

مدارهای مغناطیسی

Magnetic Circuits

مقدمه

این کتاب عمدتاً به تشریح دستگاههایی می‌پردازد که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و بالعکس تبدیل می‌کند. ماشینهای الکتریکی دوار^۱ مانند ماشینهای جریان مستقیم^۲ (DC)، ماشینهای القایی^۳ و ماشینهای سنکرون^۴ مهم‌ترین دستگاههایی هستند که اینگونه تبدیل انرژی را انجام می‌دهند. ترانسفورماتور^۵ اگر چه یک مبدل انرژی الکترومکانیکی نیست، اما نقش مهمی در فرایند تبدیل انرژی ایفا می‌کند و باید گفت ترانسفورماتور انرژی الکتریکی را به همان صورت دریافت شده تحویل مصرف‌کننده می‌دهد، و فقط سطوح ولتاژ یا جریان را دگرگون می‌سازد. در دستگاههای دیگر همچون محرک‌ها یا عمل‌کننده‌ها^۶، سولنوئیدها^۷ و رله‌ها^۸ در اثر تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی حرکت خطی پدید می‌آید، در همگی این دستگاهها مواد مغناطیسی برای شکل دادن و جهت بخشیدن میدانهای مغناطیسی^۹ به کار آمده و به منزله واسطه‌ای در فرایند تبدیل انرژی عمل می‌کنند. امتیاز اساسی بکارگرفتن ماده مغناطیسی در ماشینهای الکتریکی، به این دلیل است که چگالی شار^{۱۰} بزرگی در ماشین حاصل شود و بالمال به تولید گشتاوری^{۱۱} زیاد یا خروجی افزونی به ازاء واحد حجم منجر می‌گردد. به سخنی دیگر با بکارگیری مواد مغناطیسی ابعاد ماشین الکتریکی به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

1 - Rotating Electrical Machines.

2 - Direct Current Machines

3 - Induction Machines

4 - Synchronous Machines

5 - Transformers

6 - Actuators

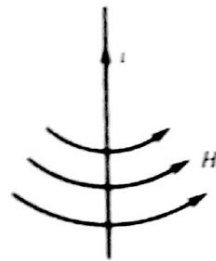
7 - Solenoids

8 - Relays

9 - Magnetic Field.

10 - Flux Density

11 - Torque



شکل ۱-۱

میدان مغناطیسی در گرداگرد یک هادی حامل
جریان

از آنجائیکه مواد مغناطیسی بخش اعظمی از ساختمان ماشینهای الکتریکی را تشکیل میدهد، در این فصل پیرامون ویژگیهای مواد مغناطیسی گفتگو می شود و برخی از شیوه های تحلیل مدارهای مغناطیسی^۱ بازگو می شود.

۱-۱- مدارهای مغناطیسی

در ماشینهای الکتریکی مدارهای مغناطیسی ممکن است فقط از مواد فرومغناطیسی^۲ تشکیل شده باشند (ترانسفورماتورها)، یا از مواد فرومغناطیسی در پیوند با شکاف هوایی (فاصله هوایی)^۳ فراهم آمده باشند (ماشینهای الکتریکی دوار). در اکثر ماشینهای الکتریکی بجز ماشینهای با آهنربای دائم،^۴ میدان مغناطیسی با شار^۵ به کمک عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ هائی^۶ که بر روی مواد مغناطیسی پیچیده می شود، ایجاد می گردد.

۱-۱-۱- رابطه بین i ، H

در آغاز رابطه بین جریان یک سیم پیچ⁽ⁱ⁾ و شدت میدان مغناطیسی^۷ حاصله توسط جریان^(H) را مورد بررسی قرار دهیم. هرگاه از یک هادی جریان عبور کند، میدان مغناطیسی در اطراف هادی شکل می گیرد (شکل ۱-۱). جهت خطوط شار یا شدت میدان مغناطیسی^(H) توسط قانون شست^۸ معین میشود. طبق این قانون، اگر هادی با دست راست نگهداشته شود بنحویکه انگشت شست در جهت جریان باشد، در اینصورت سرانگشتان دیگر جهت شدت میدان مغناطیسی را نشان خواهد داد.

