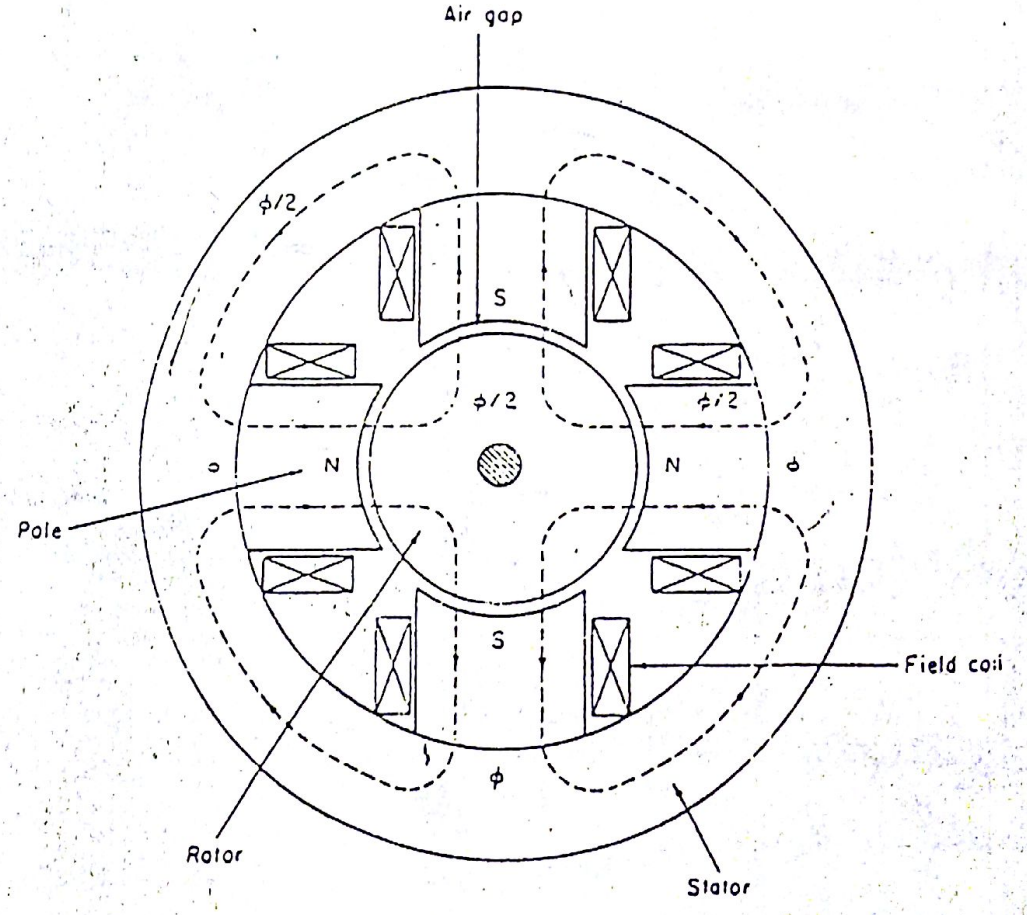
دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی

مبانی مهندسی برق ۲

(ماشینهای الکتریکی)



تالیف : مهندس محسن مجیدی

فصل دوم

ماشینهای جریان مستقیم

۲-۱ = مقدمه = ماشینهای الکتریکی جریان مستقیم جزو اولین سری ماشینهای الکتریکی بوده که طراحی و تولید گردید. این ماشینها بعلت داشتن خصوصیات و مشخصه های کاری خوب و کاربرد در سرعت بالا و همچنین مشخصه های کنترل سرعت بسیار خوب و ساده، کاربرد فراوانی پیدا کرد. لیکن این ماشینها بعلت قیمت نسبتاً زیاد و تعمیر و نگهداری بالا و نیاز به مراقبت پیاپی در هنگام بهره برداری مشکلات زیادی را ایجاد کرده است.

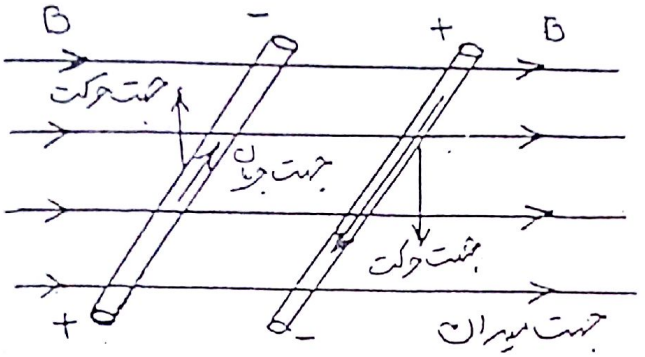
۲-۲ = چگونگی تولید ولتاژ = نحوه تولید و القاء ولتاژ که اساس کار ژنراتورهای الکتریکی است، بر پایه قانون القاء فاراده می باشد. طبق این قانون اگر یک هادی در داخل میدان حرکت کند در داخل آن ولتاژ تولید می گردد. مقدار ولتاژ القایی در این هادی از رابطه زیر بدست می آید:

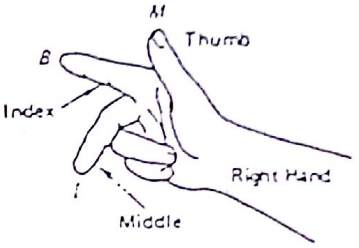
$$e = B l v \sin \alpha \qquad (۲-۱)$$

در رابطه فوق B چگالی شار میدان (تسلا)، l طول مؤثر هادی در داخل میدان (متر) و v سرعت حرکت هادی در داخل میدان (متر بر ثانیه) و α زاویه حرکت هادی با جهت میدان است. طبق رابطه فوق اگر هادی بطور موازی با خطوط قوا حرکت کند (یعنی میدان را قطع نکند)، زاویه $\alpha = 0$ بوده و در نتیجه در آن ولتاژ تولید نمی شود، و اگر حرکت هادی عمود بر میدان باشد،

بیشترین ولتاژ را به ازای B، l و v معین درهادی تولید می نماید.

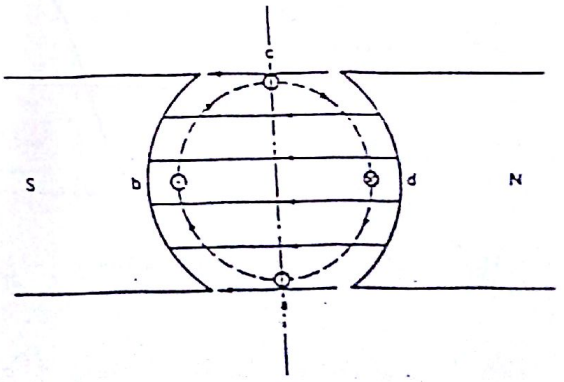
- جهت ولتاژ یا جریان القایی درهادی از قانون سه انگشت دست راست فلمینگ بدست می آید. یعنی اگر جهت میدان در جهت انگشت نشان و جهت حرکت در جهت شست باشد، جهت ولتاژ یا جریان القایی در جهت انگشت وسط خواهد بود (شکل ۱-۲). جهت ولتاژ و جریان در یک هادی را برای دو حالت طبق همین قانون در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

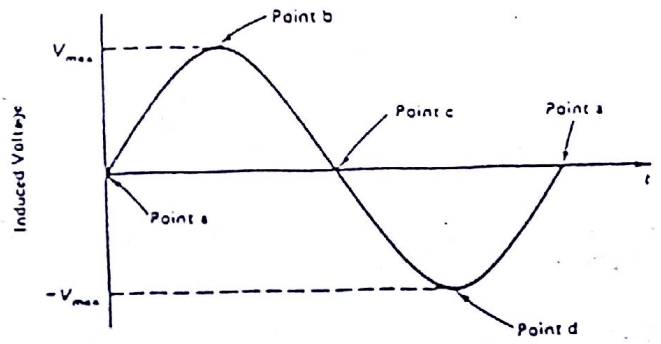




شکل ۱-۲ = نمایش قانون دست راست فلمینگ. شکل ۲-۲ = جهت ولتاژ و جریان در هادیها.

۱-۲-۲ = ولتاژ القایی در حرکتهای دورانی = معمولاً در ماشینهای الکتریکی میدان حرکت یک هادی دایره‌ای است، لذا به بررسی ولتاژ القایی در حرکتهای دورانی می پردازیم. در شکل ۲-۳-a حرکت یک هادی را در یک میدان دایره‌ای در جهت عقربه های ساعت در یک ماشین دوقطبی با سرعت ثابت نشان می دهد. در شکل ۲-۳-b ولتاژ القایی در آن هادی را نشان می دهد. در این لحظه



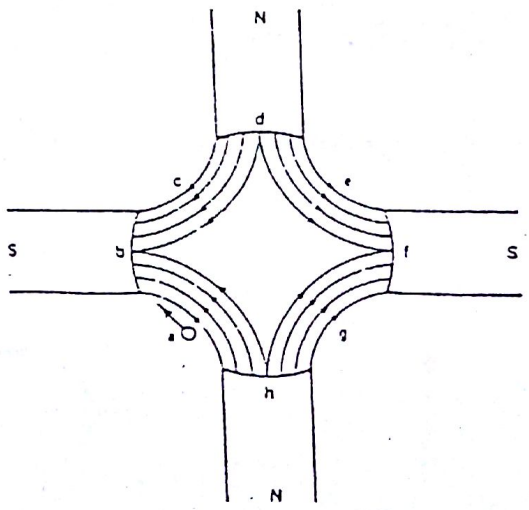


(a) (b)

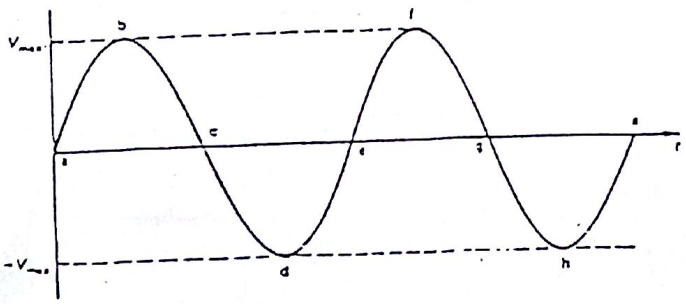
شکل ۲-۲ = a) حرکت هادی در میدان دایره‌ای در میدان دوقطبی، b) ولتاژ القایی در هادی.

چون سرعت حرکت ثابت و مقدار فوران ثابت و طول مؤثر هادی ثابت است، لذا ولتاژ القایی تابعی از زاویه حرکت هادی خواهد بود. در حالت a (شکل ۲-۳-۵) چون زاویه حرکت هادی با میدان صفر است، لذا ولتاژ در هادی القاء نمی شود. در حالت b زاویه حرکت هادی ۹۰° است لذا بیشترین مقدار ولتاژ تولید شده و در حالت c چون زاویه حرکت هادی با میدان دوباره صفر است لذا ولتاژ در آن القاء نمی گردد. در حالت d چون زاویه حرکت هادی با میدان ۲۷۰° است، لیکن جهت حرکت عکس حالت b است، لذا ولتاژ القایی ماکزیمم و با جهت عکس یعنی مینیمم خواهد بود. پس ولتاژ القایی در حرکتهای دورانی یک ولتاژ سینوسی برده و در یک سیستم دو قطبی با یک دور چرخش هادی یک سیکل سینوسی ولتاژ تولید می گردد. در شکل ۲-۴ ولتاژ القایی در یک هادی در یک ماشین چهار قطبی را نشان می دهد. در اینحالت در یک دور چرخش هادی دو سیکل کامل ولتاژ سینوسی تولید می گردد. یعنی با افزایش تعداد قطب ها فرکانس ولتاژ القایی در هادی زیادتر می گردد.

۲-۲-۲ = ولتاژ متوسط القایی = ولتاژ متوسط القایی که مقدار مورد نظر ماست در حرکت دورانی



(a)



(b)

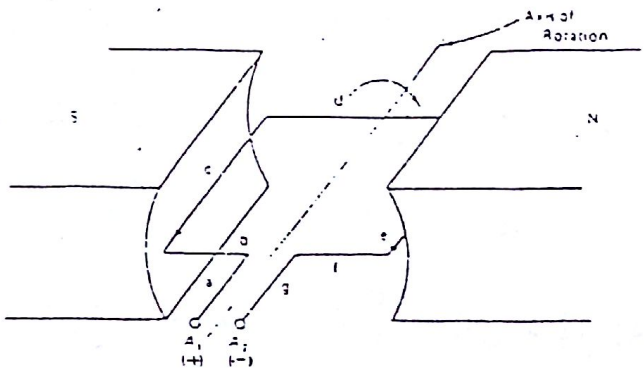
شکل ۲-۴ = a) حرکت دورانی هادی در یک میدان چهار قطبی، b) ولتاژ سینوسی القاء شده در هادی.

در یک هادی از رابطه زیر بدست می آید :

$$E = \frac{\Phi P \omega}{2\pi} \qquad (۲-۲)$$

در رابطه فوق Φ شار هر قطب و P تعداد قطب و ω سرعت زاویه ای حرکت هادی و 2π عدد ثابت است . ولتاژ القایی در یک کلاف یک دوری (شکل ۵-۲) با توجه به اینکه جهت ولتاژ القا شده در دو ضلع کلاف هم جهت بوده و در نتیجه با هم جمع می شوند، از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = \frac{2\Phi P \omega}{2\pi} = \frac{\Phi P \omega}{\pi} \qquad (۲-۳)$$



شکل ۵-۲= ولتاژ القا شده در یک کلاف یک دوری در سیستم دو قطبی .

و اگر این کلاف N دوری باشد، در نتیجه تعداد هادی های آن $z = 2N$ بوده و چون ولتاژهای القایی در تمام بازوهای کلاف هم جهت می باشد لذا ولتاژ متوسط القایی در یک کلاف N دوری از رابطه زیر بدست می آید :

$$E = \frac{z \Phi P \omega}{2\pi} = \frac{2N \Phi P \omega}{2\pi} = \frac{N \Phi P \omega}{\pi} \qquad (۲-۴)$$

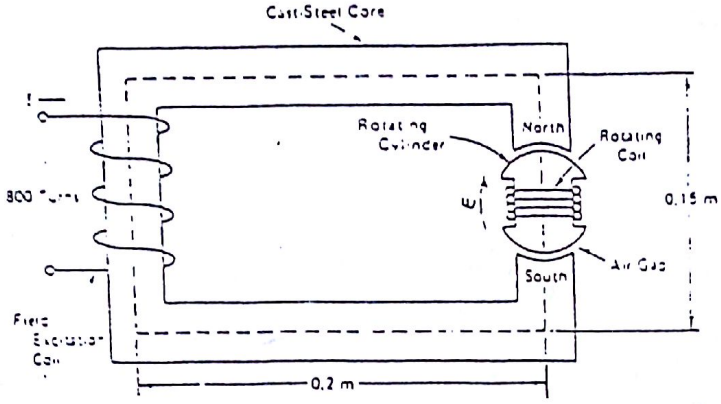
در رابطه فوق z تعداد کل هادی ها و N تعداد دور کلاف می باشد .

مثال ۱-۲= یک کلاف ۵۰۰ دور با سرعت ۲۰۰ رادیان بر ثانیه در یک سیستم ۶ قطبی می چرخد. اگر فوران هر قطب ۲ (mwb) باشد، ولتاژ متوسط القا شده در کلاف را بدست آورید .

$$E = \frac{N\Phi P\omega}{\pi} = \frac{500 \times 2\times10^{-3} \times 6 \times 200}{3.14} = 382^{(V)}$$

راه حل:

مثال ۲-۲= در شکل ۶-۲ یک کلاف ۵۰ دوری بر روی استوانه‌ای از جنس فولاد ریخته‌گری پیچیده شده و با سرعت ۱۸۸ رادیان بر ثانیه می‌چرخد. مقدار جریان سیم‌پیچ تحریک جهت بانداز ولتاژ القایی متوسط در کلاف دوار ۲۵ ولت گردد. سطح مقطع هسته ماشین و دوار $25\ (cm^2)$ و طول فواصل هوایی $1.3\ (mm)$ بوده و جنس هسته ثابت از جنس فولاد ریخته‌گری است.



شکل ۶-۲= مربوط به مثال ۲-۲

راه حل: ابتدا با قرچه به ولتاژ القایی فوران هسته را بدست آورده و سپس با قرچه به مقدار فوران هسته، MMF و جریان سیم‌پیچ اصلی (تحریک) را بدست آوریم:

$$E = \frac{N\Phi P\omega}{\pi} \Rightarrow 25 = \frac{50\times\Phi\times2\times188}{\pi} \Rightarrow \Phi = 4.18^{(mWb)}$$

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{4.18\times10^{-3}}{25\times10^{-4}} = 1.67\ (T)$$

$$B_{\text{فولاد}} = 1.67 \xrightarrow[\text{فولاد ریخته‌گری}]{\text{از منحنی ۳-۱}} H_{\text{فولاد}} \simeq 7.3\times10^{3}\ (A/m)$$

$$B_{ag} = 1.67 \Rightarrow H_{ag} = \frac{B_{ag}}{\mu_0} = \frac{1.67}{4\pi\times10^{-7}} = 1329\times10^{3}\ (A/m)$$ ناحیه هوایی

$$F = F_{\text{فولاد}} + F_{ag} = H_{\text{فولاد}}\cdot l_{\text{فولاد}} + H_{ag}\cdot l_{ag} =$$

$$F = 7.3\times10^{3}\times0.7 + 1329\times10^{3}\times2.43\times10^{-3} = 8547\ \ A.t$$

$$I = \frac{F}{N} = \frac{8547}{800} = 10.7\ (A)$$

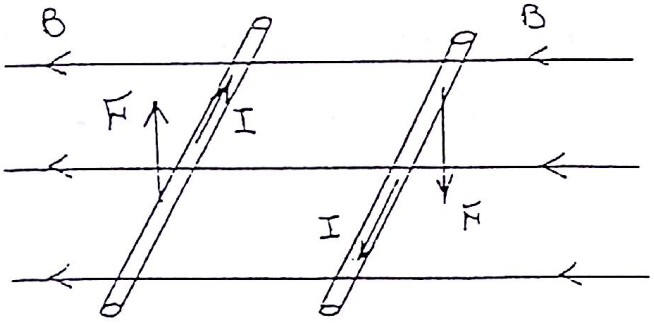
۲-۳ = چگونگی تولید نیرو و گشتاور = نحوه تولید نیرو که اساس کار موتورهای الکتریکی است بر پایه قانون بیوساوار می باشد. طبق این قانون اگر یک هادی حامل جریان در داخل یک میدان مغناطیسی قرار گیرد به آن نیرو وارد می گردد. مقدار این نیرو از رابطه زیر بدست می آید:

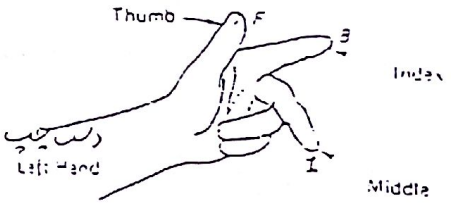
$$F = B l I \qquad (۲-۵)$$

در رابطه فوق B چگالی شار (تسلا) و l طول مؤثر هادی در میدان (متر) و I جریان هادی (آمپر) بوده و F نیروی وارد بر هادی برحسب نیوتن می باشد.

جهت نیروی وارد بر هادی، از قانون سه انگشت دست چپ فلمینگ بدست می آید. مانند قانون سه انگشت دست راست فلمینگ، اگر جهت میدان در جهت انگشت نشان دست چپ و جریان در جهت انگشت وسط دست چپ باشد، انگشت شصت جهت نیرو را نشان می دهد (شکل ۲-۷).

شکل ۲-۸ جهت نیروی اعمالی بر یک هادی را در دو حالت نشان می دهد.





شکل ۲-۷ = قانون دست چپ فلمینگ.

شکل ۲-۸ = جهت نیروی اعمالی بر دو هادی حامل جریان.

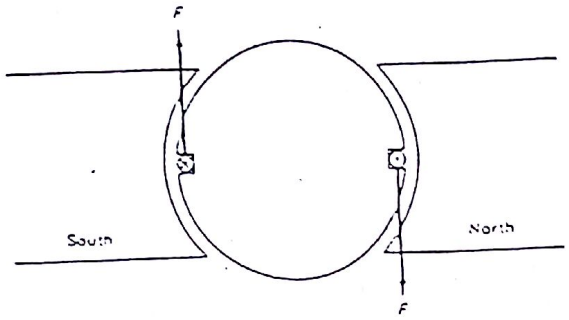
۲-۳ = گشتاور اعمالی بر یک کلاف = اگر بجای یک هادی از یک کلاف حامل جریان مطابق شکل ۲-۹ استفاده گردد. با توجه به جهت جریانها در دو ضلع کلاف، یک زوج نیرو با جهتهای عکس بر دو ضلع کلاف وارد می گردد. این زوج نیرو باعث ایجاد گشتاور شده که موجب چرخیدن کلاف می گردد. اگر تعداد دور کلاف N دور باشد، نیرو اعمالی بر هر ضلع کلاف و

گشتاور حاصله برابراست با :

$$F = NBlI \qquad (۲-۶)$$

$$T = F \cdot d = NBlId \qquad (۲-۷)$$

در رابطه فوق N تعداد دور کلاف و d عرض کلاف یا قطر روتور که کلاف بر روی آن قرار دارد بوده و یا طول کلاف (طول مؤثر) و B چگالی شار قطبها است.

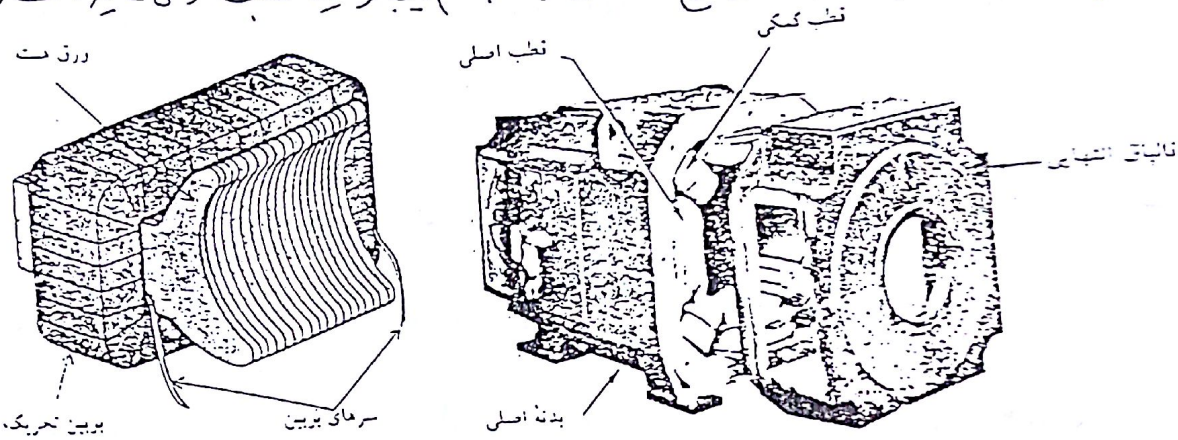


شکل ۹-۲ = نیروی اعمالی بر دو ضلع یک کلاف حامل جریان.

۲-۳-۲ = نیروی ضد محرکه = اگر هادی حامل جریان داخل میدان قرار گیرد، همانگونه که گفته شد، براساس قانون بیوسوار به آن هادی نیرو وارد شده و باعث حرکت آن هادی در آن میدان می گردد. با شروع حرکت هادی، با توجه به قانون القاء فاراده در آن با توجه به وجود حرکت و میدان، ولتاژ و جریان القاء می گردد. جهت جریان القایی عکس جهت جریان اصلی بوده و با ولتاژ و یا جریان اعمالی به هادی مخالفت می کند. این ولتاژ القاء شده را نیروی ضد محرکه (BEMF) می گویند. وجود این ولتاژ باعث کاهش جریان در داخل هادیهای ماشینهای الکتریکی شده و حجم آنها را کاهش می دهد.

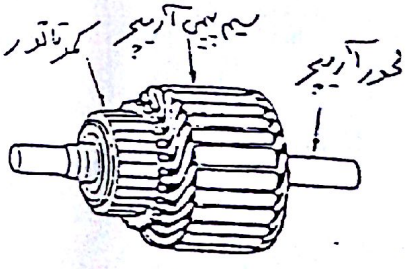
۲-۴ = ساختمان ماشینهای DC = تمام ماشینهای الکتریکی از دو قسمت ساکن یا استاتور و متحرک یا روتور تشکیل می گردد. در ماشین های جریان مستقیم (DC) قطبها در استاتور قرار

گفته که به آن سیم پیچی میدان یا سیم پیچی تحریک گویند، عبور جریان از این سیم پیچ ها باعث ایجاد نیروی محرکه می گردد. شکل ۲-۱۰-a استاتور یک ماشین DC را نشان می دهد و شکل ۲-۱۰-b یک کفشک قطبی بهراه سیم پیچ روی آن را که با هم ایجاد یک قطب را می نمایند، نشان می دهد.

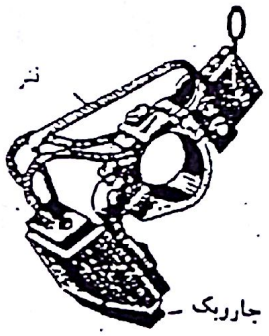


شکل ۲-۱۰ = a) استاتور یک ماشین DC ، b) کفشک قطبی بهراه سیم پیچ روی آن.

قسمت متحرک یا روتور را در ماشین DC آرمیچر می نامند و آن مطابق شکل ۲-۱۱ شکل از تعدادی آرمیچر و هسته با سیم پیچ در داخل آن و کموتاتور (کلیوساز) است. هادیها در داخل شیارهای هسته آرمیچر قرار گرفته که به آن سیم بندی آرمیچر گویند و ابتدا و انتهای این هادیها به تیغه های کموتاتور وصل می گردد. کموتاتور متشکل از تیغه های مسی بوده که نسبت به هم و نسبت به آرمیچر عایق بوده و به هر یک از این تیغه ها یک سر و یک ته مربوط به کلافهای سیم بندی آرمیچر متصل می گردد. وظیفه کموتاتور یکسوسازی ولتاژ و جریان القاء شده در ماشین است لذا ولتاژ سینوسی القاء شده



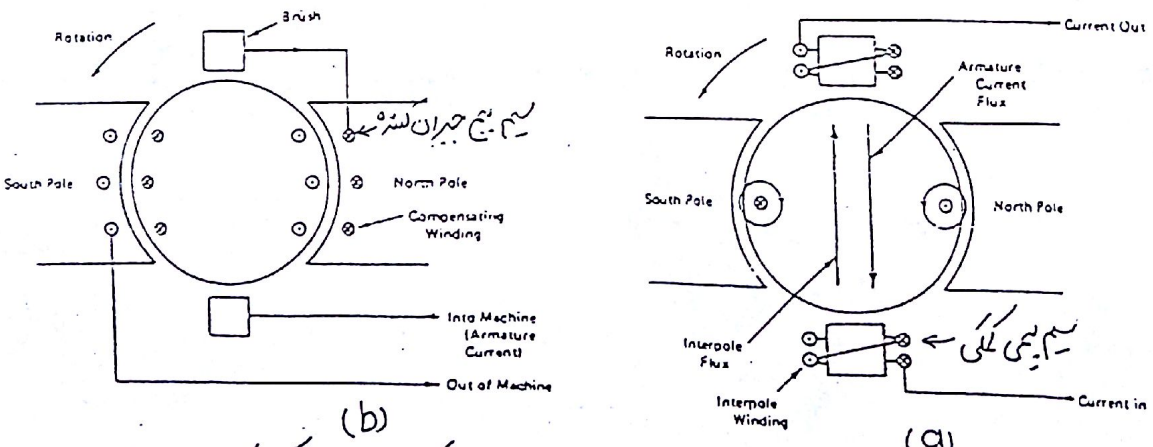
شکل ۲-۱۱ = آرمیچر یک ماشین DC.



شکل ۲-۱۲ = جاروبک و متعلقات آن.

در کلافهای آرمیچر توسط کموتاتور به جریان DC تبدیل می گردد. کموتاتور از طریق جاروبک و ذغال داخل آن که به سطح کموتاتور چسبیده است، با بیرون ارتباط دارد. شکل ۲-۱۲ جاروبک و ذغال مربوط را نشان می دهد. ذغال از طریق فنری که در پشت آن قرار دارد با سطح کموتاتور در تماس کامل است و جریان را از کموتاتور به بیرون هدایت کرده و یا جریان را به داخل سیم پیچی آرمیچر وارد می سازد.

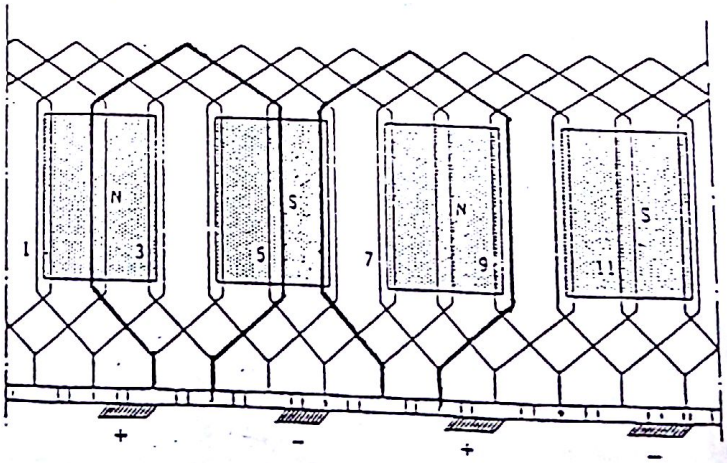
۱-۴-۲ = عکس العمل آرمیچر = عبور جریان از داخل سیمهای آرمیچر باعث ایجاد دعوارضی می گردد که به آن عکس العمل آرمیچر می گویند. از آنجایکه مقدار جریان آرمیچر متغیر است لذا شدت و ضعف این عوارض متناسب با جریان آرمیچر خواهد بود. عکس العمل آرمیچر باعث پیچیدن محور خنثی ماشین شده و در نتیجه باعث ایجاد جرقه در کموتاتور می گردد و در نتیجه باعث خرابی سریع ذغال و تیغه های کموتاتور می شود. مشکل دیگری که عکس العمل آرمیچر ایجاد می کند کاهش فوران قطبها است. برای از بین بردن عکس العمل آرمیچر از قطبهای کمکی و سیم پیچ جبران کننده در لبه کفشکهای قطبی استفاده می شود (شکل ۲-۱۳). این دو عامل باعث از بین رفتن تقریبی عکس العمل آرمیچر شده و در نتیجه روند کاری ماشین DC را بهبود می بخشد. اینرو سیم پیچ (کمکی و جبران کننده)



شکل ۲-۱۳ = a) سیم پیچی کمکی ، b) سیم پیچی جبران کننده در لبه کفشکهای قطبی.

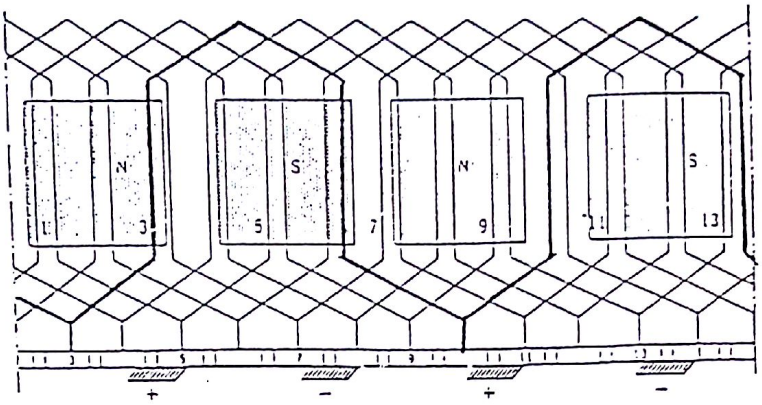
بطور سری با آرمیچر قرار گرفته و چون جریانهای آنها یکی می باشد، لذا اثر عکس العمل آرمیچر (جریان آرمیچر) را تا حدزیادی خنثی می کند.

۲-۴-۲ = سیم بندی آرمیچر = سیم بندی آرمیچر درحالت ساده معمولاً بصورت سیم بندی حلقوی (Lap winding) و سیم بندی موجی (wave winding) می باشد. تفاوت ساختاری این دو سیم بندی به نحوه اتصال سرهای کلاف به تیغه های کموتاتور مربوط می باشد. در سیم بندی حلقوی سر و ته یک کلاف به دو تیغه مسی کموتاتور که در مجاورت هم هستند وصل می گردند و در سیم بندی موجی سر و ته یک کلاف به تیغه های کموتاتور که به اندازه نصف تمام تیغه های کموتاتور فاصله دارند، وصل می گردد. تعداد مسیر عبور جریان در سیم بندی حلقوی برابر تعداد قطب بوده (a=p) و در سیم بندی موجی همیشه برابر با ۲ است (a=۲). چون تعداد مسیر عبور جریان در سیم بندی حلقوی زیاد است لذا در موتورهایی که جریان آنها زیاد بوده و ولتاژ آنها کم است از سیم بندی آرمیچر حلقوی استفاده می شود. و اگر جریان موتور کم بوده و ولتاژ آن زیاد باشد از سیم بندی آرمیچر موجی استفاده می گردد. شکل ۱۴-۲ سیم بندی حلقوی ساده یک آرمیچر ۱۲ شیار چهار قطب را نشان می دهد. سیم بندی موجی ساده یک آرمیچر ۱۲ شیار چهار قطب در شکل ۱۵-۲



شکل ۱۴-۲ = سیم بندی حلقوی ساده آرمیچر ۱۲ شیار چهار قطب ماشین DC.

نشان داده شده است. در این سیم بندی تعداد مسیر جریان برای سیم بندی حلقوی چهار مسیر ($a=4$) و برای سیم بندی موجی دو مسیر ($a=2$) می باشد.



شکل ۱۵-۲= سیم بندی موجی ساده آرمیچر ۱۳ شیار چهار قطب ماشین DC.

مثال ۳-۲= یک دور کشاورزی برگ کلاف ۱۰۰ دوری بطول 30^{cm} و عرض 20^{cm} که جریان 2^{A} از آن می گذرد و تحت تأثیر میدان با چگالی شار $1/5^{T}$ قرار دارد، چقدر است؟

راه حل:

$$F = NBlI = 100 \times 1/5 \times 30 \times 10^{-2} \times 2 = 90 \quad N$$

$$T = F \cdot d = 90 \times 20 \times 10^{-2} = 18 \quad N.m$$

مثال ۴-۲= کشاورزی برگ کلاف ۵۰ دوری بطول 20^{cm} و عرض 10^{cm} که جریان 5^{A} از آن می گذرد، برابر با $20^{N.m}$ است. اگر سطح مقطع قطب ها 150^{cm^2} باشد، شار و چگالی شار قطب ها را حساب کنید.

راه حل:

$$F = \frac{T}{d} = \frac{20}{10 \times 10^{-2}} = 200 \ (N)$$

$$F = NBlI \Rightarrow B = \frac{200}{50 \times 2 \times 10^{-2} \times 5} = 4 \ (T)$$

$$\Phi = B \cdot A = 4 \times 150 \times 10^{-4} = 0.6 \ (wb)$$

۲-۴-۲- ولتاژ خروجی ماشین DC = ولتاژ القایی در ماشین DC با توجه به نوع سیم‌بندی آرمیچر آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_a = \frac{Z \Phi P w}{2 \Pi a} \qquad (۲-۸)$$

در رابطه فوق Z تعداد کل هادی آرمیچر، Φ فوران هر قطب، P تعداد قطب، w سرعت زاویه‌ای و a تعداد مسیر جریان بوده که مقدار آن برای سیم‌بندی موجی همیشه ۲ بوده و برای سیم‌بندی حلقوی برابر با P است.

مثال ۲-۸ = یک ژنراتور DC ۴ قطب با سرعت ۱۸۰ rad/s گردش می‌کند. اگر تعداد کل هادی آن ۴۰۰ عدد بوده و فوران هر قطب ۰/۰۰۲ وبر باشد، مطلوبیت ولتاژ متوسط القایی در ژنراتور اگر: الف) سیم‌بندی آرمیچر حلقوی باشد. ب) سیم‌بندی آرمیچر موجی باشد.

راه حل:

الف ⟹ $a = P = 4$

$$E_a = \frac{Z \Phi P w}{2 \Pi a} = \frac{400 \times 0/002 \times 4 \times 180}{2 \times 3/14 \times 4} = 22/9 \, (V)$$

ب ⟹ $a = 2$

$$E_a = \frac{Z \Phi P w}{4 \Pi} = \frac{400 \times 0/002 \times 4 \times 180}{4 \times 3/14} = 45/8 \, (V)$$

۲-۵- ژنراتور DC = اگر یک ماشین DC را توسط وسیله‌ای بچرخانیم و فوران قطبها نیز موجود باشد، در داخل سیمهای آرمیچر ولتاژ القا می‌گردد. این ماشین DC را ژنراتور DC گویند. پس ژنراتور DC، ژنراتوری است که انرژی مکانیکی از نوع جریان مستقیم (DC) تبدیل می‌کند. فوران توسط عبور جریان از داخل قطبها (سیم پیچی تحریک) تولید می‌گردد.

۲-۵-۱= رابطه اساسی در ژنراتور DC = رابطه اساسی در ژنراتور DC مربوط به ولتاژ القا شده در ژنراتور می باشد که بصورت زیر است:

$$E_a = \frac{Z P \Phi w}{2\pi a} = k_a \Phi w \qquad (۲-۹)$$

$$k_a = \frac{Z P}{2\pi a} \qquad (۲-۱۰)$$

در یک ژنراتور معین مقدار k_a ثابت می باشد، لذا با توجه به رابطه ۲-۹ مقدار ولتاژ القایی به نوران قطبها و سرعت ژنراتور بستگی دارد. در سرعت ثابت ($w = const$) داریم:

$$\frac{E_{a1}}{E_{a2}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \qquad (۲-۱۱)$$

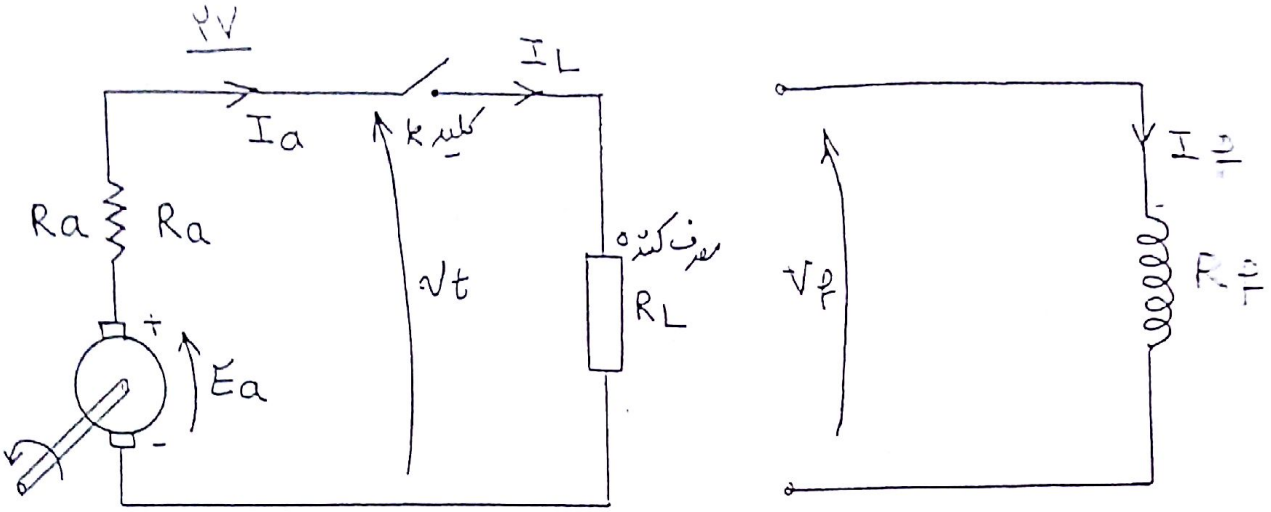
و در نوران ثابت ($\Phi = const$) داریم:

$$\frac{E_{a1}}{E_{a2}} = \frac{w_1}{w_2} \qquad (۲-۱۲)$$

و در حالت کلی داریم:

$$\frac{E_{a1}}{E_{a2}} = \frac{\Phi_1 w_1}{\Phi_2 w_2} \qquad (۲-۱۳)$$

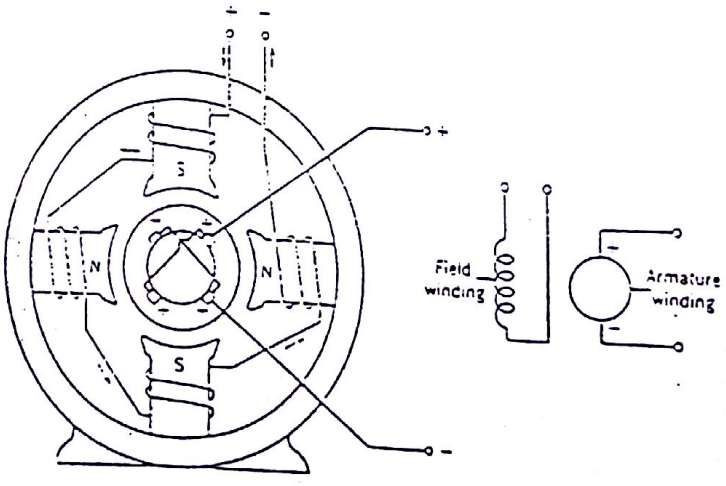
۲-۵-۲= مدار معادل ژنراتور DC = مدار معادل یک ماشین الکتریکی در حقیقت معادل الکتریکی آن وسیله بوده تا بوسیله آن بتوان به راحتی آن وسیله را تجزیه و تحلیل کرد. مدار معادل ژنراتور DC مانند حرد ژنراتور را از دو بخش سیم پیچی تحریک یا قطبها (استاتور) و مدار معادل آرمیچر (رتور) تشکیل می دهد. مدار معادل سیم پیچ تحریک بصورت یک بوبین (R_f) است که عبور جریان تحریک (I_f) باعث ایجاد نوران (Φ) می گردد (شکل ۲-۱۶-a). مدار معادل آرمیچر بصورت یک منبع ولتاژ است که براثر وجود Φ و چرخش ژنراتور، ولتاژ E_a در دو سر آن ظاهر شده و یک مقاومت سری R_a که مقاومت سیم پیچی آرمیچر می باشد (شکل ۲-۱۶-b)



شکل ۲-۱۲ a) مدار معادل سیم پیچی تحریک (قطبها)، b) مدار معادل آرمیچر بهراه مصرف کننده.

در شکل فوق $V_{تح}$ ولتاژ دو سر سیم پیچ تحریک (ولتاژ تحریک) و $R_{تح}$ مقاومت معادل بار یا مصرف کننده الکتریکی و V_t ولتاژ خروجی ژنراتور می باشد.

۲-۵- انواع ژنراتورهای DC = ژنراتورهای DC با توجه به نحوه تغذیه سیم پیچ تحریک به دو دسته ((تحریک مستقل و خود تحریک (تحریک خودی)) تقسیم می شوند. ژنراتور خود تحریک بسته به نحوه ارتباط سیم پیچ تحریک با آرمیچر به ژنراتور شنت، ژنراتور سری و ژنراتور کمپوند که هم دارای سیم پیچ تحریک سری و هم سیم پیچ تحریک شنت است تقسیم می گردند. شکل ۲-۱۷ یک ژنراتور DC با تحریک مستقل را نشان می دهد. سیم پیچ تحریک با سیم پیچ آرمیچر ارتباط نداشته و مستقلاً از یک



شکل ۲-۱۷ = ژنراتور DC با تحریک مستقل چهار قطبیه.

منبع DC (مثل باطری) تغذیه می‌گردد. شکل ۲-۱۸ انواع ژنراتورهای خود تحریک را نشان می‌دهد در این ژنراتورها سیم پیچ تحریک (قطبها) از دینامو تولیدی آرمیچر تغذیه کرده و نیازی به منبع DC دیگری ندارد.

۲-۵-۴ = ژنراتور با تحریک مستقل = شکل ۲-۱۲ در مجموع مدار معادل یک ژنراتور با تحریک مستقل را نشان می‌دهد. در نتیجه داریم:

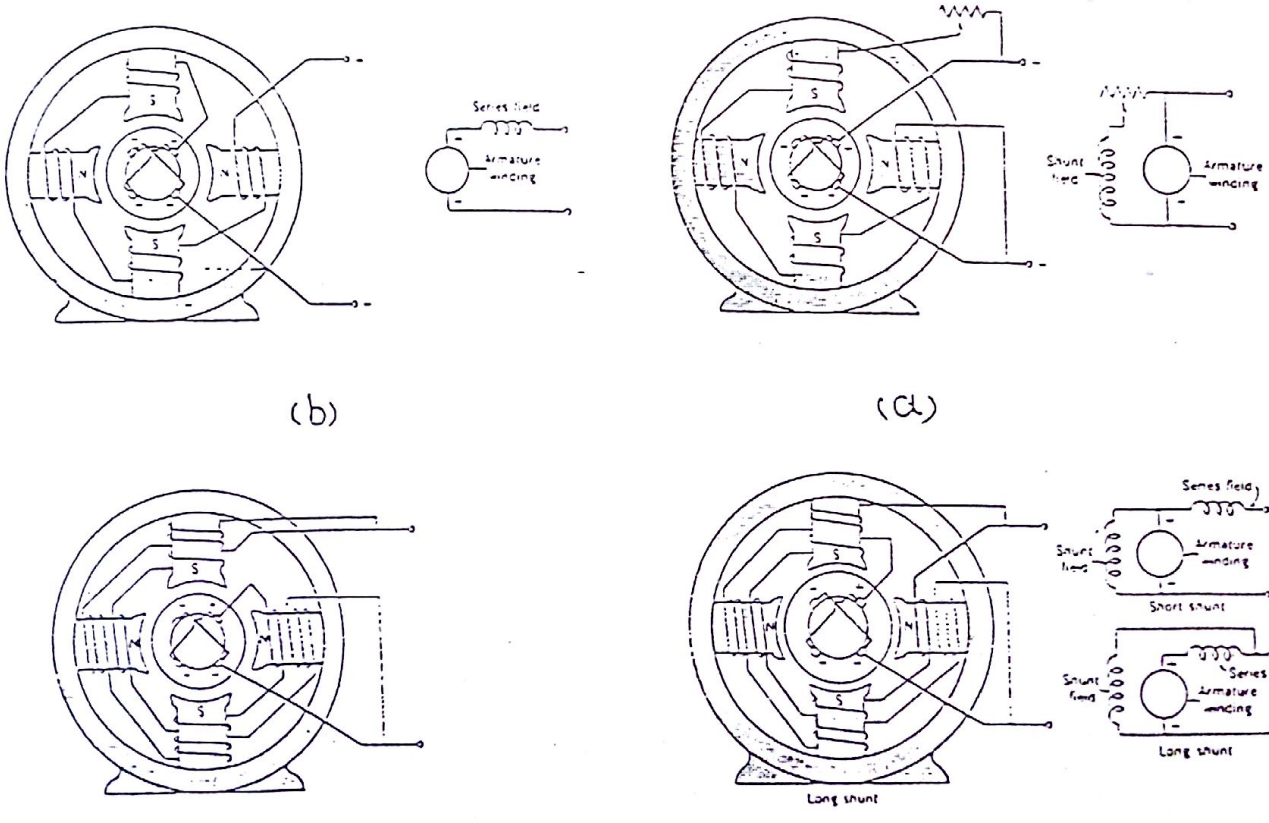
$$I_f = \frac{V_f}{R_f}$$

$$V_t = E_a - R_a I_a \qquad (۲-۱۴)$$

$$I_a = I_L = \frac{E_a - V_t}{R_a}$$

در حالت بی باری یعنی وقتیکه کلید K باز است داریم:

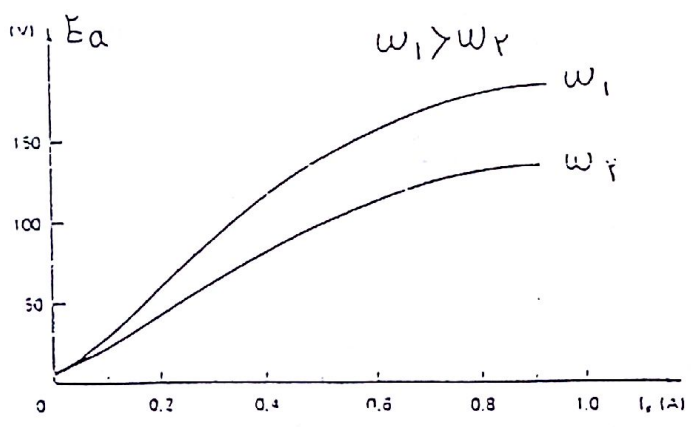
$$I_{a_{NL}} = I_L = 0 \quad ; \quad V_{t_{NL}} = E_a \qquad (۲-۱۵)$$

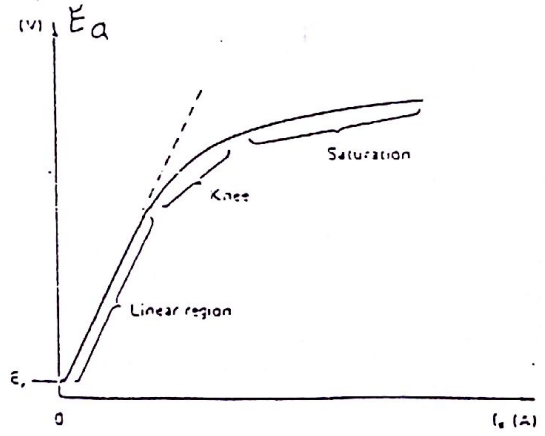


شکل ۲-۱۸ = a) ژنراتور شنت، b) ژنراتور سری، c) ژنراتور کمپوند اضافی، d) ژنراتور کمپوند تفاضلی.

در رابطه ۲-۱۵ $I_a N L$ و V_{tNL} به ترتیب ولتاژ خروجی و جریان آرمیچر در حالت بی باری است.

منحنی مغناطیس شوندگی ژنراتور با تحریک مستقل در حقیقت منحنی تغییرات ولتاژ القایی (E_a) نسبت به جریان سیم پیچ تحریک I_f در سرعت ثابت است. این منحنی در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. منحنی مغناطیس شوندگی برای ژنراتورهای DC نیز تقریباً مشابه این منحنی است. این منحنی در ابتدا خطی و با شروع اشباع حالت خمیده پیدا کرده و در حالت اشباع کامل تقریباً بصورت یک خط با شیب بسیار کم درمی آید. علت این امر نیز مربوط به تبدیل I_f به Φ است چون این تبدیل بصورت غیرخطی است (علت اشباع) در نتیجه با توجه به رابطه $E_a = k_a \Phi \omega$ منحنی E_a و I_f نیز مانند شکل ۲-۱۹ غیرخطی خواهد بود. مقدار E_r که در آن $I_f = 0$ است مربوط به شار پس ماند بوده و به آن ولتاژ ناشی از شار پس ماند گویند. شکل ۲-۲۰ منحنی مغناطیس شوندگی را به ازاء دو سرعت مختلف نشان می دهد.





شکل ۲-۱۹ = منحنی مغناطیس شوندگی ژنراتور DC.

شکل ۲-۲۰ = منحنیهای مغناطیس شوندگی در دو سرعت.

منحنی دیگری که در ماشینهای DC اهمیت دارد منحنی مشخصه بار است. این منحنی تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به جریان بار را نشان می دهد. در شکل ۲-۲۱ منحنی مشخصه بار ژنراتور DC با تحریک مستقل آمده است. در حالت بی باری ($I_L = 0$) جریان بار صفر بوده