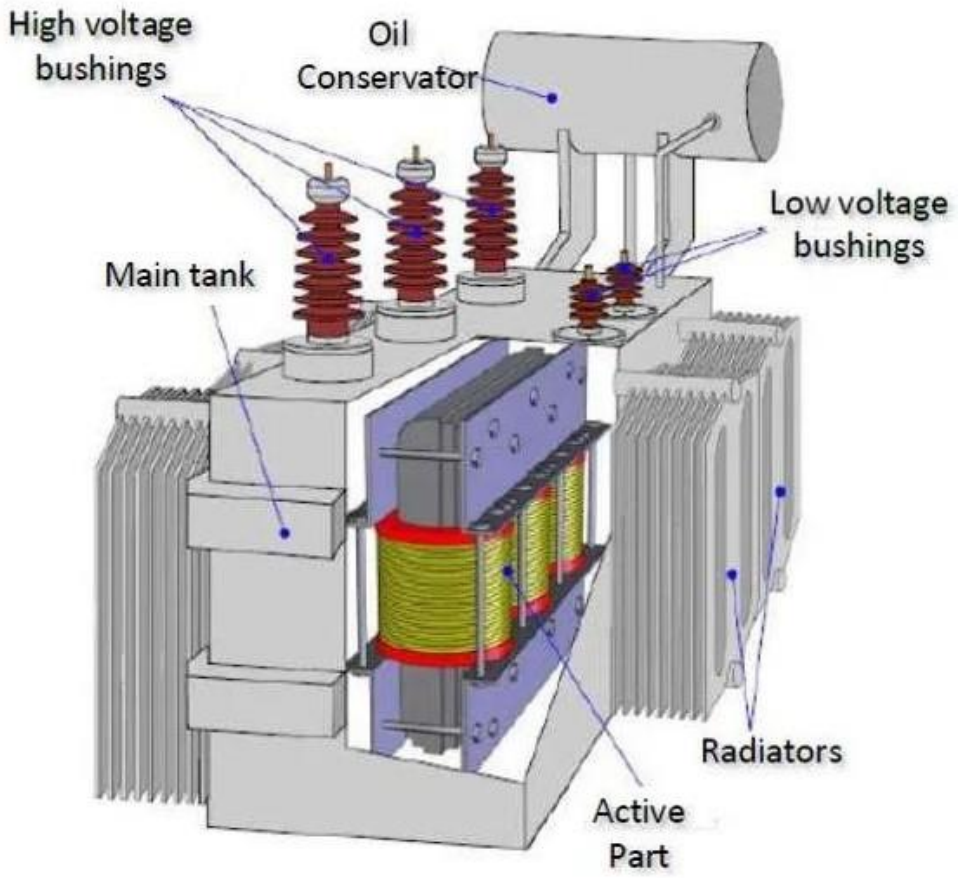
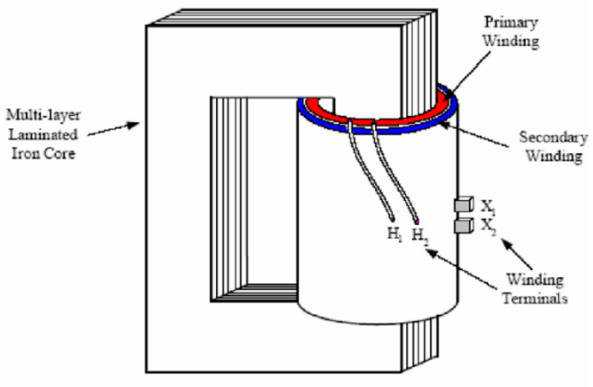
# طراحی ماشین‌های الکتریکی

## طراحی ترانسفورماتور




آرایش ترانسفورماتور تک فاز

به‌منظور کاهش حجم هادی به‌کاررفته و نیز افزایش راندمان انتقال انرژی، توان تولیدی در ولتاژهای بالا (مثلاً $400kV$) انتقال می‌یابد.

با توجه به ولتاژ ترمینال ژنراتورها و همچنین ولتاژ موردنیاز در شبکه‌های توزیع ($400kV$)، نیاز به تبدیل توان تولیدی از یک سطح ولتاژ به سطوح دیگر می‌باشد. این عمل توسط ترانسفورماتورها صورت می‌گیرد.

در شبکه‌های قدرت حداقل 5 برابر ظرفیت نصب‌شده، ترانسفورماتور موجود می‌باشد.

ترانسفورماتورها در موارد دیگری از قبیل یکسوسازها، کوره‌ها، جوشکاری و غیره نیز کاربرد دارند.

ترانسفورماتورها را می‌توان از منظرهای متفاوتی تقسیم‌بندی نمود:

۱. بر اساس موقعیت هسته و سیم‌پیچی: ستونی، زرهی

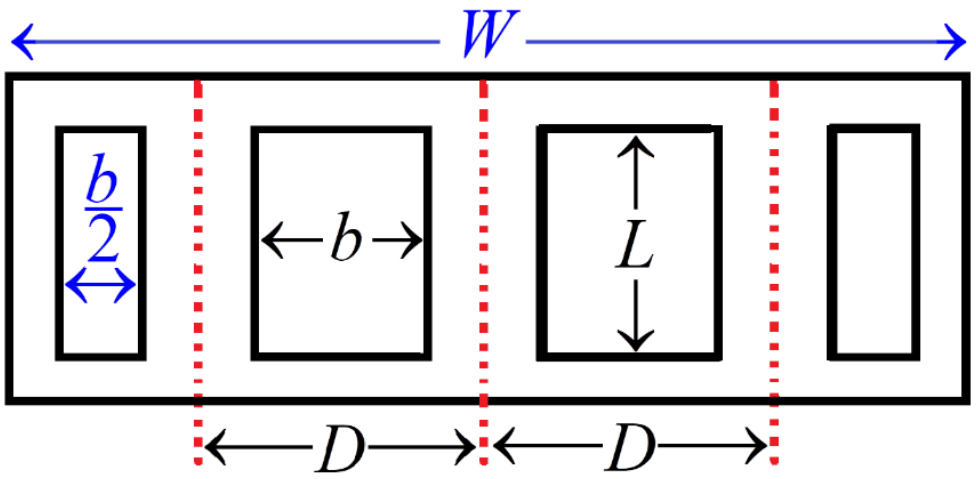
۲. بر اساس نسبت تبدیل: کاهنده، افزاینده

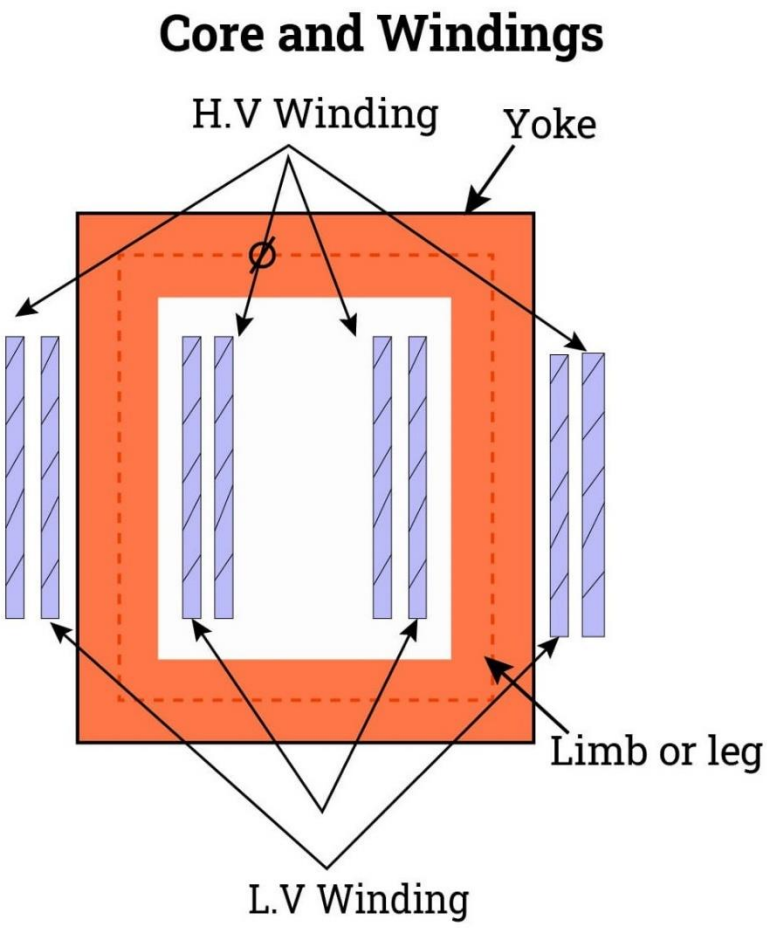
۳. بر اساس نوع سرویس‌دهی: توزیع قدرت

ترانسفورماتور نوع ستونی نسبت به نوع زرهی دارای ویژگی‌های زیر است:

I. ساده‌تر بودن ساخت
II. راحت‌تر بودن تعمیرات (دسترسی به سیم‌پیچی بیشتر است)
III. خنک‌سازی بهتر سیم‌پیچی و خنک‌سازی بدتر هسته
IV. شار پراکندگی بیشتر
V. استحکام مکانیکی کمتر

درمجموع و با توجه به نکات یادشده استفاده از هسته ستونی رایج‌تر است.






| *S. No.* | *Item of Comparison* | *Distribution Transformer* | *Power Transformer* |
|---|---|---|---|
| *1* | Capacity | Up to 500 kVA | Beyond 500 kVA, up to 500 MVA or more |
| *2* | Voltage rating | 11, 22, or 33 kV 440 V (3-phase) | 400 kV 33 kV,<br>220 kV 11 kV, etc. |
| *3* | Connection for 3-phase | Delta–Star, three-phase four-wire | Delta–Delta or Delta–Star, three-phase three-wire |
| *4* | Load condition | 100% load for a few hours, part load for some time, and no load for a few hours | Operates nearly at full load |
| *5* | Flux density | Up to 1.5 Tesla using CRGO steel | Up to 1.7 Tesla using CRGO steel |
| *6* | Current density | Up to 2.6 Amm² | Up to 3.3 Amm² |
| *7* | Ratio of iron loss to copper loss | Approximately 1: 3 | Approximately 1: 1 |
| *8* | Voltage regulation | 4% to 9% | 6% to 10% |
| *9* | Cooling | Self-oil-cooled | Forced oil-cooled |

**تفاوت طراحی ترانسفورماتور توزیع و قدرت**

I. ترانسفورماتور توزیع

- ✓ ترانسفورماتورهای کاهنده تا ظرفیت $500kVA$
- ✓ در طول 24 ساعت برق‌دار هستند، چه بار داشته باشد چه نداشته باشد. بنابراین تلفات آهنی در طول 24 ساعت اتفاق می‌افتد.
- ✓ دارای بار متغیر در طول شبانه‌روز هستند، بنابراین طراحی این ترانسفورماتورها باید به‌گونه‌ای باشد که دارای تلفات آهنی کمتر در مقایسه با تلفات مسی بار کامل باشد.
- ✓ این ترانسفورماتورها برای ماکزیمم بازده شبانه‌روزی حدود $50\%$طراحی می‌شوند.

II. ترانسفورماتور قدرت

- ✓ ترانسفورماتورهای افزاینده با ظرفیت بیش از $500kVA$
- ✓ شرایط بهره‌برداری ممکن است به‌گونه‌ای باشد که فقط در دوره‌های پربار شدن شبکه تحت بار قرار گیرند و در دوره‌های کم باری، ترانسفورماتور بی‌برق گردد.
- ✓ دارای ماکزیمم بازده حدود $80\%$در بار کامل

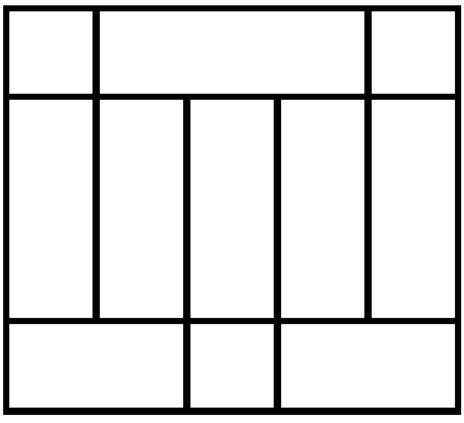
**ساخت ترانسفورماتور**

مدار مغناطیسی

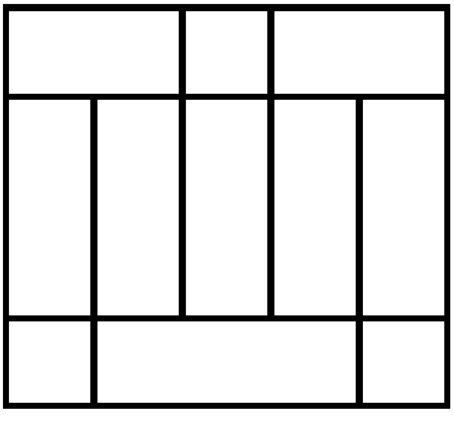
– به‌منظور کاهش تلفات جریان گردابی در هسته ترانسفورماتور، هسته به‌صورت ورقه ورقه ساخته می‌شود.

– ترتیب قرار گرفتن ورقه‌ها به‌صورت متوالی معکوس می‌گردد تا نقاط انفصال در کل ضخامت هسته، کنار یکدیگر قرار نگیرند و تلفات بی‌باری کاهش یابد.

هنگام پانچ ورقه‌های ترانسفورماتور برآمدگی‌هایی به وجود می‌آید که برای کاهش اثرات آن‌ها ورقه‌ها به ترتیب خاصی روی هم قرار می‌گیرند.

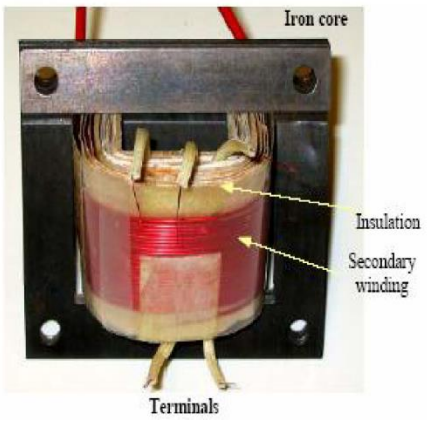


لایه‌های فرد (اول، سوم و ...)

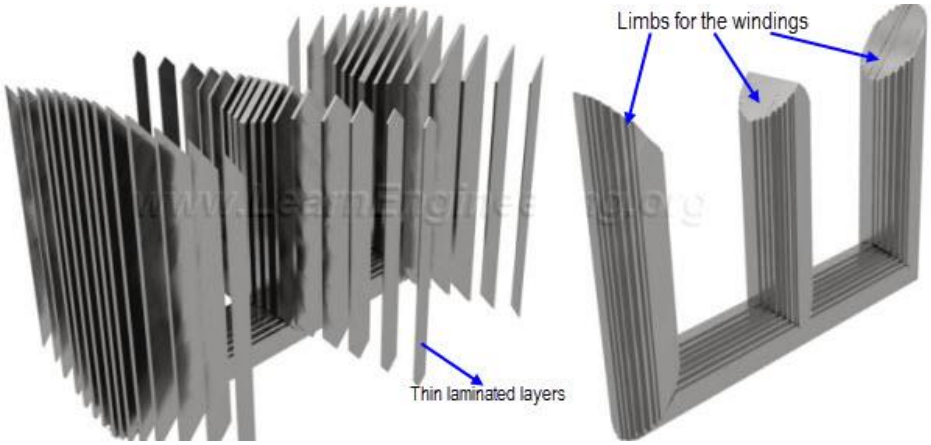


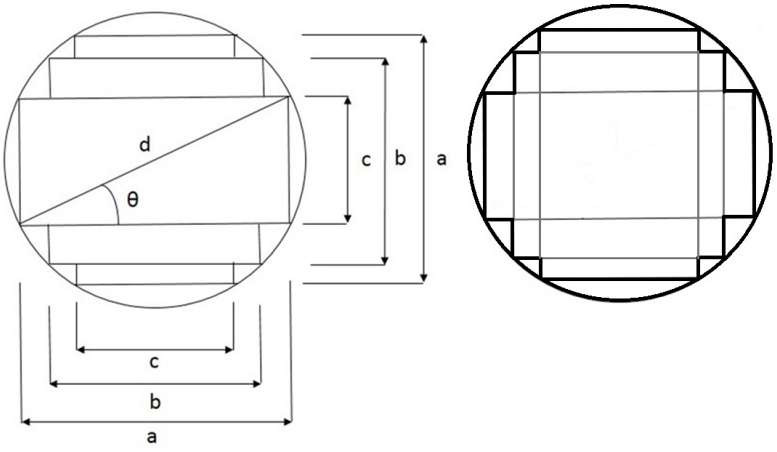
لایه‌های زوج (دوم، چهارم و ...)



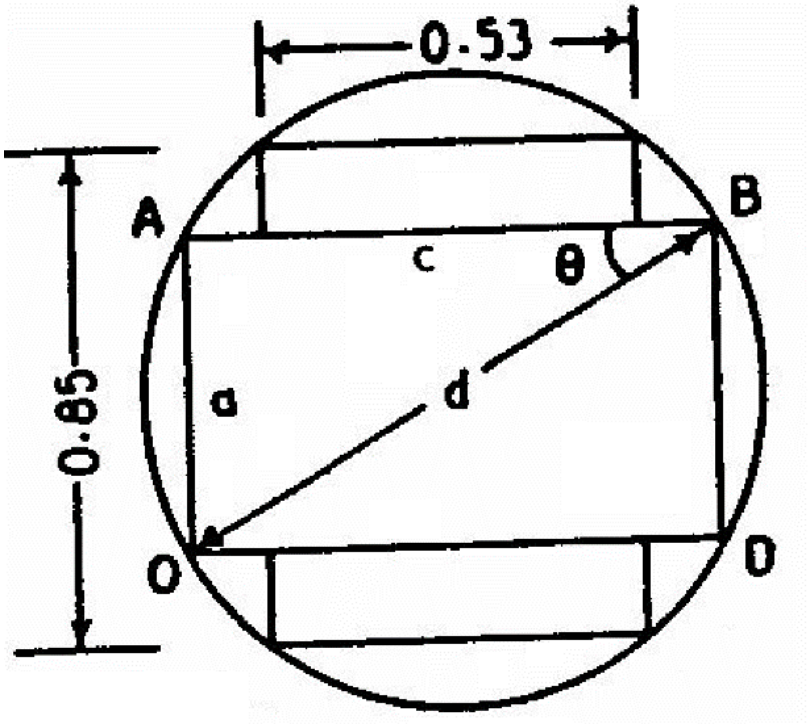



- به دلیل استقامت مکانیکی بهتر سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور به‌صورت مدور پیچیده می‌گردد.
- سطح مقطع هسته برای آنکه طول متوسط سیم‌پیچی کـاهش یابـد و از فضا بهتر استفاده شود، بهتر است به‌صورت دایره انتخاب گردد.
- به دلیل دشواری ساخت سطح مقطع دایره‌ی، آن را به‌صورت پله‌پله می‌سازند. همچنین با این کار قطر دایره محیطی برای یک سطح مقطـع خـاص نـسبت بـه هسته مربعی شکل، کاهش می‌یابد.
- تعداد پله‌ها با توجه به ظرفیت ترانسفورماتور و درنتیجه سطح مقطع موردنیاز، انتخاب می‌گردد.




سطح مقطع کلی بر اساس تعداد پله انتخاب‌شده ماکزیمم می‌شود.




سطح مقطع یک هستهٔ دو پله‌ای (صلیبی) برابر است با:

$$A = ac + 2\left[ a\left( \frac{c-a}{2} \right) \right]$$

$$A = 2ac - a^2$$

از طرفی با توجه به شکل $a = d\sin\theta$ و $c = d\cos\theta$ می‌باشد.

$$\Rightarrow \quad A = d^2(\sin 2\theta - \sin^2\theta)$$

برای به دست آوردن سطح مقطع هستهٔ دو پله‌ای ماکزیمم از رابطه قبل مشتق می‌گیریم:

$$\frac{dA}{d\theta} = d^2\left(2\cos 2\theta - 2\sin\theta\cos\theta\right) = 0$$

$$\theta = 31.72^\circ$$

$$A = 0.623d^2$$

$$A_{Net} = 0.56d^2$$

ضریب سطح مقطع هستهٔ با پله‌های متفاوت در جدول زیر ارائه شده است:

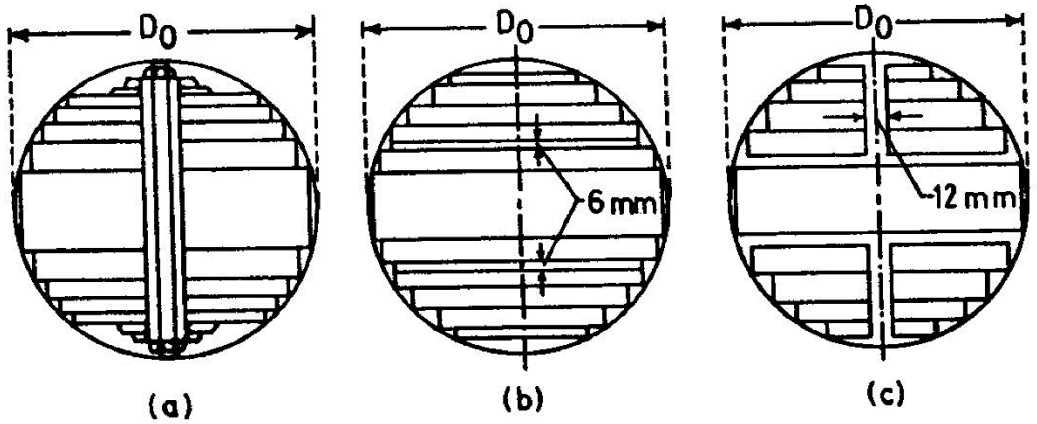
$$A = K_i d^2$$

| تعداد پله | مربعی | دو پله | سه پله | چهار پله |
|---|---|---|---|---|
| مقدار $K_i$ | 0.45 | 0.56 | 0.6 | 0.62 |

در جدول زیر نحوه انتخاب تعداد پله‌ها مشخص شده است:

| سطح مقطع مترمربع×1000 | کمتر از 3 | 3 تا 5 | 5 تا 7 | 7 تا 15 | 15 تا 45 | 45 تا 80 | 80 تا 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تعداد پله | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

در برخی از هسته‌ها برای تسهیل خنک‌سازی از کانال‌های روغن استفاده می‌شود:




**مقدمه‌ای بر طراحی**

برای شروع طراحی معمولاً مشخصات زیر از سوی مشتری به سازنده ارائه می‌شود:

- توان نامی
- نسبت تبدیل
- تعداد فازها
- فرکانس
- نوع ترانسفورماتور (زرهی یا ستونی)
- کلاس (توزیع یا قدرت)
- اتصالات سیم‌پیچی‌ها
- درصد تپ
- نوع خنک‌کنندگی
- و...

بعلاوه مقادیر محدودکننده موردنظر نظیر حداقل راندمان، رگولاسیون ولتاژ، حجم و ..... نیز مشخص و اعلام می‌گردد.

در فرآیند طراحی موارد زیر روشن می‌گردد:

I. مدار مغناطیسی شامل← ابعاد و جنس هسته، یوغ، پنجره و...
II. مدار الکتریکی شامل← سیم‌پیچی‌های فشارضعیف و فشارقوی
III. مشخصات خروجی← تلفات آهنی، تلفات مسی، رگولاسیون و...
IV. مشخصات تانک ← ابعاد و جنس و تعداد پره‌ها و...

**معادلات طراحی**

برای شروع طراحی مدار مغناطیسی، معادلات زیر مورد نیاز است:

- معادلات emf
- معادلات ولت بر دور
- معادلات خروجی

برای شروع طراحی معمولاً از معادلات emf شروع می‌شود:

$$e_1 = T_1 \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow E_1 = 4.44 T_1 \, f \varphi_m = 4.44 T_1 f B_m A_i$$

($T_1$: تعداد دور سیم‌پیچی اولیه)

از معادله فوق می‌توان نسبت ولت بر دور ترانسفورماتور را به دست آورد:

$$\frac{E_1}{T_1} = E_t = 4.44 f B_m A_i$$

(برای ولتاژ ورودی سینوسی:

$$E_{\max} = \omega N \varphi_{\max} = 2\pi f N B_{\max} A \Rightarrow E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = 4.44 N f \varphi_{\max}$$

که در آن N تعداد دور سیم‌پیچی اولیه است.)

با مشخص بودن نسبت ولت بر دور، متعاقباً سایر پارامترهای طراحی به دست می‌آید.

**معادلات ولت بر دور**

$r$: نسبت بارگذاری مغناطیسی در بار کامل به نیروی محرکه مغناطیسی(MMF)

$$\frac{\varphi_m}{IT} = const. = r$$

که در آن $I$=جریان، $T$=تعداد دور هادی هستند و $r$ ثابت هست.

$$\frac{kVA}{phase} :\rightarrow VI = \frac{V}{T} \times IT = E_t \times IT = E_t \times \frac{\varphi_{\mathrm{m}}}{r} \Rightarrow \frac{kVA}{phase} = E_t \times \frac{\varphi_{\mathrm{m}}}{r} \times 10^{-3}$$

$$\Rightarrow \varphi_{\mathrm{m}} = \frac{(\frac{kVA}{phase}) \times r}{E_t} \times 10^{3}$$

داشتیم $E_t = 4.44 f \varphi_m$ پس:

$$E_t = 4.44 f \times \frac{(\frac{kVA}{phase}) \times r}{E_t} \times 10^{3}$$

$$E_t = K \sqrt{\frac{kVA}{phase}}$$

$$K = \sqrt{4.44 fr \times 10^{3}}$$

ضریب K بر اساس جدول زیر به دست می‌آید:

| نوع ترانسفورماتور | مقدار ضریب K |
|---|---|
| ستونی سه فاز (قدرت) | 0.6 تا 0.65 |
| ستونی سه فاز (توزیع) | 0.45 تا 0.5 |
| زرهی سه فاز | 1.2 تا 1.3 |
| ستونی تک فاز | 0.75 تا 0.8 |
| زرهی تک فاز | 1 تا 1.1 |

$$A_i = \frac{\varphi_m}{B_m}$$

$$A_{cu} = aT = \frac{I}{\delta} \times T$$

$$\frac{A_i}{A_{cu}} = \frac{\varphi_m}{IT} \times \frac{\delta}{B_m} = const$$

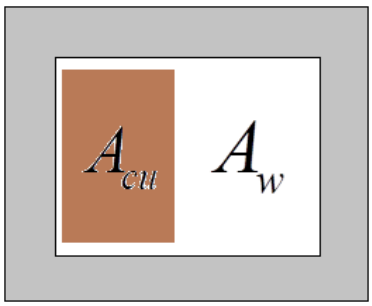
در اینجا $A_{cu}$ مجموع سطح مقطع مس در پنجره، $a$ سطح مقطع یک هادی و $\delta$ چگالی جریان هستند.

**معادله خروجی ترانسفورماتور تک فاز:**

برای مشخص کردن سایر ابعاد هسته از معادله خروجی استفاده می‌شود:

$$Q = V_2 I_2 = V_1 I_1$$

$$Q = 4.\ 44\ f B_m A_i T_1 I_1$$




$K_w$ : ضریب پنجره

$A_w$ : سطح کل پنجره

$A_{cu}$ : سطح مس پنجره

$$a_1T_1 + a_2T_2 = K_wA_w = A_{cu}$$

که در آن:

$a_1$ : سطح مقطع سیم‌پیچی اولیه و $a_2$ : سطح مقطع سیم‌پیچی ثانویه می‌باشند. پس

$$K_wA_w = \frac{I_1}{\delta_1}T_1 + \frac{I_2}{\delta_2}T_2$$

$\delta_1$ : چگالی جریان سیم‌پیچی اولیه

$\delta_2$ : چگالی جریان سیم‌پیچی ثانویه

با توجه به اینکه آمپر-دورهای اولیه و ثانویه برابر و $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ می‌باشد، داریم:

$$A_{cu} = K_wA_w = 2\frac{I_1T_1}{\delta}$$

**(نکته**: چرا $\delta_1 = \delta_2$؟ چون در این حالت تلفات کل مسی حداقل می‌شود. اثبات:

$u_p$ : حجم مس اولیه

$u_s$ : حجم مس ثانویه

$$\begin{cases} \alpha_p = \dfrac{I_p}{\delta_p} \\ \alpha_s = \dfrac{I_s}{\delta_s} \end{cases}$$

$$P_{cu} = RI^2, \quad R = \rho\frac{L}{\alpha}$$

$$\delta = \frac{I}{\alpha} \Rightarrow I = \alpha\delta$$

$$P_{cu} = \frac{\rho L}{\alpha}(\alpha\delta)^2 \Rightarrow P_{cu} = \rho L\alpha\delta^2 \Rightarrow P_{cu} = u\rho\delta^2$$

که در آن $u = L\alpha$ حجم می‌باشد.

داریم:

$$u_t = u_p + u_s$$

که در آن:

$u_t$: حجم کل مس

$u_p$: حجم مس اولیه

$u_s$: حجم مس ثانویه هستند.

برای تلفات داریم: ( $P_{cu_p}$ = تلفات مسی اولیه و $P_{cu_s}$ = تلفات مسی ثانویه)

$$P_{cu_p} = \rho \times \delta_p^2 \times u_p$$

$$P_{cu_s} = \rho \times \delta_s^2 \times u_s = \rho \times \delta_s^2 \times (u_t - u_p)$$

تلفات کل مسی:

$$P_{cu_t} = \rho\delta_p^2 u_p + \rho\delta_s^2 (u_t - u_p) = \rho(\delta_p^2 u_p + \delta_s^2 (u_t - u_p))$$

$$\frac{dP_{cu_t}}{du_p} = \rho(\delta_p^2 - \delta_s^2) = 0 \Rightarrow \delta_p = \delta_s$$

یعنی اگر $\delta_1 = \delta_2$ تلفات مسی حداقل می‌شود.)

$$K_w A_w = 2\frac{I_1 T_1}{\delta} \Rightarrow I_1 T_1 = \frac{K_w A_w \delta}{2}$$

**با جایگذاری آمپردورها:**

$$Q = 4.44\, f B_m A_i \frac{K_w A_w \delta}{2}$$

بنابراین معادله خروجی ترانسفورماتور تک فاز به دست می‌آید:

$$Q = 2.22\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

معادله خروجی ترانسفورماتور سه فاز:

$$Q = 3.33\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

اثبات فرمول‌ها:

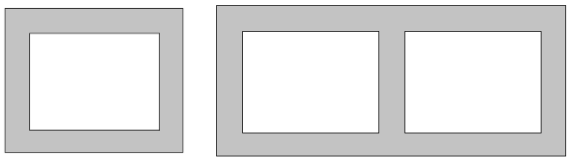
$$Q = 4.44\, f B_m A_i T_1 I_1$$
$$A_c = K_w A_w = 2\frac{I_1 T_1}{\delta} \Rightarrow I_1 T_1 = \frac{A_{cu}\delta}{2} = \frac{K_w A_w \delta}{2}$$

$$Q = 4.44\, f B_m A_i T_1 I_1$$

برای یک‌فاز داریم:

$$Q = 2.22\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

نکته: معادله خروجی سه فاز از رابطه زیر به دست می‌آید:



یک‌فاز　　سه فاز

برای تک فاز داشتیم:

$$A_{cu} = \frac{2 I_1 T_1}{\delta}$$

برای سه فاز چون تعداد پنجره‌ها دو برابر است خواهیم داشت:

$$A_{cu} = 2 \times \frac{2 I_1 T_1}{\delta}$$

پس:

$$I_1 T_1 = \frac{A_c \delta}{4} \qquad (*)$$

$$Q_{3p} = 3 Q_{1p} = 3 \times 4.44\, f B_m A_i T_1 I_1$$

$$Q_{3p} = 3 \times 4.44\, f B_m A_i T_1 I_1 \xrightarrow{I_1 T_1 = \frac{A_{cu}\delta}{4}} Q_{3p} = 3 \times 4.44\, f B_m A_i \frac{A_{cu}\delta}{4} = \frac{3 \times 4.44}{4}\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

$$\Rightarrow Q_{3p} = 3.33\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

**ضریب پنجره** ( $K_w$ )

ضریب پنجره به‌صورت نسبت سطح اشغال‌شده توسط مس در پنجره به کل فضای پنجره تعریف می‌شود.

فضای پنجره در ترانسفورماتور به‌وسیلهٔ مواد زیر پر می‌شود:

- مواد هادی (مس)
- عایق هادی‌های سیم‌پیچی

- عایق جداکننده سیم‌پیچی‌ها از یکدیگر و سیم‌پیچی‌ها از هسته
- روغن

جدول مقادیر ضریب اشغال پنجره

| KVA | 3.3KV | 11KV | 33KV | 110KV |
|---|---|---|---|---|
| **100** | 0.27 | 0.2 | 0.14 | - |
| **1000** | 0.38 | 0.28 | 0.2 | 0.15 |
| **2000** | 0.4 | 0.3 | 0.24 | 0.16 |
| **5000** | 0.42 | 0.34 | 0.26 | 0.18 |
| **10000** | 0.45 | 0.37 | 0.29 | 0.2 |

اصولاً مقدار ضریب پنجره به دو عامل بستگی دارد:

i. ولتاژ نامی سیم‌پیچی (ولتاژ بالاتر)
ii. ظرفیت نامی ترانسفورماتور

مقدار تقریبی $K_w$ توسط رابطه تجربی زیر می‌تواند مشخص می‌گردد:

$$K_w = \frac{10}{30+kV} \times C_F$$

در این رابطه، مقدار $C_F$ به‌قرار زیر تعیین می‌شود:

$$C_F \begin{cases} 0.8 \text{ تا } 0.95 & \text{ظرفیت بین } 5KVA \text{ تا } 50KVA \\ 1 & \text{ظرفیت بین } 50KVA \text{ تا } 250KVA \\ 1.05 \text{ تا } 1.2 & \text{ظرفیت بالاتر از } 250KVA \end{cases}$$

**انتخاب مقدار بارگذاری مغناطیسی ویژه ( $B_m$ ):**

اصولاً مقدار بارگذاری مغناطیسی ویژه با توجه به نوع فولاد مغناطیسی و با توجه به عوامل زیر تعیین می‌گردد:

- جریان بی‌باری
- حد اشباع مغناطیسی هسته
- تلفات آهنی هسته
- افزایش دمای ترانسفورماتور

با توجه به شاخص‌های یادشده بزرگی و کوچکی مقدار چگالی شار می‌تواند مزایا و معایبی را در برداشته باشد.

❖ **مزایای انتخاب $B_m$ بزرگ:**
❖ کاهش سطح مقطع هسته
❖ کاهش طول سیم‌پیچی

- ❖ وزن کمتر
- ❖ هزینه کمتر

❖ **معایب انتخاب $B_m$ بزرگ:**

۱. جریان مغناطیس کنندگی زیاد
۲. تلفات بی‌باری بالا
۳. اشباع مغناطیسی
۴. راندمان کمتر (به خاطر تلفات بی‌باری بیشتر)
۵. دمای بالاتر (به خاطر تلفات بی‌باری بیشتر)

درمجموع انتخاب $B_m$ با در نظر گرفتن نکات فنی و اقتصادی یادشده به‌صورت زیر انجام می‌گیرد:

چگالی شار ($B_m$):
- ترانسفورماتور قدرت:
  - با ورق HRSS 1.2 تا 1.4 تسلا
  - با ورق CROS 1.5 تا 1.7 تسلا
- ترانسفورماتور توزیع:
  - با ورق HRSS 1.1 تا 1.3 تسلا
  - با ورق CROS 1.4 تا 1.5 تسلا

**انتخاب مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه ($\delta$):**

با در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی، چگالی جریان $\delta$ مطابق جدول زیر انتخاب می‌گردد:

| | |
|---|---|
| ترانسفورماتور توزیع | $A/mm^2$ 2 تا 2.5 ← |
| ترانسفورماتور قدرت | $A/mm^2$ 2.3 تا 3.5 ← |
| ترانسفورماتورهای بزرگ با خنک‌سازی اجباری | $A/mm^2$ 3 تا 4.5 ← |

معمولاً چگالی جریان سیم‌پیچی فشارقوی را اندکی بیش از سیم‌پیچی فشار ضعیف در نظر می‌گیرند.

**ابعاد هسته ترانسفورماتور ستونی:**

ابعاد اصلی ستون ترانسفورماتور شامل موارد زیر است:

۱. قطر دایره محیطی هسته
۲. طول هسته که همان طول پنجره است
۳. فاصله بین مراکز ساق‌ها

عرض پنجره معمولاً $b_w = D - d$ در نظر گرفته می‌شود

نسبت ارتفاع به عرض پنجره بین 2.5 تا 4 در نظر گرفته می‌شود. تا شرایط زیر مهیا شود:

۱. سهولت سیم بندی
۲. افزایش انتقال حرارت
۳. کاهش اندوکتانس نشتی

ابعاد اصلی یوغ ترانسفورماتور شامل سطح مقطع یوغ (معمولاً مستطیلی)، طول یوغ و ضخامت یوغ می‌باشد:

$$W = 2D + 0.9d$$

سطح مقطع یوغ 10%تا 15% بزرگ‌تر از سطح مقطع ستون در نظر گرفته می‌شود:

$$A_y = (1.1 \sim 1.15)A_i$$

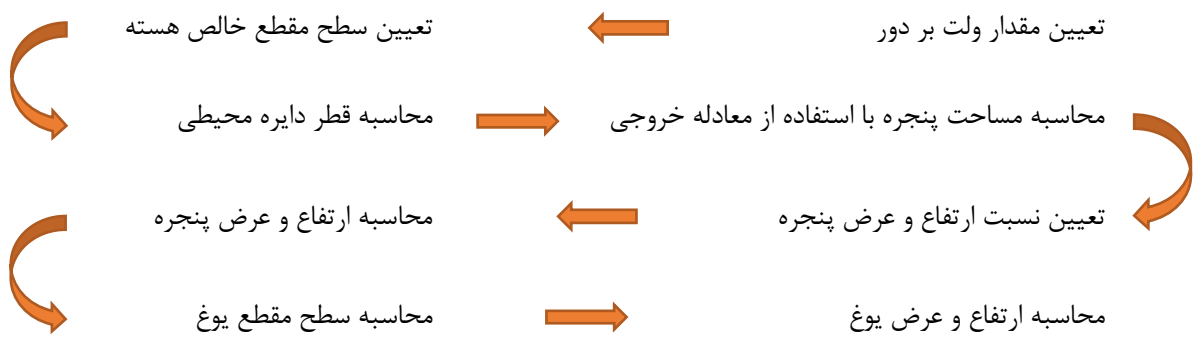
عرض یوغ (با توجه به تعداد پله):

$$b_y = (0.71 \sim 0.9)d$$

ضخامت یوغ

$$h_y = A_y / b_y$$

با توجه به مطالب مطروحه مراحل طراحی ترانسفورماتور به شکل زیر خواهد بود:




**مثال ۱:** مطلوب است طراحی هسته مغناطیسی ترانسفورماتور توزیع ستونی سه فاز، $250\,kVA$ ، $6600/400V$، $50Hz$. فرض کنید هسته ستون صلیبی و یوغ مستطیلی است.

<u>تعیین ولت بر دور</u>

$$E_t = K\sqrt{\frac{kVA}{phase}}$$

مقدار K را از جدول زیر انتخاب می‌کنیم

| نوع ترانسفورماتور | مقدار ضریب K |
|---|---|
| ستونی سه فاز (قدرت) | 0.6 تا 0.65 |
| ستونی سه فاز (توزیع) | 0.45 تا 0.5 |
| زرهی سه فاز | 1.2 تا 1.3 |
| ستونی تک فاز | 0.75 تا 0.8 |
| زرهی تک فاز | 1 تا 1.1 |

$$K = 0.45$$

$$E_t = 0.45\sqrt{\frac{250}{3}} = 4.1 \ \ V/t$$

انتخاب $B_m$

درمجموع انتخاب $B_m$ با در نظر گرفتن نکات فنی و اقتصادی یادشده به‌صورت زیر انجام می‌گیرد:

چگالی شار ($B_m$)

- ترانسفورماتور قدرت
  - با ورق HRSS 1.2 تا 1.4 تسلا
  - با ورق CROS 1.5 تا 1.7 تسلا
- ترانسفورماتور توزیع
  - با ورق HRSS 1.1 تا 1.3 تسلا
  - با ورق CROS 1.4 تا 1.5 تسلا

$B_m = 1.2T$ انتخاب می‌گردد.

$$E_t = 4.44\, f B_m A_i \xrightarrow[f=50]{E_t=4.1,\, B_m=1.2} 4.1 = 4.44 \times 50 \times 1.2 A_i \Rightarrow A_i = 0.0154\, m^2$$

انتخاب قطر دایره محیطی:

بر اساس جدول زیر تعداد پله‌های موردنیاز 5 پله می‌باشد ولی در این مسئله برای سهولت 2 پله انتخاب می‌کنیم.

| سطح مقطع مترمربع×1000 | کمتر از 3 | 3 تا 5 | 5 تا 7 | 7 تا 15 | 15 تا 45 | 45 تا 80 | 80 تا 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تعداد پله | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

انتخاب $K_i$ (ضریب سطح مقطع هسته)

| تعداد پله | مربعی | دو پله | سه پله | چهار پله |
|---|---|---|---|---|
| مقدار $K_i$ | 0.45 | 0.56 | 0.6 | 0.62 |

$$K_i = 0.56$$

$$A_i = K_i d^2 \xrightarrow[K_i=0.56]{A_i=0.0154} 0.0154 = 0.56 d^2 \Rightarrow d = 0.166\, m$$

با انتخاب چگالی جریان و نسبت ارتفاع به عرض پنجره، از روی معادله خروجی ابعاد پنجره محاسبه می‌شود:

$$Q = 3.33\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

انتخاب $\delta$ (بارگذاری الکتریکی ویژه):

- ترانسفورماتور توزیع ← 2 تا 2.5 $A/mm^2$
- ترانسفورماتور قدرت ← 2.3 تا 3.5 $A/mm^2$
- ترانسفورماتورهای بزرگ با خنک‌سازی اجباری ← 3 تا 4.5 $A/mm^2$

$$\delta = 2.2\, A/mm^2$$

انتخاب ضریب اشغال پنجره $K_w$:

$K_w$ را از جدول زیر و یا با استفاده فرمول تجربی داده‌شده در پایین انتخاب می‌کنیم.

جدول مقادیر ضریب اشغال پنجره

| KVA | 3.3KV | 11KV | 33KV | 110KV |
|---|---|---|---|---|
| **100** | 0.27 | 0.2 | 0.14 | - |
| **1000** | 0.38 | 0.28 | 0.2 | 0.15 |
| **2000** | 0.4 | 0.3 | 0.24 | 0.16 |
| **5000** | 0.42 | 0.34 | 0.26 | 0.18 |
| **10000** | 0.45 | 0.37 | 0.29 | 0.2 |

از جدول $K_w = 0.3$ را انتخاب می‌کنیم.

مقدار تقریبی $K_w$ توسط رابطه تجربی زیر می‌تواند مشخص می‌گردد:

$$K_w = \frac{10}{30 + kV} \times C_F$$

در این رابطه، مقدار $C_F$ به‌قرار زیر تعیین می‌شود:

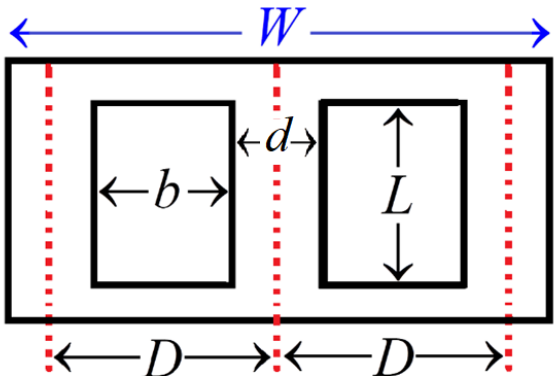
$$C_F \begin{cases} 50KVA \text{ تا } 5KVA & \text{ظرفیت بین} \quad 0.8 \text{ تا } 0.95 \\ 250KVA \text{ تا } 50KVA & \text{ظرفیت بین} \quad 1 \\ 250KVA & \text{ظرفیت بالاتر از} \quad 1.05 \text{ تا } 1.2 \end{cases}$$

از فرمول $K_w = \frac{10}{30+6.6} \times 1 \Rightarrow K_w = 0.27$ محاسبه می‌شود. درنهایت $K_w = 0.3$ را انتخاب می‌کنیم.

$$Q = 3.33\, f B_m A_i A_w K_w \delta$$

$$\Rightarrow A_w = \frac{Q}{3.33\, f B_m A_i K_w \delta} = \frac{250 \times 10^3}{3.33 \times 50 \times 1.2 \times 0.0154 \times 0.3 \times 2.2 \times 10^6} = 0.123 m^2$$

عرض پنجره معمولاً $b_w = D - d$ در نظر گرفته می‌شود.




نسبت ارتفاع به عرض پنجره بین 2.5 تا 4 در نظر گرفته می‌شود. می‌گیریم: $\frac{L}{b}=3$

$$A_w = L\times b = L\times\frac{L}{3} = 0.123 \Rightarrow L^2 = 0.369$$
$$\Rightarrow L = 0.6,\ b = 0.2,\ D = b+d = 0.2+0.166 = 0.366$$

اکنون شار و چگالی شار در یوغ حساب می‌شود:

$A_y$ (سطح مقطع یوغ) 10 درصد بیشتر از $A_i$ (سطح مقطع خالص هسته) انتخاب می‌شود.

$$\begin{cases}\varphi_m = B_m A_i = 1.2\times 0.0154 = 0.0185 Wb\\ A_y = 1.1A_i = 1.1\times 0.0154 = 0.01694 m^2\end{cases}$$

$$\varphi_m = B_y A_y \Rightarrow 0.0185 = B_y \times 0.01694 \Rightarrow B_y = 1.09T$$

$B_y$ چگالی شار در یوغ است.

$$W = 2D + 0.85d = 0.87\ m$$

$$b_y = 0.85d = 0.14\,m$$

$$h_y = \frac{A_y}{b_y} = 0.12\,m$$

$b_y$ عرض یوغ و $h_y$ ضخامت یوغ هستند.

هنگام حل معادلات همواره باید به تعداد پنجره‌ها توجه داشت.

**مثال ۲:** یک ترانسفورماتور $800KVA$، $50Hz$، سه فاز، $6600/400V$، اولیه مثلث، ثانویه ستاره و نوع ستونی را در نظر بگیرید، طراحی آن را انجام دهید.

**طراحی چارچوب مغناطیسی (بخش ۱)**

با فرض هسته سه‌پله‌ای، ضریب $K_i = 0.6$ از جدول زیر انتخاب می‌شود.

| تعداد پله | مربعی | دو پله | سه پله | چهار پله |
|---|---|---|---|---|
| مقدار $K_i$ | 0.45 | 0.56 | 0.6 | 0.62 |

با توجه به ظرفیت، ترانسفورماتور قدرت است و مقدار K از جدول زیر انتخاب می‌شود.

| نوع ترانسفورماتور | مقدار ضریب K |
|---|---|
| ستونی سه فاز (قدرت) | 0.6 تا 0.65 |
| ستونی سه فاز (توزیع) | 0.45 تا 0.5 |
| زرهی سه فاز | 1.2 تا 1.3 |
| ستونی تک فاز | 0.75 تا 0.8 |
| زرهی تک فاز | 1 تا 1.1 |

$$K = 0.6$$

تعیین ولت بر دور

$$E_t = K_i\sqrt{\frac{KVA}{phase}}$$

$$E_t = 0.6\sqrt{\frac{800}{3}} = 9.798 \;\; V/turn$$

انتخاب $B_m$

چگالی شار ($B_m$)
- ترانسفورماتور قدرت
  - با ورق HRSS 1.2 تا 1.4 تسلا
  - با ورق CROS 1.5 تا 1.7 تسلا
- ترانسفورماتور توزیع
  - با ورق HRSS 1.1 تا 1.3 تسلا
  - با ورق CROS 1.4 تا 1.5 تسلا

فرض می‌کنیم ترانسفورماتور با ورق CROS باشد پس چگالی شار ماکزیمم در هسته، $B_m = 1.5T$ انتخاب می‌گردد. با $B_m = 1.5\ T$، مساحت هسته ($A_i$) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_t = 4.44\,fB_mA_i \Rightarrow A_i = \frac{E_t}{4.44\times f\times B_m}$$

$$\left.\begin{array}{c} E_t = 9.798 \\ B_m = 1.5 \\ f = 50 \end{array}\right\} \Rightarrow A_i = \frac{9.798}{4.44\times 50\times 1.5} \Rightarrow A_i = 0.0294m^2$$

قطر هسته (قطر دایره پیرامونی هسته):

$$A_i = K_id^2 \xrightarrow[K_i=0.6]{A_i=0.0294} d = \sqrt{\frac{A_i}{K_i}} = \sqrt{\frac{0.0294}{0.6}} = 0.2214 \simeq 0.23 \Rightarrow d = 0.23m$$

با توجه به اینکه $d = 0.23m$ انتخاب گردید لذا باید مقادیر اصلاح‌شده $A_i$ و $E_t$ محاسبه شوند:

$$A_i = K_i d^2 \xrightarrow[K_i=0.6]{d=0.23} A_i = 0.6\times 0.23^2 = 0.0317 m^2$$

$$\left.\begin{array}{c} A_i = 0.0317 \\ B_m = 1.5 \\ f = 50 \end{array}\right\} \Rightarrow E_t = 4.44\, f B_m A_i = 4.44\times 50\times 1.5\times 0.0317 = 10.57 \ \ V/turn$$

انتخاب $\delta$ (بارگذاری الکتریکی ویژه):

| | |
|---|---|
| ترانسفورماتور توزیع | $\leftarrow$ 2 تا 2.5 $A/mm^2$ |
| ترانسفورماتور قدرت | $\leftarrow$ 2.3 تا 3.5 $A/mm^2$ |
| ترانسفورماتورهای بزرگ با خنک‌سازی اجباری | $\leftarrow$ 3 تا 4.5 $A/mm^2$ |

$$\delta = 2.6\, A/mm^2$$

انتخاب ضریب اشغال پنجره $K_w$:

مقدار تقریبی $K_w$ توسط رابطه تجربی زیر می‌تواند مشخص گردد:

$$K_w = \frac{10}{30+kV}\times C_F$$

در این رابطه، مقدار $C_F = 1.15$ از جدول زیر تعیین می‌شود:

| | | |
|---|---|---|
| $50KVA$ تا $5KVA$ | ظرفیت بین | 0.8 تا 0.95 |
| $250KVA$ تا $50KVA$ | ظرفیت بین | 1 |
| $250KVA$ | ظرفیت بالاتر از | 1.05 تا 1.2 |

$C_F$

$$K_w = \frac{10}{30+\frac{6600}{1000}}\times 1.15 \Rightarrow K_w = 0.314$$

مساحت پنجره:

$$Q = 3.33\, f B_m A_i A_w K_w \delta \Rightarrow$$

$$A_w = \frac{Q}{3.33\, f B_m K_w \delta A_i} = \frac{kVA\times 1000}{3.33\, f B_m K_w \delta \times 10^6 A_i} =$$

$$\frac{800\times 1000}{3.33\times 50\times 1.5\times 0.314\times 2.6\times 10^6\times 0.0317} = 0.1235 m^2$$

طول هسته:

نسبت ارتفاع به عرض پنجره بین 2.5 تا 4 در نظر گرفته می‌شود. می‌گیریم: $\frac{L}{b} = 3$

$$A_w = L \times b = L \times \frac{L}{3} = 0.1235 \Rightarrow L^2 = 0.3705 \Rightarrow L = 0.6 \simeq 0.59$$

$$\Rightarrow b = 0.196\,m$$

عرض پنجره معمولاً $b = D - d$ در نظر گرفته می‌شود.

$$D = b + d \xrightarrow[d=0.23]{b=0.196} D = 0.196 + 0.23 = 0.426 \simeq 0.44$$

$W$ طول یوغ:

$$W = 2D + 0.9d = (2 \times 0.44) + (0.9 \times 0.23) = 1.1\ m$$

$A_y$ (سطح مقطع یوغ) 15 درصد بیشتر از $A_i$ (سطح مقطع هسته) انتخاب می‌شود.

$$A_y = 1.15A_i = 1.15 \times 0.0317 = 0.03645 m^2$$

اکنون شار و چگالی شار در یوغ حساب می‌شود:

شار در هسته:

$$\varphi_m = B_m A_i = 1.5 \times 0.0317 = 0.04755 Wb$$

چگالی شار در یوغ:

$$\varphi_m = B_y A_y \Rightarrow B_y = \frac{\varphi_m}{A_y} = \frac{0.04755}{0.03645} = 1.3T$$

$B_y$ چگالی شار در یوغ است. به دلیل اینکه سطح مقطع یوغ از سطح مقطع ستون بزرگ‌تر است چگالی شار در یوغ کاهش می‌یابد.

$$b_y = 0.9d = 0.9 \times 0.23 = 0.207m$$

$$h_y = \frac{A_y}{b_y} = \frac{0.03645}{0.207} = 0.18m$$

$b_y$ عرض یوغ و $h_y$ ارتفاع یوغ هستند.

