

میدان مغناطیسی و مدارات مغناطیسی

فرض کنید مسیر بسته‌ای به نام C داشته باشیم که رویه‌ای به سطح A را در بر بگیرد، طبق قانون مداری آمپر خواهیم داشت

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A}$$

که H شدت میدان مغناطیسی و J چگالی جریان الکتریکی است. $F = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ را نیروی محرکه مغناطیسی حول مسیر C می‌نامیم.

پس طبق رابطه بالا خواهیم داشت

$$F = \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A}$$

یعنی نیروی محرکه مغناطیسی حول هر مسیر بسته برابر جریان خالص عبوری از هر سطحی است که محصور به آن مسیر باشد. حال اگر مسیری یکنواخت از ماده مغناطیسی با μ بالا را فرض کنید مثلاً یک چنبره با شعاع بزرگ و سطح مقطع کوچک و دور آن را به طور یکنواخت سیم‌پیچی کنیم و از N دور سیم پیچیده شده جریان i را بگذرانیم، آنگاه با فرض یکنواخت بودن H روی سطح مقطع چنبره و طول مسیر مغناطیسی میانگین l خواهیم داشت

$$F = \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} = Ni = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hl$$

در یک محیط همگن و همسانگرد چگالی شار مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

که در سیستم SI $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ و μ_r ضریب نفوذپذیری نسبی ماده مغناطیسی است. شار مغناطیسی عبوری از این مسیر برابر است با

$$\phi = BA_e = \mu HA_e = \frac{\mu A_e}{l} F$$

اگر F را شبیه نیروی محرکه الکتریکی در مدارات الکتریکی و ϕ را شبیه جریان الکتریکی بدانیم کمیت $R_m = \frac{l}{\mu A_e}$ را می‌توانیم به عنوان مقاومت مغناطیسی یا رلوکتانس مسیر مغناطیسی بنامیم و خواهیم داشت

$$\phi = \frac{F}{R_m}$$

استفاده از مفهوم رلوکتانس کار تحلیل و طراحی سیستم‌های مغناطیسی را بسیار ساده‌تر می‌سازد و دقت آن برای مقاصد عملی کفایت می‌کند. اگر در سیستم مغناطیسی توصیف شده جریان تغییر کند شار مغناطیسی هم تغییر خواهد کرد و طبق قانون فاراده نیروی محرکه e در هر حلقه از سیم‌پیچ القا خواهد شد

$$e_{\text{حلقه}} = \frac{d\phi}{dt}$$

در این صورت نیروی محرکه کل القاشده در سیم‌پیچ برابر خواهد بود با

$$e = Ne_{\text{حلقه}} = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

که $\lambda = N\phi$ را حلقه زنند شار سیم‌پیچ می‌نامند. برای این القاگر چنین می‌توانیم بنویسیم:

$$\lambda = N\phi = N \frac{F}{R_m} = N \frac{Ni}{R_m} = \frac{N^2 i}{R_m} \Rightarrow \frac{\lambda}{i} = \frac{N^2}{R_m}$$

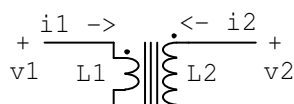
می‌بینیم که نسبت λ به i برای هر القاگر ثابت است. این نسبت ثابت را اندوکانس القاگر می‌نامیم و با L نشان می‌دهیم

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N^2}{R_m}$$

ثابت اندوکتانس یک القاگر ما را قادر می‌سازد که روابط حاکم بر القاگر را صرفاً بر حسب کمیت‌های الکتریکی بیان کنیم:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}, \lambda = Li \Rightarrow e = L \frac{di}{dt}$$

عناصر مهم مداری دیگر سلف‌های تزویج شده و ترانس‌ها هستند. اگر قسمتی از شار گذرنده از دو سیم‌پیچ مشترک باشد بین آن دو تزویج مغناطیسی وجود دارد و در صورت تغییر جریان یکی در دیگری ولتاژی القا می‌شود میزان تزویج با پارامتری به نام اندوکتانس متقابل، M ، سنجیده می‌شود که به صورت زیر قابل بیان است



$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

نقطه‌ها به معنای این است که اگر جهت جریان‌ها هر دو به داخل و یا به خارج سرهای نقطه‌دار باشد شار حاصل از آنها با هم جمع می‌شود و در غیر این صورت از هم کم می‌شود.

اثبات می‌شود که $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$ است که می‌توان با $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ و $0 \leq k \leq 1$ بیان کرد. به k ضریب تزویج می‌گویند و نشانگر میزان شار مشترک بین دو القاگر است. یک ترانس ایده‌آل شامل دو القاگر با ضریب تزویج $k=1$ است یعنی کل شار ایجاد شده بین هر دو القاگر مشترک می‌باشد در این صورت با نوشتن قانون فاراده برای هر دو سیم‌پیچ خواهیم داشت:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}, v_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$

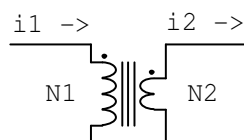
نسبت تبدیل ترانس

و وسیله‌ای به دست می‌آید که دو عمل تبدیل سطح ولتاژ و ایزولاسیون الکتریکی را همزمان انجام می‌دهد. اما تزویج کامل بین دو سیم‌پیچ از لحاظ عملی امکان‌پذیر نیست و همیشه $k < 1$ است. نتیجه آنکه مقداری از شار القاگر اول و دوم از دیگری نمی‌گذرد و ایجاد اندوکتانسی به نام اندوکتانس ناشی می‌کند که می‌توان آن را به صورت دو القاگر سری با القاگرهای

تشکیل دهنده ترانس مدل کرد. در مدارات تغذیه سوئیچینگ این اندوکتانس‌های ناشی اثر پارازیتی مهمی بر عملکرد مدار دارند و غالباً کاهش آنها تا حد امکان مطلوب است.

خصوصیت دیگری که یک ترانس ایده آل دارد این است که اندازه L_1 و L_2 هر دو به بینهایت میل می‌کنند زیرا که اگر از یک ترانس صرفاً برای تبدیل سطح ولتاژ استفاده شود مطلوب است که اثر بارگذاری خود ترانس روی مدارات تا حد ممکن کاهش یابد و با توجه به رابطه $\Delta i_L = \frac{1}{L} \int \Delta v_L dt$ با میل دادن L به سمت بینهایت به مقصود خود نزدیک می‌شویم.

حال فرض کنید به اولیه یک ترانس جریان i_1 اعمال کنیم و بار جریان i_2 را از خروجی بکشد پس با توجه به جهت نقطه‌ها و جریان‌ها داریم:

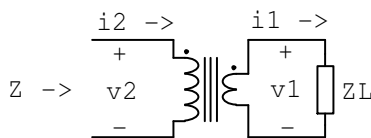


$$F = N_1 i_1 - N_2 i_2 = R_m \phi$$

معمولاً ترانس‌ها را با هسته‌های دارای μ بزرگ طراحی می‌کنند و نتیجتاً R_m مقدار کوچکی خواهد بود و تقریباً می‌توان گفت:

$$F = N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \Rightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{n}$$

کاربرد دیگر ترانس تبدیل امپدانس است. در صورتی که امپدانس Z_L را مانند شکل به ثانویه یک ترانس ایده آل وصل کنیم امپدانس دیده شده از اولیه به صورت زیر به دست می‌آید



$$Z = \frac{v_2}{i_2} = \frac{nv_1}{\frac{1}{n}i_1} = n^2 Z_L$$

مواد مغناطیسی و منحنی هیستریزیس

مواد مغناطیسی استفاده شده در هسته القاگرها و ترانسها در دو دسته فرومغناطیسیها و فری‌مغناطیسیها می‌گنجند. اتمهای مواد فرومغناطیسی مانند آهن، کوبالت، نیکل و بعضی از آلیاژهای آنها دارای گشتاور مغناطیسی خالص غیرصفر هستند و علاوه بر این حوزه‌هایی کوچک با گشاورهای اتمی هم‌جهت در راستای محورهای بلور تشکیل می‌دهند که این حوزه‌ها نسبت به هم به صورت تصادفی قرار گرفته‌اند و میدان خالص صفر ایجاد می‌کنند. وقتی یک میدان مغناطیسی خارجی به این مواد اعمال شود در میدان‌های کم ابتدا مرز حوزه‌ها حرکت می‌کنند و حوزه‌هایی که جهتشان کمابیش با جهت میدان هم‌راستا است بزرگتر می‌شوند در این حالت ماده مغناطیسی μ_r بزرگی به نمایش می‌گذارد با افزایش بیشتر میدان خارجی کم‌کم حرکت حوزه‌ها سخت‌تر می‌شود و حال این خود گشتاورهای اتمی هستند که جهت خود را از راستاهای محورهای بلور به راستای میدان اعمالی تغییر می‌دهند. این عمل سخت‌تر صورت می‌گیرد و ماده μ_r کوچکتری را از خود نشان می‌دهد. اگر یک میدان متناوب با فرکانس بسیار کم را به ماده اعمال کنیم و منحنی B برحسب H را رسم کنیم می‌بینیم که یک منحنی غیرخطی خواهیم داشت که دو جهت رفت و برگشت را در مسیرهای متفاوتی می‌پیماید به این نمودار منحنی هیستریزیس ماده فرومغناطیسی می‌گویند. مشاهده می‌کنیم که حتی در میدان اعمالی برابر $H=0$ ، $B \neq 0$ است. به این خاصیت پسماند مغناطیسی می‌گویند. همچنین برای رساندن B به صفر باید یک H معکوس اعمال کرد که به مقدار آن نیروی وادارنده می‌گویند. اگر دامنه میدان متناوب اعمالی آنقدر بزرگ باشد که ماده را به شدت داخل اشباع ببرد یعنی اکثر اتمها تا حد امکان با میدان اعمالی هم‌راستا شده باشند، آنگاه منحنی هیستریزسی به دست می‌آید که شکل آن از دامنه میدان اعمالی مستقل است و در

برگه‌های مشخصه سازندگان مواد مغناطیسی درج می‌گردد. میزان پسماند در این منحنی را بازماند (remanence) می‌گویند و با B_r نمایش می‌دهند. نیروی وادارنده را نیز در این منحنی به نام وادارندگی (coercivity) می‌شناسند و با H_c نمایش می‌دهند. در میدانهای بزرگ اکثر گساورهای اتمی با میدان هم‌راستا شده‌اند و اندازه μ_r با افزایش H به مقدار ۱ نزدیک می‌گردد. معمولاً اندازه B را هنگامی که μ_r به یک هشتم مقدار اولیه خود، μ_i ، در میدانهای کوچک برسد ($\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}, H \rightarrow 0$) را چگالی شار اشباع

نامیده و با B_s نمایش می‌دهند. مواد فرومغناطیسی بالاترین B_s را در بین دیگر مواد مغناطیسی دارند و در نتیجه برای کاربردهای با چگالی انرژی بالا مناسبند. کاربرد مواد فرومغناطیسی در فرکانسهای بالا به شکل هسته‌های فلزی یکپارچه مشکلزا است زیرا در اثر تغییرات سریع میدان مغناطیسی، در داخل هسته میدانهای الکتریکی القا می‌گردد که باعث بوجود آمدن جریانهایی به نام جریان فوکو می‌شود و این پدیده تلفات انرژی زیادی را ایجاد می‌کند. برای مقابله با آن می‌توان در فرکانسهای کم از ورقه ورقه کردن هسته مانند هسته‌های ترانسهای ۵۰ Hz استفاده کرد. در فرکانسهای بالاتر از هسته‌هایی که از نوارهای باریکتری از ماده فرومغناطیسی که به صورت یک حلقه چنبره‌ای پیچیده شده است (Toroidal Tape Wound Cores) و در فرکانسهای باز هم بالاتر از هسته‌های پودری استفاده کرد که از پودر مواد فرومغناطیسی تشکیل شده‌اند که ذرات پودر با لایه‌ای نازک از مواد عایق پوشیده شده‌اند و نهایتاً تحت فشار به شکل مورد نظر که اغلب Toroid است درآورده شده‌اند.

بخش دیگری از تلفات هسته ناشی از پدیده هیستریزیس است. انرژی ذخیره شده در هسته در هر لحظه با سطح بین منحنی $B-H$ و محور B متناسب است و به وضوح از منحنی هیستریزیس دیده می‌شود که در هر چرخه مقداری انرژی در هسته ذخیره شده و مقدار کمتری از

آن برداشت می‌گردد. این مقدار انرژی به صورت انرژی گرمایی در هسته تلف می‌شود که در واقع برای حرکت دادن دیواره حوزه‌ها و تغییر جهت گشتاورهای اتمی صرف شده است.

دسته دوم مواد مغناطیسی مورد استفاده فری‌مغناطیسها یا فریت‌ها هستند. این مواد سرامیکهایی هستند که از مخلوط کردن اکسید آهن با اکسید بعضی فلزات دیگر مانند منگنز نیکل روی و... و تحت فشار و حرارت بالا حاصل می‌شوند. این مواد از لحاظ شیمیایی همگن و بسیار سخت و شکننده‌اند. هدایت الکتریکی آنها نسبت به فرو مغناطیسها بسیار پایین‌تر است و در نتیجه تلفات انرژی در آنها عمدتاً مربوط به اثر هیستریزیس می‌باشد علاوه بر این تلفات هیستریزیس آنها نیز نسبت به اغلب هسته‌های فرومغناطیسی کمتر می‌باشد. این هسته‌ها در شکل‌ها و اندازه‌های بسیار متنوعی به بازار عرضه می‌شوند که بعضی از انواع آن در انتهای گزارش آمده است. فریت‌های به کار رفته در مدارات قدرت اغلب دارای فرمول $Mn_{\delta}Zn_{(1-\delta)}Fe_2O_4$ و فریت‌های به کار رفته در تجهیزات مخابراتی و فرکانس بالا دارای فرمول $Ni_{\delta}Zn_{(1-\delta)}Fe_2O_4$ هستند. B_{max} در فریت‌ها از فرومغناطیسها پایین‌تر است.

طراحی ترانس‌های توپولوژی فوروارد

در طراحی ترانس‌های حالت فوروارد منابع سوئیچینگ معمولاً از هسته‌های فریت و به ندرت از هسته‌های پودری مانند MPP (Moly Permalloy Powder) که ماده‌ای دارای تلفات هیستریزیس پایین است استفاده می‌گردد. نکته مهم در طراحی ترانس‌های فوروارد این است که کار این عنصر ذخیره انرژی نیست و فقط کار ایزولاسیون و تبدیل سطح ولتاژ را بر عهده دارد. اصل مورد توجه در انتخاب اندازه هسته انتخاب کوچکترین هسته‌ای است که می‌تواند توان مورد نظر را تحویل دهد. اما توان قابل تحویل یک ترانس

فوروارد عددی مطلق و دقیقاً قابل تعیین نیست. عوامل محدود کننده آن قطر لازم برای سیمهای اولیه و ثانویه با توجه به جریانهای rms جاری در آنها و در نتیجه حداقل سطح لازم برای پنجره هسته یا بوبین مورد استفاده برای جا دادن این مقدار سیم است. عامل دوم تعیین B_{max} مناسب است. گرچه هدف از یک ترانس فوروارد ذخیره انرژی نیست اما در هر ترانس واقعی اندوکتانس اولیه و ثانویه مقادیری کمتر از بینهایت هستند و ناخواسته جریانی به نام جریان مغناطیسکننده (Magnetizing Current) در این اندوکتانس (Magnetizing Inductance) جاری میشود که هسته را روی منحنی B-H جابجا میکند و مقداری انرژی در آن ذخیره میکند. نکته قابل توجه این است که جریان مغناطیسکننده جاری در اولیه یک ترانس در آرایش فوروارد هیچ انرژیای را به خروجی منتقل نمیکند و انرژی ذخیره شده در آن بسته به نوع مدار یا تلف شده یا به ورودی بازمیگردد. تنها جریانهای انعکاس یافته هستند که انرژی را بین اولیه و ثانویه منتقل میکنند. در بخشهای مربوطه فرمولهایی تقریبی برای انتخاب بهینه اندازه هسته آورده ایم.

