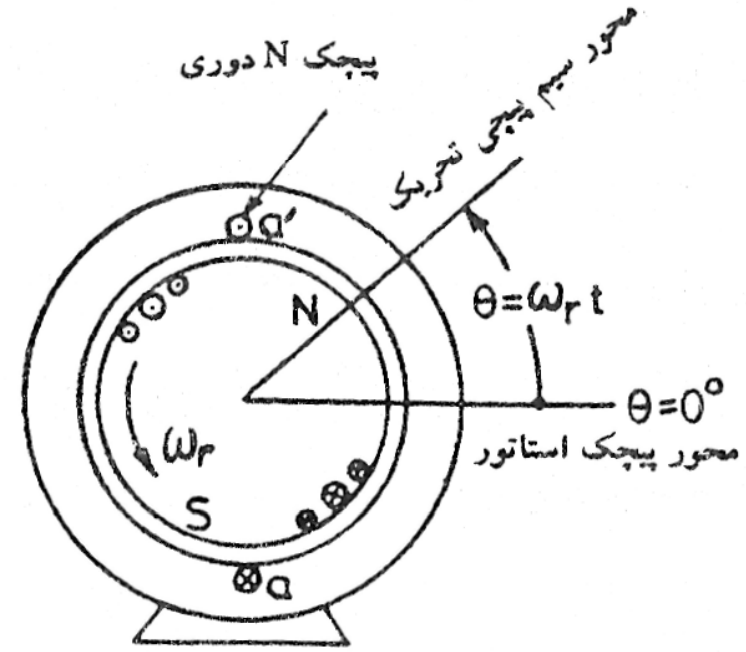
مبحث دوم:

ولتاژ و شار در ماشین سنکرون

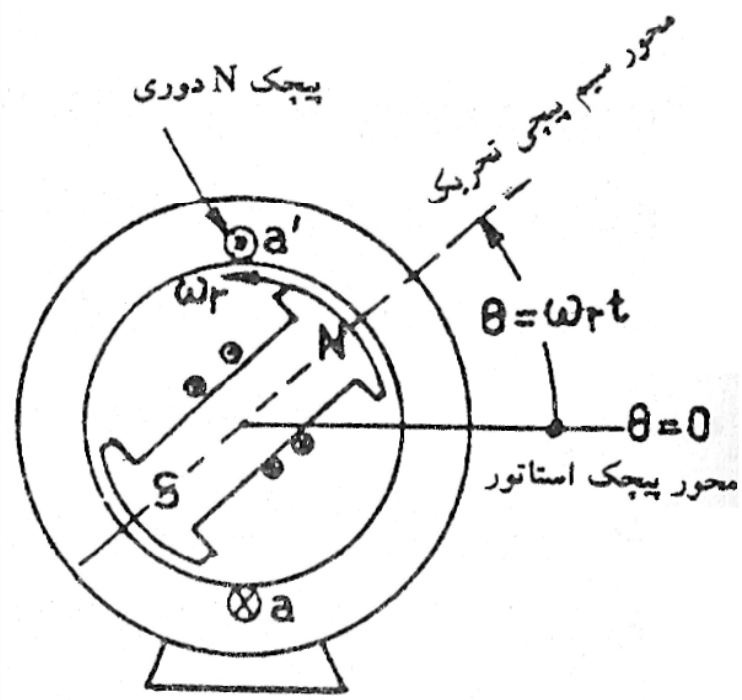
- نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور
- انواع سیم‌پیچی استاتور
- بردارهای شار و mmf و اثر عکس‌العمل آرمیچر

❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

➢ ولتاژ القاء شده در پیچک با گام کامل:



(a) تولید emf در یک پیچک N دوری با گام کامل در ماشین با روتور استوانه‌ای



(b) تولید emf در یک پیچک N دوری با گام کامل در ماشین با روتور قطب برجسته

❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

...ولتاژ القاء شده در پیچک با گام کامل:

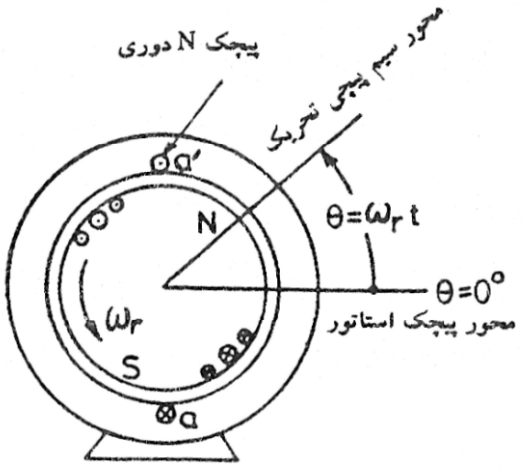
مطابق شکل، در زوایای $\theta= 0, \pi, 2\pi$ حداکثر شار تولید شده توسط میدان تحریک از سیم‌پیچی آرمیچر عبور می‌کند. همچنین در زوایای $\theta= \pi/2, 3\pi/2$ شار عبوری از سیم‌پیچی‌های آرمیچر صفر است. لذا تغییرات شار به‌صورت تابع کسینوس می‌باشد.

$$\psi = N\times (\text{شار عبوری از پیچک در زمان } t) = N\varphi\cos\omega_r t \qquad (۱)$$

از قانون فاراده نتیجه می‌شود:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = \underbrace{N\varphi\omega_r \sin\omega_r t}_{\text{ولتاژ ناشی از حرکت}} - \underbrace{N\frac{d\varphi}{dt}\cos\omega_r t}_{\text{ولتاژ ترانسفورمری}} \qquad (۲)$$

اگر دامنه شار φثابت باشد و به عبارتی نسبت به زمان تغییر نکند بخش ترانسفورمری صفر خواهد بود.



لذا برای ماشین‌های با دامنه شار ثابت، نیروی محرکه القایی از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$e = N\varphi\omega_r \sin\omega_r t \qquad (۳)$$

مقدار حداکثر نیروی محرکه القایی

$$E_{max} = \omega_r N\varphi \qquad (٤)$$

مقدار موثر نیروی محرکه القایی

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}2\pi f_r N\varphi = 4.44 f_r N\varphi \qquad (٥)$$

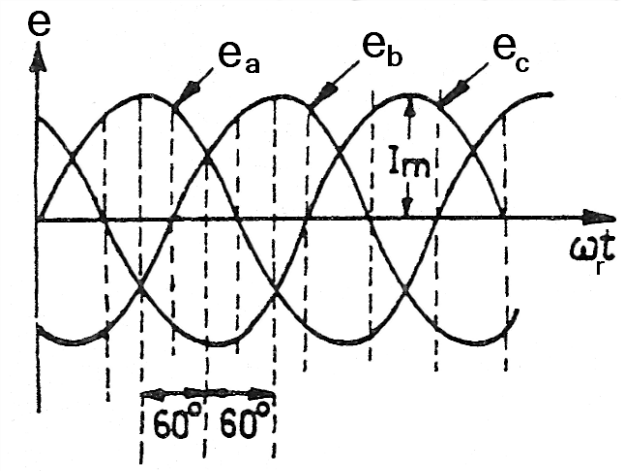
f_r = فرکانس چرخش روتور

$\theta = \omega_r t$ = موقعیت روتور

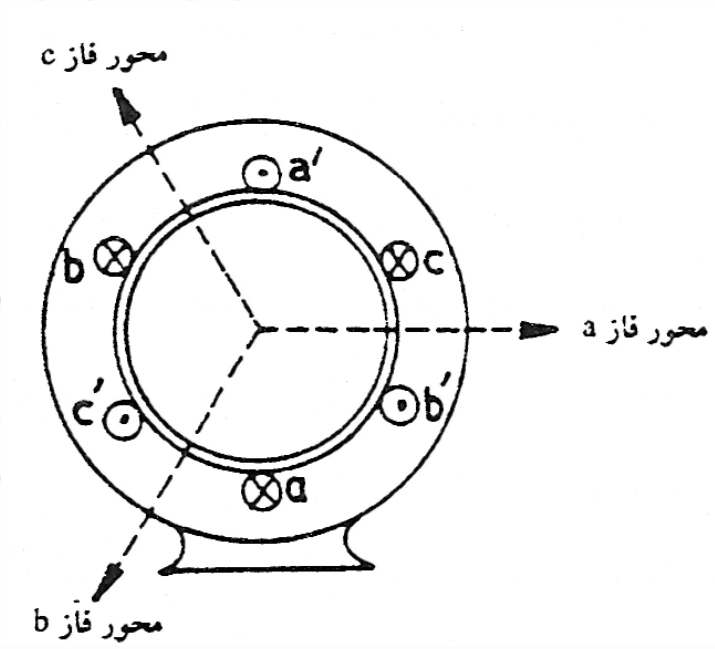
$$\boxed{e = \sqrt{2}E_{rms}\sin\omega_r t} \qquad (٦)$$

لذا در یک ماشین سه فاز ولتاژهای القایی در هر سیم پیچ برابر خواهند بود با:

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}\, E_{rms} \sin \omega_r t \\ e_b = \sqrt{2}\, E_{rms} \sin (\omega_r t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = \sqrt{2}\, E_{rms} \sin (\omega_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (۷)$$



تغییرات ولتاژهای القایی در ماشین سه فاز



ماشین سه‌فاز

❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

➢ محاسبه شار هر قطب در یک ماشین دو قطبی:

با فرض توزیع سینوسی چگالی شار مغناطیسی می‌خواهیم شار هر قطب (φ) را محاسبه نمائیم:

$$B = \hat{B}\sin\alpha \qquad (۸)$$

$$d\varphi = BdA = Blr\,d\alpha = \hat{B}lr\sin\alpha\,d\alpha \qquad (۹)$$

جزء فضایی شار

l= طول محور روتور (طول اضلاع محوری هادی‌ها)

r= شعاع روتور

α = زاویه فضایی مکانیکی

p= تعداد قطب‌ها

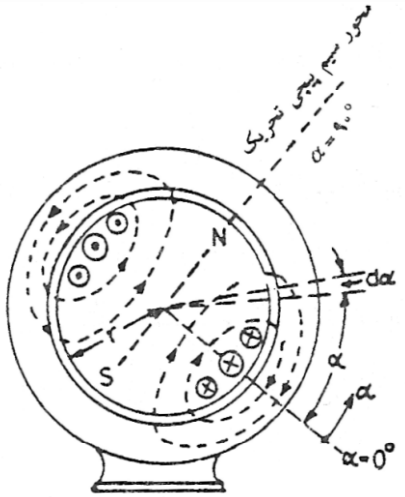
$$\varphi = \hat{B}lr\int_0^{\pi}\sin\alpha\,d\alpha = 2\hat{B}lr \qquad (۱۰)$$

کل شار هر قطب

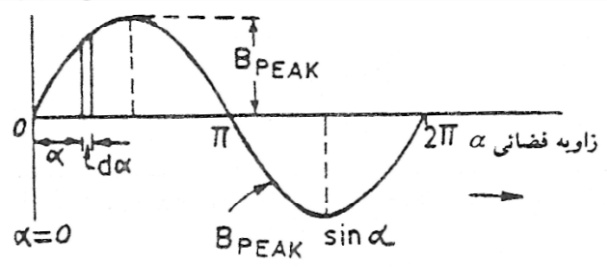
$$\varphi = \frac{2\hat{B}lr}{p/2}$$

شار هر قطب در یک ماشین p قطبی:

$$\Rightarrow \boxed{\varphi = \frac{4}{p}\hat{B}lr} \qquad (۱۱)$$



محاسبه شار قطب

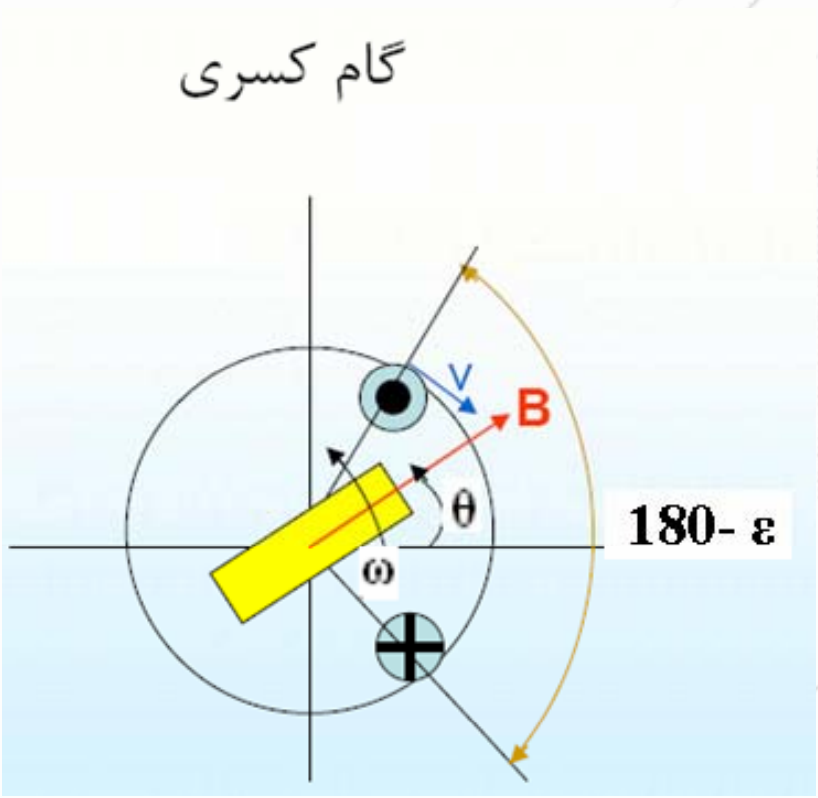


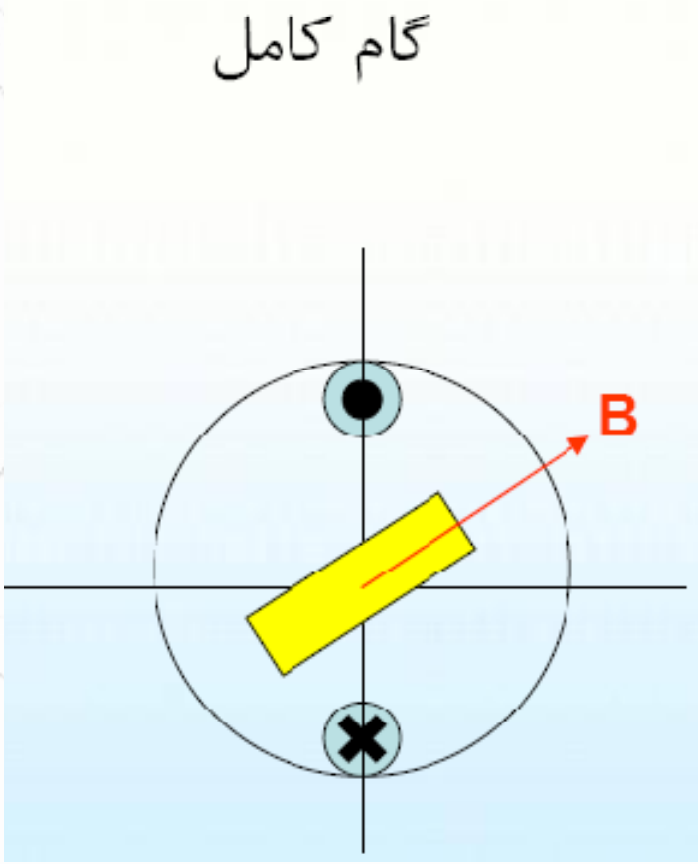
توزیع سینوسی چگالی شار

❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

➢ ولتاژ القاء شده در پیچک با گام کوتاه (کسری):

یکی از راههای کاهش هارمونیک ولتاژ القایی در سیم پیچی‌های استاتور استفاده از سیم‌پیچی با گام کسری است.





❖ محاسبه ضریب گام (k_p):

✓ مطابق شکل، فرض می‌شود که گام پیچک به اندازه ε درجه الکتریکی کوتاه شده، بطوریکه گام آن (ε-۱۸۰) درجه الکتریکی باشد.

✓ به طریق قبل، شار عبوری از میان پیچک گام کوتاه را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\varphi_{\pi-\varepsilon} = \int_{\varepsilon/2}^{\pi-\varepsilon/2} d\varphi = \int_{\varepsilon/2}^{\pi-\varepsilon/2} \hat{B}\sin\alpha(lr\,d\alpha) = 2\hat{B}lr\cos\frac{\varepsilon}{2} \qquad (۱۲)$$

$$= \varphi\cos\frac{\varepsilon}{2} \qquad (۱۳)$$

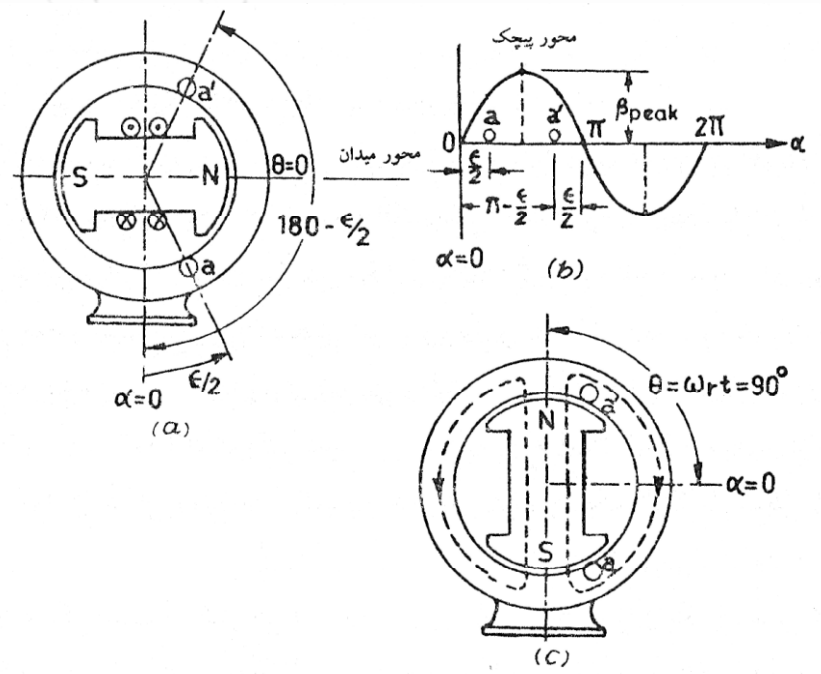
که φ در ماشین p قطبی برابرست با:

$$\varphi = \frac{4}{p}\hat{B}lr$$

✓ به‌فرض آنکه مبداء زمان لحظه‌ایی است که محور سیم‌پیچ میدان و آرمیچر بر هم منطبق باشند، عبارت کلی برای شار عبوری سیم‌پیچ گام کوتاه عبارتست از:

$$\varphi_{\pi-\varepsilon} = \varphi\cos\frac{\varepsilon}{2}\cos\theta \Rightarrow \qquad (۱۴)$$

$$\varphi_{\pi-\varepsilon} = \varphi\cos\omega_r t\times\cos\frac{\varepsilon}{2} \qquad (۱۵)$$



شکل ۳-۱۵ e.m.f تولیدی در پیچک با گام کوتاه (وتری)

... محاسبه ضریب گام (k_p):

$$\varphi_{\pi-\varepsilon} = \varphi \cos \omega_r t \times \cos \frac{\varepsilon}{2} \qquad (16)$$

لذا شار پیوندی پیچک N دوری با گام کوتاه برابرست با:

$$\psi = N\varphi \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \omega_r t \qquad (17)$$

از قانون فاراده نتیجه می‌شود:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = N\varphi \omega_r \cos \frac{\varepsilon}{2} \sin \omega_r t \qquad (18)$$

حداکثر ولتاژ القایی زمانی است که $\sin\omega_r t=1$ لذا:

$$E_{max} = N\varphi \omega_r \cos \frac{\varepsilon}{2} \qquad (19)$$

و مقدار موثر (rms) آن برابرست با:

$$E_{rms} = E = \sqrt{2}\pi f_r N\varphi \cos \frac{\varepsilon}{2} \qquad (20)$$

عبارت فوق نشان می‌دهد که اثر کوتاهی گام پیچک، کاهش نیروی محرکه القایی تولیدی است. به مقدار $\cos \varepsilon/2$ ضریب گام پیچک، ضریب گستره پیچک یا ضریب گام و به اختصار k_p گفته می‌شود. لذا:

$$k_p = \cos \frac{\varepsilon}{2} \qquad (21)$$

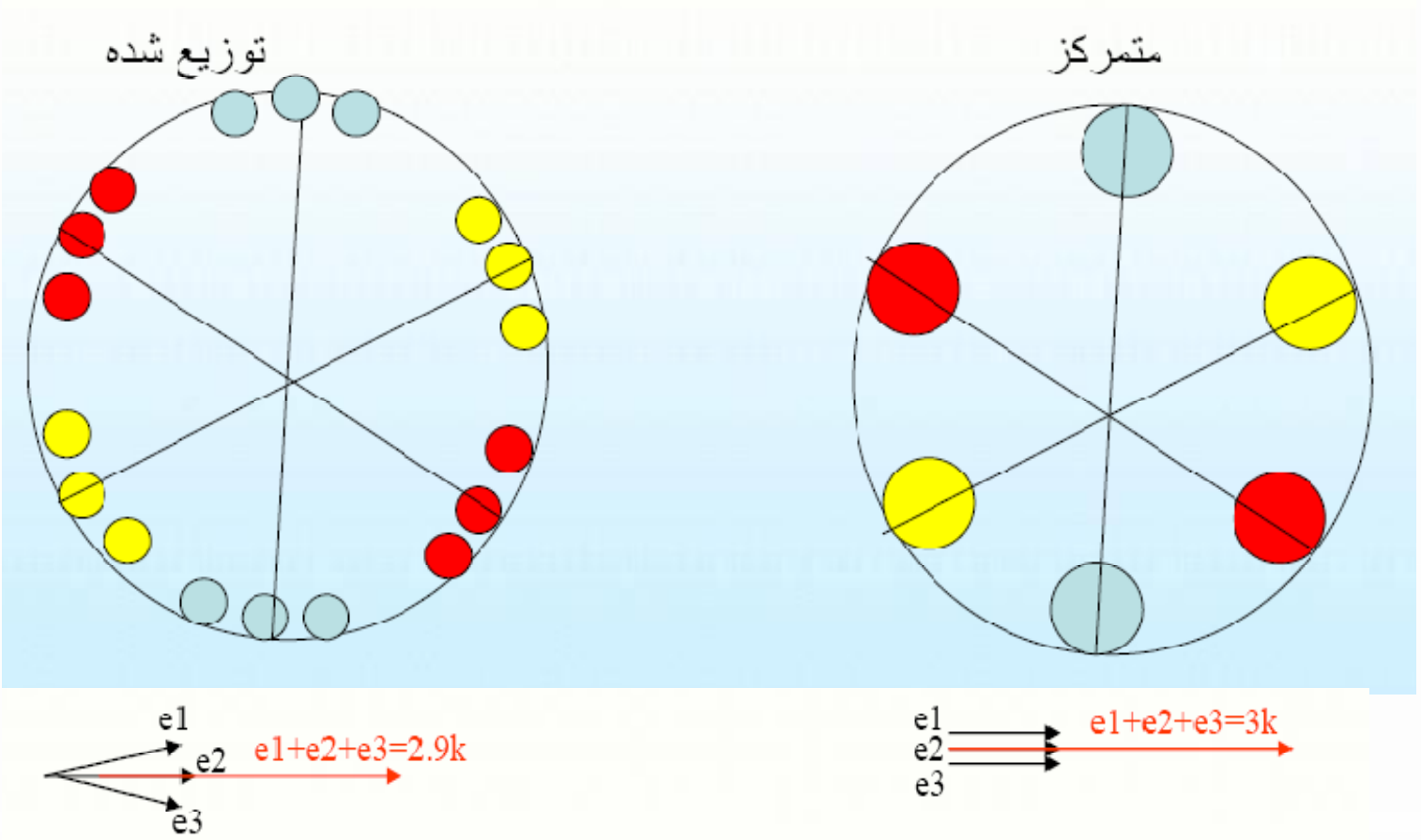
در نتیجه مقدار موثر (rms) تغییرات سینوسی ولتاژ القا شده برابرست با:

$$\boxed{E_{rms} = \sqrt{2}\pi k_p f_r N\varphi} \qquad (22)$$

ضریب گام برای هارمونیک‌های مراتب بالاتر (مرتبه n) برابرست با:

$$k_{pn} = \cos \frac{n\varepsilon}{2} \qquad (23)$$

یکی دیگر از راههای کاهش هارمونیک ولتاژ القایی در سیم پیچی‌های استاتور استفاده از سیم‌پیچی توزیع شده است.



❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

...سیم پیچی‌های توزیع شده (گسترده):

✓ **مزایای توزیع سیم‌پیچ در شیارهای استاتور عبارتند از:**

۱- کاهش هارمونیک‌های موج نیروی محرکه القایی و ایجاد یک موج شبه سینوسی

۲- استفاده کامل از آهن، مس و آرمیچر

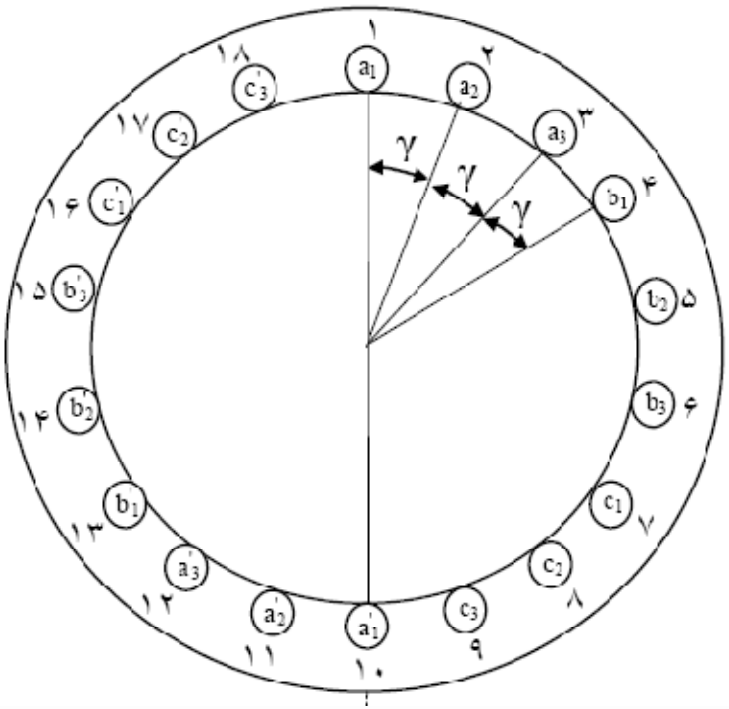
۳- افزایش استحکام مکانیکی سیم‌پیچ

دو تعریف:

(۲٤) گام شیار زاویه‌ای = $\gamma = \frac{۱۸۰p}{\text{مجموع تعداد شیارها}} = \frac{۱۸۰}{\text{شیارهای هر قطب}}$

تعداد شیارها در هر قطب هر فاز = q

تعداد قطب‌های ماشین = p



استاتور یک موتور سه فاز دوقطبی ۱۸ شیاره

❑ نیروی محرکه القایی تولید شده در استاتور

...سیم پیچی‌های توزیع شده (گسترده):

✓ توزیع سیم‌پیچی سبب می‌شود که ولتاژهای ضدمحرکه سه هادی هر قطب-فاز که در واقع باید به‌صورت حسابی با هم جمع شوند، با یکدیگر زاویه پیدا کرده و در نتیجه باید با یکدیگر به صورت برداری جمع شوند.