1 - Magnetic Circuits

2 - Ferro Magnetic Materials

3 - Air - Gap

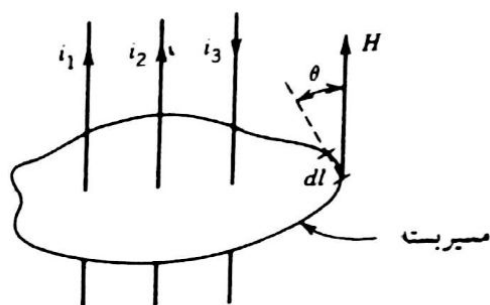
4 - Permanent Magnet Machines

5 - Flux

6 - Coils

7 - Magnetic Field Intensity

8 - Thumb Rule



شکل ۲-۱

نمایش قانون مداری آمپر

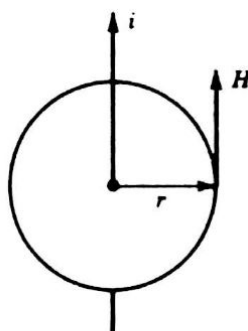
رابطه بین جریان (i) و شدت میدان مغناطیسی (H) از قانون مداری آمپر^۱ حاصل می شود. طبق این قانون، انتگرال خطی شدت میدان مغناطیسی بر روی هر مسیر مسدود^۲ معادل مجموعه جریانهائی است که بواسطه آن مسیر مسدود احاطه می شود. با توجه به شکل (۲-۱) داریم:

$$\oint H \cdot dl = \sum i = i_1 + i_2 - i_3 \quad (۱-۱)$$

در این رابطه H شدت میدان مغناطیسی در یک نقطه بر روی مسیر بسته است و dl طول جزئی (دیفرانسیل طول) در همان نقطه می باشد. اگر زاویه بین بردارهای H و dl باشد، داریم:

$$\oint H dl \cos \theta = \sum i \quad (۲-۱)$$

اکنون یک هادی^۳ را در نظر بگیرید که جریانی همچون شکل (۳-۱) از آن بگذرد. برای دستیابی به رابطه ای جهت شدت میدان مغناطیسی (H) در فاصله " r " نسبت به هادی، دایره ای به شعاع " r " رسم می کنیم. در هر نقطه از این مسیر مدور H و dl هم سو هستند. به سخی دیگر θ معادل صفر است. باید گفت به سبب تقارن، H در همه نقاط این مسیر مدور و مسدود یکسان



شکل ۳-۱

تعیین شدت میدان مغناطیسی (H) ناشی از هادی حامل جریان

خواهد بود. لذا از رابطه (۲-۱) داریم:

$$\oint H \cdot dl = i$$

$$H \cdot 2\pi r = i$$

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad \frac{A}{m} \quad (۲-۱ و ۱)$$

۱-۲-۱- رابطه بین H , B

شدت میدان مغناطیسی (H) در هر جا که باشد، چگالی شار مغناطیسی (B) را پدید می آورد و این دو کمیت اینگونه بهم وابسته اند:

$$B = \mu H \quad \text{یا} \quad \frac{\text{weber}}{m^2} \quad \text{tesla} \quad (۳-۱)$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad \frac{Wb}{m^2} \quad \text{یا} \quad T \quad (۴-۱)$$

باید دانست:

الف : μ خصیصه ای از محیط است و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی^۱ محیط نام دارد (پرمابلیته).

ب : μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (پرمابلیته) فضای آزاد^۲ بوده و برابر $4\pi \times 10^{-7}$ است. واحد این ضریب هانری بر متر می باشد.

ج : μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی^۳ محیط نام دارد (پرمابلیته نسبی).

در فضای آزاد یا هادیهای الکتریکی همچون مس و آلومینیوم یا عایقها،^۴ مقدار μ_r برابر یک است. اما در مواد مغناطیسی همانند آهن، کبالت و نیکل، μ_r از چندین صد تا چندین هزار تغییر میکند. μ_r در مواد مغناطیسی بکار رفته در ماشینهای الکتریکی در محدوده ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ تغییر می کند. هر چه μ_r بزرگتر باشد، به ازاء جریان کمتری چگالی شار افزونی در ماشین حاصل می شود.

۱-۱-۳- مدار معادل مغناطیسی

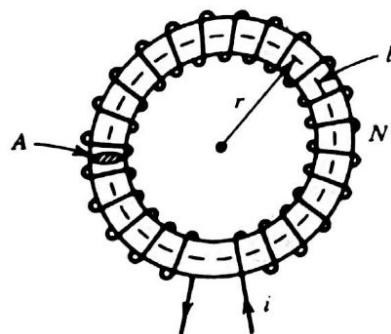
شکل (۴-۱) یک مدار مغناطیسی ساده نشان می دهد که هسته مغناطیسی حلقه گونی را

1 - Permeability

2 - Free space

3 - Relative Permeability

4 - Insulators



شکل ۴-۱

مدار مغناطیسی چنبره‌ای شکل

دارد و چنبره^۱ نامیده می‌شود.

گیریم به دور چنبره مغناطیسی یک سیم پیچ N دوری^۲ (N حلقه‌ای) پیچیده شده باشد و از آن جریان i عبور کند. در این صورت شار مغناطیسی که عمده‌تاً درون ماده هسته محبوس می‌گردد شکل می‌گیرد. شار بیرون چنبره به اندازه‌ای ناچیز است که در مقاصد عملی می‌توان از آن چشم‌پوشی نمود. این شار به شار نشتی^۳ معروف است. در شکل (۴-۱) مسیری بشعاع^۴ "r" را در نظر بگیرید. شدت میدان مغناطیسی بر روی این مسیر H بوده و طبق قانون مداری آمپر داریم:

$$\oint H \cdot dl = Ni \quad (۵-۱)$$

$$Hl = Ni \quad (۵-۱ا)$$

$$H \cdot 2\pi r = Ni \quad (۶-۱)$$

کمیت Ni نیروی محرکه مغناطیسی^۴ یا mmf نامیده می‌شود و واحد آن آمپر دور می‌باشد. به‌سبب سهولت داریم:

$$Hl = Ni = F \quad (۷-۱)$$

$$H = \frac{N}{l} i \quad (۸-۱)$$

از روابط (۸-۱) و (۳-۱) داریم:

$$B = \frac{\mu Ni}{l} \quad \text{تسلا} \quad (۹-۱)$$

گیریم همگی شار در چنبره محبوس باشد، یعنی شار نشتی در میان نباشد، شاری که از سطح

1 - Toroid

2 - N , Turns Coil

3 - Leakage

4 - Magnetic Motive Force (mmf به اختصار)

مقطع چنبره می‌گذرد، اینچنین است:

$$\Phi = \int B dl A \quad (10-1)$$

$$\Phi = B A \quad Wb \quad (11-1)$$

در این روابط B چگالی شار متوسط در هسته و A سطح مقطع چنبره است. چگالی شار متوسط می‌تواند با مسیری به شعاع متوسط چنبره متناظر گردد. اگر H شدت میدان مغناطیسی این مسیر باشد، آنگاه از روابط (۹-۱) و (۱۱-۱) داریم:

$$\Phi = \frac{\mu Ni}{l} A = \frac{Ni}{l / \mu A} \quad (12-1)$$

$$= \frac{Ni}{R} \quad (13-1)$$

$$= \frac{F}{R}$$

که:

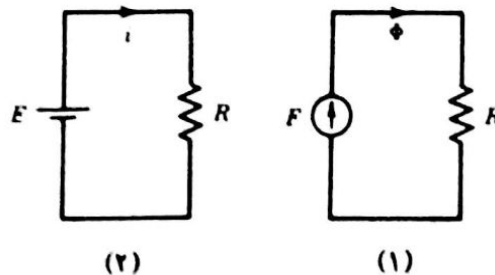
$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{1}{P} \quad (14-1)$$

R مقاومت مغناطیسی^۱ (رلوکتانس) و P هدایت مغناطیسی^۲ (پرمانس) نامیده می‌شوند. روابط (۱۲-۱) و (۱۳-۱) این نکته را دیگه می‌کنند که نیروی تحریک‌کننده مدار مغناطیسی شکل (۴-۱) همان نیروی محرکه مغناطیسی (F یا Ni یا mmf) بوده و شار مغناطیسی (Φ) را در برابر مقاومت مغناطیسی با رلوکتانس R پدید می‌آورد. از اینرو مدار مغناطیسی چنبره می‌تواند همچون مدار مغناطیسی معادلی که در شکل (۱ و ۵-۱) نشان داده شده نمایش داده شود. لازم به تذکر است که رابطه (۱۳-۱) مشابه قانون اهم^۳ در یک مدار الکتریکی^۴ است ($i = \frac{E}{R}$).

شکل ۵-۱

تشابه میان مدار مغناطیسی و مدار الکتریکی

۱- مدار مغناطیسی ۲- مدار الکتریکی



مدار الکتریکی مشابه در شکل (۲ و ۱-۵) نشان داده شده است. باید گفت همواره به مدار مغناطیسی در چهره یک مدار الکتریکی نگریسته می شود. تشابه^۱ بین این دو مدار (مغناطیسی و الکتریکی) در جدول (۱-۱) آمده است.

جدول ۱-۱: کمیت های الکتریکی در مقایسه با کمیت های مغناطیسی

مدار مغناطیسی	مدار الکتریکی	
F یا mmf	E یا emf	نیروی تحریک کننده ↓
شار (ϕ)	جریان (i)	تولید می کند ↓
مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس)	مقاومت	محدود می شود بوسیله

۱-۱-۴- منحنی مغناطیس شونده

اگر در هسته چنبره شکل (۱-۴) با افزایش جریان (i) شدت میدان مغناطیسی (H) افزون شود، چگالی شار در هسته همانند شکل (۱-۶) تغییر یافته و افزایش می یابد. به منحنی شکل (۱-۶) مشخصه $B-H$ یا منحنی مغناطیس شونده^۲ گفته می شود. چگالی شار (B) در ناحیه ای که شدت میدان مغناطیسی (H) اندازه های کمی دارد، تقریباً بگونه ای خطی^۳ افزایش می یابد، در حالیکه در اندازه های بیشتر H ، تغییرات B غیر خطی^۴ است. بعبارت دیگر ماده مغناطیسی اثر اشباع^۵ را از خود نشان می دهد. مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) مسیر مغناطیسی به چگالی شار (B) بستگی دارد. آنگاه که B کم است مقاومت مغناطیسی کوچک است و هرگاه B بزرگ باشد، مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) نیز زیاد است. از این نظر مدار مغناطیسی با مدار الکتریکی (متفاوت) است، زیرا عموماً مقاومت به

$$i \approx H$$

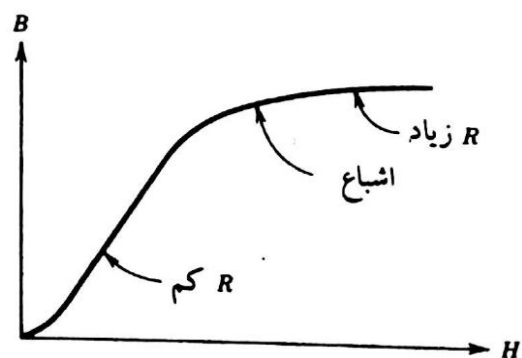
$$B \approx \phi$$

$$R \approx \frac{l}{\mu \phi}$$

تفاوت مدار مغناطیسی و مدار الکتریکی

شکل ۱-۶

مشخصه $B-H$ یا منحنی مغناطیس شونده



- 1 - Analogy
4 - Non Linear

- 2- Magnetization Curve
5 - Saturation

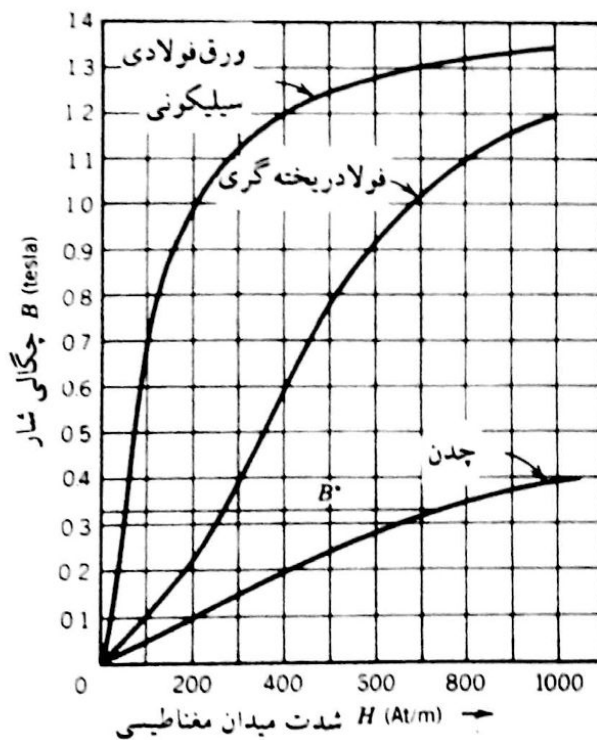
- 3 - Linear

جریان در مدار الکتریکی بستگی ندارد، حال آنکه مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) به چگالی شار مدار مغناطیسی وابسته است.

مشخصه‌های $B - H$ سه هسته مغناطیسی از قبیل چدن^۱، فولاد ریخته‌گری^۲ و ورق فولادی سیلیکونی^۳ در شکل (۷-۱) نشان داده شده است. واضح است اگر بخواهیم چگالی شار خاصی (B^*) در این سه ماده پدید آید به جریانهای متفاوتی نیاز داریم.

۱-۱-۵- مدار مغناطیسی با شکاف هوایی یا فاصله هوایی

در ماشینهای الکتریکی دوار، قسمت گردان یا رتور^۴ با یک شکاف هوایی یا فاصله هوایی از قسمت ساکن (استاتور)^۵ جدا می‌شود. شکل (۸-۱) تصویر یک برش^۶ از ماشین جریان مستقیم (DC) را نشان می‌دهد. باید گفت همان شاری که در قطبها پدید می‌آید عملاً در شکاف هوایی (فاصله هوایی) نیز ایجاد می‌گردد. گفتنی است که قطبها از هسته مغناطیسی ساخته شده‌اند. برای فراهم آوردن چگالی شار همسانی، شکاف هوایی به نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) بیشتری نسبت به هسته نیاز دارد. اگر چگالی شار زیاد باشد، بخش هسته‌ای یا فلزی مدار مغناطیسی با اشباع روبرو می‌شود، در حالیکه شکاف هوایی با اشباع مواجه نمی‌شود علت این



شکل ۷-۱

منحنی‌های مغناطیس شونده

1 - Cast Iron
4 - Rotor

2 - Cast Steel
5 - Stator

3 - Silicon Sheet Steel
6 - Cross Section

امر آنستکه نمودار $B - H$ هوا خطی است (μ ثابت است).

یک مدار مغناطیسی که برخوردار از دو یا چندین محیط است، سازه مرکب^۱ نام دارد و شکل (۸-۱) در حقیقت یک چنین سازه‌ای است. برای تحلیل سازه‌های مرکب می‌توان از مدار معادل مغناطیسی یاری گرفت. یک سازه مرکب همچون شکل (۱ و ۹-۱) در نظر می‌گیریم. نیروی محرک در این مدار مغناطیسی (mmf) برابر $F = Ni$ می‌باشد. هسته و شکاف هوایی را می‌توان با مقاومت‌های مغناطیسی متناظر (رلوکتانس‌های متناظر) آندو نشان داد. مدار مغناطیسی معادل در شکل (۲ و ۹-۱) نشان داده شده است. سهولت داریم:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c} \quad (15-1)$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (16-1)$$

$$\Phi = \frac{Ni}{R_c + R_g} \quad (17-1)$$

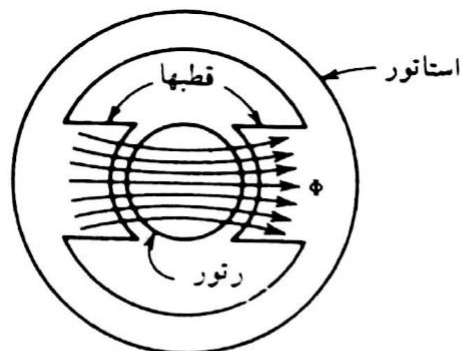
$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (18-1)$$

l_c طول متوسط هسته و l_g طول شکاف فاصله هوایی می‌باشد. چگالی شارها در این دو محیط بقرار زیراند:

$$B_c = \frac{\Phi_c}{A_c} \quad (19-1)$$

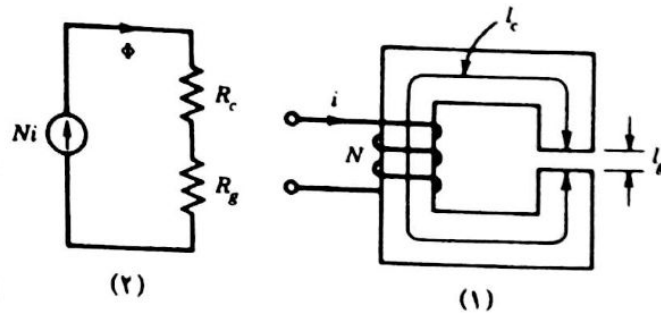
$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} \quad (20-1)$$

در شکاف هوایی خطوط شار اندکی به بیرون خمیده می‌شوند. این پدیده را خمیدگی شار^۲ یا



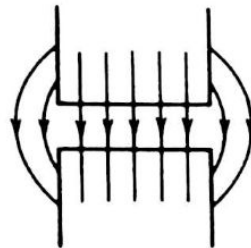
شکل ۸-۱

برشی از یک ماشین جریان مستقیم (DC)



شکل ۹-۱

سازه مرکب. ۱- هسته مغناطیسی همراه با شکاف هوایی ۲- مدار معادل مغناطیسی



شکل ۱۰-۱

خمیدگی شار یا تراوش شار

تراوش شار می نامند (شکل ۱۰-۱). برای تأثیر اثر خمیدگی شار باید مساحت سطح مقطع شکاف هوایی را افزایش داد. البته باید گفت در شکافهای هوایی کوچک از اثر خمیدگی صرف نظر می شود. اگر از پدیده خمیدگی شار چشم پوشی شود، مساحت های سطح مقطع هادر هسته و شکاف هوایی همانند یکدیگر خواهند بود و لذا داریم:

$$A_g = A_c$$

$$B_g = B_c = \frac{\Phi}{A_c}$$

مثال ۱-۱

شکل (ت و ۱-۱) مدار مغناطیسی یک رله ساده و ابتدائی^۱ را نشان می دهد. تعداد دور سیم پیچی (N) برابر ۵۰۰ دور بوده و طول متوسط مسیر هسته (l_c) معادل ۳۶۰ میلی متر است. اگر طول هر شکاف هوایی ۱/۵ میلی متر باشد، برای عملکرد رله به چگالی شاری معادل ۰/۸ تسلا (T) نیاز داریم. مطلوبست:

- الف : جریان سیم پیچی.
 ب : ضریب نفوذ پذیری (پرمابلیته) و ضریب نفوذ پذیری نسبی هست.
 ج : اگر طول شکاف های هوایی صفر شود و چگالی شار همان 0.8 تسلا باشد، جریان سیم پیچی را بدست آورید.
 توجه : جنس هسته را از فولاد ریخته گری در نظر بگیرید.

حل

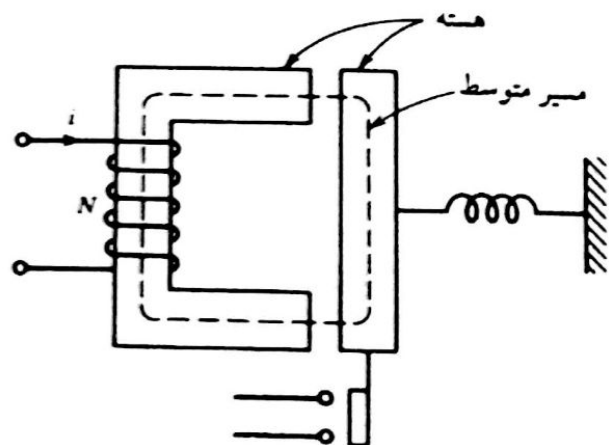
الف : از آنجائیکه طول شکافهای هوایی کوچک است از اثر خمیدگی شار چشم پوشی می کنیم . لذا چگالی شار در هسته و شکاف های هوایی یکسان است. از شکل (۱-۷) برای فولاد ریخته گری داریم:

$$B_c = 0.8 \text{ T}, \quad H_c = 510 \frac{At}{m}$$

$$mmf F_c = H_c l_c = 510 \times 0.36 = 184 At$$

برای هر دو شکاف هوایی داریم:

$$mmf F_g = H_g 2l_g = \frac{B_g}{\mu_0} 2l_g = \frac{0.8}{4\pi \times 10^{-7}} \times 2 \times 1.5 \times 10^{-2} = 1910 At$$



شکل ۱-۱
 مدار مغناطیسی مثال (۱-۱)

کل mmf مورد نیاز بقرار زیر است:

$$F = F_c + F_g = 184 + 1910 = 2094 \text{ At}$$

جریان بشرح زیر است:

$$i = \frac{F}{N} = \frac{2094}{500} = 4/19 \text{ آمپر}$$

می بینیم با آنکه طول شکافهای هوایی بمراتب از طول هسته کمتر است، با این وصف بخش اعظم mmf مورد نیاز مربوط به شکافهای هوایی خواهد بود.

ب: ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هسته (رلوکتانس) اینچنین است:

$$\mu_c = \frac{B_c}{H_c} = \frac{0/8}{510} = 1/57 \times 10^{-3}$$

ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی (رلوکتانس نسبی) بقرار زیر است:

$$\mu_r = \frac{\mu_c}{\mu_0} = \frac{1/57 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} = 1250$$

ج: سهولت داریم:

$$F = H_c l_c = 510 \times 0/36 = 184 \text{ At}$$

$$i = \frac{184}{500} = 0/368 \text{ A}$$

مشاهده می شود در اثر عدم حضور شکاف هوایی در سیستم به جریان بسیار کمتری جهت تأمین چگالی شار یکسان نیاز داریم.

مثال ۱-۲

مدار مغناطیسی مثال (۱-۱) را در نظر می گیریم. اگر جریان سیم پیچی ۴ آمپر باشد و طول هر شکاف هوایی یک میلیمتر در نظر گرفته شود، چگالی شار در شکاف هوایی چقدر است.

حل

در مثال (۱-۱)، کمیت B معلوم بود و از روی منحنی $H - B$ ، توانستیم H را بدست آوریم و بالمال mmf محاسبه شد. در این مثال جریان و یا عبارت دیگر mmf معلوم است و باید B را حساب

نمود. می‌دانیم منحنی $B - H$ مربوط به هوا یک خط مستقیم است، اما منحنی $B - H$ هسته غیر خطی می‌باشد. در اینجا باید یک مدار مغناطیسی غیر خطی را تحلیل کرد تا چگالی شار (B) حاصل شود. در این مثال دو روش بررسی می‌شود.

روش اول: روش خط بار

گیریم l_c طول متوسط هسته و l_g مجموع طولهای دو شکاف هوایی باشد. سهولت داریم:

$$Ni = H_g l_g + H_c l_c = \frac{B_g}{\mu_0} l_g + H_c l_c$$

رابطه اخیر را مرتب می‌کنیم:

$$B_g = B_c = -\mu_0 \frac{l_c}{l_g} H_c + \frac{Ni\mu_0}{l_g} \quad (21-1)$$

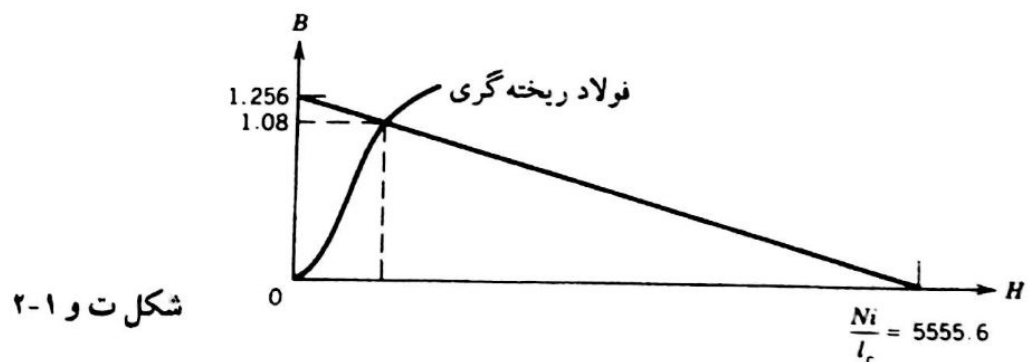
رابطه (21-1) نمایش معادله خطی در مختصات $B - H$ است و شیب^۲ این خط به‌قرار زیر است. به این خط مستقیم خط بار^۳ اطلاق می‌شود.

$$m = -\mu_0 \frac{l_c}{l_g} = -4\pi \times 10^{-7} \frac{360}{2} = -2/26 \times 10^{-2}$$

محل تلاقی این خط مستقیم با محور B دارای مختصات زیر است.

$$c = \frac{Ni\mu_0}{l_g} = \frac{500 \times 4 \times 4\pi \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-2}} = 1/256 \text{ تسلا}$$

این خط مستقیم منحنی $B - H$ هسته را قطع کرده و B در نقطه تلاقی $1/0.8$ تسلا می‌باشد (شکل ۲-۱ و ۲-۱).



شکل ۲-۱ و ۲-۱

1 - Load Line Method

2 - Slope

3 - Load Line

روش دوم: روش سعی و خطا

در این روش سلسله عملیات زیر را انجام می‌دهیم:

۱ - یک چگالی شار حدس می‌زنیم ($B_c = B_g$)

۲ - از منحنی $B - H$ هسته، H_c و از رابطه $H_g = \frac{B_g}{\mu_0}$ شدت‌های میدان مغناطیسی شکاف هوایی و هسته را بدست می‌آوریم:

۳ - از روابط زیر استفاده می‌کنیم

$$F_c = H_c l_c, F_g = H_g l_g, F = F_c + F_g$$

۴ - جریان را بدست می‌آوریم:

$$i = \frac{F}{N}$$

۵ - اگر i بدست آمده با صورت مساله تطابق داشت، جواب نهائی حاصل گشته است. در غیر

اینصورت از گام اول دوباره شروع کرده و با یک B جدید سلسله عملیات فوق را ادامه می‌دهیم تا

بالاخره جریان نزدیک ۴ آمپر بدست آوریم. در اینجا شاید سؤال این باشد که چه عددی برای B

حدس می‌زنیم. می‌گوئیم که اگر کل mmf به شکافهای هوایی اعمال شود داریم:

$$B = \frac{Ni}{l_g} \mu_0 = 1/256 \quad T$$

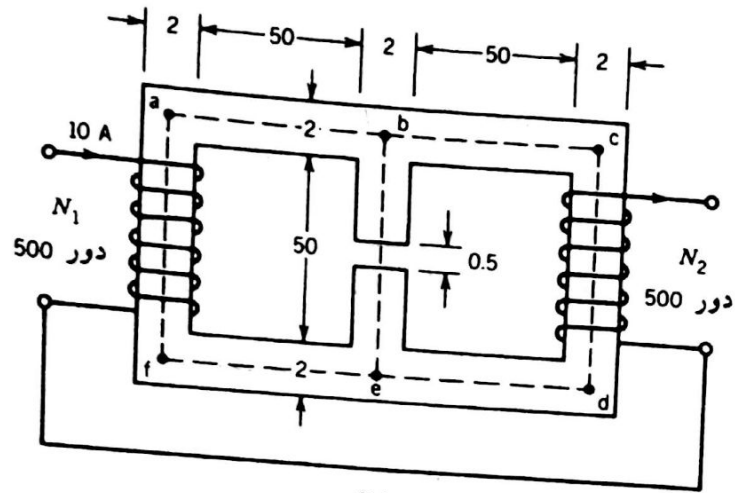
پر واضح است که در حالت کلی با حضور هسته، چگالی شار از مقدار فوق کمتر است. ما در اینجا دو

نمونه از عملیات مربوط به روش سعی و خطا را ارائه می‌دهیم.

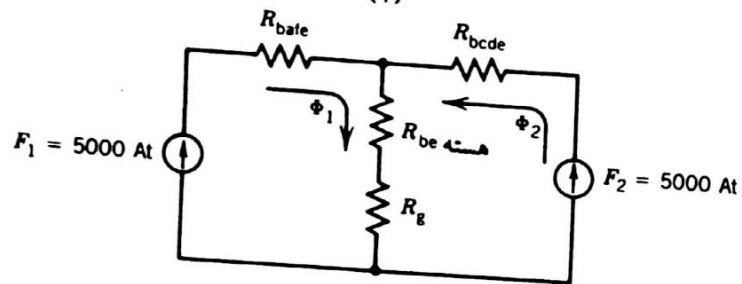
B	H_c	H_g	F_c	F_g	F	i
۱/۱	۸۰۰	$۸/۷۵۳۵ \times ۱۰^۵$	۲۸۸	$۱۷۵۰/۷$	$۲۰۳۸/۷$	۴/۰۸
۱/۰۸	۷۸۵	$۸/۵۹۴۳۲ \times ۱۰^۵$	۲۸۲	$۱۷۱۸/۸۷$	$۲۰۰۰/۸۷$	۴/۰

مثال ۳-۱

یک مدار مغناطیسی همچون شکل (ت و ۱ و ۳-۱) مفروض است. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (پرمابلیته نسبی) هسته ۱۲۰۰ بوده و از شار ناشی و پدیده خمیدگی شار صرفنظر می‌کنیم. سطح مقطع هسته مربعی بوده و در تمام مسیر یکسان است. شار، چگالی شار، و شدت میدان



(۱)



(۲)

شکل ت و ۱-۳ ۱- سازه مغناطیسی ۲- مدار مغناطیسی معادل

مغناطیسی در شکاف هوایی را حساب کنید.

حل

طول متوسط مسیر شارها بوسیله خطوط چین در شکل (ت و ۱ و ۳-۱) نشان داده شده

است. مدار معادل مغناطیسی این سیستم در شکل (ت و ۲ و ۳-۱) رسم شده است. به سبب داریم:

$$F_1 = N_1 I_1 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

$$F_2 = N_2 I_2 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

$$\mu_c = 1200 \mu_0 = 1200 \times 4\pi \times 10^{-7}$$

$$R_{bade} = \frac{l_{bade}}{\mu_c A_c}$$

$$= \frac{3 \times 52 \times 10^{-2}}{1200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}}$$

$$= 2/58 \times 10^6 \frac{\text{At}}{\text{Wb}}$$

با توجه به تقارن در سیستم داریم:

$$R_{bcde} = R_{bafe}$$

$$\begin{aligned} R_g &= \frac{l_g}{\mu_o A_g} \\ &= \frac{5 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2 \times 2 \times 10^{-2}} \\ &= 9/94 \times 10^6 \frac{At}{Wb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{be(هسته)} &= \frac{l_{be(هسته)}}{\mu_c A_c} \\ &= \frac{51/5 \times 10^{-2}}{1200 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-2}} \\ &= 0/82 \times 10^6 \frac{At}{Wb} \end{aligned}$$

معادلات حلقه ۱ بقرار زیر است.

$$\Phi_1 (R_{bafe} + R_{be} + R_g) + \Phi_2 (R_{be} + R_g) = F_1$$

$$\Phi_1 (R_{be} + R_g) + \Phi_2 (R_{bcde} + R_{be} + R_g) = F_2$$

یا

$$\Phi_1 (13/34 \times 10^6) + \Phi_2 (10/76 \times 10^6) = 5000$$

$$\Phi_1 (10/76 \times 10^6) + \Phi_2 (13/34 \times 10^6) = 5000$$

پس

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 2/067 \times 10^{-4} Wb$$

لذا شار شکاف هوایی اینچنین است:

$$\Phi_g = \Phi_1 + \Phi_2 = 4/134 \times 10^{-4} Wb$$

چگالی شار شکاف هوایی بقرار زیر است:

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} = \frac{4/134 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-2}} = 1/034 T$$

شدت میدان مغناطیسی در شکاف هوایی بشرح زیر است: