

# **מכונות חשמל**

## **הנדסאי חשמל**

**נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים**

**2016**

## תוכן עניינים:

פרק 1 – שנאים	עמ' 3-44
פרק 2 – מנועי השראה (אסינכרוניים)	עמ' 45-79
פרק 3 – מכונות לזרם ישר	עמ' 80-112
פרק 4 – הינע	עמ' 113-125
פרק 5 – מכונות סינכרוניות	עמ' 126-144

## פרק 1- שנאים

מבוא:

השנאי תפקידו לקבל אנרגיה חשמלית מצידו האחד ולהמיר אותה לאנרגיה חשמלית בצידו השני אך תוך כדי שינוי ערכי הזרם והמתח שלו, (בדרך כלל).

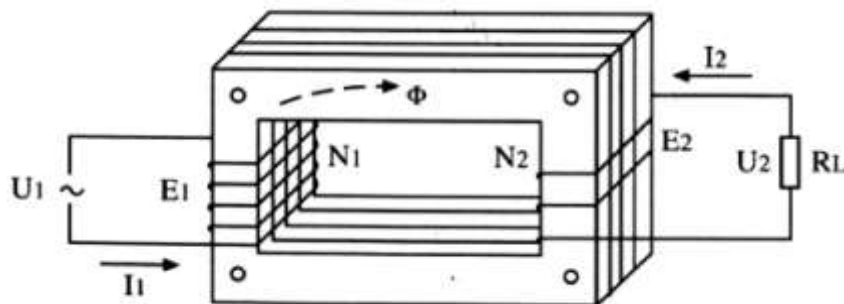
קיימים סוגים שונים של שנאים ולהלן העיקרים שבהם:

1. שנאי הספק ששימושו לתמסורת וחלוקת אנרגיה חשמלית.
2. שנאי ריתוך.
3. שנאים עצמיים להשגת מתח.
4. שנאי מדידה לצורך מדידת ערכים גבוהים של זרם ומתח.
5. שנאי מתח וזרם.

### שנאי ההספק

בעוד ששנאי זרם ומתח בנויים כדי להקטין את השגיאה במדידה, שנאי ההספק בנוי בצורה המאפשרת פיזור יעיל של החום הנוצר בזמן שהשנאי פועל ומועמס.

### מבנה ועיקרון פעולה השנאי החד פאזי:



הסליל הראשוני מחובר למקור מתח חילופין כתוצאה מכך זורם זרם בסליל זה, המלוכף סביב הליבה. זרם זה יוצר שטף מגנטי אשר עובר דרך הליבה וכתוצאה מכך נוצר מתח מושרה על פני סליל השניוני.

לכל שנאי קיים יחס השנאה בהתאם לביטוי הבא:  
עבור שנאי אידיאלי-

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

עבור שנאי מעשי-

$$K = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

### הספק השנאי:

גודל השנאי נקבע לפי ערך ההספק המדומה שלו-

$$S = U_1 * I_1 = U_2 * I_2 [VA]$$

ואם השנאי עובד בתנאי הנקובים-

$$S_n = U_{n1} * I_{n1} = U_{n2} * I_{n2} [VA]$$

הספק השנאי הוא תמיד ביחידות VA מכיוון שהוא תלוי באופי הצרכן המחובר לשנאי.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

כאשר:

כא"מ מושרה אפקטיבי בראשוני	$E_1$	[V]
כא"מ מושרה אפקטיבי בשניוני	$E_2$	[V]
מספר הכריכות בראשוני	$N_1$	[T]
מספר הכריכות בשניוני	$N_2$	[T]
מתח נקוב בראשוני	$U_{1n}$	[V]
מתח נקוב בשניוני	$U_{2n}$	[V]
זרם נקוב בראשוני	$I_{1n}$	[A]
זרם נקוב בשניוני	$I_{2n}$	[A]
תמסורת השנאי, מקדם השנאה	K	
הספק מדומה נקוב	$S_n$	[VA]

השנאי הוא מכונה דו כיוונית בהספקת מתח חילופין בצידו הראשוני יתקבל מתח מושרה בצידו השניוני וגודלו בהתאם ליחס ההשנאה, ואילו אם נספק מתח חילופין בצידו השניוני יתקבל מתח מושרה בצידו הראשוני וגודלו תלוי ביחס ההשנאה.

כא"מ מושרה אפקטיבי בשנאי:

כתוצאה מחיבור הצד הראשוני של השנאי למקור מתח נוצר בשנאי כא"מ (כוח אלקטרי מושרה) והוא מתח מושרה המתפתח בסליל הראשוני כתוצאה מהשטפים המגנטיים.

$$E = 4.44 * f * N * \phi_{max}$$

$$E_1 = 4.44 * f * N_1 * \phi_{max}$$

$$E_2 = 4.44 * f * N_2 * \phi_{max}$$

$$\phi_{max} = B_{max} * A$$

כאשר:

כא"מ מושרה אפקטיבי	E	[V]
מספר כריכות	N	[T]
תדירות	f	[Hz]
השטף המגנטי המירבי בגרעין	$\phi_{max}$	[Wb]
השראה מגנטית מירבית	$B_{max}$	$\left[ \frac{Wb}{m^2} \right]$

דוגמא 1:

חשב את המתח המושרה המתפתח בין קצוות סליל בעל 500 כריכות המחובר לרשת שתדירותה 50Hz והשטף בליבה סביבה כרוך הסליל הוא 2mWb.

$$E = 4.44 * f * N * \phi_{max} = 4.44 * 50 * 500 * 2 * 10^{-3} = 222 [V]$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

דוגמא 2:

הסליל הראשוני של שנאי אידיאלי הוא בעל 440 כריכות, מחובר לרשת של 220V. חשב את המתח בשניוני של השנאי ואת הזרם הראשוני, אם ידוע כי מספר הכריכות בסליל השניוני הוא 110, והזרם המסופק לעומס הוא 10A.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$
$$E_2 = \frac{N_2 * E_1}{N_1} = \frac{110 * 220}{440} = 55 \text{ [V]}$$
$$I_1 = \frac{N_2 * I_2}{N_1} = \frac{110 * 10}{440} = 2.5 \text{ [A]}$$

אפשרות הפעלה של השנאי

ניתן להבחין בין 3 מצבי פעולה של השנאי:

1. הפעלה בריקם.
2. הפעלה בקצר (למטרת ניסוי בלבד)
3. הפעלה בעומס.

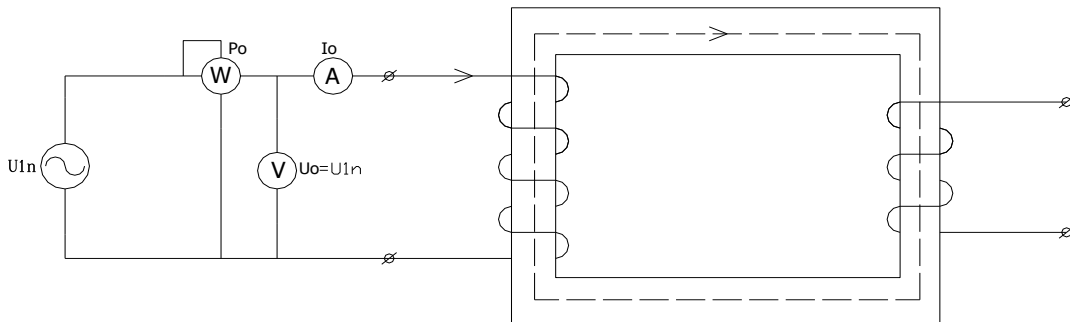
ניסויים בשנאי:

בשנאי המעשי קיימים הפסדי הספק שונים, ככל שהפסדים אלו קטנים יותר נצילות השנאי גבוהה יותר. ההפסדים העיקריים הקיימים השנאי הם הפסדי הספק קבועים-הנובעים כתוצאה מהפסדי הברזל, והפסדים משתנים-הנובעים כתוצאה מהפסדי הנחושת. לצורך חישוב הפסדים אלו מבצעים בשנאי 2 סוגי ניסויים והם:

1. ניסוי ריקם – חיבור השנאי ללא עומס במטרה למדוד את הפסדי הברזל.
2. ניסוי קצר – חיבור השנאי כאשר הצד השניוני שלו מקוצר במטרה למדוד את הפסדי הנחושת.

ניסוי ריקם של שנאי:

מטרת הניסוי למדוד את הפסדי הברזל של השנאי הנגרמים כתוצאה מהתחממות ליבת הברזל.



בניסוי זה מספקים לשנאי מתח ריקם השווה למתח הראשוני הנקוב של השנאי-  $U_0 = U_{1n}$  לצידו השניוני של השנאי לא מחברים עומס כלל.

את ניסוי הריקם ניתן לבצע הן מהצד הראשוני והן מהצד השניוני, באיור הנ"ל מתואר ניסוי ריקם מהצד הראשוני.

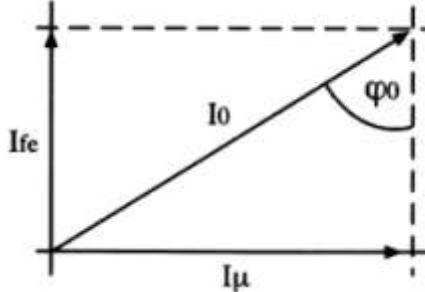
בניסוי זה מודדים את ההספק המתפתח בסליל הראשוני בריקם  $P_0$  ואת הזרם הזורם בסליל הראשוני בריקם  $I_0$ .

מאחר וערכם של המתחים המושרים  $E_1$  ו- $E_2$  תלוי בגודל השטף המכסימאלי  $\phi_{max}$  אשר ערכו אינו משתנה ומאחר שניתן בניסוי זה להזניח את מפלי המתח בסלילים ז"א  $E=U$ , ניתן לקבוע כי:

$$\phi_0 = \phi_{max}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

- המשמעות היא שהזרם  $I_0$  ערכו נמוך ותפקידו:
- א. לספק את השטף הדרוש בליבת השנאי  $\phi_0$  לצורך השראת המתחים  $E_1$  ו-  $E_2$ .
- ב. לפתח את ההספק בליבת השנאי אשר נפלט בצורת חום המוגדר  $\Delta P_{fe}$  שהוא בעצם הפסדי ההספק של הברזל בשנאי וערכו קבוע ללא קשר באפשרות הפעולה של השנאי.
- תאור הוקטורי של  $I_0$ :



כאשר:

- $I_{fe}$  - רכיב הזרם לפיתוח ההספק  $\Delta P_{fe}$  שהם הפסדי ליבת השנאי (רכיב הברזל) ביחידות אמפר [A].
- $I_\mu$  - רכיב הזרם ליצירת השטף בליבה (רכיב המיגנט) ביחידות אמפר [A].
- $\phi_0$  - זווית המופע בשנאי במצב ריקם (הזווית בין זרם הריקם למתח הריקם) ביחידות מעלות [°].
- לפי תאור זה ניתן לקבוע את הביטויים הבאים:

$$I_{fe} = I_0 * \cos \phi_0 \text{ [A]}$$

$$I_\mu = I_0 * \sin \phi_0 \text{ [A]}$$

$$I_0 = \sqrt{I_{fe}^2 + I_\mu^2} \text{ [A]}$$

עבור שנאי החד פאזי-

$$\Delta P_{fe} = U_0 * I_0 * \cos \phi_0 \text{ [W]}$$

- כאשר:  $U_0$  הוא מתח הריקם שהוא מתח הרשת אליו מחובר השנאי  $U_0 = U_{1n}$  ביחידות וולט [V].
- את גורם ההספק של השנאי בתנאי ריקם ניתן לחשב לפי-
- עבור השנאי החד פאזי-

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{U_0 * I_0} = \frac{P_0}{U_{1n} * I_0}$$

- כיון שהספק הנמדד נגרם כתוצאה מהפסדי הברזל והפסדי הנחושת בסליל הראשוני במצב ריקם ואת הפסדי הנחושת בסליל הראשוני ניתן לחשב אותו לפי הביטוי הבא:
- עבור שנאי חד פאזי-

$$\Delta P_{cu1_0} = I_0^2 * R_1 \text{ [W]}$$

- אך כיוון שערכם מזערי כתוצאה מהזרם הקטן שזורם בראשוני בניסוי זה ולכן-
- $$P_0 = \Delta P_{fe}$$

כאשר:

- $\Delta P_{cu1_0}$  - הפסדי הנחושת בסליל הראשוני במצב ריקם ביחידות ווט [W].
- $R_1$  - ההתנגדות האומית של הסלילי הראשוני ביחידות אום [Ω].

- אבל מאחר ו-  $I_0 \ll I_1$  ניתן להזניח את בזבז ההספק בנחושת הסליל הראשוני, וכמו כך את מפל המתח על פניו.

דוגמא:

שנאי חד פאזי בריקם מחובר למקור מתח של 230V הזרם בריקם הוא 10A ורכיבי זרם הריקם הם: רכיב הברזל 3A ורכיב המיגנט 9.539A, חשב את הפסדי הברזל המתפחים בליבת השנאי.

$$I_{fe} = I_0 * \cos \varphi_0 \text{ [A]}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{fe}}{I_0} = \frac{3}{10} = 0.3$$

$$U_0 = U_{1n} = 230V$$

$$\Delta P_{fe} = U_0 * I_0 * \cos \varphi_0 = 230 * 10 * 0.3 = 690 \text{ [W]}$$

בדיקת פרמטרים נוספים בניסוי ריקם

בניסוי הריקם מעבר להפסדי הברזל ניתן לבדוק פרמטרים נוספים וזאת באמצעות שיטות מדידה נוספות:

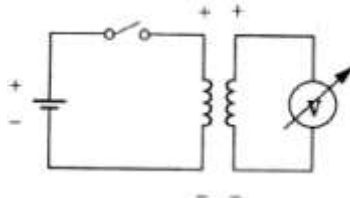
א. תמסורת השנאי (K) מספקים מתח לשנאי בסליל הראשוני ומוודדים את המתח בשניוני השנאי במצב ריקם, ניתן לחשב את יחס ההשנאה של השנאי לפי היחס:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

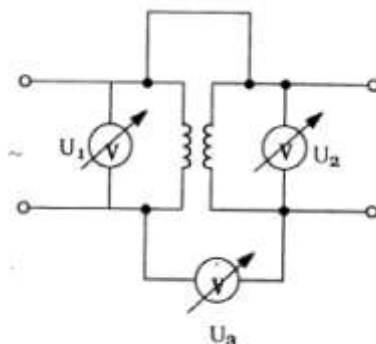
ב. עקום המגנט- משנים את מתח הכניסה לשנאי  $U_{10}$  באמצעות שנאי ווריאק (Varic) שהוא בעצם שנאי שניתן לשנות את יחס הכריכות שלו ובכך לשנות את המתח במוצא שלו, מ-0 ועד למתח הנקוב ומוודדים את זרם הריקם  $I_{10}$  וניתן לשרטט את עקום המגנט בהתאם לתוצאות הניסוי.

ג. בדיקת קוטביות השנאי- ניתן לבדוק באמצעות 2 שיטות:

1. באמצעות מתח ישר- מחברים את הסליל הראשוני של השנאי למקור מתח ישר ובשניוני של השנאי מחברים מד מתח ישר. אם הקריאה היא חיובית, השנאי שומר מופע (מתחבר), ואם הקריאה היא שלילית השנאי הופך מופע (מתחסר).



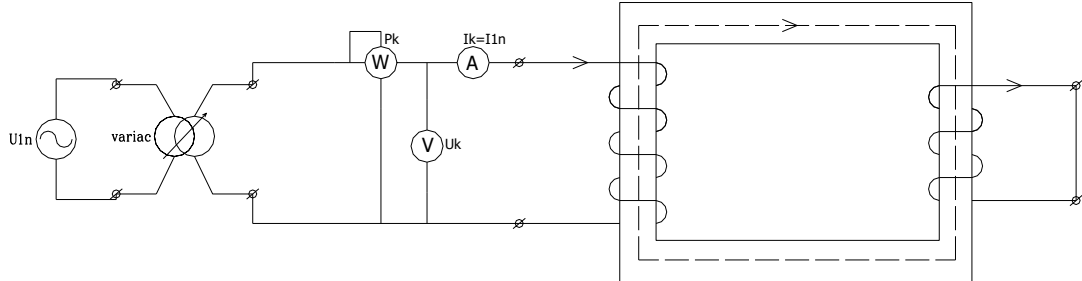
2. באמצעות מתח חילופין- מחברים את הסליל הראשוני של השנאי למקור מתח חילופין, ומחברים בין הסליל הראשוני והסליל השניוני ובנוסף מחברים 3 מדי מתח כמתואר באיור:



אם השנאי הוא שומר מופע (מתחבר) מד המתח  $U_3$  יורה על סכום המתחים של  $U_1$  ו- $U_2$ .  
ואם השנאי הוא הופך מופע (מתחסר) מד המתח  $U_3$  יורה על הפרש המתחים של  $U_1$  ו- $U_2$ .

ניסוי קצר של שנאי:

מטרת הניסוי אך ורק כדי למדוד את הפסדי הנחושת של השנאי הנגרמים כתוצאת מהתנגדות האומית של סלילי השנאי.



בניסוי זה מחברים לסליל הראשוני של השנאי מקור מתח הניתן לשינוי וזאת עושים בעזרת שנאי ווריאק (Varic) שהוא בעצם שנאי שניתן לשנות את יחס הכריכות שלו ובכך לשנות את המתח במוצא שלו. בצד הסליל השניוני מקצרים את מוצא השנאי.

במסגרת הניסוי מעלים את המתח בסליל הראשוני של השנאי עד לקבלת זרם בסליל הראשוני השווה לזרם הנקוב של השנאי בצד הראשוני.  $I_k = I_{1n}$ . במצב זה המתח על פני הסליל הראשוני שווה לערך המוגדר כמתח קצר ומסומן ב-  $U_k$ .

ההספק שנמדד שהוא ההספק בקצר ומסומן ב-  $P_k$  והוא שווה לערך הפסדי הנחושת של השנאי המסומנים ב-  $\Delta P_{cu}$ . ומכאן ניתן להבין כי  $\Delta P_{cu} = P_k$ . ערך זה אינו קבוע והוא משתנה בהתאם להעמסת השנאי.

את ניסוי הקצר ניתן לערוך הן מהצד הראשוני והן מהצד המשני. באיור הנ"ל מתואר ניסוי קצר מהצד הראשוני.

על פי המדידות שהתקבלו ניתן לחשב את גורם ההספק של השנאי בתנאי קצר לפי-  
עבור שנאי חד פאזי-

$$\Delta P_{cu} = P_k = U_k * I_k * \cos \varphi_k$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k * I_k} = \frac{P_k}{U_k * I_{1n}}$$

ניתן לחשב את הפסדי הנחושת גם לפי-

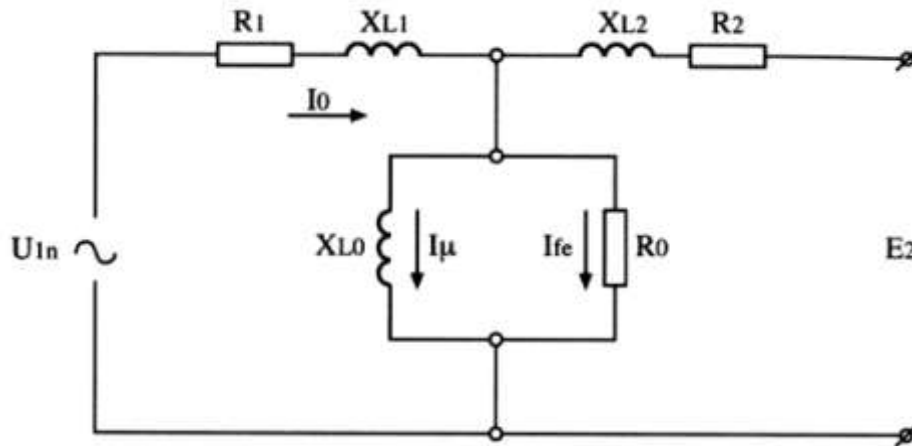
$$\Delta P_{cu} = I_{1n}^2 * R_1 + I_{2n}^2 * R_2$$



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

מעגל תמורה של שנאי:

ניתן לתאר את המעגל החשמלי של השנאי באמצעות מעגל תמורה המביא לידי ביטוי את כל הפרמטרים של השנאי וניתן לגזור ממנו ערכים נוספים הן בניסוי הקצר והן בניסוי הריקים- מעגל התמורה בריקים מצד הראשוני:



כאשר:

- $-X_L$  - היגב השראתי של שטף הפיזור בליפוף ביחידות אום [Ω].
  - $-R$  - ההתנגדות האומית של סלילי הליפוף ביחידות אום [Ω].
  - $-X_{L0}$  - היגב השראתי של הברזל השנאי ביחידות אום [Ω].
  - $-R_0$  - ההתנגדות האומית של ברזל השנאי ביחידות אום [Ω].
  - $-I_{10}$  - זרם ריקים בראשוני ביחידות אמפר [A].
  - $-I_{\mu}$  - זרם המיגנט בליבת השנאי ביחידות אמפר [A].
  - $-I_{fe}$  - זרם ריקים אפקטיבי (זרם הפסדי הברזל) ביחידות אמפר [A].
- בניסוי ריקים מהצד הראשוני-  $(U_0 = U_{1n})$  -

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu1_0} \approx \Delta P_{fe}$$

$$P_0 = U_{1_0} * I_{1_0} * \cos\varphi_{1_0}$$

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = I_{1_0} * \cos\varphi_{1_0}$$

$$I_{\mu} = I_{1_0} * \sin\varphi_{1_0}$$

$$I_{1_0}^2 = I_{fe}^2 + I_{\mu}^2$$

כאשר:

- $-P_0$  - הספק יעיל בריקים ביחידות ווט [W].
- $-\Delta P_{fe}$  - הפסדי ההספק בברזל ביחידות ווט [W].
- $-\Delta P_{cu1_0}$  - הפסדי ההספק בנחושת של הסליל הראשוני ביחידות ווט [W].
- $-\cos\varphi_{1_0}$  - מקדם ההספק בסליל הראשוני בריקים.

דוגמא 1:

בשנאי חד מופעי בריקים מתבזבז הספק בליבת השנאי שערכו 900W. חשב את התנגדותו האומית של ברזל הליבה אם ידוע כי השנאי מוזן במתח חד מופעי של 320V, כמו כן חשב את ההיגב האומי בליבת השנאי אם זרם הריקים שלו הוא 12A.

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = \frac{900}{320} = 2.812 [A]$$

$$R_0 = \frac{U_0}{I_{fe}} = \frac{320}{2.815} = 113.8 [\Omega]$$

$$I_{1_0}^2 = I_{fe}^2 + I_{\mu}^2$$

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{1_0}^2 - I_{fe}^2} = \sqrt{12^2 - 2.812^2} = 11.666 [A]$$

$$X_{L_0} = \frac{U_0}{I_{\mu}} = \frac{320}{11.666} = 27.43 [\Omega]$$

בניסוי ריקם מהצד השניוני- $(U_0 = U_{2n})$

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu2_0} \approx \Delta P_{fe}$$

$$P_0 = U_{2_0} * I_{2_0} * \cos\varphi_{2_0}$$

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = I_{2_0} * \cos\varphi_{2_0}$$

$$I_{\mu} = I_{2_0} * \sin\varphi_{2_0}$$

$$I_{2_0}^2 = I_{fe}^2 + I_{\mu}^2$$

דוגמא 2:

בשנאי חד מופעי שהספק הנקוב 1.5KVA וביחס מתחים של 230/24V בוצע ניסוי ריקם מהצד השניוני.

תוצאות הניסוי:

$$U_0 = 24V ; I_0 = 2A ; \cos\rho_0 = 0.7$$

חשב את הפסדי הברזל בשנאי ואת זרם הריקים באחוזים מזרם הנקוב.

$$U_0 = U_{2n} = 24 [V]$$

$$\Delta P_{fe} = P_0 = U_{2_0} * I_{2_0} * \cos\varphi_{2_0} = 24 * 2 * 0.7 = 33.6 [W]$$

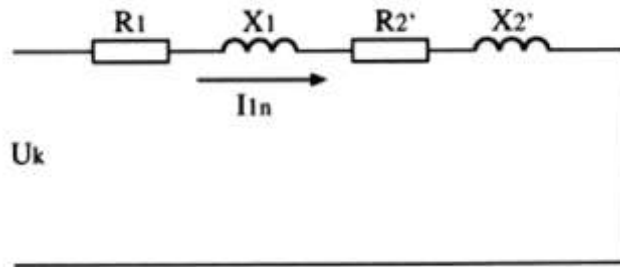
$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{1500}{24} = 62.5 [A]$$

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{2n}} * 100 = \frac{2}{62.5} * 100 = 3.2 [\%]$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

מעגל התמורה בקצר מהצד הראשוני

כך שמעגל התמורה של השנאי בקצר  $I_{10}$  בפעולת השנאי בקצר ניתן להזניח את זרם המגנט כמתואר באיור הבא:



בניסוי קצר מהצד הראשוני - ( $I_k = I_{1n}$ )  
בניסוי קצר מהצד השניוני - ( $I_k = I_{2n}$ )

$$P_k = \Delta P_{cu1n} + \Delta P_{cu2n} = \Delta P_{cun}$$

$$\Delta P_{cu1n} = I_{1n}^2 * R_1$$

$$\Delta P_{cu2n} = I_{2n}^2 * R_2$$

$$P_k = U_k * I_k * \cos \varphi_k$$

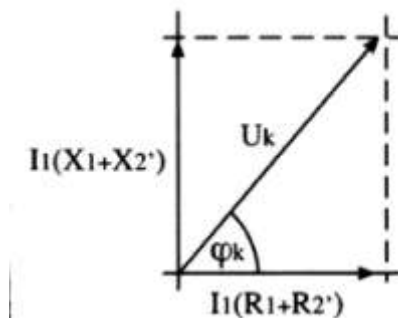
$$P_k = I_k^2 * R_k$$

$$R_k = R_1 + R_2' = R_1 + R_2 * K^2$$

$$X_k = X_1 + X_2' = X_1 + X_2 * K^2$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

דיאגרמה הפאזורית של מעגל התמורה בקצר מהצד הראשוני:



$$R_k = R_1 + R_2'$$

$$X_k = X_1 + X_2'$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

$$U_k = I_k * R_k * \cos \varphi_k + I_k * X_k * \sin \varphi_k$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

הערכים  $R_2$  ו-  $X_2$  שייכים לשניוני של השנאי ודרכם עובר הזרם  $I_2$ . בניסוי קצר מהצד הראשוני שמשמעותו שהזרם הזורם בם הוא  $I_1$ , יש להעניק להם ערך אחר מערכם האמיתי על מנת שההספקים המתפתחים בהם כאשר עובר דרכם  $I_1$  יהיו זהים להספקים המתפתחים בהם כאשר עובר דרכם  $I_2$  ולכן יש צורך לשקף את התנגדותם לצד הראשוני ולהעניק להם שמות חדשים  $R_2'$  ו-  $X_2'$ . אותו מהסבר נכון גם כאשר מבצעים את ניסוי הקצר מהצד השניוני הפעם יש לשקף את הערכים  $R_1$  ו-  $X_1$  לצד השניוני ולכן שמותם החדשים יהיו-  $R_1'$  ו-  $X_1'$ . הערכים המשוקפים טובים אך ורק לצורך מעגלי התמורה.  
ולכן:

$$I_2^2 * R_2 = I_1^2 * R_2' \Rightarrow R_2' = \frac{I_2^2 * R_2}{I_1^2} \Rightarrow R_2' = K^2 * R_2$$

$$I_2^2 * X_2 = I_1^2 * X_2' \Rightarrow X_2' = \frac{I_2^2 * X_2}{I_1^2} \Rightarrow X_2' = K^2 * X_2$$

כאשר אין נתונים מדויקים להתנגדויות וההיגבים האומים של סלילי השנאי או לא ניתן לחשבם ניתן להיעזר בהנחות המקובלות:  
הנחה מקובלת בשיקוף לראשוני-

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}$$

הנחה מקובלת בשיקוף לשניוני-

$$R_2 = R_1' = \frac{R_k}{2}$$

$$X_2 = X_1' = \frac{X_k}{2}$$

כאשר:

$-I_k$  זרם הקצר. כאשר הניסוי מצד הראשוני  $I_k = I_{1n}$  וכשר הניסוי מצד השניוני  $I_k = I_{2n}$  [A].  
 $-P_k$  הספק הקצר [W].

$-\Delta P_{cu1n}$  הפסדי הנחשת בסליל הראשוני בעומס נקוב [W].

$-\Delta P_{cu2n}$  הפסדי הנחשת בסליל השניוני בעומס נקוב [W].

$-\Delta P_{cun}$  סה"כ הפסדי הנחשת בעומס נקוב [W].

$-R_1$  ההתנגדות האומית של הסליל הראשוני [Ω].

$-R_2$  ההתנגדות האומית של הסליל השניוני [Ω].

$-X_1$  היגב הסליל הראשוני [Ω].

$-X_2$  היגב הסליל הראשוני [Ω].

$-R_k$  ההתנגדות הקצר [Ω].

$-X_k$  היגב הקצר [Ω].

$-Z_k$  עכבת הקצר [Ω].

$-U_k$  מתח הקצר [V].

$-U_{k\%}$  מתח הקצר באחוזים [%].

דוגמא:

שנאי חד מופעי שהספקו הנקוב 11KVA מחובר למתח 500V. לשנאי יחס השנאה 6, לסליל הראשוני התנגדות של 0.9Ω והיגב של 2.1Ω, ולסליל השניוני התנגדות של 0.0346Ω והיגב של 0.0528Ω. חשב את מתח הקצר באחוזים של השנאי כאשר הניסוי נערך מהצד הראשוני וכאשר הניסוי נערך מהצד המשני.

א. כאשר הניסוי מהצד הראשוני:

$$I_k = I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{11 \cdot 10^3}{500} = 22 \text{ [A]}$$

$$R_k = R_1 + R_2 \cdot K^2 = 0.9 + 0.0346 \cdot 6^2 = 2.146 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_k = X_1 + X_2 \cdot K^2 = 2.1 + 0.0528 \cdot 6^2 = 4 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{2.146^2 + 4^2} = 4.539 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$U_k = I_k \cdot Z_k = 22 \cdot 4.539 = 99.858 \text{ [V]}$$

$$U_{k\%} = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{99.858}{500} \cdot 100 = 19.97\%$$

ב. כאשר הניסוי מהצד השניוני:

$$U_{2n} = \frac{U_{1n}}{K} = \frac{500}{6} = 83.333 \text{ [V]}$$

$$I_k = I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{11 \cdot 10^3}{83.333} = 132 \text{ [A]}$$

$$K' = \frac{U_{2n}}{U_{1n}} = \frac{83.333}{500} = \frac{1}{6} = 0.1667$$

$$R_{k'} = R_1 \cdot K'^2 + R_2 = 0.9 \cdot 0.1667^2 + 0.0346 = 0.05961 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$X_{k'} = X_1 \cdot K'^2 + X_2 = 2.1 \cdot 0.1667^2 + 0.0528 = 0.111157 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$Z_{k'} = \sqrt{R_{k'}^2 + X_{k'}^2} = \sqrt{0.05961^2 + 0.111157^2} = 0.126132 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$U_{k'} = I_k \cdot Z_{k'} = 132 \cdot 0.126132 = 16.6494 \text{ [V]}$$

$$U_{k'\%} = \frac{U_{k'}}{U_{2n}} \cdot 100 = \frac{16.6494}{83.333} \cdot 100 = 19.97\%$$

מסקנה: אין זה חשוב מאיזה צד הראשוני או השניוני עורכים את ניסוי הקצר, מתח הקצר באחוזים יהיה זהה.

הפסדי ההספק בשנאי העמוס

בעבודת השנאי בעומס מתבזזים בו הפסדי נחושת הן בסליל הראשוני והן בסליל המשני  $[\Delta P_{cun}]$ , שגודלו תלוי בזרמים  $I_1$  ו-  $I_2$  הנקובים.

ערכי הזרם הנקובים מתקבלים כאשר השנאי מחובר לעומס נקוב ז"א שההספק המדומה המפתח על העומס יהיה זהה להספק המדומה הנקוב של השנאי ולכן:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}}$$

כך שאם השנאי אינו עמוס בהתאם לעומס הנקוב שלו גם הזרמים הסלילים שלו אינם נקובים ולכן גם בזבזי ההספק בסלילי השנאי אינם נקובים. ולכן לפי חישוב הפסדי הנחושת יש לחשב תחילה את היחס שבין ההספק הנצרך בפועל מהשנאי לבין ההספק הנקוב של השנאי. יחס זה מסומן באות  $(\beta)$ .

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

ומכאן הזרמים בסלילי השנאי בפועל יבוטאו בצורה הבאה:

$$I_1 = \frac{\beta * S_n}{U_1}$$

$$I_2 = \frac{\beta * S_n}{U_2}$$

את הפסדי הנחושת הנקובים מחשבים לפי הביטוי:

$$P_k = \Delta P_{cun} = \Delta P_{cu1n} + \Delta P_{cu2n} = I_{1n}^2 * R_1 + I_{2n}^2 * R_2$$

ניתן גם לרשום גם:

$$\Delta P_{cun} = \left(\frac{S_n}{U_{1n}}\right)^2 * R_1 + \left(\frac{S_n}{U_{2n}}\right)^2 * R_2$$

ובמצב שבו השנאי אינו מועמס בהספקו הנקוב יתקבלו גם הפסדי נחושת שאינם נקובות-

$$\Delta P_{cu} = \left(\frac{\beta * S_n}{U_1}\right)^2 * R_1 + \left(\frac{\beta * S_n}{U_2}\right)^2 * R_2$$

ניתן לפתח את הנוסחה ולרשום גם:

$$\Delta P_{cu} = \beta^2 * (I_{1n}^2 * R_1 + I_{2n}^2 * R_2)$$

ומכאן ניתן לקבוע כי:

$$\Delta P_{cu} = \beta^2 * \Delta P_{cun}$$

מפלי מתח ומתחי עבודה בשנאי

כאשר מחברים עומס נקוב לשנאי זורמים בו זרמים נקובים ב-2 צידי השנאי דרך סלילי השנאי שהם בעלי התנגדות ולכן נוצר בהם מפלי מתח.

מפל המתח בשנאי מסומן ב- $\Delta U$  ותלוי בגורמים שונים:

א. מקדם העמסה של השנאי  $\beta$ - באיזה הספק מועמס השנאי ביחס להספקו הנקוב.

ב. מקדם ההספק של הצרכן  $\cos \varphi_2$ .

מפל המתח בשנאי מורכב מ-2 גורמים:

א. מפל מתח אקטיבי (פעיל) המסומן ב-  $\Delta U_R$ . כאשר  $\Delta U_{R\%}$  הוא מפל המתח האקטיבי באחוזים מהמתח הנקוב  $U_{1n}$ .

ב. מפל מתח ראקטיבי (הגיבי) המסומן ב-  $\Delta U_X$ . כאשר  $\Delta U_{X\%}$  הוא מפל המתח הראקטיבי באחוזים מהמתח הנקוב  $U_{1n}$ .

$$\Delta U_{Rn\%} = \frac{\Delta P_{cun}}{S_n} * 100$$

$$\Delta U_{Rn\%} = \frac{I_{1n} * R_k}{U_{1n}} * 100$$

$$\Delta U_{Xn\%} = \frac{I_{1n} * X_k}{U_{1n}} * 100$$

$$\Delta U_{kn\%} = \sqrt{\Delta U_{Rn\%}^2 + \Delta U_{Xn\%}^2}$$

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

$$\Delta U_{k\%} = \beta * \Delta U_{kn\%}$$

$$\Delta U_{n\%} = (\Delta U_{Rn\%} * \cos \varphi_2 + \Delta U_{Xn\%} * \sin \varphi_2)$$

$$\Delta U_{\%} = \beta * (\Delta U_{R\%} * \cos \varphi_2 + \Delta U_{X\%} * \sin \varphi_2)$$

$$U_2 = U_{2_0} - \Delta U$$

$$U_2 = U_{2_0} - U_{2_0} * \frac{\Delta U_{\%}}{100}$$

את המתח השניוני ניתן לחשב כאשר המתח הראשוני הוא המתח הנקוב.

$$U_2 = U_{2_0} * \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right)$$

$$U_2 = U_{2_0} * \left[1 - \beta * \frac{\Delta U_{kn\%}}{100} * \cos(\varphi_k - \varphi_2)\right]$$

ניתן לחשב את המתח בראשוני כאשר המתח השניוני הוא המתח הנקוב.

$$U_1 = U_{1_0} * \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right)$$

כאשר:

$\Delta U_{R\%}$  מפל מתח התנגדותי באחוזים

$\Delta U_{X\%}$  מפל מתח היגבי באחוזים

$\Delta U_{\%}$  מפל מתח באחוזים

$\beta$  מקדם העמסה

$\cos \varphi_2$  מקדם ההספק של הצרכן

נצילות השנאי

נצילות השנאי  $\eta$  תלויה בגורמים הבאים:

- הפסדי ההספק של השנאי ברזל ונחושת.
- הספק הצרכן המחובר לשנאי.
- מקדם ההספק של הצרכן.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}}$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}}$$

נצילות מרבית  $\eta_{max}$

כאשר הפסדי הנחושת בשנאי שווים להפסדי הברזל מתקבלת נצילות מרבית לשנאי. הנצילות המרבית מתקבלת כאשר מקדם העמסה הוא מקסימאלי  $\beta_{max}$ .

$$\Delta P_{cu} * \beta_{max}^2 = \Delta P_{fe}$$

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cu}}}$$

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2}{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta_{max}^2 * \Delta P_{cun}}$$

תכנון השנאי:

תכנון שנאי היא פעולה מורכבת התלויה במספר מרכיבים השלובים זה בזה, והצורך לייעל מרכיב אחד, עשוי לגרום הפסד במרכיב אחר. האחד המרכיבים בתכנון השנאי הוא הפחתת החום המתפתח בשנאי, ואחת מהסיבות להתפתחות חום השנאי הוא צפיפות הזרם במוליכים מהם מלופפים הסלילים. מכאן שיש לשאוף ששטח החתך של המוליכים יהיה גדול ככל שניתן כדי להקטין את התנגדותם האומית ובכך להפחתה בהפסדי הנחושת והפחתה בחום. אך בשימוש במוליכים עבים הדבר יצריך בניית ליבת ברזל בנפח גדול יותר דבר שיגדיל את הפסדי הברזל, ועלייה משמעותית במשקל השנאי. לכן השיקול המרכזי לקביעת שטח החתך של המוליכים הוא מידת הקירור של השנאי. דבר נוסף שיש לשאוף אליו הוא התפתחות חום זהה ב-2 הסלילים ובכך לפיזור חום טוב יותר, וזאת ניתן להשיג ביצירת צפיפות זרם זהה ב-2 הסלילים. את צפיפות הזרם ניתן לחשב לפי-

$$J = \frac{I}{A} \left[ \frac{A}{mm^2} \right]$$

כאשר:

$J$  - צפיפות הזרם.

$I$  - הזרם בליפוף.

$A$  - שטח החתך של המוליך.

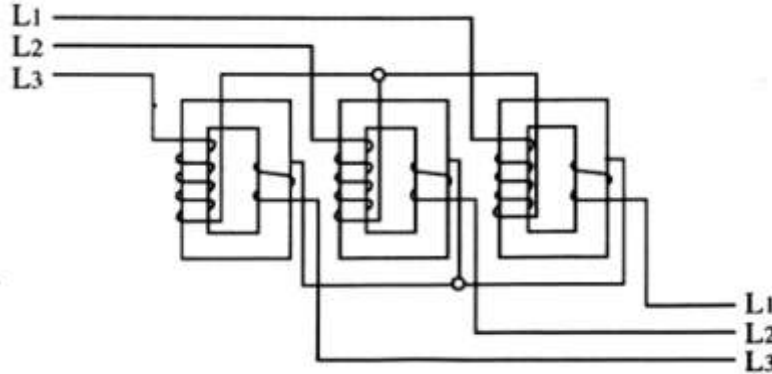


### קירור השנאי:

- השנאי מתחמם תוך כדי העבודה בעקבות הפסדי ההספק בליבה  $\Delta P_{fe}$  והפסדי ההספק בנחושת הסלילים  $\Delta P_{cu}$ , ויש צורך לקררו. לצורך כך קיימות מספר שיטות:
1. קירור טבעי- השנאי חשוף לאוויר ובכך פולט את החום שלו לאוויר ובכך מתקרר, לצורך העברת חום השנאי לאוויר יש לבנות את המעטפת החיצונית של השנאי בצורת צלעות וזאת כדי להגדיל את השטח שבא במגע עם האוויר האופף את גוף השנאי.
  2. קירור טבעי מאולץ- וזאת על ידי הזרמת אוויר על גוף השנאי באמצעות מאווררים.
  3. קירור שמן בזרימה חופשית- ליבת השנאי וסליליו טבולים בשמן קירור מיוחד בתוך מעטפת. השמן המתחמם עולה לחלקה העליון של המעטפת ומשם דרך פתחים שבחלק העליון הוא מועבר דרך צינורות החשופים לאוויר, ובכך הוא מתקרר, לאחר התקררותו הוא זורם כלפי מטה ודרך פתחים שבחלקו התחתון הוא חודר פנימה לתוך המעטפת למסלול קירור נוסף החוזר על עצמו.
  4. קירור שמן בזרימה- באמצעות משאבה מזרימים את השמן שבתוך מעטפת השנאי, השמן סופג את חום השנאי ומוזרם דרך צינורות הטבולים במכלי מים לצורך קירורו, וחוזר חלילה.
  5. קירור משולב- בשנאים ששיטות הקירור הנ"ל אינן מספיקות, משלבים מספר שיטות יחד, כלומר בנוסף לקירור באמצעות הזרמת שמן מוסיפים מאווררים להאצת תהליך הקירור.

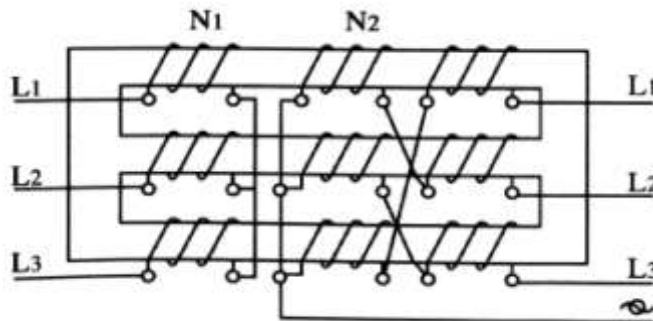
**מבנה השנאי התלת פאזי:**

השנאי התלת מופעי בנוי מצירופם של 3 שנאים חד מופעיים. לכל מופע יש 2 סלילים הסליל ראשוני וסליל שניוני. 3 הסלילים הראשוניים אחד לכל מופע, מחוברים בניהם במבנה כוכב או משולש. 3 הסלילים השניוניים אחד לכל מופע, מחוברים בניהם במבנה כוכב או משולש או זיג-זג. לא חובה שתהיה התאמה בין מבנה חיבור הסלילים בראשוני לבין מבנה חיבור הסלילים בשניוני.



**חיבור סלילי השניוני במבנה זיג-זג:**

ברשת תלת מופעית הניזונה משנאי תלת מופעי, אליה מחוברים גם מכשירים חד-מופעיים, לא ניתן להגיע לאיזון מוחלט בצריכת ההספק ולכן גם לא בזרם בשלושת המופעים בו זמנית כפי שרצוי. חוסר האיזון בין המופעים בשניוני של השנאי גורם לחוסר איזון בין המופעים בצידו הראשוני של השנאי, ובכך גם לחוסר איזון ברשת המזינה את השנאי. את התופעה הזו רצוי להקטין ככל האפשר. לצורך הקטנת חוסר האיזון משתמשים בשנאי אשר סלילי השניוני שלו מחוברים במבנה זיג-זג כמתואר באיור הבא:



כמתואר באיור כל סליל מופע בשניוני מחולק ל-2 חצאים, 2 חצאי הסליל כרוכים סביב 2 עמודים שונים. בצורה זו השטף למופע אחד הנוצר בסליל הראשוני משרה מתח ב-2 חצאי הסלילים הכרוכים על אותו עמוד אך השייכים ל-2 מופעים שונים. חיבור הסלילים במבנה זיג-זג בשניוני תהיה תמיד במבנה כוכב עם מוליך "אפס". בראשוני חיבור הסלילים יכול להיות במבנה כוכב או משולש.

**סימנים למבנה הסלילים:**

מקובל לסמן את הסלילים במבנה הכוכב באות Y או Y הפוכה. במבנה משולש באות D או Δ. במבנה זיג-זג באות Z.

ברישום המלא של הסימנים בשנאי האות הראשונה השמאלית ברישום, תסמן את מבנה החיבורים הסלילים בצד הראשוני. האות השנייה ברישום תסמן את מבנה החיבורים בצד השניוני ובד"כ אות או סימן תהיה אות קטנה, כאשר קו אלכסוני מפריד בין האותיות.

דוגמאות:

$$D/d ; D/yo ; D/zo ; Yo/yo ; Yo/d ; Yo/zo$$

כאשר הסימן "0" מסמן שקיים גם מוליך "אפס". (מוליך "0" יכול להופיע רק במבנה כוכב או זיג-זג).

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

תזכורת לרשת תלת פאזית:

פרמטר	Y	Δ
$I_{ph}$	$I_L$	$\frac{I_L}{\sqrt{3}}$
$U_{ph}$	$\frac{U_L}{\sqrt{3}}$	$U_L$
$P_{ph}$	$\frac{P}{3}$	$\frac{P}{3}$

הספק השנאי:

גודל השנאי נקבע לפי ערך ההספק המדומה שלו-

$$S = \sqrt{3} * U_1 * I_1 = \sqrt{3} * U_2 * I_2 [VA]$$

ואם השנאי עובד בתנאיו הנקובים-

$$S_n = \sqrt{3} * U_{n1} * I_{n1} = \sqrt{3} * U_{n2} * I_{n2} [VA]$$

אפשרות ההפעלה של השנאי

ניתן להבחין בין 3 מצבי פעולה של השנאי:

1. הפעלה בריקם.
2. הפעלה בקצר (למטרת ניסוי בלבד)
3. הפעלה בעומס.

ניסויים בשנאי:

בשנאי המעשי קיימים הפסדי הספק שונים, ככל שהפסדים אלו קטנים יותר נצילות השנאי גבוהה יותר. ההפסדים העיקריים הקיימים השנאי הם הפסדי הספק קבועים-הנובעים כתוצאה מהפסדי הברזל, והפסדים משתנים-הנובעים כתוצאה מהפסדי הנחושת.

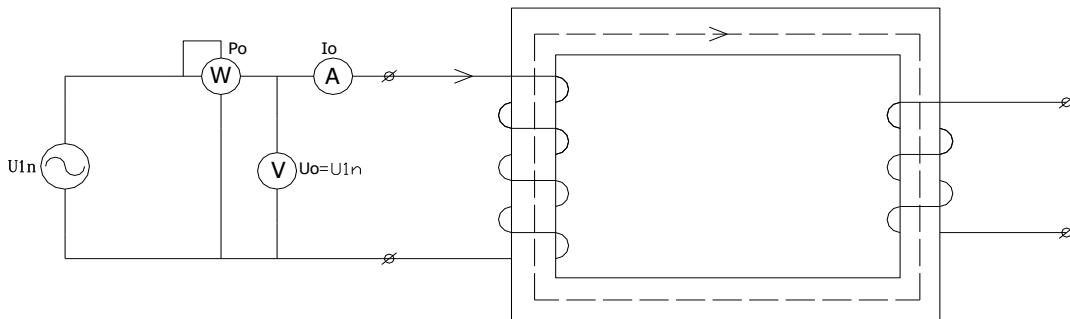
לצורך חישוב הפסדים אלו מבצעים בשנאי 2 סוגי ניסויים והם:

1. ניסוי ריקם – חיבור השנאי ללא עומס במטרה למדוד את הפסדי הברזל.
2. ניסוי קצר – חיבור השנאי כאשר הצד השניו שלו מקוצר במטרה למדוד את הפסדי הנחושת.

הניסויים בשנאי התלת פאזי נערך לכל מופע ולכן הערכים שמתקבלים הם ערכים פאזיים.

ניסוי ריקם של שנאי:

מטרת הניסוי למדוד את הפסדי הברזל של השנאי הנגרמים כתוצאה מהתחממות ליבת הברזל.



בניסוי זה מספקים לשנאי מתח ריקם השווה למתח הראשוני הנקוב של השנאי-  $U_0 = U_{1phn}$  לצידו השניו של השנאי לא מחברים עומס כלל.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

את ניסוי הריקם ניתן לבצע הן מהצד הראשוני והן מהצד השניוני, באיור הנ"ל מתואר ניסוי ריקם מהצד הראשוני.

בניסוי זה מודדים את ההספק המתפתח בסליל הראשוני בריקם  $P_0$  ואת הזרם הזורם בסליל הראשוני בריקם  $I_{0ph}$ .

מאחר וערכם של המתחים המושרים  $E1$  ו- $E2$  תלוי בגודל השטף המכסימאלי  $\phi_{max}$  אשר ערכו אינו משתנה ומאחר שניתן בניסוי זה להזניח את מפלי המתח בסלילים ז"א  $E=U$ , ניתן לקבוע כי:

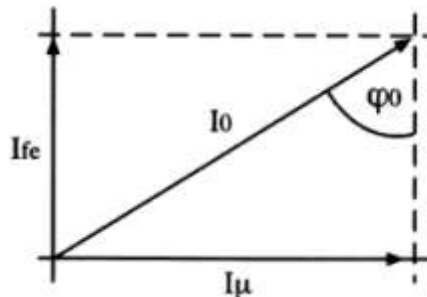
$$\phi_0 = \phi_{max}$$

המשמעות היא שהזרם  $I_0$  ערכו נמוך ותפקידו:

א. לספק את השטף הדרוש בליבת השנאי  $\phi_0$  לצורך השראת המתחים  $E1$  ו- $E2$ .

ב. לפתח את ההספק בליבת השנאי אשר נפלט בצורת חום המוגדר  $\Delta P_{fe}$  שהוא בעצם הפסדי ההספק של הברזל בשנאי וערכו קבוע ללא קשר באפשרות הפעולה של השנאי.

תאור הוקטורי של  $I_0$ :



כאשר:

$I_{fe}$  - רכיב הזרם לפיתוח ההספק  $\Delta P_{fe}$  שהם הפסדי ליבת השנאי (רכיב הברזל) ביחידות אמפר [A].

$I_\mu$  - רכיב הזרם ליצירת השטף בליבה (רכיב המיגנט) ביחידות אמפר [A].

$\phi_0$  - זווית המופע בשנאי במצב ריקם (הזווית בין זרם הריקם למתח הריקם) ביחידות מעלות [°].  
לפי תאור זה ניתן לקבוע את הביטויים הבאים:

$$I_{fe} = I_0 * \cos \phi_0 \text{ [A]}$$

$$I_\mu = I_0 * \sin \phi_0 \text{ [A]}$$

עבור שנאי תלת פאזי-

$$\Delta P_{fe} = P_0 = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \phi_0 \text{ [W]}$$

כאשר:  $U_0$  הוא מתח הריקם שהוא מתח הרשת אליו מחובר השנאי  $U_0 = U_{1n}$  ביחידות וולט [V].  
את גורם ההספק של השנאי בתנאי ריקם ניתן לחשב לפי-

עבור השנאי התלת פאזי-

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_0 * I_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_{1n} * I_0}$$

כיוון שההספק הנמדד נגרם כתוצאה מהפסדי הברזל והפסדי הנחושת בסליל הראשוני במצב ריקם שניתן להזניחם כיוון שהם מזעריים כתוצאה מהזרם הקטן שזורם בראשוני בניסוי זה ולכן-

$$P_0 = \Delta P_{fe}$$

הערה: בנוסף לבזבז ההספק בליבת השנאי מתקיים גם בזבז הספק בנחושת הסליל הראשוני וניתן לחשב אותו לפי הביטויים הבאים:

עבור השנאי התלת פאזי-

$$\Delta P_{cu1_0} = 3 * I_0^2 * R_1 \text{ [W]}$$

כאשר:

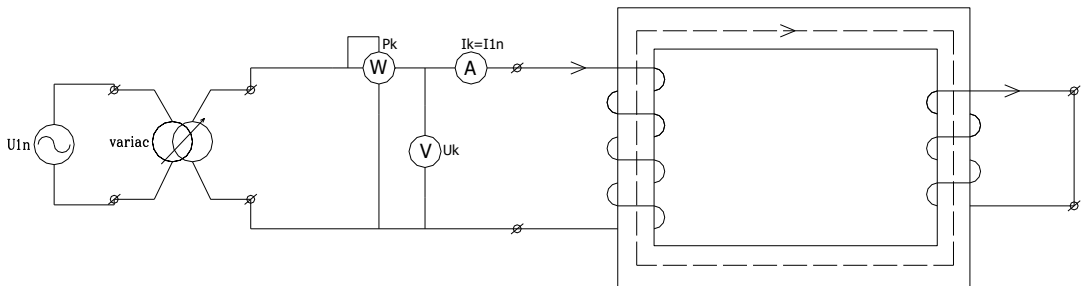
$\Delta P_{cu1_0}$  - הפסדי הנחשת בסליל הראשוני במצב ריקם ביחידות ווט [W].

$R_1$  - ההתנגדות האומית של הסלילי הראשוני ביחידות אום [Ω].

אבל מאחר ו-  $I_0 \ll I_1$  ניתן להזניח את בזבז ההספק בנחשת הסליל הראשוני, וכמו כך את מפל המתח על פניו.

**ניסוי קצר של שנאי:**

מטרת הניסוי אך ורק כדי למדוד את הפסדי הנחשת של השנאי הנגרמים כתוצאת מהתנגדות האומית של סלילי השנאי.



בניסוי זה מחברים לסליל הראשוני של השנאי מקור מתח הניתן לשינוי וזאת עושים בעזרת שנאי ווריאק (Varic) שהוא בעצם שנאי שניתן לשנות את יחס הכריכות שלו ובכך לשנות את המתח במוצא שלו. בצד הסליל השניוני מקצרים את מוצא השנאי.

במסגרת הניסוי מעלים את המתח בסליל הראשוני של השנאי עד לקבלת זרם בסליל הראשוני השווה לזרם הנקוב של השנאי בצד הראשוני.  $I_k = I_{1ph_n}$ . במצב זה המתח על פני הסליל הראשוני שווה לערך המוגדר כמתח קצר ומסומן ב-  $U_k$ .

ההספק שנמדד שהוא ההספק בקצר ומסומן ב-  $P_k$  והוא שווה לערך הפסדי הנחשת של השנאי המסומנים ב-  $\Delta P_{cu}$ . ומכאן ניתן להבין כי  $\Delta P_{cu} = P_k$ . ערך זה אינו קבוע והוא משתנה בהתאם להעמסת השנאי.

את ניסוי הקצר ניתן לערוך הן מהצד הראשוני והן מהצד המשני. באיור הנ"ל מתואר ניסוי קצר מהצד הראשוני.

על פי המדידות שהתקבלו ניתן לחשב את גורם ההספק של השנאי בתנאי קצר לפי- עבור שנאי תלת פאזי-

$$\Delta P_{cu} = P_k = \sqrt{3} * U_k * I_k * \cos \varphi_k$$

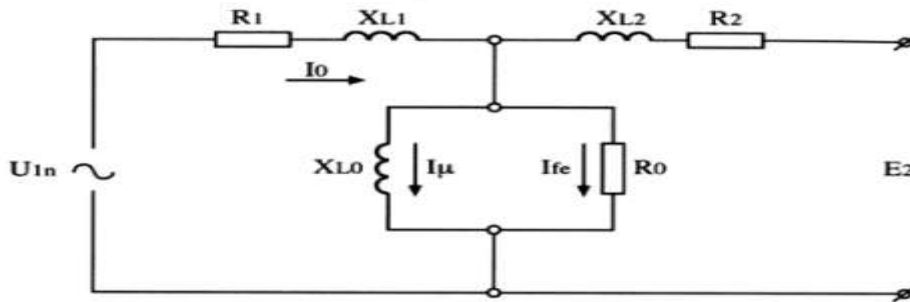
$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} * U_k * I_k} = \frac{P_k}{\sqrt{3} * U_k * I_{1n}}$$

$$\Delta P_{cu} = 3 * I_{1n}^2 * R_1 + 3 * I_{2n}^2 * R_2$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

מעגל תמורה של שנאי:

ניתן לתאר את המעגל החשמלי של השנאי באמצעות מעגל תמורה המביא לידי ביטוי את כל הפרמטרים הפאזיים של השנאי וניתן לגזור ממנו ערכים נוספים הן בניסוי הקצר והן בניסוי הריקים- מעגל התמורה בריקים מצד הראשוני:



**כאשר:**

- $-X_L$  היגב השראתי של שטף הפיזור בליפוף ביחידות אום [Ω].
- $-R$  ההתנגדות האומית של סלילי הליפוף ביחידות אום [Ω].
- $-X_{L0}$  היגב השראתי של הברזל השנאי ביחידות אום [Ω].
- $-R_0$  ההתנגדות האומית של ברזל השנאי ביחידות אום [Ω].
- $-I_{10}$  זרם ריקים בראשוני ביחידות אמפר [A].
- $-I_\mu$  זרם המיגנט בליבת השנאי ביחידות אמפר [A].
- $-I_{fe}$  זרם ריקים אפקטיבי (זרם הפסדי הברזל) ביחידות אמפר [A].

בניסוי ריקים מהצד הראשוני- ( $U_0 = U_{1n}$ ) -

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu1_0} \approx \Delta P_{fe}$$

$$P_0 = \sqrt{3} * U_{1_0} * I_{1_0} * \cos\varphi_{1_0}$$

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = I_{1_0} * \cos\varphi_{1_0}$$

$$I_\mu = I_{1_0} * \sin\varphi_{1_0}$$

$$I_{1_0}^2 = I_{fe}^2 + I_\mu^2$$

**כאשר:**

- $-P_0$  הספק יעיל בריקים ביחידות ווט [W].
- $-\Delta P_{fe}$  הפסדי ההספק בברזל ביחידות ווט [W].
- $-\Delta P_{cu1_0}$  הפסדי ההספק בנחושת של הסליל הראשוני ביחידות ווט [W].
- $-\cos\varphi_{1_0}$  מקדם ההספק בסליל הראשוני בריקים.

בניסוי ריקים מהצד השניוני- ( $U_0 = U_{2n}$ ) -

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu2_0} \approx \Delta P_{fe}$$

$$P_0 = \sqrt{3} * U_{2_0} * I_{2_0} * \cos\varphi_{2_0}$$

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = I_{2_0} * \cos\varphi_{2_0}$$

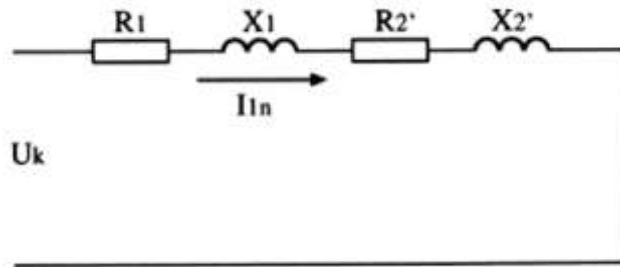
$$I_\mu = I_{2_0} * \sin\varphi_{2_0}$$

$$I_{2_0}^2 = I_{fe}^2 + I_\mu^2$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

מעגל התמורה בקצר מהצד הראשוני

כך שמעגל התמורה של השנאי בקצר  $I_{10}$  בפעולת השנאי בקצר ניתן להזניח את זרם המגנט כמתואר באיור הבא:



בניסוי קצר מהצד הראשוני - ( $I_k = I_{1n}$ )  
בניסוי קצר מהצד השניוני - ( $I_k = I_{2n}$ )

$$P_k = \Delta P_{cu1n} + \Delta P_{cu2n} = \Delta P_{cun}$$

$$\Delta P_{cu1n} = 3 * I_{1n}^2 * R_1$$

$$\Delta P_{cu2n} = 3 * I_{2n}^2 * R_2$$

$$P_k = \sqrt{3} * U_k * I_k * \cos \varphi_k$$

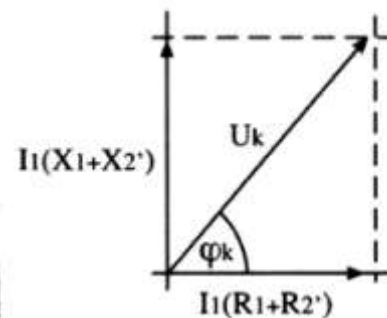
$$P_k = 3 * I_k^2 * R_k$$

$$R_k = R_1 + R_2' = R_1 + R_2 * K^2$$

$$X_k = X_1 + X_2' = X_1 + X_2 * K^2$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

דיאגרמה הפאזורית של מעגל התמורה בקצר מהצד הראשוני:



$$R_k = R_1 + R_2'$$

$$X_k = X_1 + X_2'$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

$$U_k = I_k * R_k * \cos \varphi_k + I_k * X_k * \sin \varphi_k$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

הערכים  $R_2$  ו-  $X_2$  שייכים לשניוני של השנאי ודרכם עובר הזרם  $I_2$ . בניסוי קצר מהצד הראשוני שמשמעותו שהזרם הזורם בה הוא  $I_1$ , יש להעניק להם ערך אחר מערכם האמיתי על מנת שההספקים המתפתחים בהם כאשר עובר דרכם  $I_1$  יהיו זהים להספקים המתפתחים בהם כאשר עובר דרכם  $I_2$  ולכן יש צורך לשקף את התנגדותם לצד הראשוני ולהעניק להם שמות חדשים  $R_2'$  ו-  $X_2'$ . אותו מהסבר נכון גם כאשר מבצעים את ניסוי הקצר מהצד השניוני הפעם יש לשקף את הערכים  $R_1$  ו-  $X_1$  לצד השניוני ולכן שמותם החדשים יהיו-  $R_1'$  ו-  $X_1'$ . הערכים המשוקפים טובים אך ורק לצורך מעגלי התמורה.  
ולכן:

$$I_2^2 * R_2 = I_1^2 * R_2' \Rightarrow R_2' = \frac{I_2^2 * R_2}{I_1^2} \Rightarrow R_2' = K^2 * R_2$$

$$I_2^2 * X_2 = I_1^2 * X_2' \Rightarrow X_2' = \frac{I_2^2 * X_2}{I_1^2} \Rightarrow X_2' = K^2 * X_2$$

כאשר אין נתונים מדויקים להתנגדויות וההיגבים האומים של סלילי השנאי או לא ניתן לחשבם ניתן להיעזר בהנחות המקובלות:  
הנחה מקובלת בשיקוף לראשוני-

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}$$

הנחה מקובלת בשיקוף לשניוני-

$$R_2 = R_1' = \frac{R_k}{2}$$

$$X_2 = X_1' = \frac{X_k}{2}$$

כאשר:

$-I_k$  זרם הקצר. כאשר הניסוי מצד הראשוני  $I_k = I_{1n}$  וכשר הניסוי מצד השניוני  $I_k = I_{2n}$  [A]  
 $-P_k$  הספק הקצר [W].

$-\Delta P_{cu1n}$  הפסדי הנחשת בסליל הראשוני בעומס נקוב [W].

$-\Delta P_{cu2n}$  הפסדי הנחשת בסליל השניוני בעומס נקוב [W].

$-\Delta P_{cun}$  סה"כ הפסדי הנחשת בעומס נקוב [W].

$-R_1$  ההתנגדות האומית של הסליל הראשוני [Ω].

$-R_2$  ההתנגדות האומית של הסליל השניוני [Ω].

$-X_1$  היגב הסליל הראשוני [Ω].

$-X_2$  היגב הסליל הראשוני [Ω].

$-R_k$  ההתנגדות הקצר [Ω].

$-X_k$  היגב הקצר [Ω].

$-Z_k$  עכבת הקצר [Ω].

$-U_k$  מתח הקצר [V].

$-U_{k\%}$  מתח הקצר באחוזים [%].



הפסדי ההספק בשנאי העמוס

בעבודת השנאי בעומס מתבזבים בו הפסדי נחושת הן בסליל הראשוני והן בסליל המשני  $[\Delta P_{cun}]$ , שגודלו תלוי בזרמים  $I_1$  ו-  $I_2$  הנקובים.

ערכי הזרם הנקובים מתקבלים כאשר השנאי מחובר לעומס נקוב ז"א שההספק המדומה המפתח על העומס יהיה זהה להספק המדומה הנקוב של השנאי ולכן:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{2n}}$$

כך שאם השנאי אינו עמוס בהתאם לעומס הנקוב שלו גם הזרמים הסלילים שלו אינם נקובים ולכן גם בזבזי ההספק בסלילי השנאי אינם נקובים. ולכן לפי חישוב הפסדי הנחושת יש לחשב תחילה את היחס שבין ההספק הנצרך בפועל מהשנאי לבין ההספק הנקוב של השנאי. יחס זה מסומן באות  $(\beta)$ .

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

ומכאן הזרמים בסלילי השנאי בפועל יבוטאו בצורה הבאה:

$$I_1 = \frac{\beta * S_n}{\sqrt{3} * U_1}$$

$$I_2 = \frac{\beta * S_n}{\sqrt{3} * U_2}$$

את הפסדי הנחושת הנקובים מחשבים לפי הביטוי:

$$P_k = \Delta P_{cun} = \Delta P_{cu1n} + \Delta P_{cu2n} = 3 * I_{1n}^2 * R_1 + 3 * I_{2n}^2 * R_2$$

ניתן גם לרשום גם:

$$\Delta P_{cun} = 3 * \left( \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}} \right)^2 * R_1 + 3 * \left( \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{2n}} \right)^2 * R_2$$

ובמצב שבו השנאי אינו מועמס בהספקו הנקוב יתקבלו גם הפסדי נחושת שאינם נקובות-

$$\Delta P_{cu} = 3 * \left( \frac{\beta * S_n}{\sqrt{3} * U_1} \right)^2 * R_1 + 3 * \left( \frac{\beta * S_n}{\sqrt{3} * U_2} \right)^2 * R_2$$

ניתן לפתח את הנוסחה ולרשום גם:

$$\Delta P_{cu} = \beta^2 * (3 * I_{1n}^2 * R_1 + 3 * I_{2n}^2 * R_2)$$

ומכאן ניתן לקבוע כי:

$$\Delta P_{cu} = \beta^2 * \Delta P_{cun}$$

מפלי מתח ומתחי עבודה בשנאי

כאשר מחברים עומס נקוב לשנאי זורמים בו זרמים נקובים ב-2 צידי השנאי דרך סלילי השנאי שהם בעלי התנגדות ולכן נוצר בהם מפלי מתח.

מפל המתח בשנאי מסומן ב- $\Delta U$  ותלוי בגורמים שונים:

3. מקדם העמסה של השנאי  $\beta$ - באיזה הספק מועמס השנאי ביחס להספקו הנקוב.

4. מקדם ההספק של הצרכן  $\cos \varphi_2$ .

מפל המתח בשנאי מורכב מ-2 גורמים:

ג. מפל מתח אקטיבי (פעיל) המסומן ב-  $\Delta U_R$ . כאשר  $\Delta U_{R\%}$  הוא מפל המתח האקטיבי באחוזים מהמתח הנקוב  $U_{1n}$ .

ד. מפל מתח ראקטיבי (הגיבי) המסומן ב-  $\Delta U_X$ . כאשר  $\Delta U_{X\%}$  הוא מפל המתח הראקטיבי באחוזים מהמתח הנקוב  $U_{1n}$ .

$$\Delta U_{Rn\%} = \frac{\Delta P_{cun}}{S_n} * 100$$

$$\Delta U_{Rn\%} = \frac{I_{1n} * R_k}{U_{1n}} * 100$$

$$\Delta U_{Xn\%} = \frac{I_{1n} * X_k}{U_{1n}} * 100$$

$$\Delta U_{kn\%} = \sqrt{\Delta U_{Rn\%}^2 + \Delta U_{Xn\%}^2}$$

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

$$\Delta U_{k\%} = \beta * \Delta U_{kn\%}$$

$$\Delta U_{n\%} = (\Delta U_{Rn\%} * \cos \varphi_2 + \Delta U_{Xn\%} * \sin \varphi_2)$$

$$\Delta U_{\%} = \beta * (\Delta U_{R\%} * \cos \varphi_2 + \Delta U_{X\%} * \sin \varphi_2)$$

$$U_2 = U_{2_0} - \Delta U$$

$$\Delta U = U_{2_0} - U_2 * \frac{\Delta U_{\%}}{100}$$

את המתח השניוני ניתן לחשב כאשר המתח הראשוני הוא המתח הנקוב.

$$U_2 = U_{2_0} * \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right)$$

$$U_2 = U_{2_0} * \left[1 - \beta * \frac{\Delta U_{kn\%}}{100} * \cos(\varphi_k - \varphi_2)\right]$$

ניתן לחשב את המתח בראשוני כאשר המתח השניוני הוא המתח הנקוב.

$$U_1 = U_{1_0} * \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right)$$

כאשר:

$\Delta U_{R\%}$  מפל מתח התנגדותי באחוזים

$\Delta U_{X\%}$  מפל מתח היגבי באחוזים

$\Delta U_{\%}$  מפל מתח באחוזים

$\beta$  מקדם העמסה

$\cos \varphi_2$  מקדם ההספק של הצרכן

נצילות השנאי

נצילות השנאי  $\eta$  תלויה בגורמים הבאים:

ג. הפסדי ההספק של השנאי ברזל ונחושת.

ד. הספק הצרכן המחובר לשנאי.

ה. מקדם ההספק של הצרכן.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}}$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}}$$

נצילות מרבית  $\eta_{max}$

כאשר הפסדי הנחושת בשנאי שווים להפסדי הברזל מתקבלת נצילות מרבית לשנאי.

הנצילות המרבית מתקבלת כאשר מקדם העמסה הוא מקסימאלי  $\beta_{max}$ .

$$\Delta P_{cu} * \beta_{max}^2 = \Delta P_{fe}$$

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cu}}}$$

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2}{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta_{max}^2 * \Delta P_{cun}}$$

תרגיל דוגמא 1:

לשנאי תלת מופעי הנתונים הבאים:

$$3.3KV/0.4KV ; 66KVA$$

בניסוי ריקם בתנאים נקובים נמדדו הערכים הבאים:

$$I_{10\%} = 2\% ; \cos \varphi_{10} = 0.2$$

בניסוי קצר בתנאים נקובים נמדדו הערכים הבאים:

$$U_{1k\%} = 4\% ; \cos \varphi_{1k} = 0.4$$

חשב את נצילותו של השנאי במקרים הבאים:

א. כאשר מחברים לשנאי עומס נקוב במקדם הספק של 0.8 .

ב. כאשר מחברים לשנאי עומס של 56.1 KVA במקדם הספק של 0.6 .

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

כיוון שניסוי הריקם בוצע בתנאים נקובים לכן:

$$U_0 = U_{1n} = 3.3KV$$

וכיוון שניסוי הקצר בוצע בתנאים נקובים לכן:

$$I_k = I_{1n}$$

$$I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{66 * 10^3}{\sqrt{3} * 3.3 * 10^3} = 11.55A$$

$$I_0 = \frac{I_{10\%} * I_{1n}}{100} = \frac{2 * 11.55}{100} = 0.23A$$

$$\Delta P_{fe} = P_0 = \sqrt{3} * U_{1n} * I_0 * \cos \varphi_{10} = \sqrt{3} * 3.3 * 10^3 * 0.23 * 0.2 = 263W$$

$$U_k = \frac{U_{1k\%} * U_{1n}}{100} = \frac{4 * 3.3 * 10^3}{100} = 132V$$

$$\Delta P_{cu} = P_k = \sqrt{3} * U_k * I_k * \cos \varphi_k = \sqrt{3} * 132 * 11.55 * 0.4 = 1056W$$

א.

$$\beta = \frac{S}{S_n} = \frac{66 * 10^3}{66 * 10^3} = 1$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}} = \frac{1 * 66 * 10^3 * 0.8}{1 * 66 * 10^3 * 0.8 + 263 + 1^2 * 1056} =$$

$$\eta = 0.9756 = 97.56\%$$

ב.

$$\beta = \frac{S}{S_n} = \frac{56.1 * 10^3}{66 * 10^3} = 0.85$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}} = \frac{0.85 * 66 * 10^3 * 0.6}{0.85 * 66 * 10^3 * 0.6 + 263 + 0.85^2 * 1056} =$$

$$\eta = 0.9704 = 97.04\%$$

תרגיל דוגמא 2:

לשנאי תלת פאזי הנתונים הבאים:

$$6.3KV/0.4KV ; 160KVA$$

לאחר ביצוע ניסוי הריקם והקצר בתנאים נקובים התקבלו הנתונים הבאים:

$$\Delta P_k = 3.2KW ; \Delta P_0 = 1.2KW$$

א. מה גודלו של העומס אותו יש לחבר ביציאת השנאי על מנת לקבל נצילות מרבית.

ב. מה תהיה הנצילות המרבית עבור העומס בעל מקדם הספק של 0.85.

ג. מחברים לשנאי עומס 140KVA במקדם הספק 0.85 חשב את הנצילות במקרה זה.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cu}}} = \sqrt{\frac{1.2}{3.2}} = 0.612$$

$$\beta = \frac{S}{S_n} \Rightarrow S = \beta * S_n = 0.612 * 160 * 10^3 = 97.92KVA$$

ב.

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2}{\beta_{max} * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta_{max}^2 * \Delta P_{cun}} =$$

$$\eta_{max} = \frac{0.612 * 160 * 10^3 * 0.85}{0.612 * 160 * 10^3 * 0.85 + 1.2 * 10^3 + 0.612^2 * 3.2 * 10^3} = 0.9719 = 97.19\%$$

ג.

$$\beta = \frac{S}{S_n} = \frac{140 * 10^3}{160 * 10^3} = 0.875$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}} =$$

$$\eta = \frac{0.875 * 160 * 10^3 * 0.85}{0.875 * 160 * 10^3 * 0.85 + 1.2 * 10^3 + 0.875^2 * 3.2 * 10^3} = 0.97 = 97\%$$

תרגיל דוגמא 3:

לשנאי תלת מופעי בהספק נקוב של 400KVA ויחס מתחים של 15/0.4 KV בוצעו ניסויי קצר וריקים מצד המתח הגבוה. תוצאות הניסוי הם:

$$U_k = 400V ; I_k = 9.4A ; \cos \varphi_k = 0.28$$

$$U_0 = 15KV ; I_0 = 72.8mA ; \cos \varphi_0 = 0.53$$

- קבע את הפסדי הקצר הנקובים ואת מתח הקצר הנקוב באחוזים מהמתח הנקוב.
- קבע את הפסדי הריקים הנקובים ואת הזרם הריקים הנקוב באחוזים מהזרם הנקוב.
- קבע את נצילות השנאי כאשר הוא עמוס ב- 300KW ובמקדם הספק 0.8 .
- קבע את המתח השניוני, אם השנאי עמוס בהספק נקוב ומקדם הספק 0.8 קיבולי.

הערה:

בתרגילים מסוג זה יש לבדוק אם הניסויים בוצעו בתנאים נקובים. כיוון שאם לא, הערכים שיתקבלו לא יהיו ערכים נקובים.

שלב חישוב הפסדי הנחשת נומינאליים  $\Delta P_{cun}$

יש לבדוק אם ניסוי הקצר התבצע בתנאים נקובים וזאת לבדוק אם מתקיים התנאי:  $I_k = I_{1n}$ .  
 אם כן- ניתן לחשב את הפסדי הנחשת לפי הנוסחה  $\Delta P_{cun} = P_{kn} = \sqrt{3} * U_k * I_k * \cos \varphi_k$   
 אם לא- יש צורך לחפש גורם משותף נקוב אשר בעזרתו יהיה ניתן לחשב את הפסדי הנחשת הנקוב. הגורם המשותף הוא  $R_k$  שהוא ערך שאינו משתנה גם אם הניסוי לא התקיים בתנאים נקובים. למציאת  $R_k$  יש צורך להשתמש בנוסחאות על פי חוק אום לדוגמא  $R_k = \frac{P_k}{I_k^2}$  יש לזכור כי התנגדויות הם ערכים פאזיים ולכן יש להשתמש רק בערכים פאזיים  $R_k = \frac{P_{kph}}{I_{kph}^2}$  וזאת בהתאם לסוג החיבור של הסלילי הראשוני כיוון שאנו מחשבים את  $R_k$  משוקף לצד הראשוני.  
 לדוגמא אם הצד הראשוני הוא  $\Delta$  -

$$P_{kph} = \frac{P_k}{3} ; I_{kph} = \frac{I_k}{\sqrt{3}}$$

לאחר שחשבנו  $R_k$  ניתן לחשב את  $\Delta P_{cu}$  לפי הנוסחה-

$$\Delta P_{cun} = 3 * I_{1n}^2 * R_k$$

יש לזכור כי המכפלה 3 בנוסחה גורם לכך שהפסדי הנחשת המחושבים יחזרו לערכם הנומינאלי עבור 3 הפאזות.

ניתן לחשב הפסדי הנחשת הנומינאליים  $P_{kn}$  גם באמצעות  $\beta_k$  שניתן לחשבו-  $\beta_k = \frac{I_k}{I_{kn}}$

$$\text{או } \beta_k = \frac{U_k}{U_{kn}} \text{ ומכאן } P_{kn} = \frac{P_k}{\beta_k^2}$$

שלב חישוב הפסדי ברזל נומינאליים  $\Delta P_{fen}$

יש לבדוק אם ניסוי הריקים התבצע בתנאים נקובים וזאת לבדוק אם מתקיים התנאי:  $U_0 = U_{1n}$ .  
 אם כן- ניתן לחשב את הפסדי הברזל לפי הנוסחה  $\Delta P_{fen} = P_{0n} = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \varphi_0$   
 אם לא- יש צורך לחפש גורם משותף נקוב אשר בעזרתו יהיה ניתן לחשב את הפסדי הברזל הנקוב. הגורם המשותף הוא  $R_{fe}$  שהוא ערך שאינו משתנה גם אם הניסוי לא התקיים בתנאים נקובים.  
 למציאת  $R_{fe}$  יש צורך להשתמש בנוסחאות על פי חוק אום לדוגמא  $R_{fe} = \frac{P_0}{I_{Rfe}^2}$  יש לזכור כי התנגדויות הם ערכים פאזיים ולכן יש להשתמש רק בערכים פאזיים  $R_{fe} = \frac{P_{0ph}}{I_{Rfe}^2}$  וזאת בהתאם לסוג החיבור של הסלילי הראשוני כיוון שאנו מחשבים את  $R_{fe}$  משוקף לצד הראשוני.  
 לדוגמא אם הצד הראשוני הוא  $\Delta$  -

$$\Delta P_{0ph} = \frac{\Delta P_0}{3} ; U_{0ph} = U_{0L} ; I_{Rfe}^2 = I_{0ph}^2 - I_{\mu}^2 = \frac{I_0^2 - I_{\mu}^2}{\sqrt{3}}$$

לאחר שחשבנו  $R_{fe}$  ניתן לחשב את  $\Delta P_{0n}$  לפי הנוסחה-

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

$$\Delta P_{0n} = 3 * \frac{U_{1phn}^2}{R_{fe}}$$

יש לזכור כי המכפלה 3 בנוסחה גורם לכך שהפסדי הנחושת המחושבים יחזרו לערכם הנומינאלי עבור 3 הפאזות.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{400 * 10^3}{\sqrt{3} * 15 * 10^3} = 15.4A$$

לפי תוצאת חישוב  $I_{1n}$  ברור כי הניסוי לא נערך בתנאים נקובים כיוון ש-  $I_{k1} \neq I_{1n}$ .

$$P_{k1} = \sqrt{3} * U_{k1} * I_{k1} * \cos \varphi_{k1} = \sqrt{3} * 400 * 9.4 * 0.28 = 1823.5W$$

$$R_{kn} = \frac{P_{k1}}{3 * I_{k1}^2} = \frac{1823.5}{3 * 9.4^2} = 6.88\Omega$$

$$\Delta P_{cun} = P_{kn} = 3 * I_{kn}^2 * R_{kn} = 3 * 15.4^2 * 6.88 = 4895W$$

$$U_{kn} = \frac{P_{kn}}{\sqrt{3} * I_{kn} * \cos \varphi_{k1}} = \frac{4895}{\sqrt{3} * 15.4 * 0.28} = 655V$$

$$U_{kn\%} = \frac{U_{kn}}{U_{1n}} * 100 = \frac{655}{15 * 10^3} * 100 = 4.96\%$$

ב.

כיוון שניסוי ריקם בוצע בתנאים נקובים כיוון ש-  $U_{01} = U_{1n}$

$$\Delta P_{fen} = P_{01} = \sqrt{3} * U_{01} * I_{01} * \cos \varphi_{01} = \sqrt{3} * 15 * 10^3 * 72.8 * 10^{-3} * 0.53 =$$

$$\Delta P_{fen} = 1002.44W$$

$$I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{400 * 10^3}{\sqrt{3} * 15 * 10^3} = 15.4A$$

$$I_{0n\%} = \frac{I_{0n}}{I_{1n}} * 100 = \frac{72.8 * 10^{-3}}{15.4} * 100 = 0.472\%$$

ג.

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = \frac{300 * 10^3}{0.8} = 375KVA$$

$$\beta = \frac{S_2}{S_n} = \frac{375 * 10^3}{400 * 10^3} = 0.9375$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}} =$$

$$\eta = \frac{0.9375 * 400 * 10^3 * 0.8}{0.9375 * 400 * 10^3 * 0.8 + 1002.44 + 0.9375^2 * 4895} = 0.9826 = 98.26\%$$

$$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{cun}}{S_n} * 100 = \frac{4895}{400 * 10^3} * 100 = 1.224\%$$

$$\Delta U_{k\%} = \beta * \Delta U_{kn\%} = \beta * U_{kn\%} = 1 * 4.96 = 4.96\%$$

$$\Delta U_{X\%} = \sqrt{\Delta U_{K\%}^2 - \Delta U_{R\%}^2} = \sqrt{4.96^2 - 1.224^2} = 4.8066\%$$

$$\Delta U_{\%} = \beta * (\Delta U_{R\%} * \cos \varphi_2 + \Delta U_{X\%} * \sin \varphi_2) =$$

$$\Delta U_{\%} = 1 * [1.224 * (\cos -36.87) + 4.8066 * (\sin -36.87)] = -1.9\%$$

$$U_2 = U_{20} * \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right) = 400 * \left(1 - \frac{-1.9}{100}\right) = 407.6V$$

תרגיל דוגמא 4:

נתוני שנאי תלת מופעי-

$$S = 220KVA ; 22KV/400V ; \Delta/Y$$

$$U_k = 1KV ; I_k = 5.77A ; P_k = 4.8KW$$

$$U_0 = 22KV ; I_0 = 0.1A ; P_0 = 0.2KW$$

א. חשב את עוצמת הזרם הקווי ואת עוצמת הזרם המופעי בסליל הראשוני והשניוני.

ב. חשב את ערכי הרכיבים הטוריים והמקביליים של תרשים התמורה המלא למופע משוקף לצד הראשוני של השנאי.

ג. חשב את נצילות השנאי בעומס המורכב מ-2 צרכנים המחוברים במקביל האחד בעל הספק של  $50KW ; \cos \varphi = 0.8$  והשני בעל הספק  $1 \cos \varphi = 0.8$  ו- $50KW$ .

פתרון לתרגיל דוגמא 4:

א.

$$I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{220 * 10^3}{\sqrt{3} * 22 * 10^3} = 5.774A$$

$$I_{1phn} = \frac{I_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{5.774}{\sqrt{3}} = 3.333A$$

$$I_{2n} = I_{2phn} = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{2n}} = \frac{220 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 317.543A$$

ב.

$$R_{Kph} = \frac{P_k}{3 * I_{1phn}^2} = \frac{4800}{3 * 3.333^2} = 144.029\Omega$$

$$Z_{Kph} = \frac{U_{K1ph}}{I_{K1ph}} = \frac{1 * 10^3}{3.333} = 300\Omega$$

$$X_{Kph} = \sqrt{Z_{Kph}^2 - R_{Kph}^2} = \sqrt{300^2 - 144.029^2} = 263.165\Omega$$

על פי ההנחה המקובלת-

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{144.029}{2} = 72.0145\Omega$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{263.165}{2} = 131.583\Omega$$

$$R_{feph} = \frac{U_{0ph}^2}{P_{0ph}} = \frac{(22 * 10^3)^2}{200/3} = 7.26M\Omega$$

$$I_{Rfeph} = \frac{U_{oph}}{R_{feph}} = \frac{22 * 10^3}{7.26 * 10^6} = 0.003A$$

$$I_{\mu ph} = \sqrt{I_{oph}^2 - I_{Rfeph}^2} = \sqrt{\left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 - 0.003^2} = 57.657mA$$

$$X_{\mu ph} = \frac{U_{oph}}{I_{\mu ph}} = \frac{22 * 10^3}{57.657 * 10^{-3}} = 381.567K\Omega$$

.ג

$$\vec{S}_{oniv} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 = 50 * 10^3 \angle 36.87^\circ + \frac{50 * 10^3}{1} \angle 0^\circ = 94.868 \angle 18.435^\circ KVA$$

$$\beta = \frac{S_{oniv}}{S_n} = \frac{94.868 * 10^3}{220 * 10^3} = 0.431$$

$$\cos \varphi_{oniv} = \cos 18.435 = 0.949$$

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}} =$$

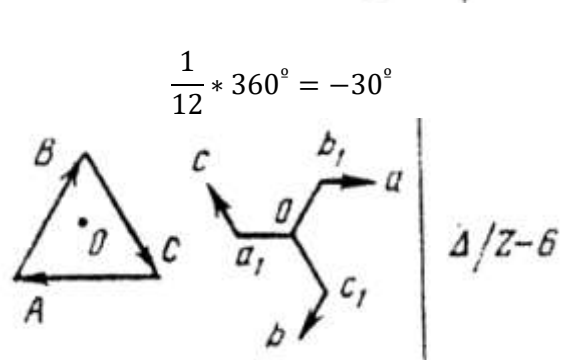
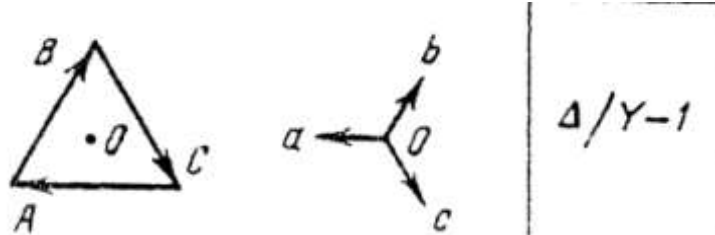
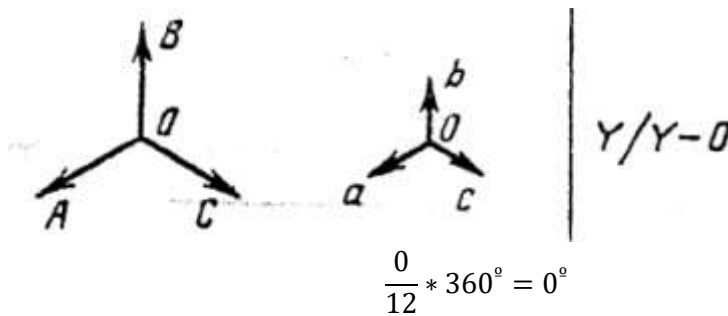
$$\eta = \frac{0.431 * 220 * 10^3 * 0.949}{0.431 * 220 * 10^3 * 0.949 + 200 + 0.431^2 * 4800} = 0.988 = 98.8\%$$



**חיבור שנאים במקביל**

- לעיתים יש צורך לחבר שנאים במקביל על מנת לספק הספק גדול יותר לצרכנים. התנאים הטובים ביותר לעבודה במקביל של שנאים הם:
- מתחים זהים בראשוני ובשניוני ויחס השנאה שווה.
  - קבוצת חיבורים זהה בין הראשוני לשניוני.
  - חיבור תואם של הסלילים של השנאי מבחינת קוטבי המתח המתפתחים בהם, למניעת התפתחות זרמי קצר פנימיים בין השנאים. המשמעות היא שזווית המופע בין המח בשניוני למתח בראשוני צריך להיות זהה, זווית זו נוצרת בעקבות 3 גורמים: כיוון ליפופי הסלילים בשנאי, שיטת סימון הדקי הסלילים בשנאי ושיטת חיבור הליפופים בשנאי. קבוצות החיבור נבדלות זו מזו כאמור בהפרשי המופע בין מתח הראשוני למתח בשניוני, כאשר הווקטור  $B$  בראשוני הוא ווקטור הייחוס והוא מצביע תמיד על הספרה 12 בשעון, ואילו הווקטור  $b$  בשניוני על הזווית המופע של השניוני ביחס לראשוני. יש לזכור כי זווית שלילית כיוונה עם כיוון השעון.

דוגמאות:



מס'-	החיבורים הסליליים	סכמת של	וקטורי	תרשים	קבוצה
1					$\gamma/\gamma-0$
2					$\Delta/\Delta-0$
3					$\Delta/\Delta-0$
4					$\gamma/\Delta-1$
5					$\Delta/\gamma-1$
6					$\Delta/\Delta-2$
7					$\Delta/\Delta-4$
8					$\gamma/\Delta-5$
9					$\Delta/\gamma-5$

קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

25					$\Delta/Z-5$
26					$\Delta/Z-6$
27					$Y/Z-7$
28					$\Delta/Z-8$
29					$\Delta/Z-9$
30					$Y/Z-11$

10					$Y/Y-6$
11					$\Delta/\Delta-6$
12					$\Delta/\Delta-6$
13					$Y/\Delta-7$
14					$3/Y-7$
15					$\Delta/\Delta-8$
16					$\Delta/\Delta-10$
17					$Y/\Delta-11$
18					$\Delta/Y-11$
19					$\Delta/Z-9$
20					$\Delta/Z-9$
21					$Y/Z-1$
22					$\Delta/Z-2$
23					$\Delta/Z-4$
24					$Y/Z-5$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

ד. מתחי קצר זהים או לפחות קרובים.

תנאי זה הוא לא הכרחי אך במידה ומתחי הקצר יהיו שונים יתכנו 2 מצבים:

1. העמסת אחד השנאים או יותר בעומס יתר דבר שאינו רצוי כיוון שיכול להזיק לשנאים.
2. שנאי אחד יועמס בעומס הנקוב שלו ושאר השנאים יועמסו בעומס הקטן מהעומס הנקוב שלהם.

את ההספק המועמס על כל שנאי ניתן לחשב לפי הביטוי:

$$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nA}}{U_{k\%A}}$$

כאשר:

$$S_t = S_1 + S_2 + \dots S_n$$

$S_A$  [VA] הספק מדומה שנאי כלשהו A מוסר לצרכנים

m אינדקס - מתייחס לשנאי כלשהו

n מספר השנאים המחוברים במקביל

$S_{nm}$  [VA] הספק מדומה נקוב של שנאי כלשהו m

$S_t$  [VA] ההספק המדומה שמשפקים כל השנאים יחד לצרכן

דוגמא לחיבור שנאים בעלי מתחי קצר שווים:

נתונים 3 שנאים בעלי מתחים שווים ובעלי קבוצת חיבורים זהה בעלי הנתונים הבאים המחוברים במקביל:

$$S_A = 100KVA ; U_{k\%1} = 3\%$$

$$S_B = 150KVA ; U_{k\%2} = 3\%$$

$$S_C = 125KVA ; U_{k\%2} = 3\%$$

חשב את גודל העומס שניתן לחבר ל-3 השנאים המחוברים במקביל.

פתרון:

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 = (100 + 150 + 125) * 10^3 = 375KVA$$

$$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nA}}{U_{k\%A}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{3} + \frac{125}{3}} * \frac{100}{3} = 100KVA$$

$$S_B = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nB}}{U_{k\%B}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{3} + \frac{125}{3}} * \frac{150}{3} = 150KVA$$

$$S_C = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nC}}{U_{k\%C}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{3} + \frac{125}{3}} * \frac{125}{3} = 125KVA$$

המשמעות היא שכאשר מתחי הקצר זהים כל שנאי מועמס בעומס הנקוב שלו.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

דוגמא לחיבור שנאים בעלי מתח קצר שונים עם העמסת יתר:

נתונים 3 שנאים בעלי מתחים שווים ובעלי קבוצת חיבורים זהה בעלי הנתונים הבאים המחוברים במקביל:

$$S_A = 100KVA ; U_{k\%A} = 3\%$$

$$S_B = 150KVA ; U_{k\%B} = 5\%$$

$$S_C = 125KVA ; U_{k\%C} = 4\%$$

חשב את גודל העומס שניתן לחבר ל-3 השנאים המחוברים במקביל

פתרון:

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 = (100 + 150 + 125) * 10^3 = 375KVA$$

$$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nA}}{U_{k\%A}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{5} + \frac{125}{4}} * \frac{100}{3} = 132.159KVA$$

$$S_B = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nB}}{U_{k\%B}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{5} + \frac{125}{4}} * \frac{150}{5} = 118.943KVA$$

$$S_C = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nC}}{U_{k\%C}} = \frac{375}{\frac{100}{3} + \frac{150}{5} + \frac{125}{4}} * \frac{125}{4} = 123.899KVA$$

$$S_t = S_A + S_B + S_C = (132.159 + 118.943 + 123.899) * 10^3 = 375KVA$$

המשעות היא שכאשר מתחי הקצר של השנאים שונה השנאים מועמסים לא בעומס הנקוב שלהם, וכאשר שנאי מועמס מעל ערכו הנקוב זה יכול לגרום לשרפתו.  
שנאי A מועמס ב-32% מעל הספקו הנקוב- מסוכן לשנאי  
שנאי B מועמס ב-20% מתחת להספקו הנקוב- מצב תקין.  
שנאי C מועמס ב-2% מתחת להספקו הנקוב- מצב תקין.  
למרות שהעומס מקבל את כל ההספק הדרוש.

על מנת לטפל בבעיית העמסת היתר של שנאים קיימת שיטת חלוקת העמסה של השנאים בצורה שונה. על פי שיטה זו השנאי בעל מתח הקצר הקטן ביותר יועמס בעומס היחסי הגדול ביותר (100%), ואילו שאר השנאים יועמסו בעומס הקטן מהספקם הנקוב.  
אומנם בשיטה זו העומס מקבל הספק מוקטן אך אף שנאי אינו מועמס בעומס יתר.  
על פי שיטה זו ניתן לקבוע מה יהיה גודלו המקסימאלי של העומס בהתאם לשנאים נתונים.

דוגמא לחיבור שנאים בעלי מתח קצר שונים ללא העמסת יתר:

נתונים 3 שנאים בעלי מתחים שווים ובעלי קבוצת חיבורים זהה בעלי הנתונים הבאים המחוברים במקביל:

$$S_A = 100KVA ; U_{k\%A} = 3\%$$

$$S_B = 150KVA ; U_{k\%B} = 5\%$$

$$S_C = 125KVA ; U_{k\%C} = 4\%$$

חשב את גודל העומס שניתן לחבר ל-3 השנאים המחוברים במקביל ללא העמסת אף אחד מהשנאים בעומס יתר.

פתרון:

שנאי A הוא בעל מתח הקצר הנמוך ביותר לכן:

$$S_A = S_{An} = 100KVA$$

$$S_B = S_{Bn} * \frac{U_{k\% \min}}{U_{k\%B}} = 150 * \frac{3}{5} = 90KVA$$

$$S_C = S_{Cn} * \frac{U_{k\% \min}}{U_{k\%C}} = 125 * \frac{3}{4} = 93.75KVA$$

$$S_t = S_A + S_B + S_C = (100 + 90 + 93.75) * 10^3 = 283.75KVA$$

בשיטה זו אומנם העומס המרבי קטן, אך אף שנאי אינו מועמס בעומס יתר.

תוספת עכבה לצורך השוואת מתחי הקצר בחיבור שנאים במקביל

קיימת שיטה נוספת לחיבור שנאים במקביל בעלי מתחי קצר שונים וזאת ע"י הוספת עכבה בטור לשנאי בעל מתח הקצר הנמוך יותר בכך להשוות את המתח הקצר שלו לשנאי המחובר אליו במקביל על מנת לאפשר להעביר לעומס הספק מאוזן יותר.

תרגיל דוגמא:

2 שנאים תלת מופעים המחוברים במקביל בעלי הנתונים הבאים:

$$S_A = 400KVA; U_{k\%A} = 5\%; 12.6/0.4KV; \Delta/Y; \cos \varphi_A = 0.2$$

$$S_B = 800KVA; U_{k\%B} = 8\%; 12.6/0.4KV; \Delta/Y; \cos \varphi_B = 0.2$$

א. חשב את ההספק המדומה המרבי שניתן לחבר לשנאים אלו כך שאף אחד מהם לא יעבוד בעומס יתר.

ב. הוחלט להוסיף עכבה בעלת מקדם הספק 0.2 על קו הזינה לשנאי A מצד המת הגבוה, כדי להשוות את מתחי הקצר של השנאים. חשב את גודל העכבה.

ג. חשב מחדש את ההספקים המדומים בין השנאים לאחר הוספת העכבה.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$S_A = S_{An} = 400KVA$$

$$S_B = S_{Bn} * \frac{U_{k\% \min}}{U_{k\%B}} = 800 * \frac{5}{8} = 500KVA$$

$$S_t = S_A + S_B = (400 + 500) * 10^3 = 900KVA$$

ב.

$$I_{kA} = I_{nA} = \frac{S_A}{\sqrt{3} * U_{nA}} = \frac{400 * 10^3}{\sqrt{3} * 12.6 * 10^3} = 18.33A$$

$$\Delta U_{k\%} = U_{k\%B} - U_{k\%A} = 8\% - 5\% = 3\%$$

$$\Delta U_k = \frac{\Delta U_{k\%}}{100} * U_{1n} = \frac{3}{100} * 12.6 * 10^3 = 378V$$

$$Z_{xA} = \frac{\Delta U_k}{I_{kA}} = \frac{378}{18.33} = 20.622\Omega$$

$$\cos^{-1} \varphi_{xA} = \cos^{-1} 0.2 = 78.46^\circ$$

$$Z_{xA} = 20.622 \angle 78.46^\circ \Omega$$

## קורס- מכונות השמל-הנדסאי השמל

ג. עם תוספת העכבה הושוו מתחי הקצר של השנאים ל-8% ולכן:

$$S_t = S_A + S_B = (400 + 800) * 10^3 = 1200KVA$$

$$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nA}}{U_{k\%A}} = \frac{1200}{\frac{400}{8} + \frac{800}{8}} * \frac{400}{8} = 400KVA$$

$$S_B = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nB}}{U_{k\%B}} = \frac{1200}{\frac{400}{8} + \frac{800}{8}} * \frac{800}{8} = 800KVA$$

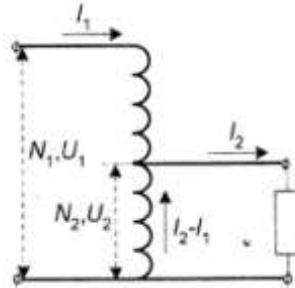
$$S_t = S_A + S_B = (400 + 800) * 10^3 = 1200KVA$$

שנאי עצמי (אוטו-טרנספורמטור)

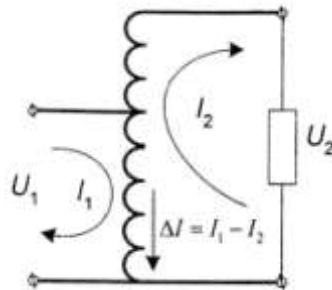
שנאי עצמי הוא שנאי בעל סליל אחד בלבד  $N_1$ , אשר חלק מכריכותיו מהווים את הסליל השניוני  $N_2$ . ניתן להוציא מספר יציאות מהסליל בעלי מספר שונה של כריכות מתוך סה"כ הכריכות וכתוצאה מכך ניתן לקבל מתחים שונים ביחס ישיר למספר הכריכות במוצא השנאי.

שנאי עצמי יכול להיות מעלה מתח או מוריד מתח.

שנאי מוריד מתח-



שנאי מעלה מתח-



$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$S = U_2 * I_2 = U_2 * I_1 + U_2 * (I_2 - I_1)$$

$$S = \frac{U_1 * I_1}{K} + \frac{U_1 * I_1}{K} * (K - 1)$$

כאשר:

יחס תמסורת	K
הספק מדומה	S [VA]

את הזרמים ניתן לחשב לפי-

$$I_2 = \frac{P_2}{U_{2n} * \cos \varphi_2} = \frac{\beta * S}{U_{2n}}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{\beta * S}{U_{1n}}$$

הפסדים בשנאי:

כמו בשנאי רגיל קיימים ההפסדים הבאים:

$\Delta P_{fe}$  - הפסדים קבועים והם נובעים מהפסדי ההספק בליבת השנאי שידוע שהם ההפסדים בריקם.

$\Delta P_{cu}$  - הפסדים המשתנים והם נובעים מהפסדי ההספק במוליכי הנוחשת בשנאי שהם הפסדים בקצר.

$$\Delta P_{CU} = I_1^2 * R_{(N1-N2)} + (I_2 - I_1)^2 * R_{N2}$$



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

יתרונות וחסרונות השנאי העצמי:

חסרונו בחוסר הבטיחות שבו, מאחר והקשר בין הסליל הראשוני והשניוני הוא אינו השראי כמו בשנאי הרגיל אלא קשר גלוי (חשמלי) בשל קיומו של סליל 1 בלבד.

לדוגמא אסור להשתמש בשנאי זה כשנאי מבדל המשמש כאמצעי נגד חשמול.

לעומת חסרונו זה קיימים בשנאי העצמי מספר יתרונות וכולן נובעות מהיותו בעל סליל 1 בלבד:  
א. משקלו מועט.

ב. הפסדי הנחושת בסליל 1 קנטים מאשר בשנאי רגיל בעל 2 סלילים.

ג. כאשר מתח היציאה של השנאי גורם ליחס השנאה  $K < 2$  הזרם בקטע הסליל המשותף

קטן מ- $I_1$ , מסיבה זו ניתן ללפף קטע זה של הסליל במוליך דק יותר מאשר בקטע הסליל

דרכו זרם הזרם  $I_1$ , ובכך תורמים תרומה נוספת למשקל להפסדים ולמחיר.

תרגיל דוגמא 1:

נתון שנאי עצמי בעל הנתונים הבאים:

$$N_T = N_1 = 500 ; U_1 = 1000V ; U_2 = 100V ; P_2 = 1000W ; \cos \varphi_2 = 1$$

חשב:

א.  $N_2 = ?$

ב.  $I_1 = ?$

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$
$$N_2 = \frac{N_1 * U_2}{U_1} = \frac{500 * 100}{1000} = 50$$

ב.

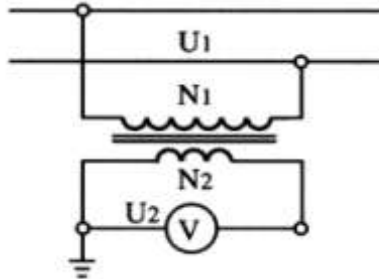
$$I_2 = \frac{P_2}{U_{2n} * \cos \varphi_2} = \frac{1000}{100 * 1} = 10A$$
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$
$$I_1 = \frac{I_2 * U_2}{U_1} = \frac{10 * 100}{1000} = 1A$$

**שנאי מדידה**

מדי מתח וזרם הקיימים אינם מסוגלים למדוד ערכים גבוהים יחסית. באמצעות שנאי מדידה ניתן לפתור בעיה זו. ע"י ניצול תכונתם לשינויים יחסיים בערכי המתחים והזרמים כתוצאה של קשר ההשראי בין הסלילים.

**משנה מתח**

תפקידו למדידת מתח כמתואר באיור הבא:



הסליל בעל מספר הכריכות הרב של שנאי המדידה מחובר למוליכי הרשת אשר את מתחה מעוניינים למדוד. אל הסליל בעל מספר הכריכות המועט מחברים מד מתח. קריאת מד המתח תהיה יחסית לגודל המתח בין מוליכי הרשת בהתאם ליחס הכריכות בין הסלילים.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow U_1 = U_2 * \frac{N_1}{N_2}$$

נתונים נקובים של משנה-המתח:

1. סטיית המתח  $f_u$ - זוהי סטייה במדידות המתח כתוצאה מכך שהשנאי אינו אידיאלי ומחושבת באחוזים לפי הנוסחה הבאה:

$$f_u = \frac{U_2 * \frac{N_1}{N_2} - U_1}{U_1} * 100$$

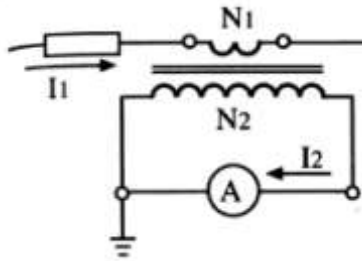
2. סטיית הזווית  $\delta_u$ - זהו הפרש הזוויות בין הווקטורים של המתח השניוני והמתח הראשוני ונמדד בדקות המעלה של הזוויות.
3. דרגת הדיוק (קלאס המדידה)- של משנה המתח מהווה ערך מספרי של סטיית המתח, והוא נע בגבולות רחבים 0.1-10 תלוי בדרישות המדידה. להלן טבלה של משני זרם המיועדים למדידות-

קלאס משנה-מתח	סטיית הזווית המרבית (בדקות)
0.1	5
0.2	10
0.5	20
1.0	40
3.0 ויותר	לא מוגדר

4. קלאס הבידוד- כמו כל ציוד למתח גבוה משנה-מתח חייב לעמוד בכל דרישות הנוגעות לעמידות בפני מתחי יתר.

5. הספק נקיב  $S_n (VA)$ - סטיות השנאי נשארות במסגרת קלאס השנאי בתנאי שהעומס בשניוני אינו עולה על הספקו הנקיב של השנאי ולכן ניתן לחשב את העכבה המינימאלית של המכשירים המחוברים לשניוני השנאי לפי הביטוי:

$$Z_{min} = \frac{U_{2n}^2}{S_n}$$



דרך הסליל בעל מספר הכריכות המועט של שנאי המדידה עובר הזרם אותו מעוניינים למדוד. אל הסליל בעל מספר הכריכות הרב של שנאי המדידה מחברים מד זרם. קריאת מד הזרם תהיה יחסית לגודל הזרם הנמדד ובהתאם ליחס הכריכות בין הסלילים.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow I_1 = I_2 * \frac{N_2}{N_1}$$

כאמור שנאי המדידה שימושיים ברשתות בעלות מתח זרם גדולים יחסית. לכן חובה להאריק את הסליל אליו מחובר מכשיר המדידה, להגנה בפני פריצת מתח הרשת. כמו כן במשנה זרם יש להאריק את הסליל אליו מחובר מד הזרם לצורך בהגנה בפני התפתחות מתח גבוה בסליל השניוני כתוצאה מהמספר הרב של הכריכות בו בעת ניתוק מד הזרם. כלל אין לנתק מד זרם במעגל נושא זרם מבלי לקצר תחילה בין קצוות הסליל.

נתונים נקובים של משנה הזרם:

1. סטיית הזרם  $f_I$  זוהי סטייה במדידות הזרם, אשר נובעת מהעובדה שמשנה זרם אינו שנאי אידיאלי. ואת סטיית הזרם באחוזים מחשבים לפי הנוסחה הבאה:

$$f_I = \frac{I_2 * \frac{N_2}{N_1} - I_1}{I_1} * 100$$

2. סטית הזווית  $\delta_1$  - זהו הפרש הזוויות בין הווקטורים של הזרם בשניוני לזרם בראשוני והוא נמדד ביחידות דקות המעלה של הזווית.
  3. דרגת הדיוק (קלאס המדידה) - מהווה ערך מספרי של סטיית הזרם. לדוגמא: לשנאי בעל קלאס 1 סטיית הזרם שווה ל- 1%.
- קלאס משני הזרם המיועדים למכשירי הגנה יכול להיות  $P1, P3, P5$  וסטית הזרם בהתאם. למשני זרם המיועדים למדידות, דרישות דיוק המדידה גבוהות יותר והן בעלי קלאס הקטן מ-1 להלן טבלה של משני זרם המיועדים למדידות-

קלאס משנה הזרם	סטיות הזווית המרבית (בדקות)
0.1	5
0.2	10
0.5	30
1.0	60
3.0 ויותר	לא מוגדר

4. הספק נקוב  $S_n (VA)$  -סטיות השנאי עולות עם עלית העומס. העומס של משנה הזרם זהו סליל מד המדידה או ממסר ההגנה המחובר לשניוני של משנה הזרם. סטיות השנאי נשארות במסגרת קלאס השנאי, בתנאי שהעומס אינו עולה על הספקו הנקוב של השנאי, לכן ניתן לחשב את העכבה המרבית של המכשירים המחוברים לשניוני של משנה הזרם לפי הביטוי-

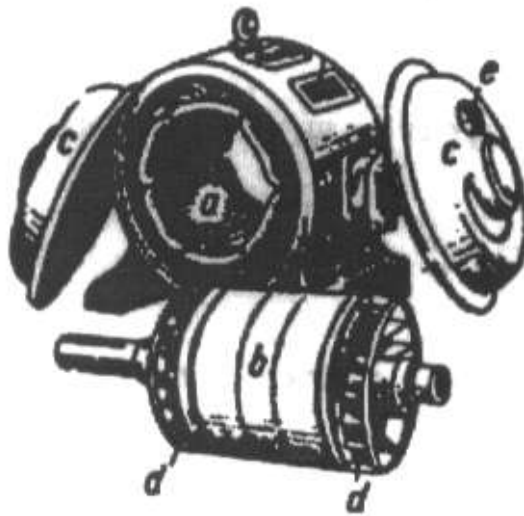
$$Z_{max} = \frac{S_n}{I_{2n}^2}$$

כדי להגן על מכשירי המדידה, משני הזרם מתוכננים להיכנס לרוויה כאשר הזרם בראשוני עולה מעל ערך של  $5 * I_n$ . ובשנאים המיועדים להגנה גבול הרוויה יכול להיות  $10 * I_n - 20 * I_n$ .

## פרק 2- מנוע השראה (אסיכרוני)

### מבוא

אסיכרוני פירושו "לא מתואם" ואכן אחד מהמאפיינים של מנועים אלו הוא בחוסר התאום בין מהירות הסיבובים של עוגן המנוע (הציר) לבין מהירות תנועתם של השטפים המגנטיים בסטטור המתפתחים בין קוטבי הברזל (תדירות הרשת). מנועי השראה פועלים על אותו עיקרון של השראה אלקטרומגנטית בדומא לשנאי. מנועים אלו הם הנפוצים ביותר בתעשייה. קיימים מנועי השראה חד פאזיים ותלת פאזיים. מנוע השראתי התלת פאזי מורכב מסטטור בעל סליל תלת פאזי ורוטור המופיע ב-2 צורות: א. רוטור כלוב (מקוצר). ב. רוטור מלופף.



a - סטטור

b - רוטור

c - תושבות למסבים

d - מאורר

E - פתח אוורור

### המנוע התלת מופעי

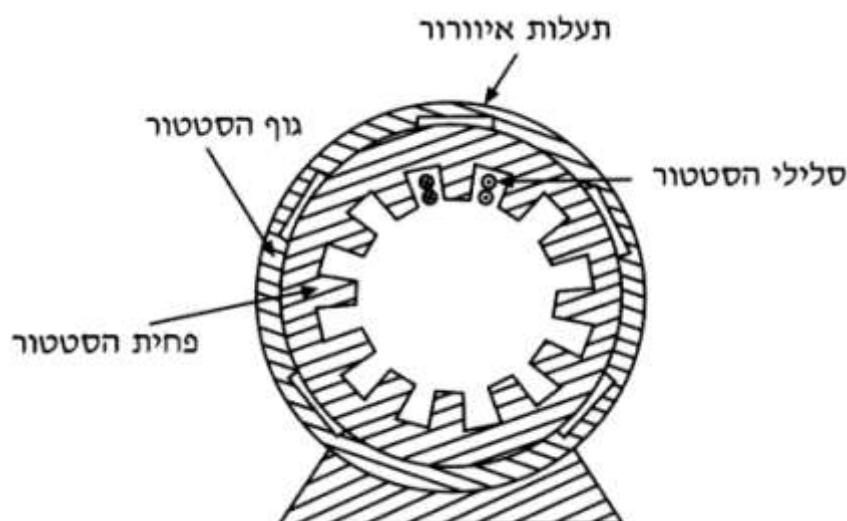
#### מבנה המנוע

למנוע 2 חלקים עיקריים: החלק הנייח – הסטטור, והחלק המסתובב – העוגן.

#### הסטטור:

מבנהו עגול וחלול סביב חלקו הפנימי העליון ולאורכו, צמודות זו לזו ומבודדות זו מזו פחיות משוננות היוצרות חריצים לאורכו, אל תוך החריצים מוכנסים 3 סלילים אחד לכל מופע, ובמרחק של  $120^\circ$  זה מזה. צורת החיבור בין הסלילים בצורת כוכב או בצורת משולש.

כל סליל מופעי שכזה מחולק ל-2 חצאים המסודרים בהיקף הסטטור אחד מול השני, במרחק של  $180^\circ$  זה מזה. כל מחצית סליל בנוי אף הוא מסלילים טורים זה מזה, וכל אחד מהסלילים הטורים כרוכים סביב אחת משיני פחיות הברזל המשוננות שהן למעשה בליטות לאורך הסטטור שנוצר מעצם חיבורן זו לזו של הפחיות המשוננות.

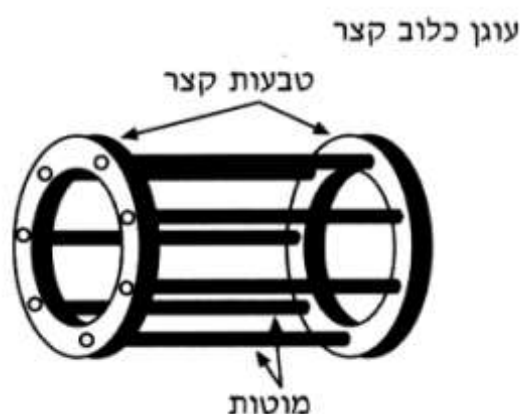


עם חיבור הסטטור התלת מופעי למקור מתח חילופין תלת מופעי, ועם זרימת זרם בסלילי המופעים בהתאם למופע המתח בהם, מתפתחים בליבות הברזל סביבם כרוכים הסלילים קטבים מגנטיים. מספרם של הקטבים המגנטיים המתפתחים לסליל מופע אחד, כמספר השינויים בכיוון הליפוף של חלקי הסליל הטוריים הכרוכים סביב ליבותיהם.

#### העוגן (רוטור) מסוג "כלוב קצר":

העוגן הוא החלק המסתובב בחלל הסטטור. הוא בנוי מציר מתכתי ולאורכו מושחלות פחיות משוננות הצמודות זו לזו ומבודדות זו מזו. בתוך החריצים המתקבלים לאורך העוגן מצירופן של הפחיות זו לזו נמצאים מוליכי הזרם.

את המוטות מקצרים זה עם זה באמצעות "טבעות קצר" ליצירת מסלול לזרם שיזרום לאורך המוטות. ומכאן שמו "עוגן כלוב קצר" או "עוגן כלוב סנאי".

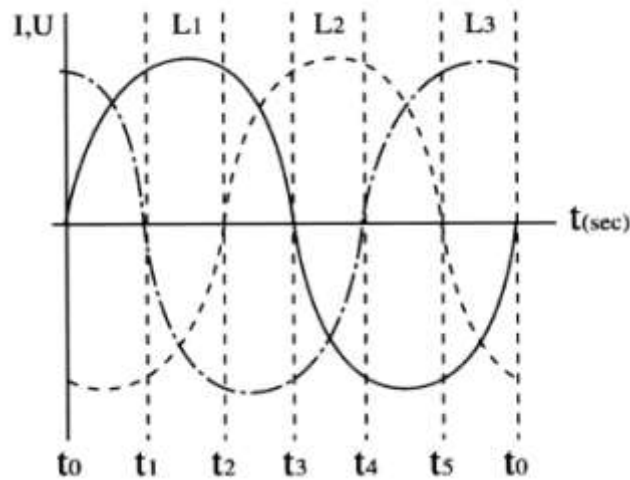


#### עיקרון הפעולה:

פעולתם של מנועים אלו נובעת מתוך ההשראה המגנטית בין הסטטור לעוגן, ומכאן שמם "מנועי השראה", כלומר ללא קשר חשמלי בין הסטטור לרוטור, אלא רק קשר מכני בהיות ציר העוגן מסתובב בתוך חלל הסטטור בעזרת מסבים אשר נמצאים בצידי הסטטור. פעולתם של כל מנועי ההשראה האסינכרוניים על סוגיהם מתחילה עם התפתחות שדה מגנטי בין קוטבי הסטטור עם חיבורם לרשת החשמל וזרימת זרם בסלילי הסטטור.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

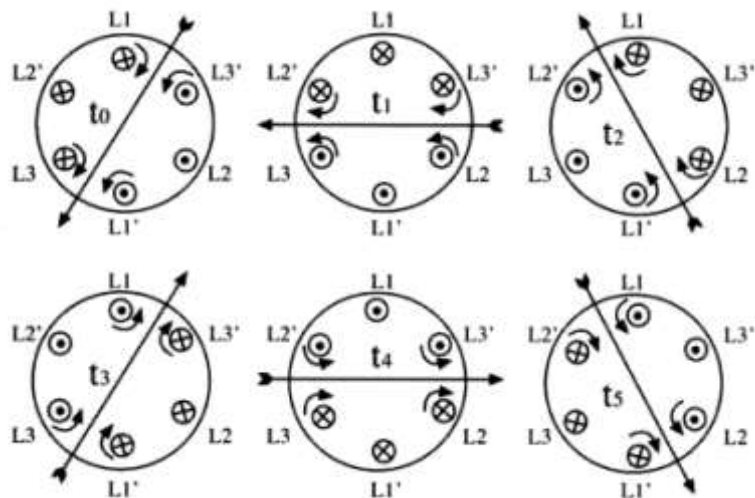
במנועים התלת מופעיים המחוברים לרשת תלת מופעית, מתפתח שדה מגנטי בהתאם למופע הזרם. מקובל להגדיר את מופע L1 (R) כמופע הייחוס, ולכן השדה המגנטי מתפתח תחילה במופע L1 ולאחר מכן במופעים L2 (S) ו-L3 (T). מאחר וסלילי המופעים מסודרים סביב חלקו העליון של הסטטור, במרחקים של  $120^\circ$  זה מזה נוצר שדה מגנטי מסתובב בחלל הסטטור. השדה המגנטי המסתובב נחתך תוך כדי תנועתו על ידי מוטות העוגן ומשרה בהם מתח, ומאחר ומוטות העוגן מקוצרות זה עם זה באמצעות טבעות הקצר, נוצר בהם ודרכם זרם מושרה. ומכיוון שהמוטות נושאי הזרם נמצאים בתוך השדה המגנטי המסתובב שבחלל הסטטור מתפתח כוח השואף להניעם. כידוע ניתן לקבוע את כיוון הכוח המניע על פי כלל "יד שמאל" הקובע- כף היד פונה לקוטב הצפוני האצבעות מורות על כיוון הזרם, והאגודל יורה על כיוון הכוח הפועל על המוליך. מופעי המתח או הזרם בסטטור מתוארים באיור הבא:



המופע L2 מפגר אחרי מופע L1 ב-  $120^\circ$ .

המופע L3 מפגר אחרי מופע L2 ב-  $120^\circ$ .

השדה המגנטי המסתובב בחלל הסטטור מתואר באיור הבא:



בכל ששת המעגלים במתוארים לעיל מתואר חתך לאורך רוחב הסטטור ובו 3 סלילי מופע ולכל סליל 2 קצוות.

נבחן לדוגמא את המתואר בזמן  $t_0$ :

כפי המתואר בעקומות מופע המתח או הזרם, המופע  $L1$  חיובי, לכן נסמן בקצה הסליל- $L1$  את כיוון הזרם נע מאיתנו אל תוך הדף ונסמנו כזנב חץ  $(X)$ . בקצה השני של סליל- $L1$  שיוסמן ב- $L1'$  הזרם נע מהדף אלינו ולכן יסומן בחוד החץ  $(.)$ . גם מופע  $L3$  חיובי והוא נמצא במרחק של  $240^\circ$  עם כיוון השעון ממופע  $L1$ , ולכן יסומן הקצה של  $L3$  בזנב חץ והקצה  $L3'$  בחוד חץ. המופע  $L2$  שלילי והוא נמצא במרחק של  $120^\circ$  עם כיוון השעון מ- $L1$  ולכן יסומן הקצה  $L2$  בחוד חץ והקצה  $L2'$  בזנב חץ. ניתן לקבוע את כיוון תנועתם של השטפים המגנטיים סביב הקצוות של סלילי המופעים לפי כלל "יד ימין" הקובע- שאם לופתים את הסליל ביד ימין באופן שהאצבעות יציינו את כיוון מגמת הזרם האגודל מציין את מיקומו של הקוטב הצפוני שהוא כיוון השטף המתפתח בסליל. בזמן  $t_0$  ניתן לראות כי סביב קצוות הסלילים  $L1$  ו-  $L3'$  וכן  $L1'$  ו-  $L3$ , כיוון תנועת השטפים יוצרים שדה שקול העובר בניהם.

ובזמן  $t_1$  ניתן לראות כי השטף השקול שינה את מיקומו וכעת הוא עובר במרחק של  $60^\circ$  עם כיוון השעון, וכך גם עבור הזמנים האחרים עד  $t_5$  וחוזר חלילה. התוצאה המתקבלת היווצרות שטף מסתובב סביב חלל הסטטור.

### מהירות הסיבוב של השדה המגנטי בסטטור:

כתוצאה מתדירות הרשת השטף המגנטי משנה את קוטביותו, מהירות השינוי בקוטביות הרשת נקראת מהירות סינכרונית או מהירות השדה המגנטי המסתובב והוא מסומן ב-  $n_1$ . מהירות השדה המגנטי תלויה במספר זוגות הקטבים ובתדר הרשת, והיא מחושבת לפי הנוסחה הבאה:

$$n_1 = \frac{60 * f}{p}$$

כאשר:

$n_1$  [rpm] - מהירות סינכרונית.

$f$  [Hz] - תדירות הרשת.

$p$  - מס' זוגות קטבים למופע.

דוגמאות:

$$p = 1 \rightarrow n_1 = 3000 \text{ rpm}$$

$$p = 2 \rightarrow n_1 = 1500 \text{ rpm}$$

$$p = 3 \rightarrow n_1 = 1000 \text{ rpm}$$

$$p = 4 \rightarrow n_1 = 750 \text{ rpm}$$

### חליקה:

מהירות סיבוב הרוטור היא המהירות הנקובה של המנוע והיא מסומנת ב-  $n_2$  והיא נמוכה מעט מהמהירות הסינכרונית (מהירות השדה המגנטי) ולכן מנוע זה נקרא מנוע אסינכרוני (לא מתואם). וזאת כיוון שמהירותו של העוגן תגיע למהירות השדה המסתובב, תתבטל אז תופעת החיתוך של מוטות העוגן בשדה המסתובב, והתוצאה מכך שלא יתפתח מתח במוליכי העוגן ולא יזרום בהם זרם מושרה ולא יתפתח בהם הכוח הסיבובי שמניע את העוגן. בעקבות כך תחול ירידה במהירות סיבובי



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

העוגן ואז שוב מוליכיו ישובו לחתוך את השדה הסטטור המסתובב ושוב יתפתחו בו הכוחות אשר ישובו להניע אותו. ולכן תמיד מהירות סיבובי העוגן יהיו קטנים ממהירות סיבובי השדה המסתובב:

$$n_2 < n_1$$

ההפרש בין מהירות השדה למהירות הרוטור באחוזים נקרא " מקדם חליקה" ומסומן ב-  $s$ .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$n_2 = n_1 * (1 - s_n)$$

כאשר:

$n_1$  [rpm] - מהירות סינכרונית.

$n_2$  [rpm] - מהירות הרוטור.

$S$  [ ] - חליקה

החליקה נתונה כשבר עשרוני ניתן לרשום אותה גם באחוזים לפי הביטוי:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} * 100$$

החליקה במצב תקין של סיבוב העוגן הוא תמיד  $s < 1$ .

קיימים 2 מצבי קיצון:

1. כאשר המנוע במצב מנוחה, ומצב זה מתקיים מייד עם תחילת ההנעה או בעת בלימת

המנוע במצבים אלו החליקה היא מרבית-

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_1 - 0}{n_1} = 1$$

2. כאשר העוגן מאיץ את מהירותו עד למהירות של השדה המסתובב ובצב זה החליקה-

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{0}{n_1} = 0$$

כיוון שמהירות העוגן מושפעת מהעומס המכני המחובר לציר העוגן ניתן להבין כי גם החליקה תלויה

בעומס המכני לכן עבור עומס מכני נקוב של המנוע תפתח חליקה נקובה המסומנת ב-  $S_n$ .

דוגמא:

מנוע בעל 4 קטבים מגנטיים פועל ברשת שתדירותה 50Hz. חשב את המהירות הנקובה של המנוע

אם ידוע שהחליקה הנקובה היא 4%.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

$$s_{n\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} * 100 \Rightarrow n_2 = n_1 - \frac{s_{n\%} * n_1}{100} = 1500 - \frac{4 * 1500}{100} = 1440 \text{ rpm}$$

**מתחים במנוע:**

המנוע מחובר אל הרשת באמצעות סלילי הסטטור, סלילים אלו מחוברים בניהם בחיבור כוכב או בחיבור משולש.

יש להבחין ביו 2 סוגי מתח במנוע:

$U_L$  – מתח השלוב של הרשת אשר אליה מחובר המנוע.

$E_{2ph}$  – הכאמ"מ למופע במוליכי העוגן (רוטור).

מאחר ובסטטור המתח והזרם הם תלת מופעים, גם השטף המגנטי המתפתח בהם יהיה תלת מופעי, וכל מופע שטף יתפתח בתורו כאמ"מ בעוגן וניתן לחשבו כמו בשנאי לפי הנוסחה:

$$E_{2ph} = 4.44 * N_{2ph} * \phi_{max} * f_2$$

כאשר:

$N_{2ph}$  - מספר הכריכות למופע.

$\phi_{max} [wb]$  - השטף המקסימאלי המתפתח בסטטור.

$f_2 [Hz]$  – תדירות מושרית ברוטור.

**תדירות הזרם בעוגן:**

המונח "תדירות הזרם בעוגן" מתייחס למספר הפעמים בשנייה בה מתחלפים כיווני הזרם במוליכי העוגן.

זרם זה הוא בעל תדירות המסומנת ב-  $f_2$  והיא שונה מתדירות הרשת.

$$f_2 = f_1 * s$$

כאשר:

$s$  [ ] - חליקה.

$f_1 [Hz]$  - תדירות הרשת.

$f_2 [Hz]$  – תדירות מושרית ברוטור.

במצבי הקיצון:

1. כאשר מהירות סיבובי העוגן כמהירות סיבובי השדה כאמור החליקה היא 0 ולכן גם התדירות הזרם במוליכי העוגן שווים ל-0.

2. וכאשר העוגן בלום (כמו בתחילת ההתנעה) כאמור במצב זה החליקה היא 1 ותדירות הזרם במוליכי העוגן שווה לתדירות השדה המסתובב שהיא תדירות הרשת. לחליקה זו ניתן לקרא

חליקת התנעה ומסומנת  $s_{st}$ . וערכה כאמור:  $s_{st} = 1$

חשוב לציין כי כאשר המנוע בלום המנוע ההשראי מתנהג כמו שנאי בקצר ולכן סלילי העוגן במצב זה מתנהג כמו הסליל השניוני של השנאי בקצר.

כיוון שבמצב שעוגן המנוע בלום התדירות שלו שווה לתדירות הרשת ( $S=1$ ) לכן במצב זה:

$$E_{2ph} = E_{2_0ph} * S \Rightarrow E_{2ph} = E_{2_0ph}$$

כאשר:

$E_{2_0ph}$  - הכאמ"מ למופע במוליכי העוגן הבלום (הספרה 0 מציינת 0 סיבובים).

**זרמים המנוע:**

כתוצאה מהשדה המגנטי נוצר הכאמ"מ במוליכי הרוטור (עוגן) וכתוצאה ממנו נוצר זרם במוליכי הרוטור והוא מסומן ב-  $I_2$ .

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi_1} = \frac{P_2}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi_1 * \eta}$$

כיוון ש-

$$I_{2ph} = \frac{E_{2ph}}{Z_{2ph}} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{R_{2ph}^2 + X_{2ph}^2}} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{R_{2ph}^2 + (2\pi * f_2 * L_{ph})^2}} =$$

$$I_{2ph} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{R_{2ph}^2 + (2\pi * f_1 * S * L_{ph})^2}} = \frac{E_{2ph} * S}{\sqrt{R_{2ph}^2 + (2\pi * f_1 * S * L_{ph})^2}}$$

ובחילוק המונה והמכנה ב-  $S^2$  נקבל:

$$I_{2ph} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_{2ph}}{S}\right)^2 + (2\pi * f_1 * L_{ph})^2}} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_{2ph}}{S}\right)^2 + X_{2ph}^2}}$$

כאשר:

$I_{2ph}$  - הזרם למופע בעוגן.

$E_{2ph}$  - הכאמ"מ למופע בעוגן.

$E_{2ph}$  - הכאמ"מ למופע בעוגן במצב ניח (בלום או בתחילת התנעה).

$R_{2ph}$  - התנגדות סליל העוגן למופע.

$X_{2ph}$  - היגב סליל העוגן למופע.

$X_{2ph}$  - היגב סליל העוגן למופע במצב ניח.

יש לציין כי הזרם למופע בעוגן בחליקה כלשהיא תלוי בעיקר ב-2 גורמים: במתח המושרה ובעכבה המתפתחת למופע בעוגן.

מיד עם תחילת ההתנעה וכל עוד החליקה היא  $s_{st} = 1$  (חליקה מרבית) הכאמ"מ למופע בעוגן הוא כפי 20 מערכו בעבודה הנקובה של המנוע  $E_{2ph} = 20 * E_{2ph}$ .

$$\text{לפי היחס: } \frac{s_{st}}{s_n} = \frac{1}{0.05} = 20$$

באותו זמן מתפתחת עכבה למופע בעוגן שערכה הוא חיבור ווקטורי של ההתנגדות האומית למופע שאינה משתנה בכל מקרה וההיגב ההשראי למופע אשר משתנה בהתאם לחליקה כיוון שהוא תלוי תדר. כל עוד העוגן המצב ניח (בלום)  $s=1$  ערכו של ההיגב במצב ניח הוא בערכו המרבי.

2 הגורמים המשתנים הללו- המתח המושרה והעכבה המתפתחים בכל מופע בעוגן מיד עם תחילת ההתנעה, לא מתפתחים ביחס זהה. לכן זרם ההתנעה במנוע גדול מהזרם הנקוב של המנוע בסדר גודל של פי 4-8.

זרם ההתנעה הגדול המתפתח בעוגן בעת ההתנעה, גורם לצריכת זרם גבוהה גם מרשת החשמל המזינה את המנוע.

כאמור מיד עם תחילת ההתנעה מתנהג המנוע כשנאי בקצר, אך זרמי ההתנעה במנוע קטנים באופן יחסי מזרמי הקצר בשנאי עקב שטף דליפה גדול יותר במנוע מאשר בשנאי.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

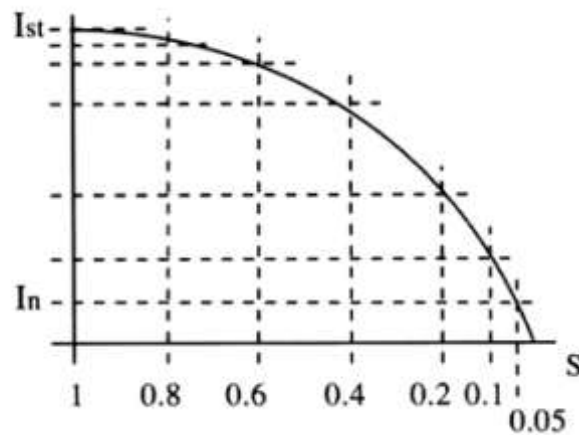
**דוגמא:**

המתח למופע בעוגן בלום של מנוע השראי תלת פאזי אסינכרוני הוא  $190V$ . ההתנגדות האומית למופע היא  $0.2\Omega$  וההיגב ההשראי למופע בעוגן בלום הוא  $0.5\Omega$ . שרטט את אופיין הזרם למופע בעוגן מרגע ההתנעה ועד עבודתו בחליקה בת  $5\%$ .  
נחשב תחילה את הזרם העוגן בחליקות שונות בין  $S=1$  שזוהי החליקה בהתנעה לבין  $S=0.05$  שזוהי החליקה הנקובה לפי הנוסחה:

$$I_{2ph} = \frac{E_{2\ 0ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_{2ph}}{S}\right)^2 + X_{2\ 0ph}^2}}$$

על פי התוצאות נשרטט את אופיין הזרם:

S	I <sub>2 PH(A)</sub>
1	352.8
0.8	339.8
0.6	316.2
0.4	268.7
0.2	169.9
0.1	92.2
0.05	47.1



**הפסדי הספק במנוע:**

1. הפסד הספק בברזל הקטבים בסטטור (שדה)  $\Delta P_{fe}$  וערכו קבוע ואינו תלוי בגודל העמסת המנוע. הוא כולל את הפסדי החשל והפסדי החום כתוצאה מזרמי המערבולת בברזל הקטבים. גם בברזל העוגן נגרמים הפסדי הספק וליתר דיוק בשיני פחיות הפלדה. והם נגרמים כתוצאה של מעבר זרם העוגן בסלילי או מוטות העוגן המונחים בין שיני הפחיות. ערכם מזערי יחסית להפסד ההספק בקוטבי הסטטור ולכן ניתן להזניחם.
2. הפסדי הספק חשמליים בנחושת סלילי הסטטור הכרוכים סביב קוטבי הסטטור  $\Delta P_{cu1}$  ובסלילי או מוטות העוגן  $\Delta P_{cu2}$ , כתוצאה ממעבר של זרם דרכם. ערכם של הפסדים אלו אינו קבוע והוא תלוי בגודל הזרמים בסטטור ובעוגן.
3. הפסד הספק מכני- הנובע מחיכוך בין המסבים שבצידי גוף המנוע לציר העוגן המסתובב בתוכם, החיכוך נגרם עקב משקלו של העוגן, והפסד ההספק המכני מתבזבז ניפלט בצורת חום מגוף המנוע.

**ניסויים במנוע:**

ניסוי ריקם

ניסוי ריקם במנוע ניתן לבצע רק כאשר המנוע חסר עוגן או אם ניתן לסובב את העוגן באמצעי חיצוני ובמהירות השדה המסתובב בסטטור כאילו אין עומס המחובר לציר העוגן ( $f_1 = f_2$ ). אבל מבחינה מעשית לא ניתן לבצע זאת כיוון שכן קיים עומס והוא העוגן עצמו, ולכן לא ניתן למדוד במדויק את הפסדי הריקם באמצעות ניסוי הריקם המוכר (משנאים) אלא בקירוב מספק. לעריכת הניסוי יש לחבר את המנוע בריקם למתח נקוב  $U_{1n}$ , אשר לצורך המדידה יקרא  $U_0$ , מד הזרם ימדוד במצב זה את זרם הריקם  $I_0$ , ומדי ההספק ימדדו את הפסדי הברזל  $\Delta P_{fe}$  הפסדים אלו נקראים גם  $P_0$ .

$$P_0 = \sqrt{3} * U_0 * I_0 * \cos \varphi_0$$

ערכו של מקדם ההספק בריקם נמוך מאוד והוא כ- 0.25.

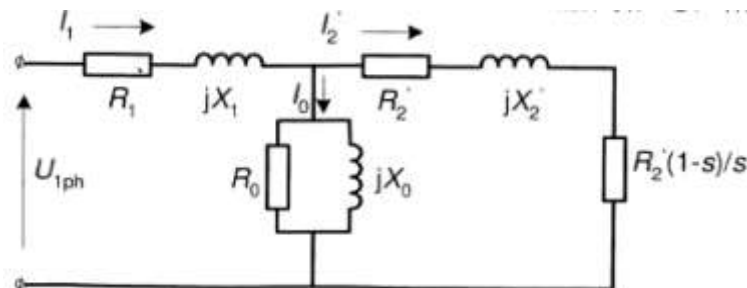
ניסוי קצר

מצב קצר במנוע מתקיים כאשר העוגן אינו מסתובב כלל (במצב מנוחה)- התנהגותו במצב זה דומה בכל להתנהגות חשמלית של שנאי בניסוי קצר. לערכת הניסוי יש לחבר את המנוע לרשת באמצעות שנאי "ווריאק" המספק מתח משתנה רצוף, למסירת מתח הקצר  $U_k$  הדרוש לניסוי. במצב זה ימדוד מד הזרם שיחובר לאחד ממוליכי ההזנה את ערכו של הזרם  $I_{1n}$  למנוע, אשר לצורך המדידה יקרא  $I_k$ . מדי ההספק שיחוברו למוליכי ההזנה ימדדו את הפסדי הנחושת  $\Delta P_{cu}$ . הפסדים אלו נקראים גם  $P_k$ .

$$P_k = \sqrt{3} * U_k * I_k * \cos \varphi_k$$

**מעגלי תמורה של מנוע השראה:**

לחישוב הפרמטרים של מכונה אסינכרונית במשטרי עבודה שונים משתמשים במעגל תמורה, שבו מוצגים תהליכי המרת האנרגיה במכונה המעשית בעלת קשר אלקטרומגנטי בין הסטטור לרוטור, וזאת באמצעות מעגל חשמלי פשוט יחסית ע"י מעגל "ד".



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

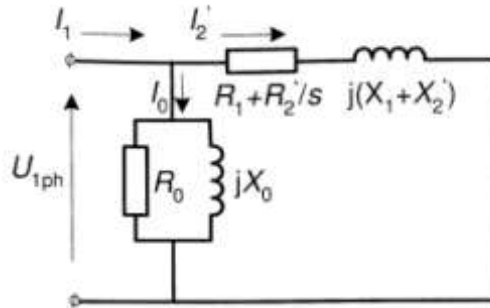
במעגל זה הסטטור מיוצג ע"י העכבה  $Z_1 = R_1 + jX_1$ , כאשר  $R_1$  זוהי התנגדות סלילי הסטטור ו-  $X_1$  זהו ההיגב ההשראי של סלילי הסטטור. הרכיבים  $R_0$  ו-  $X_0$  מהווים את ענף המיגנוט, המתאר את הפסדי הברזל בסטטור. הזרם  $I_0$  מייצג את הזרם בריקים אשר נצרך לשם יצירת השדה המגנטי של המכונה. העכבה  $Z_2' = R_2' + jX_2'$  מייצגת את סלילי הרוטור, כאשר הערכים של ההתנגדות וההיגב של הרוטור משוקפים לסטטור לפי:

$$\begin{aligned} R_2' &= R_2 * K^2 \\ X_2' &= X_2 * K^2 \\ K &= \frac{U_{1nph}}{E_{20ph}} \end{aligned}$$

הרכיב  $R_2' * \frac{1-s}{s}$  מתאר את העומס המכני של המנוע והוא יחסי להספק המכני  $P_{mec}$ . זרם הרוטור המשוקף ניתן לחשב:

$$I_2' = I_2 * \frac{E_{20ph}}{U_{1nph}}$$

ניתן לפשט את המעגל באמצעות חיבור הרכיבים ע"י מעגל "T":



כאשר:

$$\begin{aligned} R_1 + R_2' + R_2' * \frac{1-s}{s} &= R_1 + \frac{R_2'}{s} \\ jX_1 + jX_2' &= j(X_1 + X_2') \end{aligned}$$

אומנם האיור משותף ל-2 הניסויים אך יש לזכור כי הניסויים מבוצעים הנפרד. ניסוי ריקם מתייחס רק לענף הריקים עם זרם הריקים  $I_{0ph}$  בקו ההזנה, כאשר מתח הריקים

$$U_{L_0} = U_{1n}$$

ניסוי קצר מתייחס רק לענף הקצר עם זרם הנומינלי בקו הזינה  $I_{kph} = I_{1nph}$ . כאשר מתח הקצר

$$U_{L_k} \text{ הוא -}$$

כאשר:

$R_1$  [Ω] - התנגדות הסטטור בכל מופע.

$R_2$  [Ω] - התנגדות הרוטור בכל מופע.

$R_2'$  [Ω] - התנגדות הרוטור בכל מופע משוקפת לסטטור.

$X_1$  [Ω] - היגב הסטטור בכל מופע.

$X_2$  [Ω] - היגב הרוטור בכל מופע.

$X_2'$  [Ω] - היגב הרוטור בכל מופע משוקפת לסטטור.

$K$  - יחס השנאה במנוע.

את הזרמים במנוע ניתן לחשב:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_1 * \cos \varphi}$$

$$I_{2ph} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

$$I_{2ph} = I'_{2ph} * K$$

$$I'_{2ph} = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_{20})^2}}$$

כאשר:

$E_{20ph}$  [V] - כא"מ מושרה ברוטור למופע כאשר הרוטור נייח.

$I_{2ph}$  [A] - זרם ברוטור למופע.

$I'_{2ph}$  [A] - זרם ברוטור למופע כאשר הוא משוקף לסטטור.

$I_1$  [A] - זרם קווי בסטטור.

$U_1$  [V] - מתח שלוב בסטטור.

$\cos \varphi$  - גורם ההספק.

#### תרגיל דוגמא:

מנוע השראה תלת פאזי בעל 6 הדקים מחובר בכוכב למתח שלוב של 208V, ההספק הנקוב 25HP,

במנוע זה בוצעו ניסוי ריקם וניסוי קצר ונמצאו הפרמטרים הבאים:

בריקם:  $P_0 = 2.2Kw$ ;  $U_0 = 208V$ ;  $I_0 = 22A$ ;  $f = 60Hz$

בקצר:  $P_k = 2.2Kw$ ;  $U_k = 24.6V$ ;  $I_k = 64.5A$ ;  $f = 15Hz$

בבדיקה בזרם ישר שבוצעה ע"י חיבור 2 הדקי הסטטור למקור זרם ישר נמצא שבמתח של 13.5V זרם של 64A.

א. חשב את התנגדות סלילי הסטטור.

ב. חשב את הפרמטרים בענף המיגנוט של המנוע.

ג. חשב את ההתנגדות השקולה של הרוטור.

ד. חשב היגבי הסלילים של הסטטור והרוטור ושרטט מעגל תמורה למנוע זה.

א.

$$R_{1ph} = \frac{U_{DC}}{2 * I_{DC}} = \frac{13.5}{2 * 64} = 0.105 \Omega$$

ב.

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu1} = 3 * \frac{U_{0ph}^2}{R_0} + 3 * I_0^2 * R_{1ph}$$

$$U_{0ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120.1V$$

$$R_0 = \frac{3 * U_{0ph}^2}{P_0 - 3 * I_0^2 * R_{1ph}} = \frac{3 * 120.1^2}{2200 - 3 * 22^2 * 0.105} = 21.134 \Omega$$

$$I_{R0} = \frac{U_{0ph}}{R_0} = \frac{120.1}{21.134} = 5.683A$$

$$I_{X0} = \sqrt{I_0^2 - I_{R0}^2} = \sqrt{22^2 - 5.683^2} = 21.253A$$

$$X_0 = \frac{U_{0ph}}{I_{X0}} = \frac{120.1}{21.253} = 5.65 \Omega$$

ג.

$$R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_k}{3 * I_k^2} = \frac{2200}{3 * 64.5^2} = 0.176 \Omega$$

$$R_2' = R_k - R_1 = 0.176 - 0.105 = 0.071 \Omega$$

ד.

$$U_{kph} = \frac{U_{kL}}{\sqrt{3}} = \frac{24.6}{\sqrt{3}} = 14.2V$$

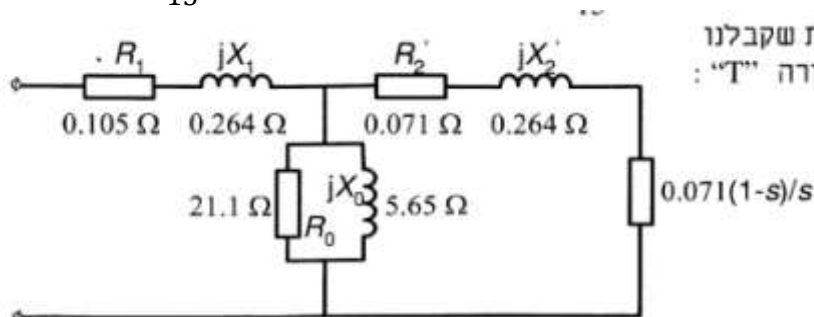
$$Z_k = \frac{U_{kph}}{I_{kph}} = \frac{14.2}{64.5} = 0.22 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0.22^2 - 0.176^2} = 0.132 \Omega$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{0.132}{2} = 0.066 \Omega$$

כיוון שניסוי הקצר בוצע בתדר 15Hz ומכיוון שהיגב הוא יחסי לתדר לכן עבור תדר 60Hz ההיגבים יהיו-

$$X_1 = X_2' = 0.066 * \frac{60}{15} = 0.264 \Omega$$

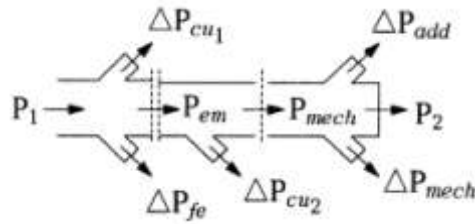


על פי התוצאות שקבלנו  
נבנה מעגל תמורה "T":



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

הספקים במנוע (דיאגרמה האנרגטית)



$$\Delta P = \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cu2} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}$$

$$\Delta P_{cu1} = 3 * I_{ph}^2 * R_{1ph}$$

$$P_1 = \sqrt{3} * U_{1n} * I_{1n} * \cos \varphi_{1n}$$

$$P_n = P_2 = P_1 * \eta$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

$$P_{mech} = P_{em} * (1 - s)$$

$$\Delta P_{cu2} = s * P_{em}$$

כאשר:

הספק כניסה	$P_1$	[ W ]
הספק יציאה	$P_2$	[ W ]
הספק אלקטרומגנטי	$P_{em}$	[ W ]
הספק מכני	$P_{mech}$	[ W ]
הפסדי נחושת בסטטור	$\Delta P_{cu1}$	[ W ]
הפסדי ברזל	$\Delta P_{fe}$	[ W ]
הפסדי נחושת ברוטור	$\Delta P_{cu2}$	[ W ]
הפסדים מכניים	$\Delta P_{mech}$	[ W ]
הפסדים נוספים	$\Delta P_{add}$	[ W ]
הפסדי הספק כוללים	$\Delta P$	[ W ]
הספק נקוב ביציאה	$P_n$	[ W ]

תרגיל דוגמא:

למנוע השראה תלת מופעי בחיבור כוכב הנתונים הבאים:

$$P = 75HP ; U = 400V ; f = 50Hz ; \eta = 90.5\% ; \cos \varphi = 0.9 ; R_1 = 72m\Omega$$

החליקה הנקובה שווה ל- 2.7%, ולמנוע 2 זוגות הקטבים.

הפסדי הברזל ברוטור, וההפסדים המכניים זניחים.

- א. חשב את הזרם הנקוב.
- ב. חשב את מהירות הרוטור.
- ג. חשב את הפסדי הנחושת ברוטור.
- ד. חשב את הפסדי הברזל בסטטור.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi * \eta} = \frac{75 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.9 * 0.905} = 97.82 A$$

ב.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{2} = 1500 rpm$$

$$n_2 = n_1 * (1 - s_n) = 1500 * (1 - 0.027) = 1460 rpm$$

ג.

כיוון שההפסדים המכניים ואחרים זניחים לכן-

$$P_{mec} = P_2 = 75HP$$

$$P_{em} = \frac{P_{mec}}{1-s} = \frac{75 * 736}{1-0.027} = 56.732 Kw$$

$$\Delta P_{cu2} = s * P_{em} = 0.027 * 56.732 * 10^3 = 1.532 Kw$$

ד.

$$\Delta P_{cu1} = 3 * I_{ph}^2 * R_{1ph} = 3 * 97.82^2 * 72 * 10^{-3} = 2.067 Kw$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{75 * 736}{0.905} = 60.995 Kw$$

$$\Delta P_{fe} = P_1 - P_{em} - \Delta P_{cu1} = (60.995 - 56.732 - 2.067) * 10^3 = 2.196 Kw$$

### נצילות במנוע

הנצילות במנוע היא היחס בין הספק המופק (יציאה) לבין ההספק המושקע (כניסה).

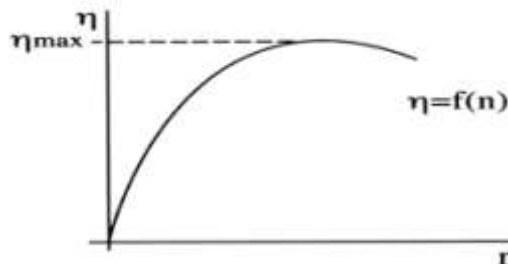
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

### נצילות מרבית במנוע:

לנצילות ערך מרבי כאשר ההפסדים המשתנים (הפסדי הנחושת השונים) שווים בערכם להפסדים הקבועים (הפסדי הברזל השונים)-

$$\sum \Delta P_{cu} = \sum \Delta P_{fe}$$

### אופיין הנצילות:



### מומנטים במנוע

א. מומנט מתפתח בעבודה מכאנית כתוצאה של הפעלת כוח על נקודה הנמצאת במרחק מסוים מציר התנועה. המומנט הנקוב (נומינאלי) המסומן  $M_n$  הוא המומנט המתפתח על ציר העוגן. למומנט 2 יחידות חישוב האחת  $[Nm]$  והשנייה  $[kgm]$ . ביחידות  $kgm$  נהוג להשתמש במומנט המתפתח תוך כדי פעולה מכאנית כמו מומנט המתפתח על ציר העוגן המסתובב של המנוע. וביחידות  $Nm$  נהוג להשתמש כאשר המומנט הנתון כשווה ערך חשמלי לערכו המכאני כמו מומנט הכניסה למנוע. היחס המספרי בין היחידות הוא:  $1kg = 9.81N$  ולכן:

$$1[kgm] = 9.81[Nm]$$

את המומנט הנקוב (נומינאלי) ניתן לחשב לפי-

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$$

$$\omega_n = 2 * \pi * f = \frac{2 * \pi * n_2}{60}$$

$$M_n = \frac{P_n}{\frac{2 * \pi * n_2}{60}} = \frac{60 * P_n}{2 * \pi * n_2} = \frac{9.55 * P_n}{n_2}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

ב. המומנט האלקטרומגנטי המסומן  $M_{em}$  הוא המומנט אותו מוסר הסטטור לעוגן. ולכן בנוסחאות החישוב שלו יש להציב את מהירות השדה המסתובב של הסטטור  $n_1$ . את המומנט האלקטרומגנטי ניתן לחשב לפי-

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1}$$

$$\omega_1 = \frac{2 * \pi * n_1}{60}$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n_1}$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * 3 * U_{1ph}^2 * \frac{R_2'}{s}}{n_1 * \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)' \right]}$$

ג. מומנט ההתנעה מסומן  $M_{st}$  והוא המומנט המפתח במנוע מיד עם תהליך ההתנעה וערכו נתון על ידי היצרן כגודל יחסי למומנט הנקוב-  $\frac{M_{st}}{M_n} > 1$ .

ד. מומנט מקסימאלי מסומן  $M_{max}$  והוא המומנט המקסימאלי המנוע יכול לפתח וזה קורה כאשר החליקה נמצאת בנקודה הקריטית שלה ולכן במצב זה המומנט המקסימאלי שווה למומנט הקריטי המסומן ב-  $M_k$ :

$$M_{max} = M_k$$

### תרגיל דוגמא:

על שלט מנוע השראה רשומים הפרטים הבאים:

25 HP ; 400V (Y) ; 50Hz ; 692rpm ; 35A

המנוע צורך 20.8Kw כאשר הוא עובד בעומס מלא.

א. חשב את החליקה.

ב. חשב את מקדם ההספק.

ג. חשב את המומנט.

ד. חשב את הנצילות.

### פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$n_2 = 692rpm \Rightarrow n_1 = 750 rpm$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{750 - 692}{750} = 0.0773$$

ב.

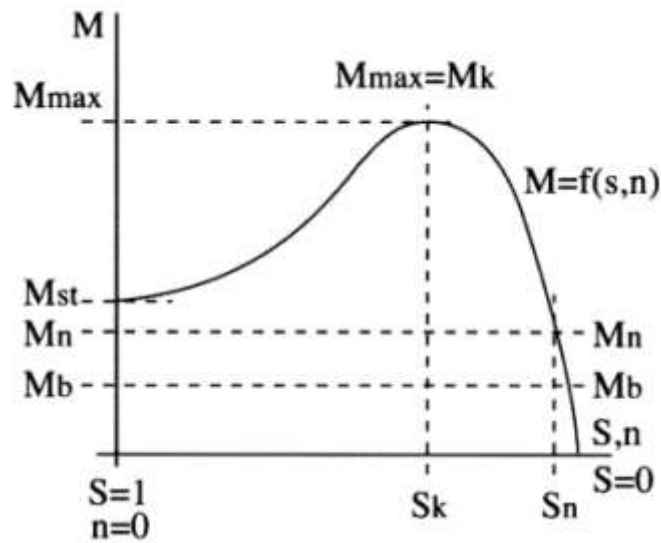
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_n * I_1} = \frac{20.8 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 35} = 0.858$$

ג.

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_2} = \frac{9.55 * 25 * 736}{692} = 254.931 Nm$$

ד.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{25 * 736}{20.8 * 10^3} = 0.8846 = 88.46\%$$



כאשר:

$M_n$  - מומנט נקוב של המנוע.

$M_{st}$  - מומנט התנעה של המנוע.

$M_b$  - מומנט הנצרך ע"י המכונה המחוברת לציר העוגן במנוע.

$M_k$  - מומנט קריטי גודלו כגודל המומנט המירבי  $M_{max}$ .

$S_n$  - חליקה נקובה של המנוע.

$S_k$  - חליקה קריטית.

#### חליקה קריטית

כאשר מעמיסים מנוע בעומס נקוב המומנט המתפתח על ציר העוגן הוא מומנט נקוב והחליקה הקיימת היא חליקה נקובה.

כאשר מעמיסים את המנוע מעבר לעומס הנקוב מהירות סיבוב העוגן קטנה וכתוצאה מכך החליקה גדלה.

המנוע מגיב על העמסת יתר בפיתוח מומנט גדול יותר. הגדילה במומנט נפסקת כאשר המומנט המתפתח יגיע לערכו המרבי, ובנקודה זו החליקה מגיעה לערכה הקריטית. במידה והגידול בעומס ימשיך, מהירות סיבובו תמשיך ותורד והחליקה תגדל מעבר לערכה הקריטית. במצב זה המנוע לא יוכל יותר להגיב בהעלאת המומנט (כפי שקרה עוד בטרם הגיעה החליקה לערכה הקריטית), והתוצאה תתבטא בכך שהמנוע לא יוכל להמשיך להניע את העומס המכאני המחובר אליו עד כדי עצירת המנוע ושרפת סליליו. החליקה הקריטית מסומנת ב-  $s_k$  וניתן לחשבה לפי-

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2 0')^2}}$$

כיוון שהתנגדות האומית של  $R_1$  בסטור זניחה במצב זה לכן-

$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_2 0'}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

ומכאן ניתן להגדיר את המומנט הקריטי לפי-

$$M_k = \frac{9.55 * 3 * U_{1ph}^2}{2 * n_1 * (X_1 + X_{20}')}$$

ניתן גם לחשב את  $s_k$  באמצעות המומנטים לפי-

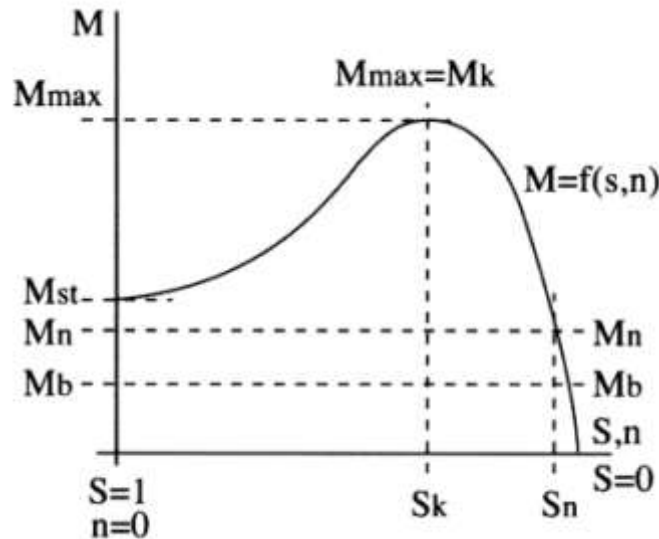
$$s_k = \frac{M_k * s_n}{M_n} * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[ \frac{1}{\left(\frac{M_k}{M_n}\right)^2} \right]} \right\}$$

### עקומת המומנט

לחישוב גודל מומנט בחליקה כלשהי יש להשתמש בנוסחת "קלאוס"-

$$M_b = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

יש לזכור כי  $M_k = M_{max}$



לצורך בניית עקומת המומנט במנוע מסוים יש לערוך טבלה שאת המומנט המשתנה מחשבים לפי נוסחת "קלאוס".

### תרגיל דוגמא:

על שלט של מנוע השראה תלת פאזי רשומים הנתונים הבאים:

$$U_n = 380V ; P_n = 90Kw ; I_n = 165A ; \cos \varphi_n = 0.86 ; s_n = 2.5\% ;$$

$$f = 50Hz ; p = 2 ; s_k = 0.16$$

ההפסדים המכניים זניחים.

- א. חשב את המהירות הנקובה של המנוע ואת תדירות זרמי הרוטור במהירות זו.
- ב. חשב את נצילות המנוע בתנאים הנקובים.
- ג. חשב את הפסדי הנחושת ברוטור כאשר המנוע עובד בחליקה של 2%.
- ד. חשב את הפסדי הסטטור (נחושת+ברזל יחד) בעומס נקוב.

א.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

$$n_2 = n_1 * (1 - s_n) = 1500 * (1 - 0.025) = 1463 \text{ rpm}$$

$$f_2 = f_1 * s = 50 * 0.025 = 1.25 \text{ Hz}$$

ב.

$$P_1 = \sqrt{3} * U_n * I_n * \cos \varphi_n = \sqrt{3} * 380 * 165 * 0.86 = 93.396 \text{ Kw}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{90}{93.396} = 0.9636 = 96.36\%$$

ג.

$$P_{mec} = P_2 = 90 \text{ Kw}$$

$$P_{em} = \frac{P_{mec}}{1 - s} = \frac{90 * 10^3}{1 - 0.025} = 92.308 \text{ Kw}$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n_1} = \frac{9.55 * 92.308 * 10^3}{1500} = 587.694 \text{ Nm}$$

$$M_{em} = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \Rightarrow M_k = \frac{M_{em}}{2} * \left( \frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} \right) = \frac{587.694}{2} * \left( \frac{0.16}{0.025} + \frac{0.025}{0.16} \right) = 1926.53 \text{ Nm}$$

חישוב המומנט האלקטרומגנטי עבור חליקה של 2%

$$M_{em(2\%)} = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} = \frac{2 * 1926.53}{\frac{0.16}{0.02} + \frac{0.02}{0.16}} = 474.223 \text{ Nm}$$

$$P_{em(2\%)} = \frac{M_{em(2\%)} * n_1}{9.55} = \frac{474.223 * 1500}{9.55} = 74.485 \text{ Kw}$$

$$\Delta P_{cu2(2\%)} = s * P_{em(2\%)} = 0.02 * 74.485 * 10^3 = 1.49 \text{ Kw}$$

ד.

$$\Delta P_{cu1} + \Delta P_{fe} = P_1 - P_{em} = (93.396 - 92.308) * 10^3 = 1.088 \text{ Kw}$$

תרגיל דוגמא לבניית עקומת המומנט

למנוע אסינכרוני הנתונים הנומינאליים הבאים:

368Kw ; 380/220V ; 50Hz ; 2955rpm

החליקה הקריטית היא 8%.

א. חשב את המומנט ואת החליקה של המנוע בעבודה נומינאלית.

ב. שרטט את עקומת המומנט (אופיין המכני) של המנוע באמצעות הטבלה הבאה:

s	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.08	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0
M						3285					

בטבלה מתוארים שינויי המומנט בתלות בחליקה בתנאי שליופי הסטטור מחוברים במשולש למתח שלוב 220V.

ג. כיצד ישתנו המומנטים הרשומים בטבלה אם הסטטור יחובר:

1. בכוכב למתח שלוב 380V.

2. בכוכב למתח שלוב 220V.

ד. פי כמה מותר להגדיל את מומנט העומס על ציר המנוע ביחס למומנט הנומינאלי כך

שהמנוע יישאר במשטר עבודה יציב? ובמומנט זה, מה הספק העומס?

א.

$$n_2 = 2955 \text{rpm} \Rightarrow n_1 = 3000 \text{rpm}$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{3000 - 2955}{3000} = 0.015$$

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_2} = \frac{9.55 * 368 * 10^3}{2955} = 1190 \text{ Nm}$$

ב.

$$M_k = \frac{M_n}{2} * \left( \frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k} \right) = \frac{1190}{2} * \left( \frac{0.08}{0.015} + \frac{0.015}{0.08} \right) = 3285 \text{ Nm}$$

$$M_1 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_1} + \frac{s_1}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.01} + \frac{0.01}{0.08}} = 809 \text{ Nm}$$

$$M_2 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_2} + \frac{s_2}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.02} + \frac{0.02}{0.08}} = 1546 \text{ Nm}$$

$$M_3 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_3} + \frac{s_3}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.04} + \frac{0.04}{0.08}} = 2628 \text{ Nm}$$

$$M_4 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_4} + \frac{s_4}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.06} + \frac{0.06}{0.08}} = 3154 \text{ Nm}$$

$$M_5 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_5} + \frac{s_5}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.07} + \frac{0.07}{0.08}} = 3256 \text{ Nm}$$

$$M_6 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_6} + \frac{s_6}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.08} + \frac{0.08}{0.08}} = 3285 \text{ Nm}$$

$$M_7 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_7} + \frac{s_7}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.1} + \frac{0.1}{0.08}} = 3205 \text{ Nm}$$

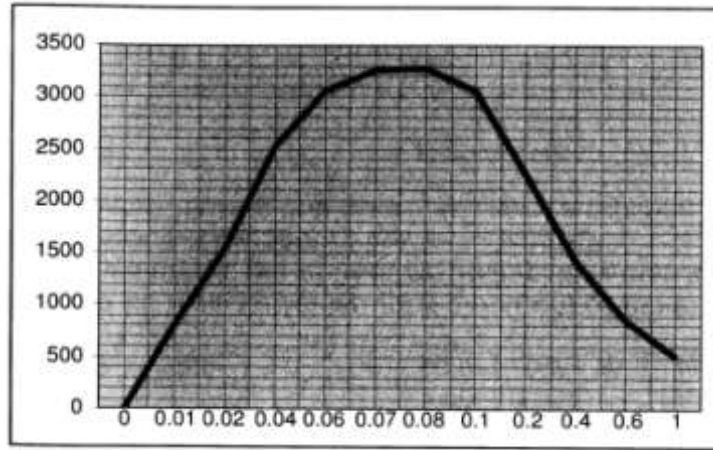
$$M_8 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_8} + \frac{s_8}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.2} + \frac{0.2}{0.08}} = 2266 \text{ Nm}$$

$$M_9 = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_9} + \frac{s_9}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{0.4} + \frac{0.4}{0.08}} = 1263 \text{ Nm}$$

$$M_{10} = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_{10}} + \frac{s_{10}}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.6}{0.01} + \frac{0.01}{0.6}} = 861 \text{ Nm}$$

$$M_{11} = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_{11}} + \frac{s_{11}}{s_k}} = \frac{2 * 3285}{\frac{0.08}{1} + \frac{1}{0.08}} = 522 \text{ Nm}$$

לפי האופיין נבנה את האופיין:



ג.

כאשר הסטטור מחובר בכוכב למתח שלוב של 380V :

$$U_{ph\gamma} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V$$

ניתן לראות כי אין שינויי במתח בחיבור מסוג זה לכן גם אין שינויי בערכי המומנטים.

כאשר הסטטור מחובר בכוכב למתח שלוב של 220V :

$$U_{ph\gamma} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$$

ניתן לראות כי בחיבור זה יש שינויי במתח, וכיוון שיחס המומנטים שווה ליחס הריבועי של המתחים הפאזיים לפי הביטוי הבא-

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \Rightarrow M_2 = \frac{M_1}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{M_1}{\left(\frac{U_1}{220/\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{M_1}{3}$$

ז"א שהערכי המומנטים בטבלה בצורת חיבור זו ובמתח זה, יקטנו פי-3.

ד.

המומנט המקסימאלי היציב של המנוע הוא המומנט הקריטי לכן ניתן לחשב את היחס בין המומנט הקריטי למומנט הנומינאלי-

$$\frac{M_k}{M_n} = \frac{3285}{1190} = 2.76$$

ז"א שניתן להגדיל את מומנט העומס פי 2.76 ועדין המנוע יישאר בתחום העבודה היציב שלו.

$$n_k = n_1 * (1 - s_k) = 3000 * (1 - 0.08) = 2760 \text{ rpm}$$

$$P_k = \frac{M_k * n_k}{9.55} = \frac{3285 * 2760}{9.55} = 949.382 \text{ Kw}$$



**זרמי התנעה במנוע- $I_{st}$**

הזרם אותו צורך מנוע השראה אסיכרוני בזמן ההתנעה גדול פי 4-8 בערך מצריכת הזרם הנקוב שלו. זרם ההתנעה מהווה עומס רב מאוד על הרשת. לכן ועל פי "אמות המידה" של חברת חשמל במנועים בעלי הספק הגדול מ-4H.P יש דרישה להקטין את זרם ההתנעה של המנוע. הקטנת זרם ההתנעה אפשרי ב-2 דרכים:  
א. הקטנת הזרם הנמסר לסלילי הסטטור וזאת באמצעות השיטות הבאות:  
1. שימוש במתנע כוכב משולש.  
2. חיבור המנוע דרך שנאי עצמי.  
3. שימוש במתנע רך.

ב. הגדלת התנגדותם האומית של סלילי או מוטות העוגן בעת ההנעה, ובגמר ההנעה החזרתם להתנגדותם הנקובה. שיטה זו אפשרית במנועים בעלי עוגנים מסוג:  
1. כלוב כפול.  
2. חריצים עמוקים.  
3. עוגן מלופף.

**שיטות ההתנעה:**

**התנעה בשיטת כוכב משולש**

עיקרון ההתנעה בשיטה זו מבוסס על חיבור במבנה כוכב של סלילי הסטטור עם תחילת ההתנעה, ולאחר שהעוגן מפתח כ-70% מהמהירות הסיבוב הנקובה שלו משנים את החיבור סלילי הסטטור למבנה משולש.

התנאי לכך הוא שהמנוע יהיה מתאים לכך הן מבחינת אפשריות החיבור והן מבחינת התאמת הסלילים לעבודה בחיבור משולש. חיבור סלילי הסטטור מיד עם תחילת ההתנעה במבנה כוכב תגרום שהזרם בסלילי הסטטור יהיה קטן מהזרם לו חובר ישירות לקו. ומכיוון שהמתח בהתנעה הוא בחיבור כוכב לכן-

$$U_{ph} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

והזרם בחיבור כוכב הוא-

$$I_{L\gamma} = \frac{I_{L\Delta}}{3}$$

המשמעות היא שזרם ההתנעה קטן פי 3. החיסרון בשיטה זו שבעת התנעת המנוע במצב כוכב קיימת הקטנה במומנט. גודלו של המומנט בעת ההתנעה תלוי ב-2 גורמים:  
1. הקטנת המומנט לפי יחס ההקטנה של המתח בריבוע לסלילי הסטטור לפי-

$$M_{st\gamma} = M_{st\Delta} * \left(\frac{U_{ph\gamma}}{U_{ph\Delta}}\right)^2 = \frac{M_{st\Delta}}{3}$$

2. גודלו של המומנט בהתנעה המתפתח במנוע בעת ההתנעה הוא פי 1.8-2.4 מגודלו של המומנט הנקוב של המנוע.

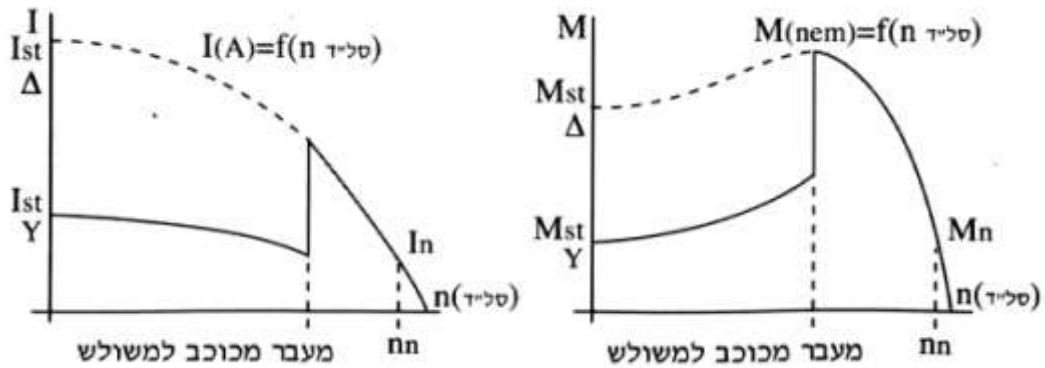
לכן יש לקחת בחשבון את 2 הגורמים הנ"ל בבחירת מנוע להנעת מכונת עבודה.

**דוגמא:**

למכונת עבודה כלשהי דרוש מומנט של 10 Kgm חשב את המומנט הנקוב של המנוע הדרוש אם ידוע שמומנט ההתנעה הוא פי 2 מהמומנט הנקוב, וכן אם משתמשים לצורך התנעת המנוע במתנע "כוכב-משולש".

$$M_b = \frac{2 * M_n}{3} \Rightarrow M_n = \frac{3}{2} * M_b = \frac{3}{2} * 10 = 15 Kgm$$

אופייני זרם ומומנט בהתנעת "כוכב-משולש"



התנעה באמצעות שנאי עצמי

בהתנעה בשיטה זו המנוע לא חייב להיות בעל 6 כניסות כמו המנוע בשיטת כוכב משולש. באמצעות השנאי העצמי ניתן למסור למנוע מתח התנעה ב-3 ערכים שונים (או יותר) ובהתאם לכך יהיו גם ערכי הזרם והמומנט. הדבר מהווה יתרון על ההתנעה באמצעות כוכב-משולש כיוון שכאן ערך מתח ההתנעה אינו קבוע ובהתאם לכך יהיו כאמור גם ערכי הזרם והמומנט. חסרונו הגדול הסרבול של מתקן ההנעה מבחינת הציוד והחיבורים.

ואלו הערכים הסטנדרטיים המקובלים במתנע בשיטת שנאי עצמי:  
 50% מהמתח כאשר  $K=2$   
 60% מהמתח כאשר  $K=1.667$   
 80% מהמתח כאשר  $K=1.25$   
 ולכן זרם ההתנעה יחושב לפי הנוסחה-

$$I_{st_{\text{לקו ישיר}}} = K^2 * I_{st_{\text{מנוע}}}$$

המסקנה המתקבלת היא שבהתנעה עם שנאי עצמי המתח לסליל בתחילת ההנעה הוא 50% מערכו הנקוב ולכן הזרם יקטן עד פי 4 מזרם ההתנעה הישיר לקו-

$$I_{st_{\text{מנוע}}} = \frac{I_{st_{\text{לקו ישיר}}}}{2^2} = \frac{I_{st_{\text{לקו ישיר}}}}{4}$$

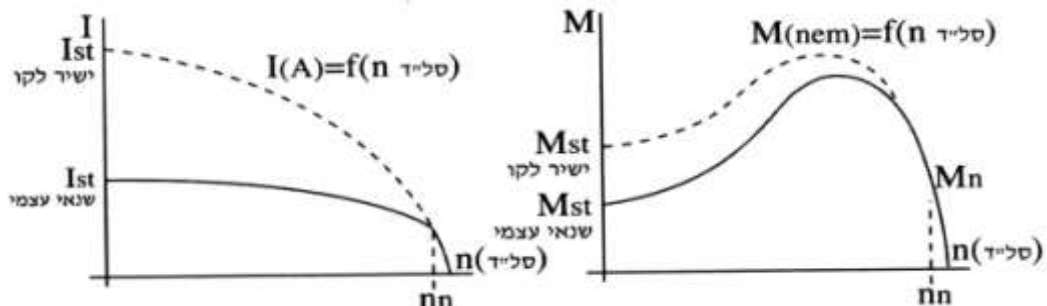
גם המומנט אשר יפתח המנוע בתחילת ההתנעה יקטן לעומת המומנט אשר יתפתח עליו בהתנעה ישירה לקו, מאחר והמתח לסליל ההתנעה קטן מהמתח לסליל בהתנעה ישירה לפי הביטוי:

$$M_{st} = M_{st_n} * \left( \frac{\Delta U * U_{ph_n}}{U_{ph_n}} \right)^2 = M_{st_n} * \Delta U^2$$

דוגמא:

בהתנעת מנוע באמצעות שנאי עצמי ב-60% מהמתח הנקוב ז"א  $K=1.667$ . זרם ההתנעה קטן רק פי 2.779 לעומת פי 3 בהתנעה בכוכב-משולש ביחס להתנעה ישירה לקו, ואילו המומנט קטן רק ב-36% לעומת 33.33% בהתנעה בכוכב משולש ביחס להתנעה ישירה לקו.

אופייני זרם ומומנט בהתנעת "שנאי-עצמי"



לסיכום:

בשימוש במתנע כוכב משולש ובשנאי עצמי קיימת מגרעת בעלת משקל הנובעת מהתפתחות של מומנט התנעה בציר המנוע בערך הקטן מערכו של המומנט התנעה אשר עשוי היה להתפתח לו ההתנעה הייתה ישירה לקו.

הירידה במומנט היא לפי הנוסחה הבאה:

$$M_{st} = M_n * \left(\frac{U_{st}}{U_n}\right)^2$$

את התופעה של הירידה במומנט ההתנעה יש לקחת בחשבון בבחירת המנוע (אם יש כוונה להניעו כאשר העומס מחובר לצירו) כלומר יש לבחור מנוע אשר בעת ההתנעה יתפתח על צירו מומנט הנעה הגדול במעט מהמומנט הנדרש ע"י העומס. זרם ההתנעה המשוקף לסטטור מחושב לפי-

$$I_{2st}' = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_{20}')^2}} = \frac{U_{1ph}}{\sqrt{(R_k)^2 + (X_k)^2}} = \frac{U_{1ph}}{Z_{kph}} = I_{1kph} = \frac{P_k}{U_k * \cos \varphi_k}$$

$$I_{2ph} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}} \Rightarrow I_{2st} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_{st}}\right)^2 + X_{20}^2}}$$

#### התנעה באמצעות מתנע רך

בשימוש במתנע רך מבוצעת ההתנעה באמצעות שינוי רציף בתדר אשר מעבירה למנוע הספק הולך ובבנה בצורה רציפה לצורך ההתנעה תוך כדי פיצוי ע"י שינוי במתח המסופק כדי לשמור על מומנט המנוע בזמן ההתנעה, וכל זאת עד גמר ההתנעה. מתח הולך וגדל באופן רציף עד שמגיע לערכו הנקוב בגמר ההתנעה. זרם ההתנעה מתנהג ביחס הפוך למתח הוא הולך ויורד באופן רציף עד לערכו הנקוב בגמר ההתנעה.

#### עוגנים בעלי מבנה מיוחד לפתרון בעיות ההתנעה

שיטת ההנעה באמצעות כוכב-משולש ושנאי-עצמי אשר הוזכרו לעיל, מספקות פתרון חלקי לבעיות ההתנעה כי באמצעותן אומנם מקטינים את זרם ההתנעה אך גם קטן מומנט ההתנעה. תעשיית המנועים פתחה פיתרון לכך באמצעות בניית עוגנים בעל מבנה מיוחד שחסרונם הוא גודלם וסרבולם.

העיקרון הוא כי במוטות או בסלילים של עוגנים אלו מתפתחת התנגדות אומית גבוהה יחסית בתחילת ההתנעה אשר יורדת בהמשך או באופן אוטומטי בעוגנים מסוימים או באופן ידני בעוגן מסוים אחר.

להתנגדות הגבוהה יותר של מוטות או סלילי העוגן בתחילת ההתנעה ישנן יתרונות אשר מועילות בהתנעת המנוע והן:

1. מקטינה את זרם ההתנעה למנוע.
2. משפרות את גורם ההספק למנוע, בהתאם לגודלה של ההתנגדות של המוטות או סלילי העוגן. דבר זה גורם למומנט התנעה גדול יותר בהתנעה בגודל היחסי למקדם ההספק.
3. בנוסף לגדילתו של המומנט בהתנעה כתוצאה משיפור גורם ההספק, גם העובדה שהמתח שנמסר למנוע בהתנעה הוא המתח הנקוב בעבודתו הסדירה, גורמת למנוע לפתח מומנט התנעה המתקרב מאוד למומנט הנקוב של המנוע. יתרון שאינו מתקבל בהתנעה בכוכב-משולש או בשנאי-עצמי.

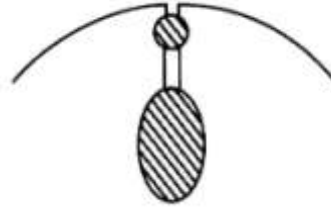
כאמור למנועי השראה האסינכרוניים 2 סוגים עוגנים עיקריים:

1. עוגן כלוב קצר.
2. עוגן מלופף.

בעוד שבעוגן המלוכף ניתן בקלות יחסית לשנות את התנגדות סליליו באמצעות חיבור נגד משתנה בטור להם, אין הדבר כך בעוגן כלוב קצר. ליצירת התנגדויות מוטות העוגן בכלוב קצר קיימות 2 שיטות:

1. יצירת עוגן בעל- כלוב קצר כפול.
2. יצירת עוגן בעל- חריצים עמוקים.

עוגן כלוב כפול



האיור הנ"ל מתאר קטע מתוך היקפו הכולל של העוגן ובו 2 מוטות האחד מעל השני. המוט העליון בעל שטח חתך קטן יותר לעומת שטח החתך של המוט התחתון. טבעות מ-2 צידי העוגן מקצרות בין 2 המוטות. עקב מבנהו הצר יותר של המוט בכלוב העליון, גדולה התנגדותו האומית מאשר התנגדותו של המוט בכלוב התחתון. כאשר דרך המוטות עובר זרם העוגן מתפתח סביבם שדה מגנטי. מסלול השדה המגנטי סביב המוט העליון חשוף יותר לאוויר מאשר הסלול השדה המגנטי סביב המוט התחתון, ולכן נוצר סביבו מיאון מגנטי גדול יותר מזה של התחתון, וזאת לפי הביטוי לחישוב המיאון-

$$R_m = \frac{l}{\mu * A}$$

ומכיון שההשראות היא ביחס הפוך למיאון לפי-

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

מתקבל מכך שההשראות של הכלוב העליון קטנה יותר מההשראות של הכלוב התחתון. מאחר ותדירות הזרם בעוגן משתנה לפי השינוי בחליקה לפי הביטוי-

$$f_2 = f_1 * s$$

ניתן לקבוע כי ההיגב במוטות משתנה ביחס לחליקה לפי הביטוי-

$$X_L = 2\pi * f_2 * L = 2\pi * f_1 * s * L$$

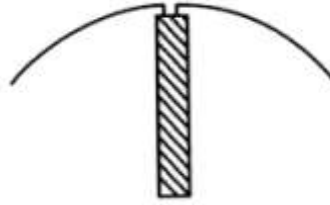
ומכיוון שעכבה היא חיבור ווקטורי בין ההיגב לבין ההתנגדות, לכן ניתן לקבוע כי התופעה המתקבלת כי בתחילת ההתנעה כאשר החליקה היא 1 ותדירות העוגן היא מרבית, כתדירות הרשת, העכבה המתפתחת בכלוב התחתון גדולה יותר בהרבה עקב השראותו הגדולה יותר מאשר העכבה בכלוב העליון, על אף התנגדותו הקטנה מזו שבכלוב העליון. התוצאה היא כי בתחילת ההתנעה עובר דרך הכלוב העליון רובו הגדול של זרם העוגן והוא הכלוב הפעיל.

2 תוצאות חיוביות נגרמות עקב היות הכלוב העליון פעיל:

א. בזכות העכבה הגדולה יחסית בתחילת ההתנעה זרם ההתנעה למנוע קטן יחסית.

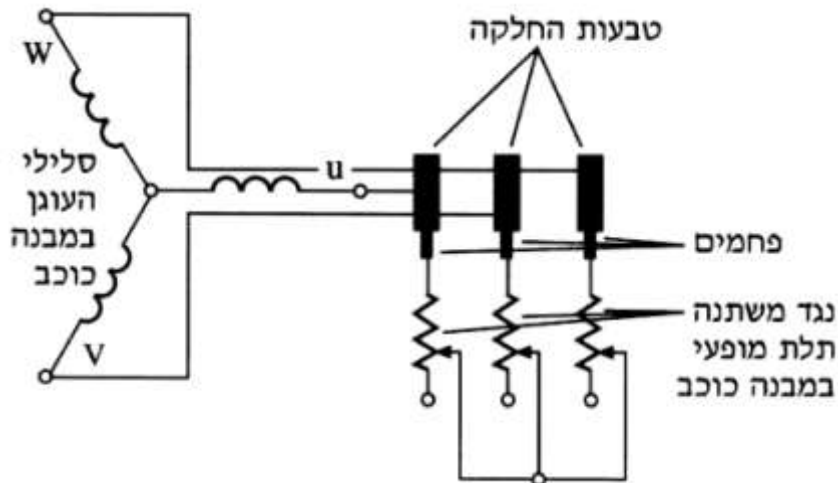
ב. בזכות התנגדותו האומית הגדולה יחסית מתפתח מומנט התנעה גבוה יותר.

עם העלייה במהירות סיבובי העוגן עד כדי המהירות הנקובה, קטנה תדירות זרמי העוגן כתוצאה מהירידה בחליקה ומכאן יורד גם ההיגב במוטות העוגן עד כדי הזנחתם והעכבה של העוגן שווה בערכה בקירוב להתנגדותם האומית. ולכן בעבודה הנקובה של המנוע הכלוב התחתון בעל התנגדות אומית קטנה מהתנגדות האומית של הכלוב העליון ולכן הוא הכלוב הפעיל כי זרם העוגן עובר ברובו בו.

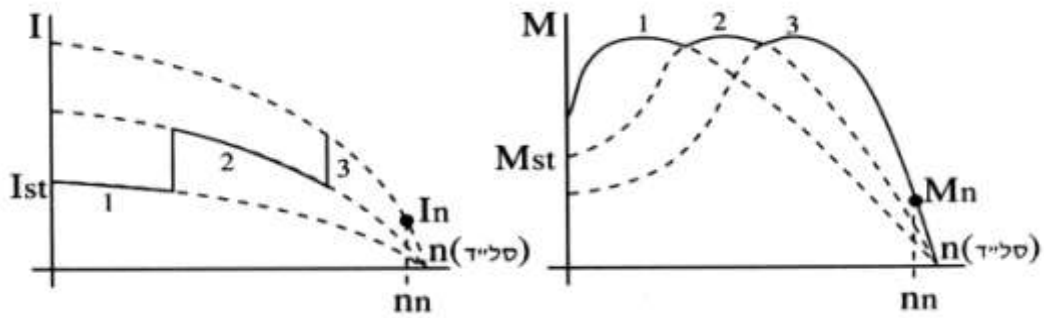


בעוגן בעל חריצים עמוקים קיים כלוב אחד בעל מוטות החודרים לעומק העוגן למתואר באיור הנ"ל. ההשראות המתפתחת במוט אינה זהה בערכה בחלקו העליון של המוט לחלקו התחתון של המוט. מאחר וכך מתפתחים המוט לעומקו היגבים שונים בין חלקו העליון לתחתון. כאשר בתחילת ההתנעה המוט החלק העליון של המוט הוא הפעיל ואילו בסוף ההתנעה חלקו התחתון הוא הפעיל, כך שזרם זרם העוגן בתחילת ההתנעה עובר ברובו בחלקו העליון של המוט וככל שההתנעה מתקרבת לסופה יותר זרם עובר בחלקו התחתון של המוט. למרות הדמיון בין עוגן כלוב כפול לבין עוגן בעל חריצים עמוקים, למנוע בעל כלוב כפול יעילות רבה יותר בהקטנת זרם ההתנעה וביצירת מומנט גדול יותר בהתנעה.

התנעה באמצעות עוגן מלופף



סביב ציר העוגן ובתוך חריצי הפחיות מלופפים 3 סלילים במבנה כוכב. קצותיהם החופשיים מחוברים דרך 3 טבעות החלקה הסובבות יחד עם ציר העוגן והסלילים באמצעות פחמים אל נגד משתנה תלת מופעי המחובר במבנה כוכב אף הוא. תפקיד הנגד המשתנה המופעל ידנית או אוטומטית לשמש תוספת התנגדות אומית להתנגדות הסלילים. בתחילת ההתנעה התנגדותו של הנגד המשנה היא מרבית לצורך הקטנת זרם ההנעה ולפיתוח מומנט התנעה גבוה יחסית. בהמשך לתהליך ההתנעה וככל שמהירות סיבובי העוגן גדלה התנגדותו של הנגד המשתנה הולך וקטן, וכאשר מהירות המנוע מגיע לערכו הנקוב, הנגד המשתנה מקוצר.



**שינוי במהירות סיבובי העוגן במנועים אסינכרוניים**

ויסות מהירות סיבוב הרוטור (עוגן)

כאמור למנועי השראה האסינכרוניים 2 סוגים עיקריים:

א. מנוע בעל עוגן כלוב קצר

ב. מנוע בעל עוגן מלופף

בעוד שמנוע בעל עוגן מלופף ניתן לווסת את מהירותו באמצעות תוספת נגד משתנה טורי לסלילי העוגן אין הדבר כך במנוע בעל עוגן כלוב קצר.

שינוי מהירות במנוע בעל עוגן כלוב קצר

מנוע בעל עוגן כלוב קצר ניתן לשנות את המהירות באמצעות ווסת מהירות שהיא מערכת אלקטרונית המבוססת על שינוי תדר הרשת המסופק למנוע כיוון ש-

$$n_1 = \frac{60 * f}{p}$$

ניתן לראות כי המהירות היא ביחס ישיר לתדר.

עם הפעלת המנוע מתפתח כאמ"מ  $E$  בסלילי המופעים שבסטטור. ערכו של הכאמ"מ תלוי ב-2 גורמים משתנים: תדירות המתח איליו הוא מחובר וגודל השטף המקסימאלי בהתאם לביטוי-

$$E_{1ph} = 4.44 * N_{1ph} * \phi_{max} * f_1$$

כמו כן חייב להתקיים קשר בערכם של 2 הגורמים הללו על מנת שיתקיים קשר בין ערכם של הכאמ"מ ולמתח המקור.

לכן עם שינוי בתדירות המתח הנמסר למנוע על ידי ווסת התדר והשינוי במהירות סיבובי העוגן חייב השטף בסלילי הסטטור להשתנות ביחס הפוך לתדר.

שינוי תדירות הרשת מאפשר לווסת את מהירות המנוע בגבולות רחבים מאוד, אך יחד עם זאת יש צורך לשנות בהתאם את מתח הרשת. לכן על מנת לשמור על מומנט קבוע תוך כדי שינוי המהירות

חייבים לשנות את מתח הרשת ביחס ישיר לשינוי התדירות לפי הביטוי הבא:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1}$$

ובכדי לשמור על הספק מכני קבוע בציר המנוע יש צורך לשנות את המתח לפי:

$$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}}$$

ולכן בווסתי תדר קימת מערכת המפצה את ירידת התדר בעלית המתח על מנת לבטל את ההשפעה של השטף המגנטי על סלילי הסטטור.

כמובן כי ניתן גם לשנות את המהירות ע"י שינוי מס' הקטבים אך דבר זה מוגבל למנועי "דלנדר" וגם זאת ל-2 מהירות בלבד.

שינוי מהירות במנוע בעל עוגן מלופף:

בנוסף לשינוי המהירות באמצעות ווסת מהירות ע"י שינוי תדר כמו במנוע בעל עוגן כלוב קצר, ניתן גם במהלך התנעת מנוע בעל העוגן המלופף לעשות שימוש בנגדים משתנים טורי לסלילי העוגן במטרה לווסת את הזרם לעוגן מתחילת ההתנעה ועד לסיומה. בשימוש בשיטה זו מסיעים להתפתחות מומנט התנעה גדול יחסית עקב התפתחות מקדם הספק משופר למנוע עקב התוספת של התנגדות טהורה למופע בעוגן. מאחר וכך, ניתן להבין כי קיים תאום וביחס הפוך בין גודל ההתנגדות הכוללת לסליל המופע בעוגן לבין מהירות סיבובי העוגן. העובדה היא שבמהירות נמוכה נדרשת התנגדות גבוהה ובמהירות גבוהה נדרשת התנגדות נמוכה. בניצולה של תופעה זו ניתן לשנות את מהירות סיבובי העוגן המלופף ממהירותו הנקובה כאשר הנגד המשתנה מקוצר ועד לכל מהירות קטנה אחרת ככל שהתנגדות הנגד המשתנה עולה. את ההתנגדות הנגד המשתנה  $R_V$  ניתן לחשב לפי ההנחה כי היחס בין החליקות שווה ליחס בין התנגדויות-

$$\frac{s_V}{s_n} = \frac{R_2 + R_V}{R_2}$$

ולאחר פיתוח מתקבלת הנוסחה לחישוב הנגד המשתנה  $-R_V$

$$R_V = R_2 * \left( \frac{s_V}{s_n} - 1 \right)$$

כאשר:

$-R_V$  ההתנגדות הנוספת במעגל העוגן (הנגד המשתנה) אותה יש להוסיף לסלילי העוגן.

$-R_2$  התנגדות סלילי העוגן.

$-s_V$  החליקה במהירות V (הדרושה).

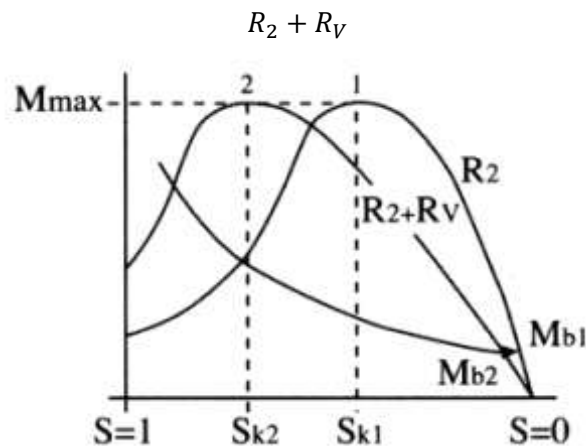
$-s_n$  החליקה הנקובה.

עם השינוי במהירות הסיבוב של העוגן המלופף באמצעות הוספת ההתנגדות  $R_V$ , משתנה גם ערכה של החליקה הקריטית  $S_k$ .

האופיין הבא מתאר 2 עקומות מומנט מומנט במערכת צירים אחת למנוע עם עוגן מלופף.

עקומה מס' 1 מתארת את המומנט המתפתח במנוע כאשר התנגדות לסליל מופע בעוגן היא-  $R_2$  בלבד.

ועקומה מס' 2 מתארת את המומנט המתפתח במנוע כאשר התנגדות לסליל מופע בעוגן היא-



ניתן לראות מהאופיין כי ערכו של המומנט המקסימאלי אינו תלוי בשינוי התנגדויות בעוגן וערכו נשאר קבוע.

ניתן לראות באופיין גם שהמומנט יורד ככל שמהירות הסיבוב עולה.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

כדי לתאם בין פעולת המנוע לפעולת מכונת העבודה בשתי מהירות שונות חייב המנוע לספק את המומנט הדרוש למכונה לכן בחישוב  $R_V$  הדרוש לוויסות המנוע מס' 2 יש לקחת להתחשב ביחס שבין המומנטים המנוע הנקוב של המנוע והמומנט הדרוש למכונת העבודה לפי הנוסחה:

$$R_V = R_2 * \left( \frac{M_n * s_V}{M_V * s_n} - 1 \right)$$

כאשר:

$M_n$ - מומנט נקוב של המנוע בהתנגדות סלילי העוגן בערך  $R_2$  בלבד.

$M_V$ - מומנט הדרוש עבור המכונה במהירות מסוימת כאשר התנגדות סלילי העוגן  $R_2 + R_V$ .

### תרגיל דוגמא 1:

מנוע תלת מופעי בעל עוגן מלופף ובחיבור כוכב של סלילי הסטטור. לעוגן הספק נומינאלי של 65KW כאשר הוא מחובר לרשת בעלת מתח שלוב של 400V. למנוע הנתונים הבאים:  
 $EL_{20} = 200V$ ;  $R_2 = 0.022\Omega$ ;  $R_1 =$  זניח;  $XL_{20} = 0.05\Omega$ ;  $XL_1 = 0.18\Omega$ ;  $n_2 = 690rpm$   
חשב:

- המומנט הנומינאלי של המנוע.
- דרוש להוריד את מהירות העוגן ל- 500rpm וידוע כי במהירות זו עולה המומנט הדרוש למכונת העבודה ל- 1.3 מהמומנט הדרוש לה בעבודה הנומינאלית של המנוע. חשב את התנגדות הנוספת שיש להוסיף לסלילי העוגן כדי שתתקיים דרישה זו.
- חשב את החליקה הקריטית ב-2 המהירויות.
- מה יהיה ערכה של החליקה הקריטית אם נדרש להקטין את מהירות המנוע עוד ועוד.

### פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_2} = \frac{9.55 * 65 * 10^3}{690} = 899.638 Nm$$

ב.

$$n_2 = 690rpm \Rightarrow n_1 = 750 rpm$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{750 - 690}{750} = 0.08$$

$$s_V = \frac{n_1 - n_V}{n_1} = \frac{750 - 500}{750} = 0.333$$

$$M_V = 1.3 * M_n = 1.3 * 899.638 = 1169.53$$

$$R_V = R_2 * \left( \frac{M_n * s_V}{M_V * s_n} - 1 \right) = 0.022 * \left( \frac{899.638 * 0.333}{1169.53 * 0.08} - 1 \right) = 0.0484\Omega$$

ג.

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2}}$$

כיוון שהתנגדות האומית של  $R_1$  בסטטור זניחה (בחליקה הקריטית) לכן-



$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_{20}'} = \frac{R_2 * K^2}{X_1 + X_{20} * K^2}$$

$$K = \frac{UL_1}{EL_{20}} = \frac{400}{200} = 2$$

$$s_{k_n} = \frac{R_2 * K^2}{X_1 + X_{20} * K^2} = \frac{0.022 * 2^2}{0.18 + 0.05 * 2^2} = 0.232$$

$$s_{k_v} = \frac{(R_2 + R_v) * K^2}{X_1 + X_{20} * K^2} = \frac{(0.022 + 0.0484) * 2^2}{0.18 + 0.05 * 2^2} = 0.741$$

ד.

ככל שנקטין את מהירות סיבובי המנוע באמצעות הוספת התנגדות לסלילי העוגן החליקה הקריטית תלך ותגדל.

אך תופעה זו לא תשפיע לעבודתם המשולבת של המנוע והמכונה כיוון שהגידול בחליקה לא יגדיל את המומנט והוא לא יגיע לערכו המרבי כיוון שהקטנת המהירות אינה נובעת מעומס יתר על המנוע.

כמובן שרצוי לדאוג מראש ולבחור מנוע בעל חליקה קריטית כזו הקטנה מאחד למרות שהמנוע מסתובב במהירות קבועה ואיטית מהמהירות הנומינאלית של המנוע.

#### תרגיל דוגמא 2:

נתון מנוע השראה עם רוטור מלופף בעל 5 זוגות קטבים. המנוע מחובר לרשת בתדירות 50Hz. הכא"מ המושרה הפאזי בליפוי הרוטור הוא 180V כאשר המנוע בלום, ו-5.4 V כאשר הרוטור מסתובב במהירות הנומינאלית. ההתנגדות הפאזית של ליפוי הרוטור 0.1Ω והיגבו הפאזי 0.25Ω.

- חשב את מהירות הסינכרונית ואת המהירות הנומינאלית של המנוע.
- מהי עוצמת הזרם ברוטור בהתנעה ישירה ובזמן עבודה נומינאלית.
- מה ניתן לעשות במעגל הרוטור על מנת שברגע חיבור הסטטור לרשת הזרם ברוטור יקטן למחצית מהערך המחושב בסעיף ב', חשב את ערכו של הרכיב הנדרש לצורך כך.

#### פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{5} = 600 \text{ rpm}$$

$$s_n = \frac{E_{2ph}}{E_{20ph}} = \frac{5.4}{180} = 0.03$$

$$n_2 = n_1 * (1 - s_n) = 600 * (1 - 0.03) = 582 \text{ rpm}$$

ב.

בהתנעה s=1 ולכן-

$$I_{2st} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_{st}}\right)^2 + X_{20}^2}} = \frac{180}{\sqrt{\left(\frac{0.1}{1}\right)^2 + 0.25^2}} = 668.5 \text{ A}$$

במהירות נומינלית s=0.03 ולכן-

$$I_{2n} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s_n}\right)^2 + X_{20}^2}} = \frac{180}{\sqrt{\left(\frac{0.1}{0.03}\right)^2 + 0.25^2}} = 53.85 \text{ A}$$

ג.

על מנת להקטין את הזרם בסטטור ניתן לחבר נגדים בטור לסלילי הרוטור בכדי להקטין את זרמי ההתנעה.  
בזמן התנעה  $s=1$  ולכן-

$$I_{2st} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2 + R_V}{s_{st}}\right)^2 + X_{20}^2}} =$$

$$\frac{668.5}{2} = \frac{180}{\sqrt{\left(\frac{0.1 + R_V}{1}\right)^2 + 0.25^2}}$$

$$(0.1 + R_V)^2 + 0.25^2 = \left(\frac{180}{334.25}\right)^2$$

$$R_V = 0.377\Omega$$

תרגיל דוגמא 3:

למנוע השראה תלת מופעי בעל רוטור מלופף הנתונים הנקובים הבאים:

$$U_n = 400V ; P_n = 20Kw ; I_n = 40A ; E_{20} = 288V ; I_{2n} = 24A ; n_n = 1450 rpm ;$$

$$\frac{M_k}{M_n} = 2.7 ; f = 50Hz$$

ניתן להניח כי:

א. הפסדי הברזל ברוטור ההפסדים המכניים והנוספים זניחים.

ב. המנוע עובד בממונט הנקוב שלו.

ג. הרוטור מחובר בכוכב.

ד.  $E_{20}$  הוא המתח המופעי ברוטור פתוח בלום.

חשב:

א. את החליקה הקריטית של המכונה.

ב. את התנגדות סלילי הרוטור למופע.

ג. את הנגדים שיש לחבר למעגל הרוטור כדי לקבל מומנט מרבי בהתנעה.

ד. את הנגדים הנוספים שיש לחבר למעגל הרוטור כדי להוריד את מהירות הסיבוב ל-

750rpm במומנט הנקוב, ואת ההספק המתפזר בהם.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$n_2 = 1450 rpm \Rightarrow n_1 = 1500 rpm$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.0333$$

$$s_k = \frac{M_k * s_n}{M_n} * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[ \frac{1}{\left(\frac{M_k}{M_n}\right)^2} \right]} \right\} = 2.7 * 0.0333 * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[ \frac{1}{2.7^2} \right]} \right\} = 0.1734$$

ב.

$$P_{mech} = P_{em} * (1 - s)$$

$$\Delta P_{cu2} = s * P_{em}$$

$$\Delta P_{cu2} = \frac{s}{1 - s} * P_{mech} = \frac{0.0333}{1 - 0.0333} * 20 * 10^3 = 689W$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

$$R_2 = \frac{\Delta P_{cu2}}{3 * I_{2ph}^2} = \frac{689}{3 * 24^2} = 0.4 \Omega$$

ג.

במומנט מרבי-  $M_{st} = M_k$  ובהתנעה החליקה  $s=1$  ולכן-

$$R_{st} = R_2 * \left( \frac{M_n * s_{st}}{M_{st} * s_n} - 1 \right) = 0.4 * \left( \frac{1}{2.7} * \frac{1}{0.0333} - 1 \right) = 4.05 \Omega$$

ד.

$$s_v = \frac{n_1 - n_v}{n_1} = \frac{1500 - 750}{1500} = 0.5$$

במצב זה  $M_v = M_n$

$$R_v = R_2 * \left( \frac{M_n * s_v}{M_v * s_n} - 1 \right) = 0.4 * \left( 1 * \frac{0.5}{0.0333} - 1 \right) = 5.6 \Omega$$

$$\Delta P_{RV} = 3 * I_2^2 * R_v = 3 * 24^2 * 5.6 = 9.677 Kw$$

### מנועים מיוחדים

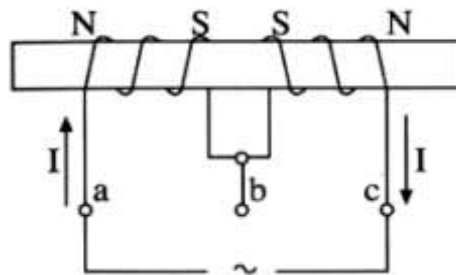
#### מנוע תלת מופעי מסוג "דלנדר"

השיטה מבוססת על שינוי מספר הקטבים המגנטיים לכל מופע בסטטור. כל סליל למופע בסטטור במנוע ה"דלנדר" מחולק ל-2 חצאי סליל וניתן לחבר את 2 חצי הסלילים ב-2 אפשרויות:

- א. חיבור טורי.
- ב. חיבור מקבילי.

#### חיבור טורי:

בחיבור טורי 2 חצאי הסליל מחוברים זה לזה בטור, ומקור המתח מחובר בין הנקודות a ו-b. לפי כלל "יד ימין" ניתן לקבוע את כיוון השטפים המגנטיים בליבת הסליל, היוצרים את הקטבים המגנטיים בשני חצאי הסליל, מתברר כי כאשר קצוות חצאי הסליל הסמוכים זה לזה מתפתחים קטבים מגנטיים דרומיים זהים. וכיוון שקטבים מגנטיים דומים זה את זה נוצר מרווח בין השדות המגנטיים שבין 2 חצאי הסליל. כך שלכל מחצית סליל נוצרים 2 קטבים מגנטיים N ו-S.

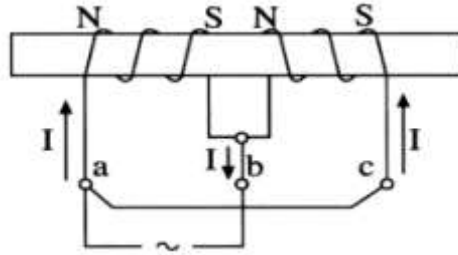


בחיבור טורי של 2 חצאי הסליל מתקבלים 2 זוגות קטבים מגנטיים ולכן מהירות בחיבור טורי תהיה:

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

#### חיבור מקבילי:

בחיבור מקבילי 2 חצאי הסליל מחוברים במקביל זה לזה ומקור המתח מחובר בין הנקודות a ו-b. כאשר הנקודות a ו-c מקוצרות זו לזו. מתברר כי בשני קצוות חצאי הסליל הסמוכים זה לזה נוצרים קטבים מגנטיים שונים זה מזה N ו-S. במקרה כזה מתמזגים השדות המגנטיים זה עם זה ומתקבל זוג אחד של קטבים מגנטיים.



ובחיבור מקבילי של 2 חצאי הסליל מתקבל זוג קטבים אחד ולכן המהירות בחיבור מקבילי תהיה:

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{1} = 3000 \text{ rpm}$$

המשמעות היא שבחיבור טורי התפתחת מהירות הקטנה פי 2 מהמהירות המתפתחת בחיבור המקבילי של 2 חצאי הסליל.

#### מנוע תלת מופעי 2 מהירויות

למנוע זה 2 מערכות סלילים תלת מופעים נפרדות. לכל מערכת סלילים מספר זוגות קטבים שונה מהאחרת, אשר לפיהם נקבעות 2 מהירויות סיבוב שונות של העוגן.

#### מנוע השראה אסינרוני חד מופעי

כמו למנוע התלת פאזי החלק החיצוני הנייח הוא הסטטור, לסטטור במנוע זה סליל מופע אחד בלבד הכרוך סביב ליבת ברזל הממוקמת סביב חלקו העיון הפנימי של חלל הסטטור. החלק המסתובב הוא הרוטור או העוגן אשר בד"כ הוא מסוג עוגן כלוב קצר.

מנועים אלו מיוצרים להספקים נמוכים עקב צריכת הזרם הגבוהה יחסית, הם צורכים זרם הגדול פי 3 לעומת זרם במנוע התלת פאזי באותו הספק.

#### מגבלות המנוע:

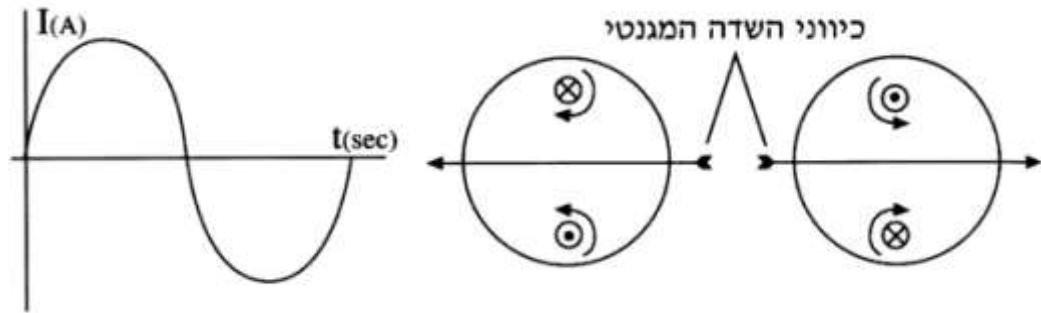
- היותו בנוי להספקים נמוכים.
- מקדם הספק גרוע.
- בעל נצילות נמוכה.

הסיבה לנצילותו הנמוכה של המנוע נעוצה בכך, כי למנוע החד מופעי סליל שדה אחד למופע אחד בלבד, והוא כרוך כולו סביב קטבי הברזל שבהיקפו הפנימי של הסטטור. ולכן שטחם של הקטבים גדולים פי 3 משטחם במנוע התלת מופעי, והתוצאה מכך שעם התפתחות השטף המגנטי בין הקטבים, צפיפותו B התלויה בשטח הקטבים קטנה פי 3 מאשר במנוע התלת מופעי. ובנוסף העובדה כי פעמיים במחזור ערכו של זרם המנוע הוא 0 ומתקבל הגורמים לנצילותו הנמוכה של המנוע החד מופעי.

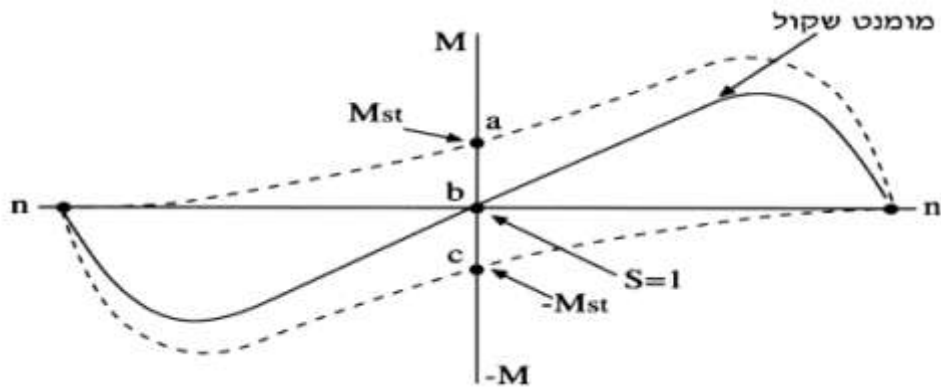
ד. צורך בפיצול מופע השדה המגנטי בסטטור לצורך הנעתו.

#### השדה המגנטי בסטטור:

בניגוד לסטטור של מנוע התלת מופעי שבו השדה המגנטי נע סביב חלל הסטטור בפסיעות של  $60^\circ = \frac{360^\circ}{6}$  כיוון שהוא בנוי מ-3 זוגות קטבים בד"כ ויוצר תנועה סיבובית הגורמת לעוגן להסתובב, במנוע החד פאזי בשל היותו בעל סליל מופע אחד (זוג קטבים אחד) בחלל הסטטור קיים שדה מגנטי אחד, המשנה את מיקומו בפסיעות של  $180^\circ = \frac{360^\circ}{2}$  ובתדירות כפולה מתדירות מקור המתח, כך שבכל פעם שהעוגן נע בכיוון אחד של השדה מופיע מיד השדה שבכיוון הנגדי, והתוצאה הנגרמת בעקבות כך הכוחות המופעלים בחלל הסטטור מבטלים זה את זה כך שלא נוצר מומנט מסתובב בחלל הסטטור וגורם לעוגן לא להסתובב כלל.



אופיין המומנטים:



השטף בכיוונים המנוגדים יוצר מומנטים להתנעה בכיוונים מנוגדים, אשר כל אחד מהם שואף לטוב את העוגן לכיוונו.

באופיין המומנטים ניתן לראות את גודל מומנט ההתנעה הזהה ל-2 הכיוונים בין הנקודות a, b חיובי ובין הנקודות b, c שלילי, ובמרחק של  $180^\circ$  זה מזה, ובנקודה b את המומנט השקול שערכו 0. כך שמומנט ההתנעה אינו מתקיים למעשה עקב העצירה במקום של העוגן בנקודה b אשר היא גם נקודת החליקה המרבית  $S=1$ . וברור שבמצב זה העוגן לא מסתובב כלל.

הדרך ליצירת מומנט סיבובי למנוע חד פאזי:

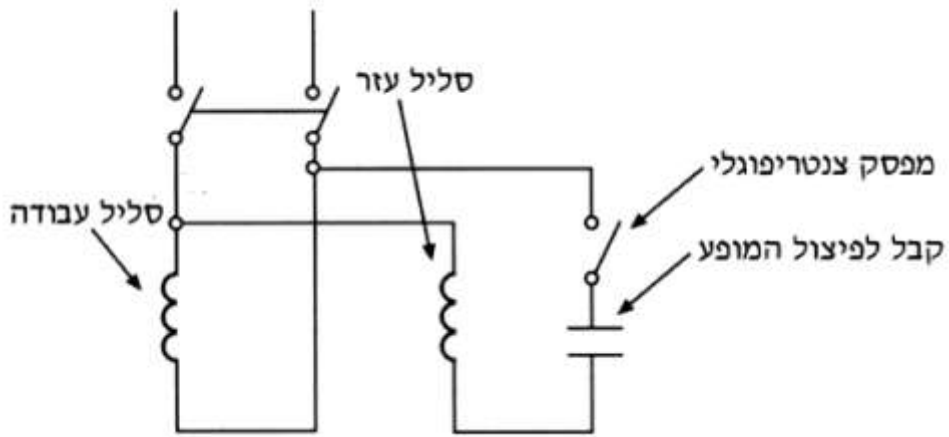
הדרך היא ביצירת שדה מגנטי נוסף בסטטור, הכוונה ליצור פסיעות של  $90^\circ = \frac{360^\circ}{4}$  ובכך ליצור את התנועה הסיבובית של העוגן. הדרך הנפוצה ביותר ליצירת שדה מגנטי נוסף בסטטור היא שימוש בסליל וקבל עזר.

מנוע חד מופעי עם סליל וקבל עזר זהו המנוע היעיל מבין המנועים החד פאזיים. הדרך במנוע זה ליצור מומנט מסתובב בחלל הסטטור מבוסס על הוספת סליל עזר עם קבל ומפסק צנטריפוגאלי בטור לו וזאת בנוסף לסליל העבודה של הסטטור.

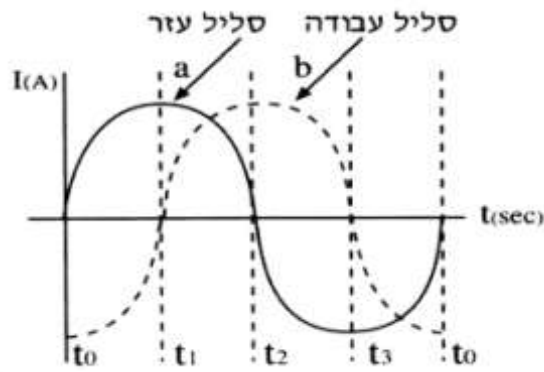
תפקיד הקבל לגרום לשינוי בזווית המופע של הזרם בסליל העזר לעומת זווית המופע של הזרם בסליל העבודה. בדרך זו ניתן להגיע למצב שבו הפסיעות ברווח של  $90^\circ$  בין המומנטים המתפתחים ב-2 הסלילים ולהיווצרות שדה אלקטרו מגנטי מסתובב שיגרום לעוגן להסתובב. עם חיבור המנוע למקור מתח ותחילת ההנעה הזרם שבסליל העבודה והזרם שבסליל העזר מופעים בזמנים שונים כלומר מתקיים בניהם הפרש מופע בסטטור ומתפתחים 2 שדות מגנטיים ובעוגן מתפתח מומנט סיבובי התחלתי.

לאחר זמן קצר כאשר מהירות סיבוב העוגן מגיע לכ-60% ממהירותו הנקובה, מתנתק סליל העזר ע"י פתיחתו של המפסק הצנטריפוגאלי והמנוע ממשיך בעבודתו עם סליל העבודה בלבד, בעזרת כוח התנופה שצבר העוגן בתחילת ההתנעה באמצעות סליל העזר.

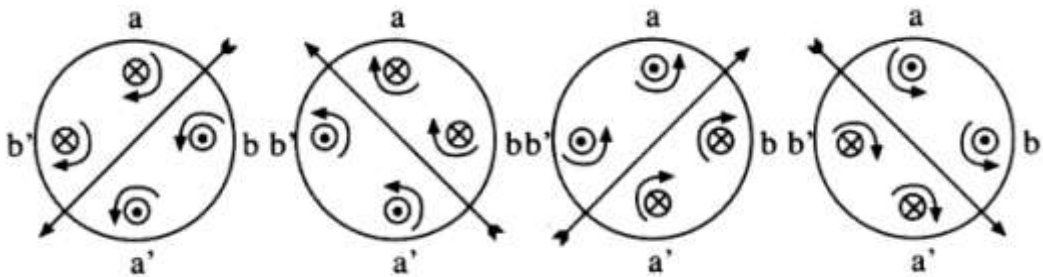
מבנה העקרוני של מנוע:



תאור מופעי הזרם בסלילים בתחילת ההנעה:

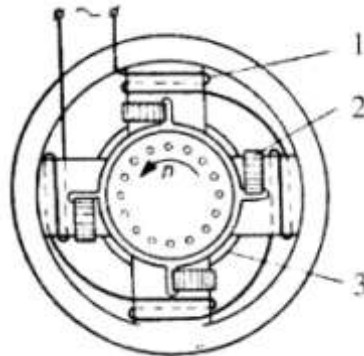


הזרם בסליל העזר a בו נמצא הקבל מקדים את זרם בסליל העבודה b ב- $90^\circ$ .  
ומכאן נוצר בסטטור שדה מגנטי מסתובב כמתואר באיור הבא:



מנוע בעל כריכות-קצר בקטבים.

דרך נוספת ליצירת שדה מגנטי נוסף בעל הפרש מופע מסלילי השדה לצורך התנעת המנוע, הוא בשימוש במנוע בעל קוטבי סטטור מפוצלים בעזרת חריץ שבתוכו הוכנסה כריכה מקוצרת ועל ידי כך הקוטב מחולק ל-2 חלקים, כמתואר באיור הבא:



בסטטור נוצרים 2 שטפים: האחד של סליל הסטטור (המסומן ב-1 באיור), והשני של הכריכה המסתובבת (המסומן ב-2 באיור). בין השטפים הללו קיימים הפרשי מופע, ולכן מופיע שדה מגנטי מסתובב המניע את העוגן. לשיפור מאפייני המנוע ניתן להוסיף מגשרים מגנטיים בין הקטבים (המסומן ב-3 באיור). למנוע זה שימושי בהספקים קטנים מאוד עד כ-100W כיוון שהוא בעל נצילות, מקדם הספק, ומומנט התנעה נמוכים. אך בגלל המבנה הפשוט שלו ואמינותו מחירו זול והוא כאמור שימושי מאוד בהספקים קטנים מאוד.

### פרק 3- מכונות לזרם ישר

#### מבוא

המתקן אשר נחשב למייצר זרם ונקרא "מחולל זרם" הוא למעשה מתקן הגורם להתפתחות מתח חשמלי בין 2 קצוות של סליל המסתובב בתוך שדה אלקטרומגנטי. עם חיבור 2 קצוות הסליל באמצעות גוף המוליך זרם, מתפתח הזרם החשמלי.

קיימים 2 סוגים עיקריים למכונות לזרם ישר:

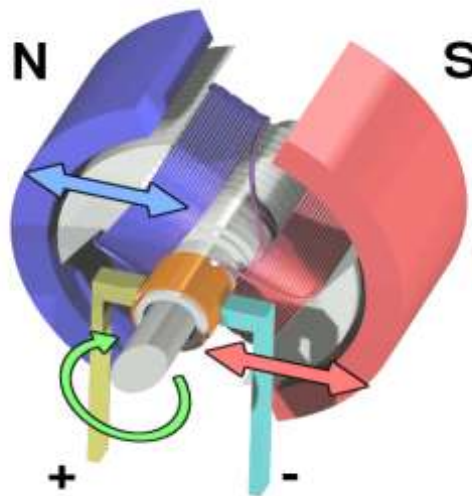
א. מחולל לזרם ישר.

ב. מנוע לזרם ישר.

לשתי המכונות הללו גם יחד אותו גוף מכונה עם אותו התקן מכני.

כאשר המכונה תופעל באמצעות אנרגיה מכאנית חיצונית, היא תופעל כמחולל זרם, ותמיר את האנרגיה המכאנית לאנרגיה חשמלית. כאשר המכונה תופעל באמצעות אנרגיה חשמלית, היא תופעל כמנוע ותמיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכאנית.

#### מבנה המכונה



למכונה לזרם ישר (הן למחולל והן למנוע) 4 מרכיבים עיקריים המאפיינים אותה:

א. סטטור-זהו החלק הנייח שהוא בעצם החלק החיצוני ובתוכו כל חלקי המכונה.

ב. רוטור (עוגן)- החלק המסתובב.

ג. צובר (קולקטור, קומוטטור)-מישר הזרם.

ד. פחמים (מברשות)-משמשות לחיבור חשמלי בין הסטטור לרוטור.

#### הסטטור:

הסטטור כאמור הוא החלק הנייח במכונה, מבנהו עגול חלול ואטום בצידו האחד, ומצידו השני בולט ציר העוגן. סביב הדופן הפנימית של הסטטור מחוברת ליבות הברזל הבנויות מפחיות ברזל המחוברות זו לזו והמבודדות זו מזו. ליבות אלו נקראות גם "רגלי קוטב". סביב צווארי הליבות כרוכים סלילי נחושת הנקראים "סלילי עירור" או "סלילי שדה", דרכם עובר "זרם העירור" הנקרא גם "זרם השדה", שתפקידו לעורר שדה מגנטי, לשם יצירת שטף מגנטי בחלל הסטטור. מקור זרם

העירור תלוי באופן עבודת המכונה:

כמחולל-מקור הזרם מתוך המחולל.

כמנוע-מקור הזרם הוא מקור המתח בכניסת המנוע.

הליבה והסליל הכרוך סביבה מהווים יחד קטבים מגנטיים, כאשר לכל מכונה הסטטור שלה מכיל לפחות זוג קטבים אחד, שאחד מהם דרומי S והשני צפוני N.

במכונות קטנות ניתן להשתמש במגנטים קבועים במקום ליבות הברזל והסלילים, אך לכך יש מגרעות:

א. החלשות השדה המגנטי כתוצאה מהחלשות המגנט הקבוע.

ב. חוסר יכולת לשנות את מהירות סיבוב העוגן (כפי שנלמד בהמשך).



**הרוטור (עוגן):**

- העוגן הוא החלק המסתובב בתוך חלל הסטטור. הוא בנוי מכלוב מתכת המיוצב בגוף המכונה באמצעות מסבים, קצה אחד של הציר הוא בתוך הסטטור והקצה השני יוצא אל מחוץ גוף המכונה. לאורך הציר שבתוך המכונה מושחלות פחיות ברזל משוננות צמודות זו לזו ומבודדות זו מזו. סביב מרכז הפחיות מצויים חורים או חריצים כחלק ממערכת הקירור של המכונה. בתוך החריצים המתקבלים מצירופן של הפחיות המשוננות זו לזו מונחים סלילי העוגן בכמות הדרושה למכונה.
1. בעבודת המכונה כמחולל-מושרה הסלילי העוגן מתח חשמלי המהווה את מקור המתח. גודל המתח המושרה בין קצוות הסליל הוא סכום כל המתחים המושרים של כל סלילי העוגן.
  2. בעבודת המכונה כמנוע-תפקיד הסלילים להוליך דרכם את הזרם ממקור המתח לצורך יצירת הכוח אשר יניע את העוגן מעצם היותם נמצאים בתוך שדה מגנטי בחלל הסטטור.

**הצובר (קולקטור, קומוטטור):**

- בסליל העוגן במחולל מתפתח זרם חילופין ולכן יש לישר אותו. ישור הזרם נעשה באמצעות הצובר, המותקן בקצה ציר העוגן. הצובר בנוי מפלחי נחושת המותקנים זה לצד זה ומבודדים זה מזה, וכולם יחד מחוברים בחיבור יציב סביב ציר העוגן ובקצהו. השיטה ליישור זרם החילופין באיור הבא מתוארת השיטה ליישור זרם חילופין באמצעות הצובר, הזורם בסלילי העוגן. לצורך ההסבר ניתן להסתפק בכריכה אחת ובזוג פלחי צובר אחד. עיקרון היישור זהה לכל כמות של כריכות ופלחי צובר:



כאשר מוליכי הכריכה a-b, c-d מסתובבים בכיוון השעון מול הקטבים המגנטיים הצפוני והדרומי, וחותרים בניצב את קווי השטף המגנטי שבין הקטבים, מושרה מתח בקצוות הכריכה. בהיות הכריכה מחוברת אל מתקן הצורך זרם (RL), דרך זוג פלחי הצובר והפחמים יזרום זרם אשר ינוע במסלול לפי כלל יד-שמאל מהנקודה a אל הנקודה b וממנה לנקודה c ומשם לנקודה d, ומנקודה זו לפחם x וממנו דרך הנגד RL אל הפחם y, וחזרה דרך אותו מסלול עד אשר תיסוב הכריכה את מחצית הסיבוב הבאה כאשר ינוע מוליכי הכריכה מול הקטבים האחרים. הזרם במוליכי הכריכה ינוע באותו כיוון שנע במחצית הסיבוב הקודם אלא שהפעם מסלול הזרם יהיה מ-d ל-c ומשם ל-b ומשם ל-a דרך הפחם x לנגד RL וחזרה לפחם y. לכן כיוון הזרם שסיפק המחולל לעומס RL יהיה תמיד באותו כיוון כלומר זרם ישר.

**הפחמים (מברשות):**

תפקיד הפחמים להוות את החיבור החשמלי למעבר זרם בין הצובר לבין המתקן הניזון מהמחולל, ובמנוע בין מקור המתח לסלילי העוגן שלו. לצורך כך הם חייבים להיות צמודים למקומם ומחליקים על גבי פלחי הנחושת המסתובבים עם העוגן.

החומר ממנו עשויים הפחמים הוא תערובת של פחם עם גרפית, אשר תכונותיו:

- א. הולכת זרם טובה.
- ב. עמידה גבוהה בפני שחיקה.
- ג. אין שינוי התנגדות החומר כתוצאה משינוי טמפרטורה בו.

**המתח המושרה בסלילי העוגן**

בעבודת המכונה הן כמחולל והן כמנוע, חותכים סלילי העוגן תוך כדי תנועתם הסיבובית בחלל הסטטור את השטפים המגנטיים שבין קוטבי הסטטור, ובניצב להם. כתוצאה מכך מושרה בהם מתח הנקרא כ"מ" (כוח אלקטרו מניע). במחולל מהווה מתח מושרה זה את מקור המתח למתקן המוזן ממנו. חישוב המתח המושרה לפי הנוסחה הבאה:

$$E = k_e * \phi * n$$

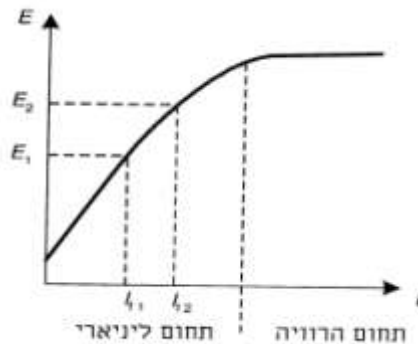
$$k_e = \frac{2 * p * N}{2 * a * 60}$$

כאשר:

- $E$  – כ"מ מושרה ברוטור-  $[V]$ .
- $\phi$  – שטף מגנטי בין זוג קטבים-  $[Wb]$ .
- $k_e$  – קבוע של כ"מ.
- $N$  – מספר המוליכים (כריכות) ברוטור.
- $p$  – מספר זוגות הקטבים.
- $a$  – מספר זוגות ענפים מקביליים בליפוף הרוטור כאשר עבור: ליפוף עניבה פשוט  $p = a$ .
- ליפוף גלי פשוט  $a = 1$ .
- $n$  – מספר סיבובי העוגן במשך דקה אחת  $[rpm]$ .

עירור מכונה- הוא התפתחות של שטפיים מגנטיים בסלילי הסטטור וכתוצאה מכך השראת מתח בסלילי העוגן.

מכיוון שהכ"מ ברוטור המכונה תלוי בשטף המגנטי בין 2 הקטבים ובמהירות הרוטור, ניתן לווסת את כ"מ המכונה ע"י שינוי זרם העירור. הגרף הבא מתאר תלות של הכ"מ בזרם העירור (בתנאי שהמהירות קבועה), והוא נקרא אופיין המגנט:



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

לאופיין 2 תחומים:

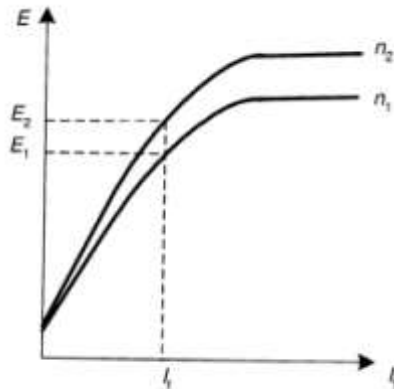
א. התחום הליניארי בזרמי עירור נמוכים קיים יחס ישר בין הכא"מ לזרם העירור לפי הביטוי:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{I_{f2}}{I_{f1}}$$

ב. בתחום הרוויה בזרמי עירור גדולים יותר, כאשר ברזל הקטבים נכנס לרוויה שינוי זרם העירור אינו משפיע על גודל הכא"מ.

כיוון שהכא"מ תלוי גם במהירות הרוטור ניתן לקבל עבור כל מהירות אופיין מגנוט שונה. ובזרם עירור קבוע שינוי בכא"מ גורם לשינוי במהירות באותו יחס לפי הביטוי הבא:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}$$



תרגיל דוגמא:

למחולל לז"י 4 קטבים, מספר המוליכים 300, השטף לקוטב הוא  $0.01Wb$  ומהירות סיבוב העוגן 1200 סל"ד.

חשב את המתח המושרה בעוגן כאשר הליפוף הוא:

א. מסוג עניבה

ב. מסוג גלי פשוט.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. עבור ליפוף עניבה-

$$k_e = \frac{2 * p * N}{2 * a * 60} = \frac{2 * 4 * 300}{2 * 4 * 60} = 5$$

$$E = k_e * \phi * n = 5 * 0.01 * 1200 = 60V$$

ב. עבור ליפוף גלי פשוט-

$$k_e = \frac{2 * p * N}{2 * a * 60} = \frac{2 * 4 * 300}{2 * 1 * 60} = 20$$

$$E = k_e * \phi * n = 20 * 0.01 * 1200 = 240V$$

**סוגי מומנטים**

מומנט הוא כוח הפועל על סלילי העוגן השואף להזיזם בתנועה ישרה, אך מהיותם מחוברים סביב ציר העוגן הם נעים בתנועה סיבובית.

- א. מומנט "מפעיל" - זהו המומנט המפעיל את המכונה, במחולל זהו מומנט חיצוני המסובב את העוגן לצורך חישוב יש להציב את ההספק המכאני הנמסר למחולל  $P_1$ . במנוע המומנט שמתפתח מתוך ההספק החשמלי המזין את המנוע, שלחישוב יש להציב את ההספק החשמלי הנמסר מהרשת למנוע  $P_1$ .
- ב. מומנט "בלימה" (מומנט "מניע")- זהו המומנט המתפתח בציר המכונה כתגובה שוות ערך למומנט הנצרך ע"י המכונה, במחולל זהו המומנט השווה ערך להספק החשמלי הנצרך הרשת לצורך חישוב יש להציב את ההספק היעיל הנמסר לרשת  $P_2$ . במנוע זהו המומנט המתפתח בציר המנוע שהוא שווה ערך למומנט הנמסר לעומס המכאני המחובר למנוע, ולצורך חיוב יש להציב את ההספק היעיל הנמסר לעומס  $P_2$ .
- ג. מומנט אלקטרומגנטי (מומנט "תגובה")- זהו מומנט החשמלי המתפתח בעוגן המכונה. בהזנת הפסדי מומנטים (שנגרמים מהפסדים מכאניים והפסדי ברזל). במחולל הוא למעשה המומנט "המפעיל", והוא המומנט החשמלי המתפתח כתגובה למומנט המכאני המפעיל אותו. ובמנוע הוא למעשה מומנט "בלימה". שהוא המומנט החשמלי המתפתח כתגובה למומנט המכאני הנמסר לציר המנוע. (שוב בהזנת הפסדים).

**חישוב המומנט**

ערכו של המומנט  $M$  ביחידות ניוטון-מטר. שהוא בעצם מכפלה של הכוח  $F$  (ביחידות ניוטון) במרחק  $R$  (ביחידות מטר) מציר הסיבוב של הנקודה עליה מופעל הכוח.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P * 60}{2 * \pi * n}$$

$$M = \frac{9.55 * P}{n}$$

$$M_{em} = K_m * \phi * I_a$$

$$K_m = \frac{N * p}{2 * \pi * a}$$

$$K_m = K_e * \frac{60}{2 * \pi}$$

$$K_e = \frac{p * N}{a * 60}$$

כאשר:

$M$  [Nm] - מומנט.

$P_1$  [W] - הספק.

$\omega$  - מהירות זוויתית  $2\pi n$  או  $2\pi f$   $\left[ \frac{rad}{sec} \right]$

$n$  [rpm] - מהירות סיבוב העוגן.

$M_{em}$  [Nm] - מומנט אלקטרו מכני (מומנט סיבובי).

$K_m$  [W] - קבוע של המומנט האלקטרו מכני.

$p$  [ ] - מספר זוגות קטבים.

$a$  [ ] - מספר זוגות ענפים מקביליים בליפוף הרוטור כאשר:

עבור ליפוף עניבה פשוט-  $p = a$ . עבור ליפוף גלי פשוט-  $a = 1$ .

$K_e$  [ ] - קבוע של הכא"מ.

$N$  [ ] - מספר ליפופים של המוליכים בסליל הרוטור.

המומנט הוא גודל מכאני ולכן נהוג לרשום את ערכו ביחידות מכאניות כמו  $Kgm$ .

יחס המרה בין למומנט ביחידות [Kgm]:

$$M[Kgm] = \frac{M_{em}}{9.81}$$

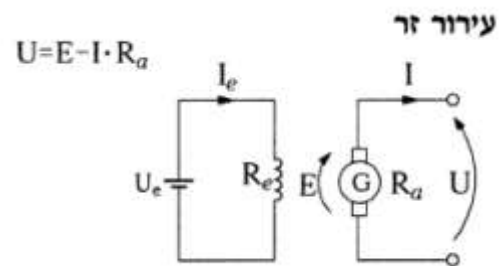
**המכונה בעבודתה כמחולל לזרם ישר**

- קיימים 4 סוגי מחוללים לזרם ישר, הנחלקים בניהם בהתאם לשיטת העירור:
- מחולל בעירור זר.
  - מחולל בעירור מקבילי.
  - מחולל בעירור טורי.
  - מחולל בעירור מעורב (ארוך וקצר).

עירור מכונה- הוא התפתחות של שטפיים מגנטיים בסלילי הסטטור וכתוצאה מכך השראת מתח בסלילי העוגן.

סלילי הסטטור קוראים גם "סלילי שדה" וגם "סלילי העירור" ולכן הסטטור יקרא גם "שדה".

מחולל בעירור זר



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור זר, בו סלילי העירור וסלילי העוגן נפרדים זה מזה, וללא קשר חשמלי (גלווני) בניהם, אלא השראי בלבד. כאשר:

- $-U_e [V]$  מקור מתח זר.
- $-R_e [\Omega]$  התנגדות סלילי העירור.
- $-I_e [A]$  הזרם בסלילי העירור.
- $-E [V]$  מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן.
- $-R_a [\Omega]$  התנגדות סלילי העוגן.
- $-I [A]$  הזרם בסלילי העוגן (במחולל בעל עירור זר הוא גם הזרם בעומס).
- $-U [V]$  המתח בהדקי המכונה.

ניתן להוסיף נגד משתנה  $R_r$  בטור ל-  $R_e$  בכדי לשנות את גודל זרם העירור  $I_e$ , במטרה לשנות את השטף המגנטי בשדה העירור וזאת על מנת לשנות את המתח המושרה  $E$  בכדי לשנות את מהירות סיבוב העוגן. כיוון ש-

$$E = k_e * \phi * n$$

עקרון העירור הזר:

מקור המתח הזר מזרים זרם  $I_e$  דרך סלילי הסטטור שהתנגדותו  $R_e$  הגורם ליצירת שטף מגנטי בין הקטבים בסטטור.

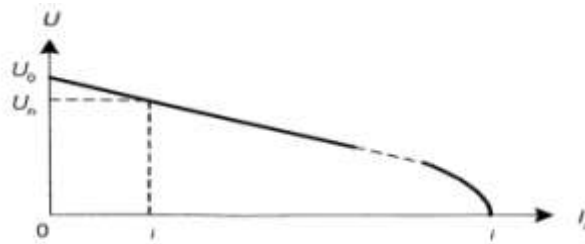
סלילי העוגן המסתובב באמצעות כוח מכני חיצוני בעלי התנגדות  $R_a$  חותכים את בתנועתם הסיבובית את השטף המגנטי שבין הקטבים, ומושרה בהם מתח כאמ"מ  $E$ . כאשר מחברים עומס להדקי המוצא של המחולל, בין הפחמים מתפתח זרם  $I$  אשר זורם מסלילי העוגן דרך הפחמים לעומס. בין הדקי המוצא של המחולל ועל פני העומס מתפתח מתח העומס  $U$ . והוא:

$$U = I * R_L$$

$$U = E - I * R_a$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

כאשר הכא"מ ללא שינוי כיוון שזרם העירור והמהירות ללא שינוי ניתן לתאר את התנהגות הגנרטור באמצעות אופיין העמסה של הגנרטור הבא:



כאשר המחולל בריקים ז"א שלא מחובר אליו עומס לא מתפתח זרם  $I$  ולכן:

$$U_0 = E_0$$

בזרם נקוב  $I_a = I_n$  מתח הגנרטור שווה למתח הנקוב ולכן:

$$U = E - I * R_a$$

בגנרטור מקוצר הזרם מרבי  $I_a = I_k$  אבל המתח שווה ל-0:

$$0 = E - I_{ak} * R_a$$

### אופייני המחולל

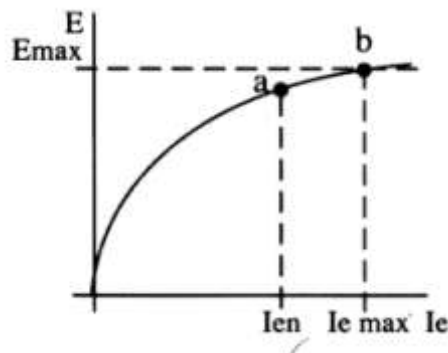
את התנהגות המחולל כמו את התנהגות כל מכונה אחרת ניתן לתאר באמצעות אופייניים הנקראים גם "עקומות המחולל".

למחולל בעירור זר 3 אופייניים שניים פנימיים ואחד חיצוני.

האופייניים הפנימיים- מתארים את עליית המתח המושרה (הכאמ"מ  $E$ ).

האופיין החיצוני מתאר את עליית המתח המוצא  $U$  בתלות בזרם העומס  $I$ .

האופייניים הפנימיים:



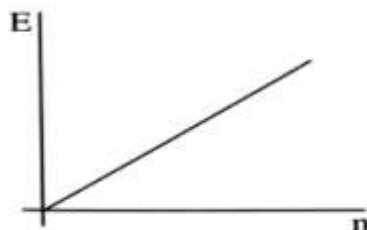
הקו העקום באופיין מתאר את העלייה הלא ליניארית בערכו של הכאמ"מ  $E$  כתוצאה מעלייה בערכו של זרם השדה  $I_e$ . בנקודה  $a$  ערכם של הכאמ"מ וזרם השדה הם נקובים. נקודה  $b$  היא נקודת

הרוויה המגנטית בה מתייצבת גם נקודת העבודה ובה זרם השדה והכאמ"מ בערכם המרבי.

באופן מעשי בכל סוגי המחוללים מתייצבת נקודת העבודה בתחום הרוויה המגנטית, במטרה לשמור

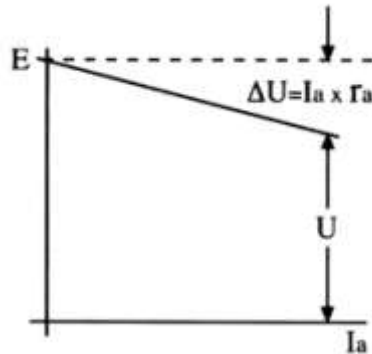
על ערכם הנקוב של הכאמ"מ  $E$  ומתח ההדקים  $U$  במחולל, לבל ישתנו בכל מקרה של שינויים קלים

בזרם השדה  $I_e$ .



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

אופיין זה מתאר את עליית ערך הכאמ"מ בצורה ליניארית עם עליית במהירות סיבובי העוגן, ורק המגבלה המכנית היא המונעת מהכאמ"מ לעלות לערכים גבוהים יותר. האופיין הפנימי:



אופיין זה מתאר את הירידה במתח ההדקים של המחולל  $U$  בתלות גודלו של זרם העוגן  $I_a$ . עם העלייה בזרם העומס שהוא גם זרם העוגן, גדל מפל המתח בסלילי העוגן, וכתוצאה מכך יורד מתח ההדקים, שהוא מתח המוצא  $U$  של המחולל. במקרה כזה יש צורך להגדיל שוב את מתח המוצא ע"י הגדלת המתח המושרה בסלילי העוגן  $E$  וזאת באמצעות הגברת סיבובי העוגן עד למגבלה המכנית, או באמצעות הגדלת זרם העירור  $I_e$  עד לרוויה המגנטית.

תרגיל דוגמא 1:

מחולל בעירור זר מפיק בריקם מתח של  $600V$ , התנגדות העוגן היא  $0.2\Omega$ , העומס ברשת הוא  $150A$ .

חשב בכמה אחוזים יש להגדיל את מהירות הסיבוב של העוגן כדי לקבל בעומס זה מתח השווה למתח הריקם.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

בריקם-

$$U_0 = E_0 = 600V$$

בעומס-

$$E = U + I * R_a = 600 + 150 * 0.2 = 630V$$

כיוון שמהירות המחולל היא ביחס ישיר לכאמ"מ שלו ולכן-

$$E = k_e * \phi * n$$

$$\Delta E_{\%} = \frac{E - E_0}{E} * 100 = \frac{630 - 600}{600} * 100 = 5\%$$

תרגיל דוגמא 2:

גנרטור בעירור נפרד (זר) במהירות  $860rpm$  מספק מתח  $180V$  לצרכן בעל התנגדות  $4.5\Omega$ . חשב את המתח על הדקי הגנרטור במהירות  $640rpm$  אם נתון שהתנגדות העוגן היא  $0.42\Omega$ .

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{180}{4.5} = 40A$$

$$E = U + I * R_a = 180 + 40 * 0.42 = 196.8V$$

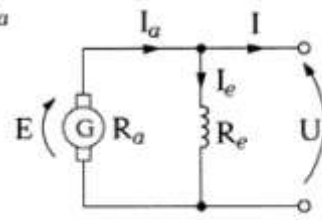
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow E_2 = E_1 * \frac{n_2}{n_1} = 196.8 * \frac{640}{860} = 146.46V$$

$$I = \frac{E_2}{R_L + R_a} = \frac{146.46}{4.5 + 0.42} = 29.77A$$

$$U = I * R_L = 29.77 * 4.5 = 133.96V$$

עירור מקבילי

$$U = E - I_a \cdot R_a$$



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור מקבילי בו סלילי השדה וסלילי העוגן מקבילים זה לזה.

כאשר:

$R_e$  [Ω] - התנגדות סלילי העירור.

$I_e$  [A] - הזרם בסלילי העירור.

$E$  [V] - מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן.

$R_a$  [Ω] - התנגדות סלילי העוגן.

$I_a$  [A] - הזרם בסלילי העוגן.

$I$  [A] - הזרם המוחלל.

$U$  [V] - המתח בהדקי המכונה.

עקרון העירור המקבילי:

במחולל בעירור מקבילי שונה שיטת העירור מזו של המחולל בעירור זר. למחולל זה אין מקור מתח חיצוני הגורם לזרם בסלילי השדה, ליצירת השדה המגנטי הדרוש בין קוטבי השדה.

לכן במחולל זה דרוש כי בין קוטבי השדה יתקיים שדה מגנטי קבוע הנקרא-"שירות מגנטית".

לצורך כך יש להזרים זרם לסלילי השדה ממקור מתח ישר וזר עוד בטרם להפעלה הראשונית של המחולל, במטרה לגרום להתפתחותם של שטפים מגנטיים בין קוטבי השדה.

לאחר פעולת מגנט ראשונית זו וניתוק הזרם לסלילי השדה, יורדת מידת המגנט שהתפתחה בין קוטבי השדה, והשארת הנותרת היא "השירות המגנטית" שעוצמתה מספיקה לעירור חוזר של המחולל בהפעלה לאחר כל הפסקה.

את הכמות המעטה של השטפים המגנטיים חותכים סלילי העוגן מיד עם תחילת הסיבובים, וכתוצאה מכך מתפתח בהם כאמ"מ קטן יחסית לכמ"מ הנקוב.

כאמ"מ קטן זה גורם להתפתחות זרם עוגן  $I_a$  אף הוא קטן יחסית אך מספיק כדי לגרום לכמ"מ

בסלילי העוגן להגדיל את עצמו תוך כדי סיבובי העוגן עד שמגיע לערכו הנקוב.

מתוך כך מובן כי רצוי לעורר את המחולל בעירור מקבילי כאשר הוא עובד בריקם וזאת כדי שזרם העוגן אשר יתפתח, יזרום כולו אל שדה העירור לצורך עירור המחולל, שאם לא כך חלק ניכר מזרם העירור היה זורם לעומס דבר שהיה מעכב את תהליך העירור של המחולל.

לסיכום התנאים לעירור מקבילי הם:

1. קיומה של "שירות מגנטית" בקוטבי השדה.

2. כיוון סיבוב העוגן יהיה כזה שיגביר את "השירות המגנטית" עד לקבלת כאמ"מ נקוב.

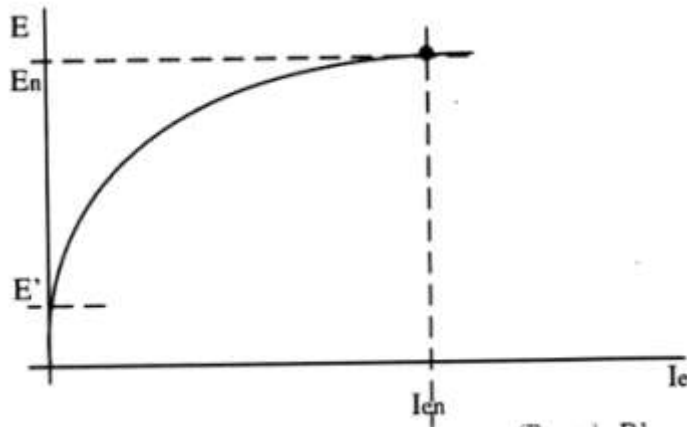
3. התנגדות השדה  $R_e$  חייבת להיות קטנה מהתנגדות הקריטית בתחילת העירור.



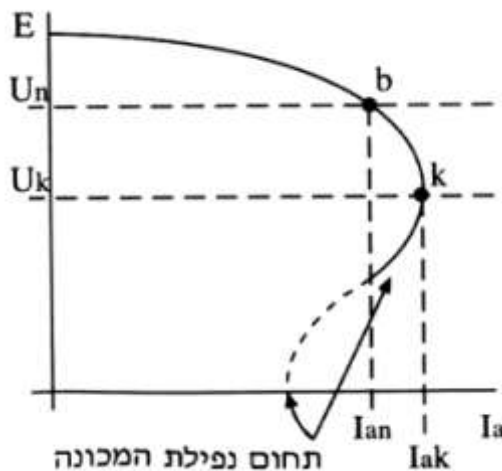
אופייני המחולל:

למחולל זה 2 אופייניים: אופיין פנימי ואופיין חיצוני.

האופיין הפנימי:



אופיין זה המתאר את התלות של התפתחות הכאמ"מ בזרם העירור  $I_e$  ובתנאי שהכאמ"מ התחלתי הוא הכאמ"מ של השיוריות המגנטית  $E'$ , וכאשר הזרם בסליל העירור מגיע לערכו הנקוב גם הכאמ"מ  $E$  מגיע לערכו הנקוב והמחולל מתייצב בנקודת העבודה שלו בתחום הרוויה המגנטית. האופיין החיצוני:



אופיין זה מתאר את התנהגות מתח המוצא  $U$  והשפעתו על שדה העירור המחובר במקביל להדקי המחולל.

בהעמסת יתר של המחולל כאשר יגדל זרם העומס  $I$  ובעקבותיו הזרם  $I_a$ , יקטן מתח ההדקים כיוון

כאשר ימשיך לגדול זרם העוגן ויגיע לגודלו הקריטי  $I_{ak}$  וזאת קורה בנקודה  $k$  באופיין, ימשיך וירד מתח ההדקים אל מתחת למתח הקריטי  $U_k$  שבו ערכו של מתח ההדקים הוא קטן מידי מכדי לאפשר למחולל לתפקד.

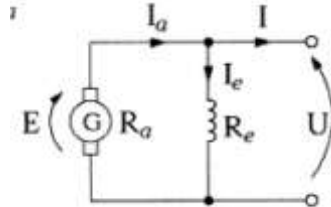
כך שאם צריכת העומס תלך ותגדל מעבר לנקודה  $k$ , תתפתח תגובת שרשרת: מתח ההדקים בנקודה זו  $U_k$  שהוא גם מתח השדה בסטטור הוא קטן וגרום לזרם השדה  $I_e$  להיות קטן מהדרוש, אשר יגרום להקטנת השטף המגנטי בשדה הסטטור, אשר מצידו יקטין את מתח המושרה בסלילי העוגן  $E$ , אשר יגרום להקטנה נוספת של מתח ההדקים. וכך תמשיך תגובת השרשרת עד לירידת מתח ההדקים של המחולל ל-  $0V$ . תופעה זו של ירידת המתח ל-  $0$  נקראת "נפילת המכונה".

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

תרגיל דוגמא:

מחולל לזרם ישר בעירור מקבילי מספק עומס של 150KW במתח הדקים של 500V, התנגדות העוגן  $0.05\Omega$  והתנגדות סלילי השדה  $50\Omega$ .  
חשב את הכאמ"מ.

פתרון תרגיל דוגמא:



$$I = \frac{P}{U} = \frac{150 \cdot 10^3}{500} = 300A$$

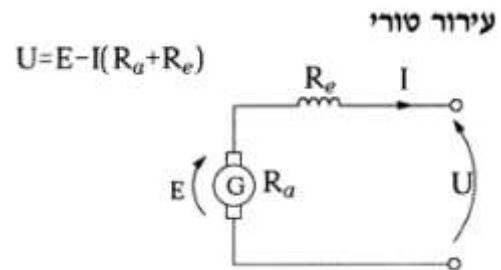
$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{500}{50} = 10A$$

$$I_a = I + I_e = 300 + 10 = 310A$$

$$U = E - I_a \cdot R_a$$

$$E = U + I_a \cdot R_a = 500 + 310 \cdot 0.05 = 515.5V$$

מחולל בעירור טורי



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור טורי בו סלילי השדה וסלילי העוגן טוריים זה לזה.  
כאשר:

$R_e[\Omega]$  - התנגדות סלילי העירור.

$E[V]$  - מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן.

$R_a[\Omega]$  - התנגדות סלילי העוגן.

$I[A]$  - זרם המחולל.

$U[V]$  - המתח בהדקי המכונה.

כאשר:

$$I = I_a = I_e$$

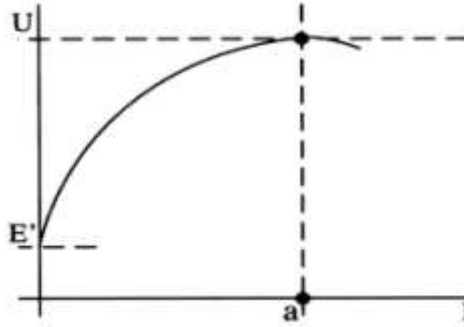
## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

עקרון העירור הטורי:

להתפתחות הכאמ"מ הנקוב של המחולל, דרוש כי יזרום זרם דרך סלילי השדה על מנת להגביר את "השיוריות המגנטית" שבין קטבי השדה. לפי מבנה המחולל בעירור טורי, יתפתח הזרם הדרוש רק עם חיבור עומס במוצא המחולל שלא כמו בעירור מקבילי.

מתוך כך ניתן להבין כי בנוסף לתנאי העירור של מחולל בעירור מקבילי הנדרשים גם למחולל בעירור טורי, יש לקיים תנאי נוסף והוא קיומו של עומס במוצא המחולל, ליצירת מעגל סגור כתנאי להתפתחות זרם.

אופיין המחולל:



באופיין זה מתוארת העלייה במתח המוצא  $U$  של המחולל כל עוד זרם המחולל קטן מגודלו בנקודה  $a$ . מעבר לה השדה המגנטי בסטטור נכנס לתחום הרוויה המגנטית והמחולל מתייצב בתחום עבודה. גדילה נוספת בזרם הנצרך לא תגרום לעלייה בכאמ"מ, אך כן תגרום להגברת מפל המתח בסלילי העוגן הסטטור ולהפחתה במתח ההדקים שבמוצא המחולל.

תופעה זו של שינויים בכאמ"מ  $E$  ובמתח המוצא  $U$  כתוצאה של שינויים בזרם הנצרך, מגבילה מאוד את השימוש במחולל בעל עירור טורי, רק לעומסים בעלי צריכת זרם קבועה. ומסיבה זו מחולל זה הוא פחות שימושי.

תרגיל דוגמא:

נתון מחולל בעל עירור טורי המספק זרם של  $27.5A$ , לעומס שהתנגדותו  $8\Omega$ . התנגדות העוגן  $0.3\Omega$ , והתנגדות השדה  $0.2\Omega$ .

חשב:

- הכאמ"מ.
- מתח ההדקים.
- המתח בשדה.

תרגיל דוגמא:

א.

$$U = I * R_L = 27.5 * 8 = 220V$$

ב.

$$E = U + I * (R_a + R_e) = 220 + 27.5 * (0.3 + 0.2) = 233.75V$$

ג.

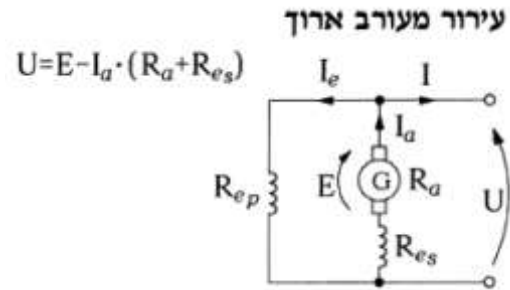
$$U_e = I * R_e = 27.5 * 0.2 = 5.5V$$

יא

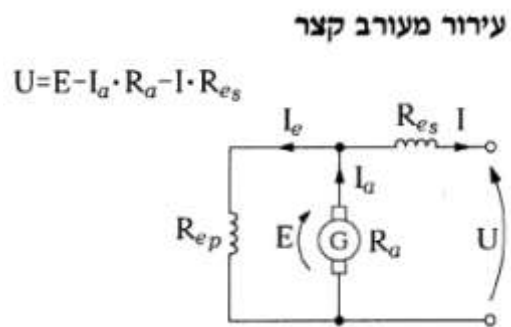
$$U_e = E - U - U_a = E - U - I * R_a = 233.75 - 220 - 27.5 * 0.3 = 5.5V$$

מחולל בעירור מעורב

מחולל בעירור מעורב קיים ב-2 צורות חיבורים:  
א.



ב.



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור מעורב בו קיימים 2-סלילי שדה והם מחוברים הן במקביל והן בטור לסליל העוגן.

כאשר:

- $R_{es}[\Omega]$  - התנגדות סלילי העירור הטורי.
- $R_{ep}[\Omega]$  - התנגדות סלילי העירור המקבילי.
- $E[V]$  - מתח מושרה כ"מ בסלילי העוגן.
- $R_a[\Omega]$  - התנגדות סלילי העוגן.
- $I[A]$  - זרם המחולל.
- $U[V]$  - המתח בהדקי המכונה.

עקרון העירור המעורב:

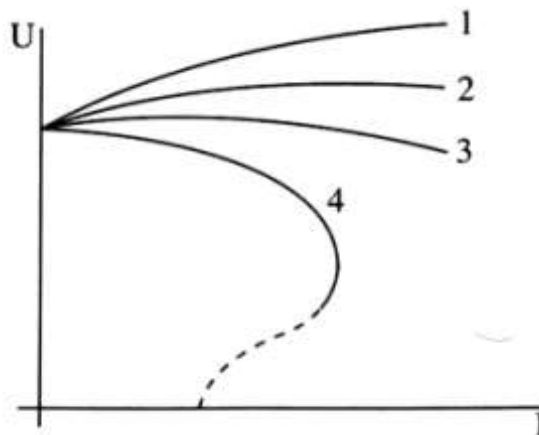
מבנה המחולל בעירור מעורב משלב בתוכו מבנה מחולל בעירור מקבילי ומבנה מחולל בעירור טורי. את השילובים ניתן לבנות ב-2 צורות חיבורים-קצר וארוך. המטרה בשילובים השונים היא יצירת מחולל המאחד את תכונותיהם של המחולל הטורי והמקבילי לניצול טוב יותר של תכונותיהם.

- עירור מעורב קצר:
  - בחיבור זה מחוברים במקביל זה לזה סלילי העוגן  $R_a$  וסלילי העירור המקבילי  $R_{ep}$ , ובטור להם מחובר סליל העירור הטור  $R_{es}$ .
- עירור מעורב ארוך:
  - בחיבור זה מחוברים זה לזה סלילי העוגן  $R_a$  וסלילי העירור הטורי  $R_{es}$ , ולשניהם במקביל מחובר סלילי העירור המקבילי  $R_{ep}$ .

בנוסף לחלוקת המבנה ל-2 צורת חיבורים מחולק המחולל המעורב ל-2 סוגים נוספים:

1. מחולל ב"עירור מעורב מסייע" – שהוא השימוש מביין השניים. במחולל זה סליל העירור הטורי מחובר בקוטביות זהה לסליל העירור המקבילי להגברת השטף בשדה. השימוש בסוג מחולל זה נועד לשמירת מתח במוצא המחולל בגודל קבוע, שאינו משתנה עם שינויים בצריכת זרם העומס שלא כמו במחולל בעירור מקבילי ובמיוחד לא כמו במחולל העירור טורי.
2. מחולל ב"עירור מעורב מתנגד" במחולל זה סליל העירור הטורי מחובר בקוטביות הפוכה לסליל העירור המקבילי להחלשת השטף בשדה. השימוש בסוג מחולל זה נועד בעיקר למטרת ריתוך. במחולל מסוג זה מחליש זרם העומס הגדל עד כי קצר את השטף בסליל העירור המקבילי וכתוצאה מכך קטן הכאמ"מ המתפתח בעוגן במטרה לזווסת את גודל זרם הריתוך לגודל הדרוש.

האופיניים החיצוניים של המחולל:



- באופיין זה מתוארות העקומות של המצבים הבאים:
- עקומה 1- עלייה המתח המוצא בזכות סליל העירור הטורי ב"עירור המעורב המסייע".
  - עקומה 2- הירידה במתח המוצא בזכות סליל העירור המקבילי ב"עירור המעורב המסייע".
  - עקומה 3- מתח המוצא המיוצב.
  - עקומה 4- ירידה במתח המוצא לאיזון הזרם הנצרך ב"עירור המעורב המתנגד".

תרגיל דוגמא:

למחולל בעירור מעורב, התנגדות סליל העוגן  $0.085\Omega$ , התנגדות סליל העירור  $0.065\Omega$  והתנגדות סליל העירור המקבילי  $100\Omega$ . המחולל מזין עומס של  $100A$  ובמתח של  $150V$ .

חשב:

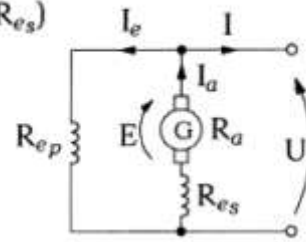
- א. זרם העוגן.
  - ב. המתח המושרה בסליל העוגן.
  - ג. ההספק הנמסר לעומס.
- יש לחשב את 3 הסעיפים גם עבור חיבור ארוך וגם עבור חיבור קצר של המחולל וכמו כן יש להסיק את המסקנות המתקבלות.

פתרון לתרגיל דוגמא:

1. עבור חיבור מעורב ארוך:

עירור מעורב ארוך

$$U = E - I_a \cdot (R_a + R_{es})$$



$$I_e = \frac{U_{Rep}}{R_{ep}} = \frac{U}{R_{ep}} = \frac{150}{100} = 1.5A$$

$$I_a = I + I_e = 100 + 1.5 = 101.5A$$

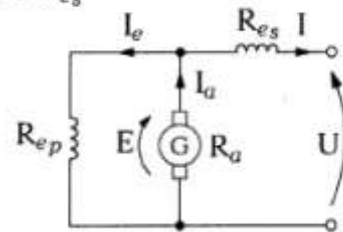
$$E = U + I_a \cdot (R_a + R_{es}) = 150 + 101.5 \cdot (0.085 + 0.065) = 165.225V$$

$$PRL = U \cdot I = 150 \cdot 100 = 15Kw$$

2.

עירור מעורב קצר

$$U = E - I_a \cdot R_a - I \cdot R_{es}$$



$$I_e = \frac{U_{Rep}}{R_{ep}} = \frac{U + U_{Res}}{R_{ep}} = \frac{U + I \cdot R_{es}}{R_{ep}} = \frac{150 + 100 \cdot 0.065}{100} = 1.565A$$

$$I_a = I + I_e = 100 + 1.565 = 101.565\Omega$$

$$E = U + I_a \cdot R_a + I \cdot R_{es} = 150 + 101.565 \cdot 0.085 + 100 + 0.065 = 165.133V$$

$$PRL = U \cdot I = 150 \cdot 100 = 15Kw$$

מסקנות:

- א. מתוך הזהות שבתוצאות ניתן להסיק כי להזנת עומס בתנאים הנקובים אין זה משנה אם המחולל מחובר בחיבור ארוך או קצר.
- ב. השיקול לבחירת סוג המחולל-"מתנגד" או מסייע" הוא בהתאם לסוג העומס.

חיבור מחוללים במקביל

להזנת מתקן הצורך זרם בעוצמה גדולה יותר מהזרם הנקוב של מחולל נתון, ניתן לחבר 2 מחוללים ואף יותר במקביל, אשר יחד יספקו את זרם העומס הנדרש. לבניית רשת מחוללים במקביל דרושים התנאים הבאים:

1. המתחים המושרים (הכאמ"מ)  $E$  בעוגני המחוללים ערכם יהיה זהה.

$$E_1 = E_2$$

במידה ולא, בעבודה בריקם של המחוללים המחוברים במקביל יתפתח זרם במעגל הפנימי של המחוללים ובינם לבין עצמם לפי-

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{a1} + R_{a2}}$$

• בהזנחת זרמי השדות.

2. האופייניים  $U_f(I)$  של המחוללים יהיו זהים או לפחות דומים.

עבור אופיינים זהים- הזרם הנצרך מהמחוללים יתחלק שווה בשווה בניהם.

עבור אופיינים דומים- הזרם הנצרך מהמחוללים לא יתחלק שווה בניהם, ניתן לתקן זאת ע"י שינויי בכאמ"מ של המחוללים שישווה את  $I_e$  שלהם ובכך לגרום לחלוקת זרם העומס בצורה שווה בין המחוללים.

3. חיבור המחוללים צריך להיות בקוטביות זהה למניעת זרמי קצר פנימיים.

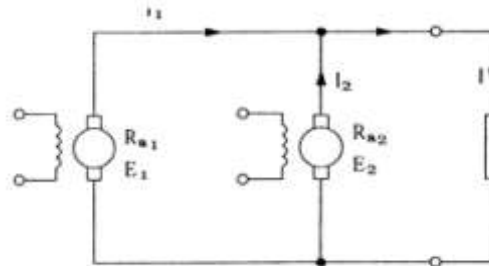
תרגיל דוגמא 1:

2 גנרטורים זהים לזרם ישר בעירור זר פועלים במקביל ומספקים יחד מתח של 230V בהספק של 9.2KW, התנגדות העוגן  $0.8\Omega$ , תנאי העירור זהים, האחד מסתובב במהירות של 860 סל"ד והשני מסתובב במהירות של 903 סל"ד. חשב:

א. הכאמ"מ בכל גנרטור.

ב. חלוקת העומס בין 2 הגנרטורים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:



א.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{9.2 * 10^3}{230} = 40A$$

$$I = I_1 + I_2 ; I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{a1}} ; I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{a2}}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{860}{903} = 0.952$$

$$E_1 = 0.952 * E_2$$

$$I = \frac{E_1 - U}{R_{a1}} + \frac{E_2 - U}{R_{a2}}$$

$$I = \frac{0.952 * E_2 - U}{R_{a1}} + \frac{E_2 - U}{R_{a2}} =$$

קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

$$40 = \frac{0.952 * E_2 - 230}{0.8} + \frac{E_2 - 230}{0.8} =$$

$$40 * 0.8 = 0.952 * E_2 - 230 + E_2 - 230 =$$

$$32 = 1.952 * E_2 + 460 =$$

$$E_2 = \frac{32 + 460}{1.952} = 252V$$

$$E_1 = 0.952 * E_2 = 0.952 * 252 = 240V$$

ב.

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{a1}} = \frac{240 - 230}{0.8} = 12.5A$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{a2}} = \frac{252 - 230}{0.8} = 27.5$$

בדיקה-

$$I = I_1 + I_2 = 12.5 + 27.5 = 40A$$

תרגיל דוגמא 2:

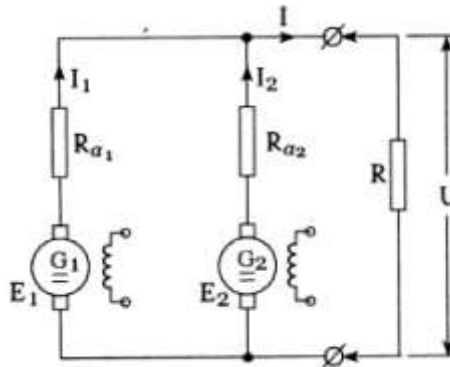
2 מחוללים בעירור זר מחוברים במקביל ומספקים לרשת הניזונה מהן מתח של 220V . נתוני המחוללים הם:

$$E_1 = 230V ; R_{a1} = 0.3\Omega$$

$$E_2 = 228V ; R_{a2} = 0.3\Omega$$

חשב את הזרם לעומס שכל מחולל מזרים וכן חשב את ההספק המתפתח בעומס.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:



$$U = E - I * R_a$$

$$I * R_a = E - U$$

$$I = \frac{E - U}{R_a}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{a1}} = \frac{230 - 220}{0.3} = 33.333A$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{a2}} = \frac{228 - 220}{0.3} = 26.667A$$

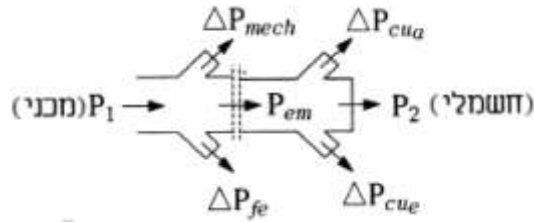
$$I_T = I_1 + I_2 = 33.333 + 26.667 = 60A$$

$$PRL = I_T * U = 60 * 220 = 13.2Kw$$



**נצילות המחולל:**

דיאגרמה אנרגטית (סולם הספקים):



כאשר:

- $-P_1 [W]$  ההספק מכני הנמסר למחולל ממקור חיצוני.
- $-\Delta P_{mech} [W]$  ההפסדים המכניים כתוצאה של חיכוך בין ציר העוגן והמסבים בסטטור.
- $-\Delta P_{fe} [W]$  הפסדי הברזל כתוצאה של חימום הקטבים והפסדים האלקטרומגנטיים.
- $-\Delta P_{cua} [W]$  הפסדי נחושת בשדה כתוצאה מהפסדי הספק בסלילי השדה.
- $-\Delta P_{cue} [W]$  הפסדי נחושת בעוגן כתוצאה מהפסדי הספק בסלילי העוגן.
- $-P_{em} [W]$  ההספק האלקטרומגנטי הנמסר לעוגן והופך להספק חשמלי.
- $-P_2 [W]$  ההספק החשמלי היעיל המתקבל במוצא המחולל והנמסר לעומס.
- $-\Delta P [W]$  כלל הפסדי ההספק.

נוסחאות:

$$\Delta P = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e$$

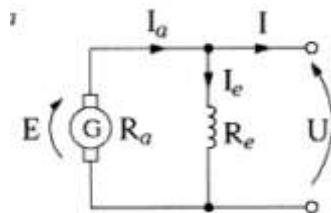
$$P_{em} = E * I_a = P_1 - \Delta P_{mech} - \Delta P_{fe}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = U * I$$

**תרגיל דוגמא 1:**

למחולל בעל עירור מקבילי מתח נקוב 380V וזרם נקוב של 180A. התנגדות סלילי העוגן  $0.07\Omega$  והתנגדות סלילי השדה  $100\Omega$ . למחולל נגרמים הפסדי חיכוך של 1400W והפסדי ברזל של 2000W, חשב את נצילות המחולל.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:



$$P_2 = U * I = 380 * 180 = 68.4Kw$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e = \frac{U^2}{R_e} = \frac{380^2}{100} = 1444w$$

$$I_a = I + I_e = I + \frac{\Delta P_{cue}}{U} = 180 + \frac{1444}{380} = 183.8A$$

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a = 183.8^2 * 0.07 = 2365w$$

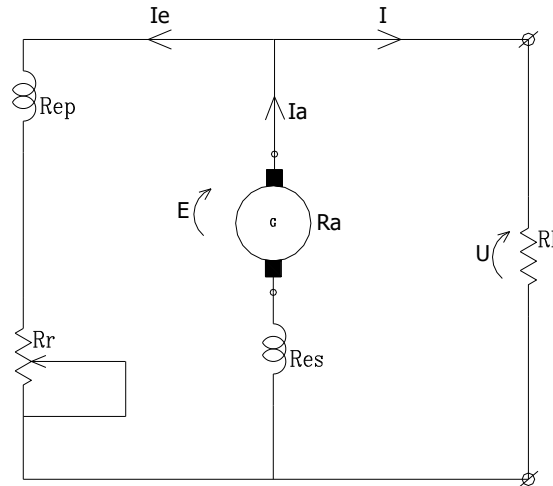
$$\Delta P = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} = 1444 + 2365 + 2000 + 1400 = 7209w$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{68.4 * 10^3}{68.4 * 10^3 + 7209} = 0.9046 = 90.46\%$$

תרגיל דוגמא 2:

מחולל בעירור מעורב מופעל ע"י מנוע במהירות 1200 rpm. מומנט המנוע הוא 586 Nm. במצב זה הזרם ברוטור הוא 168A. הפסדי הברזל הם 2460W והפסדי החיכוך 890W. התנגדות מוליכי הרוטור היא 0.089Ω, התנגדות סליל העירור הטורי היא 0.039Ω והתנגדות סליל העירור המקבילי היא 136Ω. בטור לסליל העירור המקבילי מחובר נגד משתנה שהתנגדותו 32Ω. חשב: א. מתח המחולל. ב. ההספק שהמחולל מספק לצרכן. ג. נצילות המחולל.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:



א.

$$M_m = \frac{9.55 * P_1}{n}$$

$$P_1 = \frac{M_m * n}{9.55} = \frac{586 * 1200}{9.55} = 73.64Kw$$

$$P_{em} = P_1 - \Delta P_{mech} - \Delta P_{fe} = 73.64 * 10^3 - 890 - 2460 = 70.29Kw$$

$$P_{em} = E * I_a$$

$$E = \frac{P_{em}}{I_a} = \frac{70.29 * 10^3}{168} = 418.4V$$

$$U = E - I_a * (R_a + R_{es}) = 418.4 - 168 * (0.089 + 0.039) = 396.9V$$

ב.

$$I_e = \frac{U}{R_{ep} + R_r} = \frac{396.9}{136 + 32} = 2.36A$$

$$I = I_a - I_e = 168 - 2.36 = 165.64A$$

$$P_2 = U * I = 396.9 * 165.64 = 65.74Kw$$

ג.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{65.74 * 10^3}{73.64 * 10^3} = 0.8927 = 89.27\%$$

**המכונה בעבודתה כמנוע לזרם ישר**

כאמור מנוע הוא מכונה הממירה אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכאנית. עיקרון הפעולה של המנוע הוא- כריכה או מוליך שעובר דרכם זרם והנמצאים בתוך שדה מגנטי פועל עליהם כוח השואף להניעם. וכאשר מדובר במנוע המוליך נושא הזרם הם סלילי העוגן, והשדה המגנטי הם השטפים המגנטיים שבין קוטבי הסטטור. מיד עם חיבורו של המנוע למקור מתח ישר, מתפתח בו זרם העובר בו זמנית דרך סלילי העוגן ודרך סלילי הסטטור. הזרם שבסלילי הסטטור הכרוכים סביב קוטבי הסטטור, מפתח בין הקטבים שטפים מגנטיים, ולכן על סלילי העוגן שגם בהם עובר זרם ואשר נמצאים בתוך השטפים המגנטיים שבין קוטבי הסטטור פועל כוח המניע אותם, ובהיותם כרוכים סביב ציר העוגן מתפתחת תנועה סיבובית.

**סוגי המנועים:**

- א. מנוע בעירור מקבילי.
- ב. מנוע בעירור טורי.
- ג. מנוע בעירור מעורב.
- ד. מנוע בעירור זר.

**מומנט סיבוב במנוע:**

הזרם במוליכי העוגן יחד עם השטף המגנטי יוצרים ברוטור את המומנט האלקטרומגנטי והוא מחושב כאמור:

$$M_{em} = k_m * \phi * I_a$$

$k_m$  - מקדם קבוע התלוי במבנה המכונה.

המומנט האלקטרומגנטי מאזן את מומנט הבלימה הנובע כתוצאה העומס על ציר המנוע וגם ההפסדים הקבועים ברוטור:

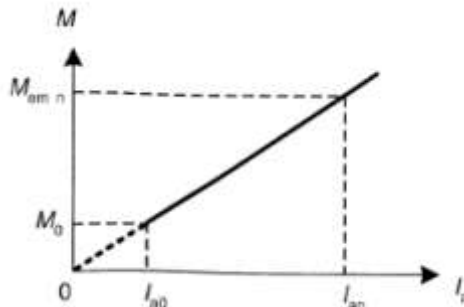
$$M_{em} = M_2 + M_0$$

ניתן קבוע כי:

- א. גודל המומנט האלקטרומגנטי המתפתח ברוטור תלוי בעומס על ציר המנוע. בריקם ללא עומס המומנט הוא מינימאלי ושווה למומנט ההפסדים:

$$M_{em} = M_0$$

- ב. כאשר השטף קבוע קיים יחס ישר בין המומנט לזרם העוגן ועבור מנועים בעלי עירור מקבילי וערעור זר מתקבל אופיין המומנט (בהזנחת תגובת העוגן) הבא:

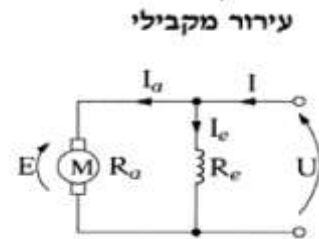


- ג. אם משנים את השטף זרם הצריכה משתנה ביחס הפוך לשינוי השטף כדי לשמור על גודל מומנט קבוע.

$$E = U - I_a \cdot R_a$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{I_{a2}}{I_{a1}}$$



הערה:

האינדקסים 1,2 מציינים את פרמטרים בעומסים שונים.

תרגיל דוגמא:

מנוע בעל עירור מקבילי בעל הנתונים הנקובים הבאים:

$$U_n = 460V ; I_a = 32A ; R_a = 1.25\Omega ; I_e = 2A ; n_n = 2800rpm$$

ניתן להניח כי:

1. מפל המתח על הפחמים זניח.
2. תגובת העוגן זניחה.
3. סכום ההפסדים המכניים והפסדי הברזל שווים בגודלם להפסדי הנחשת הנקובים ברוטור.
4. מעגל העירור פועל התחום הליניארי.

חשב:

- א. את המומנט האלקטרומגנטי הנקוב של המנוע.
- ב. את נצילות הנקובה של המנוע.
- ג. את מהירות המנוע עבור מתח זרם נקובים, אם במעגל העירור הוסיפו נגד שערכו  $57.5\Omega$ .

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$E_n = U - I_a \cdot R_a = 460 - 32 \cdot 1.25 = 420V$$

$$P_{em} = E \cdot I_a = 420 \cdot 32 = 13.44Kw$$

$$M_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n_n} = \frac{9.55 \cdot 13.44 \cdot 10^3}{2800} = 45.84Nm$$

ב.

$$I = I_a + I_e = 32 + 2 = 34A$$

$$P_1 = U \cdot I = 460 \cdot 34 = 15.64Kw$$

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 \cdot R_a = 32^2 \cdot 1.25 = 1.28Kw$$

$$\Delta P_{fe} + \Delta P_{mec} = \Delta P_{cua} = 1.28Kw$$

$$P_2 = P_{em} - (\Delta P_{fe} + \Delta P_{mec}) = 13.44 - 1.28 = 12.16Kw$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{12.16}{15.64} = 0.7775 = 77.75\%$$

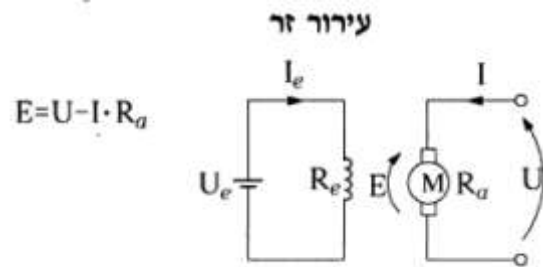
ג.

$$R_e = \frac{U}{I_e} = \frac{460}{2} = 230\Omega$$

$$I_e' = \frac{U}{R_e + R_x} = \frac{460}{230 + 57.5} = 1.6A$$

$$\frac{\phi}{\phi'} = \frac{I_e}{I_e'} = \frac{2}{1.6} = 1.25$$

$$\frac{\phi}{\phi'} = \frac{n'}{n} \Rightarrow n' = n \cdot \frac{\phi}{\phi'} = 2800 \cdot 1.25 = 3500rpm$$



תרגיל דוגמא:

למנוע לזרם ישר בעל עירור זר הנתונים הנקובים הבאים:

$$P_n = 12Kw ; U_a = 250V ; I_a = 50A ; R_a = 0.2\Omega ; R_e = 125\Omega ; U_e = 250V ; n_n = 1200rpm$$

1. ניתן להניח כי עקום המגנטי ליניארי.
  2. ניתן להזניח את ההפסדים הקבועים.
  3. ניתן להזניח את מפל המתח על הפחמים.
- א. חשב את ערך הנגד שיש להוסיף למעגן העוגן להפעלת המנוע במהירות של  $1000rpm$  אם הוא עמוס במומנט אלקטרומגנטי השווה ל-  $0.5 * M_{em_n}$ .
- ב. הוסיפו למעגל העירור נגד שערכו  $125\Omega$  חשב את מהירות המנוע אם הוא עמוס במומנט אלקטרומגנטי השווה ל-  $0.5 * M_{em_n}$ .
- הערה: סעיפים א' וב' אינם תלויים זה בזה.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$E_n = U_{a_n} - I_{a_n} * R_a = 250 - 50 * 0.2 = 240V$$

$$P_{em_n} = E_n * I_a = 240 * 50 = 12Kw$$

בהזנחת ההפסדים הקבועים-

$$P_{em_n} = P_n = 12Kw$$

ומכאן-

$$M_{em} = M_n$$

וכיוון שזרם העוגן הוא ביחס ישר למומנט האלקטרומגנטי לכן כאשר העומס הוא  $0.5 * M_{em_n}$  גם

$$I_a = 0.5 * I_{a_n} = 0.5 * 50 = 25A$$

וכן הכא"מ של המנוע הוא ביחס ישר למהירות לכן-

$$\frac{E}{E_n} = \frac{n}{n_n} \Rightarrow E = E_n * \frac{n}{n_n} = 240 * \frac{1000}{1200} = 200V$$

$$E = U_a - I_a * (R_a + R_x)$$

$$R_x = \frac{U_a - E}{I_a} - R_a = \frac{250 - 200}{25} - 0.2 = 1.8\Omega$$

ב.

$$I_{e_n} = \frac{U_{e_n}}{R_e} = \frac{250}{125} = 2A$$

$$I_{e'} = \frac{U_{e_n}}{R_e + R_x} = \frac{250}{125 + 125} = 1A$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

עם ירידת זרם העירור תהיה גם ירידה בשטף ומנוע כדי לשמור על המומנט בעומס יגדיל את הזרם בעוגן. ולכן עבור מנוע זה הנמצא בתחום הליניארי קיים יחס ישר בין זרם העירור לזרם העוגן ולכן:

$$\frac{I_a'}{I_a} = \frac{I_e'}{I_e} \Rightarrow I_a' = I_a * \frac{I_e'}{I_e} = 50 * \frac{1}{2} = 25A$$

כיוון שזרם העוגן גדל הכא"מ יורד לפי החישוב הבא:

$$E' = U_a - I_a' * R_a = 250 - 25 * 0.2 = 245V$$

שינוי השטף הוא ביחס ישר לשינוי זרם העירור ולכן:

$$\frac{I_e}{I_e'} = \frac{\phi}{\phi'} = \frac{2}{1} = 2$$

$$E = k_e * \phi * n$$

$$E' = k_e * \phi' * n'$$

נחלק את 2 המשוואות זו בזו:

$$\frac{E}{E'} = \frac{k_e * \phi * n}{k_e * \phi' * n'} = \frac{\phi * n}{\phi' * n'}$$

$$\frac{E}{E'} = \frac{\phi * n}{\phi' * n'} \Rightarrow n' = n * \frac{E'}{E} * \frac{\phi}{\phi'} = 1200 * \frac{245}{240} * 2 = 2450rpm$$

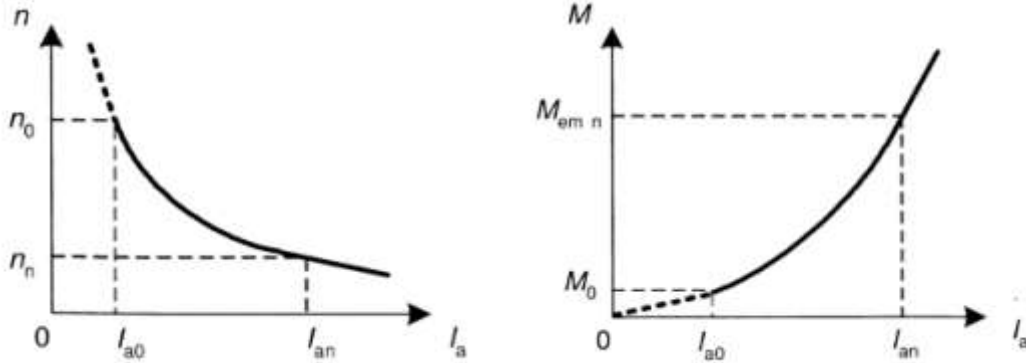
## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### מנוע בעירור טורי

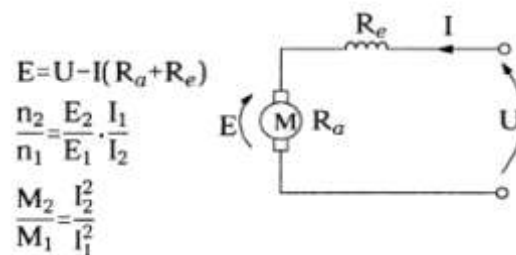
למנוע בעירור טורי סליל העירור מחובר בטור עם העוגן ועובר בו זרם העומס:

$$I = I_a = I_e$$

האופייניים הבאים מתארים את האופיין המכני ואופיין המומנט וניתן ללמוד מהם כיצד זרם העומס משפיע על המומנט ועל המהירות.



### עירור טורי



הערות:

- א. האינדקסים 1,2 מציינים את פרמטרים בעומסים שונים.
- ב. חישוב המהירות והמומנט בעומס המנוע בעירור טורי, בהזנחת תגובת העוגן.

### תרגיל דוגמא

מנוע לזרם ישר בעירור טורי בהספק נקוב של 4Kw במהירות של 240rpm צורך זרם של 20A מרשת של 220V. התנגדות המנוע (סליל בעוגן יחד עם סליל העירור) 0.5Ω. בהנחה שהמנוע פועל בתחום הליניארי של אופיין המגנט שלו חשב:

- א. את המומנט האלקטרו מגנטי בעומס הנתון.
- ב. את המהירות ואת המומנט האלקטרו מגנטי אם הזרם ירד ל-12A

### פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$E = U_n - I * (R_a + R_e) = 220 - 20 * 0.5 = 210V$$

$$P_{em} = E_n * I_a = 210 * 20 = 4.2Kw$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} = \frac{9.55 * 4.2 * 10^3}{240} = 167.125Nm$$

ב.

$$\frac{M_{em2}}{M_{em1}} = \frac{I_2^2}{I_1^2} \Rightarrow M_{em2} = M_{em1} * \frac{I_2^2}{I_1^2} = 167.125 * \frac{12^2}{20^2} = 60.165Nm$$

$$E_2 = U_n - I_2 * (R_a + R_e) = 220 - 12 * 0.5 = 214V$$

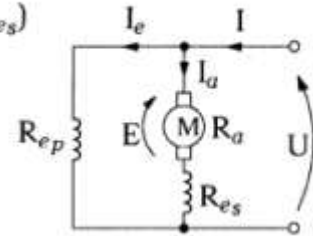
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2 * I_1}{E_1 * I_2} \Rightarrow n_2 = n_1 * \frac{E_2 * I_1}{E_1 * I_2} = 240 * \frac{214 * 20}{210 * 12} = 408rpm$$

מנוע בעירור מעורב

מנוע בעירור מעורב קיים ב-2 צורות חיבורים:  
1.

**עירור מעורב ארוך**

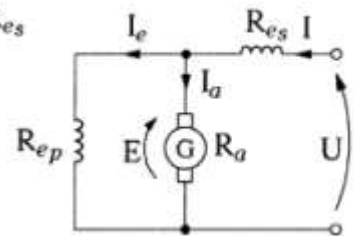
$$E=U-I_a \cdot (R_a+R_{es})$$



2.

**עירור מעורב קצר**

$$E=U-I_a \cdot R_a - I \cdot R_{es}$$



כאשר:

$R_e$  [Ω]-התנגדות סלילי העירור.

$E$  [V]-מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן.

$R_a$  [Ω]-התנגדות סלילי העוגן.

$I$  [A]-זרם המנוע.

$U$  [V]-המתח בהדקי המכונה.

$R_{es}$  [Ω]-התנגדות סלילי העירור הטורי.

$R_{ep}$  [Ω]-התנגדות סלילי העירור המקבילי.

מקור מתח זר.

$-U_e$  [V]

תרגיל דוגמא:

נתון מנוע לזרם ישר בעירור מעורב שקיצרו בו את סלילי העירור הטורי ובתנאים אלה נמדדו הפרמטרים הנקובים הבאים:

$$P_n = 30Kw ; U_n = 460V ; I_{an} = 80A ; R_a = 0.6\Omega ; I_e = 4A ; n_n = 1600rpm$$

מספר הכריכות בסלילי העירור הנפרד שווה ל-1000.

נתון שלשדה הטורי 8 כריכות והתנגדות של  $0.2\Omega$ . ניתן להניח שהמעגל המגנטי הנו ליניארי, וניתן להזניח את מפל המתח על הפחמים ואת תגובת העוגן.

א. חשב את מהירות סיבוב הריקים האידיאלי ואת המומנט האלקטרומגנטי עבור זרם נקוב של המנוע כאשר סלילי העירור הטורי מקוצר.

ב. חשב את המהירות והמומנט האלקטרומגנטי עבור זרם עוגן נקוב בעירור מעורב מתווסף.

ג. חשב את המהירות והמומנט האלקטרומגנטי עבור זרם עוגן נקוב בעירור מעורב מתחסר.



א.

כאשר הסליל הטורי מקוצר המנוע עובד כמנוע בעל עירור מקבילי-

$$E_n = U_n - I_{a_n} * R_a = 460 - 80 * 0.6 = 412V$$

$$\frac{n_0}{n_n} = \frac{E_0}{E_n} \Rightarrow n_0 = n_n * \frac{E_0}{E_n} = 1600 * \frac{460}{412} = 1786rpm$$

$$P_{em} = E_n * I_a = 412 * 80 = 32.96Kw$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} = \frac{9.55 * 32.96 * 10^3}{1600} = 196.73Nm$$

ב.

נחשב את הערכים עבור מנוע בעירור ארוך:

$$E = U_n - I_{a_n} * (R_a + R_{es}) = 460 - 80 * (0.6 + 0.2) = 396V$$

הכמ"מ (כוח אלקטרומניע) של הסליל המקבילי-

$$IN_{Rep} = I_{Rep} * N_{Rep} = I_e * N_{Rep} = 4 * 1000 = 4000AT$$

הכמ"מ (כוח אלקטרומניע) של הסליל הטורי-

$$IN_{Res} = I_{Res} * N_{Res} = I_a * N_{Res} = 80 * 8 = 640AT$$

בחיבור מתווסף הכמ"מ השקול-

$$IN_T = IN_{Rep} + IN_{Res} = 4000 + 640 = 4640AT$$

המהירות תחושב ביחסים לכא"מ והשטף בסליל העוגן

$$\frac{E}{E_n} = \frac{k_e * \phi * n}{k_e * \phi_n * n_n} = \frac{\phi * n}{\phi_n * n_n}$$

$$\frac{E}{E_n} = \frac{\phi * n}{\phi_n * n_n} \Rightarrow n = n_n * \frac{E * \phi_n}{E_n * \phi} = n_n * \frac{E * IN_{Rep}}{E_n * IN_T} = 1600 * \frac{396 * 4000}{412 * 4640} = 1326rpm$$

$$P_{em} = E_n * I_a = 396 * 80 = 31.68Kw$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} = \frac{9.55 * 31.68 * 10^3}{1326} = 228.163Nm$$

ג.

בחיבור מתחסר הכמ"מ השקול-

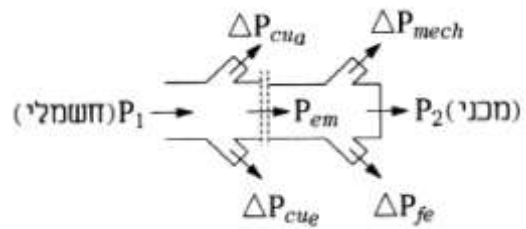
$$IN_T = IN_{Rep} - IN_{Res} = 4000 - 640 = 3360AT$$

$$\frac{E}{E_n} = \frac{\phi * n}{\phi_n * n_n} \Rightarrow n = n_n * \frac{E * \phi_n}{E_n * \phi} = n_n * \frac{E * IN_{Rep}}{E_n * IN_T} = 1600 * \frac{396 * 4000}{412 * 3360} = 1831rpm$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} = \frac{9.55 * 31.68 * 10^3}{1831} = 165.234Nm$$

נצילות המנוע:

דיאגרמה אנרגטית (סולם הספקים):



כאשר:

- $-P_1 [W]$  - ההספק חשמלי הנמסר למנוע ממקור חיצוני.
- $-\Delta P_{mech} [W]$  - ההפסדים המכניים כתוצאה של חיכוך בין ציר העוגן והמסבים בסטטור.
- $-\Delta P_{fe} [W]$  - הפסדי הברזל כתוצאה של חימום הקטבים והפסדים האלקטרומגנטיים.
- $-\Delta P_{cue} [W]$  - הפסדי נחושת בשדה כתוצאה מהפסדי הספק בסלילי השדה.
- $-\Delta P_{cua} [W]$  - הפסדי נחושת בעוגן כתוצאה מהפסדי הספק בסלילי העוגן.
- $-P_{em} [W]$  - ההספק האלקטרומגנטי הנמסר לעוגן והופך להספק חשמלי.
- $-P_2 [W]$  - ההספק המכאני המתקבל במוצא המנוע והנמסר לעומס.
- $-\Delta P [W]$  - כלל הפסדי ההספק.

נוסחאות:

$$\Delta P = \Delta P_{cue} + \Delta P_{cua} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$$

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e$$

$$P_{em} = E * I_a = P_2 + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fe}$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P = U * I$$

נצילות מרבית ( $\eta(max)$ ):

למנוע נצילות מרבית כאשר ערכם של ההפסדים הקבועים שווים לערכם של ההפסדים המכאניים:

$$\eta(max) \Rightarrow \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue} = \Delta P_{mech} + \Delta P_{fe}$$

תרגיל דוגמא 1:

מנוע בעל עירור מקבילי מוזן במתח של  $1000V$  ובזרם של  $52A$ . השטף לזוג קטבים הוא  $27.2mWb$ . מספר המוליכים בעוגן הוא  $400$  והתנגדות העוגן היא  $0.2\Omega$ , התנגדות השדה היא  $110\Omega$ . חשב את מהירות המנוע.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{1000}{110} = 9.09A$$

$$I_a = I - I_e = 52 - 9.09 = 42.91A$$

$$E = U - I_a * R_a = 1000 - 42.91 * 0.2 = 991.418V$$

$$k_e = \frac{2 * p * N}{2 * a * 60} = \frac{2 * 1 * 400}{2 * 1 * 60} = 6.667$$

$$E = k_e * \phi * n$$

$$n = \frac{E}{k_e * \phi} = \frac{991.418}{6.667 * 27.2 * 10^{-3}} = 5467 \text{ rpm}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### תרגיל דוגמא 2:

מנוע בעל עירור טורי הספק נומינאלי  $7Kw$ , מתח נומינאלי  $220V$ , נצילותו  $82\%$ , התנגדות העירור  $0.248\Omega$ , התנגדות העוגן  $0.2\Omega$ , מהירותו הנומינאלית  $1000$  סל"ד. חשב:

- הזרם הנומינאלי.
- הכא"מ הנגדי בעומס נומינאלי.
- מהירות המנוע ב- $40\%$  מהזרם הנומינאלי.

### פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

$$I_n = \frac{P_n}{U_n * \eta} = \frac{7 * 10^3}{220 * 0.82} = 38.803A$$

ב.

$$E_n = U - I_n(R_a + R_e) = 220 - 38.803 * (0.2 + 0.248) = 202.939 V$$

ג.

$$I_2 = 40\%I_n = 0.4 * 38.803 = 15.521 A$$

$$E_2 = U - I_2(R_a + R_e) = 220 - 15.521 * (0.2 + 0.248) = 213.047 V$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} * \frac{I_1}{I_2}$$

$$n_2 = \frac{E_2}{E_n} * \frac{I_n}{I_2} * n_n = \frac{213.047}{202.939} * \frac{38.803}{15.521} * 1000 = 2625 rpm$$

### תרגיל דוגמא 3:

למנוע בעירור זר הנתונים הבאים: מתח נקוב  $440V$ , המתח בסליל העירור  $220V$ , הזרם בעוגן  $200A$ , התנגדות העוגן  $0.065\Omega$ , התנגדות השדה  $5.5\Omega$ , נצילות המנוע  $80\%$ . חשב:

- ההפסד המושקע במנוע.
- ההפסדים בסליל העירור והעוגן.
- ההספק האלקטרומגנטי.

### פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$P_e = \frac{U_e^2}{R_e} = \frac{220^2}{5.5} = 8.8Kw$$

$$P_a = U * I = 440 * 200 = 88Kw$$

$$P_n = P_2 = (P_e + P_a) * \eta = (8.8 + 88) * 10^3 * 0.8 = 77.44Kw$$

ב.

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a = 200^2 * 0.065 = 2.6Kw$$

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{220}{5.5} = 40A$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e = 40^2 * 5.5 = 8.8Kw$$

$$\Delta P_{cu} = \Delta P_{cue} + \Delta P_{cua} = (8.8 * 2.6) * 10^3 = 11.4Kw$$

ג.

$$E_a = U_a - I_a * R_a = 440 - 200 * 0.065 = 427V$$

$$P_{em} = E_a * I_a = 427 * 200 = 85.4Kw$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### תרגיל דוגמא 4:

מנוע בעל עירור מעורב ארוך בעל 4 זוגות קטבים, עובד במתח נקוב של 220V ובמהירות 1100 סל"ד. הזרם הנקוב של המנוע 94A התנגדות העוגן כולל ההתנגדות העירור הטורי היא  $0.172\Omega$  והתנגדות העירור המקבילי היא  $338\Omega$ . מספר התילים של ליפוף העוגן הוא 372. מספר הענפים המקבילים בין המברשות הוא 2. הפסדי ההספק הכלליים שווים ל-3312W. חשב:

- עוצמת הזרם בעוגן.
- הכא"מ של העוגן.
- השטף היעיל לקוטב.
- ההספק הנומינאלי החשמלי למנוע.
- ההספק האלקטרומגנטי של המנוע.
- ההספק המכאני.
- נצילות המנוע.
- המומנט הסיבובי האלקטרומגנטי.
- המומנט המכאני על הציר.

### פתרון לתרגיל דוגמא 4:

א.

$$I_e = \frac{U_n}{R_{ep}} = \frac{220}{338} = 0.651A$$

$$I_a = I_n - I_e = 94 - 0.651 = 93.349A$$

ב.

$$E = U - I_a(R_a + R_{es}) = 220 - 93.349 * 0.172 = 203.944 V$$

ג.

$$k_e = \frac{p * N}{a * 60} = \frac{2 * 4 * 372}{2 * 2 * 60} = 12.4$$

$$E = k_e * \phi * n$$

$$\phi = \frac{E}{k_e * n} = \frac{203.944}{12.4 * 1100} = 15mWb$$

ד.

$$P_1 = U_n * I_n = 220 * 94 = 20.68Kw$$

ה.

$$P_{em} = E * I_a = 203.944 * 93.349 = 19.038Kw$$

ו.

$$P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P = 20.68 * 10^3 - 3312 = 17.368Kw$$

ז.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{17.368}{20.68} \cong 0.84 = 84\%$$

ח.

$$K_m = K_e * \frac{60}{2 * \pi} = 12.4 * \frac{60}{2 * \pi} = 118.411$$

$$M_{em} = K_m * \phi * I_a = 118.411 * 15 * 10^{-3} * 93.349 = 165.803Nm$$

ט.

$$M_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega} = \frac{P_2 * 60}{2 * \pi * n} = \frac{17.368 * 10^3 * 60}{2 * \pi * 1100} = 150.775Nm$$

זרם התנעה  $I_{st}$  של מנוע בעירור מקבילי:

מיד עם חיבור המנוע למקור מתח ובטרם החל העוגן להסתובב ז"א  $n = 0$  כתוצאה מכך:

$$E_{st} = K_e * \phi * n = 0$$

ומתפתח במנוע צריכת זרם העוגן  $I_a$  גדולה, וזאת בנוסף לזרם אותו צורך המנוע בסלילי השדה שלו  $I_e$ .

2 הזרמים גם יחד נצרכים מהרשת המזינה את המנוע מהווים את זרם ההתנעה  $I_{st}$ , והוא גדול פי כמה מונים מהזרם הנצרך מהמקור בעבודתו הסדירה של המנוע.

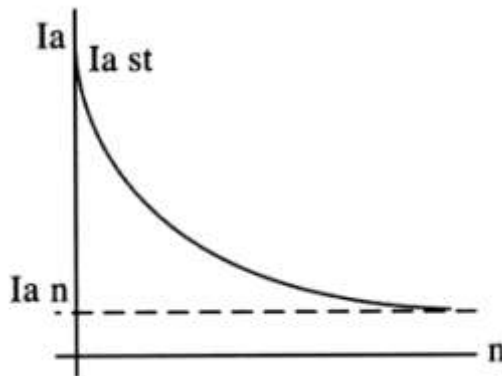
$$I_{st} = I_{ast} + I_e$$

אם זרם העירור  $I_e$  לא ידוע או לא ניתן לחישוב ניתן להזניחו עקב ערכו המזערי בעבודתו הנקובה של המנוע וכל שכן בעת ההתנעה, ולכן:

$$I_{st} \approx I_{ast} = \frac{U - E_{st}}{R_a} = \frac{U - 0}{R_a} = \frac{U}{R_a}$$

לאחר ההתנעה ועם עליית מהירות סיבובי העוגן במנוע ועליה בערכו של הכאמ"מ  $E$ , פוחת הזרם  $I_{ast}$  הנצרך בהתנעה ומתייצב בערכיו הנומינאליים  $I_{an}$ .

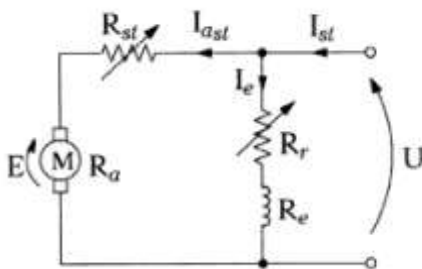
האופיין הבא מתאר את השינויים בגודל הזרם במנוע מרגע ההתנעה:



כדי להגביל את זרם ההתנעה עד כ-  $I_{ast} \approx 2 * I_{an}$

נוהגים להשתמש במתנעים שהם למעשה נגדים המחוברים בטור להתנגדות העוגן  $R_a$ .

כאשר למתנע דרגת התנעה אחת, המחוברת בטור לסלילי העוגן היא מוגדרת כ-  $R_{st}$ .



זרם העוגן בזמן התנעה	$I_{ast}$	[A]
התנגדות ווסת ההתנעה	$R_{st}$	[ $\Omega$ ]
התנגדות ווסת העירור	$R_r$	[ $\Omega$ ]

$$I_{st} = I_{ast} + I_e$$

$$I_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

$$I_e = \frac{U}{R_e + R_r}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

יסות מהירות מנוע בעירור מקבילי:

ניתן לווסת את מהירות המנוע ב-3 אפשריות הבאות:

א. שינוי מתח הרשת  $U$ :

ניתן לשנות את מתח הרשת על מנת לווסת את מהירות המנוע כיוון ש-

$$E = U - I_a * R_a$$

כתוצאה מהקטנת המתח הכאמ"מ בעוגן יורד וכתוצאה מכך גם המהירות יורדת כיוון ש-

$$n = \frac{E}{K_e * \phi}$$

באותה שיטה ניתן להגדיל את מהירות המנוע, אך יש לקחת בחשבון את העלייה בזרם העוגן ובזרם השדה שיכול לגרום לשרפת הסלילים.

ב. שינוי התנגדות מעגל העוגן:

בשיטה זו ניתן להשתמש בהתנגדות  $R_{st}$  של מערכת ההתנעה המחוברת בטור לסליל העוגן במטרה לשנות את הזרם  $I_a$  ובתנאי שזרם העירור  $I_e$  יישאר ללא שינוי.

ג. שינוי גודל השטף  $\phi$ :

את השינוי בגודל השטף ניתן לבצע באמצעות שינויי בגודל הזרם בסלילי הסטטור ז"א זרם העירור  $I_e$ .

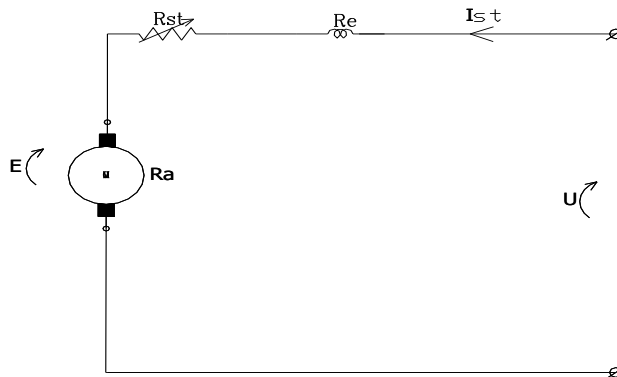
וזאת באמצעות הוספת נגד  $R_r$  בטור לסליל העוגן. הקטנת הזרם  $I_e$  גורמת להקטנת השטף ולעלית המהירות (עד גבול היכולת המכאנית), ואילו הגדלת הזרם  $I_e$  גורמת להגדלת השטף ולירידת המהירות (עד גבול הרוויה המגנטית בקוטבי הסטטור).

שינוי בכיוון סיבוב העוגן (המנוע) בעירור מקבילי:

השינוי בכיוון סיבוב העוגן יעשה ע"י שינוי בכיוון הזרם בסלילי העוגן או העירור (לא בשניהם יחד). כיוון שעל פי כלל "יד שמאל" הקובע- כף יד שמאל מול הקוטב הצפוני כך שקווי השטף המגנטי יחדרו לתוכה, האצבעות יורו את כיוון הזרם במוליך (סליל) והאגודל יראה את כיוון התנועה.

זרם התנעה  $I_{st}$  של מנוע בעירור טורי:

גם המנוע זה מתפתח זרם התנעה גבוה ויש צורך להקטינו עד-  $I_{st} = 2 * I_n$ , וגם במנוע זה ניתן להפחיתו ע"י חיבור נגד  $R_{st}$  בטור לסלילי העוגן.



כיוון שמהירות המנוע היא ביחס ישר לכאמ"מ, הקטנת הכאמ"מ תקטין את המהירות.

$$n = \frac{E}{K_e * \phi}$$

$$E = U - I_{st} * (R_a + R_e + R_{st})$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

יסות מהירות מנוע בעירור טורי:

יסות המהירות נעשה בצורה אוטומטית ע"י העמסת המנוע בעומסים משתנים. בתנאי שהשטף המגנטי בקוטבי השדה אינו נמצא בתחום הרוויה המגנטית וזאת לפי הנוסחה:

$$n = \frac{E}{K_e * \phi} = \frac{U - I * (R_a + R_e)}{K_e * \phi}$$

ז"א ככל שנעמיס את המנוע הזרם יגדל כדי לייצר מומנט גדול יותר כדי להתגבר על העומס וכתוצאה מכך הזרמים  $I_a$  ו-  $I_e$  גדלים ומגדילים את השטף המגנטיים הגורמים לירידה במהירות.

מכאן ניתן להבין שאסור להפעיל את המנוע בריקים כיוון שבמצב זה הזרם הנצרך שואף ל-0 וכתוצאה מכך המהירות גדלה עד כדי סיכון מכאני.

אבל באופן מעשי כן ניתן להפעיל מנוע בעירור טורי בריקים כיוון שהעוגן עצמו מהווה עומס כל שהוא וגם בעבודה בריקים צורך המנוע זרם כגודל מספיק כדי לפתח שטף מגנטי, בין קוטבי הסטטור כזה אשר ימנע מהמנוע להאיץ את מהירותו עד כי הריסתו.

תרגיל דוגמא:

מנוע בעירור מקבילי בהספק 6HP הפועל במתח 240V ונצילותו 82%, מפתח כא"מ נגדי של 212V. מהירות הסיבוב היא 1400 סל"ד והתנגדות העירור  $60\Omega$ . חשב:

- זרם הצריכה.
- התנגדות העוגן.
- זרם ההתנעה.
- מהירות הסיבוב בריקים.
- הנגד בטור לעוגן שיגביל את זרם ההתנעה פי 3 מהזרם הנקוב.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I = \frac{P_2}{U * \eta} = \frac{6 * 736}{240 * 0.82} = 22.439A$$

ב.

$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{240}{60} = 4A$$

$$I_a = I - I_e = 22.439 - 4 = 18.439A$$

$$R_a = \frac{U - E}{I_a} = \frac{240 - 212}{18.439} = 1.519\Omega$$

ג.

$$I_{a_{st}} = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - 0}{R_a} = \frac{U}{R_a} = \frac{240}{1.519} = 158A$$

$$I_{st} = I_{a_{st}} + I_e = 158 + 4 = 162A$$

ד.

במצב ריקים  $I_a = 0A$  וכן-

$$E_0 = U - I_a * R_a = U = 240V$$

$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{E_0}{E_1}$$

$$n_0 = \frac{E_0}{E_1} * n_1 = \frac{240}{212} * 1400 = 1585rpm$$

ה.

$$I_{st} = I_{a_{st}} + I_e = 3 * I_n = 3 * 22.439 = 67.317A$$

$$I_{a_{st}} = I_{st} - I_e = 67.317 - 4 = 63.317A$$

$$I_{a_{st}} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

$$R_{st} = \frac{U}{I_{a_{st}}} - R_a = \frac{240}{63.317} - 1.519 = 2.27\Omega$$

### תופעת קומוטציה במכונות לזרם ישר

תופעת הקומוטציה היא הופעת ניצוצות בין הפחמים לבין פלחי הצובר (קומוטטור), כתוצאה מהמצאות שנים או יותר מפלחי הצובר מקוצרים בניהם על ידי אחד מהפחמים תוך כדי החלקה על פניהם.

את עוצמתה של הקומוטציה מפרידים ל- 2 דרגות:

1. כל עוד זרם העוגן בגבולות הערך הנקוב, עוצמת הניצוצות קטנה תופעת הקומוטציה נחשבת אידיאלית.
2. עם עליה בערכו של זרם העוגן מעבר לערכו הנקוב, גדלה עוצמת הניצוצות, עד כי עוצמתם עשויה לגרום לשרפת הפחמים וכיסוי של פלחי הצובר בפיח. רמת קומוטציה גדולה זו יש צורך להחליש ככל שניתן. את זאת ניתן לבצע באמצעות הוספת קוטבי "מפנה" בין קוטבי הסטטור ועליהם כרוכים סלילי המפנה. במכונות בהם הוספת קוטבי וליפופי ה"מפנה" אינה יעילה דיה להחלשת תגובת העוגן, מוסיפים ליפופי "קזוז" בין קוטבי הסטטור. ליפופי ה"מפנה" וה"קזוז" חייבים להיות מחוברים בטור עם ליפופי העוגן וזאת שעל מנת שזרם העוגן המשתנה העובר דרכם יגרום לסלילי ה"מפנה" וה"קזוז" להשפיע על עוצמת הקומוטציה המתרחשת בעוגן. בד"כ כ במנועים עד 4Kw משתמשים בסלילי "מפנה" בלבד, ובמנועים מעל ל- 4Kw מוסיפים לסלילי ה"מפנה" גם סלילי "קזוז".

### מנוע אוניברסאלי

- מנוע אוניברסאלי הוא חיבור של מנוע בעל עירור טורי למקור מתח חילופין. היתרון במנוע זה פשטותו ועלותו הנמוכה והוא מתאים לעומסים קטנים עם דרישות לא מורכבות. עם זאת בחיבור זה מתפתחות מגרעות אשר יש לצמצם אותן ככל האפשר עד כדי ביטולן, והן:
1. ירידה בגודל הזרם למנוע והתוצאה לכך שהמומנט האלקטרומגנטי קטן, וזאת כיוון שמתפתחת עכבה Z בסלילי העוגן ובסלילי הקטבים המגנטים בסטטור אשר ערכם באומים גדול יותר מהתנגדות R שבכל אחד מהסלילים. כיוון שהזרם לעוגן יורד, והזרם בעוגן הוא ביחס ישר למומנט, גם המומנט יורד, ומגרעת זו אינה ניתנת לפיתרון, המשמעות היא שבשימוש במנוע זה בזרם חילופין יש לקחת בחשבון את המומנט הדרוש ולבחור בגודל מנוע כזה שעונה על הדרישה.
  2. היווצרות זרמי מערבולת בברזל קוטבי הסטטור. זרמי מערבולת גורמת להתחממות יתר של ברזל הקטבים, מגרעת זו ניתנת לפיתרון חלקי ע"י בניית הקטבים מרצף פחיות הצמודות זו לזו ומבודדות זו מזו כמו ליבת השנאי.
  3. בעל מקדם הספק גרוע  $\cos \varphi = 0.4 - 0.6$  ניתן לשפר באמצעות קבל לשיפור גורם ההספק.
  4. הופעת ניצוצות בין הפחמים לצובר (תופעת הקומוטציה) ניתן לשפר באמצעות הוספת ליפופי "מפנה" וליפופי "קזוז" או חיבור קבל במקביל לפחמים.



**פרק 4- הינע**

**התנעת מנוע לזרם ישר באמצעות מתנע דרגתי**

החיסרון בשיטת חיבור הנגד למעגל הרוטור הוא שיחד עם הגבלת זרם ההתנעה, קטן גם מומנט ההתנעה באותו יחס, וקייטון זה גורם להארכת זמן ההתנעה ויותר קשיים במהלכה. פותרים בעיה זו באמצעות מתנע נגדים בעל דרגות ומעגל אוטומטי המשנה את הדרגה בכל פעם

שזרם המנוע יורד מתחת לערך מסוים שנקבע מראש ( $I_{amin}$ ). חישוב נגדי ההתנעה ומספר הדרגות יבצעו בשלבים הבאים:  
1. נחשב את קבוע ההתנעה  $[C]$ -

$$C = \frac{I_{amin}}{I_{amax}}$$

2. נחשב את התנגדות הדרגה הראשונה  $[R_{st1}]$ -

$$R_{st1} = \frac{U_a}{I_{amax}}$$

3. נחשב את מספר הדרגות  $[m]$ -

$$m = \frac{\ln \frac{R_a}{R_{st1}}}{\ln C}$$

4. נעגל את מספר הדרגות למספר שלם ונעדכן את קבוע ההתנעה  $[C']$ -

$$\ln C' = \frac{\ln \frac{R_a}{R_{st1}}}{m'}$$

$$C' = e^{\ln C'}$$

5. נעדכן את זרם ההתנעה המזערי ( $I'_{amin}$ )-

$$I'_{amin} = C' * I_{amax}$$

6. נחשב את התנגדויות  $[R_{stn}]$ -

$$R_{stn} = R_{st1} * C'^{(n-1)}$$

**תרגיל דוגמא:**

יש לתכנן מתנע דרגתי עבור מנוע זרם ישר בעירור זר בעל הנתונים הבאים:

$$P_n = 15Kw ; U_a = 240V ; I_a = 75A ; R_a = 0.3\Omega ; R_e = 120\Omega ; U_e = 240V ;$$

$$n_n = 2000rpm$$

$$I_{max} = 2xI_a ; I_{min} = 1.2xI_a$$

א. קבע את מספר דרגות המתנע.

ב. קבע את זרם ההתנעה המזערי ואת ערכי נגדי ההתנעה.

ג. קבע את המהירות בהן יבוצעו קיצורי הנגדים.

**פתרון לתרגיל דוגמא:**

א.

$$I_{max} = 2xI_a = 2 * 75 = 150A$$

$$I_{min} = 1.2xI_a = 1.2 * 75 = 90A$$

$$C = \frac{I_{amin}}{I_{amax}} = \frac{90}{150} = 0.6$$

$$R_{st1} = \frac{U_a}{I_{amax}} = \frac{240}{150} = 1.6\Omega$$

$$m = \frac{\ln \frac{R_a}{R_{st1}}}{\ln C} = \frac{\ln \frac{0.3}{1.6}}{\ln 0.6} = 3.277$$

$$m' = 4$$

ב.

$$\ln C' = \frac{\ln \frac{R_a}{R_{st1}}}{m'} = \frac{\ln \frac{0.3}{1.6}}{4} = -0.418$$

$$C' = e^{\ln C'} = e^{-0.418} = 0.658$$

$$I'_{amin} = C' * I_{amax} = 0.658 * 150 = 99A$$

$$R_{stn} = R_{st1} * C'^{(n-1)}$$

$$R_{st1} = R_{st1} * C'^{(1-1)} = 1.6 * 0.658^0 = 1.6\Omega$$

$$R_{st2} = R_{st1} * C'^{(2-1)} = 1.6 * 0.658^1 = 1.05\Omega$$

$$R_{st3} = R_{st1} * C'^{(3-1)} = 1.6 * 0.658^2 = 0.69\Omega$$

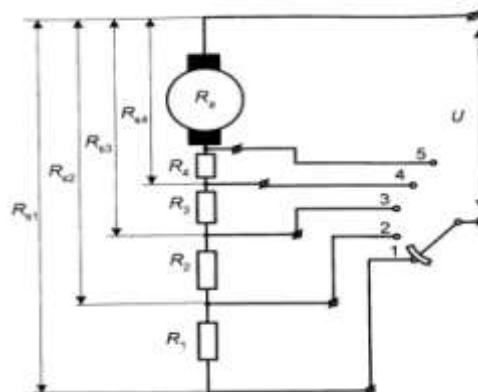
$$R_{st4} = R_{st1} * C'^{(4-1)} = 1.6 * 0.658^3 = 0.46\Omega$$

$$R_1 = R_{st1} - R_{st2} = 1.6 - 1.05 = 0.55\Omega$$

$$R_2 = R_{st2} - R_{st3} = 1.05 - 0.69 = 0.36\Omega$$

$$R_3 = R_{st3} - R_{st4} = 0.69 - 0.46 = 0.23\Omega$$

$$R_4 = R_{st4} - R_a = 0.46 - 0.3 = 0.16\Omega$$



ג.

$$E_n = U_a - I_a * R_a = 240 - 75 * 0.3 = 217.5 V$$

$$E_1 = U_a - I'_{amin} * R_{st1} = 240 - 99 * 1.6 = 81.6 V$$

$$n_1 = \frac{E_1}{E_n} * n_n = \frac{81.6}{217.5} * 2000 = 750rpm$$

$$E_2 = U_a - I'_{amin} * R_{st2} = 240 - 99 * 1.05 = 136V$$

$$n_2 = \frac{E_2}{E_n} * n_n = \frac{136}{217.5} * 2000 = 1250rpm$$

$$E_3 = U_a - I'_{a_{min}} * R_{st3} = 240 - 99 * 0.69 = 172V$$

$$n_3 = \frac{E_3}{E_n} * n_n = \frac{172}{217.5} * 2000 = 1582rpm$$

$$E_4 = U_a - I'_{a_{min}} * R_{st4} = 240 - 99 * 0.46 = 194V$$

$$n_4 = \frac{E_4}{E_n} * n_n = \frac{194}{217.5} * 2000 = 1784rpm$$

### חישוב זמן התנעה

ניתן לחשב את זמן ההתנעה לפי הנוסחה:

$$t = \frac{GD^2}{375} * \frac{n_2 - n_1}{M_{st(av)} - M_s} [sec]$$

כאשר:

$GD^2$  - מומנט התנופה  $[kgf * m^2]$ .

$n_1$  - המהירות ההתחלתית  $[rpm]$ .

$n_2$  - המהירות הסופית  $[rpm]$ .

$M_{st}$  - מומנט ההתנעה  $[kgf * m]$ .

$M_s$  - מומנט העומס  $[kgf * m]$ .

### תרגיל דוגמא:

חשב לפי נתוני התרגיל הקודם את זמן ההתנעה של הדרגה הראשונה, כאשר ידוע כי מומנט התנופה הכולל המועבר לציר המנוע הוא-  $GD^2 = 2.5 kgf * m^2$ , והמומנט הנגדי של העומס שווה למומנט הנקוב בכל טווח המהירות.

### פתרון לתרגיל דוגמא:

המהירות ההתחלתית היא  $0 rpm$ .

המהירות הסופית של הדרגה הראשונה היא  $750rpm$ .

המומנט הנגדי של העומס שווה לפי הנתון למומנט הנקוב ולכן-

$$M_s = M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_n} = \frac{9.55 * 15 * 10^3}{2000} = 71.625Nm$$

נמיר את היחידות ל- $kgf * m$

$$M_s = \frac{71.625}{9.81} = 7.3 kgf * m$$

נחשב את המומנט ההתנעה של המנוע, אך כיוון שמומנט ההתנעה של המנוע משתנה בתהליך ההתנעה, נחשב את מומנט ההתנעה הממוצע-

$$P_{em_n} = E_n * I_{a_n} = 217.5 * 75 = 16.313Kw$$

$$M_{em_n} = \frac{9.55 * P_{em_n}}{n_n} = \frac{9.55 * 16.313 * 10^3}{2000} = 77.89Nm$$

$$M_{st_{max}} = \frac{I_{max}}{I_{a_n}} * M_{em_n} = \frac{150}{75} * 77.89 = 155.78Nm$$

$$M_{st_{min}} = \frac{I_{min}}{I_{a_n}} * M_{em_n} = \frac{90}{75} * 77.89 = 93.47Nm$$

$$M_{st_{av}} = \frac{M_{st_{max}} + M_{st_{min}}}{2} = \frac{155.78 + 93.47}{2} = 124.625Nm$$

נמיר את היחידות ל- $kgf * m$

$$M_{st(av)} = \frac{124.625}{9.81} = 12.704 kgf * m$$

$$t = \frac{GD^2}{375} * \frac{n_2 - n_1}{M_{st(av)} - M_s} = \frac{2.5}{375} * \frac{750 - 0}{12.704 - 7.3} = 0.925 [sec]$$

התנעת מנוע השראה באמצעות מתנע דרגתי

תרגיל דוגמא:

למנוע השראה תלת מופעי בעל רוטור מלוכף הנתונים הנקובים הבאים:

$$P_n = 15Kw ; U_{1n} = 400V(Y) ; I_{1n} = 31.5A ; f = 50Hz ; E_{20} = 361V(Y) ;$$

$$n_n = 970rpm ; I_{2n} = 25A ; \frac{M_k}{M_n} = 2.5$$

ניתן להניח כי ההפסדים המכניים והפסדי הברזל ברוטור זניחים.

א. חשב את התנגדות הרוטור למופע, החליקה הקריטית של המנוע המקורי.

ב. יש לתכנן למנוע זה מתנע דרגתי בשיטה האנליטית כך ש-

$$M_{MAX} = 2.25 * M_n ; M_{min} = 1.1 * M_n$$

קבע את מספר דרגות המתנע, את ההתנגדות עבור כל דרגה ודרגה ואת המהירויות בהן

יבוצעו קיצורי הנגדים.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$n_2 = 970rpm \Rightarrow n_1 = 1000rpm$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0.03$$

$$E_{20ph} = \frac{E_{20}}{\sqrt{3}} = \frac{361}{\sqrt{3}} = 208.423V$$

$$U_{1ph} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231V$$

$$R_2 = \frac{E_{20ph} * s}{I_{2ph}} = \frac{208.423 * 0.03}{25} = 0.25\Omega$$

$$s_k = \frac{M_k}{M_n} * s_n * \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{M_k}{M_n}\right)^2}} \right] = 2.5 * 0.03 * \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{1}{2.5^2}} \right] = 0.144$$

ב.

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_n} = \frac{9.55 * 15 * 10^3}{970} = 147.68[Nm]$$

$$M_{max} = 2.25 * M_n = 2.25 * 147.68 = 332.28[Nm]$$

$$M_{min} = 1.1 * M_n = 1.1 * 147.68 = 162.448[Nm]$$

לקביעת ההתנגדות הנוספת לויסות מהירות הרוטור יש להתייחס למומנט בהתנעה ובמצב זה החליקה הקריטית שווה ל-1.

$$R_v = R_2 * \left( \frac{M_n}{M_{max}} * \frac{s_{max}}{s_n} - 1 \right) = 0.25 * \left( \frac{147.68}{332.38} * \frac{1}{0.03} - 1 \right) = 3.45\Omega$$

$$R_s = R_2 + R_v = 0.25 + 3.45 = 3.7\Omega$$

$$C = \frac{M_{min}}{M_{max}} = \frac{1.1}{2.25} = 0.489$$

$$m = \frac{\ln \frac{R_2}{R_s}}{\ln C} = \frac{\ln \frac{0.25}{3.7}}{\ln 0.489} = 3.76$$

$$m' = 4$$

$$\ln C' = \frac{\ln \frac{R_2}{R_s}}{m'} = \frac{\ln \frac{0.25}{3.7}}{4} = -0.6737$$

$$C' = e^{\ln C'} = e^{-0.6737} = 0.51$$

$$R_{vn} = R_s * C'^{(n-1)}$$

$$R_{v1} = R_s * C'^{(n-1)} = 3.7 * 0.51^{(1-1)} = 3.7\Omega$$

$$R_{v2} = R_s * C'^{(n-1)} = 3.7 * 0.51^{(2-1)} = 1.887\Omega$$

$$R_{v3} = R_s * C'^{(n-1)} = 3.7 * 0.51^{(3-1)} = 0.962\Omega$$

$$R_{v4} = R_s * C'^{(n-1)} = 3.7 * 0.51^{(4-1)} = 0.49\Omega$$

$$R_v = R_2 * \left( \frac{M_n}{M_v} * \frac{s_v}{s_n} - 1 \right)$$

$$M_n = M_v$$

$$R_v = R_2 * \left( \frac{s_v}{s_n} - 1 \right) \Rightarrow s_v = s_n * \left( \frac{R_v}{R_2} + 1 \right)$$

$$s_{v1} = s_n * \left( \frac{R_{v1}}{R_2} + 1 \right) = 0.03 * \left( \frac{3.7}{0.25} + 1 \right) = 0.474$$

$$s_{v2} = s_n * \left( \frac{R_{v2}}{R_2} + 1 \right) = 0.03 * \left( \frac{1.887}{0.25} + 1 \right) = 0.256$$

$$s_{v3} = s_n * \left( \frac{R_{v3}}{R_2} + 1 \right) = 0.03 * \left( \frac{0.962}{0.25} + 1 \right) = 0.145$$

$$s_{v4} = s_n * \left( \frac{R_{v4}}{R_2} + 1 \right) = 0.03 * \left( \frac{0.49}{0.25} + 1 \right) = 0.089$$

$$n_{v1} = n_1 * (1 - s_{v1}) = 1000 * (1 - 0.474) = 526rpm$$

$$n_{v2} = n_1 * (1 - s_{v2}) = 1000 * (1 - 0.256) = 744rpm$$

$$n_{v3} = n_1 * (1 - s_{v3}) = 1000 * (1 - 0.145) = 855rpm$$

$$n_{v4} = n_1 * (1 - s_{v4}) = 1000 * (1 - 0.089) = 911rpm$$

**בלימת מנוע לזרם ישר**

על מנת לבלום או להאט את מהירות המכונה ניתן להשתמש בבולם מכני, אך ניתן לבלום את מהירות המכונה בנוסף לבלום המכני גם באמצעות המנוע ע"י שיטות אלקטרומגנטיות, שמשמעותן הפיכת משטר המכונה ממוטורי לגנרטורי. במצב זה המכונה מייצרת מומנט אלקטרומגנטי אשר מנוגד לכיוון סיבוב העוגן ובכך גורמת לבלימת סיבוב הציר.

קיימות 3 שיטות בלימה אלקטרומגנטית:

- בלימה גנרטורית- כאשר מהירות ציר המנוע גבוהה ממהירות הריקם האידיאלי (כדוגמא בניתוק העומס המכני). במצב זה כא"מ המנוע גדול ממתח הרשת, וזרם העוגן הופך את כיוונו. עקב כך נוצר מומנט בלימה, המנוע עובד כגנרטור ומחזיר מתח לרשת.
- בלימה דינאמית- כאשר מנתקים את רוטור המנוע ממקור הזינה ומקצרים אותו באמצעות נגד, וסליל העירור עדין מחובר למתח. במצב זה מתפתח ברוטור זרם גבוה כתוצאה מהכא"מ נגדי במוליכי סליל הרוטור, כיוון זרם הבלימה מנוגד לכיוונו הרגיל, ועקב כך מתפתח ברוטור מומנט בלימה.
- שיטת חיבור נגדי-כאשר הופכים את כיוון מתח זינת העוגן, הרוטור ממשיך להסתובב מתוך אנרציית הסיבוב שלו אך בכיוון המנוגד לכיוון המומנט האלקטרומגנטי שלו ובמצב זה מתפתח מומנט בלימה. במצב זה למתח ולכא"מ כיוונים זהים והזרם ברוטור במצב זה יכול להגיע לערכים גבוהים כפי 2 מזרם ההתנעה. על מנת להגביל את הזרם הזה מחברים נגד  $R_b$  בטור לעוגן. את מתח הזינה יש לנתק מיד עם עצירת המנוע שאם לא כך המנוע יתחיל להסתובב בכיוון ההפוך.

תרגיל דוגמא

נתון מנוע זרם ישר בעירור זר בעל הנתונים הבאים:

$$P_n = 40Kw ; U_a = 420V ; I_a = 100A ; R_a = 0.2\Omega ; R_e = 120\Omega ; U_e = 240V ; n_n = 2000rpm$$

ניתן להזניח את הפסדי הריקם (חיכוך וברזל) של המנוע.

- איזה נגד נוסף יש לחבר בטור לעוגן כדי שהמכונה תעבוד בבלימה גנרטורית, במהירות של 3000rpm ובמומנט בלימה נקוב על הציר.
- המכונה עובדת בבלימה דינמית כאשר מחובר לעוגן נגד של  $2.3\Omega$ . מה מומנט הבלימה במהירות של 2000rpm ובמהירות של 1500rpm ומה המהירות והזרם בסיום הבלימה.
- המנוע עובד בתנאיו הנקובים, מה גודל הנגד שיש לחבר בטור לעוגן, כדי להגביל את זרם הבלימה בשיטת "החיבור הנגדי" ל-150A, וחשב את הערך ההתחלתי של מומנט הבלימה.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$E_n = U_a - I_a * R_a = 420 - 100 * 0.2 = 400 V$$

$$E = E_n * \frac{n}{n_n} = 400 * \frac{3000}{2000} = 600V$$

כיוון שהמנוע עובד במומנט הנקוב וכגנרטור

$$E = U_a + I_a * (R_a + R_x)$$

$$R_x = \frac{E - U_a}{I_a} - R_a = \frac{600 - 420}{100} - 0.2 = 1.6\Omega$$

ב.

בבלימה דינמית רוטור המנוע מנותק ממקור הזינה ומקוצר ע"י נגד כאשר סליל העירור עדין מחובר למתח.

עבור מהירות 2000rpm-

$$E = E_n = 400V$$

$$E = U_a - I_a' * (R_a + R_x) \Rightarrow I_a' = \frac{U_a - E}{(R_a + R_x)} = \frac{0 - 400}{(0.2 + 2.3)} = -160A$$

הסימן (-) מסמן את כיוונו הנגדי של הזרם.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

$$P_{em_n} = P_n = 40Kw$$

$$M_{em_n} = \frac{9.55 * P_{em_n}}{n_n} = \frac{9.55 * 40 * 10^3}{2000} = 191Nm$$

$$\frac{M_{em'}}{M_{em_n}} = \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} \Rightarrow M_{em'} = M_{em_n} * \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} = 191 * \frac{-160}{100} = -305.6 Nm$$

הסימן (-) מסמן כי המומנט הוא ממונט בלימה.

עבור מהירות 1500rpm-

$$E = E_n * \frac{n}{n_n} = 400 * \frac{1500}{2000} = 300V$$

$$E = U_a - I_{a'} * (R_a + R_x) \Rightarrow I_{a'} = \frac{U_a - E}{(R_a + R_x)} = \frac{0 - 300}{(0.2 + 2.3)} = -120A$$

הסימן (-) מסמן את כיוונו הנגדי של הזרם.

$$P_{em_n} = P_n = 40Kw$$

$$\frac{M_{em'}}{M_{em_n}} = \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} \Rightarrow M_{em'} = M_{em_n} * \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} = 191 * \frac{-120}{100} = -229.2 Nm$$

הסימן (-) מסמן כי המומנט הוא ממונט בלימה.

בסוף תהליך הבלימה מהירות המנוע שווה ל-0 והמנוע צורך מהרשת רק את זרם העירור בלבד.

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{240}{120} = 2A$$

ג.

בשיטת חיבור הנגדי רוטור המנוע מסתובב מתוך האינרציה שלו, בכיוון המנוגד לכיוון המומנט האלקטרומגנטי. במצב זה המתח והכא"מ בכיוונים זהים. להגבלת זרם המנוע מחברים נגד בטור לעוגן ולכן.

$$-E_n = U_a - I_{a'} * (R_a + R_b) \Rightarrow R_b = \frac{U_a + E_n}{I_{a'}} - R_a = \frac{420 + 400}{150} - 0.2 = 5.27\Omega$$

$$\frac{M_{br}}{M_{em_n}} = \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} \Rightarrow M_{br} = M_{em_n} * \frac{I_{a'}}{I_{a_n}} = 191 * \frac{150}{100} = 286.5[Nm]$$

חישוב זמן הבלימה

את זמן הבלימה מתחילת הבלימה ועד לעצירה מוחלטת ניתן לחשב לפי:

$$t = \frac{GD^2}{375} * \frac{n_1 - n_2}{M_{br} + M_s} [sec]$$

כאשר:

$GD^2$  - מומנט התנופה  $[kgf * m^2]$ .

$n_1$  - המהירות ההתחלתית [rpm].

$n_2$  - המהירות הסופית [rpm].

$M_{br}$  - מומנט הבלימה  $[kgf * m]$ .

$M_s$  - מומנט העומס הנגדי  $[kgf * m]$ .

חישוב הספק מנוע בעבודה עם הפסקות מחזוריות

חישוב הספק מנוע הפועל עם הפסקות מחזוריות המוצג באמצעות דיאגרמת העמסה בתלות בזמן באמצעות הנוסחאות הבאות:

חישוב מומנט העומס הממוצע באמצעות הנוסחה הכללית הבאה:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 * \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}} [Nm]$$

מומנט ממוצע של לפרק זמן מסוים ניתן לחשב באמצעות:

$$M_i = \sqrt{\frac{M_{max}^2 + M_{min}^2 + M_{max} * M_{min}}{3}} [Nm]$$

זרם ממוצע של לפרק זמן מסוים ניתן לחשב באמצעות:

$$I_i = \sqrt{\frac{I_{max}^2 + I_{min}^2 + I_{max} * I_{min}}{3}} [A]$$

חישוב הספק המנוע הדרוש בעבודה ממושכת (ללא הפסקות) באמצעות:

$$P_e = \frac{M_e * n}{9.55}$$

או באמצעות:

$$P_e = U_n * I_e * \eta ; P_e = \sqrt{3} * U_n * I_e * \eta$$

הנוסחה הכוללת לחישוב מומנט העומס הממוצע בתלות בהרעת הקירור היא:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 * t_1 + M_2^2 * t_2 + \dots + M_n^2 * t_n}{\beta * (t_s + t_b) + \alpha * t_0 + \sum t_\omega}} [Nm]$$

הנוסחה הכוללת לחישוב זרם העומס הממוצע בתלות בהרעת הקירור היא:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 * t_1 + I_2^2 * t_2 + \dots + I_n^2 * t_n}{\beta * (t_s + t_b) + \alpha * t_0 + \sum t_\omega}} [A]$$

כאשר:

$t_s$  - זמן התנעה (sec).

$t_b$  - זמן בלימה (sec).

$t_\omega$  - זמן עבודה (sec).

$t_0$  - זמן מנוחה (sec).

$\alpha$  - מקדם הרעת קירור בזמן הפסקה התלוי בסוג האוורור:

עבור אוורור זר  $\alpha = 1$

עבור אוורור עצמי  $\alpha < 1$

$\beta$  - מקדם הרעת קירור בזמן התנעה או בלימה התלוי בסוג האוורור:

עבור אוורור זר  $\beta = 1$

עבור אוורור עצמי  $\beta < 1$



## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

חישוב היחס בין הספק מנוע כל שהוא לבין הספק הנדרש בעבודה מחזורית:

$$\varepsilon = \left( \frac{P_{\varepsilon}}{P_e} \right)^2$$

חישוב חלק זמן העבודה היחסי במשטר עבודה עם הפסקות מחזוריות:

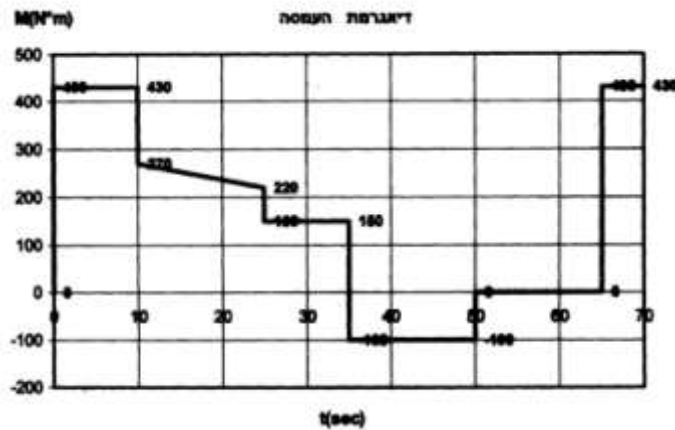
$$\varepsilon = \frac{\beta * (t_s + t_b) + \sum t_{\omega}}{\beta * (t_s + t_b) + \alpha * t_0 + \sum t_{\omega}}$$

חישוב זמן מנוחה מינימאלי:

$$t_0 = \frac{\beta * (t_s + t_b) + \sum t_{\omega} - (\beta * (t_s + t_b) + \sum t_{\omega})}{\alpha}$$

### תרגיל דוגמא:

במפעל צריכים להפעיל מנוע לזרם ישר בעירור מקבילי אשר דיאגרמת ההעמסה שלו נתונה באיור הבא. מהירות המנוע הנקובה 720 rpm.



- א. חשב את הספק המנוע הדרוש אם המנוע עובד באורור זר  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 1$ .
- ב. חשב את הספק המנוע הדרוש אם המנוע עובד באורור עצמי  $\alpha = 0.5$ ;  $\beta = 1$ .
- ג. במפעל החליטו להשתמש במנוע שהיה ברשותם שהספקו הנקוב 15Kw, מהירותו הנקובה 720rpm ועובד באורור עצמי. חשב את זמן המנוחה המינימאלי הנחוץ במחזור עבודה של המנוע.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

פתרון לתרגיל דוגמא:

מהדיאגרמה ניתן לקבוע את משטר העבודה של המנוע:  
 משך זמן המחזור  $t_p = 65sec$ , זמן העבודה  $t_w = 25sec$ , זמן המנוחה  $t_0 = 15sec$ ,  
 זמן ההתנעה  $t_s = 10sec$ , זמן הבלימה  $t_b = 15sec$ .  
 נחשב את המומנט הממוצע בקטע המשופע-

$$M_2 = \sqrt{\frac{M_{max}^2 + M_{min}^2 + M_{max} * M_{min}}{3}} = \sqrt{\frac{270^2 + 220^2 + 270 * 220}{3}} = 245 [Nm]$$

א.

נחשב את מומנט העומס הממוצע באזור זר-

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 * t_1 + M_2^2 * t_2 + M_3^2 * t_3 + M_4^2 * t_4}{\beta * (t_s + t_b) + \alpha * t_0 + \sum t_w}}$$

$$M_e = \sqrt{\frac{430^2 * 10 + 245^2 * 15 + 150^2 * 10 + 100^2 * 15}{1 * (10 + 15) + 1 * 15 + 25}} = 219.243 [Nm]$$

נחשב את הספק המנוע בעבודה באזור זר-

$$P_e = \frac{M_e * n}{9.55} = \frac{219.243 * 720}{9.55} = 16.529 Kw$$

ב.

נחשב את מומנט העומס הממוצע באזור עצמי-

$$M_e = \sqrt{\frac{430^2 * 10 + 245^2 * 15 + 150^2 * 10 + 100^2 * 15}{1 * (10 + 15) + 0.5 * 15 + 25}} = 233.103 [Nm]$$

נחשב את הספק המנוע בעבודה באזור עצמי-

$$P_e = \frac{M_e * n}{9.55} = \frac{233.103 * 720}{9.55} = 17.574 Kw$$

ג.

נחשב את מומנט העומס בעבודה ממושכת בקירור עצמי (ללא הפסקות)

$$M_e = \sqrt{\frac{430^2 * 10 + 245^2 * 15 + 150^2 * 10 + 100^2 * 15}{1 * (10 + 15) + 0.5 * 0 + 25}} = 250 [Nm]$$

נחשב את הספק המנוע בעבודה ממושכת באזור עצמי-

$$P_e = \frac{M_e * n}{9.55} = \frac{250 * 720}{9.55} = 18.848 Kw$$

נחשב זמן העבודה היחסי עבור מנוע 15Kw באזור עצמי-

$$P_\varepsilon = P_e * \sqrt{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon = \left(\frac{P_\varepsilon}{P_e}\right)^2 = \left(\frac{15}{18.848}\right)^2 = 0.633$$

נחשב את זמן המנוחה של המנוע באזור עצמי-

$$t_0 = \frac{\frac{\beta * (t_s + t_b) + \sum t_w}{\varepsilon} - (\beta * (t_s + t_b) + \sum t_w)}{\alpha} =$$

$$t_0 = \frac{\frac{1 * (10 + 15) + 25}{0.633} - (1 * (10 + 15) + 25)}{0.5} = 58 sec$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

חישוב הספק מרבי של מנוע בעבודה בטמפרטורת סביבה שונה מהתקנית בתקן הישראלי 298 מוגדרים תנאים לעבודה של מנועים אסינכרוניים. בתנאי עבודה רגילים, מוגדרת הטמפרטורה של האוויר בסביבת המנוע שלא תעלה על 40°C. כאשר הטמפרטורה הסביבתית גבוהה מהטמפרטורה התקנית, יש להקטין את הספק ההעמסה של המנוע ביחס להספק הנומינאלי של המנוע, ואילו במקרים שהטמפרטורה של הסביבה נמוכה מהטמפרטורה התקנית ניתן להגדיל את העומס של המנוע מעל לעומס הנקוב שלו. הטמפרטורה המרבית שבו יכול לעמוד מנוע כלשהו תלויה בסוג החומרי הבידוד ששמשו לבנייתו, ואילו הפרש הטמפרטורה תלויה בהפסדים שנוצרים במנוע. להלן טבלת קבוצות חומרי בידוד לפי תקן IEC:

קבוצת חומר בידוד	קבוצת חומר בדוד	קבוצת משנה
כותנה, משי טבעי נייר ומוצרי נייר, פרשפן, פיבר וולקני עץ, פרינקס	עמיד בחום עד 90 °C	a
פוליקרילט, פוליאטילן, פוליסטרול, P.V.C קשה P.V.C רך, גומי טבעי	90 °C	b
כותנה, משי טבעי, נייר ומוצרי נייר, פריטפן, פיבר וולקני, עץ - בתנאי שהם ספוגים ע"י חומרי בדוד נוזליים וקבלו טפול טרמי כמו כן כל החומרים הנ"ל מצופים לקה. חוטי לפוף מצופים לקה, חוטי לפוף מצופים פוליאמיד, חוטי ליפוף מצופים פוליויניל - אצטל - פולימיד	עמיד בחום עד 105 °C	a
גומי מלאכותי על בסיס פוליכלורופרן - אלסטומר	105 °C	b
כותנה, משי טבעי, נייר - בתנאי שהם ספוגים בחומר מבדד נוזלי וקבלו טפול טרמי. כמו כן החומרים הנ"ל מצופים לקה, נייר קשה, אריגים מוקשים, בקליט, מיילר, מלינקס, הוסטפן, טרילן, דקרון, חוטים ללפוף עם בדוד-אפוקסי, חוטים ללפוף עם בדוד פוליאוריטן	עמיד בחום עד 120 °C	b
מיקה בשכבות, מוצרי מיקה דחוסים בתוספת מבדדים נוזליים כמו שלק אטפלט, ביטומין, סיבי זכוכית או אזבסט ספוגים בחומר נוזלי מבדד בקליטו למיניהם	עמיד בחום עד 130 °C	a
שרפים אפוקסיים יצוקים	130 °C	b
מוצרי מיקה בשכבות עם דבק, מיקנית בחוספות מבדדים נוזליים ויצוקים כמו אפוקסי	עמיד בחום עד 155 °C	b
מיקה מובחרת עם תוספת של מקשרים סיליקוניים, מיקנית כנ"ל, סיבי זכוכית ואזבסט ספוגים בסיליקונים, סילקון - אלסטומר	עמיד בחום עד 180 °C	a
חוטי לפוף מצופים פוליאמיד - אמיד, או פוליאסטר או סיבי זכוכית מלאכותיים	180 °C	b
זכוכית, מיקה, קוורץ, חרסינה, סטאטיט	עמיד בחום מעל 180 °C	a
חומרים על בסיס פוליטטרה - פלואור - אטילן	180 °C	b

על מנת לחשב את הספק העמסה המותר למנוע העובד בטמפרטורה שונה מהתקנית נעזר בנוסחה הבאה:

$$P_{T^{\circ}} = P_n * \sqrt{\left(\frac{T_0 - T_2}{T_0 - T_1} - \frac{\Delta P_0}{\Delta P}\right) * \frac{1}{\frac{\Delta P_k}{\Delta P}}}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

כאשר:

$P_T$  - הספק העמסה מותר בטמפרטורה שונה מהתקנית.

$P_n$  - הספק נקוב של המנוע.

$T_{max}$  - טמפרטורה מקסימאלית של המנוע בהתאם לסוג הבידוד (בהתאם לטבלה או הנתון).

$T_1$  - טמפרטורה סביבתית תקנית ( $40^{\circ}\text{C}$ ).

$T_2$  - טמפרטורה סביבתית בו פועל המנוע.

$\frac{\Delta P_k}{\Delta P}$  - הפסדים המשתנים של המנוע מסך ההפסדים בעומס נומינאלי (בשבר עשרוני).

$\frac{\Delta P_0}{\Delta P}$  - ההפסדים הקבועים של המנוע מסך ההפסדים בעומס נומינאלי (בשבר עשרוני)

תרגיל דוגמא:

מנוע בהספק נקוב של 20KW פועל בסביבה של  $60^{\circ}\text{C}$ . מה ההספק שמותר להעמיס את המנוע כאשר נתון כי ההפסדים הקבועים הם 40% מסך ההפסדים בעומס נקוב, וההפסדים המשתנים הם 60% מסך ההפסדים בעומס נקוב. המנוע בנוי מחומרי בידוד מקבוצת B.

פתרון לתרגיל דוגמא:

לפי קבוצת הבידוד ניתן לקבוע לפי הטבלה שהטמפרטורה המקסימאלית לעבודת המנוע היא  $130^{\circ}\text{C}$ .

$$P_T = P_n * \sqrt{\left(\frac{T_{max} - T_2}{T_{max} - T_1} - \frac{\Delta P_0}{\Delta P}\right) * \frac{1}{\frac{\Delta P_k}{\Delta P}}} = 20 * 10^3 * \sqrt{\left(\frac{130 - 60}{130 - 40} - 0.4\right) * \frac{1}{0.6}} = 16KW$$

חישוב הספק מנוע בעבודה בפרק זמן מסוים באמצעות קבוע זמן תרמי ( $\tau$ )

$$P(t_\omega) = P_n \left(1 - e^{-\frac{t_\omega}{\tau}}\right)$$

תרגיל דוגמא:

חשב את הספק המנוע שהספקו הנקוב 20KW העובד במשך 8.5 min כאשר קבוע הזמן התרמי שלו 30min.

פתרון לתרגיל דוגמא:

$$P(t_\omega) = P_n \left(1 - e^{-\frac{t_\omega}{\tau}}\right) = 20 * 10^3 * \left(1 - e^{-\frac{8.5}{30}}\right) = 5KW$$

חישוב הספק מרבי של מנוע בעבודה מחזורית באמצעות קבוע זמן תרמי ( $\tau$ )

$$P_{max} = P_n * \sqrt{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_\omega}{\tau}}}\right) * \frac{1}{\frac{\Delta P_k}{\Delta P}} - \frac{\Delta P_0}{\Delta P}}$$

תרגיל דוגמא:

קבע את ההספק המרבי שניתן להעמיס מנוע בעל הספק נקוב של 15KW אם הוא מועמס לפרק זמן של 15 דקות וקבוע הזמן התרמי שלו 60 דקות.

הנח כי ההפסדים הקבועים שווים להפסדים המשתנים וכן כי המנוע עובד בטמפרטורה סביבתית של  $40^{\circ}\text{C}$ .

פתרון לתרגיל דוגמא:

$$P_{max} = P_n * \sqrt{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_\omega}{\tau}}}\right) * \frac{1}{\frac{\Delta P_k}{\Delta P}} - \frac{\Delta P_0}{\Delta P}} = 15 * 10^3 * \sqrt{\left(\frac{1}{1 - e^{-\frac{15}{60}}}\right) * \frac{1}{0.5} - \frac{0.5}{0.5}} = 42.5KW$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### התחממות ופזור חום של מנועים

לצורך חישובי טמפרטורה במנועים יש צורך במספר נתונים של המנוע:

$$\frac{W*s}{Kg*^{\circ}C} \quad C \text{ ויחידותיו}$$

משקל המנוע  $G$  ויחידותיו  $Kg$

$$\frac{W}{m^2*^{\circ}C} \quad \alpha \text{ ויחידותיו}$$

שטח פיזור החום  $A_{TH}$  ויחידותיו  $m^2$

שינוי הטמפרטורה סביבתית בו פועל המנוע  $\Delta T_0$  ויחידותיו  $^{\circ}C$

שינוי הטמפרטורה המנוע לאחר זמן מסוים בעבודה ממושכת  $\Delta T_{\omega}$  ויחידותיו  $^{\circ}C$

שינוי הטמפרטורה סופית של המנוע  $\Delta T_{\infty}$  ויחידותיו  $^{\circ}C$

שינוי הטמפרטורה מקסימאלית מותרת של המנוע בהתאם לסוג הבידוד  $\Delta T_{max}$  ויחידותיו  $^{\circ}C$

קבוע זמן תרמי  $\tau$ .

זמן פעולה של המנוע בעבודה ממושכת  $t_{\omega}$

את קבוע הזמן התרמי של המנוע ניתן לחשב לפי:

$$\tau = \frac{G * C}{\alpha * A_{TH}}$$

טמפרטורה של המנוע לאחר פעולה ממושכת מחשבים לפי:

$$\Delta T_{\omega} = \Delta T_{max} * (1 - e^{-\frac{t_{\omega}}{\tau}})$$

טמפרטורה סופית של מנוע לאחר פעולה ממושכת מחשבים לפי:

$$\Delta T_{\infty} = \Delta T_0 + \Delta T_{\omega} \quad ; \quad \Delta T_{\infty} = \frac{\Delta P}{\alpha * A_{TH}}$$

### תרגיל דוגמא:

למנוע השראה הנתונים הנקובים הבאים:

$$n = 1450rpm \quad ; \quad \eta = 0.84 \quad ; \quad G = 130kg$$

נתוני התרמיים של המנוע הם:

$$\alpha = 55 \left[ \frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right] \quad ; \quad A_{TH} = 1[m^2] \quad ; \quad C = 500 \left[ \frac{W * s}{Kg * ^{\circ}C} \right] \quad ; \quad T_0 = 30^{\circ}C$$

קבוצת חומר הבידוד של סלילי המנוע היא F.

ב. הנחה שהמנוע מגיע לאחר עבודה רצופה ממושכת לגבול הטמפרטורה המותרת.

א. חשב את הטמפרטורה שאליה מגיע המנוע לאחר עבודה ממושכת של 15 דקות.

ב. חשב את המומנט על ציר המנוע במצב זה.

### פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$\tau = \frac{G * C}{\alpha * A_{TH}} = \frac{130 * 500}{55 * 1} = 1182sec$$

$$\Delta T_{max} = T_{max} - \Delta T_0 = 155 - 30 = 125^{\circ}C$$

$$\Delta T_{\omega} = \Delta T_{max} * \left( 1 - e^{-\frac{t_{\omega}}{\tau}} \right) = 125 * \left( 1 - e^{-\frac{15*60}{1182}} \right) = 66.625^{\circ}C$$

$$\Delta T_{\infty} = \Delta T_0 + \Delta T_{\omega} = 30 + 66.625 = 96.625^{\circ}C$$

ב.

$$\Delta T_{\infty} = \frac{\Delta P}{\alpha * A_{TH}} \Rightarrow \Delta P = \Delta T_{\infty} * \alpha * A_{TH} = 96.625 * 55 * 1 = 5.314Kw$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{P_2}{\eta} - P_2 \Rightarrow P_2 = \frac{\Delta P * \eta}{1 - \eta} = \frac{5.314 * 10^3 * 0.84}{1 - 0.84} = 27.899Kw$$

$$M_2 = \frac{9.55 * P_2}{n_2} = \frac{9.55 * 27.899 * 10^3}{1450} = 183.749[Nm]$$

**פרק 5- מכונה סינכרונית**

**מבוא**

מכונה סינכרונית משמשת בעיקר כגנרטור בתחנות כוח, תפקידו ייצור אנרגיה חשמלית בעלת תדירות קבועה. בתחנות תרמו-חשמליות גנרטור סינכרוני מופעל באמצעות טורבינת קיטור ומפיק חשמל תוך כדי המרת אנרגיה מכנית לאנרגיה חשמלית.

מכונה סינכרונית יכולה לשמש גם כמנוע, ההבדלים העיקריים בין מנוע סינכרוני למנוע השראה הם:

1. מהירות קבועה שאינה תלויה בעומס המנוע.
2. יכולת ייצור הספק הגיבי.
3. עלות.

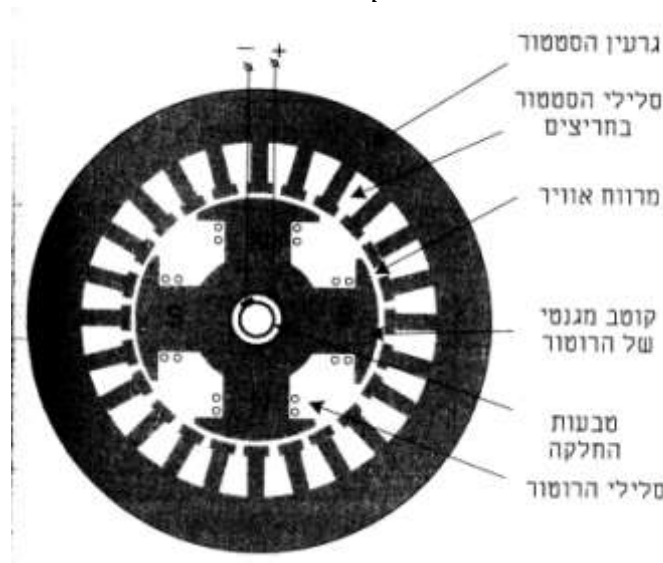
מכונה סינכרונית אשר מופעלת ללא עומס צירי (בריקם) יכולה לשמש כקבל סינכרוני (קבל מסתובב) ליצירת הספק היגבי לשם שיפור מקדם הספק המתקן או הרשת אך הדבר לא כדאי כלכלית ביחס לאלטרנטיביות הקימות.

הסטטור של מכונה סינכרונית זהה לסטטור של מנוע השראה.

הרוטור מהווה אלקטרו-מגנט בעל מספר זוגות קטבים  $p$ . סלילי הרוטור מחוברים למקור זרם ישר באמצעות מברשות וטבעות החלקה.

בין 2 השדות המגנטיים של הסטטור והרוטור נוצר קשר אלקטרו-מגנטי. מאחר ושדה הסטטור מסתובב במהירות סינכרונית  $n_1$  הרוטור מסתובב גם הוא באותה מהירות ומכאן  $n_1 = n_2$ . ומכאן שמה של המכונה סינכרונית (מתואם).

$$n = \frac{60 * f}{p}$$



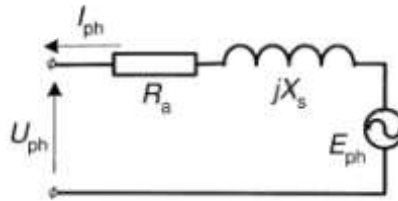
באופן עקרוני סלילי הרוטור של מכונה סינכרונית מהווים סליל עירור אשר תפקידם לעורר שטף מגנטי במכונה. לעומת זאת בסלילי הסטטור עובר זרם העומס של המכונה, ולכן הסטטור במכונה סינכרונית נקרא עוגן.

כאמור במכונה סינכרונית ישנם 2 שטפים מסתובבים: האחד שטף העוגן שנוצר בסטטור עקב שיתוף פעולה של השטפים המופעים, כמו בסטטור של מנוע השראה. והשני שטף הרוטור שנוצר בסלילי העירור ומסתובב במהירות הרוטור.

2 השדות מסתובבים באותו כיוון ובמהירות זהה, כאשר בעומס קבוע הזווית המכנית בין ה-2 נשארת קבועה. זווית זו מכונה "זווית הפיסק" וסימונה  $\delta$  (דלתא).

גנרטור סינכרוני

מעגל תמורה ודיאגרמה פאזורית



כאשר:

$X_s$  - היגב השראי למופע (נקרא גם היגב סינכרוני) של סלילי הסטטור.

$R_a$  - ההתנגדות האומית למופע של סלילי הסטטור.

$E_{ph}$  - כא"מ מושרה למופע בסלילי הסטטור הנובע מהשדה המגנטי של הרוטור.

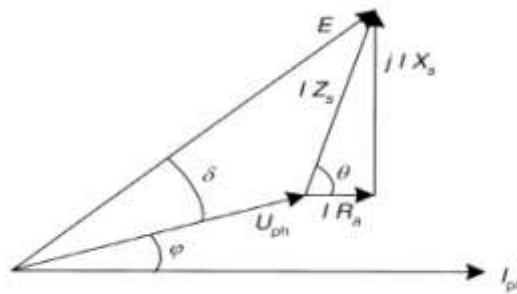
במעגל התמורה הרוטור אינו מיוצג אך השפעתו מיוצגת ע"י הכא"מ  $E_{ph}$  אשר גודלו תלוי בזרם העירור שבמוליכי הרוטור.

ההתנגדות  $R_a$  קטנה בהרבה מההיגב הסינכרוני  $X_s$  ולא פעם ניתן להזנחה.

בהתאם למעגל התמורה ניתן לרשום את משוואת המתחים למופע של עוגן הגנרטור לפי הביטוי הבא:

$$\vec{E} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} * (R_a + jX_s)$$

הדיאגרמה הפזורית של הגנרטור הסינכרוני מתואר באיור הבא:



כאשר:

$U_{ph}$  - מתח למופע על סליל העוגן (סטטור).

$E$  - הכא"מ המושרה בסליל העוגן (סטטור).

$-I R_a$  - מפל המתח על התנגדות העוגן למופע (סטטור).

$-j I X_s$  - מפל המתח על ההיגב הסינכרוני למופע.

$\varphi$  - זווית המופע התלוייה באופי העומס על הגנרטור.

$\theta$  - זווית פנימית התלוייה ביחס בין ההיגב להתנגדות עוגן הגנרטור.

$\delta$  - זווית הפיסוק זווית מכנית בין וקטור השטף ברטור שאילו צמוד ווקטור הכא"מ לבין וקטור שטף העוגן. ניתן לחשב זווית זו לפי הפרש הזוויות  $\delta = \varphi_U - \varphi_E$ .

וקטור שטף הרוטור בגנרטור הסינכרוני מקדים תמיד את וקטור השדה המסתובב של הסטטור, לכן וקטור הכא"מ בדיאגרמה מקדים את וקטור המתח ומכאן שזווית הפיסוק תהיה תמיד שלילית.

נהוג להגדיר את וקטור הזרם כציר הייחוס ז"א שזווית הזרם תמיד שווה ל-0 לכן ניתן לרשום את נוסחת כא"מ הגנרטור הצורה הבאה:

$$\vec{E} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} * (R_a + jX_s)$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### תרגיל דוגמא:

לגנרטור סינכרוני הנתונים הבאים:

$$U_n = 2300V; S_n = 2500KVA; X_{s\ ph} = 1.5\Omega; R_{a\ ph} = 0.1\Omega; \cos \varphi_n = 0.85$$

א. חשב את הכא"מ וזווית הפיסק עבור עומס נקוב.

ב. חשב את הכא"מ וזווית הפיסק עבור עומס של 900KW ובמקדם הספק של 0.6 השראי.

יש להניח כי סטטור המכונה מחובר בצורת כוכב.

### פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I_{ph} = I_L = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{2500 * 10^3}{\sqrt{3} * 2300} = 627.555 \angle -31.79^\circ A$$

$$\cos^{-1} \varphi = \cos^{-1} 0.85 = 31.79^\circ$$

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1327.91V$$

$$\vec{E} = \vec{U}_{ph} + I_{ph} * (R_a + jX_s) = 1327.19 \angle 31.79 + 627.555 * (0.1 + j1.5) = 2027.16 \angle 54.02^\circ V$$

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 31.79 - 54.02 = -22.23^\circ$$

ב.

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{900 * 10^3}{\sqrt{3} * 2300 * 0.6} = 376.533 \angle -53.13^\circ A$$

$$\cos^{-1} \varphi = \cos^{-1} 0.6 = 53.13^\circ$$

$$\vec{E} = \vec{U}_{ph} + I_{ph} * (R_a + jX_s) = 1327.19 \angle 53.13 + 376.533 * (0.1 + j1.5) = 1827.89 \angle 62.85^\circ V$$

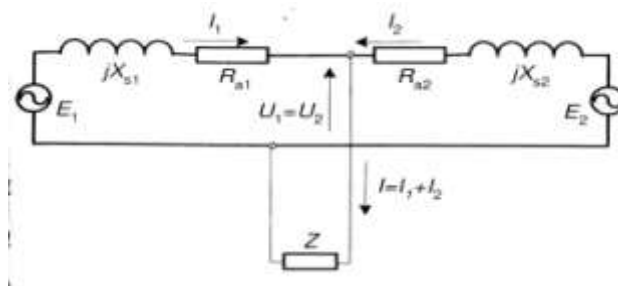
$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 53.13 - 62.85 = -9.72^\circ$$

### חיבור גנרטורים סינכרוניים במקביל

בעבודה במקביל של גנרטורים דומה לזו של שנאים במקביל. אך אם בשנאים העומס מתחלק לפי יחס קבוע השווה ליחס ההפוך של מתחי הקצר, בגנרטורים סינכרוניים ניתן לחלק את העומס בין הגנרטורים, באמצעות שינוי זרמי העירור. הגדלת זרם העירור גורמת להגדלת כא"מ הגנרטור, וכתוצאה מכך גדל הזרם המסופק ממנו לעומס המשותף.

כאשר 2 גנרטורים זהים מחוברים במקביל תרומת הגנרטור בעל זרם העירור הגדול יותר תהיה גדולה יותר לעומס המשותף.

### מעגל תמורה של חיבור 2 גנרטורים במקביל



### ויסות מתח גנרטור סינכרוני

מנוסחת חישוב הכא"מ של הגנרטור ובשינוי נושא נוסחה ניתן לחשב את מתח הגנרטור לפי-

$$\vec{U}_{ph} = \vec{E} - I_{ph} * (R_a + jX_s)$$

ניתן לראות שמתח הגנרטור תלוי בזרם בעומס שיוצר את מפל המתח המשתנה בסטטור.

כאמור ניתן לווסת את מתח הגנרטור באמצעות שינוי זרם העירור המשפיע על הכא"מ בהתאם.

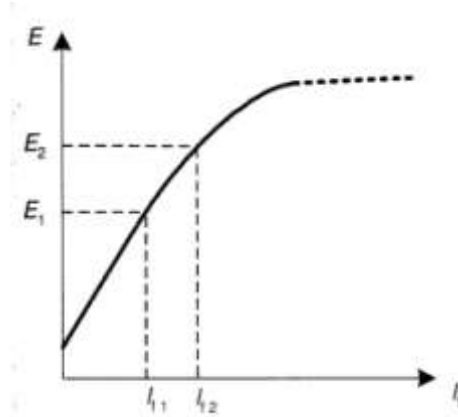
תלות כא"מ הגנרטור בזרם העירור נתונה ע"י עקום המגנט אשר צורתו תלויה בכמה גורמים:

א. סוג החומר (המתכת) שממנה עשויה ליבת הרוטור.

ב. במספר כריכות סלילי העירור.

ג. בגודל המרווח האוויר במכונה.





ניתן לראות מאופיין המיגנט כי בערכים נמוכים של זרמי העירור קיים יחס ליניארי בין הכא"מ לזרם העירור, ניתן לבטא זאת באמצעות היחס הבא:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{I_{f2}}{I_{f1}}$$

ובמצב זה "המכונה עובדת בתחום הליניארי של אופיין המיגנט".  
 בזרמי עירור גבוהים, חומר ליבת הרוטור נכנס לרוויה, והגדלת זרם העירור אינה משנה את השטף ברטור ומכאן אינה משנה את כא"מ המכונה.  
 לכן שליטה במתח הגנרטור מחייבת עבודה בתחום הליניארי של אופיין המיגנט.

תרגיל דוגמא:

2 מחוללים תלת מופעיים זהים, אשר סלילי הסטטור שלהם מחוברים בכוכב, מזינים עומס משותף בהספק של 25MVA ובגורם הספק השראי 0.6.

נתוני הגנרטורים הם:

$$S_n = 17.5 \text{ MVA} ; U_n = 24 \text{ KV} ; \cos \varphi_n = 0.8 ; Z_s = (0.5 + j10) \Omega / ph$$

כאשר אחד הגנרטורים עובד בעומס נקוב חשב:

- את חלוקת ההספקים הפעיל והעיוור בין הגנרטורים.
- את זרמי העירור של הגנרטורים בתחום הליניארי אם לקבלת מתח נקוב בריקם דרוש זרם עירור של 200A.
- את זווית הפיסק עבור כל גנרטור.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

נקבע שהגנרטור 1 עובד בהספק הנקוב שלו ולכן:

$$\vec{S}_1 = 17.5 \angle 36.87 = (14 + j10.5) \text{ MVA}$$

$$\vec{S}_2 = \vec{S}_L - \vec{S}_1 = 25 \angle 53.13 - 17.5 \angle 36.87 = 9.552 \angle 83.99 = (1 + j9.5) \text{ MVA}$$

ב.

נחשב את זרם העומס-

$$I_{ph} = I_L = \frac{S_L}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{25 * 10^6}{\sqrt{3} * 24 * 10^3} = 601.407 \angle -53.13 \text{ A}$$

נחשב את זרמים שתורם כל גנרטור לעומס

$$I_{ph1} = I_{L1} = \frac{S_1}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{17.5 * 10^6}{\sqrt{3} * 24 * 10^3} = 420.985 \angle -36.87 \text{ A}$$

$$I_{ph2} = I_{L2} = \frac{S_2}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{9.552 * 10^6}{\sqrt{3} * 24 * 10^3} = 229.785 \angle -83.99 \text{ A}$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

המתח הפאזי של הגנרטורים-

$$U_{Aph} = U_{Bph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{24 * 10^3}{\sqrt{3}} = 13.856 \text{ KV}$$

נחשב את הכא"מ של כל גנרטור-

$$\vec{E}_1 = \vec{U}_{1ph} + I_{1ph} * (R_a + jX_s) = 13.856 * 10^3 \angle 36.87 + 420.985 * (0.5 + j10) = 16.865 \angle 47.95 \text{ KV}$$

$$\vec{E}_2 = \vec{U}_{2ph} + I_{2ph} * (R_a + jX_s) = 13.856 * 10^3 \angle 83.99 + 229.796 * (0.5 + j10) = 16.154 \angle 84.44 \text{ KV}$$

כאשר הגנרטור עובד בריקם אין זרם בסלילי העוגן לכן במצב זה-

$$\vec{E}_{10} = \vec{U}_{1ph} = 13.856 \text{ KV} \quad ; \quad \vec{E}_{20} = \vec{U}_{2ph} = 13.856 \text{ KV}$$

ולפי הנתונים כדי לקבל כא"מ השווה למתח הפאזי דרוש זרם עירור של 200A ולכן

זרם העירור של גנרטור 1 יחושב-

$$\frac{E_1}{E_{10}} = \frac{I_{f1}}{I_{f0}} \Rightarrow I_{f1} = I_{f0} * \frac{E_1}{E_{10}} = 200 * \frac{16.865}{13.856} = 243.43 \text{ A}$$

זרם העירור של גנרטור 2 יחושב-

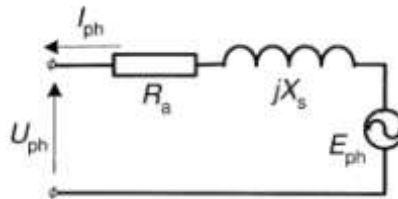
$$\frac{E_2}{E_{20}} = \frac{I_{f2}}{I_{f0}} \Rightarrow I_{f2} = I_{f0} * \frac{E_2}{E_{20}} = 200 * \frac{16.154}{13.856} = 233.17 \text{ A}$$

ג.

$$\delta_1 = \varphi_{U1} - \varphi_{E1} = 36.87 - 47.95 = -11.08^\circ$$

$$\delta_2 = \varphi_{U2} - \varphi_{E2} = 83.99 - 84.44 = -0.45^\circ$$

ניסוי קצר וריקם בגנרטור סינכרוני



בהתבוננות במעגל תמורה של גנרטור סינכרוני ניתן להבין כי:

בניסוי ריקם:

$$I_0 = 0 \text{ A}$$

כיוון שאין זרם דרך הרכיבים (סלילי הסטטור) לכן-

$$U_0 = U_{phn} = E_{ph0}$$

בניסוי קצר:

$$U_{ph} = U_k = 0 \text{ V}$$

$$I_{phn} = I_{phk} = I_s$$

ולכן-

$$\vec{E}_{phk} = \vec{U}_k + I_{phn} * (R_a + jX_s) = I_{phn} * (R_a + jX_s)$$

יחס הכא"מ בקצר ובריקם שווה ליחס זרמי העירור בקצר ובריקם לפי-

$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}}$$

תרגיל דוגמא:

לגנרטור סינכרוני תלת מופעי אשר סלילי הסטטור שלו מחוברים בכוכב בוצעו ניסויי ריקם וקצר בהתאמה:

בניסוי ריקם נמדדו:  $U_L=400V$  ;  $I_f=4.5A$

בניסוי הקצר נמדדו:  $I_s=400A$  ;  $I_f=6A$

בהנחה כי אופיין המיגנט ליניארי ובהזנחת ההתנגדות האומית של סלילי הסטטור חשב:

א. הכא"מ המחולל כאשר הוא מספק  $70kW$  ובמקדם הספק  $0.8$  השראי, והמתח השלוב על הדקיו הוא  $390V$ .

ב. הזווית בין הכא"מ למתח ההדקים.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$U_{phn} = E_{ph0} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231V$$

$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \Rightarrow E_{kph} = E_{0ph} * \frac{I_{fk}}{I_{f0}} = 231 * \frac{6}{4.5} = 308 V$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{P_L}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{70 * 10^3}{\sqrt{3} * 390 * 0.8} = 129.534 \angle -36.87A$$

$$\vec{E}_{phk} = I_{phn} * (R_a + jX_s)$$

ובהזנחת ההתנגדות האומית-

$$X_s = \frac{E_{phk}}{I_{phn}} = \frac{308}{400} = 0.77\Omega$$

$$U_{phn} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{390}{\sqrt{3}} = 225.167V$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + I_{ph} * (R_a + jX_s) = 225.167 \angle 36.87 + 129.534 * j0.77 = 295.971 \angle 52.51 V$$

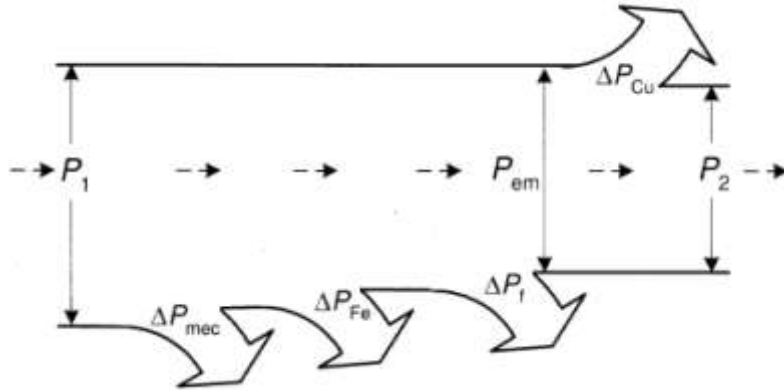
ב.

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 36.87 - 52.51 = -15.64^\circ$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### מאזן הספקים של גנרטור סינכרוני

את תהליך המרת האנרגיה בגנרטור סינכרוני ניתן לתאר באמצעות הדיאגרמה הבאה:



מנוע ראשוני או טורבינה מוסרים לציר הגנרטור הספק כניסה מכני  $P_1$ . חלק ממנו הולך לכיסוי ההפסדים המכניים במסבים  $\Delta P_{mec}$ , והפסדי הברזל בסטטור  $\Delta P_{Fe}$ . הפסדי העירור  $\Delta P_f$  שווים להספק מקור הזרם הישר אשר מזין את סלילי הרוטור. מקור זה יכול להיות גנרטור לזרם ישר אשר מותקן על צידו של הגנרטור.

כתוצאת מהמרת הפרש ההספק בין ההספק המושקע לבין ההפסדים הנ"ל מתקבל ההספק האלקטרומגנטי של הגנרטור הסינכרוני-

$$P_{em} = 3 * I_{ph} * E_{ph} * \cos \varphi_E$$

כאשר  $\varphi_E$  היא הזווית בין וקטור הכא"מ לבין וקטור הזרם.

חלק מההספק האלקטרומגנטי המושקע מתבזבז בסלילי העוגן (סטטור) כהפסדי נחושת-

$$\Delta P_{cu} = 3 * I_{ph}^2 * R_a$$

כאשר  $R_a$  התנגדות סלילי העוגן.

ההספק  $P_2$  מהווה את הספק היציאה של הגנרטור הסינכרוני-

$$P_2 = 3 * I_{ph} * U_{ph} * \cos \varphi$$

המומנט האלקטרומגנטי בגנרטור הסינכרוני מחושב לפי-

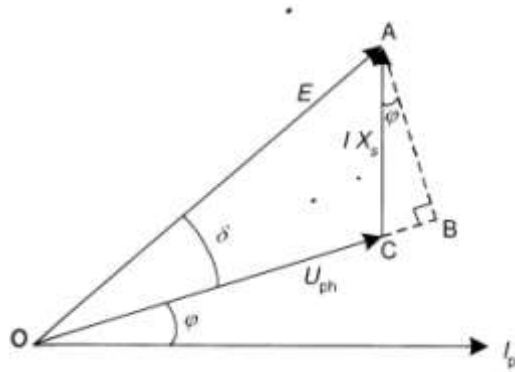
$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} [Nm]$$

המומנט הצירי (המתפתח בציר הגנרטור) מחושב לפי-

$$M_2 = \frac{9.55 * P_2}{n} [Nm]$$

יציבות הגנרטור הסינכרוני

בעזרת דיאגרמה פאזורית ניתן לרשום נוסחה עבור ההספק החשמלי של הגנרטור בתלות זווית הפיזיק:



מדיאגרמה זו ניתן לרשום את הביטויים הבאים:

$$AB = I_{ph} * X_s * \cos \varphi$$

$$AB = E_{ph} * \sin \delta$$

משוויון זה מתקבלת המשוואה:

$$I_{ph} * \cos \varphi = E_{ph} * \frac{\sin \delta}{X_s}$$

ואם נציב ביטוי זה בנוסחת ההספק החשמלי נקבל:

$$P = 3 * I_{ph} * U_{ph} * \cos \varphi = 3 * E_{ph} * U_{ph} * \frac{\sin \delta}{X_s}$$

מהמשוואה שהתקבלה ניתן לראות שבזרם עירור קבוע הספק הגנרטור תלוי רק בזווית המכנית  $\delta$ . (בהזנחת ההתנגדות האומית של סלילי הסטטור  $R_a$ ).

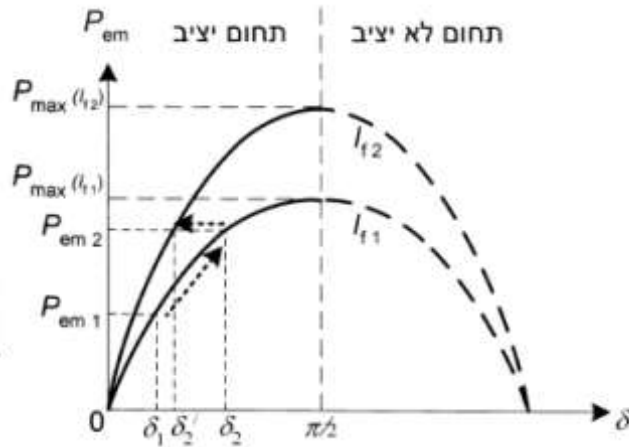
במידה ויש נתון של  $R_a$  ניתן לחשב את ההספק החשמלי באמצעות הנוסחה הבאה:

$$P = \frac{3 * U_{ph}}{Z_s} * [E_{ph} * \cos(\theta - \delta) - U_{ph} * \cos \theta]$$

כאשר  $\theta$  - היא הזווית בין הרכיב האומי של סליל העירור  $R_a$  לבין הרכיב ההיגבי של סליל העירור  $X_s$  וניתן לחשבה לפי-

$$\tan \theta = \frac{X_s}{R_a}$$

הגרף הבא מתאר את תלות ההספק החשמלי בזווית הפיסק  $\delta$  והוא נקרא "אופיין זוויתי של הגנרטור הסינכרוני":



לגרף זה צורה סינוסואלית והוא מחולק ל-2 תחומים: התחום השמאלי מתאר את עבודת יציבה של הגנרטור, והתחום הימני מתאר עבודה לא יציבה של הגנרטור ולכן אינו יכול לייצר הספק. כאשר הגנרטור עובד בהספק  $P_{em1}$  עם זווית פיסוק  $\delta_1$  ובזרם עירור  $I_{f1}$ , הגנרטור עובד בתחום היציב שלו ומייצר הספק. כאשר הספק העומס גדל הגנרטור יעבוד בהספק  $P_{em2}$  עם זווית פיסוק  $\delta_2'$  ובזרם עירור  $I_{f2}$ , והוא עדין עובד בתחום היציב שלו ומייצר הספק.

ניתן להגדיל את הספק הגנרטור גם בעזרת שינוי זווית הפסוק וזאת ע"י הגדלת כא"מ הגנרטור ובזרם עירור קבוע, ובמצב זה הגנרטור יעבוד בהספק  $P_{em2}$  עם זווית פיסוק  $\delta_2$  ובזרם עירור  $I_{f1}$ . וגם במצב זה הגנרטור בתחום היציב שלו ומייצר הספק.

ואם ההספק העומס ימשיך לגדול יגיע לערך המרבי שלו כפונקציה של זרם העירור שלו  $P_{max}$  או לחילופין אם נגדיל את זווית הפיסוק ע"י הגדלת כא"מ של הגנרטור וזווית הפיסוק תגיע לערך  $\frac{\pi}{2}$  ויותר, הגנרטור יכנס לתחום הלא יציב שלו ויפסיק לייצר הספק. ניתן למנוע את כניסת הגנרטור לתחום הלא יציב שלו באמצעות הגדלת זרם העירור. יש לבדוק אם הספק העומס אינו עובר את ההספק המקסימאלי של הגנרטור שאתו ניתן לחשב לפי-

$$P_{max} = \frac{3 * U_{ph}}{Z_s} * [E_{ph} * \cos(\theta - \delta) - U_{ph} * \cos \theta]$$

כאשר הספק מקסימאלי יתקבל כאשר  $\theta = \delta$ .

תרגיל דוגמא:

נתון גנרטור סינכרוני בעל הנתונים הנקובים הבאים:

$$P_n = 150kW ; U_n = 500V ; p = 1 ; \cos \varphi_n = 0.88 L ; f = 50Hz$$

סלילי הסטטור מחוברים בכוכב.

כאשר סלילי הסטטור מקוצרים ועובר דרכם זרם נקוב, זרם העירור בסלילי הרוטור מגיע ל- 4.8A. בריקם הגנרטור מייצר מתח של 500V כאשר זרם העירור שלו 2.5A. ההתנגדות האומית של סלילי הסטטור היא  $0.38\Omega$  לפאזה. יש להניח כי עקומת המיגנט של הגנרטור היא ליניארית. חשב:

א. הכא"מ הפנימי של הגנרטור כאשר הוא עמוס ב- 115KW וגורם הספק של 0.84 קיבולי, ובמתח של 500V.

ב. המומנט האלקטרומגנטי במצב זה.

ג. בדוק את יציבות הגנרטור במצב זה.

א.

$$U_{phn} = E_{ph0} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288.675V$$

$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{I_{fk}}{I_{f0}} \Rightarrow E_{kph} = E_{0ph} * \frac{I_{fk}}{I_{f0}} = 288.675 * \frac{4.8}{2.5} = 554.256 V$$

$$I_{phn} = I_{Ln} = \frac{P_{Ln}}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{150 * 10^3}{\sqrt{3} * 500 * 0.88} = 196.824 \angle -28.36A$$

$$U_{ph} = U_k = 0V$$

$$Z_s = \frac{E_{phk}}{I_s} = \frac{E_{phk}}{I_n} = \frac{554.256}{196.824} = 2.816\Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} = \sqrt{2.816^2 - 0.38^2} = 2.79\Omega$$

$$I_{ph} = I_L = \frac{P_L}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{115 * 10^3}{\sqrt{3} * 500 * 0.84} = 158.084 \angle 32.86A$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 288.675 \angle -32.86 + 158.084 * (0.38 + j2.79) = 415.257 \angle 43.23 V$$

ב.

$$\Delta P_{cu} = 3 * I_{ph}^2 * R_a = 3 * 158.084^2 * 0.38 = 28.489 Kw$$

$$P_{em} = P_2 + \Delta P_{cu} = 115 + 28.489 = 143.489 Kw$$

$$n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{1} = 3000 rpm$$

$$M_{em} = \frac{9.55 * P_{em}}{n} = \frac{9.55 * 143.489 * 10^3}{3000} = 457.773 [Nm]$$

ג.

גנרטור נמצא בתחום היציבות שלו כאשר הספק העומס קטן מהספקו המירבי בזרם עירור מסוים, המחושב כאשר זווית הפיסק היא מקסימאלית ושווה לזווית שבין המרכיבים של עכבת סליל הסטטור.

$$\tan \theta = \frac{X_s}{R_a} \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left( \frac{X_s}{R_a} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2.79}{0.38} \right) = 82.24^\circ$$

$$P_{max} = \frac{3 * U_{ph}}{Z_s} * [E_{ph} * \cos(\theta - \delta) - U_{ph} * \cos \theta]$$

ההספק המקסימאלי מתקבל כאשר:

$$\delta = \theta$$

$$P_{max} = \frac{3 * 288.675}{2.816} * [415.257 * \cos 0 - 288.675 * \cos 82.24] = 115.72 Kw$$

מהתוצאה מתקבל כי:

$$P_L < P_{max} \Rightarrow 115 < 115.72$$

ולכן הגנרטור עובד בתחום היציב שלו אך קרוב לגבול היציבות.

מומלץ במצב זה להגדיל את זרם העירור.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### ויסות הספקים ואופייני "V" בגנרטור סינכרוני

כאשר מספר גנרטורים סינכרוניים עובדים במקביל, כל אחד מהם מפיק חלק מסוים מההספק הכללי האקטיבי והראקטיבי.

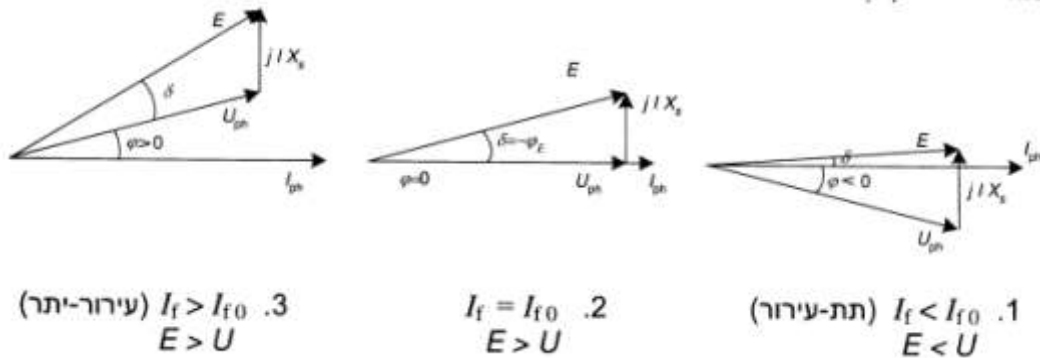
את ההספק האקטיבי ניתן לווסת באמצעות שינוי בהספק המכני  $P_1$  המסופק לגנרטור, עם עלית המומנט של הטורבינה או המנוע המסובב את הגנרטור עולה המומנט הסיבובי על הציר וכתוצאה מכך גדל ההספק החשמלי של הגנרטור וכן זווית הפיסוק כתוצאה מעלית הכא"מ. התוצאה היא תרומה גדולה יותר של גנרטור זה להספק האקטיבי הכללי.

את ההספק הראקטיבי של הגנרטור ניתן לווסת באמצעות שינוי זרם העירור. כנקודת יחוס של זרם העירור קיים ערך  $I_{f0}$  שבו ההספק הראקטיבי של הגנרטור שווה ל-0 ז"א שהגנרטור לא מייצר ולא צורך הספק היגבי ולזרם הגנרטור אופי אומי טהור. ומכאן ניתן להגדיר:

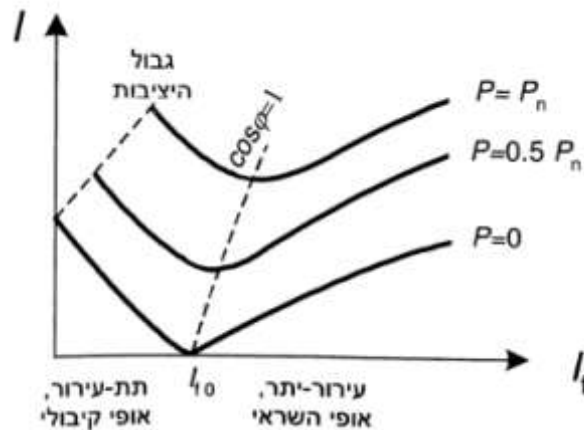
עירור יתר- כאשר זרם העירור גדול יותר מזרם העירור הייחוס  $I_f > I_{f0}$  הגנרטור במצב זה מייצר הספק היגבי ולזרם הגנרטור אופי השראי.

תת עירור- כאשר זרם העירור קטן יותר מזרם העירור הייחוס  $I_f < I_{f0}$  הגנרטור במצב זה צורך הספק היגבי ולזרם הגנרטור אופי קיבולי.

ניתן לתאר את המצבים הללו באמצעות הדיאגרמות הפזוריות הבאות כאשר המתח והספק קבועים:



התלות הגרפית של זרם הגנרטור בזרם העירור, כאשר לגנרטור הספק קבוע נקראת "אופייני V" של גנרטור סינכרוני.



באופינים אלו ניתן לראות כי בזרם עירור  $I_{f0}$  לגנרטור אופי אומי טהור וערכו של זרם הגנרטור בהספק קבוע הוא הנמוך ביותר.



תרגיל דוגמא:

נתון גנרטור סינכרוני עם 2 קטבים בתדירות 50Hz, ועוגן הגנרטור מחובר בכוכב. לגנרטור זה מתח נקוב של 13.8kV שלוב, והספק נקוב של 10MVA, בגורם הספק של 0.8 מפגר. ההתנגדות האומית של הסטטור היא 2Ω לפאזה. והיגבו 18Ω לפאזה. הגנרטור מחובר למערכת הספק גדולה.

- חשב את גודל הכא"מ המושרה לפאזה של העוגן בתנאים נקובים.
- חשב את זווית הפיסק של הגנרטור בתנאים נקובים.
- אם זרם העירור קבוע מהו ההספק המקסימאלי האפשרי לקבל מגנרטור זה, ומה עודף ההספק שיש לגנרטור זה כאשר הוא עובד בתנאים הנקובים.
- כאשר הגנרטור מספק הספק מקסימאלי וזרם העירור עדין ללא שינוי חשב את ההספק הראקטיבי שהגנרטור מספק או צורך מהרשת.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I_{ph} = I_L = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{10 * 10^6}{\sqrt{3} * 13.8 * 10^3} = 418.37 \angle -36.87^\circ A$$

$$U_{phn} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{13.8 * 10^3}{\sqrt{3}} = 7.967 KV$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 7.967 * 10^3 \angle 36.87^\circ + 418.37 * (2 + j18) = 14.267 \angle 59.64^\circ KV$$

ב.

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 36.87 - 59.64 = -22.77^\circ$$

ג.

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} = \sqrt{2^2 + 18^2} = 18.11 \Omega$$

$$\tan \theta = \frac{X_s}{R_a} \Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left( \frac{X_s}{R_a} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{18}{2} \right) = 83.66^\circ$$

$$P_{max} = \frac{3 * U_{ph}}{Z_s} * [E_{ph} * \cos(\theta - \delta) - U_{ph} * \cos \theta]$$

ההספק המקסימאלי מתקבל כאשר:

$$\delta = \theta$$

$$P_{max} = \frac{3 * 7.967 * 10^3}{18.11} * [14.267 * 10^3 * \cos 0 - 7.967 * 10^3 * \cos 83.66] = 17.667 MW$$

$$P_n = S_n * \cos \varphi = 10 * 10^6 * 0.8 = 8 MW$$

$$P_{max} - P_n = 17.667 - 8 = 9.669 MW$$

ד.

נחשב את הזרם בסטטור הגנרטור כאשר בגנרטור מספק הספק המקסימאלי- יש לזכור כי בהספק זה זווית הכא"מ מקדימה את זווית המתח ב-

$$\delta = \theta = 83.66^\circ$$

$$\vec{I}_{sph} = \frac{\vec{U}_{sph}}{\vec{Z}_{sph}} = \frac{\vec{E}_{ph} - \vec{U}_{ph}}{Z_{sph}} = \frac{(14.267 \angle 83.66 - 7.967 \angle 0) * 10^3}{2 + j18} = 858.8 \angle 30.6^\circ A$$

$$\vec{S}_s = \sqrt{3} * \vec{I}_{sph} * \vec{U}_n = \sqrt{3} * 858.8 \angle 30.6^\circ * 13.8 * 10^3 \angle 0 = 20.527 \angle -30.6^\circ MVA$$

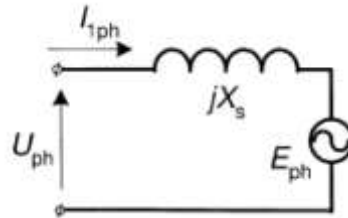
$$\vec{S}_s = (17.667 - j10.449) MVA$$

ההספק הראקטיבי של הגנרטור הוא 10.449 MVA. ומכיוון שזווית הזרם חיובית לכן לזרם הגנרטור אופי קיבולי והמשמעות היא שהגנרטור צורך הספק ראקטיבי מהרשת ולא מספק.

**מנוע סינכרוני**

מעגל תמורה ודיאגרמה פאזורית

כאשר שטף מגנטי מסתובב בסטטור של המנוע הסינכרוני, הוא מושך אחריו את הרוטור וגורם לו להסתובב באותה מהירות סינכרונית. עומס מכני מפעיל על ציר המנוע מומנט בלימה ומאלץ את הרוטור לפגור אחרי וקטור השטף המסתובב הזווית פיסוק  $\delta$ . ערך הזווית תלוי בגודל העומס המכני על ציר המנוע והוא תמיד יהיה חיובי ז"א  $\delta > 0$ .  
מעגל התמורה של מנוע סינכרוני זהה לזה של הגנרטור הסינכרוני, השוני הוא בכיוון זרימת ההספק האקטיבי, כאשר מדובר במנוע, ההספק האקטיבי נצרך מהרשת.



בדומה לגנרטור הסינכרוני המנוע יכול גם לצרוך וגם לספק את ההספק ההיגבי. בהתאם למעגל התמורה ניתן לרשום את משוואת המתחים הפאזית של עוגן המנוע:

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s)$$

תרגיל דוגמא:

מנוע סינכרוני תלת מופעי המחובר בכוכב בעל היגב סינכרוני של  $2\Omega/ph$ , ניזון ממתח קווי של  $690V$ , וצורך זרם של  $82.5A$ , במקדם הספק של  $0.82$  מפגור. מהירות הסיבוב הסינכרונית  $1000rpm$ , יש להניח כי העקום המגנטי הוא ליניארי.

א. חשב את המומנט על ציר המנוע אם נצילותו  $90\%$ .

ב. חשב את הכא"מ המושרה ע"י זרם העירור במצב הפעולה הנדון, ואת זווית העומס

(הפיסוק).

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$P_2 = \sqrt{3} * U_n * I_n * \cos \varphi * \eta = \sqrt{3} * 690 * 82.5 * 0.82 * 0.9 = 72.765 \text{ Kw}$$

$$M_2 = \frac{9.55 * P_2}{n} = \frac{9.55 * 72.765 * 10^3}{1000} = 694.906 \text{ [Nm]}$$

ב.

$$I_{ph} = I_L = 82.5 \angle -34.92 \text{ A}$$

$$U_{phm} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398.37 \text{ V}$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 398.37 \angle 34.92 - 82.5 * (j2) = 332.672 \angle 10.92 \text{ V}$$

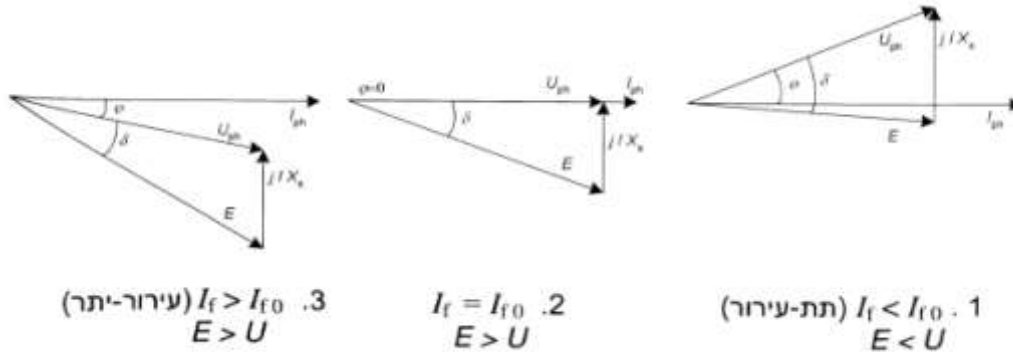
$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 34.92 - 10.92 = 24^\circ$$

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

### יסודות הספק ראקטיבי של מנוע סינכרוני

יסודות ההספק הראקטיבי של מנוע סינכרוני נעשה ע"י שינוי זרם העירור. כאשר זרם העירור שווה לערך הייחוס  $I_{f0}$ , המשמעות היא שהספקו ההיגבי של המנוע שווה ל-0, ז"א שהמנוע בזרם עירור זה אינו מייצר ולא צורך הספק ראקטיבי, ולכן זרם המנוע הוא בעל אופי אומי טהור. בתת-עירור - כאשר זרם העירור קטן מערך הייחוס  $I_f < I_{f0}$  המנוע צורך הספק היגבי, ולזרם המנוע אופי השראי.

בעירור יתר - כאשר זרם העירור גדול מערך הייחוס  $I_f > I_{f0}$  המנוע מייצר הספק היגבי, ולזרם המנוע אופי קיבולי. הדיאגרמות הפאזוריות של המצבים של המנוע הסינכרוני בעומס קבוע מתוארות באיור הבא:



### תרגיל דוגמא 1:

נתוני מנוע סינכרוני הם:

כוכב חיבור ;  $U_n = 400V$  ;  $f = 50Hz$  ;  $n = 1500 \text{ rpm}$  ;  $P_n = 55KW$

לפי קירוב ליניארי של תכונות מעגל העירור, היחס בין הכא"מ הפאזי של המנוע לבין זרם העירור הוא -  $270 \text{ V/A}$ .

ההיגב הסינכרוני של המנוע הוא  $2.5\Omega/\text{ph}$ . התנגדות סלילי הסטטור זניחה.

המנוע צורך מהרשת הספק של  $40\text{kW}$  במתח של  $390\text{V}$  במקדם הספק  $0.92$  מפגר.

א. חשב את הכא"מ הפאזי וזווית הפיסק של המנוע בנקודת עבודה זו.

ב. מה צריך לעשות כדי שהמנוע ישמש כקבל.

ג. מהם הכא"מ הפאזי וזרם העירור כאשר המנוע עובד באותו עומס אך עם גורם הספק  $0.92$  מקדים.

### פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{40 * 10^3}{\sqrt{3} * 390 * 0.92} = 64.365 \angle - 23.07^\circ A$$

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{390}{\sqrt{3}} = 225.167 V$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 225.167 \angle 23.07^\circ - 64.365 * (j2.5) = 219.539 \angle - 19.33^\circ V$$

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 23.07^\circ - (-19.33^\circ) = 42.4^\circ$$

ב.

כדי שהמנוע ישמש כקבל יש להכניסו למצב של עירור יתר וזאת באמצעות הגדלת זרם העירור שבמצב זה לזרם המנוע אופי קיבולי.

ג.

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{40 * 10^3}{\sqrt{3} * 390 * 0.92} = 64.365 \angle 23.07 A$$

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{390}{\sqrt{3}} = 225.167 V$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 225.167 \angle - 23.07 - 64.365 * (j2.5) = 324.019 \angle - 50.26 V$$

$$\frac{E_{ph}}{I_f} = 270 V/A$$

$$I_f = \frac{E_{ph}}{270} = \frac{324.019}{270} = 1.211 A$$

תרגיל דוגמא 2:

למפעל הצורך הספק של 800Kw ובמקדם הספק 0.85 מפגר ובמתח של 400V תלת פאזי, הוחלט להוסיף מנוע סינכרוני חסר הפסדים בעל חיבור משולש שנתוני:

$$S_n = 250 KVA ; U_n = 400V ; X_s = 10 \Omega$$

ההספק המכני הנדרש מהמנוע שווה ל- 200Kw.

בהנחה שמקדם ההספק הנדרש למפעל הוא 0.92 מפגר חשב:

א. ההספק העיוור הנדרש מהמנוע.

ב. מקדם ההספק של המנוע ואופיו.

ג. זרם המנוע (גודל זוויתי).

ד. הכא"מ הפאזי זוויתי הפיסוק של המנוע.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

ההספק העיוור של המפעל לפני חיבור המנוע-

$$\vec{Q}_{מפעל} = P_{מפעל} * \tan \varphi_{מפעל} = 800 * \tan 31.79 = 495.828 KVAr$$

ההספק העיוור של המפעל לאחר חיבור המנוע לקבלת מקדם הספק של 0.92-

$$\vec{Q}'_{מפעל} = (P_{מנוע} + P_{מפעל}) * \tan \varphi'_{מפעל} = (200 + 800) * \tan 23.07 = 425.917 KVAr$$

ההספק העיוור של המנוע בלבד-

$$Q_{מנוע} = Q_{מפעל} - Q'_{מפעל} = 495.828 - 425.917 = 69.911 KVAr$$

ב.

ההספק המדומה של המנוע-

$$S_{מנוע} = P_{מנוע} - j * Q_{מנוע} = 200 - j * 69.911 = 211.867 \angle - 19.27 KVA$$

ניתן לקבוע כי למנוע אופי קיבולי כיוון שהוא מקטין את הזווית ומקדם ההספק שלו-

$$\cos \varphi_{מנוע} = \cos 19.27 = 0.944$$

ג.

$$I_L = \frac{S_{מנוע}}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{211.867 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 305.804 \angle 19.27 A$$

ד.

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{305.804}{\sqrt{3}} = 176.556 A$$

$$U_{ph} = U_L = 400 V$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 400 \angle - 19.27 - 176.556 * (j10) = 1934.77 \angle - 78.75 V$$

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = -19.27 - (-78.75) = 59.48^\circ$$

תרגיל דוגמא 3:

למנוע סינכרוני חסר הפסדים הנתונים הנקובים הבאים:

$$X_s = 0.8\Omega ; p = 1 ; f = 50\text{Hz} ; U_n = 380\text{V} ;$$

ע"י העמסת המנוע גורמים לפיגור הרוטור בזווית המכנית של  $25^\circ$  כלפי השדה המסתובב. ידוע שבמצב זה הכא"מ והמתח הפאזיים שווים. חשב:

- את הספק המנוע ואת מהירותו.
- את זרם המנוע ואת אופיו.
- את זווית הפיסק, את זרם המנוע ואת אופיו אם הגדילו את הכא"מ ב-20% מבלי לשנות את ההספק המכני על הציר.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393\text{V}$$

$$P = 3 * E_{ph} * U_{ph} * \frac{\sin \delta}{X_s} = 3 * 219.393 * 219.393 * \frac{\sin 25}{0.8} = 76.283\text{Kw}$$

$$n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{1} = 3000 \text{rpm}$$

ב.

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s)$$

$$\vec{I}_{ph} = \frac{U_{ph} - \vec{E}_{ph}}{jX_s} = \frac{219.393 - 219.393\angle - 25}{j * 0.8} = 118.713\angle - 12.5\text{A}$$

זרם המנוע הוא בעל אופי השראי.

ג.

$$E_{ph}' = 1.2 * E_{ph} = 1.2 * 219.393 = 263.272\text{V}$$

אם לא משנים את ההספק המכני על הציר-

$$E_{ph}' * \sin \delta' = E_{ph} * \sin \delta$$

$$\sin \delta' = \frac{E_{ph} * \sin \delta}{E_{ph}'} = \frac{219.393 * \sin 25}{263.272} = 0.352$$

$$\delta' = \sin^{-1} 0.352 = 20.6^\circ$$

$$\vec{I}_{ph} = \frac{U_{ph} - \vec{E}_{ph}'}{jX_s} = \frac{219.393 - 263.272\angle - 20.6}{j * 0.8} = 120.622\angle 16.28\text{A}$$

זרם המנוע הוא בעל אופי קיבולי.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

תרגיל דוגמא 4:

נתוניו של מכונה סינכרונית תלת מופעית הם:

$$P_n = 10\text{KW} ; X_s = 14\Omega ; f = 50\text{Hz} ; U_n = 400\text{V} ;$$

כוכב חיבור ; זרם העירור לקבלת מתח נקוב בריקים הוא-  $10\text{A}$ , עקום המיגנט ליניארי, התנגדות הסטור והפסדים זניחים.

א. חשב את הכא"מ של המכונה בעבודתה כמנוע בעומס נקוב ובמקדם הספק יחידה.

ב. חשב את זרם העירור הנדרש, את זווית הפיסק.

ג. מצא את זרם הסטור אם העומס המכני ינותק ואת אופיו.

פתרון תרגיל דוגמא 4:

א.

$$I_{ph} = I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{1n} * \cos \varphi} = \frac{10 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 14.434 \angle 0\text{A}$$

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94\text{V}$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 230.94 \angle 0 - 14.434 * (j14) = 306.868 \angle -41.19\text{V}$$

ב.

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{I_{f1}}{I_{f0}} \Rightarrow I_{f1} = I_{f0} * \frac{E_1}{E_0} = 10 * \frac{\sqrt{3} * 306.868}{400} = 13.288\text{A}$$

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 0 - (-41.19) = 41.19^\circ$$

ג.

כאשר אין עומס ואין הפסדים המנוע לא צורך הספק אקטיבי  $P=0$ .

במצב זה זווית הפיסק שווה ל-0 ולכן-

$$\vec{I}_{ph} = \frac{U_{ph} - \vec{E}_{ph}}{jX_s} = \frac{230.94 - 306.868 \angle 0}{j * 14} = 5.423 \angle 90\text{A}$$

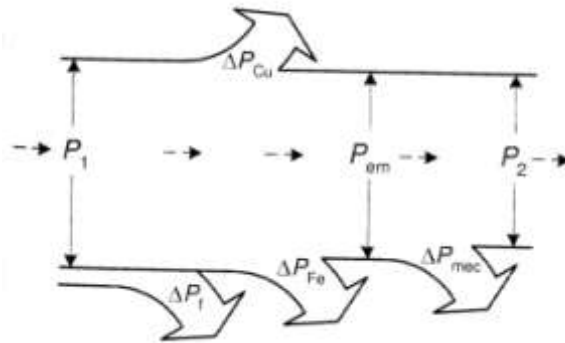
זרם המנוע הוא בעל אופי קיבולי טהור.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

מאזן הספקים. יציבות ואופייני "V" של מנוע סינכרוני

מנוע סינכרוני צורך מהרשת את הספק הכניסה-

$$P_1 = \sqrt{3} * U_n * I * \cos \varphi$$



בדרך כלל סלילי הרוטור מוזנים ממקור נפרד, וכדי לכלול את הספק העירור בהספק הכללי של המנוע יש לחבר את הפסדי סליל העירור  $\Delta P_f$  להספק הכניסה. הפסדים החשמליים בסלילים  $\Delta P_{cu}$  והפסדים המגנטיים בברזל  $\Delta P_{fe}$  מהווים את הפסדי הסטור.

ההספק האלקטרומגנטי  $P_{em}$  מומר להספק המכני של המנוע, חלק ממנו הולך לאיבוד במסבים בצורה של הפסדים מכניים  $\Delta P_{mec}$ , ויתרת ההספק מהווה את ההספק על ציר המנוע  $P_2$ . למנוע ולגנרטור הסינכרוניים אופיין זוויתי זהה.

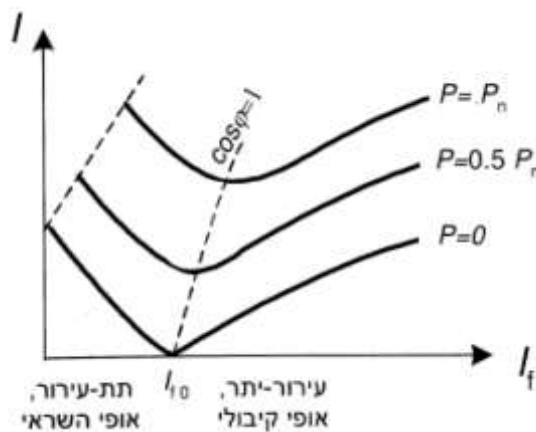
ובהנחת התנגדות העוגן  $R_a$ , את ההספק האלקטרומגנטי ניתן לחשב בעזרת-

$$P_{em} = 3 * E_{ph} * U_{ph} * \frac{\sin \delta}{X_s}$$

גבול היציבות של המנוע נמצא בזווית המכנית  $\delta = \frac{\pi}{2} [rad]$ , את ההספק המרבי בזרם עירור מסוים ניתן לחשב לפי הביטוי הבא כאשר במקום הזווית  $\delta$  נציב  $90^\circ$ -

$$P_{emmax} = 3 * E_{ph} * U_{ph} * \frac{\sin 90^\circ}{X_s} = 3 * \frac{E_{ph} * U_{ph}}{X_s}$$

צורת אופיין "V" של המנוע זהה לזה של הגנרטור, כאשר בתת עירור, לזרם המנוע אופי השראי ובעירור יתר אופי קיבולי.



החלק הימני של העקומה התחתונה מתאימה למשטר עבודה ללא עומס מכני בציר  $P=0$ , כאשר המנוע עובד בעירור יתר ומשמש כקבל סינכרוני לשם שיפור מקדם ההספק של המתקן או הרשת.

## קורס- מכונות חשמל-הנדסאי חשמל

תרגיל דוגמא:

מנוע סינכרוני עם 8 קטבים,  $480V$ ;  $400HP$ ;  $50Hz$ , גורם הספק  $0.8$  מקדים, סלילי העוגן מחוברים במשולש, בעלי היגב  $1\Omega$ , התנגדות העוגן זניחה וכן הפסדי החיכוך, גרעין ואחרים זניחים.

א. כאשר המנוע מספק את הספקו הנקוב בגורם הספק  $0.85$  מפגר, חשב את הוקטורים של הזרם ושל הכא"מ של המנוע.

ב. חשב את המומנט המופק ע"י המנוע בתנאים של סעיף א'.

ג. חשב את המומנט המקסימאלי האפשרי עם זרם העירור הנוכחי.

ד. כאשר מגדילים את הכא"מ ב-  $10\%$  חשב את בזרם בעוגן.

ה. חשב את גורם ההספק של המנוע בתנאי העבודה של סעיף ד'.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

לפי הנתון כיוון שכל ההפסדים זניחים לכן-

$$P_1 = P_2$$

$$I_L = \frac{P_2}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi} = \frac{400 * 736}{\sqrt{3} * 480 * 0.85} = 416.6 \angle - 31.79 \text{ A}$$

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{416.6}{\sqrt{3}} = 240.524 \text{ A}$$

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - I_{ph} * (R_a + jX_s) =$$

$$\vec{E}_{ph} = 480 \angle 31.79 - 240.524 * (j1) = 408.18 \angle 1.73 \text{ V}$$

ב.

$$n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{4} = 750 \text{ rpm}$$

$$M_2 = \frac{9.55 * P_2}{n} = \frac{9.55 * 400 * 736}{750} = 3748.69 \text{ [Nm]}$$

ג.

$$P_{max} = 3 * E_{ph} * U_{ph} * \frac{\sin 90^\circ}{X_s} = 3 * \frac{E_{ph} * U_{ph}}{X_s} = 3 * \frac{408.18 * 480}{1} = 587.78 \text{ kw}$$

$$M_{max} = \frac{9.55 * P_{max}}{n} = \frac{9.55 * 587.78 * 10^3}{750} = 7484.4 \text{ [Nm]}$$

ד.

$$E_{ph}' = 1.1 * E_{ph} = 1.1 * 408.18 = 449 \text{ V}$$

$$\delta = \varphi_U - \varphi_E = 31.79 - 1.73 = 30.06^\circ$$

אם לא משנים את הספק המכני על הציר-

$$E_{ph}' * \sin \delta' = E_{ph} * \sin \delta$$

$$\sin \delta' = \frac{E_{ph} * \sin \delta}{E_{ph}'} = \frac{408.18 * \sin 30.06}{449} = 0.455$$

$$\delta' = \sin^{-1} 0.455 = 27.06^\circ$$

$$\vec{I}_{ph} = \frac{U_{ph} - \vec{E}_{ph}'}{jX_s} = \frac{480 - 449 \angle - 27.06}{j * 1} = 219.424 \angle - 21.43 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} * I_{ph} = \sqrt{3} * 219.424 = 380.054 \text{ A}$$

זרם המנוע הוא בעל אופי השראי.

ה.

$$\cos \varphi = \cos 21.43 = 0.931$$