❖ محاسبه ضریب سیم‌پیچی (k_d):

$$k_d = \frac{\text{جمع برداری نیروهای محرکه القائی هادیهای هر سیم‌پیچ}}{\text{جمع حسابی نیروهای محرکه القائی هادیهای هر سیم‌پیچ}} \qquad (۲۵)$$

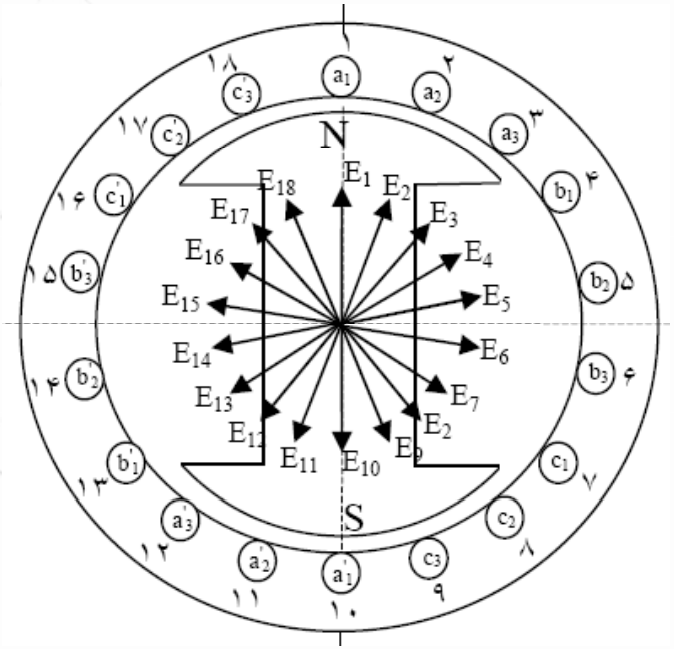
$$= \frac{|\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3|}{|\vec{E}_1| + |\vec{E}_2| + |\vec{E}_3|} \qquad (۲۶)$$

با بکاربردن رابطه فوق، ضریب توزیع سیم‌پیچی برابر است با:

$$k_d = \frac{\sin\frac{q\gamma}{2}}{q\sin\frac{\gamma}{2}} \qquad (۲۷)$$

ضریب توزیع برای هارمونیک مرتبه n ام از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$k_{dn} = \frac{\sin\frac{qn\gamma}{2}}{q\sin\frac{n\gamma}{2}} \qquad (۲۸)$$



(الف) بردارهای emf القاء شده در هادی‌های مختلف

۱- ولتاژ القاء شده در آرمیچر (E_f):

به دلیل وجود سرعت نسبی بین میدان دوار با دامنه ثابت و سیم‌پیچ ساکن استاتور نیروی محرکه القائی در سیم‌پیچ استاتور ایجاد می‌گردد.

$$E_f = \sqrt{2}\pi k_w f N_{ph} \varphi \qquad (۲۹)$$

N_{ph} = مجموع تعداد دورهای سری هر فاز سیم‌پیچ چندفازه آرمیچر

f= فرکانس سنکرون

φ= شار کل هر قطب

$k_w=k_pk_d$ ضریب سیم پیچی

۲- ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچی تحریک ناشی از تحریک:

چون سرعت نسبی بین سیم پیچ تحریک و میدان دوار ناشی از استاتور صفر است، و همچنین سیم‌پیچ تحریک از dc تغذیه می‌شود، در نتیجه سیم‌پیچ‌های روتور هیچگونه تغییر شاری را نخواهند دید و لذا نیروی محرکه القاء شده در آنها برابر با صفر است.

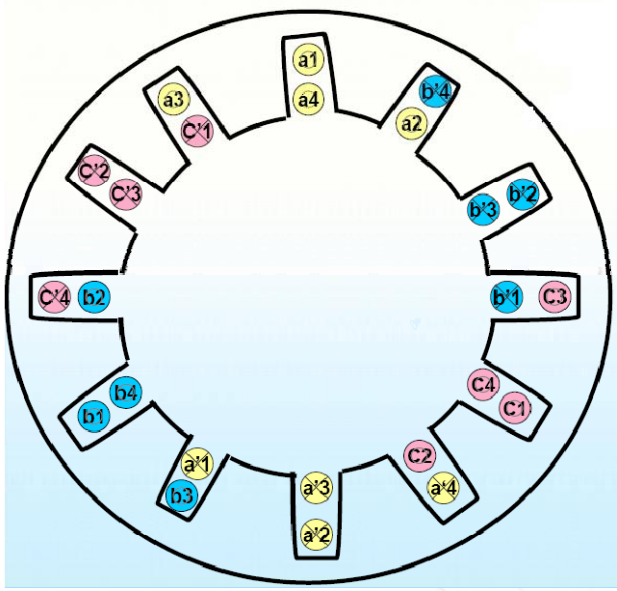
❑ انواع سیم‌پیچی استاتور

❖ انواع سیم‌پیچی استاتور ماشین‌های AC:

۱- سیم‌پیچهای یک طبقه

۲- سیم پیچ‌های دو طبقه

تفاوت این دو نوع سیم پیچی در ترتیب اتصالات پیشانی آنهاست.



سیم‌پیچی دوطبقه

❖ مزایای سیم پیچی دوطبقه نسبت به یک طبقه:

(الف) ساخت آنها ساده‌تر و هزینه پیچک‌ها کمتر است.

(ب) استفاده از سیم پیچی گام کوتاه ممکن است.

(ج) ماشین راکتانس نشتی کمتری خواهد داشت.

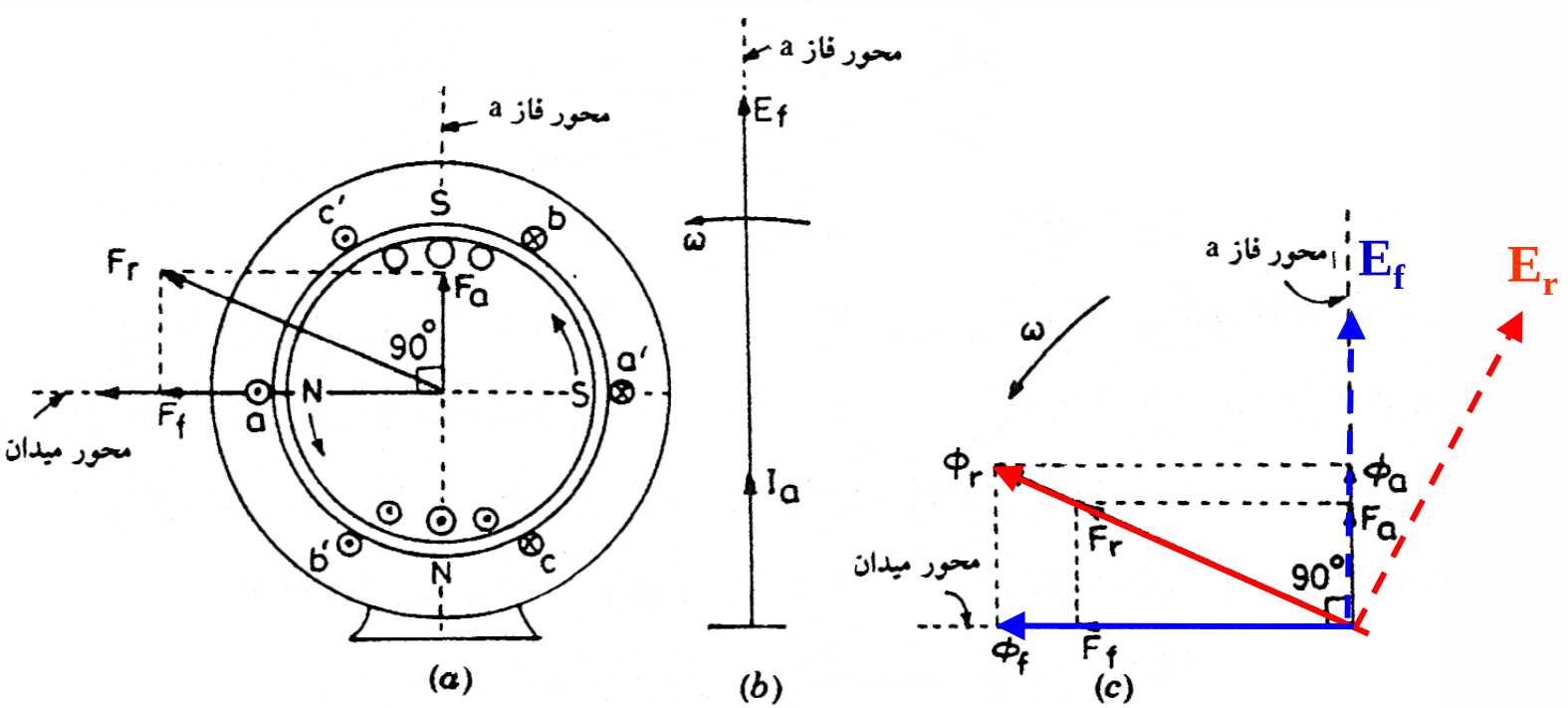
(د) در ژنراتورها شکل موج emf بهتری خواهیم داشت.

در اغلب ماشین‌های سنکرون (و برای تمام ماشینهای با توان بیش از ۵ kW) از سیم پیچی دو طبقه استفاده می‌شود.

❑ بردارهای شار و mmf و اثر عکس‌العمل آرمیچر

➢ حالت بار مقاومتی (pf=1):

❖ عبور جریان از سیم پیچی آرمیچر سبب ایجاد شار مغناطیسی و اثر آن بر شار ایجاد شده توسط سیم پیچی تحریک می شود.



(a) موقعیت فضایی بردارهای mmf آرمیچر (F_a) و میدان (F_f) و برآیند آنها (F_r)

(b) نمودار برداری زمانی جریان فاز a (I_a) و ولتاژ القایی ناشی از تحریک (E_f)

(c) نمودار بردار فضایی بردارهای شار و mmf

▪ عکس‌العمل آرمیچر سبب دگرگون شدن ولتاژ emf در آرمیچر شده و بعبارتی اختلاف فاز بوجود می‌آورد.