلوکتانس دیده شده توسط شار عمل کننده با حرکت رتور تغییر کند.



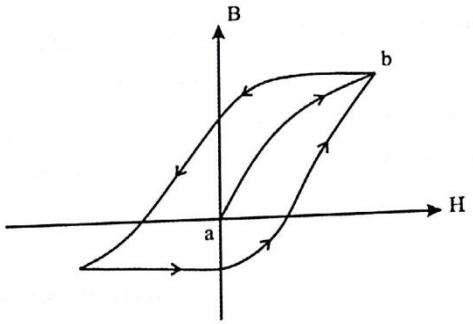
(الف)



۱-۲-۳-گشتاور هیسترزیسی

۱-۲-۳-۱-حلقه هیسترزیس

مطابق شکل زیر با اعمال جریان متناوب به سیم پیچ هسته و فرض اینکه شار هسته ابتدا صفر و با افزایش جریان زیاد می شود شار هسته مسیر ab را می پیماید ولی با کاهش جریان، شار در مسیری غیر مسیر افزایش ، کاهش می یابد. یعنی شار همواره از جریان مغناطیس کنندگی عقب تر است.بنابراین شار هسته تنها به جریان سیم پیچ بستگی ندارد و به شار قبلی هسته نیز وابسته می باشد. چنانچه یک سیکل کامل از جریان به سیم پیچ اعمال گردد حلقه بسته ای مطابق شکل زیر ایجاد میشود که به آن حلقه هیسترزیس می گویند.

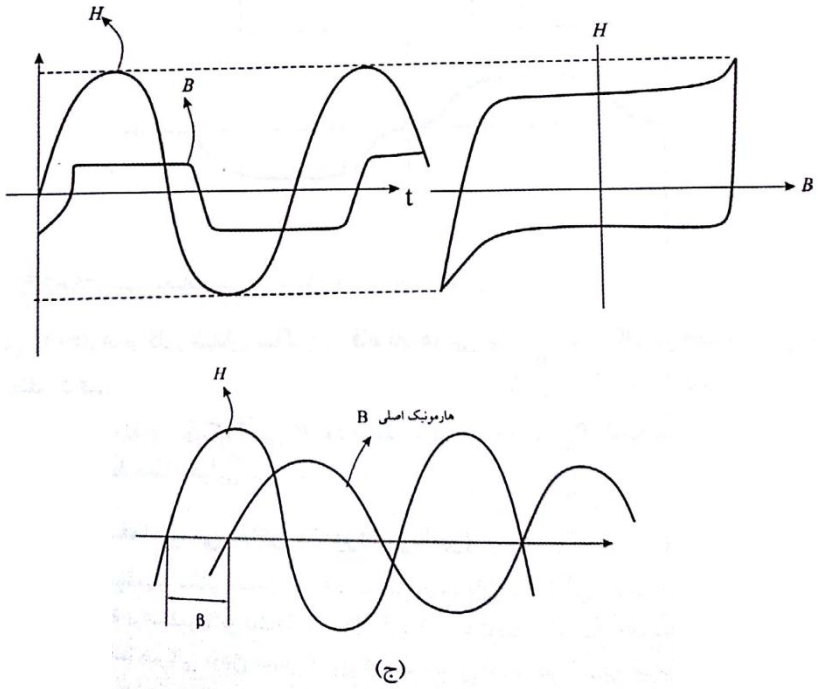


۱-۲-۳-۲-چگونگی ایجاد گشتاور هیسترزیسی

فرض کنید رتور از یک ماده مغناطیسی دارای حلقه هیسترزیس مناسب تشکیل شده است.با اعمال ولتاژ مناسب به سیم پیچ استاتور یک میدان دوار ناشی از تحریک استاتور ایجاد میگردد.این میدان دوار در فاصله هوایی سبب مغناطیس شدن رتور میگردد و یا به عبارتی میدان دومی در رتور القا می شود که عقب تر از میدان دوار استاتور است .این اختلاف زاویه سبب ایجاد گشتاور هیسترزیسی که تا حدودی شبیه گشتاور تداخلی است می شود و رتور بدنبال میدان گردان فاصله هوایی ناشی از استاتور به حرکت در می آید.

چگونگی ایجاد گشتاور هیسترزیسی

شکل ب زیر منحنی چگالی شار B می باشد که به کمک نقطه یابی از منحنی الف شکل زیر بدست آمده است. H نماینده میدان دوار استاتور و B نماینده شار القا شده در رتور توسط این میدان دوار می باشد. با در نظر گرفتن هارمونیک اصلی B شکل ب به صورت شکل ج در می آید. اختلاف فاز β ایجاد شده در اثر پدیده هیسترزیس دلیل تولید گشتاور در این نوع ماشین می باشد.

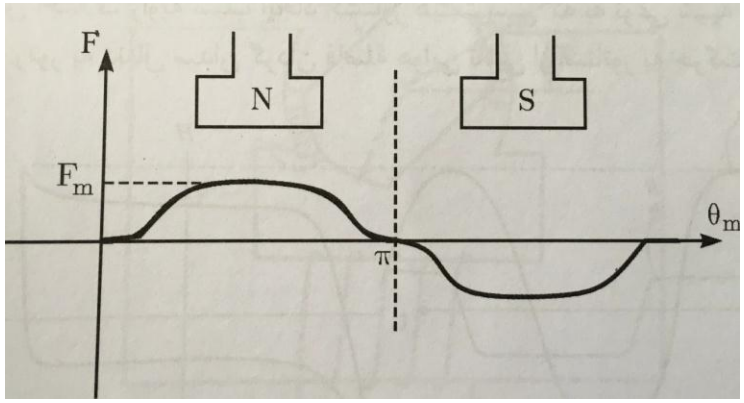


۱-۳ انواع میدان های مغناطیسی

میدان های مغناطیسی در فرایند تبدیل انرژی نقش واسطه را بر عهده دارد. میدان های مغناطیسی را می توانبه سه دسته تقسیم نمود:

۱-۳-۱ میدان مغناطیسی ساکن ثابت

این میدان در مکان ساکن است و دامنه آن نیز ثابت است و تغیرات زمانی ندارد مانند میدان تحریک (استاتور) و میدان آرمیچر در ماشین dc . تأثیر این دو میدان ساکن بر هم باعث ایجاد گشتاور تداخلی می گردد.



چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی یک ماشین dc دو قطب

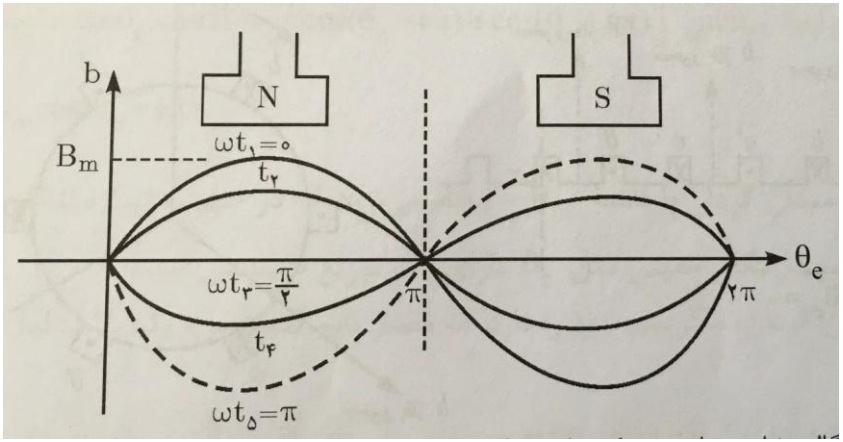
۱-۳-۲ میدان مغناطیسی ساکن متغییر (ضربانی)

در این نوع میدان موقعیت مکانی میدان در فضا ساکن است ولی دامنه آن متغییر با زمان است.
اساساً ضربانی بودن میدان از ویژگی سیستمی است که با منبع جریان متناوب تک فاز تغذیه میگردد.

معادله چگالی شار ضربانی با فرض توزیع مکانی سینوسی و تغییرات زمانی سینوسی به فرم زیر است:

$$b(\theta_e, t) = B_m . \cos \omega t \, . \sin(\theta_e)$$

معادله فوق برای یک میدان دو قطبی در ۵ لحظه مختلف در شکل زیر رسم شده است



چگالی شار نوسانی در یک ماشین الکتریکی دو قطبی

۱-۳-۳ میدان گردان ثابت (میدان دوار با دامنه ثابت)

میدان مغناطیسی گردان ثابت یک موج متحرک است که دارای دامنه ثابت است و با سرعتی ثابت حول فاصله هوایی ماشین دوران می کند.
میدان دوار با دامنه ثابت را می توان به روش های مختلفی ایجاد نمود که در ادامه به سه طریق آن اشاره می شود.

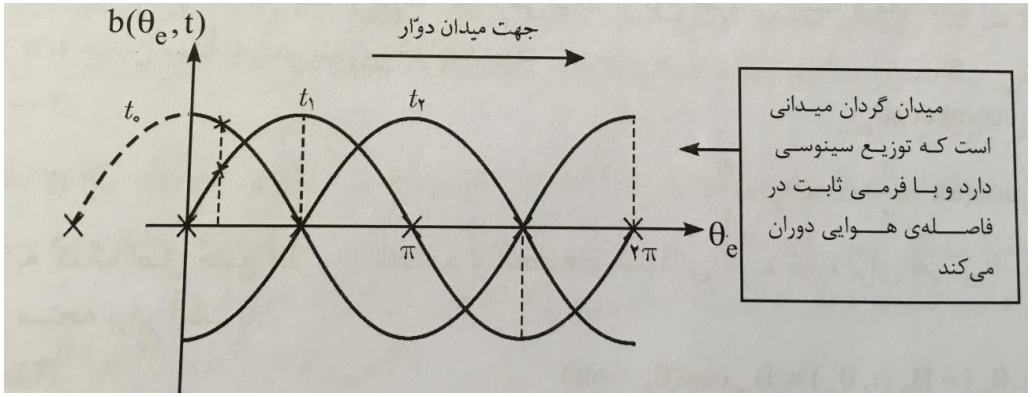
الف) توسط دوران یک میدان ثابت

هرگاه رتور توسط جریان dc تغذیه و با سرعت ثابت دوران داده شود یک میدان دوار با دامنه ثابت ایجاد می گردد مانند میدان رتور چرخان ماشین سنکرون

ب) توسط سیم پیچ سه فاز متعادل متقارن

هرگاه سیم پیچ سه فاز متعادل p قطبی توسط سیستم جریان سه فاز متقارن با فرکانس f تغذیه گردد میدان ایجاد شده با سرعت ثابت $n_s = \frac{2f}{p}$ دور بر ثانیه نسبت به خود سیم پیچ ها دوران خواهد داشت.

در اینجا n_{syn} سرعت چرخش حوزه گردان استاتور بر حسب دور بر ثانیه (سرعت سنکرون) است. در شکل زیر موقعیت میدان گردان یک سیم پیچ سه فاز دو قطبی برای چند لحظه مختلف رسم شده است.



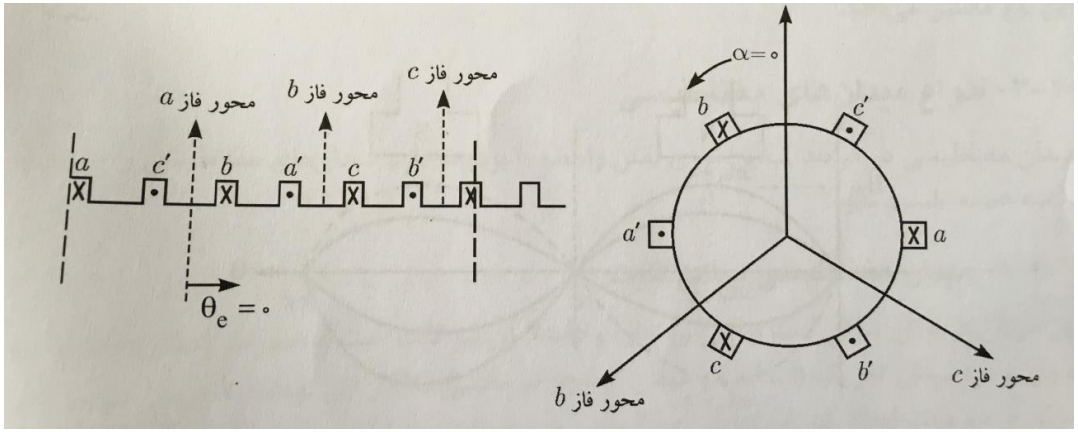
میدان دوار در یک ماشین دو قطب سه فاز

ب) توسط سیم پیچ سه فاز متعادل متقارن

چنانچه بخواهیم جهت چرخش میدان گردان را عوض کنیم کافیست جای تغذیه دوتا از فاز ها باه عوض کنیم.

پ) توسط سیم‌پیچ دو فاز متعادل متقارن

هرگاه یک سیم‌پیچ دوفاز متعادل (اختلاف فاز مکانی بین محور فازها، ۹۰° و سیم‌پیچ‌ها مشابه) توسط سیستم جریان دو فاز متقارن تغذیه گردد یک میدان گردان ایجاد می‌گردد که با دامنه ثابت و سرعت $n = 2f / P$ دور بر ثانیه نسبت به سیم‌پیچ دوران می‌کند.



سیم‌پیچ دو فاز متعادل دو قطبی

ب) توسط سیم پیچ سه فاز متعادل متقارن

میدانی که توسط هر یک از فازها ایجاد می‌گردد که از نوع ضرباتی است و معادلات آن با انتخاب محور فاز a به عنوان مبدأ به صورت زیر خواهند بود:

$$b_a = (\theta_e,t) = B_m \cos\omega t \,.\cos\theta_e$$

$$b_b = (\theta_e,t) = B_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \,.\cos(\theta_e - \frac{\pi}{2})$$

به کمک اصل جمع آثار و با استفاده از اتحادهای مثلثاتی مورد نیاز، برای هر θ_m دلخواه، چگالی شار منتجه برابر است با:

$$B(t,\theta_e) = B_a(t,\theta_e) + B_b(t,\theta_e) = B_m \cos(\theta_e - \omega t)$$

(۱) فرمول میدان گردان

$$F(\theta_e,t) = F_m \cos(\theta_e - \omega t)$$

(۲) فرمول میدان ضربانی

$$F(\theta_e,t) = F_m \cos\omega t \cos\theta_e$$

۱-۴- نمایش کمیت‌های الکترومغناطیسی با بردار فضایی

۱-۴-۱- مفهوم فازور زمانی

در واقع فازور زمانی نمایش برداری موج سینوسی است که شامل دو پارامتر مقدار ماکزیمم و زاویه فاز تابع سینوسی می‌باشد. این بردار با سرعت ω در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد.

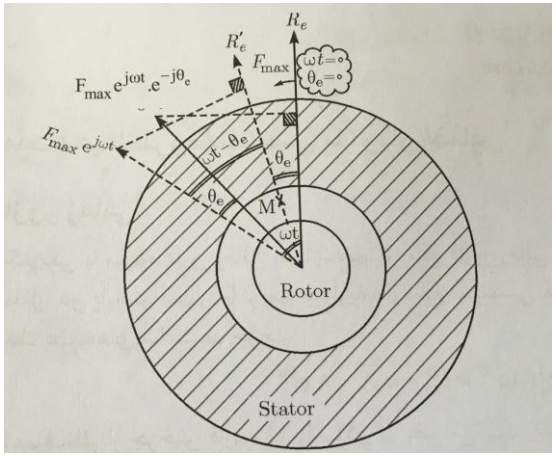
$$A.\cos(\omega t + \varphi) = Re\{(Ae^{j\varphi})e^{i\omega t}\} \Rightarrow \bar{A} = A.e^{j\varphi}$$

۱-۴-۲- مفهوم بردار فضایی (مکانی)

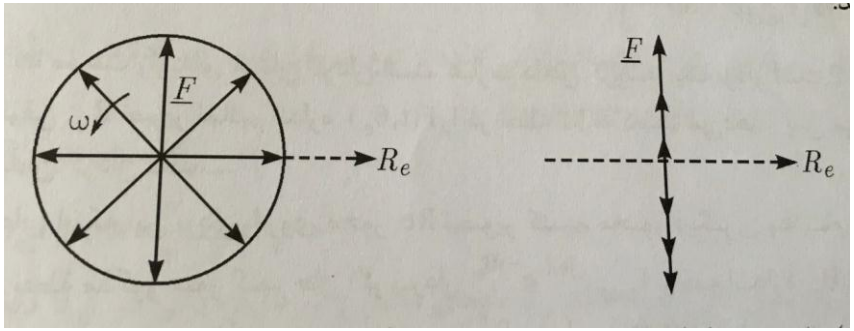
جهت نمایش کمیت‌های مغناطیسی که دارای توزیع سینوسی در مکان هستند می‌توان از مفهوم بردار فضایی استفاده نمود. برای درک مفهوم بردار فضایی، میدان مغناطیس گردان را در یک ماشین القایی سه‌فاز در نظر بگیرید. شکل (۱-۱۱)، نمایش یک ماشین الکتریکی القایی سه فاز است که در آن M یک نقطه دلخواه در فاصله هوایی می‌باشد. بر روی این نقطه، میدان گردان برابر است با:

$$F(t,\theta_e) = Re\{F_{max}e^{i\omega t}.e^{-j\theta_e}\}$$

۱-۴-۲- مفهوم بردار فضایی (مکانی)



چنان‌چه مشاهده می‌شود با این کار یکی از مختصات‌ها یعنی θ_e را حذف کرده‌ایم. در واقع در بردار فضایی از قید مکان و در بردار زمانی (فازور) از قید زمان آزاد می‌شویم. اکنون بردار فضایی میدان دارای این خصوصیت است که تصویر آن روی هر محوری، اندازه میدان را در نقطه‌ای که این محور از آن عبور می‌کند به دست می‌دهد.



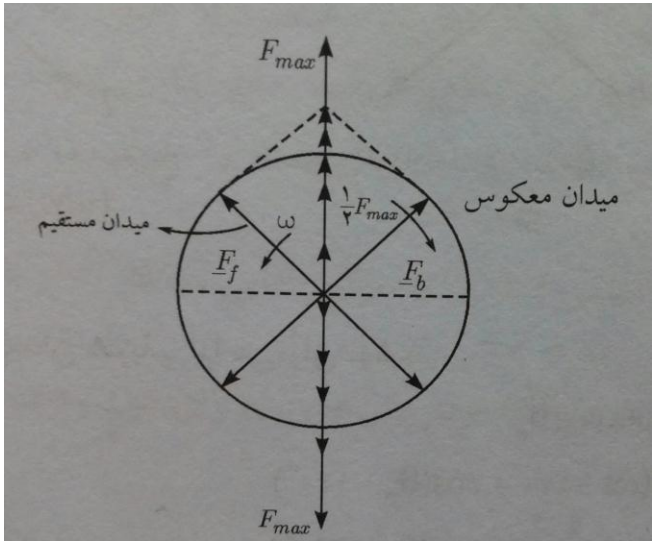
نمایش بردار فضایی برای میدان ضربانی و دوار ثابت

می‌دانیم در ماشین‌ها دو میدان گردان وجود دارد. یکی در جهت محورهای مختصات (جهت مثبت مثلثاتی) دوران می‌کند که به آن میدان مستقیم (forward) گویند و دیگری میدان معکوس (backward) که در خلاف جهت میدان مستقیم دوران می‌کند. برای هر کدام از این دو میدان می‌توان بردار فضایی میدان را جداگانه تعریف نمود:

بردار فضایی میدان گردان مستقیم: $\underline{F_f}=F_{max}e^{+i\omega t}$

بردار فضایی میدان گردان معکوس: $\underline{F_b}=F_{max}e^{-i\omega t}$

می‌دانیم که در ماشین‌های سه فازی که با یک سیستم ولتاژ تقارن تغذیه می‌شوند میدان گردان معکوس تولید نمی‌گردد.



تجزیه میدان ضربانی به دو میدان دوار

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌کنید میدان ضربانی به دو میدان مستقیم و معکوس تجزیه می‌شوند که دامنه‌های برابری دارند ($|F_f|=|F_b|$) ولی در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند. به عنوان مثال یک ماشین تک فاز بدون سیم‌پیچ کمکی را در حالت راه‌اندازی در نظر بگیرید. از آن‌جا که نوع میدان در این حالت ضربانی است دو گشتاور مساوی در جهت خلاف یکدیگر ناشی از مؤلفه‌های مستقیم و معکوس ایجاد می‌گردند به گونه‌ای که برآیند دو گشتاور صفر خواهد بود. به همین دلیل ماشین تک فاز گشتاور راه‌اندازی ندارد.

اما اگر به نوعی بتوان دو میدان مستقیم و معکوس با شرط ($|F_f|\neq|F_b|$) ایجاد نمود (مانند ماشین تک فاز راه‌اندازی شده) گشتاور برآیند در جهت میدان قوی‌تر شکل می‌گیرد. هر چه اختلاف اندازه دو میدان بیشتر باشد، میدان برآیند به دایره نزدیک‌تر می‌شود به گونه‌ای که چنان‌چه صرفاً یکی از این دو میدان چپ‌گرد یا راست‌گرد وجود داشته باشد میدان حاصله، میدانی دوار با دامنه ثابت خواهد بود.

۱-۴-۳- بررسی ماشین دو فاز به کمک بردارهای فضایی

در حالت کلی مطابق شکل زیر ، دو سیم‌پیچ با زاویه مکانیکی ε در نظر می‌گیریم.

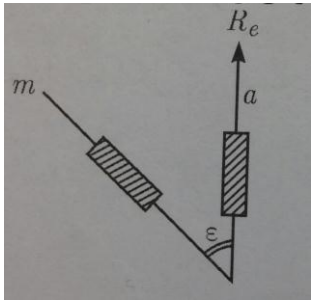
$$i_a = I_{max}\cos\omega t$$
$$i_m = I_{max}\cos(\omega t+\varphi)$$

که ϕ، اختلاف فاز زمانی بین جریان دو سیم‌پیچ می‌باشد. در این صورت، میدان مغناطیسی هر یک از سیم‌پیچ‌ها برابر است با:

$$F_a = F_{max,1}cos\omega t\cos\theta_e = \frac{F_{max,1}}{2}[\cos(\theta_E+\omega T)+\cos(\theta_E-\omega T)]$$

$$F_b = F_{max,2}\cos(\omega t+\varphi)\cos(\theta_e-\varepsilon)$$
$$=\frac{F_{max,2}}{2}[\cos(\omega t+\varphi-\varepsilon+\theta_e)+\cos(\omega t+\varphi-\varepsilon-\theta_e)]$$

که در آن دامنه‌های میدان‌های ضربانی دو سیم‌پیچ، $F_{max,1}$ و $F_{max,2}$به دلیل تعداد دور مؤثر دو سیم‌پیچ a و m، دارای مقادیر متفاوت هستند. نمایش بردار فضایی این دو میدان عبارتند از:



$$\underline{F_a} = \frac{F_{max,1}}{2}e^{i\omega t}+\frac{F_{max,1}}{2}e^{-i\omega t}$$
$$\underline{F_m} = \frac{F_{max,2}}{2}e^{i\omega t}e^{i\varphi}e^{i\varepsilon}+\frac{F_{max,2}}{2}e^{-i\omega t}e^{-i\varphi}e^{-i\varepsilon}$$

$$\underline{F_f} = \left(\frac{F_{max,1}}{2} + \frac{F_{max,2}}{2} e^{i(\varepsilon+\varphi)}\right) e^{i\omega t}$$
$$\underline{F_b} = \left(\frac{F_{max,1}}{2} + \frac{F_{max,2}}{2} e^{i(\varepsilon-\varphi)}\right) e^{-i\omega t}$$