*تلفات آهنی هسته:*

وزن هسته:

$$KgC = N_c \times A_c \times L \times d_s$$

که در آن:

$KgC$: وزن هسته

$N_c$: تعداد ساق‌های هسته

$A_c$: سطح مقطع اصلی هسته ( $A_i$: سطح مقطع خالص هسته)

$d_s$: چگالی وزنی ورق ترانسفورماتور ( $d_s = 7.55\times10^{-3}\ kg/m^3$ ) هستند.

برای $A_i$ (سطح مقطع خالص هسته) داریم:

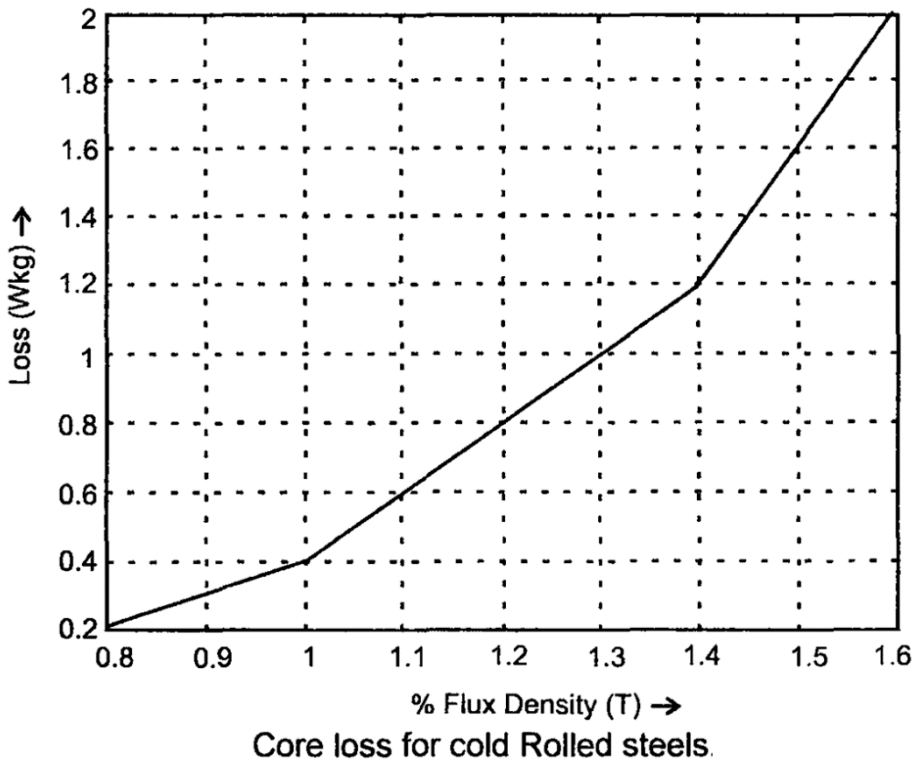
$$A_i = K_s A_c$$

که در آن $K_s$: ضریب آهن (stacking factor - ضریب چسبندگی) است. در اینجا $K_s = 0.92$ انتخاب می‌کنیم.

$$A_c = \frac{A_i}{K_s} = \frac{0.0317}{0.92} = 0.0345\,m^2$$

$$KgC = N_c \times A_c \times L \times d_s = 3\times0.0345\times0.59\times7.55\times1000 = 461.04\,kg$$

از شکل زیر تلفات ویژه در $B_m = 1.5\ T$ برابر $WpKgC = 1.6W/kg$ است.



Core loss for cold Rolled steels.

تلفات آهن هسته:

$$P_{iC} = WpKgC \times KgC = 1.6\times461.04 = 737.67\,W$$

وزن یوغ:

$$KgY = 2\times A_y \times W \times d_s = 2\times0.0397\times1.1\times7.55\times1000 = 659\,kg$$

چگالی شار در یوغ:

$$B_Y = (A_c / A_y)\times B_m = (0.0345/0.0397)\times1.5 = 1.3043T$$

از شکل بالا، تلفات ویژه در $B_Y = 1.3043T$ برابر $1.009W/kg$ است.

تلفات آهن یوغ:

$$P_{iY} = WpKgY \times KgY = 1.009 \times 659 = 664.73W$$

با 5% اضافه:

$$P_i = 1.05 \times (P_{iC} + P_{iY}) / 1000 = 1.05 \times (737.67 + 664.73) = 1472.5W = 1.4725kW$$

**جریان بی‌باری (بخش ۲)**

آمپر-دور بر متر برای هسته ( $atC$ )

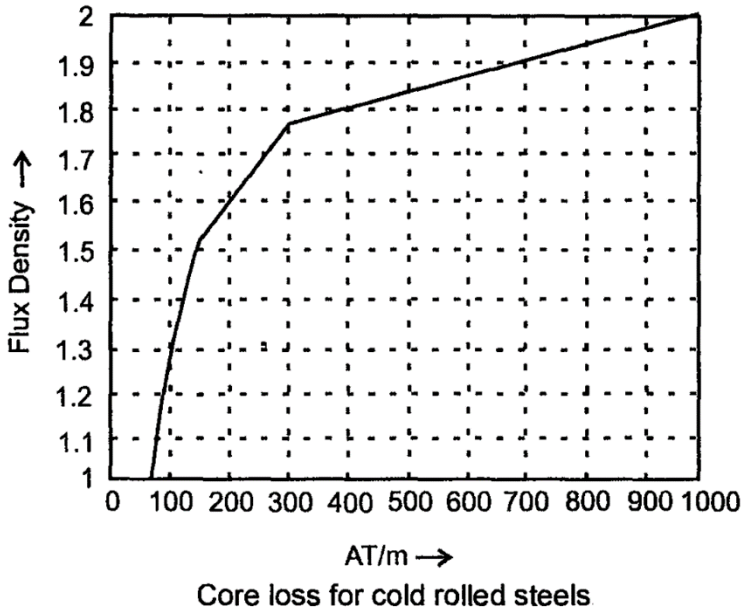
از شکل زیر AT/m (آمپر-دور بر متر) برای هسته ( $atC$ ) در $B_m = 1.5T$ :

$$atC = 150 \ AT/m$$

آمپر-دور بر متر برای یوغ ( $atY$ ):

از شکل زیر AT/m برای یوغ در $B_y = 1.3T$ :

$$atY = 109.6 \ AT/m$$



Core loss for cold rolled steels

آمپر-دور کل هسته:

$$ATC = N_C \times atC \times L$$

که در آن

$N_c$ : تعداد ساق‌های هسته است.

$$ATC = 3 \times 150 \times 0.59 = 265.5$$

آمپر-دور یوغ:

$$ATY = N_Y \times atY \times W$$

که در آن

$N_Y$ : تعداد یوغ‌های است.

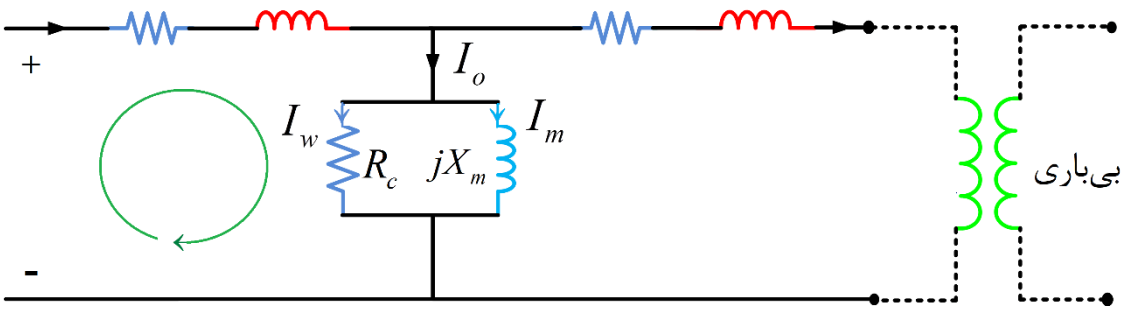
$$ATY = 2 \times 109.6 \times 1.1 = 241.12$$

آمپر-دور هر فاز:

$$AT_{ph} = \frac{ATC + ATY}{ph}$$

$$AT_{ph} = \frac{265.5 + 241.12}{3} = 168.87$$

برای هر فاز:




$$I_o = \sqrt{I_w^2 + I_m^2}$$

$$E_t = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{V_2}{E_t} = \frac{440/\sqrt{3}}{10.57} = 24.03 \Rightarrow T_2 \simeq 24$$

$$S = \sqrt{3} V_L I_L \Rightarrow I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} V_2} = \frac{800 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 440} \Rightarrow I_2 = 1049.7 A$$

تلفات کل آهن $P_i = 1.4725 kW$ هست پس:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta \Rightarrow I_w = \frac{P_i}{\sqrt{3} V} = \frac{1.4725 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 440} \Rightarrow I_w = 1.9322 A$$

جریان مغناطیس‌کنندگی $I_m$: با در نظر گرفتن 15% اضافه خواهیم داشت

$$I_m = \frac{1.15 AT_{ph}}{\sqrt{2} T_2} = \frac{1.15 \times 168.87}{\sqrt{2} \times 24} \Rightarrow I_m = 5.7218 A$$

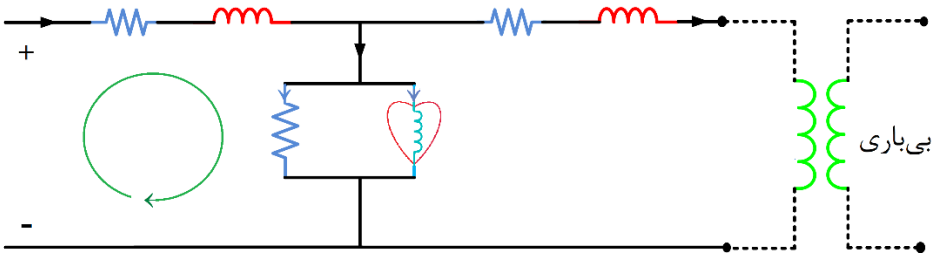
$$I_o = \sqrt{I_w^2 + I_m^2} = \sqrt{1.9322^2 + 5.7218^2} = 6.0392\,A$$

نسبت $I_o byI_2 = \frac{I_o}{I_2} \times 100$:

$$I_o byI_2 = \frac{I_o}{I_2} \times 100 = \frac{6.0392}{1049.7} \times 100 = 0.5753$$

این نسبت باید بین 0.5 تا 1 باشد که در اینجا این شرط برقرار می‌باشد.

نکته: کلاً در مدار معادل ماشین‌های الکتریکی هر سلفی که به‌صورت موازی قرار می‌گیرد قلب تپنده مدار بوده و انجام کار مفید مدار را بر عهده دارد و هر سلفی که به‌صورت سری قرار می‌گیرد مُرده بوده و به‌منظور مدل‌سازی شارهای پراکندگی و نشتی وجود دارد.




### طراحی سیم‌پیچی

سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و قوی روی‌هم قرار می‌گیرند و سیم‌پیچی فشار ضعیف نزدیک هسته قرار می‌گیرد زیرا:

- نیاز به عایق‌کاری کمتر سیم‌پیچی فشار ضعیف
- احتمال خطای کمتر سیم‌پیچی فشار ضعیف و هسته
- کاهش طول متوسط سیم‌پیچی‌ها
- کاهش هزینه عایق‌کاری
- سهولت تعبیه تپ بر روی سیم‌پیچی فشارقوی

### انواع سیم‌پیچی:

سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و قوی باید طوری طراحی گردند تا موارد زیر را تأمین نمایند:

- استقامت الکتریکی در شرایط معمول
- استقامت الکتریکی در شرایط اضافه ولتاژ و ...
- استقامت مکانیکی در مقابل تنش‌ها
- سهولت خنک‌سازی

سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- هم‌مرکز

- ساندویچی

عایق‌های سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور:

به دلیل سطح بالای ولتاژ، در طراحی عایق‌های سیم‌پیچی ترانسفورماتور، شرایط زیر باید لحاظ گردد:

- استقامت مکانیکی در مقابل تنش‌های ناشی از اتصال کوتاه
- استقامت عایقی (دی‌الکتریک) بالا در مقابل اضافه ولتاژها و شرایط گذرا
- غیرقابل‌حل بودن در روغن

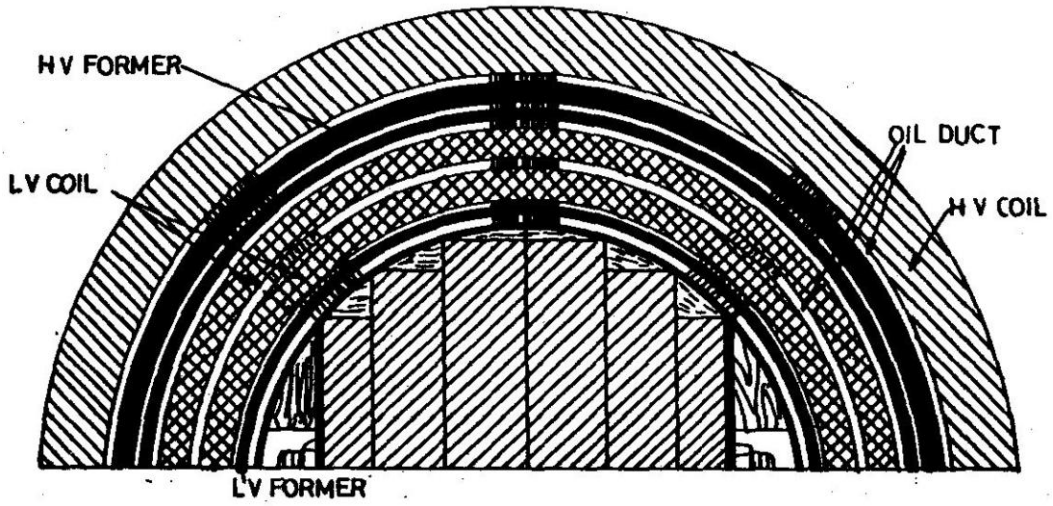
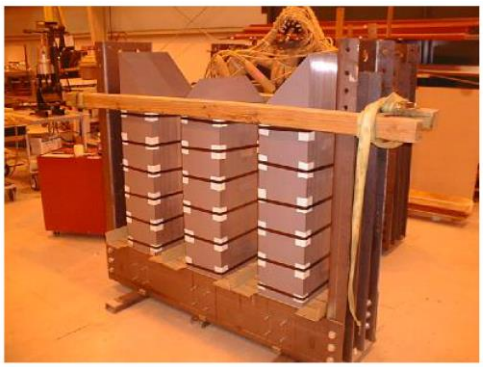
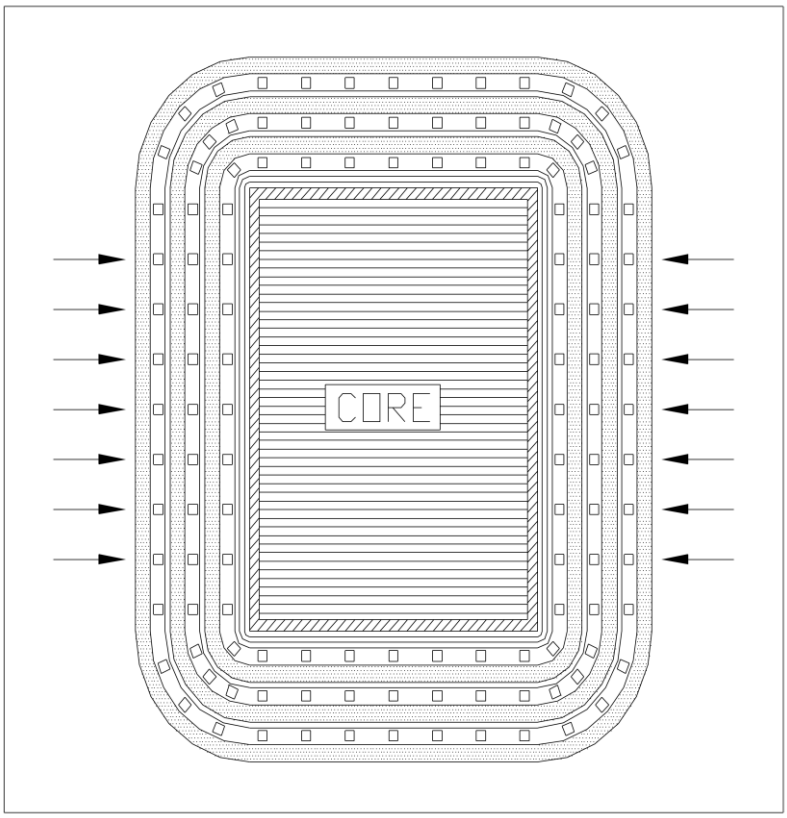



**Fig.5.19. Half sectional plan of limb**

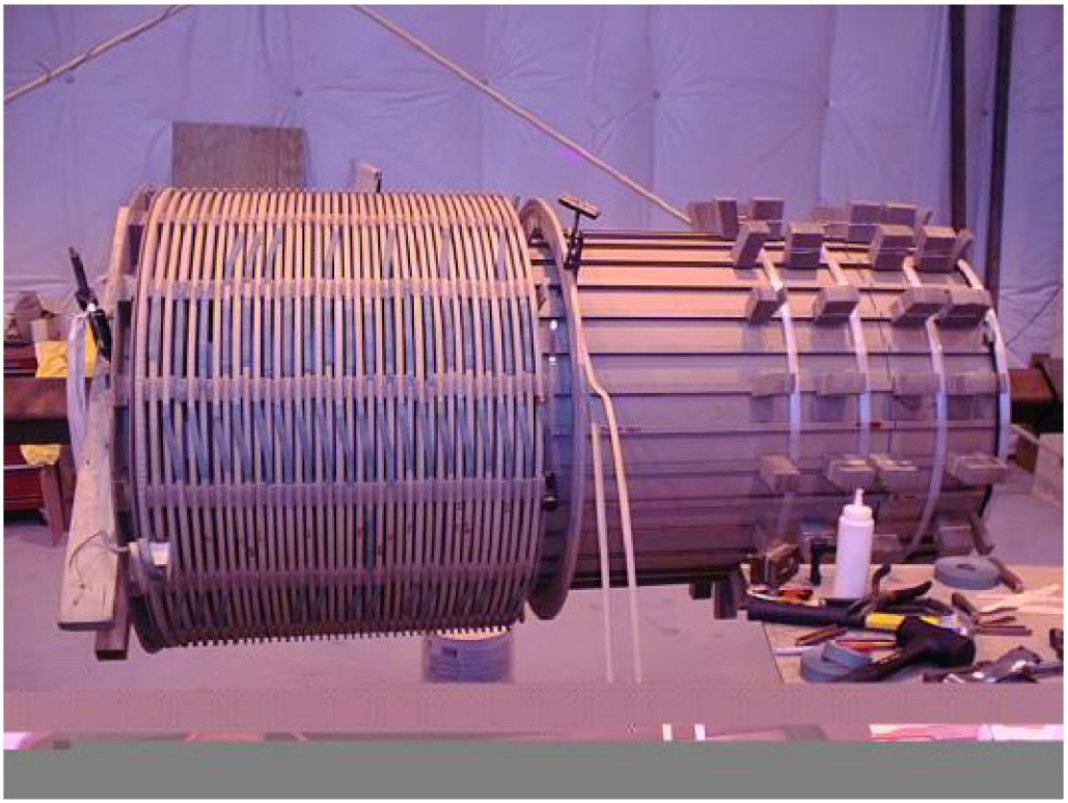


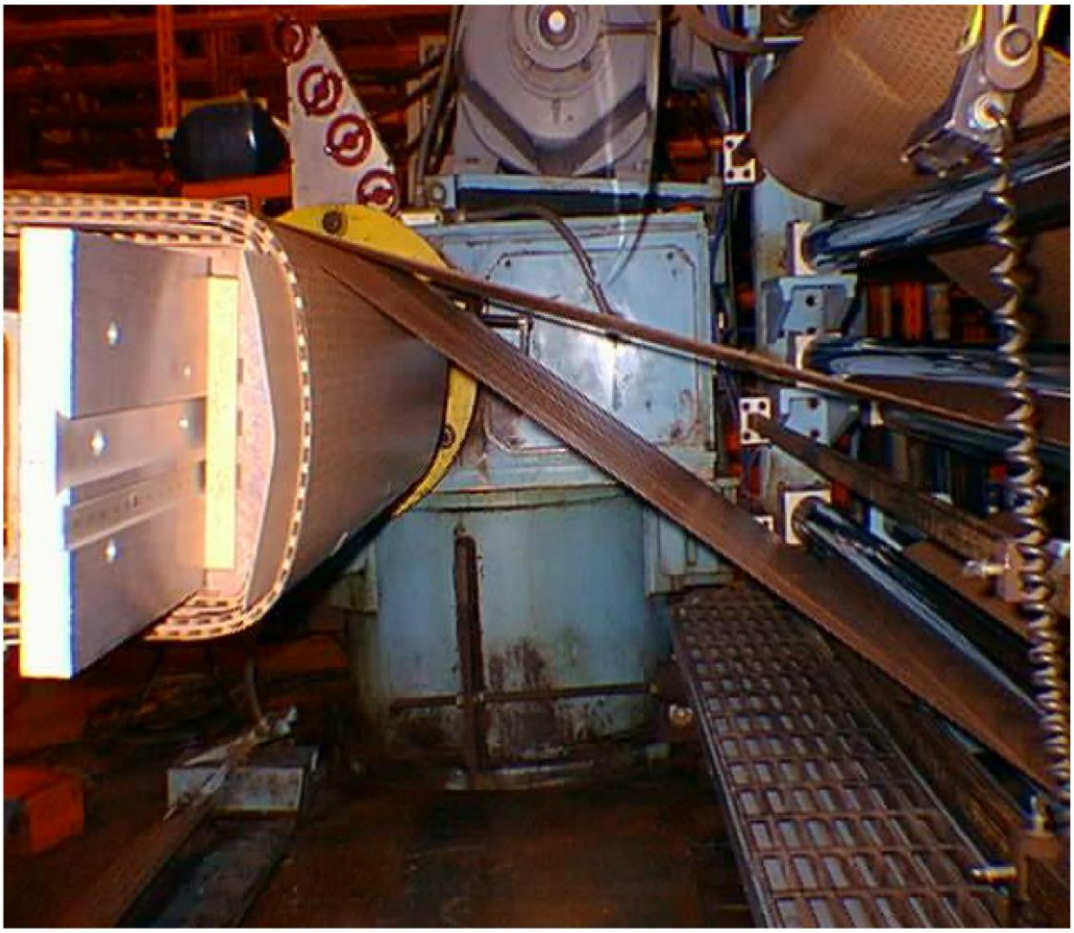


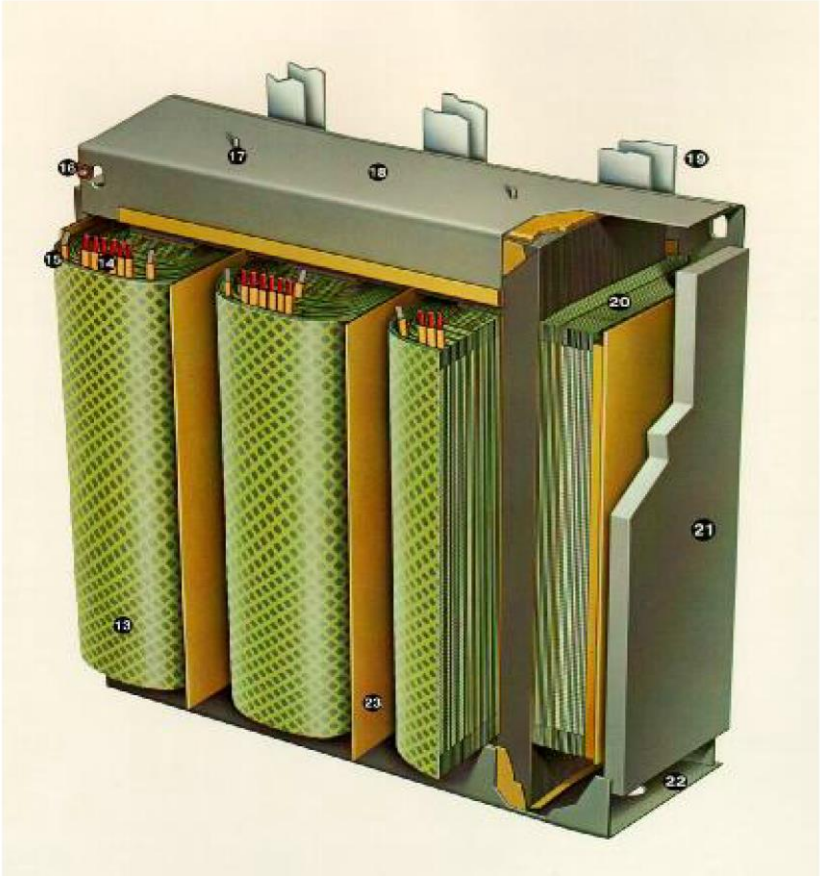

CORE



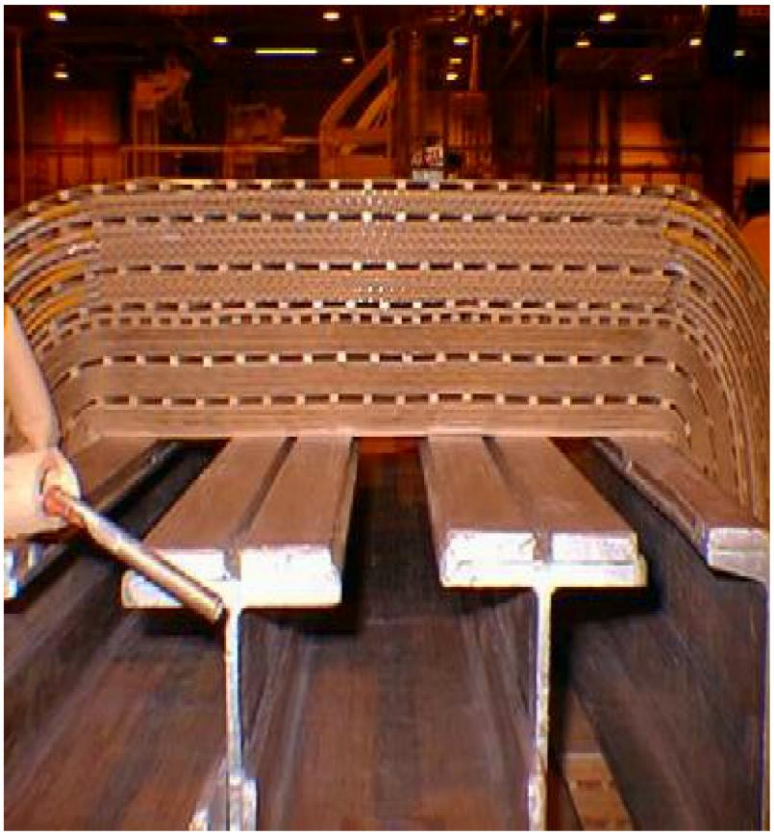







17
18
19
16
15
14
20
21
13
23
22





**طراحی سیم‌پیچی:**

برای طراحی سیم‌پیچی داده‌های ورودی زیر موردنیاز هستند:

۱. توان نامی (کیلوولت‌آمپر ترانسفورماتور)
۲. ولت بر دور (مقدار EMF بردور)
۳. ولتاژ نامی (ولتاژ ترانسفورماتور)
۴. نحوه اتصال سیم‌پیچی
۵. ابعاد اصلی هسته و پنجره (سیم‌پیچی باید در داخل پنجره جای بگیرد.)
۶. مشخصات هادی‌ها، چگالی جریان
۷. اطلاعاتی در مورد بحث‌های عایقی (جداول مربوطه)
۸. سایز استاندارد هادی‌ها (جداول مربوطه)

**خروجی طراحی:**

۱. تعداد دور در هر فاز
۲. سطح مقطع هادی‌ها
۳. انتخاب نوع مقطع هادی (مستطیلی برای LV یا دایره‌ای برای HV)
۴. قطر داخلی سیم‌پیچی
۵. قطر خارجی سیم‌پیچی
۶. مقاومت سیم‌پیچی (به‌وسیله طول متوسط)

**مسئله:**

یک ترانسفورماتور سه فاز، $300\,kVA$، $11000 / 400V$، 50 هرتز، اولیه مثلث ثانویه، ستاره، ستونی با مقدار 6 ولت بر دور، قطر دایره محیطی 19 سانتیمتر، ارتفاع پنجره 54 سانتی‌متر و عرض پنجره 18.5 سانتی‌متر در نظر است. طراحی سیم‌پیچی های آن را انجام دهید.

شکل زیر یک تصویر شماتیک کامل سیم‌پیچی LV و HV با در نظر گرفتن فضاهای عایقی و کانال روغن را نشان می‌دهد.

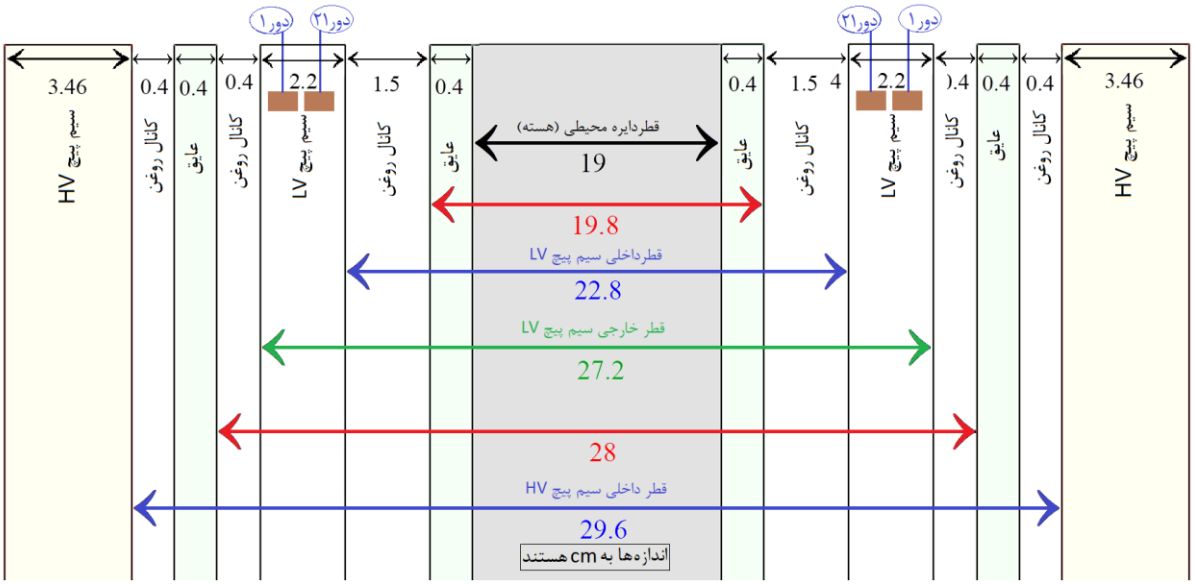
نکته: ضخامت کانال روغن و عایق مابین هسته و سیم‌پیچی LV و بین سیم‌پیچی LV و HV با توجه به جداول طراحی مشخص می‌گردند.

**محاسبات اصلی سیم‌پیچی:**

نکته: در طراحی سیم‌پیچی‌ها برای سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف از هادی‌های با سطح مقطع مستطیلی استفاده می‌شود. هادی‌های با سطح مقطع مستطیلی به خاطر کرونا در ولتاژهای کم به کار گرفته می‌شوند. فرم‌دهی این هادی‌ها راحت‌تر است و می‌توان به‌راحتی آن‌ها را خم کرد. در صورت نیاز چند هادی باهم نیز به‌کاربرده می‌شوند. هادی‌های با سطح مقطع دایره‌ای در ولتاژهای زیاد استفاده می‌شوند زیرا سطح صاف و گرد باعث کاهش کرونا می‌گردد.

<u>محاسبات سیم‌پیچی ثانویه (سیم‌پیچی LV):</u>

محاسبه تعداد دورهای سیم‌پیچی LV




$$V_2 = T_2 E_t \Rightarrow T_2 = \frac{V_2}{E_t} = \frac{400/\sqrt{3}}{6} = 38.6$$

تعداد دور را رند کرده و 40 انتخاب می‌کنیم.

سطح مقطع هادی:

انتخاب $\delta$ (بارگذاری الکتریکی ویژه):

| | | |
|---|---|---|
| ترانسفورماتور توزیع | ← | $A/mm^2$ 2 تا 2.5 |
| ترانسفورماتور قدرت | ← | $A/mm^2$ 2.3 تا 3.5 |
| ترانسفورماتورهای بزرگ با خنک‌سازی اجباری | ← | $A/mm^2$ 3 تا 4.5 |

$$\delta = 2.4\, A/mm^2$$

چون سیم‌پیچی LV در درون قرار می‌گیرد به خاطر مسائل خنک‌سازی $\delta = 2.3\, A/mm^2$ انتخاب می‌کنیم. داریم:

$$S = 3V_{ph} I_{ph}$$

$S$: توان ظاهری خروجی ترانسفورماتور

$$S_1 = S_2 = S \Rightarrow I_2 = \frac{S}{3V_2} = \frac{300\times10^3}{3\times\left(400/\sqrt{3}\right)} = \frac{300\times10^3}{3\times231} = 433\,A$$

$$a_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{433}{2.3} = 188\,mm^2$$

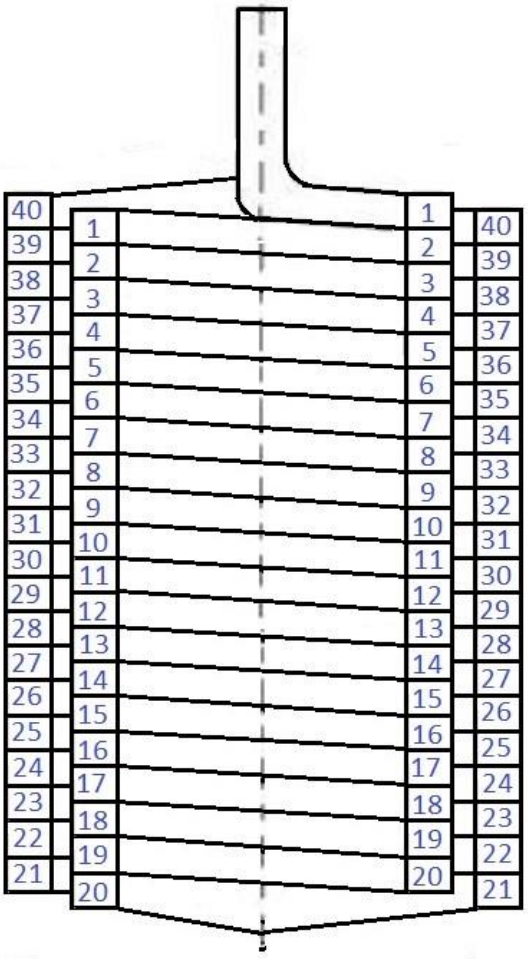
هادی با سطح مقطع $188\,mm^2$ بسیار بزرگ است و اجرائی نیست بنابراین از 6 رشته با سطح مقطع $\frac{188}{6} = 31.3\,mm^2$ استفاده می‌شود. (6 رشته: برای عملکرد و جاسازی بهتر زوج انتخاب می‌شود.)

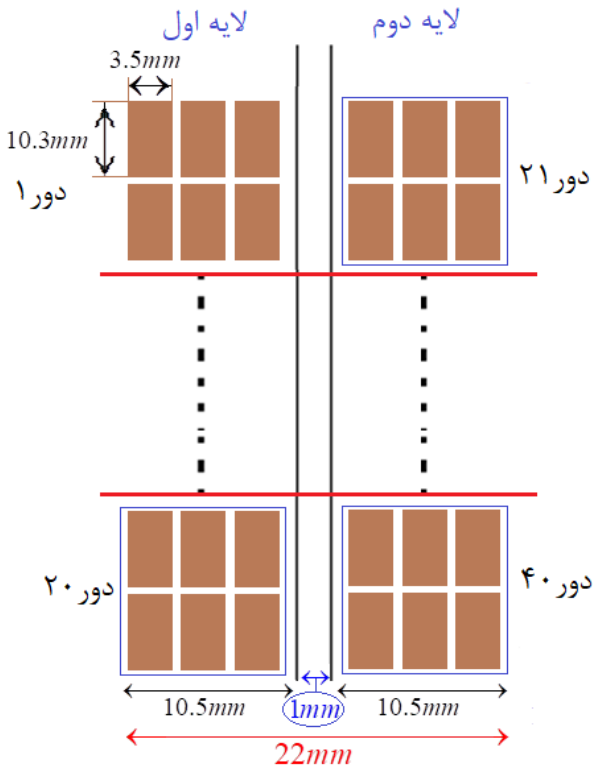
**نکته**: در سمت فشار ضعیف 80% ارتفاع پنجره را برای سیم‌پیچی در نظر می‌گیریم و 20% آن را برای تهویه و عایق خالی می‌گذاریم.

ارتفاع سیم‌پیچی:

$$h_w = 0.8 \times 54 = 43 cm$$

تعداد دورها 40 دور است آن را در 2 لایه می‌پیچیم پس در هر لایه 20 دور قرار می‌گیرد. هر دور را به‌صورت 6 رشته $2 \times 3$ می‌چینیم.






ارتفاع قابل‌دسترس برای هر دور: $\frac{43}{20}=2.15\,cm$

ارتفاع قابل‌دسترس برای هر رشته: $\frac{2.15}{2}=1.08\,cm=10.8\,mm$

با توجه به اینکه طول شعاعی هادی‌های مستطیلی به دلیل شار نشتی و تلفات فوکو از $3.5\ mm$ بیشتر نمی‌تواند باشد و با توجه اطلاعات به‌دست‌آمده و جدول A.5 داریم:

$$10mm\times 3.2mm=32mm^2$$

**نکته:** می‌توان در حالت معمول تا 8 رشته به‌صورت موازی در نظر گرفت. درنهایت باید دقت شود که عدد سطح مقطع اولیه (اینجا $188mm^2$) را به دست آوریم، با توجه به جدول استاندارد سیم‌ها:

$10mm\times 3.2mm$

$31.1mm^2$

$10.3mm\times 3.5mm$

$10.3+10.3=20.6\,mm=2.06\,cm<2.15\,cm$

در تمام این محاسبات باید به سایز استاندارد سیم‌ها توجه شود.

برای هر رشته سیم‌پیچی با عایق داریم: $10.3mm\ \times\ 3.5\ mm=36.05\,mm^2$

برای 6 رشته سیم‌پیچی داریم: $36.05\,mm^2\times 6=216.3\,mm^2$

سطح مقطع موردنیاز $188mm^2$ می‌باشد و چون $216.3\,mm^2>188mm^2$ برقرار است لذا این مقدار قابل‌قبول است.

*Table A.5. Recommended Sizes of Rectangular Copper Conductor (With Approximate Cross-Sectional Area in $mm^2$)*

| Thickness (mm) → | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.2 | 2.5 | 2.8 | 3.0 | 3.2 | 3.5 | 3.8 | 4.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Width (mm) ↓ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.9 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.0 | – | – | 0.86 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.2 | – | – | – | – | 1.3 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.4 | 0.98 | 1.12 | 1.26 | 1.4 | – | – | 1.75 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.6 | 1.14 | 1.30 | 1.46 | 1.62 | 1.78 | 1.87 | – | – | 2.35 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 1.8 | 1.3 | 1.48 | 1.66 | 1.84 | 2.02 | 2.13 | 2.31 | 2.49 | – | – | 2.93 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 2.0 | 1.46 | 1.66 | 1.86 | 2.06 | 2.19 | 2.39 | 2.59 | 2.79 | 2.99 | 3.19 | – | – | 3.69 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 2.2 | 1.62 | 1.84 | 2.06 | 2.21 | 2.43 | 2.65 | 2.87 | 3.09 | 3.31 | 3.53 | 3.65 | – | – | 4.58 | – | – | – | – | – | – | – |
| 2.5 | 1.86 | 2.11 | 2.36 | 2.54 | 2.79 | 3.04 | 3.29 | 3.54 | 3.79 | 4.04 | 4.19 | 4.44 | 4.69 | – | 7.94 | – | – | – | – | – | – |
| 2.8 | 2.10 | 2.38 | 2.66 | 2.87 | 3.15 | 3.43 | 3.71 | 3.99 | 4.17 | 4.45 | 4.73 | 5.01 | 5.29 | 5.85 | – | 7.28 | – | – | – | – | – |
| 3.0 | 2.26 | 2.56 | 2.86 | 3.09 | 3.39 | 3.69 | 3.99 | 4.19 | 4.49 | 4.79 | 5.09 | 5.39 | 5.69 | 6.29 | 7.19 | – | 8.44 | – | – | – | – |
| 3.2 | 2.42 | 2.74 | 3.06 | 3.31 | 3.63 | 3.95 | 4.27 | 4.49 | 4.81 | 5.13 | 5.45 | 5.77 | 6.09 | 6.73 | 7.69 | 8.41 | – | 9.68 | – | – | – |
| 3.5 | 2.66 | 3.01 | 3.36 | 3.64 | 3.99 | 4.34 | 4.69 | 4.94 | 5.29 | 5.64 | 5.99 | 6.34 | 6.69 | 7.39 | 8.20 | 9.25 | 9.95 | – | 11.69 | – | – |
| 3.8 | 2.90 | 3.28 | 3.66 | 3.97 | 4.35 | 4.73 | 5.11 | 5.39 | 5.77 | 6.15 | 6.53 | 6.91 | 7.29 | 8.05 | 8.95 | 10.1 | 10.9 | 11.6 | – | 13.88 | – |
| 4.0 | 3.06 | 3.46 | 3.86 | 4.19 | 4.59 | 4.99 | 5.39 | 5.69 | 6.09 | 6.49 | 6.89 | 7.29 | 7.69 | 8.25 | 9.45 | 10.7 | 11.5 | 12.3 | 13.5 | – | 15.44 |
| 4.5 | 3.46 | 3.91 | 4.36 | 4.74 | 5.19 | 5.64 | 6.09 | 6.44 | 6.89 | 7.34 | 7.79 | 8.24 | 8.45 | 9.35 | 10.7 | 12.1 | 13.0 | 13.9 | 15.2 | – | 17.1 |
| 5.0 | 3.86 | 4.36 | 4.86 | 5.29 | 5.79 | 6.29 | 6.79 | 7.19 | 7.69 | 8.19 | 8.69 | 9.1 | 9.45 | 10.5 | 12.0 | 13.5 | 14.5 | 15.5 | 16.6 | – | 19.1 |
| 5.5 | 4.26 | 4.81 | 5.36 | 5.84 | 6.39 | 6.94 | 7.49 | 7.94 | 8.49 | 9.04 | 9.59 | 10.1 | 10.5 | 11.6 | 13.2 | 14.9 | 16.0 | 16.7 | 18.4 | – | 21.1 |
| 6.0 | 4.66 | 5.26 | 5.86 | 6.39 | 6.99 | 7.59 | 8.19 | 8.69 | 9.29 | 9.89 | 10.5 | 11.1 | 11.5 | 12.7 | 14.5 | 15.3 | 17.5 | 18.3 | 20.1 | – | 23.1 |
| 6.5 | 5.06 | 5.71 | 6.36 | 6.94 | 7.59 | 8.24 | 8.89 | 9.44 | 10.1 | 10.7 | 11.4 | 12.0 | 12.5 | 13.8 | 15.7 | 17.7 | 19.0 | 19.9 | 21.9 | – | 25.1 |
| 7.0 | 5.46 | 6.16 | 6.86 | 7.49 | 8.19 | 8.89 | 9.59 | 10.2 | 10.9 | 11.6 | 12.3 | 13.0 | 13.5 | 14.9 | 17.0 | 19.1 | 20.5 | 21.5 | 23.6 | – | 27.1 |
| 7.5 | 5.86 | 6.61 | 7.36 | 8.04 | 8.79 | 9.54 | 10.3 | 10.9 | 11.7 | 12.4 | 13.2 | 13.9 | 14.5 | 16.0 | 18.2 | 20.5 | 22.0 | 23.1 | 25.4 | – | 29.1 |
| 8.0 | 6.26 | 7.06 | 7.86 | 8.59 | 9.59 | 10.2 | 11.0 | 11.7 | 12.5 | 13.3 | 14.1 | 14.9 | 15.5 | 7.1 | 19.5 | 21.9 | 23.5 | 24.7 | 27.1 | – | 31.1 |
| 9.0 | 7.06 | 7.96 | 8.86 | 9.69 | 10.6 | 11.5 | 12.4 | 13.2 | 14.1 | 15.0 | 15.9 | 16.8 | 17.5 | 19.3 | 22.9 | 24.7 | 26.5 | 27.9 | 30.6 | – | 35.1 |
| 10.0 | 7.86 | 8.86 | 9.86 | 10.8 | 11.8 | 12.8 | 13.8 | 14.7 | 15.7 | 16.7 | 17.7 | 18.7 | 19.5 | 21.5 | 24.5 | 27.3 | 29.5 | 31.1 | 34.1 | – | 39.1 |
| 11.0 | 8.66 | 9.76 | 10.9 | 11.9 | 13.0 | 14.1 | 15.2 | 16.2 | 17.3 | 18.1 | 19.5 | 20.6 | 21.5 | 23.7 | 27.0 | 30.3 | 32.5 | 34.3 | 37.6 | – | 43.1 |
| 12.0 | 9.46 | 10.7 | 11.9 | 13.0 | 14.2 | 15.4 | 16.6 | 17.7 | 18.9 | 20.1 | 21.3 | 22.5 | 23.5 | 25.9 | 29.5 | 33.1 | 35.5 | 37.5 | 41.1 | – | 47.1 |
| 13.0 | 10.3 | 11.6 | 12.9 | 14.1 | 15.4 | 16.7 | 18.0 | 19.2 | 20.5 | 21.8 | 23.1 | 24.4 | 25.5 | 28.1 | 32.0 | 35.9 | 38.5 | 40.7 | 44.6 | – | 51.1 |
| 14.0 | 11.1 | 12.5 | 13.9 | 15.2 | 16.6 | 18.0 | 19.4 | 20.7 | 22.1 | 23.5 | 24.9 | 26.3 | 27.5 | 30.3 | 34.5 | 38.7 | 41.5 | 43.9 | 48.1 | – | 55.1 |
| 15.0 | 11.9 | 13.4 | 14.9 | 16.3 | 17.8 | 19.3 | 20.8 | 22.2 | 23.7 | 25.3 | 26.7 | 28.2 | 29.5 | 32.5 | 37.0 | 41.5 | 44.5 | 47.1 | 51.6 | – | 59.1 |
| 16.0 | 12.7 | 14.3 | 15.9 | 17.4 | 19.0 | 20.6 | 22.2 | 23.7 | 25.3 | 26.9 | 28.5 | 30.1 | 31.5 | 34.7 | 39.5 | 44.3 | 47.5 | 50.3 | 55.1 | – | 63.1 |
| 18.0 | – | 16.1 | 17.9 | 19.6 | 21.4 | 23.2 | 25.0 | 26.7 | 28.5 | 30.3 | 32.1 | 33.9 | 35.5 | 39.1 | 44.5 | 49.9 | 53.5 | 56.7 | 62.1 | – | 71.1 |
| 20.0 | – | – | 19.0 | 21.8 | 23.8 | 25.8 | 27.8 | 29.7 | 31.7 | 33.7 | 35.7 | 37.7 | 39.5 | 43.5 | 49.5 | 55.5 | 59.5 | 63.1 | 69.1 | – | 79.1 |
| 22.0 | – | – | – | 24.0 | 26.2 | 28.4 | 30.6 | 32.7 | 34.9 | 37.1 | 39.3 | 41.5 | 43.5 | 47.9 | 54.5 | 61.1 | 65.5 | 69.5 | 76.1 | – | 87.1 |
| 25.0 | – | – | – | – | – | 32.3 | 34.8 | 37.2 | 39.7 | 42.2 | 44.7 | 47.2 | 49.5 | 54.5 | 62.0 | 69.5 | 74.5 | 79.1 | 86.6 | – | 99.1 |

**نکته**: تعداد مسیرهای موازی و تعداد لایه‌ها با توجه محدودیت‌های ابعاد پنجره و سیم استاندارد جداول طراحی باید طوری انتخاب شود که درنهایت جریان و ولتاژ موردنظر برای ترانسفورماتور به دست آید.

**به دست آوردن مقاومت سیم‌پیچی LV**:

با توجه به شکل زیر قطر داخلی سیم‌پیچی LV برابر با $19.8+(2\times1.5)=22.8\ cm$ و قطر خارجی آن $22.8+(2\times2.2)=27.2\ cm$ می‌شوند. قطر متوسط سیم‌پیچی LV $D_m=\frac{22.8+27.2}{2}=25\ cm$ می‌شود.

$L_m$ طول متوسط سیم‌پیچی (محیط دایره یا محیط یک دور) از رابطه زیر به دست می‌آید:

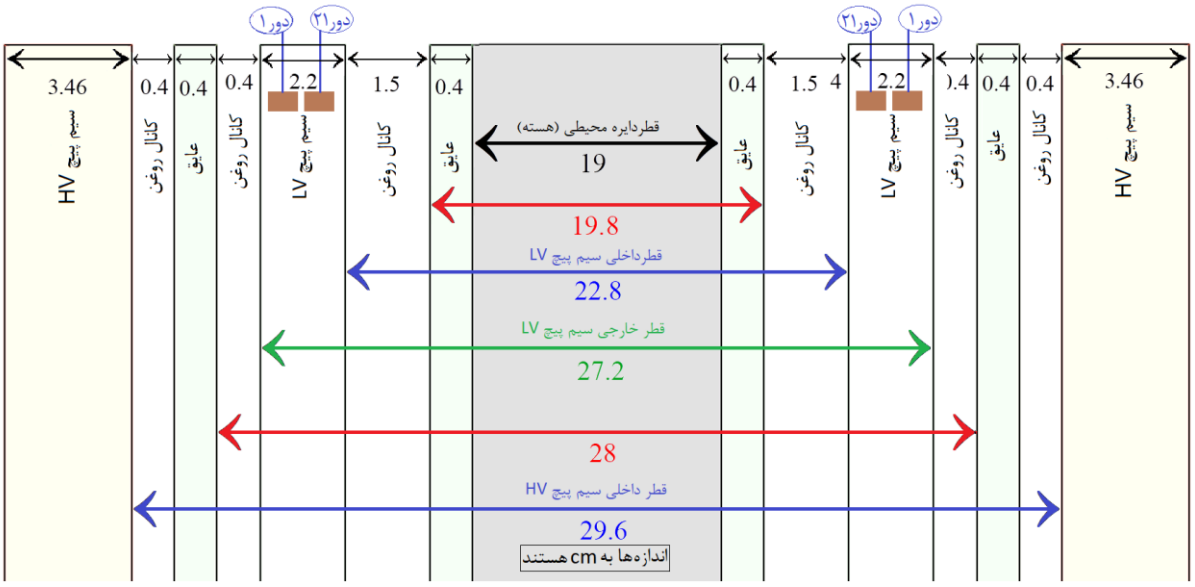
$$L_m=\pi D_m=0.25\pi\ m$$

مقاومت سیم‌پیچی LV از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_2=\frac{\rho L_m T_2}{a_2}$$

در اینجا $\rho$ مقاومت ویژه هادی در دمای $75^{\circ}c$ (دمای متوسط) که برابر با $0.02\Omega$ است.

$$r_2 = \frac{0.02 \times 0.25\pi \times 40}{216.3 \times 10^{-3}} = 2.905 \quad \Omega$$




**مفاهیم تقارن و تعادل:**

- ❖ تقارن به ساختار فیزیکی و تعادل به تغذیه ماشین برمی‌گردند.

**نکته:** مبحث مهمی در ماشین‌های الکتریکی به نام تقارن و تعادل مطرح است. تقارن به ساختار هندسی و تعادل به تغذیه ماشین برمی‌گردند.

مفهوم تعادل در ماشین القایی دو فاز:

در یک سیستم متعادل دو فاز مؤلفه‌های قدرت الکتریکی (ولتاژ یا جریان):

۱. دارای دامنه‌های برابر هستند. $|S_1| = |S_2|$

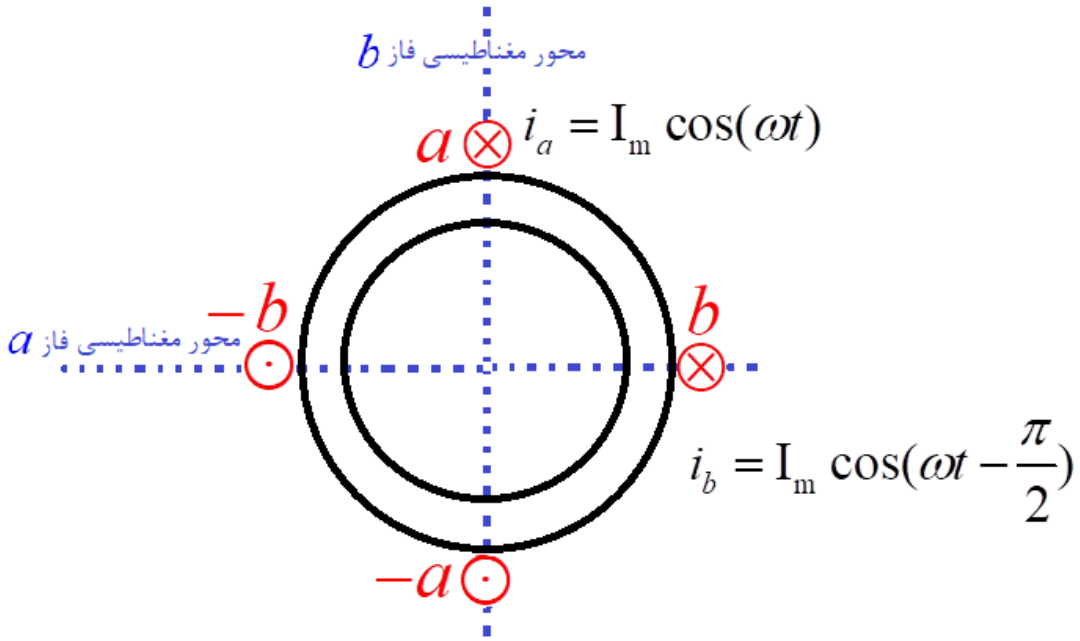
۲. دارای اختلاف‌فاز 90 درجه الکتریکی نسبت به هم هستند. $\theta_1 - \theta_2 = 90^{\circ}$

در صورت نقض هریک از دو شرط بالا و یا نقض دو شرط بالا، یک سیستم تغذیه نامتعادل داریم.

مفهوم تقارن در ماشین القایی دو فاز:

تقارن به ساختار هندسی ماشین الکتریکی مربوط می‌شود. در ماشین دو فاز متقارن علاوه بر **تقارن موجود در مدار مغناطیسی دو فاز**، **اندازه سیم‌پیچی‌های فازها نیز از هر نظر همسان می‌باشند و محورهای مغناطیسی فازها برهم عمودند.**

شکل زیر یک ماشین متقارن متعادل دو قطب دو فاز را نشان می‌دهد.

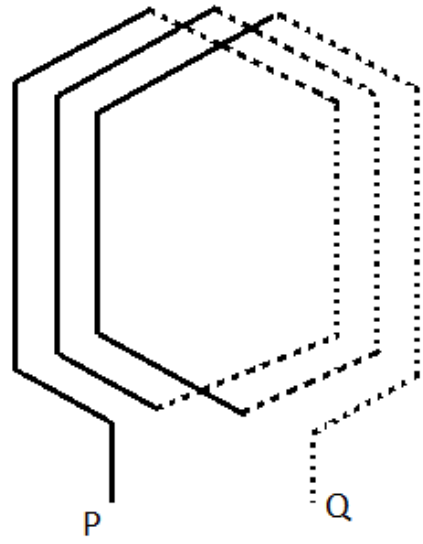



نابرابری در اندازه سیم‌پیچی‌ها می‌تواند نتیجه موارد زیر باشد:

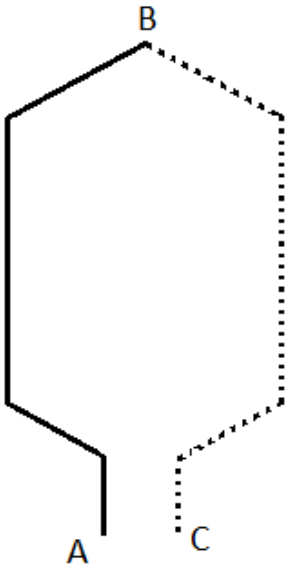
۱. نابرابری تعداد دور سیم‌پیچی فازها
۲. نابرابری سطح مقطع هادی‌های سیم‌پیچی‌های فازها
۳. یکسان نبودن جنس هادی‌های فازها

به‌عنوان‌مثال در یک موتور القایی چنانچه شروط تعادل و تقارن نقض گردند میدان دوار ماشین به‌جای حرکت دایره‌ی حرکت بیضی‌گون خواهد داشت. میدان بیضی‌گون باعث ریپل گشتاور، نویز و ... می‌گردد.

**طراحی سیم‌پیچی فشارقوی (HV) طرف اولیه:**




$PQ$ ← کویل چند دوری- 3دوری (multi turn coil-3turns)
حلقه‌ها به‌صورت سری به هم وصل هستند.




$AB$ ← هادی (conductor)
$ABC$ ← کویل تک دور (single turn coil)

تعداد دور:

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{V_1}{V_2}\Rightarrow\frac{T_1}{40}=\frac{11000}{400/\sqrt{3}}=1904$$

با توجه به فضای قابل‌دسترس و رعایت تقارن، 1904 دور را 20 کویل (18 کویل 98 دوری و 2 کویل 70 دوری) انتخاب می کنیم.

$$T_1=(18\times98)+(2\times70)=1904$$

با توجه به خنک‌سازی بهتر سیم‌پیچی HV (چون روی سیم‌پیچی LV قرار دارد)، چگالی جریان بیشتری انتخاب می‌شود. چگالی جریان متوسط است و برای سیم‌پیچی HV چگالی جریان $\delta=2.5\,A/mm^2$ انتخاب می‌گردد. $\delta=2.4\,A/mm^2$

$$S=3VI\Rightarrow I_1=\frac{S}{3V_1}=\frac{300000}{3\times11000}=9.1A$$

$$a_1=\frac{I_1}{\delta}=\frac{9.1}{2.5}=3.64\,mm^2$$

از جدول A.1 (مربوط به هادی‌های با سطح مقطع دایره‌ای)، هادی با قطر $2.12\,mm$ و سطح مقطع $3.5304\,mm^2$ انتخاب می‌گردد.

قطر هادی با عایق $2.12+0.35=2.47\,mm$ می‌شود.

**ارتفاع قابل‌دسترس برای سیم‌پیچی HV:**

**نکته:** فشارقوی عایق بیشتری لازم دارد، فضا کمتر است لذا 70%ارتفاع پنجره را برای سیم‌پیچی HV در نظر می‌گیریم. برای فشار ضعیف 80%ارتفاع پنجره در نظر گرفته شد.

$$h_{HV}=0.7\times h_W=0.7\times54=37.8\,cm$$

**ارتفاع قابل‌دسترس برای هر کویل:**

$$\frac{37.8}{20}=1.89\,cm=18.9\,mm$$

**محدودیت دور هر کویل در ارتفاع:**

$$\frac{18.9mm}{2.47mm}=7.65\simeq7$$

در اینجا $2.47\,mm$ قطر هادی با عایق است.

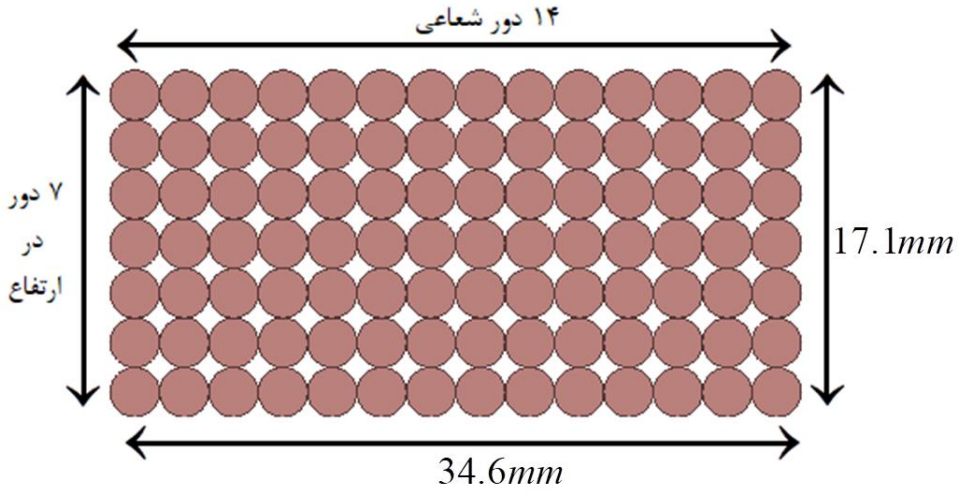
ارتفاع هر کویل:

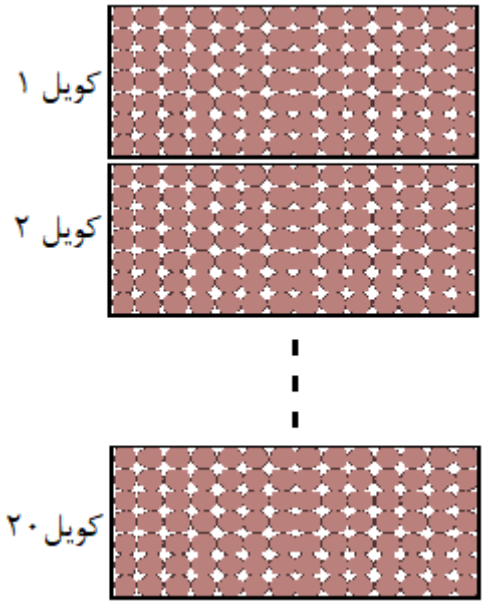
$$7\times2.47=17.1$$

**Table A.1 Size of Round Conductor as Per IS Specifications**

| Nominal Conductor Sizes | | Over all Diameter of Copper Conductor (mm) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Enamel Covering | | | Paper Covering | | Cotton Covering | | | |
| Diameter (mm) | Area ($mm^2$) | Fine | Medium | Thick | Ordinary | Fine | Single Cotton | | Double Cotton | |
| | | | | | | | Ordinary | Fine | Ordinary | Fine |
| 1.00 | 0.7855 | 1.070 | 1.095 | 1.120 | 1.275 | 1.200 | 1.162 | 1.135 | 1.290 | 1.215 |
| 1.06 | 0.8826 | 1.130 | 1.155 | 1.180 | 1.335 | 1.260 | 1.225 | 1.195 | 1.350 | 1.275 |
| 1.12 | 0.9853 | 1.190 | 1.215 | 1.240 | 1.395 | 1.320 | 1.285 | 1.255 | 1.410 | 1.335 |
| 1.18 | 1.0937 | 1.253 | 1.278 | 1.303 | 1.455 | 1.380 | 1.345 | 1.315 | 1.470 | 1.395 |
| 1.25 | 1.2273 | 1.325 | 1.350 | 1.375 | 1.525 | 1.450 | 1.415 | 1.385 | 1.540 | 1.465 |
| 1.32 | 1.3687 | 1.395 | 1.420 | 1.447 | 1.595 | 1.520 | 1.485 | 1.460 | 1.615 | 1.535 |
| 1.40 | 1.5396 | 1.480 | 1.505 | 1.535 | 1.700 | 1.575 | 1.590 | 1.565 | 1.720 | 1.645 |
| 1.50 | 1.7674 | 1.580 | 1.606 | 1.635 | 1.800 | 1.675 | 1.695 | 1.665 | 1.820 | 1.745 |
| 1.60 | 2.0109 | 1.680 | 1.710 | 1.740 | 1.900 | 1.775 | 1.795 | 1.765 | 1.920 | 1.845 |
| 1.70 | 2.2701 | 1.785 | 1.810 | 1.840 | 2.000 | 1.875 | 1.895 | 1.865 | 2.020 | 1.945 |
| 1.80 | 2.5450 | 1.885 | 1.915 | 1.940 | 2.100 | 1.975 | 1.992 | 1.970 | 2.125 | 2.045 |
| 1.90 | 2.8357 | 1.990 | 2.015 | 2.045 | 2.200 | 2.075 | 2.095 | 2.070 | 2.225 | 2.150 |
| 2.00 | 3.1420 | 2.150 | 2.180 | 2.210 | 2.350 | 2.250 | 2.225 | 2.195 | 2.375 | 2.275 |
| 2.12 | 3.5304 | 2.211 | 2.241 | 2.271 | 2.470 | 2.370 | 2.345 | 2.315 | 2.495 | 2.395 |
| 2.24 | 3.9413 | 2.335 | 2.365 | 2.347 | 2.590 | 2.490 | 2.465 | 2.440 | 2.620 | 2.575 |
| 2.36 | 4.3749 | 2.485 | 2.488 | 2.520 | 2.710 | 2.610 | 2.585 | 2.560 | 2.740 | 2.635 |
| 2.50 | 4.9093 | 2.600 | 2.630 | 2.665 | 2.850 | 2.725 | 2.730 | 2.700 | 2.880 | 2.780 |
| 2.65 | 5.5183 | 2.752 | 2.758 | 2.815 | 3.000 | 2.875 | 2.880 | 2.850 | 3.035 | 2.930 |
| 2.80 | 6.1583 | 2.905 | 2.935 | 2.970 | 3.150 | 3.025 | 3.030 | 3.005 | 3.185 | 3.080 |
| 2.90 | 6.6139 | 3.010 | 3.040 | 3.070 | 3.250 | 3.125 | 3.105 | 3.105 | 3.285 | 3.185 |
| 3.00 | 7.0695 | 3.110 | 3.140 | 3.175 | 3.350 | 3.225 | 3.235 | 3.205 | 3.385 | 3.285 |
| 3.15 | 7.7941 | 3.262 | 3.295 | 3.325 | 3.500 | 3.375 | 3.385 | 3.355 | 3.540 | 3.435 |
| 3.25 | 8.3047 | 3.365 | 3.395 | 3.427 | 3.600 | 3.475 | 3.485 | 3.455 | 3.640 | 3.535 |
| 3.35 | 8.8153 | 3.465 | 3.497 | 3.530 | 3.700 | 3.575 | 3.385 | 3.355 | 3.540 | 3.435 |
| 3.45 | 9.3573 | 3.567 | 3.600 | 3.630 | 3.800 | 3.675 | 3.585 | 3.560 | 3.740 | 3.635 |
| 3.55 | 9.8993 | 3.670 | 3.700 | 3.732 | 3.900 | 3.775 | 3.680 | 3.630 | 3.821 | 3.739 |
| 3.65 | 10.4727 | 3.770 | 3.800 | 3.835 | 4.000 | 3.875 | 3.790 | 3.760 | 3.940 | 3.840 |
| 3.75 | 11.0461 | 3.872 | 3.902 | 3.937 | 4.100 | 3.975 | 3.890 | 3.865 | 3.840 | 3.740 |
| 3.85 | 11.6195 | 3.973 | 4.003 | 4.038 | 4.200 | 4.075 | 3.990 | 3.965 | 4.145 | 4.040 |
| 4.00 | 12.5680 | 4.125 | 4.155 | 4.190 | 4.350 | 4.300 | 4.140 | 4.110 | 4.245 | 4.140 |

با توجه به اینکه تعداد 98 دور هر کویل وجود دارد پس $98/7 = 14$ دور در طول (شعاعی) وجود خواهد داشت و طول هر کویل $14 \times 2.47 = 34.6mm = 3.46cm$ می‌شود، هر کویل $14 \times 7$ خواهد داشت و ابعاد آن $17.1mm \times 34.6mm$ خواهد شد. شکل زیر یک کویل را نشان می‌دهد.




**بررسی شعاعی**

با توجه به شکل بالا قطر داخلی سیم‌پیچی HV برابر با $28.8+(2\times0.4)=29.6\ cm$ و قطر خارجی آن $29.6+(2\times3.46)=36.52\ cm$ می‌شوند. قطر متوسط سیم‌پیچی LV $D_m=\frac{29.6+36.52}{2}=33.06\ cm$ می‌شود.

$L_m$ طول متوسط سیم‌پیچی (محیط دایره یا محیط یک دور) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_m=\pi D_m=0.3306\pi\ m$$

مقاومت سیم‌پیچی LV از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_1=\frac{\rho L_m T_1}{a_1}$$

در اینجا $\rho$ مقاومت ویژه هادی در دمای $75^{\circ}c$ (دمای متوسط) که برابر با $0.02\Omega$ است.

$$r_1 = \frac{0.02 \times 0.3306\pi \times 1904}{3.64 \times 10^{-6}} = 2.905 \ \ \Omega$$

**بررسی محور (ارتفاع)**

*طول محوری کویل‌ها:*

طول محوری 20 کویل $= 20 \times 1.71 = 34.2cm$ فضای اشغال شده توسط هر کویل در ارتفاع

*فضای بین کویل‌ها:*

20 کویل وجود دارد پس 19 تا فضای خالی بین کویل‌ها وجود دارد و فاصله دو کویل مجاور 6mm است لذا در کل

$19 \times 0.0.6 = 11.4cm$ فضای خالی بین کویل‌ها وجود دارد.

*عایق انتهایی:*

Table 5.8. Insulation Thickness and Oil Ducts

| Rated KVA | Voltage of H.V KV | Thickness of Insulation Cylinder (mm) | | Thickness of Oil Ducts (mm) | | End Insulation (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | LV to HV | HV to HV | LV to HV | HV to HV | |
| Up to 100 | 3.3 & 6.6 | 3 | 3 | 6 | 8 | 22 |
| 100-500 | | 3.5 | 4 | 9 | 8 | 22 to 31 |
| 500-1000 | | 4 | 5 | 11 | 8 | 31-52 |
| Up to 500 | 11 | 4 | 5 | 10 | 13 | 35 |
| 500-1000 | | 5 | 6 | 12 | 13 | 35 to 50 |
| Up to 500 | 33 | 6 | 6 | 20 | 25 | 55 |
| 500-1000 | | 8 | 8 | 20 | 25 | 70 |

دو عدد عایق در دو انتها قرار داده می‌شود ضخامت آن‌ها از جدول زیر برابر با 30mm انتخاب می‌شود.

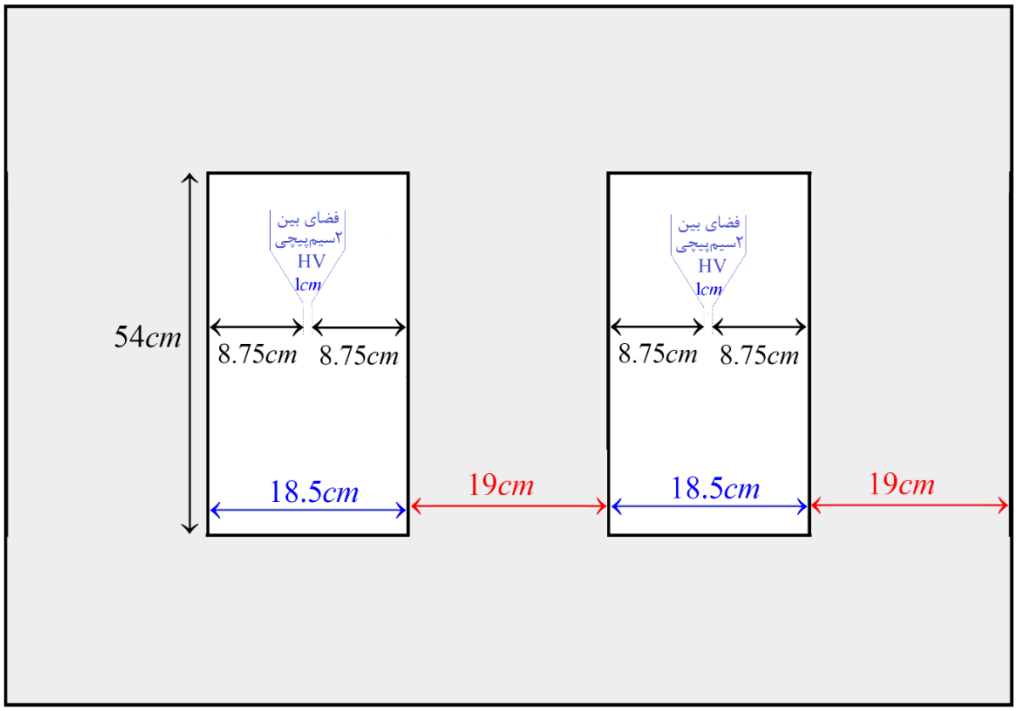
عایق انتهایی $= 2 \times 3cm = 6cm$

*ضخامت حلقه انتهایی:*

ضخامت حلقه انتهایی $= 2cm$

مجموع تمام مقادیر بالا (53.6cm) بعلاوه 0.4cm به دلیل مسئله فشردگی می‌شود 54cm که ارتفاع پنجره را می‌دهد.

**چک کردن محاسبات (بحث نهایی)**

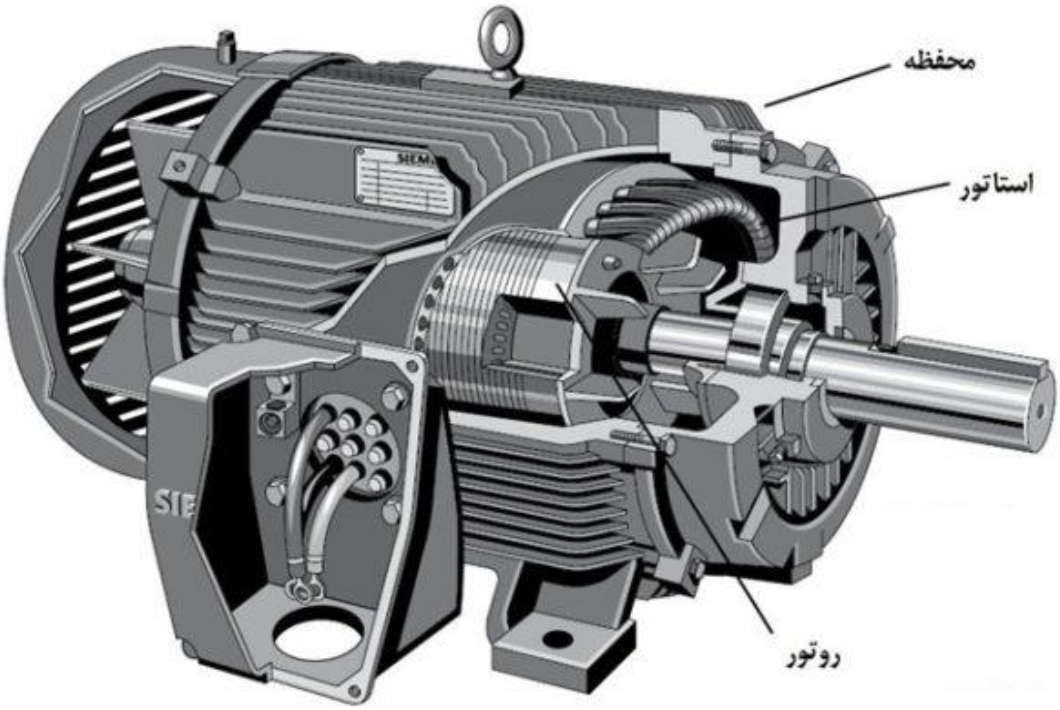



**نکاتی که باید در طراحی سیم‌پیچی رعایت گردند:**

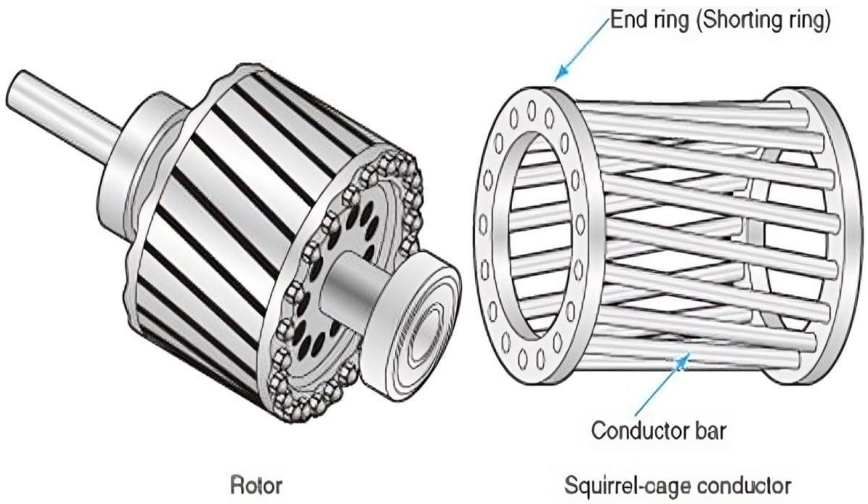
۱. اصول تقارن باید رعایت شوند.
۲. هادی‌های موردنیاز با توجه به جداول مربوطه به‌صورت مناسب انتخاب گردند.
۳. هردو سیم‌پیچی LV و HV باید به‌گونه‌ای طراحی گردند که توان خروجی ترانسفورماتور با در نظر گرفتن مقادیر ولت‌بردور و جریان‌ها تأمین گردد.
۴. در طراحی باید به محدودیت‌های فضای پنجره دقت شود.
۵. در مسئله حل‌شده در این قسمت، با داشتن یک سری پیش‌فرض‌ها و مقادیر، فقط یک‌بار روند طراحی از ابتدا به انتها طی شد، برای یک طراحی ممکن است الگوریتم طراحی چندین بار توسط کامپیوتر تکرار شود.

# طراحی ماشینهای الکتریکی

## طراحی ماشین القائی




اگر سه ولتاژ سینوسی که باهم دیگر اختلاف‌فاز 120 درجه زمانی دارند به سه سیم‌پیچی یکسان استاتور که 120 درجه اختلاف مکانی دارند اعمال شوند یک میدان مغناطیسی دوار به وجود می‌آید. این میدان دوار در هادی‌های روتور ولتاژ القاء می کند. چون هادی‌های روتور در انتهای حلقه‌ها به همدیگر متصل هستند پس یک مدار بسته تشکیل شده و جریان الکتریکی در آن برقرار می‌شود و این جریان، یک میدان مغناطیسی تولید می‌کند. از واکنش دو میدان استاتور و روتور بر یکدیگر گشتاور به وجود می‌آید. این موتور فقط یک ورودی سه فاز دارد و ولتاژ بر روی روتور القاء می‌شود به همین خاطر به این موتور، موتور القائی می‌گویند. ماشین القائی یک ماشین تک‌ورودی (تک تغذیه) است.



ماشین‌های القائی معمولاً در حالت موتوری به کار گـرفته شـده و کمتر به‌صورت ژنراتور مورداستفاده قرار می‌گیرد چون: ۱- ماشین‌های القائی همیشه در حالت پس فاز کار می‌کنند پس فقط مصرف‌کننده توان راکتیو هستند و توان راکتیو تولید نمی کنند. ۲- کنترل فرکانس آن‌ها سخت است. ۳- کنترل ولتاژ آن‌ها نیز سخت است.

موتوری‌های القائی معمول‌ترین نوع موتور برای کاربردهای صنعتی و خانگی هستند.

شهرت و اعتبار موتور القائی از ساختار ساده آن ناشی می‌شود که موجب گردیده با مقادیر نامی مشابه، قیمت و هزینه کمتری نسبت به موتورهای dc داشته باشد.

عملاً تعمیر و نگهداری موتورهای القائی راحت و کم‌هزینه است.

نکته: طول فاصله هوایی در ماشین‌های سنکرون و DC بیشتر از ماشین آسنکرون است چون ماشین‌های القائی دارای یک تحریک هستند و کل جریان مغناطیس‌کننده باید از یک ورودی تأمین شود ازاین‌رو فاصله هوایی در این ماشین‌ها کوچک است تا به mmf کمتری برای غلبه بر رلوکتانس فاصله هوایی نیاز باشد.

**مزایا و معایب موتورهای القائی**

معایب اصلی موتورهای القائی، جریان راه‌اندازی بالای آن‌ها و ضریب قدرت پائین آن‌ها در بارهای کم می‌باشد. بااین‌وجود، در بسیاری از کاربردها، مزایای این موتورها بیشتر از معایب آن‌هاست.

با پیشرفت‌هایی که در زمینه الکترونیک قدرت صورت گرفته، موتورهای القائی به‌طور گسترده‌تر در محرکه‌های سرعت متغیر برای کاربردهای صنعتی و فرآیندهای مختلف به کار می‌روند.

**جزئیات ساختاری**

عملکرد موتور القائی نیازمند دو سیم‌پیچ است، یک سیم‌پیچ اولیه که به‌وسیله منبع جریان متناوبی تحریک می‌شود و سیم‌پیچ ثانویه (سیم‌پیچی روتور) که اتصال کوتاه شده است.

در طراحی مرسوم، سیم‌پیچ اولیه روی استاتور قرار داده می‌شود درحالی‌که سیم‌پیچ ثانویه را روتور حمل می‌کند، اما لازم نیست همیشه این‌گونه باشد.

**محاسبات طراحی**

معادله خروجی ماشین‌های AC در اینجا یادآوری می‌شود:

$$Q = C_0 D^2 L n_s$$

$$C_0 = 1/11\pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3}$$

$$Q(KVA) = \frac{P_0(KW)}{\eta cos\phi}$$

$$K_w = K_d K_c$$

در اینجا:

$Q$ توان ظاهری ماشین برحسب VA،

$L$ طول محوری (طول هسته) برحسب متر،

$D$ قطر خارجی هسته برحسب متر،

$n_s$ سرعت سنکرون برحسب دور بر ثانیه،

$C_0$ ضریب خروجی،

$B_{av}$ بارگذاری مغناطیسی ویژه،

$ac$ بارگذاری مغناطیسی ویژه،

$K_w$ ضریب سیم‌پیچی،

$K_d$ ضریب توزیع،

$K_c$ ضریب گام،

$P_0$ توان خروجی نامی،

$\eta$ راندمان و

$cos\phi$ ضریب قدرت ماشین هستند.

برای شروع محاسبات می‌توان ضریب توزیع ( $K_d$ ) را برای موتورهای سه فاز برابر $0.955$ در نظر گرفته (برابر با 3 شیار در هر قطب برای هر فاز)، ضریب گام ( $K_c$ ) را برابر واحد (1) فرض نمود پس $K_w = 0.955$.

ضریب سیم‌پیچی هنگامی‌که سیم‌پیچ استاتور (اولیه) طراحی می‌گردد، مشخص خواهد شد. مقادیر اولیه راندمان و ضریب قدرت را می‌توان از جدول مربوطه به دست آورد که مقادیر نمونه‌ای برای موتورهای تغذیه‌شده از شبکه را نشان می‌دهد

جدول راندمان و ضریب قدرت موتورهای القائی قفس سنجابی 4 قطب سه فاز

| توان خروجی | راندمان | ضریب قدرت |
|---|---|---|
| 0.25 | 0.68 | 0.75 |
| 0.75 | 0.72 | 0.75 |
| 2.2 | 0.81 | 0.82 |
| 3.7 | 0.83 | 0.84 |
| 7.5 | 0.86 | 0.87 |
| 15 | 0.88 | 0.89 |
| 37 | 0.9 | 0.9 |

**انتخاب چگالی شار فاصله هوایی**

مقدار چگالی شار فاصله هوایی علاوه بر تحت تأثیر قرار دادن جریان مغناطیس‌کنندگی و ضریب قدرت، چگالی شار در دندانه‌ها و ظرفیت اضافه‌بار موتور را مشخص می‌نماید. چگالی شار زیاد موجب افزایش تلفات هسته و افزایش جریان‌های مغناطیس‌کنندگی می‌گردد و از طرفی باعث کاهش راکتانس نشتی می‌گردد.

برای جلوگیری از افزایش جریان‌های مغناطیس‌کنندگی، موتورهای القائی برای مقادیر متوسط و مناسب چگالی شار طراحی می‌شوند.

چگالی شار فاصله هوایی باید به نحوی انتخاب گردد که در هیچ قسمت از مدار مغناطیسی، اشباعی وجود نداشته باشد.

در حالت کلی طراحی‌های قابل‌قبول و رضایت‌بخش در مورد موتورهای القائی تغذیه‌شده از شبکه با توان نامی تا 22 کیلووات زمانی به دست می‌آید که چگالی شار فاصله هوایی بین 0.35 تا 0.6 تسلا باشد، که مقادیر بیشتر نیز برای موتورهای بزرگ‌تر است. مقادیر کوچک‌تر را می‌توان برای طراحی موتورهای 400 هرتز مورد استفاده قرار داد.

**انتخاب بارگذاری الکتریکی ویژه**

مقدار آمپر هادی‌ها در هر متر از محیط استاتور در فاصله هوایی ($ac$) به‌اندازه موتور، نوع محفظه و تهویه و ظرفیت اضافه‌بار مطلوب (یا راکتانس نشتی مجاز) بستگی دارد.

مقدار زیاد $ac$، تلفات مسی زیاد و افزایش دمای بالا را نتیجه می‌دهد. سیستم تهویه‌ای که مورداستفاده قرارگرفته باید طوری طراحی شده باشد که افزایش دما، از ماکزیمم مقدار مجازی که توسط کلاس عایق به‌کاررفته تعیین گردیده، تجاوز ننماید.

مقدار زیاد آمپر هادی‌ها در هر متر موجب خواهد شد تا تعداد بیشتری هادی موردنیاز باشند و این امر راکتانس نشتی ماشین را افزایش می‌دهد.

در مورد موتورهای کوچک، بارگذاری الکتریکی ویژه معمولاً بین 8000 تا 25000 آمپر هادی بر متر می‌باشد. مقادیر بیشتر برای موتورهایی به کار می‌برند که جهت کار در شرایط فرورفته در سیال مایع، طراحی‌شده‌اند

**تعداد قطب‌ها**

تعداد قطب‌ها را می‌توان به‌راحتی برحسب سرعت سنکرون و فرکانس تغذیه به‌صورت زیر بیان نمود:

$$p = \frac{2f}{n_s}$$

**ابعاد اصلی**

پس از انتخاب مقادیر اولیه برای بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی ویژه، ضریب قدرت و راندمان، ضریب خروجی و حاصل‌ضرب طول و قطر ماشین $D^2L$ محاسبه می‌شوند.

عواملی که لازم است تا هنگام تفکیک برای طول و قطر موتورهای القائی موردتوجه قرار بگیرند، به‌طور خلاصه، در انتخاب نسبت طول هسته به گام قطب (فاصله یک قطب تا قطب بعدی) موتور به شکل زیر نمایان می‌شوند.

انتخاب نسبت طول هسته به گام قطب موتور: $L/\tau$

| | |
|---|---|
| حداقل هزینه | بین 1.5 تا 2 |
| ضریب قدرت خوب | بین 1 تا 1.5 |
| راندمان خوب | برابر با 1.5 |
| طراحی متعادل | برابر با 1 |

برای موتورهای کوچک، مقادیر زیاد $L/\tau$ قطرهای کوچکی را نتیجه می‌دهند که ممکن است حتی حداقل تعداد شیار را هم نتوانند در خود جای دهند.

مقدار $L/\tau$ برابر با 0.6 را که مقدار پائینی است می‌توان برای ماشین‌های دو قطب که دارای توان نامی در حد چند کیلووات هستند و برای بعضی از موتورهای کسر از اسب بخار مورداستفاده قرار داد. در حالت کلی:

$$L = \frac{\pi D}{p} \times (0.6 \sim 2)$$

**طول فاصله هوایی**

برای به حداقل رسانیدن جریان مغناطیس‌کنندگی و برای به دست آوردن عملکردی رضایت‌بخش و قابل‌قبول، فاصله هوایی باید تا حدی که ساختار مکانیکی ماشین اجازه می‌دهد کوچک باشد.

بااین‌حال، استفاده از فاصله هوایی بزرگ یک سری مزایایی را نیز در پی خواهد داشت. تلفات ضربان و نویز مغناطیسی که از تغییر رلوکتانس فاصله هوایی ناشی می‌شوند، با افزایش فاصله هوایی کاهش می‌یابند. فاصله هوایی بزرگ در موتورهای خنک شده با فن، شرایط حرارتی را بهبود می‌بخشد.

در اغلب موارد، نیاز به ضریب قدرت مناسب، طول شعاعی فاصله هوایی را به مینیموم فاصله آزاد مکانیکی محدود می‌نماید. حداقل طول تقریبی فاصله هوایی، برحسب میلی‌متر را می‌توان به کمک فرمول تجربی زیر تعیین نمود:

$$l_g = 3.06 - \frac{6560}{D + 2280}$$

در اینجا:

$l_g$ طول فاصله هوایی برحسب mm و $D$ قطر استاتور برحسب mm هستند.

**طراحی استاتور**

*شیارهای استاتور*

در موتورهای کوچک، شیارهای باریک نیمه‌بسته با دندانه‌هایی با کناره‌های موازی مورداستفاده قرار می‌گیرند. نیاز به شیارهای نیمه‌بسته به علت مقدار کم فاصله هوایی پدید می‌آید، این ترکیب ضربان‌های شار را کاهش می‌دهد. استفاده از شیارهای نوک‌تیز مخروطی، ماکزیمم مساحت شیار را برای یک چگالی دندانه معین نتیجه می‌دهد.

به‌طورکلی، تعداد شیارهای زیاد، به عایق شیار بیشتر و نیز به تعداد سیم‌پیچ‌های بیشتری برای سیم‌پیچی، عایق‌کاری و نصب آن نیاز دارند و این امر موجب می‌گردد هزینه ساخت افزایش یابد.

از سوی دیگر، شار نشتی و سهم آن در راکتانس نشتی موتور، به‌طور معکوس با تعداد شیارهای هر قطب در هر فاز متناسب می‌باشد. بنابراین، تعداد شیارهای هر قطب در هر فاز نباید از 2 کمتر باشد در غیر این صورت راکتانس نشتی زیاد خواهد شد.

برای آنکه هزینه ساخت تا حد امکان پائین نگه داشته شود، تعداد شیارهای استاتور باید طوری انتخاب گردد که بیشترین تعداد ترکیب‌های قطب، فاز و ولتاژ را بتوان در یک پوسته معین فراهم کرد.

*طراحی سیم‌پیچی استاتور*

سیم‌پیچی استاتور ممکن است هم از نوع تک لایه (با یک بازوی کلاف در هر شیار) و هم از نوع دولایه باشد.

معمول‌ترین نوع سیم‌پیچی که برای موتورهای القائی کوچک به کار می‌روند، سیم‌پیچی‌های حلقوی تک لایه هستند. سیم‌پیچی‌های تک لایه نوع متحدالمرکز و سیم‌پیچی‌های دولایه در بعضی از موتورهای صنعتی به کار می‌روند

در مورد سیم‌پیچی‌های حلقوی، همه کلاف‌ها دارای گام یکسانی هستند و در هر فاز برای هر جفت قطب فقط یک گروه کلاف موجود می‌باشد و بنابراین، ماکزیمم تعداد مدارهای موازی برابر با نصف تعداد قطب‌هاست.

گام کلاف برحسب تعداد شیارها در سیم‌پیچی‌های حلقوی باید برای موتورهای سه فاز فرد بوده و برای موتورهای دو فاز زوج باشد.

ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچی آرمیچر برابر است با:

$$E_S = 4.44\, f \phi T_S K_{ws}$$

$E_S$: ولتاژ القاشده در سیم‌پیچی استاتور در هر فاز

$f$ : فرکانس منبع تغذیه

$\phi$: شار در هر قطب

$T_S$: تعداد دورهای سیم‌پیچی استاتور برای هر فاز در حالت سری

$K_{ws}$: ضریب سیم‌پیچی استاتور

ولتاژ القاء شده در هر فاز را می‌توان برابر با ولتاژ فاز ترمینال منهای حاصل‌ضرب جریان مغناطیس‌کنندگی و راکتانس نشتی استاتور در نظر گرفت. در ابتدا می‌توان آن را $0.97$ ولتاژ فاز ترمینال فرض نمود. تعداد دورها در هر فاز استاتور برابر است با:

$$T_S = \frac{E_S}{4.44\, f \phi K_{WS}}$$
$$\phi = B_{av} \tau L_i$$

جریان فاز استاتور به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_S = \frac{P_O \times 10^3}{3 V_{ph} \cos\phi \times \eta}$$

جریان هادی، با تقسیم نمودن جریان فاز موتور به تعداد مدارهای موازی آرمیچر به دست می‌آید.

چگالی جریان در سیم‌پیچی استاتور یک موتور القائی استاندارد را می‌توان بین $3A/mm^2$ تا $6A/mm^2$، در نظر گرفت.

سطح مقطع هادی استاتور برابر است با:

$$a_s = \frac{I_{ZS}}{\delta_S}\ , mm$$

طول تقریبی دور متوسط برای یک سیم‌پیچی تک لایه را می‌توان از فرمول زیر تعیین نمود:

$$L_{mts} = 2L + 2.3\tau$$

هنگامی‌که تعداد هادی‌ها در هر شیار و نیز سطح مقطع هادی مشخص باشند، با در نظر گرفتن مقداری برای ضریب اشغال شیار، مساحت تقریبی شیار را می‌توان به دست آورد.

در موتورهای القائی کوچک، شیارهای نیمه‌بسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش ساخت، مقدار ضریب اشغال شیار در حدود 0.4 است که در حالت کلی نیز از 0.5 بیشتر نمی‌باشد:

$$A_{SS} = \frac{Z_{SS} a_S}{0.4}$$

شیارهای عمیق موجب می‌شوند تا نشتی شیار بیشتر شود و در حالت کلی، نسبت عمق به پهنای شیار را بین 3 تا 6 در نظر می‌گیریم.

شیار باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که ماکزیمم چگالی شار به‌دست‌آمده دندانه حدود 1.7 تسلا باشد.

مقاومت استاتور در هر فاز برابر است با:

$$r_s = \frac{\rho T_S L_{mts}}{a_s \times 10^{-6}}$$

**هسته و دندانه‌های استاتور**

تلفات هسته و جریان مغناطیس‌کنندگی مستقیماً با چگالی شار دندانه تغییر می‌کنند. بنابراین، چگالی شار زیاد در دندانه‌ها مطلوب نمی‌باشد. حداقل پهنای دندانه استاتور، برحسب متر برابر است با:

$$W_{ts} = \frac{p\phi / S_s}{1.7 L_i}$$

چگالی شار متوسط در هسته استاتور نباید از 1.5 تسلا تجاوز نماید. با توجه به آنکه نیمی از شار قطب از هسته عبور می‌کند، حداقل عمق هسته، برحسب متر برابر است با:

$$d_{cs} = \frac{\phi / 2}{1.5 L_i}$$

قطر بیرونی استاتور $D_o$ برحسب متر برابر است با:

$$D_o = D + 2d_{ss} + 2d_{cs}$$

$d_{ss}$ عمق شیار استاتور برحسب متر می‌باشد.

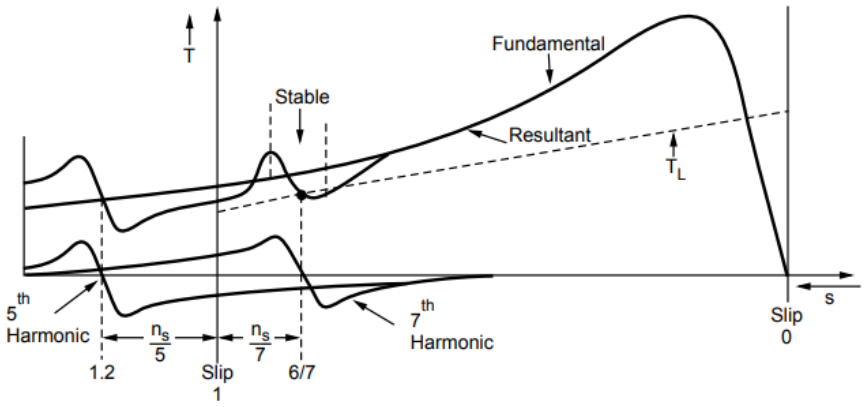
**طراحی روتور قفس سنجابی**

در عمل توزیع شار فاصله هوایی شامل تعدادی هارمونی می‌باشد. این هارمونی‌ها به علت این‌که فاصله هوایی به دلیل دهانه‌های شیار استاتور و روتور کاملاً صاف و یکدست نیست (هارمونی‌های شیار) به وجود می‌آیند. به‌علاوه، هارمونی‌ها ممکن است به علت اشباع و عدم تقارن در طول فاصله هوایی به وجود آیند.

شارهای هارمونی را می‌توان به‌صورت یک مجموعه قطب اضافی در نظر گرفت، بعضی از آن‌ها به‌طرف جلو حرکت می‌کنند (در جهت میدان اصلی) و برخی دیگر در جهت عکس گردش می‌کنند

همه این قطب/هارمونی‌ها در سرعت‌های زیر سنکرون حرکت می‌نمایند. روتور قفس سنجابی مشابه با همان رفتاری که در مقابل شار اصلی ارائه می‌کند به دیگر هارمونی‌ها نیز واکنش نشان می‌دهد و بنابراین، برای هر هارمونی مشخصه گشتاور- سرعت پارازیتی کاملی به دست می‌آید.

درنتیجه، مشخصه گشتاور- سرعت موتور منحنی یکنواخت و یکدستی نیست بلکه در لغزش‌های بزرگ دارای بی‌نظمی‌ها، فرورفتگی‌ها و نوک‌تیزی‌هایی می‌باشد. این موارد ممکن است موجب شوند موتور در حالت سکون قفل‌شده و برای راه‌اندازی دچار مشکل شود یا اینکه در بعضی از سرعت‌های زیر سنکرون به‌طور خزنده کار کرده و افزایش نویز در طول دوره کاری را سبب شوند.




**Presence of harmonics**

باید دقت داشت که در موتورهای با حلقه لغزان، احتمال پدید آمدن چنین مشکلاتی کمتر می‌باشد زیرا روتورهایشان برای تعداد مشخصی قطب سیم‌پیچی می‌شوند و بنابراین نسبت به هارمونی‌ها حساسیت کمتری دارند.

### تعداد شیارهای روتور

در یک سیم‌پیچی سه فاز حامل جریان‌های سینوسی، هارمونی‌های تولیدی مرتبه به‌قرار زیر می‌باشند:

$$n = 6N \pm 1$$

جهت چرخش هارمونی بسته به علامت، هم‌جهت یا خلاف جهت چرخش می‌باشد.

تعداد قطب‌های هارمونی $n$ ام، $n$ برابر تعداد قطب‌های اصلی است.

### هارمونی‌های شیار

اگر هارمونی‌های استاتور و روتور هم‌مرتبه باشند و اگر سرعت آن‌ها طوری باشد که بر هم منطبق شوند، این هارمونی‌ها به یکدیگر قفل‌شده و گشتاور سنکرون را ایجاد می‌نمایند. درصورتی‌که چنین گشتاوری به‌اندازه کافی بزرگ باشد موتور در سرعت ثابتی زیر سنکرون شروع به خزش خواهد کرد.

برای موتور 3 فاز با تعداد قطب $p$، مرتبه هارمونی‌های میدان استاتور و روتور ناشی از شیار گذاری، به ترتیب برابر خواهد بود با:

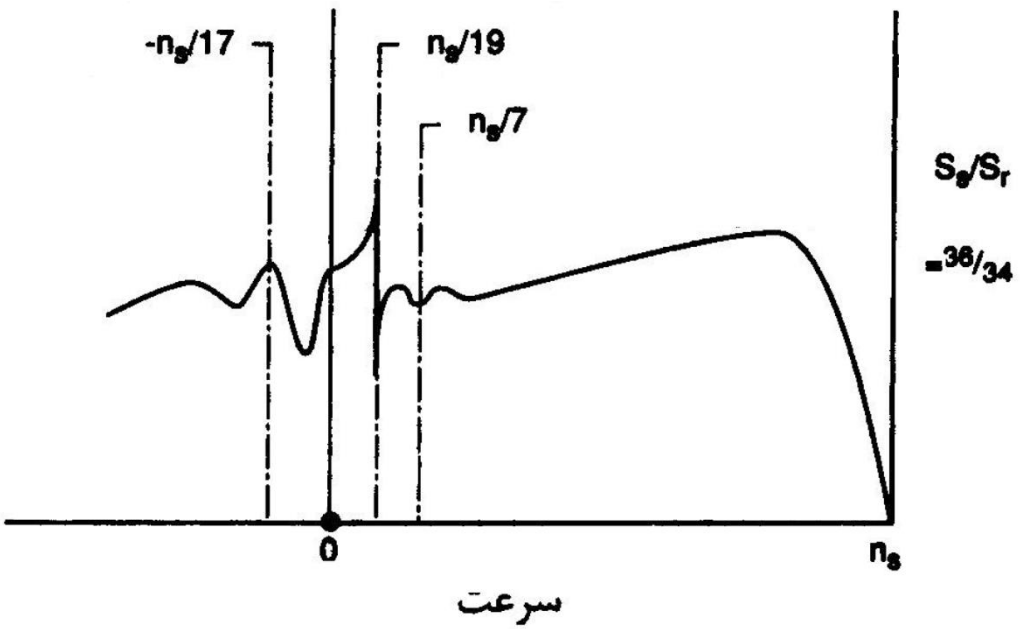
$$n = 6q \pm 1 = \left( \frac{2S_s}{p} \right) \pm 1$$

$$n' = \left( \frac{2S_r}{p} \right) \pm 1$$

هارمونی‌ها به ترتیب با سرعت $1/n$ و $1/n'$ می‌چرخند. این سرعت‌ها هنگامی برابر خواهند بود که:

$$\left( \frac{2S_s}{p} \right) \pm 1 = \left( \frac{2S_I}{p} \right) \pm 1$$

اثر شیار گذاری‌های روتور و استاتور و ترکیب آن‌ها:




**قوانین انتخاب ترکیب‌های شیار استاتور- روتور**

انتخاب صحیح ترکیب شیار استاتور- روتور کمک می‌کند تا تأثیر مزاحم‌ترین هارمونی‌ها روی کارکرد ماشین کاهش یابد. برای این کار باید از قوانین کلی زیر پیروی نمود:

۱- تعداد شیارهای روتور نباید به‌هیچ‌وجه با تعداد شیارهای استاتور برابر باشد. عملکرد رضایت‌بخش برای تعداد شیارهای روتور 15 تا 30 درصد بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از تعداد شیارهای استاتور رخ می‌دهد.

۲- برای جلوگیری از ایجاد نوک‌تیزی‌های سنکرون، اختلاف بین شیارهای استاتور و روتور نباید برابر با p، 2p، 5p باشد.

۳- در موتورهای سه فاز برای جلوگیری از ایجاد قفل مغناطیسی اختلاف بین تعداد شیارهای استاتور و روتور نباید برابر با 3p یا هر مضربی از 3p باشد.

۴- برای جلوگیری از ایجاد نویز و لرزش و ارتعاش، اختلاف بین تعداد شیارهای استاتور و روتور نباید برابر با 1، 2،p+1 یا p+2 باشد.

بعضی از این ترکیبات برای موتورهای 50 هرتز صنعتی عبارت‌اند از:

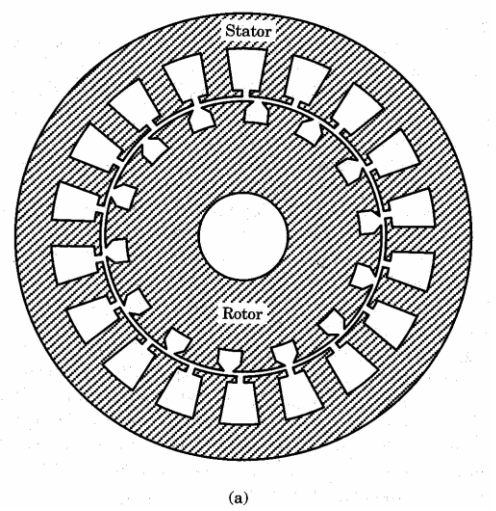
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| p=2 | 36/28<br>54/38 | 36/24<br>48/38 | 36/22<br>42/32 | 18/23<br>36/32 |
| p=4 | 48/40<br>60/52 | 24/17<br>60/42 | 24/33<br>48/60 | |
| p=6 | 54/38<br>72/58 | 48/44<br>72/56 | 36/40<br>72/54 | 36/44 |
| p=8 | 72/60 | 72/52 | | |

**میله‌های روتور و حلقه‌های انتهایی**

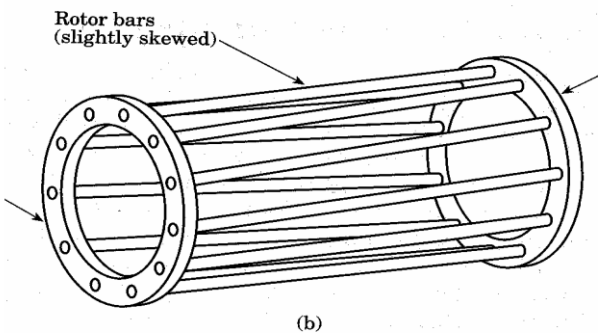
کل آمپردورهای روتور را می‌توان بین 0.85 تا 0.9 برابر کل آمپردورهای استاتور در نظر گرفت.

بین میله‌های قفس و هسته روتور هیچ عایقی به کار نمی‌رود و ممکن است روتور در چگالی جریان بسیار بیشتری نسبت به استاتور به کار گرفته شود.

طول متوسط دور کلاف‌های روتور کوتاه‌تر از استاتور بوده و لذا تهویه بهتر می‌باشد. چگالی جریان در میله‌های روتور را می‌توان حدود دو برابر چگالی جریان در سیم‌پیچی استاتور در نظر گرفت.



(a)



(b)

بنابراین، نسبت کل سطح مقطع هادی روتور به‌کل سطح مقطع مس استاتور تقریباً برابر است با:

$$\frac{A_{cr}}{A_{cs}} = 0.9 \times \frac{1}{2} = 0.45$$

سطح مقطع هادی روتور را باید نسبت به طول میله و مقطع حلقه انتهایی طوری انتخاب نمود که بتوان مقاومت مناسب روتور را جهت پاسخگویی به گشتاور راه‌اندازی و نیازهای کاری ماشین حین حرکت به دست آورد.

سطح مقطع هر میله برحسب کل مساحت هادی در روتور و تعداد میله‌های روتور، به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$a_b = \frac{A_{cr}}{s_r}$$

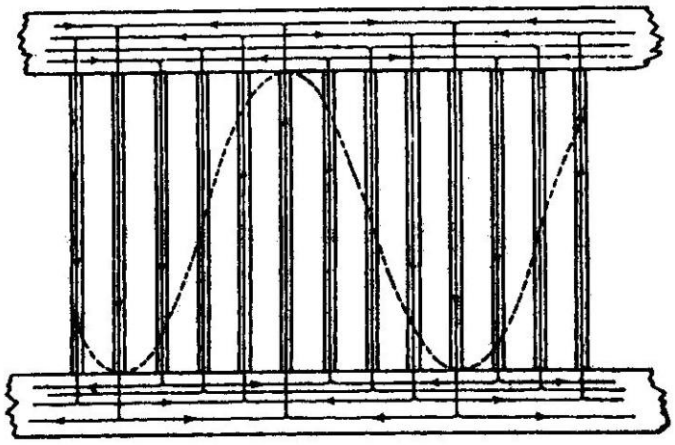
در محاسبه مساحت شیار روتور می‌توان فاصله آزادی بین 0.15 تا 0.4 میلی‌متر در نظر گرفت. مقاومت کل میله‌های قفس سنجابی برابر است با:

$$r_b = s_r \frac{pL_b}{a_b}$$

$L_b$ طول محوری میله می‌باشد.

ماکزیمم مقدار جریان حلقه انتهایی از حاصل‌ضرب جریان متوسط میله و نصف تعداد میله‌ها (یا شیارهای روتور) در هر قطب به دست می‌آید. با فرض اینکه جریان حلقه انتهایی، مشابه با جریان میله، به‌صورت سینوسی تغییر می‌کند، مقدار مؤثر جریان حلقه انتهایی برابر می‌شود با:

$$I_{er} = \frac{2}{\pi}\sqrt{2}I_b \times \frac{s_r / 2}{p} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{I_b s_r}{\pi p}$$



**شکل ۵-۱۰ توزیع جریان در یک سیم پیچی قفس.**

چگالی جریان در حلقه انتهایی را می‌توان برابر با و یا اندکی بیشتر از چگالی جریان در میله‌ها در نظر گرفت.

در اغلب موارد ابعاد حلقه انتهایی طوری انتخاب می‌گردد که سهم آن در مقاومت سیم‌پیچی روتور حداقل باشد. سطح مقطع هر حلقه انتهایی برابراست با:.

$$a_{er} = \frac{I_{er}}{\delta_{er}} = \frac{I_b s_r}{\pi p \delta_{er}} \quad \text{mm}^2$$

مساحت کل مقطع میله‌ها برابر است با:

$$A_{cr} = \frac{I_b s_r}{\delta_b}$$

سطح مقطع هر حلقه انتهایی را برحسب کل مقطع هادی روتور به‌صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$a_{cr} = \frac{A_{cr}}{\pi p} \frac{\delta_b}{\delta_{er}}$$

مقاومت دو حلقه انتهایی برابر است با:

$$r_{er} = 2 \frac{p \pi D_{er}}{a_{er}}$$

کل تلفات مسی روتور را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$I_b^2 r_b + I_{er}^2 r_{er} = \rho I_b^2 S_r^2 \left[ \frac{L_b}{S_r a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi p^2 a_{er}} \right]$$

با تقسیم تلفات به مربع جریان میله، مقاومت کل روتور را به‌صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$R_r = \rho S_r^2 \left[ \frac{L_b}{s_r a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi p^2 a_{er}} \right]$$

مقاومت روتور ارجاع شده به‌طرف استاتور برابر است با مقاومت روتور ضربدر مربع نسبت دورهای مؤثر روتور به دورهای مؤثر استاتور. این نسبت تبدیل برابر است با:

$$\left[ \frac{2m_s T_s K_{ws}}{s_r} \right]^2$$

مقاومت سیم‌پیچ قفس در هر فاز ارجاع شده به‌طرف استاتور به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_r' = 4m_s T_s^2 K_{ws}^2 \rho \left[ \frac{L_b}{s_r a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi p^2 a_{er}} \right]$$

در مورد موتورهای القائی کوچک که پهنای شعاعی حلقه انتهایی در مقایسه با سطح مقطع میله بزرگ می‌باشد، جهت محسوب نمودن توزیع جریان غیریکنواخت در حلقه باید مؤلفه حلقه انتهایی مقاومت قفس را تصحیح نمود.

**دندانه روتور و هسته**

فرکانس شار روتور خیلی کم و تلفات هسته ناچیز است. ماکزیمم چگالی شار در دندانه روتور برابر با ماکزیمم چگالی شار مجاز در دندانه استاتور در نظر گرفته می‌شود. (1.7 تسلا)

چگالی شار در هسته روتور را عموماً برابر با چگالی شار هسته استاتور در نظر گرفته که مقدار آن نباید از 1.5 تسلا تجاوز کند. زمانی که هسته روتور نیمی از شار قطب را حمل می‌کند، حداقل عمق هسته را می‌توان به کمک معادلات به دست آورد.

$$d_{cr} = \frac{\phi / 2}{1.5 L_i}$$

**مشخصه‌های کاری**

**جریان بی‌باری:**

جریان بی‌باری یک موتور القائی از دو مؤلفه تشکیل می‌گردد: جریان مغناطیس‌کنندگی که نسبت به ولتاژ اعمال‌شده 90 درجه اختلاف‌فاز دارد و مؤلفه تلفات که با ولتاژ هم‌فاز است.

با محاسبه کل آمپردورها در هر قطب که جهت عبور شار در مدار مغناطیسی موردنیاز می‌باشند، جریان مغناطیس‌کنندگی به دست می‌آید.

محاسبه مؤلفه تلفات جریان بی‌باری مستلزم تعیین تلفات بی‌باری است.

این تلفات همان تلفات آهنی در دندانه‌ها و هسته‌ها و تلفات بادخوری و اصطکاک می‌باشند.

تلفات آهنی در هسته و دندانه‌های استاتور، با محاسبه وزن مربوط به هر یک از آن‌ها و ضرب کردن آن در تلفات ویژه (در هر واحد وزن) متناظر با مقادیر چگالی شار، مشخص می‌شوند.

ازآنجاکه فرکانس روتور خیلی کم می‌باشد، می‌توان از تلفات آهنی روتور صرف‌نظر نمود. بااین‌حال، در بعضی از طراحی‌های روتور سیم‌پیچی شده هنگامی‌که از موتور انتظار می‌رود تا در طول سیکل بارگذاری‌اش در لغزش‌های زیاد کار کند، باید تلفات آهنی روتور را در محاسبات تلفات لحاظ نمود.

تلفات بادخوری و اصطکاک به ساختمان موتور بستگی دارند و در حالت کلی بسیار مشکل است که مقادیر دقیقی را برای آن‌ها تقریب بزنیم. هنگامی‌که داده‌های آزمایش روی ماشین‌های مشابه در دسترس نمی‌باشد، تلفات بادخوری و اصطکاک را می‌توان بین 1 تا 3 درصد خروجی نامی در نظر گرفت.

مؤلفه تلفات جریان بی‌باری در هر فاز برای موتورهای سه فاز برابر است با:

$$I_p = \frac{NLL}{3E_S}$$

جریان بی‌باری در هر فاز برابر است با:

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_p^2}$$

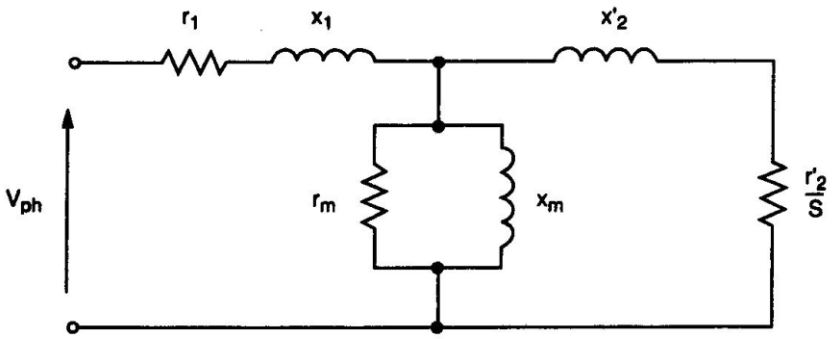
برای موتورهای القائی کوچک مقادیر معمول جریان بی‌باری بین 30 تا 50 درصد جریان بار کامل می‌باشد.

**پارامترهای مدار معادل**

• راکتانس مغناطیس‌کنندگی در هر فاز، را می‌توان هنگامی‌که جریان مغناطیس‌کنندگی و راکتانس نشتی استاتور مشخص است، به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_m} - X_1$$

از مدار معادل می‌توان برای تعیین مشخصه‌های کاری موتور استفاده کرد. اما این مدار، باید اشباع مغناطیسی را شامل شود.




**شکل ۵-۱۲مدار معادل موتور القایی.**

## مثال طراحی نمونه

طراحی یک موتور القائی قفس سنجابی $415V,\ 1380RPM,\ 0.25KW$ اتصال ستاره، $50Hz$، سه فاز و چهار قطب در نظر است. این موتور کلاس عایقی F داشته و قرار است در بازار رقابتی تنگاتنگی فروخته شود. موتور را طراحی نمایید و مدار معادل آن را به دست آورید.

حل: در این‌گونه مسائل ابتدا تمام جزئیات ساختاری موتور (از قبیل ابعاد اصلی، تعداد شیارهای استاتور و روتور و ...) را به دست آورده و درنهایت مدار معادل مداری موتور را از این داده‌ها استخراج می‌کنیم.

در مدار معادل چون هسته بین اولیه و ثانویه مشترک است به‌صورت موازی در مدار قرار می‌گیرد.

نکته: در مدار معادل ماشین‌های الکتریکی هر سلفی که به‌صورت سری قرار می‌گیرد «مُرده» است و شار نشتی را مدل‌سازی می‌کند. هر سلفی که به‌صورت موازی قرار می‌گیرد «زنده» است و شار پیوندی را مدل‌سازی می‌کند.

با توجه به اطلاعات مسئله و مقادیر قابل‌قبول راندمان و ضریب قدرت در جدول زیر داریم:

| توان خروجی | راندمان | ضریب قدرت |
|---|---|---|
| 0.25 | 0.68 | 0.75 |
| 0.75 | 0.72 | 0.75 |
| 2.2 | 0.81 | 0.82 |
| 3.7 | 0.83 | 0.84 |
| 7.5 | 0.86 | 0.87 |
| 15 | 0.88 | 0.89 |
| 37 | 0.9 | 0.9 |

ضریب قدرت: $\cos\varphi = 0.75$ راندمان: $\eta = 0.68$

**ابعاد اصلی**

$$Q = \frac{P_o}{\eta \cos\varphi} \overset{P_o=0.25}{\Rightarrow} Q = \frac{0.25}{0.68\times 0.75} \simeq 0.51 \quad \text{kVA}$$

برای مقادیر ویژه:

در حالت کلی طراحی‌های قابل‌قبول و رضایت‌بخش در مورد موتورهای القائی تغذیه‌شده از شبکه با توان نامی تا 22 کیلووات زمانی به دست می‌آید که چگالی شار فاصله هوایی بین 0.35 تا 0.6 تسلا باشد. پس

$$B_{av} = 0.5\text{T}$$

در مورد موتورهای کوچک، بارگذاری الکتریکی ویژه معمولاً بین 8000 تا 25000 آمپر هادی بر متر می‌باشد. پس

$$ac = 22000 \text{ آمپر هادی / متر}$$

برای شروع محاسبات می‌توان ضریب توزیع را برای موتورهای سه فاز برابر 0.955 در نظر گرفته (برابر با 3 شیار در هر قطب برای هر فاز)، ضریب گام را برابر واحد فرض نمود. پس

$$K_w = 0.955$$

ضریب خروجی برابر است با:

$$C_0 = 1.11\pi^2 B_{av} ac K_w \times 10^{-3} = 1.11\pi^2 \times 0.5 \times 22000 \times 0.955 \times 10^{-3} = 115$$

سرعت سنکرون:

$$n_s = \frac{120\, f_e}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500\, rpm \cong \frac{1500}{60} = 25\ rps$$

در رابطه زیر از سرعت دور در ثانیه استفاده می‌کنیم پس $n_s = 25 rev/s$ می‌باشد. حجم فعال برابر است با:

$$Q = C_0 D^2 L n_s \Rightarrow D^2 L = \frac{Q}{C_0 n_s}$$

$$D^2 L = \frac{0.51}{115 \times 25} = 1.77 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$$

بازار رقابتی و تنگاتنگ یعنی هزینه باید حداقل شود. با توجه به جدول زیر برای یک طراحی کم‌هزینه، نسبت طول هسته به گام قطب ( $L/\tau$ ) باید بین 1.5 تا 2 باشد.

| | |
|---|---|
| حداقل هزینه | بین 1.5 تا 2 |
| ضریب قدرت خوب | بین 1 تا 1.5 |
| راندمان خوب | برابر با 1.5 |
| طراحی متعادل | برابر با 1 |

$L/\tau = 1.5$ را انتخاب می‌کنیم.

$$\pi D = \tau p \Rightarrow \frac{\pi D}{\tau p} = 1 \Rightarrow L \times \frac{\pi D}{\tau p} = L \times 1 \Rightarrow L = \frac{\pi D}{p} \times \frac{L}{\tau}$$

$$L = \frac{\pi D}{p} \times \frac{L}{\tau} \quad \overset{p=4}{\Rightarrow} \quad L = \frac{\pi D}{4} \times 1.5 \Rightarrow L = 1.1775 D$$

$$\begin{cases} D^2 L = 1.77\times10^{-4} \\ L = 1.1775D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D = 53mm \\ L = 63mm \end{cases}$$

با $L/\tau = 1.5$، قطر و طول هسته به ترتیب 53 میلی‌متر و 63 میلی‌متر خواهد شد.

با استفاده از جداول استاندارد خواهیم داشت:

$$D = 55\text{mm} \quad , \quad L = 58\text{mm}$$

و درنتیجه برای گام قطب داریم:

$$\pi D = \tau p \Rightarrow \tau = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi\times55}{4} = 43.2\,mm \Rightarrow \frac{L}{\tau} = \frac{58}{43.2} = 1.34$$

ورق K&S با قطر $55\text{mm}$، ضخامت ورقه $0.5\text{mm}$ و ضریب فشردگی 0.95 را به کار می‌بریم.

طول محوری خالص:

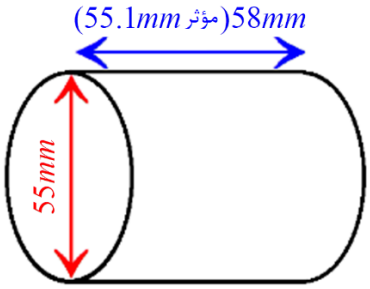
$$L_i = 0.95\times58 = 55.1mm$$

طول آهن خالص 55.1 و گام قطب 43.2 میلی‌متر می‌باشد. شار هر قطب برابر است با:

$$\phi = B_{av}\tau L_i = 0.5\times0.043\times0.0551 = 0.00118Wb \equiv 1.18\,\text{mWb}$$

طول فاصله هوایی به کمک معادله تجربی مشخص می‌گردد:

$$l_g = 3.06 - \frac{6560}{D+2280} = 3.06 - \frac{6560}{55+2280} = 0.25\,\text{mm}$$




**طراحی استاتور**

تعداد شیارها برای هر قطب در هر فاز:

$$q = \frac{s}{mp}$$

در آن:

$q$: تعداد شیارها برای هر قطب در هر فاز

$s$: تعداد کل شیارها

$m$: تعداد فازها

$p$ : تعداد قطب‌ها

تعداد شیارها برای هر قطب در هر فاز ($q$) باید یک عدد صحیح بوده و نباید کمتر از 2 باشد.

$q = 2$ انتخاب می‌کنیم پس $s = 24$ می‌شود.

مقدار متناظر ضریب توزیع سیم‌پیچی $K_{WS} = 0.966$ می‌باشد. شیارهای نوک‌تیز مخروطی نیمه‌بسته مورد استفاده قرار می گیرند.

emf القاء شده در سیم‌پیچی استاتور را می‌توان 0.97 برابر مقدار فاز ولتاژ اعمال‌شده در نظر گرفت. بنابراین:

$$E_s = 0.97 \times \frac{V}{\sqrt{3}} = 0.97 \times \frac{415}{\sqrt{3}} = 232.4 \quad \text{V}$$

تعداد دورها در هر فاز به‌صورت زیر به کمک معادله مربوطه مشخص می‌گردد:

$$E_S = 4.44 f \phi T_S K_{WS} \Rightarrow T_S = \frac{E_S}{4.44 f \phi K_{WS}}$$

$$T_s = \frac{232.4}{4.44 \times 50 \times 1.18 \times 10^{-3} \times 0.966} = 918$$

*نکته مهم از بحث سیم‌پیچی‌ها:*

در سیم‌پیچی استاتور موتورهای القائی صنعتی معمولاً از سیم بندی حلقوی تک لایه استفاده می‌کنند.

سیم بندی سیم‌پیچی‌های حلقوی: در سیم‌پیچی‌های حلقوی همه کلاف‌ها دارای گام یکسانی هستند و به‌صورت زنجیره‌ای در شیارها قرار می‌گیرند، در این سیم‌پیچی در هر فاز برای هر جفت قطب فقط یک گروه کلاف قرار می‌گیرد.

ماکزیمم تعداد مدارهای موازی در سیم‌پیچی حلقوی در هر فاز نصف تعداد قطب‌هاست.

در هر فاز 2 مسیر موازی داریم و در کل 6 مسیر موازی برای سه فاز خواهیم داشت. در این موتور تعداد کل هادی‌های استاتور می‌شود:

$$6T_s = 6 \times 918 = 5508$$

تعداد هادی‌ها در هر شیار:

$$\frac{\text{تعداد کل هادی‌های استاتور}}{\text{تعداد شیار}} = \frac{5508}{24} = 229.5 \rightarrow \text{تعداد هادی‌ها هر در شیار} = 230$$

اصلاح کمیت‌ها با توجه به تعداد هادی‌ها در هر شیار انتخاب‌شده:

$$\text{تعداد کل هادی‌های استاتور اصلاح‌شده} = 230 \times 24 = 5520$$

$$6T_s = 5520 \Rightarrow T_s = \frac{5520}{6} = 920$$

$T_s = 920$ اصلاح‌شده

$$\begin{cases} (\text{قطب})\, p = 4 \\ (\text{شیار})\, S = 24 \end{cases} \rightarrow \text{گام قطب} = \frac{24}{4} = 6$$

یعنی در هر قطب 6 شیار وجود دارد.

$$\text{زاویه هر شیار} = \frac{360}{24} = 15^o = \theta_m \text{ (زاویه مکانیکی)}$$

زاویه الکتریکی $(\theta_e)$:

$$\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \Rightarrow \theta_e = \frac{4}{2} \times 15 = 30°$$

معمولاً سیم‌پیچی‌ها را گام کامل نمی‌گیریم لذا گام کلاف را 5 شیار می‌گیریم ازاین‌رو گام کلاف 150 درجه الکتریکی می شود. ضریب گام برابر است با:

$$K_\rho = \sin\frac{\rho}{2} = \sin\frac{150}{2} = 0.966$$

حال ضریب سیم‌پیچی ( $K_w$ ) استاتور مشخص می‌گردد:

$$K_w = K_d K_\rho = 0.966 \times 0.966 = 0.933$$

در آن:

$K_d$: ضریب توزیع

$K_\rho$: ضریب گام

مقدار شار در هر قطب و چگالی فاصله هوایی باید به‌صورت زیر تصحیح گردد:

$$E_S = 4.44\, f\, \phi T_S K_{WS} \Rightarrow \phi = \frac{E_S}{4.44\, f T_S K_{WS}}$$

$$\phi = \frac{232.4}{4.44 \times 50 \times 920 \times 0.933} = 1.22 \text{ mwb}$$

$$\phi = B_{av}\tau L_i \Rightarrow B_{av} = \frac{\phi}{\tau L_i} = 0.51 \text{ T}$$

$$B_{av} = \frac{1.22 \times 10^{-3}}{43.2 \times 55.1 \times 10^{-6}} = 0.51 \text{ T}$$

جریان فاز استاتور برابر است با:

$$S = 3V_{ph}I_{ph} \Rightarrow I_S = I_{ph} = \frac{S}{3V_{ph}} = \frac{Q}{3V_{ph}}$$

$$I_S = \frac{0.51\times10^3}{3\times240} = 0.7\text{A}$$

چگالی جریان در سیم‌پیچی استاتور یک موتور القائی استاندارد را می‌توان بین $3A/mm^2$ تا $6A/mm^2$، در نظر گرفت.

با توجه به کلاس عایق‌کاری (F)، چگالی جریان سیم‌پیچی استاتور $\delta = 6\,A/mm^2$ در نظر گرفته می‌شود. سطح مقطع هادی برابر است با:

$$a_s = \frac{I_s}{\delta} = \frac{0.7}{6} = 0.117\ \text{mm}^2$$

قطر هادی موردنیاز:

$$a_s = \pi d^2/4 \Rightarrow d = \sqrt{4a_s/\pi}$$

$$d = \sqrt{4\times0.117/\pi} = 0.39\,mm$$

قطر هادی موردنیاز $0.39\,mm$ می‌باشد. نزدیک‌ترین سیم استاندارد، قطر $0.40\,mm$ را داشته و سطح مقطع آن $0.1257\,mm^2$ است.

**جمع‌بندی:**

230 هادی در هر شیار و هر هادی با قطر $0.40\,mm$ و سطح مقطع $0.1257\,mm^2$ می‌باشد پس مساحت کل 230 هادی در هر شیار $230\times0.1257 = 28.911\,mm^2$ هست. مساحت هر شیار برابر $72.6\,mm^2$ است پس ضریب اشغال شیار حدود $28.911/72.6 \simeq 0.4$ می‌باشد.

طول دور متوسط سیم‌پیچ استاتور ( $L_{\text{mts}}$ ) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{\text{mts}} = 2L + 2.3\tau = 2\times0.058 + 2.3\times0.43 = 0.215\ \text{m}$$

در دمای 25 درجه سانتی‌گراد مقاومت استاتور برابر است:

$$r_s = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho TsL_{\text{mts}}}{a_s}$$

$$r_s = \frac{1.8\times10^{-8}\times920\times0.215}{0.1257\times10^{-6}} = 28.4\,\Omega$$

چگالی شار دندانه ( $B_{ts}$ ) برابر است با:

$$\phi = B_t w_t L s \Rightarrow B_{ts} = \frac{\phi}{w_t L_i s}$$

در رابطه بالا $B_{ts}$ چگالی شار دندانه استاتور، $\phi$ شار هر قطب، $w_t$ عرض دندانه (جزء اطلاعات ورق داده می‌شود)، $L_i$ طول خالص آهن، $s$ تعداد شیار در هر قطب هستند.

$$B_{ts} = \frac{1.22\times10^{-3}}{0.0551\times0.003\times6} = 1.23\text{T}$$

چگالی شار هسته استاتور ( $B_{cs}$ ) برابر است با:

$$B_{cs} = \frac{\phi/2}{L_i d_{cs}}$$

شار قطب وقتی وارد استاتور می‌شود تقسیم شده و به دو مسیر می‌رود لذا شار استاتور $\phi/2$ می‌باشد.

در رابطه بالا $B_{cs}$ چگالی شار هسته استاتور، $\phi$ شار هر قطب، $L_i$ طول خالص آهن، $d_{cs}$ عمق هسته (عمق یوغ) استاتور هستند.

عمق هسته استاتور $39.9\,mm$ بوده و چگالی شار هسته برابر است با:

$$B_{cs} = \frac{1.22\times10^{-3}/2}{0.0551\times9.39\times10^{-3}} = 1.28\text{ T}$$

**طراحی روتور**

قطر روتور برابر است با:

$$D_r = D - 2l_g = 55 - 2\times0.25 = 54.5\text{ mm}$$

در رابطه بالا $D_r$ قطر روتور، $D$ قطر داخلی استاتور، $l_g$ فاصله هوایی هستند.

**تعداد شیارهای روتور:**

تعداد 24 شیار استاتور و 17 شیار روتور با استفاده از جدول زیر، معیار بحث شده را ایفا می‌نماید.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| p=2 | 36/28<br>54/38 | 36/24<br>48/38 | 36/22<br>42/32 | 18/23<br>36/32 |
| p=4 | 48/40<br>60/52 | **24/17**<br>60/42 | 24/33<br>48/60 | |
| p=6 | 54/38<br>72/58 | 48/44<br>72/56 | 36/40<br>72/54 | 36/44 |
| p=8 | 72/60 | 72/52 | | |

روتور 17 شیار دارد پس 17 هادی نیاز هست (قفس سنجابی).

جدول - جزئیات ورقه‌های استاتور و روتور

| Part | O/D $mm$ | I/D $mm$ | $A_s$ $mm^2$ | $W_t$ $mm^2$ |
|---|---|---|---|---|
| Stator | 99.78 | 55.00 | 72.60 | 3.00 |
| Rotor | 54.50 | 18.00 | 27.70 | 3.90 |

حال نسبت مساحت کل هادی روتور ( $A_{cr}$ ) به مساحت مس استاتور ( $A_{cs}$ ) محاسبه می‌شود که باید در محدوده بین 0.5 تا 0.8 باشد:

تعداد هادی‌های روتور 17 و سطح مقطع هر هادی $27.7mm^2$ است. تعداد هادی‌های استاتور 5520 و سطح مقطع هر هادی $0.1257mm^2$ است. پس:

$$\frac{A_{cr}}{A_{cs}} = \frac{17 \times 27.7}{5520 \times 0.1257} = \frac{471}{693} = 0.68$$

$0.5 < \frac{A_{cr}}{A_{cs}} = 0.68 < 0.8$ قابل‌قبول است.

**جریان در میله‌های روتور:**

نسبت تبدیل در موتور القائی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{I_b}{I_s \cos\varphi} = \frac{2m_s K_w T_s}{s_r}$$

در آن:

$I_s$: جریان استاتور

$I_b$: جریان هر میله روتور

$m_s$: فاز استاتور

$s_r$: تعداد میله‌های روتور

$T_s$: تعداد دور در هر فاز استاتور در حالت سری هستند.

جریان را در میله‌های روتور به دست می‌آوریم:

$$I_b = \frac{2m_s K_w T_s}{S_r} I_s \cos\varphi$$

$$I_b = \frac{2 \times 3 \times 0.933 \times 920}{17} \times 0.73 \times 0.7 = 154.9\text{A}$$

چگالی جریان هر میله روتور در حدود $154.9/27.7 = 5.6\, A/mm^2$ می‌باشد که کاملاً قابل‌قبول است.

**چگالی شار هسته و دندانه روتور**

پهنای دندانه $w_t = 3.9mm$، طول خالص محوری $L_i = 0.0551$، تعداد شیار در هر قطب $s = 17/4$، $\phi = 1.22\times10^{-3}$ هستند و چگالی شار دندانه $B_{tr}$ برابر است با:

$$B_{tr} = \frac{\phi}{w_t L_i s}$$

$$B_{tr} = \frac{1.22\times10^{-3}}{\frac{17}{4}\times0.0551\times3.9\times10^{-3}} = 1.34\text{T}$$

عمق هسته روتور $d_{cr} = 11.8mm$ بوده و چگالی هسته روتور از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$B_{cr} = \frac{\phi/2}{L_i d_{cr}}$$

$$B_{cr} = \frac{\phi/2}{L_i d_{cr}} = \frac{1.22\times10^{-3}/2}{0.0551\times11.8\times10^{-3}} = 0.93\text{T}$$

چگالی شار هسته و دندانه روتور هر دو قابل‌قبول‌اند.

**جریان حلقه انتهایی**

جریان حلقه انتهایی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{er} = \frac{I_b s_r}{\pi p}$$

$$I_{er} = \frac{154.9\times17}{\pi\times4} = 209.5\text{A}$$

با توجه به اینکه کلاف روتور بر روی روتور سوار می‌شود لذا قطر بیرونی حلقه انتهایی باید کمتر از قطر روتور باشد.

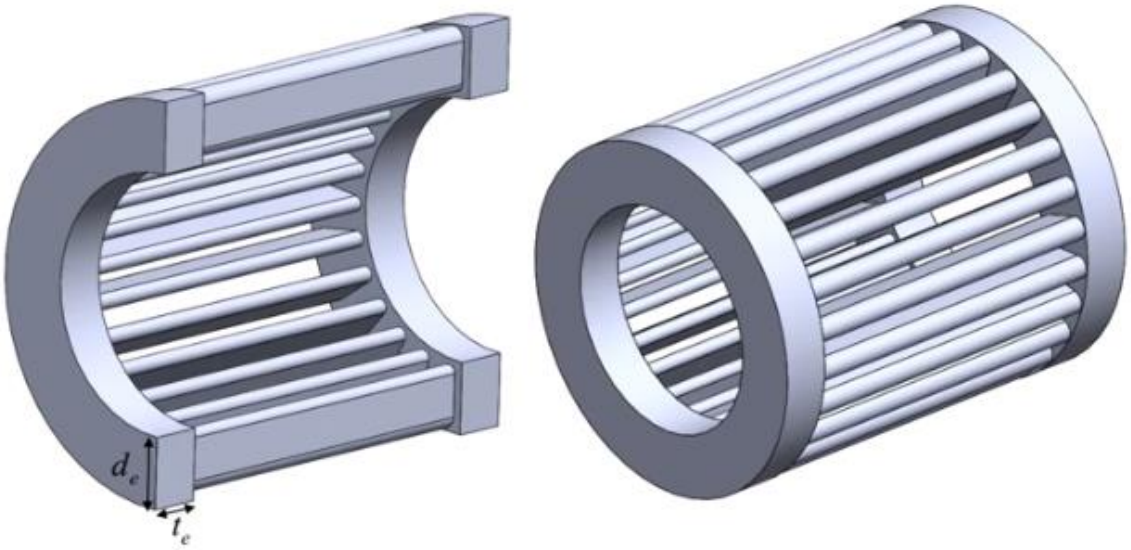
قطر روتور $54.5mm$ است پس قطر بیرونی حلقه انتهایی را $53mm$ انتخاب می‌کنیم. ضخامت شعاعی آن $8mm$ و طول محوری آن $10mm$ می‌گیریم.

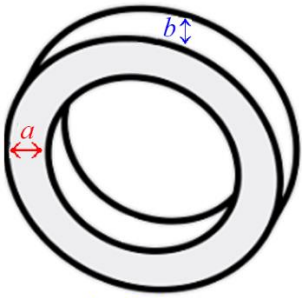
سطح مقطع حلقه انتهایی $80mm$ خواهد شد که چگالی جریان در حلقه انتهایی حدود $\delta_{er} = \frac{209.5}{80} = 2.6$ می‌شود.

قطر متوسط حلقه انتهایی $D_{er} = 53-8 = 45mm$ است.

مقاومت سیم‌پیچ قفس در هر فاز ارجاع شده به‌طرف استاتور ($r_r'$) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_r' = 4m_s T_s^2 K_{ws}^2 \rho\left[\frac{L_b}{s_r a_b} + \frac{2D_{er}}{\pi p^2 a_{er}} K_R\right]$$




$b = 10mm$
$a = 8mm$

در اینجا:

$m_s$: تعداد فازها

$K_{ws}$: ضریب سیم‌پیچی استاتور

$\rho$: مقاومت الکتریکی ویژه هادی

$L_b$: طول میله روتور برحسب متر (برابر با طول محوری است)

$s_r$: تعداد شیارهای روتور

$a_b$: سطح مقطع هر میله روتور برحسب $mm^2$

$D_{er}$: قطر متوسط حلقه انتهایی برحسب $m$

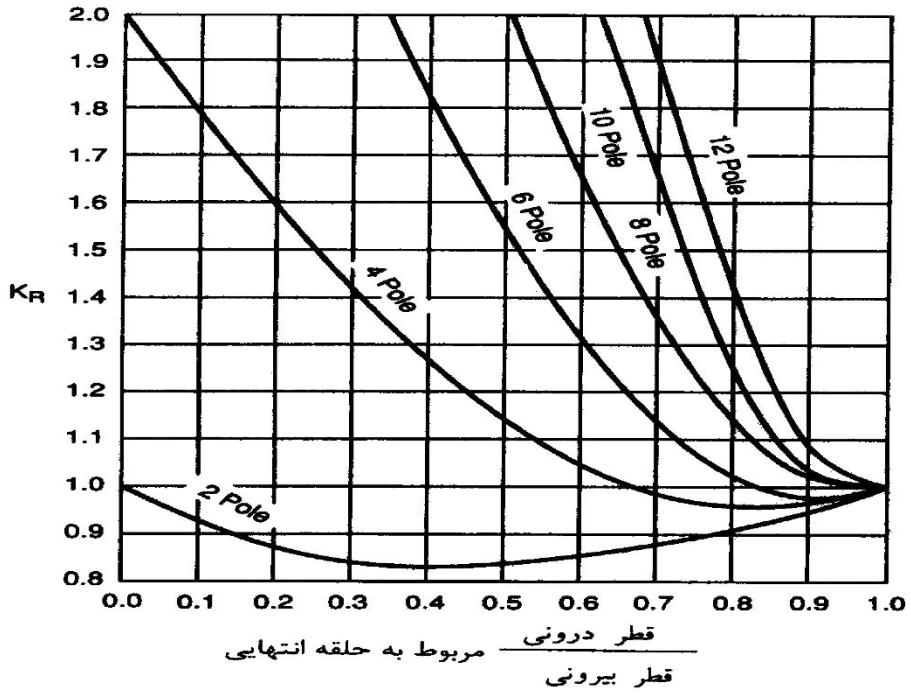
$p$: تعداد قطب‌ها

$a_{er}$: سطح مقطع حلقه انتهایی برحسب $mm^2$

$K_R$: ضریب تصحیح حلقه انتهایی، هستند.

ضریب تصحیح حلقه انتهایی ( $K_R$ ) از شکل زیر برابر با 0.95 به دست می‌آید.

$$\frac{\text{قطر درونی}}{\text{قطر بیرونی}} = \frac{37mm}{53mm} \cong 0.7 \xrightarrow{\text{با استفاده از شکل}} K_R = 0.95$$




**ضریب تصحیح حلقه انتهایی**

پس خواهیم داشت:

$$r' = 4\times 3\times 920^2 \times 0.933^2 \times 2.7\times 10^{-2}\left[\frac{0.058}{17\times 27.7} + \frac{2\times 0.049\times 0.95}{\pi\times 16\times 80}\right] = 34.9\Omega$$

**جریان بی‌باری (جریان مغناطیس شوندگی):**

جریان مغناطیس‌کنندگی ( $I_m$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_m = \frac{0.427\, pAT_p}{T_s K_{ws}}$$

در اینجا

$p$ : تعداد قطب

$T_s$: تعداد دور در هر فاز استاتور در حالت سری

$K_{ws}$: ضریب سیم‌پیچی استاتور

$AT_p$ : آمپردور قطب، هستند.

برای آمپردور قطب ( $AT_p$ ) داریم:

$$\underbrace{AT_p}_{\text{آمپردور قطب}} = \underbrace{AT_g}_{\text{آمپردور فاصله هوایی}} + \underbrace{AT_{ts}}_{\text{آمپردور دندانه استاتور}} + \underbrace{AT_{tr}}_{\text{آمپردور دندانه روتور}} + \underbrace{AT_{cs}}_{\text{آمپردور هسته استاتور}} + \underbrace{AT_{cr}}_{\text{آمپردور هسته روتور}}$$

مقادیر عددی پارامترهای رابطه بالا از جدول زیر (که داده می‌شود) استخراج می‌شود.

داده‌های مغناطیس شوندگی

| Section | B(T) | $B_g$(T) | Length (mm) | at/m | AT |
|---|---|---|---|---|---|
| **Air- gap** | 0.51 | 0.69 | 0.349 | $55.2\times10^4$ | 192.6 |
| **Stator teeth** | 1.23 | 1.67 | 13.00 | 280 | 3.6 |
| **Stator Core** | 1.28 | | -23.6 | 250 | 5.9 |
| **Rotor teeth** | 1.34 | 1.82 | 7.9 | 1000 | 7.9 |
| **Rotor Core** | 0.9 | | -7.0 | 160 | 1.1 |

$$AT_p = 192.6 + 3.6 + 5.9 + 7.9 + 1.1 = 211.1$$

با توجه به اطلاعات مغناطیس شوندگی در مورد طراحی فعلی، جریان مغناطیس‌کنندگی ( $I_m$ ) برابر است:

$$I_m = \frac{0.427\,pAT_p}{T_s K_{ws}} = \frac{0.427\times4\times211.1}{920\times0.933} = 0.42\text{A}$$

**تلفات**

تلفات در یک ماشین الکتریکی برابر با مجموع تلفات مسی و تلفات بی‌باری (آهنی) است.

اگر تلفات آهنی در مسئله داده نشود مشابه با مسائل حل‌شده در مورد ترانسفورماتور این تلفات با استفاده از وزن هسته‌ها محاسبه می‌شود. در اینجا کل تلفات آهنی برابر $10.4W$می‌باشد که برابر با مجموع تلفات آهنی هسته استاتور و تلفات آهنی دندانه‌های استاتور است.

از تلفات آهنی روتور صرف‌نظر شده است.

تلفات اصطکاک و بادخوری را $2.5\%$توان نامی ماشین در نظر می‌گیریم که برابر با $5.75W$ می‌شود.

تلفات بی‌باری کل $10.4+5.75=16.15W$است. مؤلفه تلفات جریان بی‌باری برابر است با:

$$P = 3VI \Rightarrow I_p = \frac{P}{3V} \xrightarrow{V = E_s = 0.97\times\frac{415}{\sqrt{3}} = 232.4} I_p = \frac{16.15}{3\times232.4} = 0.023\text{A}$$

جریان بی‌باری:

$$I_O = \sqrt{I_p^2 + I_m^2} = \sqrt{0.023^2 + 0.42^2} = 0.42\,\text{A}$$

$$R_c = \frac{V}{I_p} \xrightarrow{V = E_s = 0.97\times\frac{415}{\sqrt{3}} = 232.4} R_c = \frac{232.4}{0.023} = 1.104\Omega$$

**راکتانس نشتی**

راکتانس نشتی سیم‌پیچی برای یک ماشین الکتریکی با تعیین مسیرهای شار نشتی، محاسبه طول و مساحت آن‌ها انجام می‌شود. برای موتورهای القائی روش معمول آن است که شار نشتی کل را به شارهای نشتی استاتور و روتور، نشتی زیگزاگ، نشتی اتصال انتهایی تقسیم می‌کنیم.

*شار نشتی شیار:*

همه شار از فاصله هوایی عبور نخواهد کرد بلکه کل مساحت هادی در شیار را مرتبط می‌کند. درواقع شار نشتی در قسمت‌های مختلف ماشین هم وجود دارد و آن شاری است که از مسیر هسته آهنی منحرف می‌شود.

به‌طورکلی محاسبه شار نشتی بسیار سخت است و معمولاً یا صرف‌نظر می‌شود و یا تقریب‌هایی برای آن در نظر گرفته می شود.

انواع مختلف شار نشتی در محاسبات $X_1$ (راکتانس نشتی استاتور) دخیل هستند ازجمله:

۱- شار نشتی شیار استاتور ( $\lambda_s$ )

۲- شار نشتی زیگزاگ ( $\lambda_z$ )

۳- شار نشتی پیشانی قطب ( $\lambda_o$ )

۴- شار نشتی حلقه انتهایی سیم‌پیچی و ...

هرچه تعداد بیشتری از این شارهای نشتی را در محاسبات وارد کنیم مقدار $X_1$ دقیق‌تر به دست می‌آید.

*راکتانس نشتی شیارهای استاتور $\lambda_s$ و روتور $\lambda_r$*

با توجه به شکل شیارها و ابعادشان ضرایب مربوط به هدایت مغناطیسی شیارهای استاتور و روتور را به دست آورده و از روی آن‌ها محاسبات راکتانس‌های نشتی را انجام می‌دهیم. ضرایب هدایت مغناطیسی برای شیارهای استاتور و روتور به کمک شکل 3-3A تخمین زده می‌شوند:

$$\lambda_{ss} = 1.25\mu_o$$

$$\lambda_{sr} = 1.85\mu_o$$

راکتانس نشتی ناشی از شیارهای استاتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_{ss} = \frac{8\pi f T_s^2 L}{pq}\lambda_{ss}$$

که در آن

$p$ : تعداد قطب‌ها

$q$: تعداد شیارها برای هر قطب در هر فاز، هستند. پس

$$X_{ss} = \frac{8 \times \pi \times 50 \times 920^2 \times 0.058}{4 \times 2} \times 1.25\mu_o = 12.1\Omega$$

ضریب هدایت مغناطیسی شیار روتور ارجاع شده به‌طرف استاتور برابر است با:

$$\lambda'_{sr} = \lambda_{sr} \frac{K_{ws}^2 S_s}{K_{wr}^2 S_r}$$

$$\lambda'_{sr} = 1.85\mu_o \frac{0.933^2 \times 24}{1^2 \times 17} = 2.27\mu_o$$

و راکتانس نشتی شیار روتور ارجاع شده به‌طرف استاتور برابر است با:

$$X_{sr} = \frac{8\pi f T_s^2 L}{pq} \lambda'_{sr}$$

$$X'_{sr} = \frac{8 \times \pi \times 50 \times 920^2 \times 0.058}{4 \times 2} \times 2.27\mu_o = 22\Omega$$

*شار نشتی زیگزاگ*

چون معمولاً تعداد شیارهای استاتور و روتور متفاوت می‌باشند (در این ماشین 24/17) لذا دندانه‌ها دقیقاً روبروی هم قرار نمی‌گیرند ازاین‌رو شار از یک دندانه به دندانه دیگر روی کناره‌های مقابل هم در فاصله‌ی هوایی به طریق زیگزاگ عبور می‌کند.

$$\lambda_z = \mu_0 \frac{w_{ts} w_{tr} (w_{ts}^2 + w_{tr}^2)}{12 L_g Z_{ss}^2 Z_{sr}^2}$$

در رابطه بالا

$w_{ts}$: پهنای دندانه استاتور،

$w_{tr}$: پهنای دندانه روتور،

$L_g$: فاصله هوایی،

$Z_{ss}$: گام شیار استاتور و

$Z_{sr}$: گام شیار روتور هستند.

*راکتانس نشتی زیگزاگ ( $X_z$ ):*

$$X_z = \frac{8\pi f T_s^2 L}{pq} \lambda_z$$

با جایگذاری مقادیر خواهیم داشت: $X_z = 1.67\,\Omega$

*راکتانس نشتی پیشانی قطب ( $X_o$ ):*

با جایگذاری مقادیر خواهیم داشت: $X_o = 8.18\Omega$

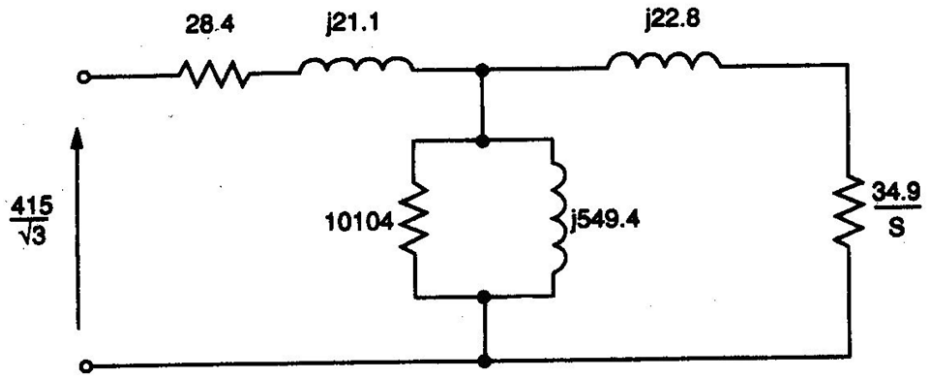
$$X_1 = X_{ss} + X_o + \frac{X_2}{2} + ... = 12.1 + 8.18 + \frac{1.67}{2} = 21.1\Omega$$

$$X_2' = X_s' + \frac{X_z}{2} + ... = 22 + \frac{1.67}{2} = 22.8\Omega$$

$$X_m = \frac{V_{ph}}{I_m} - X_1 = \frac{415/\sqrt{3}}{0.42} - 21.1 = 549.4\Omega$$

اکنون مدار معادل موتور القائی به‌صورت کامل به دست آمد. مدار معادل را می‌توان برای تعیین مشخصه‌های کاری موتور مورداستفاده قرار داد. بااین‌حال باید به خاطر داشت که پارامترهای مدار معادل بدون در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی به دست می‌آیند. این تقریب، دقت عملکرد را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

بااین‌حال، توان خروجی در لغزش 8 درصد (یا سرعت $1380\,rev/min$) حدود $325W$ خواهد بود. پس از منظور نمودن اشباع و تلفات سرگردان، توان خروجی احتمالاً نزدیک $250W$ خواهد شد.




مدار معادل یک موتور القایی ۲۵۰ W و ۱۳۸۰ rev/min