طراحی ترانس فلایبک

در حقیقت ترانس فلایبک را نمیتوان از لحاظ عملکرد اصلی معادل یک ترانس عادی دانست و در واقع هیچگاه جریان همزمان در اولیه و ثانویه جاری نمیشود و بهتر است آن را دو القاگر دارای کوپلاژ مغناطیسی در نظر گرفت. ترانس فلایبک در واقع یک عنصر ذخیره کننده انرژی است و نحوه طراحی آن به کلی با نوع فوروارد تفاوت دارد. در واقع ابتدا باید حداکثر انرژی لازم برای انتقال در یک دوره تناوب را پیدا کرد مثلاً اگر راندمان را ۱۰۰٪ در نظر بگیریم برای انتقال توان P_{max} به خروجی در $T_{on max}$

$$، V_{in min} و i_{p max} مطلوب و روابط$$

$$P_{\max} = \frac{1}{2} L_p i_p^2 f, \quad i_{p \max} = \frac{V_{in \min}}{L_p} T_{on \max}$$

مقدار L_p اولیه به دست می‌آید. مقدار L_s ثانویه برای عملکرد در حالت ناپیوسته توسط روابط مشابهی به دست می‌آید:

$$i_{p \max, sec} = \frac{V_o}{L_s} (1 - T_{on \max})$$

نهایتاً نوبت انتخاب هسته است. هسته‌های مورد استفاده در ترانس فلای‌بک به علت حداکثر جریان مغناطیس‌کننده بالای مورد نیاز، که کل جریان اولیه را تشکیل می‌دهد، باید تحت مقادیر بالاتر H قادر به عمل باشند و اشباع نشوند. یک راه‌حل برای این مشکل ایجاد یک شکاف هوایی در هسته است. در این حالت هسته مانند دو رلوکتانس سری عمل می‌کند یکی رلوکتانس غیر خطی هسته و دیگری رلوکتانس خطی شکاف هوایی. از آنجایی که هوا خیلی کمتر از مواد تشکیل دهنده هسته است، معمولاً بیشتر نیروی محرکه مغناطیسی و به طبع آن H روی شکاف هوایی افت می‌کند و اکثر انرژی میدان نیز در آنجا ذخیره می‌شود. در واقع هسته مغناطیسی بیشتر به یک وسیله هدایت‌کننده شار مغناطیسی مانند هادی‌های الکتریکی شباهت پیدا می‌کند تا محل اصلی ذخیره انرژی و در نهایت کل ظرفیت ذخیره انرژی بالا می‌رود اما در عین حال اندوکتانس مشخصه هسته پایین می‌آید (اندوکتانس مشخصه A_L ، ثابتی است که به ابعاد و جنس هسته وابسته است و رابطه $L = N^2 A_L$ برای آن صدق می‌کند). و این لازم می‌دارد که تعداد دور اولیه و ثانویه افزایش یابد اما با توجه تناسب اندوکتانس با توان دوم تعداد دور این افزایش تعداد دور خیلی زیاد نخواهد بود. ممکن است مجبور شویم از هسته بزرگتری برای جا دادن سیم‌ها استفاده کنیم. هسته‌های پودری نیز در ترانس فلای‌بک قابل استفاده هستند و مزیت آنها این است که $B_{\max}$ بزرگتری از فریت‌ها دارند. همچنین به علت فاصله هوایی توزیع شده در آنها ناهمگنی در ساختار میدان به وجود نمی‌آید و تلفات ناشی از

شکاف هوایی در آنها کمتر است. در شکاف هوایی لازم در فریت‌ها میدان از اندازه شکاف گسترده‌تر می‌شود و تلفات جریان فوکوی قابل توجهی در سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌کند.