

המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר

מכונות חשמל חשמלאי ראשי

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים
2012

דרך הטייסים 28, ת.ד. 62137, תל-אביב 61620, טל: 03-6302333, פקס: 03-6311153

28 DERECH HATAYASIM STR. P.O.Box 62137, TEL-AVIV 61620; Tel: 972-3-6302333

כתובת אינטרנט: <http://s.ort.org.il>

אורט ישראל- חברה לתועלת הציבור חל"צ / 174

תוכן עניינים:

פרק 1 –מכונות לזרם ישר	עמ' 3-26
פרק 2 – שנאים	עמ' 27-45
פרק 3 – מנועי השראה (אסינכרוניים)	עמ' 45-59

פרק 1- 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:

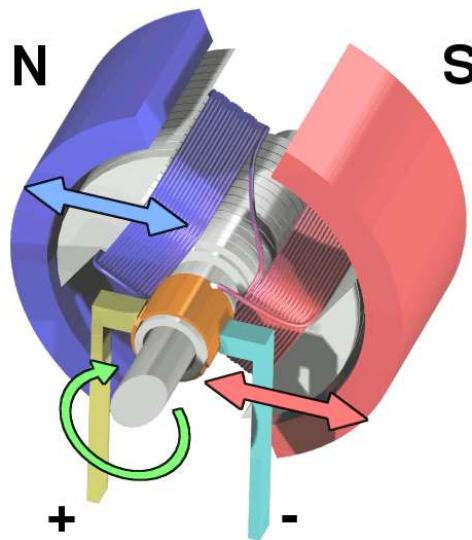
א. מחולל לזרם ישר.

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 הקצה ציר העוגן.

הצובר בנוי מפלחי נחושת המותקנים זה לצד זה ומבודדים זה מזה, וכולם יחד מחוברים בחיבור יציב סביב ציר העוגן ובקצהו.

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 כא"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- $[V]$.

ϕ – 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 $[rpm]$.

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 חישובו יש להציב את ההספק המכאני הנמסר למחולל P_1 . במנוע המומנט

שמתפתח מתוך ההספק החשמלי המזין את המנוע, שלחישובו 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 חישובו 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 חיובו יש להציב את ההספק היעיל הנמסר לעומס P_2 .

ג. מומנט אלקטרומגנטי (מומנט "תגובה")- זהו מומנט החשמלי המתפתח בעוגן המכונה.

בהזנחת 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 בהזנחת 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.

$$M = \frac{P_1}{\omega} = \frac{P_1 * 60}{2 * \pi * n}$$
$$M_{em} = K_m * \phi * I_a$$
$$K_m = \frac{N * p}{2 * \pi * a}$$
$$K_m = K_e * \frac{60}{2 * \pi}$$
$$K_e = \frac{p * N}{a * 60}$$

כאשר:

M [Nm] - מומנט.

P_1 [W] - הספק.

ω - מהירות זוויתית $2\pi f$ או $2\pi n$ $\left[\frac{rad}{sec}\right]$

n - מהירות סיבוב העוגן. [rpm]

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 $[Kgm]$:

$$M[Kgm] = \frac{M_{em}}{9.81}$$

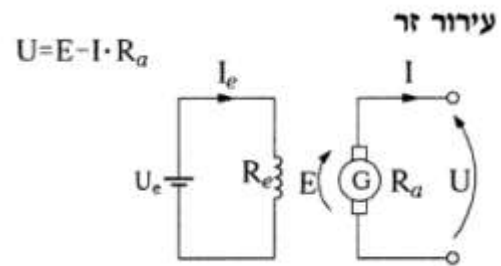
המכונה בעבודתה כמחולל לזרם ישר

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.

לסלילי הסטטור קוראים גם "סלילי שדה" וגם "סלילי העירור" ולכן הסטטור יקרא גם "שדה".



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור זר, בו סלילי העירור וסלילי העוגן נפרדים זה מזה, וללא קשר חשמלי, גלוני בניהם, אלא השראי בלבד. כאשר:

- מקור מתח זר. $-U_e [V]$
- התנגדות סלילי העירור. $-R_e [\Omega]$
- הזרם בסלילי העירור. $-I_e [A]$
- מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן. $-E [V]$
- התנגדות סלילי העוגן. $-R_a [\Omega]$
- הזרם בסלילי העוגן (במחולל בעל עירור זר הוא גם הזרם בעומס) $-I [A]$
- המתח בהדקי המכונה. $-U [V]$

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 כא"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:

$$U = I * R_L$$

$$U = E - I * R_a$$

כאשר המחולל בריקם ז"א שלא מחובר אליו עומס לא מתפתח זרם I ולכן:

$$U_0 = E_0$$

תרגיל דוגמא:

מחולל בעירור זר מפיק בריקם מתח של 660V, התנגדות העוגן היא 0.2Ω , 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-

$$E = U + I \cdot R_a = 600 + 150 \cdot 0.2 = 630V$$

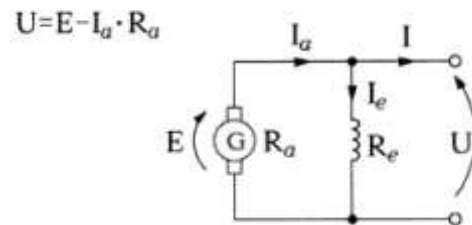
כיוון שמהירות המחולל היא ביחס ישיר לכאמ"מ שלו ולכן-

$$E = k_e \cdot \phi \cdot n$$

$$\Delta E_{\%} = \frac{E - E_0}{E} \cdot 100 = \frac{630 - 600}{600} \cdot 100 = 5\%$$

מחולל בעירור מקבילי

עירור מקבילי



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור מקבילי בו סלילי השדה וסלילי העוגן מקבילים זה לזה. כאשר:

התנגדות סלילי העירור. $R_e [\Omega]$

הזרם בסלילי העירור. $I_e [A]$

מתח מושרה כאמ"מ בסלילי העוגן. $E [V]$

התנגדות סלילי העוגן. $R_a [\Omega]$

הזרם בסלילי העוגן. $I_a [A]$

זרם המחולל. $I [A]$

המתח בהדקי המכונה. $U [V]$

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 "שיוריות מגנטית". לצורך כך יש להזרים זרם לסלילי השדה ממקור מתח יש זר 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 "השיוריות 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.

קורס- מכונות חשמל-חשמלאי ראשי

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:

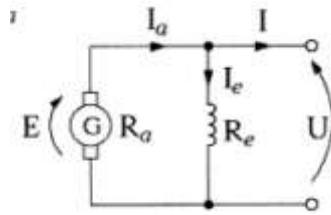
1. קיומה של "שיוריות מגנטית" בקוטבי השדה.
2. כיוון סיבוב העוגן יהיה כזה שיגביר את ה"שיוריות המגנטית" עד לקבלת כאמ"מ נקוב.
3. התנגדות השדה R_e חייבת להיות קטנה מהתנגדות הקריטית בתחילת העירור.

תרגיל דוגמא:

מחולל לזרם ישר בעירור מקבילי מספק עומס של 150KW במתח הדקים של 500V, התנגדות העוגן 0.05Ω והתנגדות סלילי השדה 50Ω .

חשב את הכאמ"מ.

פתרון תרגיל דוגמא:



$$I = \frac{P}{U} = \frac{150 \cdot 10^3}{500} = 300A$$

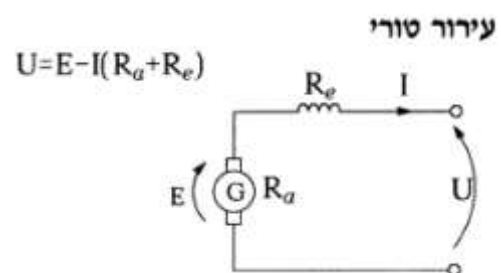
$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{500}{50} = 10A$$

$$I_a = I + I_e = 300 + 10 = 310A$$

$$U = E - I_a \cdot R_a$$

$$E = U + I_a \cdot R_a = 500 + 310 \cdot 0.05 = 515.5V$$

מחולל בעירור טורי



באיור מתואר מבנה עקרוני של מחולל בעירור טורי בו סלילי השדה וסלילי העוגן טוריים זה לזה. כאשר:

התנגדות סלילי העירור: $-R_e[\Omega]$

מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן: $-E[V]$

התנגדות סלילי העוגן: $-R_a[\Omega]$

זרם המחולל: $-I[A]$

המתח בהדקי המכונה: $-U[V]$

כאשר:

עקרון העירור המקבילי:

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 כח 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.

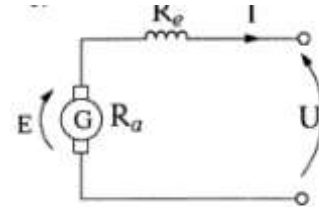
תרגיל דוגמא:

נתון מחולל בעל עירור טורי המספק זרם של $27.5A$, לעומס שהתנגדותו 8Ω . התנגדות העוגן 0.3Ω , והתנגדות השדה 0.2Ω .

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.

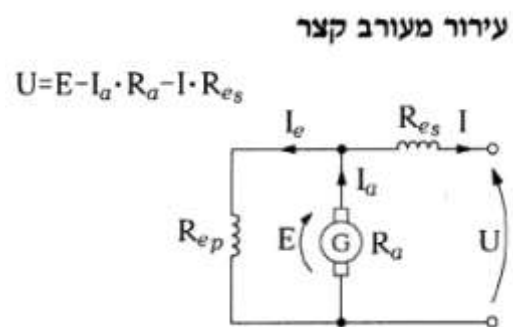
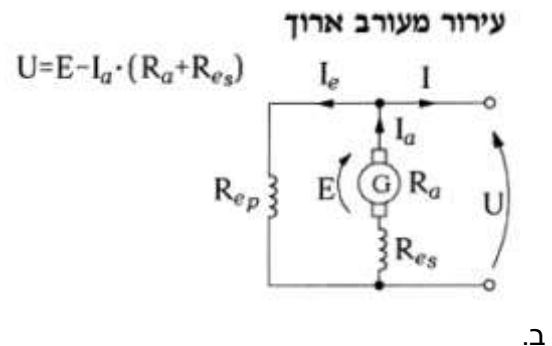
$$U_e = I * R_e = 27.5 * 0.2 = 5.5V$$

ד.

$$U_e = E - U - U_a = E - U - I * R_a = 233.75 - 220 - 27.5 * 0.3 = 5.5V$$

מחולל בעירור מעורב

מחולל בעירור מעורב קיים ב-2 צורות חיבורים:
א.



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.
- מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן. $-E[V]$
- התנגדות סלילי העוגן. $-R_a[\Omega]$
- זרם המחולל. $-I[A]$
- המתח בהדקי המכונה. $-U[V]$

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 וסליל העירור המקבילי R_{ep} , ובטור להם מחובר סליל העירור הטור R_{es} .
- עירור מעורב ארוך:
בחיבור זה מחוברים זה לזה סלילי העוגן R_a וסליל העירור הטורי R_{es} , ולשניהם במקביל מחובר סליל 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 השימושי מבין 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 לווסת את גודל זרם הריתוך לגודל הדרוש.

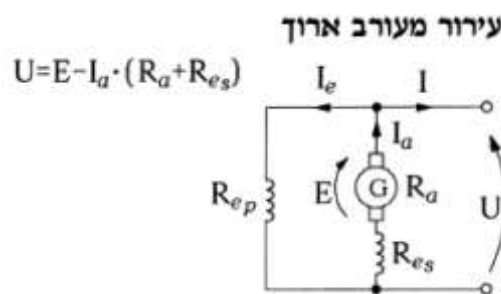
תרגיל דוגמא:

למחולל בעירור מעורב, התנגדות סליל העוגן 0.085Ω , התנגדות סליל העירור 0.065Ω והתנגדות סליל העירור המקבילי 100Ω . 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:



$$I_e = \frac{U_{Rep}}{I_a} = \frac{U}{R_{ep}} = \frac{150}{100} = 1.5A$$

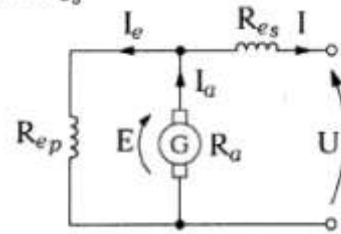
$$I_a = I + I_e = 100 + 1.5 = 101.5A$$

$$E = U + I_a * (R_a + R_{es}) = 150 + 101.5 * (0.085 + 0.065) = 165.225V$$

$$P_{RL} = U * I = 150 * 100 = 15KW$$

עירור מעורב קצר

$$U = E - I_a \cdot R_a - I \cdot R_{es}$$



$$I_e = \frac{U_{Rep}}{R_{ep}} = \frac{U + U_{Res}}{R_{ep}} = \frac{U + I \cdot R_{es}}{R_{ep}} = \frac{150 + 100 \cdot 0.065}{100} = 1.565A$$

$$I_a = I + I_e = 100 + 1.565 = 101.565A$$

$$E = U + I_a \cdot R_a + I \cdot R_{es} = 150 + 101.565 \cdot 0.085 + 100 + 0.065 = 165.133V$$

$$PRL = U \cdot I = 150 \cdot 100 = 15KW$$

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-

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{a1} + R_{a2}}$$

- בהזנת זרמי השדות.

2. האופנים $U f(I)$ של המחוללים יהיו זהים או לפחות דומים.

עבור אופנים זהים- הזרם הנצרך מהמחוללים יתחלק שווה בשווה בניהם.

עבור אופנים דומים- הזרם הנצרך מהמחוללים לא יתחלק שווה בניהם, ניתן לתקן זאת ע"י שינוי 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.

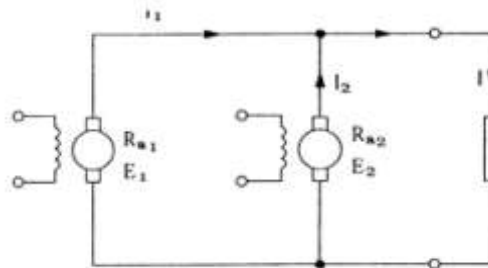
תרגיל דוגמא 1:

2 גנרטורים זהים לזרם ישר בעירור זר פועלים במקביל ומספקים יחד מתח של 230V בהספק של 9.2KW, התנגדות העוגן 0.8Ω , תנאי העירור זהים, האחד מסתובב במהירות של 860 סל"ד והשני מסתובב במהירות של 903 סל"ד. חשב:

א. הכא"מ בכל גנרטור.

ב. חלוקת העומס בין 2 הגנרטורים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:



א.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{9.2 \cdot 10^3}{230} = 40A$$

$$I = I_1 + I_2 ; I_1 = \frac{E_1 - U}{Ra_1} ; I_2 = \frac{E_2 - U}{Ra_1}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{860}{903} = 0.952$$

$$E_1 = 0.952 \cdot E_2$$

$$I = \frac{E_1 - U}{Ra_1} + \frac{E_2 - U}{Ra_2}$$

$$I = \frac{0.952 \cdot E_2 - U}{Ra_1} + \frac{E_2 - U}{Ra_2} =$$

$$40 = \frac{0.952 \cdot E_2 - 230}{0.8} + \frac{E_2 - 230}{0.8} =$$

$$40 \cdot 0.8 = 0.952 \cdot E_2 - 230 + E_2 - 230 =$$

$$32 = 1.952 \cdot E_2 + 460 =$$

$$E_2 = \frac{32 + 460}{1.952} = 252V$$

$$E_1 = 0.952 \cdot E_2 = 0.952 \cdot 252 = 240V$$

ב.

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{Ra_1} = \frac{240 - 230}{0.8} = 12.5A$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{Ra_1} = \frac{252 - 230}{0.8} = 27.5$$

בדיקה-

$$I = I_1 + I_2 = 12.5 + 27.5 = 40A$$

תרגיל דוגמא 2:

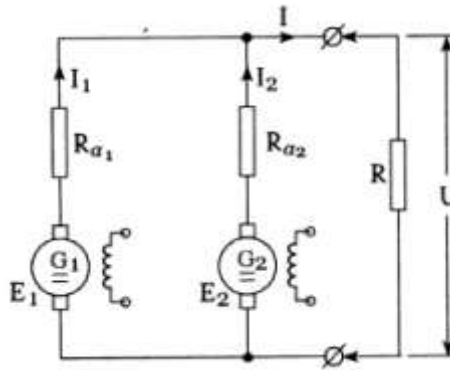
2 מחוללים בעירור זר מחוברים במקביל ומספקים לרשת הניזונה מהן מתח של 220V . נתוני המחוללים הם:

$$E_1 = 230V ; R_{a1} = 0.3\Omega$$

$$E_2 = 228V ; R_{a2} = 0.3\Omega$$

חשב את הזרם לעומס שכל מחולל מזרים וכן חשב את ההספק המתפתח בעומס.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:



$$U = E - I * R_a$$

$$I * R_a = E - U$$

$$I = \frac{E - U}{R_a}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{a1}} = \frac{230 - 220}{0.3} = 33.333A$$

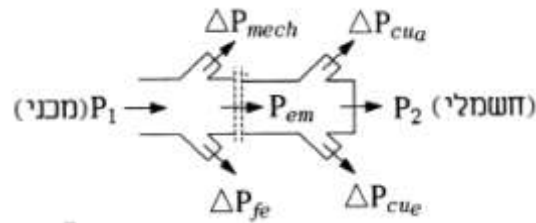
$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{a2}} = \frac{228 - 220}{0.3} = 26.667A$$

$$I_T = I_1 + I_2 = 33.333 + 26.667 = 60A$$

$$P_{RL} = I_T * U = 60 * 220 = 13.2Kw$$

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.
- $\Delta P_{cue} [W]$ - 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 החשמלי היעיל המתקבל במוצא המחולל והנמסר לעומס.
- $\Delta P [W]$ - כלל הפסדי ההספק.

נוסחאות:

$$\Delta P = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cue} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech}$$

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

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e$$

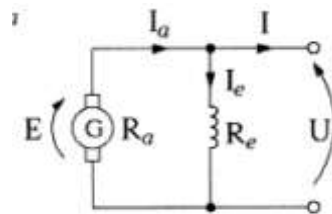
$$P_{em} = E * I_a = P_1 - \Delta P_{mech} - \Delta P_{fe}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = U * I$$

תרגיל דוגמא 1:

למחולל בעל עירור מקבילי מתח נקוב 380V וזרם נקוב של 180A. התנגדות סלילי העוגן 0.07Ω והתנגדות סלילי השדה 100Ω . למחולל נגרמים הפסדי חיכוך של 1400W והפסדי ברזל של 2000W, חשב את נצילות המחולל.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:



$$P_2 = U * I = 380 * 180 = 68.4Kw$$

$$\Delta P_{cue} = I_e^2 * R_e = \frac{U^2}{R_e} = \frac{380^2}{100} = 1444w$$

$$I_a = I + I_e = I + \frac{\Delta P_{cue}}{U} = 180 + \frac{1444}{380} = 183.8A$$

$$\Delta P_{cua} = I_a^2 * R_a = 183.8^2 * 0.07 = 2365w$$

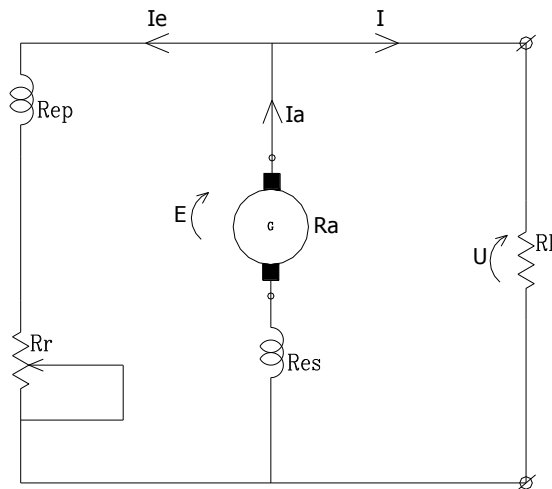
$$\Delta P = \Delta P_{cua} + \Delta P_{cua} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} = 1444 + 2365 + 2000 + 1400 = 7209w$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{68.4 * 10^3}{68.4 * 10^3 + 7209} = 0.9046 = 90.46\%$$

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.

$$M_m = \frac{P_1 * 60}{2 * \pi * n}$$

$$P_1 = \frac{M_m * 2 * \pi * n}{60} = \frac{586 * 2\pi * 1200}{60} = 73.64Kw$$

$$P_{em} = P_1 - \Delta P_{mech} - \Delta P_{fe} = 73.64 * 10^3 - 890 - 2460 = 70.29Kw$$

$$P_{em} = E * I_a$$

$$E = \frac{P_{em}}{I_a} = \frac{70.29 * 10^3}{168} = 418.4V$$

$$U = E - I_a * (R_a + R_{es}) = 418.4 - 168 * (0.089 + 0.039) = 396.9V$$

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:

- מנוע בעירור מקבילי.
- מנוע בעירור טורי.
- מנוע בעירור מעורב.
- מנוע בעירור זר.

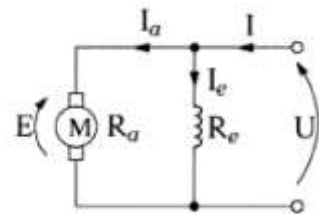
מנוע בעירור מקבילי

עירור מקבילי

$$E = U - I_a \cdot R_a$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{I_{a2}}{I_{a1}}$$



הערות:

- האינדקסים 1,2 מציינים את פרמטרים בעומסים שונים.

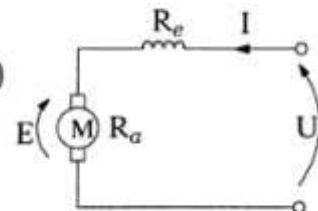
מנוע בעירור טורי

עירור טורי

$$E = U - I(R_a + R_e)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

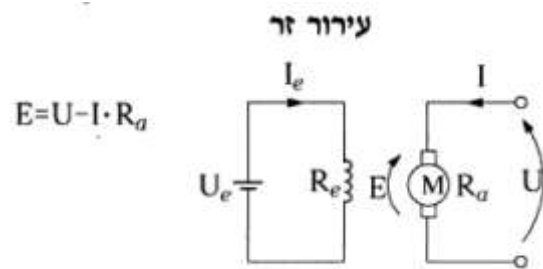
$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{I_2^2}{I_1^2}$$



הערות:

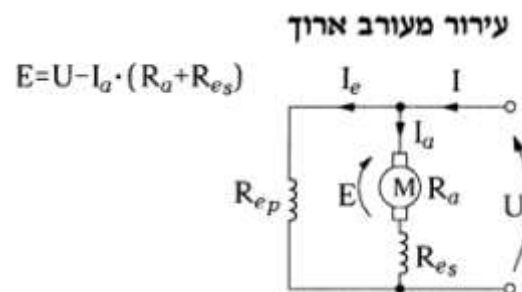
- האינדקסים 1,2 מציינים את פרמטרים בעומסים שונים.
- חישוב המהירות והמומנט בעומס המנוע בעירור טורי, בהזנחת תגובת העוגן.

מנוע בעירור זר

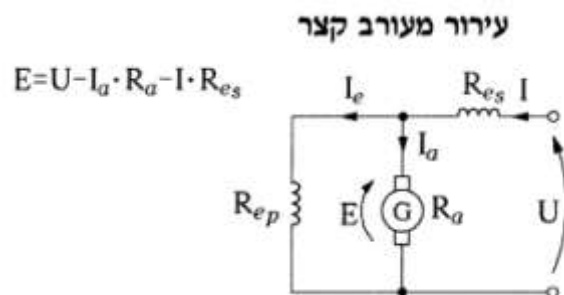


מנוע בעירור מעורב

מנוע בעירור מעורב קיים ב-2 צורות חיבורים:
1.



2.

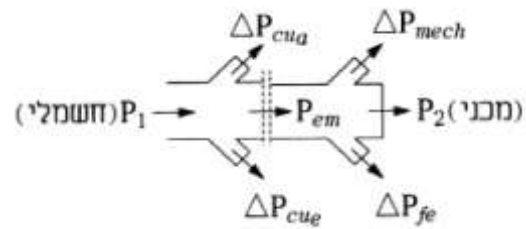


כאשר:

- התנגדות סלילי העירור. $R_e [\Omega]$
- מתח מושרה כא"מ בסלילי העוגן. $E [V]$
- התנגדות סלילי העוגן. $R_a [\Omega]$
- זרם המנוע. $I [A]$
- המתח בהדקי המכונה. $U [V]$
- התנגדות סלילי העירור הטורי. $R_{es} [\Omega]$
- התנגדות סלילי העירור המקבילי. $R_{ep} [\Omega]$
- מקור מתח זר. $U_e [V]$

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 0.2Ω , התנגדות השדה היא 110Ω . חדש את מהירות המנוע.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{1000}{110} = 9.09A$$

$$I_a = I - I_e = 52 - 9.09 = 42.91A$$

$$E = U - I_a * R_a = 1000 - 42.91 * 0.2 = 991.418V$$

$$k_e = \frac{2 * p * N}{2 * a * 60} = \frac{2 * 1 * 400}{2 * 1 * 60} = 6.667$$

$$E = k_e * \phi * n$$

$$n = \frac{E}{k_e * \phi} = \frac{991.418}{6.667 * 27.2 * 10^{-3}} = 5467 \text{ rpm}$$

תרגיל דוגמא 2:

מנוע בעל עירור טורי הספק נומינאלי $7Kw$, מתח נומינאלי $220V$, נצילותו 82% , התנגדות הרוטור 0.248Ω , התנגדות העוגן 0.2Ω , מהירותו הנומינאלית 1000 סל"ד. חשב:

- א. הזרם הנומינאלי.
- ב. הכא"מ הנגדי בעומס נומינאלי.
- ג. 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.

$$I_2 = 40\%I_n = 0.4 * 38.803 = 15.521 A$$

$$E_2 = U - I_2(R_a + R_e) = 220 - 15.521 * (0.2 + 0.248) = 213.047 V$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} * \frac{I_1}{I_2}$$

$$n_2 = \frac{E_2}{E_n} * \frac{I_n}{I_2} * n_n = \frac{213.047}{202.939} * \frac{38.803}{15.521} * 1000 = 2625 \text{ rms}$$

תרגיל דוגמא 3:

למנוע בעירור זר הנתונים הבאים: מתח נקוב $440V$, המתח בסליל העירור $220V$, הזרם בעוגן $200A$, התנגדות העוגן 0.065Ω , התנגדות השדה 5.5Ω , נצילות המנוע 80% . חשב:

- א. ההפסד המושקע במנוע.
- ב. ההפסדים בסליל העירור והעוגן.
- ג. ההספק האלקטרומגנטי.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$P_e = \frac{U_e^2}{R_e} = \frac{220^2}{5.5} = 8.8Kw$$

$$P_a = U * I = 440 * 200 = 88Kw$$

$$P_{in} = (P_e + P_a) * \eta = (8.8 + 88) * 10^3 * 0.8 = 77.44Kw$$

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.

$$E_a = U_a - I_a * R_a = 440 - 200 * 0.065 = 427V$$

$$P_{em} = E_a * I_a = 427 * 200 = 85.4Kw$$

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 0.172Ω והתנגדות העירור המקבילי היא 338Ω . מספר התילים של ליפוף העוגן הוא 372. מספר הענפים המקבילים בין המברשות הוא 2. הפסדי ההספק הכלליים שווים ל-3312W. חשב:

- א. עוצמת הזרם בעוגן.
- ב. הכא"מ של העוגן.
- ג. השטף היעיל לקוטב.
- ד. ההספק הנומינלי החשמלי למנוע.
- ה. ההספק האלקטרומגנטי של המנוע.
- ו. ההספק המכאני.
- ז. נצילות המנוע.
- ח. המומנט הסיבובי האלקטרומגנטי.
- ט. 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.

$$E = U - I_a(R_a + R_{ep})$$

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.

$$P_1 = P_n = U_n * I_n = 220 * 94 = 20.68Kw$$

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.

$$I_{st} = I_{ast} + I_e$$

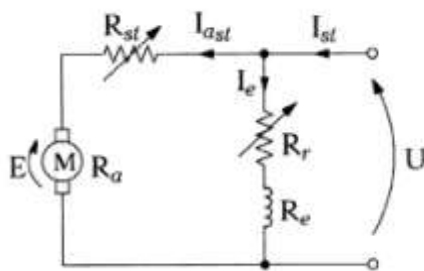
אם זרם העירור I_e לא ידוע או לא ניתן לחישוב ניתן להזניחו עקב ערכו המזערי בעבודתו הנקובה של המנוע וכל שכן בעת ההתנעה, ולכן:

$$I_{st} \approx I_{ast} = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - 0}{R_a} = \frac{U}{R_a}$$

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} .

כדי להגביל את זרם ההתנעה עד כ- $2 * I_{an}$ $I_{ast} \approx$

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}	[Ω]
התנגדות ווסת העירור	R_r	[Ω]

$$I_{st} = I_{ast} + I_e$$

$$I_{ast} = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

$$I_e = \frac{U}{R_e + R_r}$$

ויסות מהירות מנוע בעירור מקבילי:

ניתן לווסת את מהירות המנוע ב-3 אפשרויות 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.

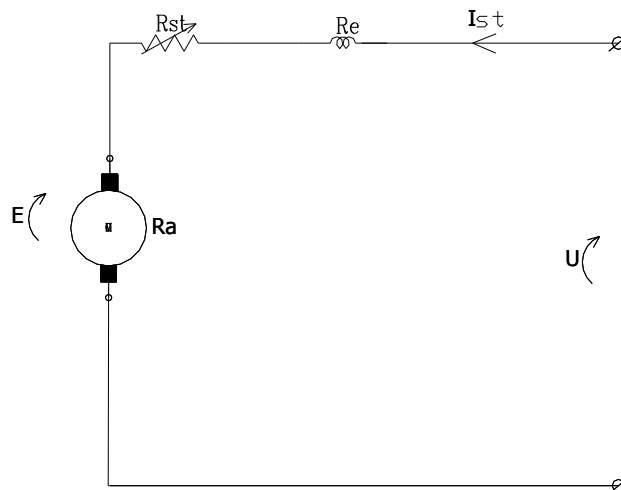
ב. שינוי התנגדות מעגל העוגן:
בשיטה זו ניתן להשתמש בהתנגדות R_{st} של מערכת ההתנעה המחוברת בטור לסליל העוגן במטרה לשנות את הזרם I_a ובתנאי שזרם העירור I_e יישאר ללא שינוי.

ג. שינוי גודל השטף ϕ :
את השינוי בגודל השטף ניתן לבצע באמצעות שינוי 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.

$$n = \frac{E}{K_e * \phi}$$

$$E = U - I_{st} * (R_a + R_e + R_{st})$$

ויסות מהירות מנוע בעירור טורי:

ויסות המהירות נעשת 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 המגנטי 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.

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 60Ω . חשב:

- א. זרם הצריכה.
- ב. התנגדות העוגן.
- ג. זרם ההתנעה.
- ד. מהירות הסיבוב בריקים.
- ה. 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.

$$I_e = \frac{U}{R_e} = \frac{240}{60} = 4A$$
$$I_a = I - I_e = 22.439 - 4 = 18.439$$
$$R_a = \frac{U - E}{I_a} = \frac{240 - 212}{18.439} = 1.519A$$

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:

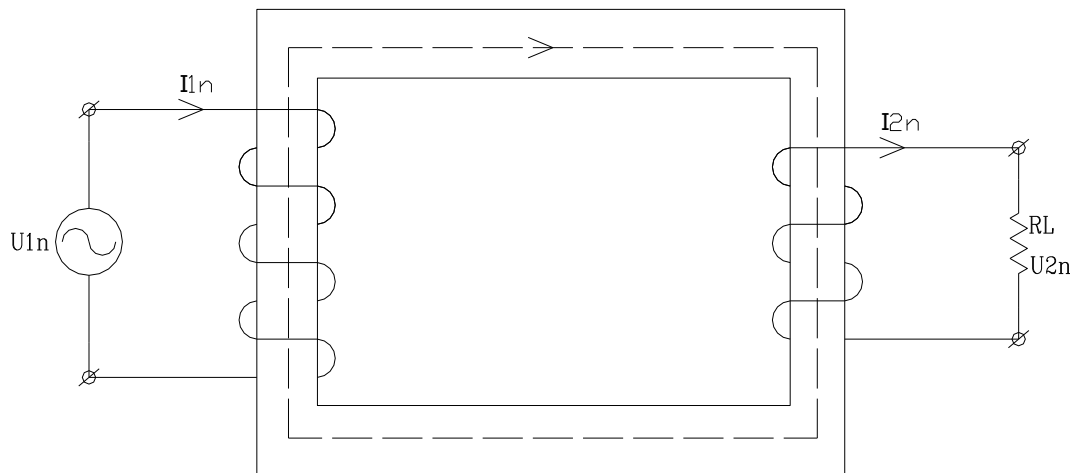
1. כל עוד זרם העוגן בגבולות הערך הנקוב, עוצמת הניצוצות קטנה תופעת הקומוטציה נחשבת אידיאלית.
2. עם עליה בערכו של זרם העוגן מעבר לערכו הנקוב, גדלה עוצמת הניצוצות, עד כי עוצמתם עשויה לגרום לשרפת הפחמים וכיסוי של פלחי הצובר בפיח. רמת קומוטציה גדולה זו יש צורך להחליש ככל שניתן. את זאת ניתן לבצע באמצעות הוספת 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 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 המגנטיים 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 2- שנאים

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-

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

גודל השנאי נקבע לפי ערך ההספק המדומה שלו-

$$S = U_1 * I_1 = U_2 * I_2$$

ואם השנאי עובד בתנאיו הנקובים-

$$S_n = U_{n1} * I_{n1} = U_{n2} * I_{n2}$$

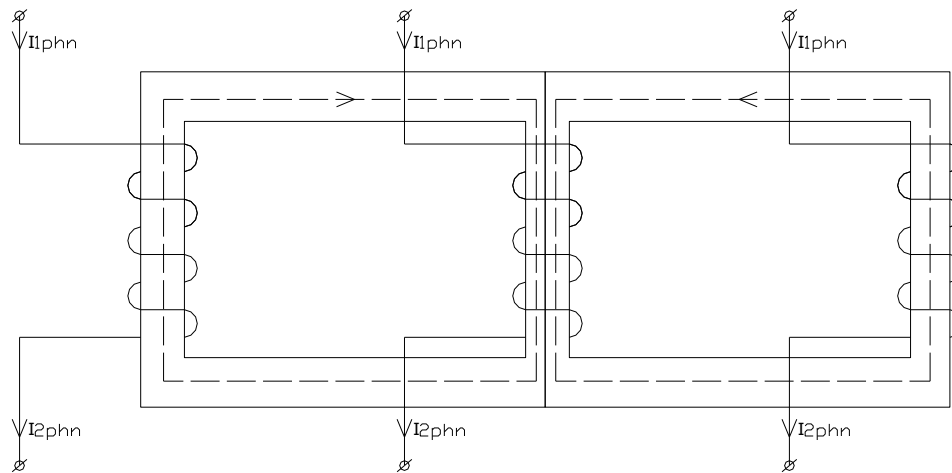
כאשר:

קורס- מכונות חשמל-חשמלאי ראשי

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.

מבנה השנאי התלת פאזי:



גודל השנאי נקבע לפי ערך ההספק המדומה שלו-

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

ואם השנאי עובד בתנאי הנקובים-

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

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.

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

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

כאשר:

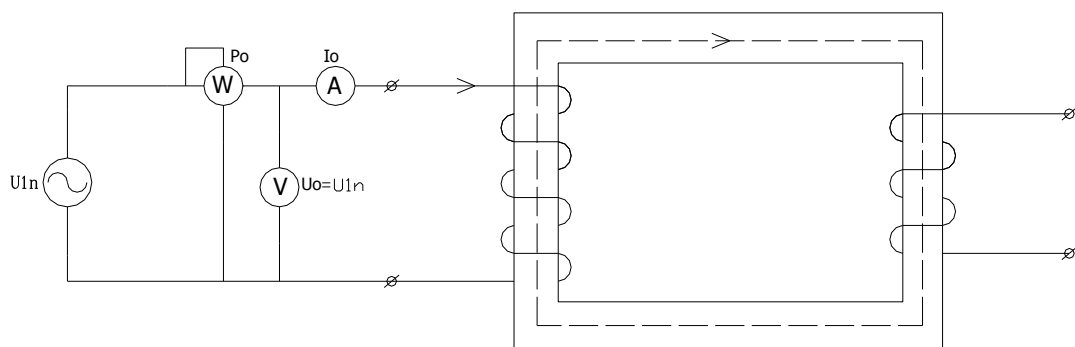
כא"מ מושרה אפקטיבי	E	[V]
מספר כריכות	N	[T]
תדירות	f	[Hz]
השטף המגנטי המירבי בגרעין	ϕ_{max}	[Wb]
השראה מגנטית מירבית	B_{max}	$\left[\frac{Wb}{m^2} \right]$

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.

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

על מפי מדידות אלו ניתן לחשב את גורם ההספק של השנאי בתנאי ריקם לפי-

עבור שנאי חד פאזי-

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 * I_0} = \frac{P_0}{U_{1n} * I_0}$$

עבור שנאי תלת פאזי-

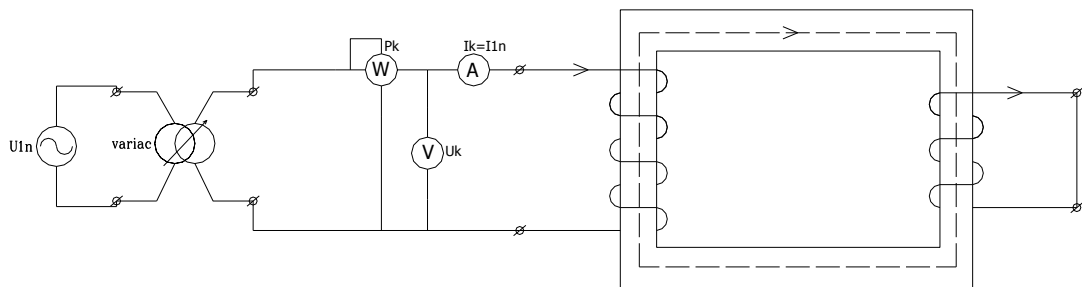
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_0 * I_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_{1n} * I_0}$$

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

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

ניסוי קצר של שנאי:

מטרת הניסוי למדוד את הפסדי הנחושת של השנאי הנגרמים כתוצאה 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 ובך 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. $I_k = I_{1n}$

ההספק שנמדד שווה ערך להפסדי הנחושת של השנאי.

על פי המדידות שהתקבלו ניתן לחשב את גורם ההספק של השנאי בתנאי קצר לפי-

עבור שנאי חד פאזי-

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

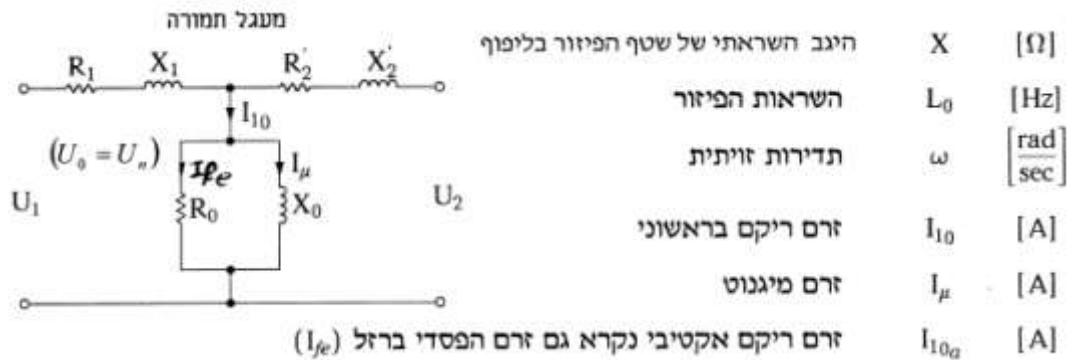
עבור שנאי תלת פאזי-

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

קורס- מכונות חשמל-חשמלאי ראשי

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-



בפעולת השנאי בריקים- ($U_0 = U_{1n}$) -

$$P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu10} \approx \Delta P_{fe}$$

$$P_0 = U_{1n} * I_{10} * \cos \varphi_{10}$$

$$P_0 = \sqrt{3} * U_{1n} * I_{10} * \cos \varphi_{10}$$

$$I_{fe} = \frac{P_0}{U_0} = I_{10} * \cos \varphi_{10}$$

$$I_{\mu} = I_{10} * \sin \varphi_{10}$$

$$I_{10}^2 = I_{fe}^2 + I_{\mu}^2$$

כאשר:

הספק יעיל בריקים	P_0	[W]
הפסדי ברזל	ΔP_{fe}	[W]
הפסדי נחשת בראשוני בריקים	ΔP_{cu10}	[W]
מקדם הספק בראשוני בריקים	$\cos \varphi_{10}$	

בפעולת השנאי בקצר- ($I_{1k} = I_{1n}$) -

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

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

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

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

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

$$P_k = I_{1n}^2 * R_k$$

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

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

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}$$

הנחה מקובלת מצד המתח הגבוה-

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

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

כאשר:

זרם הקצר	I_{1K}	[A]
הספק הקצר של השנאי	P_K	[W]
הפסדי נחושת בעומס נקוב	ΔP_{cun}	[W]
התנגדות הסליל הראשוני	R_1	[Ω]
התנגדות הסליל השניוני	R_2	[Ω]
התנגדות הקצר	R_K	[Ω]
היגב הסליל הראשוני	X_1	[Ω]
היגב הסליל השניוני	X_2	[Ω]
היגב הקצר	X_K	[Ω]
עכבת הקצר	Z_K	[Ω]
מתח הקצר	U_K	[V]
מתח הקצר באחוזים	$U_{K\%}$	

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- ΔU ותלוי בגורמים שונים:

א. מקדם העמסה של השנאי β - 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- ΔU_R . כאשר $\Delta U_{R\%}$ הוא מפל המתח האקטיבי באחוזים

מהמתח הנקוב U_{1n} .

ב. מפל מתח ראקטיבי (הגיבי) המסומן ב- ΔU_X . כאשר $\Delta U_{X\%}$ הוא מפל המתח הראקטיבי

באחוזים מהמתח הנקוב U_{1n} .

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

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

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

$$\Delta U_{k\%} = \sqrt{\Delta U_{R\%}^2 + \Delta U_{X\%}^2}$$

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

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

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

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

$$U_2 = U_{20} * [1 - \beta * \Delta U_{kn} * \cos(\varphi_k - \varphi_2)]$$

כאשר:

$\Delta U_{R\%}$	מפל מתח התנגדותי באחוזים
$\Delta U_{X\%}$	מפל מתח היגבי באחוזים
$\Delta U_{\%}$	מפל מתח באחוזים
β	מקדם העמסה
$\cos \varphi_2$	מקדם ההספק של הצרכן

נצילות השנאי

נצילות השנאי η 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 η_{max} -

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

הנצילות המרבית מתקבלת כאשר מקדם העמסה הוא מקסימאלי β_{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:

$$I_k = I_{1n}$$

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

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

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

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

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

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:

לאחר ביצוע ניסוי הריקם והקצר בתנאים נקובים התקבלו הנתונים הבאים:

- 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.

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

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

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 וריקם מצד המתח הגבוה. תוצאות הניסוי הם:

- א. קבע את הפסדי הקצר הנקובים ואת מתח הקצר הנקוב באחוזים מהמתח הנקוב.
- ב. קבע את הפסדי הריקים הנקובים ואת הזרם הריקים הנקוב באחוזים מהזרם הנקוב.
- ג. קבע את נצילות השנאי כאשר הוא עמוס ב- 300KW ובמקדם הספק 0.8 .
- ד. קבע את המתח השניוני, אם השנאי עמוס בהספק נקוב ומקדם הספק 0.9 קיבולי.

הערה:

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

שלבי חישוב הפסדי הנחשת נומינאליים ΔP_{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 Δ -

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

לאחר שחשבנו R_k ניתן לחשב את ΔP_{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.

שלבי חישוב הפסדי ברזל נומינאליים ΔP_{fen}

יש לבדוק אם ניסוי הקצר 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 $R_{fe} = \frac{P_{0ph}}{I_{Rfeph}^2}$ וזאת בהתאם לסוג החיבור של הסלילי הראשוני כיוון שאנו מחשבים את R_{fe} משוקף לצד הראשוני.
 לדוגמא אם הצד הראשוני הוא Δ -

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

לאחר שחשבנו R_{fe} ניתן לחשב את ΔP_{0n} לפי הנוסחה-

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

יש לזכור כי המכפלה 3 בנוסחה גורם לכך שהפסדי הנחשת 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- $I_{k1} \neq I_{1n}$.

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

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

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

$$U_{kn} = \frac{P_{kn}}{\sqrt{3} * I_{kn}^2 * \cos \varphi_{k1}} = \frac{4895}{\sqrt{3} * 15.4^2 * 0.28} = 655V$$

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

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 $50KW ; \cos \varphi = 1$.

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-

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

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

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

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

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

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

ג.

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

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

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

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

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

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.
 - קבוצת חיבורים זהה בין הראשוני לשניוני.
 - מתחי קצר זהים.
- תנאי זה הוא לא הכרחי אך במידה ומתחי הקצר יהיו שונים יתכנו 2 מצבים:
- העמסת אחד השנאים או יותר בעומס יתר דבר שאינו רצוי כיוון שיכול להזיק לשנאים.
 - 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 אינדקס - מספר השנאים המחוברים במקביל

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

S_t [VA] ההספק המדומה שמספקים כל השנאים יחד לצרכן

דוגמה 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.

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 מההספקם 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.

קורס- מכונות חשמל-חשמלאי ראשי

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:

הוא בעל מתח הקצר הנמוך ביותר לכן: A שנאי

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

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

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

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

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 מצחי קצר שונים וזאת ע"י תוספת 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:

- 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 תוספת העכבה. בהנחה שההספק המדומה הכללי הכולל הוא כמו שחושב בסעיף א.
- 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.

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

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

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

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

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

$$Z_{xA} = 20,622 \angle 78.46^\circ \Omega$$

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

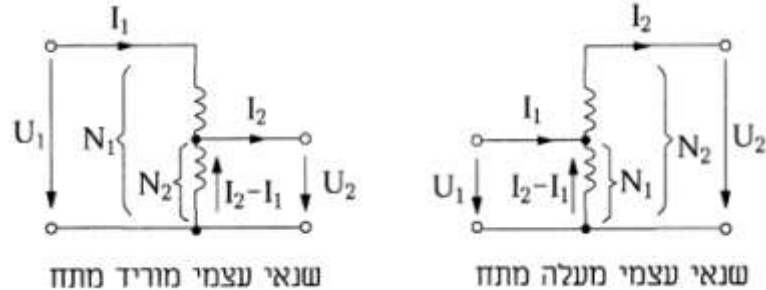
$$S_A = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nA}}{U_{k\%A}} = \frac{900}{\frac{400}{8} + \frac{800}{8}} * \frac{400}{8} = 300KVA$$

$$S_B = \frac{S_t}{\sum_{m=1}^n \frac{S_{nm}}{U_{k\%m}}} * \frac{S_{nB}}{U_{k\%B}} = \frac{900}{\frac{400}{8} + \frac{800}{8}} * \frac{800}{8} = 600KVA$$

$$S_t = S_A + S_B = (300 + 600) * 10^3 = 900KVA$$

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.



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

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

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

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:

ΔP_{fe} - הפסדים קבועים והם נובעים מהפסדי ההספק בליבת השנאי שידוע שהם ההפסדים בריקם.
 ΔP_{cu} - הפסדים המשתנים והם נובעים מהפסדי ההספק במוליכי הנחושת בשנאי שהם הפסדים בקצר.

יתרונות וחסרונות השנאי העצמי:

חסרונות: 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. לדוגמה אסור להשתמש בשנאי זה כשנאי מבדל המשמש כאמצעי נגד חשמול. לעומת חסרונות זה קיימים בשנאי העצמי מספר יתרונות וכולן נובעות מהיותו בעל סליל 1 בלבד:

- משקלו מועט.
- הפסדי הנחושת בסליל 1 קנטיים מאשר בשנאי רגיל בעל 2 סלילים.
- 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 זורם הזרם I_1 , ובכך תורמים תרומה נוספת למשקל להפסדים ולמחיר.

תרגיל דוגמא:

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.

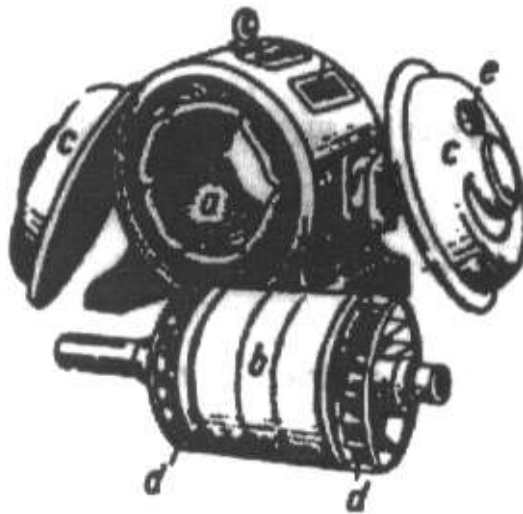
$$I_2 = \frac{P_2}{U_{2n} * \cos \varphi_2} = \frac{1000}{100 * 1} = 10A$$
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$
$$I_1 = \frac{I_2 * U_2}{U_1} = \frac{10 * 100}{1000} = 1A$$

פרק 2- מנוע השראה (אסיכרוני)

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.

המנוע התלת מופעי

*** שם מנוע אסיכרוני מקורו בכך, שבמנוע אסיכרוני השדה המגנטי הסובב של הסטטור משרה כא"מ ברוטור. במנוע זה המתחים נמצאים בהטיה של 120 מעלות זה כלפי זה ולכן נוצר שדה מסתובב בסטטור.



a - סטטור

b - רוטור

c - תושבות למסבים

d - מאורר

E - פתח אוורור

המנוע מחובר לרשת באמצעות סלילי הסטטור, אין קשר חשמלי בין הסטטור לרוטור, אלא באמצעות השדה המגנטי.

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:

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

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

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

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

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

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

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

כאשר:

n_1 [rpm] - מהירות סינכרונית.

n_2 [rpm] - מהירות הרוטור.

s_n [] - חליקה נקובה.

מתחים במנוע

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

יש להבחין בין 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.

ϕ_{max} [wb] - השטף המקסימאלי המתפתח בסטטור.

f_2 [Hz] - תדירות מושרית ברוטור.

זרמים במנוע

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

כאשר $s = 1$ היא החליקה s_{st} של המנוע.

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

$$I_{2ph} = \frac{E_{20ph}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{20}^2}} = \frac{E_{2ph}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

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

$$X_t = X_1 + X'_{20}$$

כאשר:

זרם קוי בסטטור	I_1	[A]
מתח שלוב בסטטור	U_1	[A]
גורם הספק	$\cos \varphi_1$	
זרם ברוטור למופע	I_{2ph}	[A]
התנגדות למופע של הרוטור	R_2	[Ω]
היגב למופע של הרוטור כאשר הרוטור נייח	X_{20}	[Ω]
זרם מופעי ברוטור משוקף לסטטור	I'_{2ph}	[A]
כא"מ מושרה ברוטור למופע כאשר הרוטור נייח	E_{20ph}	[V]
התנגדות למופע של הרוטור משוקפת לסטטור	R'_2	[Ω]
היגב למופע של הרוטור המשוקף לסטטור כאשר הרוטור נייח	X'_{20}	[Ω]
היגב למופע כולל	X_t	[Ω]

ניסויים במנוע

ניסוי קצר

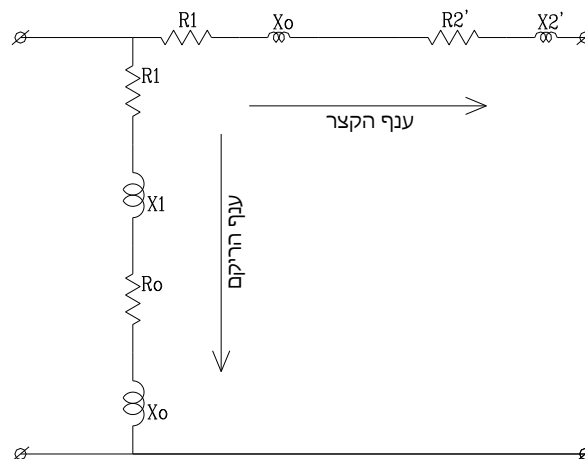
מצב קצר במנוע מתקיים כאשר העוגן אינו מסתובב כלל (במצב מנוחה)- התנהגותו במצב זה דומה בכל להתנהגות חשמלית של שנאי בניסוי קצר. לערכת הניסוי יש לחבר את המנוע לרשת באמצעות שנאי "ווריאק" המספק מתח משתנה רצוף, למסירת מתח הקצר U_k הדרוש לניסוי. במצב זה ימדוד מד הזרם שיחובר לאחד ממוליכי ההזנה את ערכו של הזרם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

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 ΔP_{fe} הפסדים אלו נקראים גם P_0 .

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

מעגל תמורה של מנוע השראה



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

כאשר:

R_1 - התנגדות הסטטור בכל מופע.

R_2 - התנגדות הרוטור בכל מופע.

R_2' - התנגדות הרוטור בכל מופע משוקפת לסטטור.

X_1 - היגב הסטטור בכל מופע.

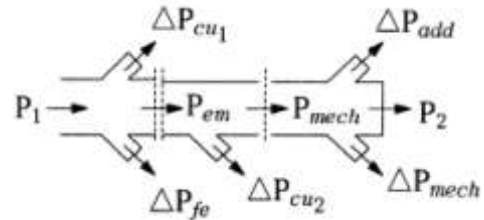
X_2 - היגב הרוטור בכל מופע.

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

$-K$ יחס השנאה במנוע.

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

הספקים במנוע (דיאגרמה האנרגטית)



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

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

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

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_1 = P_2 * \Delta P$$

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

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

כאשר:

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

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: $1gk = 9.81N$ ולכן:

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

את המומנט הנקוב (נומינאלי) ניתן לחשב לפי-

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

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_2}$$

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-

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

$$M_{em} = \frac{9.55 * 3 * U_{1ph}^2 * \frac{R_2'}{s}}{n_1 * \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_{20}')^2 \right]}$$

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-

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_{20}')^2}}$$

כיוון שהתנגדות האומית של R_1 בסטטור זניחה לכן-

$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_1 + X_{20}'}$$

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"-

$$M = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{S} + \frac{S}{s_k}}$$

יש לזכור כי $M_k = M_{max}$

תמונת מומנט

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

תרגיל דוגמא לבניית עקומת המומנט

נתון מנוע אסינכרוני תלת מופעי בעל הספק 20Kw ובהירות נומינאלית 1440 rpm. המומנט המרבי גדול פי-2 מהמומנט הנומינאלי. ידוע כי מהירות הסטטור הוא 1500 rpm. שרטט את עקומת המומנט, לפי נתוני החליקה הבאים:

$$S = 1 ; S = 0.8 ; S = 0.5 ; S = 0.3 ; S = 0.1$$

פתרון לתרגיל דוגמא

$$M_n = \frac{9.55 * P_n}{n_2} = \frac{9.55 * 20 * 10^3}{1440} = 133 Nm$$

$$M_{max} = M_k = 2 * M_n = 2 * 133 = 266 Nm$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

נחשב את החליקה הקריטית ב-2 צורות:

א. באמצעות המומנטים.

ב. באמצעות נוסחת "קלאוס".

באמצעות המומנטים-

$$s_k = \frac{M_k * s_n}{M_n} * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{M_k}{M_n} \right)^2} \right]} \right\} = \frac{266 * 0.04}{133} * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{266}{133} \right)^2} \right]} \right\} = 0.1493$$

באמצעות נוסחת "קלאוס"

$$M_n = \frac{2 * M_k}{\frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k}}$$

$$\frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k} = \frac{2 * M_k}{M} = \frac{2 * 266}{133}$$

$$\frac{s_k}{s_n} + \frac{s_n}{s_k} = 4 \quad / \quad s_n * s_k$$

$$s_k^2 + s_n^2 = 4 * s_n * s_k$$

$$s_k^2 + s_n^2 - 4 * s_n * s_k = 0$$

$$s_k^2 + 0.04^2 - 4 * 0.04 + s_k = 0$$

$$s_k^2 + 0.0016 - 0.16 * s_k = 0$$

$$s_k^2 - 0.16 * s_k + 0.0016 = 0$$

$$X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$s_{k_1} = \frac{0.16 + \sqrt{0.16^2 - 4 * 1 * 0.0016}}{2 * 1} = 0.1493$$

$$s_{k_2} = \frac{0.16 - \sqrt{0.16^2 - 4 * 1 * 0.0016}}{2 * 1} = 0.01072$$

התוצאה השנייה של המשוואה הריבועית נפסלת כי לא יתכן כי $s_k < s_n$.

נחשב את המומנט המשתנה לפי נוסחת "קלאוס"-

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

קורס- מכונות חשמל-חשמלאי ראשי

$$s = 1 \Rightarrow M = \frac{2 * 266}{\frac{0.1493}{1} + \frac{1}{0.1493}} = 77.7 \text{ Nm}$$

$$s = 0.8 \Rightarrow M = \frac{2 * 266}{\frac{0.1493}{0.8} + \frac{0.8}{0.1493}} = 95.9 \text{ Nm}$$

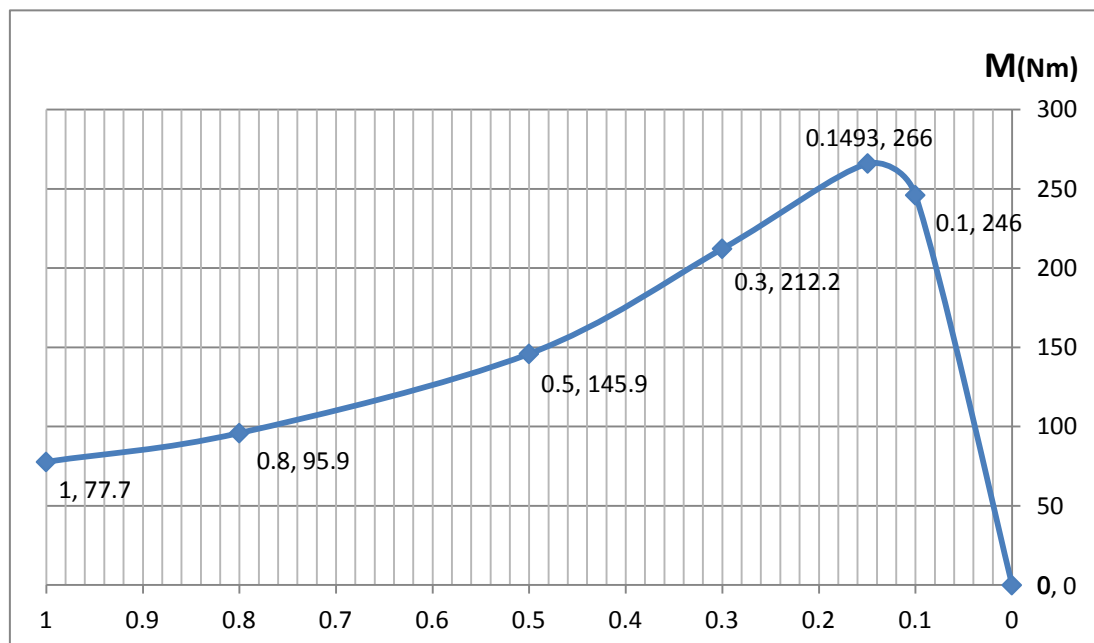
$$s = 0.5 \Rightarrow M = \frac{2 * 266}{\frac{0.1493}{0.5} + \frac{0.5}{0.1493}} = 145.9 \text{ Nm}$$

$$s = 0.3 \Rightarrow M = \frac{2 * 266}{\frac{0.1493}{0.3} + \frac{0.3}{0.1493}} = 212.2 \text{ Nm}$$

$$s = 0.1 \Rightarrow M = \frac{2 * 266}{\frac{0.1493}{0.1} + \frac{0.1}{0.1493}} = 246 \text{ Nm}$$

M [Nm]	0	246	266	212.2	145.9	95.9	77.7
S	0	0.1	Sk=0.1493	0.3	0.5	0.8	1

נשרטט את עקומת המומנט בהתאם לנתונים בטבלה-



נצילות מקסימאלית של המנוע

כידוע נצילות המנוע היא-

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

לנצילות ערך מרבי כאשר ההפסדים המשתנים-הפסדי הנחושת שווים להפסדים הקבועים- הפסדי הברזל השונים.

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

זרמי התנעה במנוע- I_{st}

הזרם אותו צורך מנוע השראה אסיכרוני בזמן ההתנעה גדול פי 4-7 בערך מצריכת הזרם הנקוב שלו. זרם ההתנעה מהווה עומס רב מאוד על הרשת.

על מנת להקטין את זרמי ההתנעה קיימים מס' דרכים שהעיקרים בניהם:

א. שימוש במתנע כוכב משולש.

ב. חיבור המנוע דרך שנאי עצמי.

ג. שימוש במתנע רך.

בשימוש במתנע רך מבוצעת ההתנעה באמצעות שינוי רציף בתדר אשר מעבירה למנוע הספק הולך ונבנה בצורה רציפה לצורך ההתנעה תוך כדי פיצוי ע"י שינוי במתח המסופק כדי לשמור על מומנט המנוע בזמן ההתנעה, וכל זאת עד גמר ההתנעה.

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-

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

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.

ומכיוון שהמתח בהתנעה הוא- $U_{ph} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ לכן הזרם בסטטור בזמן ההתנעה יהיה קטן פי 3 מאשר ההתנעה ישירה לקו ולכן-

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

המשמעות היא שזרם ההתנעה קטן פי

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.

ואלו הערכים הסטנדרטיים המקובלים:

50% מהמתח כאשר $K=2$

60% מהמתח כאשר $K=1.667$

80% מהמתח כאשר $K=1.25$

ולכן זרם ההתנעה יחושב לפי הנוסחה-

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

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

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

ויסות מהירות סיבוב הרוטור (עוגן)

כאמור למנועי השראה האסיכרוניים 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.

כמובן כי ניתן גם לשנות את המהירות ע"י שינוי מס' הקטבים אך דבר זה מוגבל למנועי "דלנדר" וגם זאת ל-2 מהירויות 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. ניתן לחשב את ערך הנגד המשתנה הטורי לפי הנוסחה הבאה-

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

כאשר:

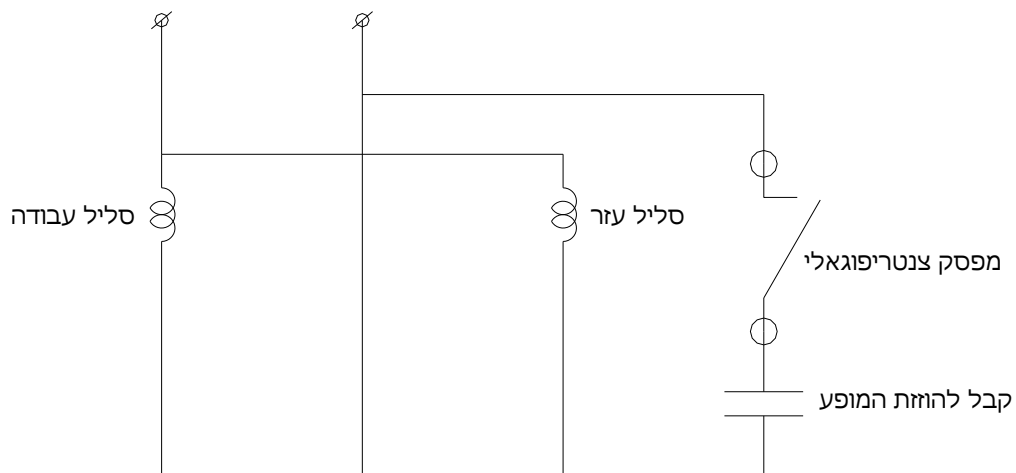
התנגדות נוספת במעגל הרוטור לויסות מהירות	R_V	[Ω]
החליקה במהירות V	s_V	
מומנט במהירות V	M_V	[Nm]

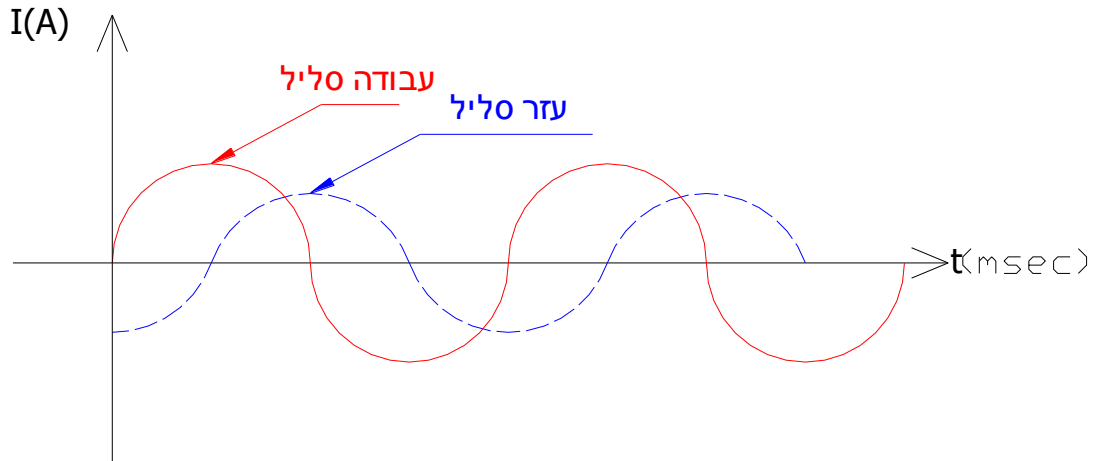
מנוע השראה אסיכרוני חד מופעי

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. מגבלות המנוע:

- א. היותו בנוי להספקים נמוכים.
- ב. מקדם הספק גרוע.
- ג. בעל נצילות נמוכה.
- ד. הצורך בפיצול מופע השדה המגנטי בסטטור לצורך הנעתו.

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. הפיתרון לכך הוספת שדה מגנטי נוסף בסטטור הכוונה ליצור פסיעות של $90^\circ = \frac{360^\circ}{4}$ ובכך ליצור את התנועה הסיבובית של העוגן. 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° 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.





מנועים מיוחדים

מנוע תלת מופעי מסוג "דלנדר"

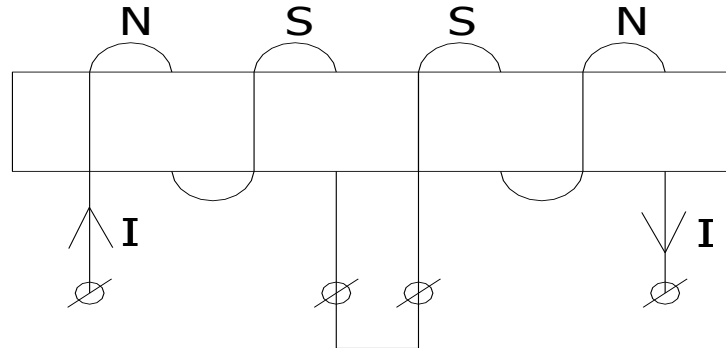
השיטה מבוססת על שינוי המספק הקטבים המגנטיים לכל מופע בסטטור. כל סליל למופע בסטטור במנוע ה"דלנדר" מחולק ל-2 חצאי סליל וניתן לחבר את 2 חצי הסלילים ב-2 אופנים:

א. חיבור טורי.

ב. חיבור מקבילי.

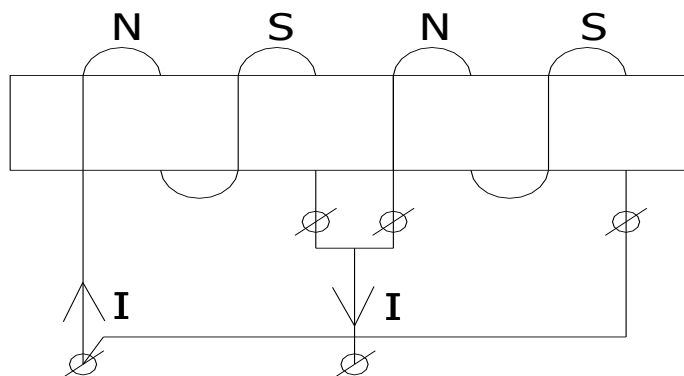
בחיבור טורי של 2 חצאי הסליל מתקבלים 2 זוגות קטבים מגנטיים ולכן מהירות בחיבור טורי תהיה:

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



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 סינכרוני

למנוע סינכרוני 3 תכונות עיקריות:

1. מהירות סיבוב העוגן במנוע מסונכרנת עם המהירות של השדה המסתובב, ובהתאם למספר זוגות הקטבים ולתדירות הרשת, ומכן שמו-מנוע סינכרוני.

מסיבה זו קבוע מהירות הסיבוב של העוגן אינו תלוי בגודל העומס המחובר לציר המנוע כמו במנוע אסינכרוני.

2. מנוע סינכרוני יכול לשמש גם כמחולל זרם (גנרטור) לזרם חילופין. הדרך להפיכתו של המנוע למחולל דורשת לחבר את הסטטור לזרם חילופין ואת העוגן למקור מתח ישר. כאשר ינותק מקור הזרם החילופין לסטטור ובו זמנית ימשיך לזרום זרם דרך סלילי העוגן המסתובב הזרם הישר יפעיל את המנוע כמחולל לזרם חילופין.

3. ניתן לווסת את גורם ההספק של המנוע ובעקבותיו את גורם ההספק שהמנוע גורם לרשת. הדבר נעשה ע"י שינוי היחס בין גודל העומס P2 לבין גודל הזרם לעוגן I2, ככל שגדל הזרם לעוגן ביחס לגודל העומס, תקטן זווית המופע בין המתח לזרם בסטטור ויגדל גורם ההספק. בעבודה בריקם כאשר P2 שואף ל-0, והזרם לעוגן נשאר כשהיה כלומר גדול מאוד ביחס להספק P2, ישתנה אופי הזרם בסטטור ממפגרים למקדים ביחס למתח, עד כדי זווית של כ-90° במצב זה למנוע יש אופי קיבולי. ולכן מנוע זה נקרא גם כ-"קבל סינכרוני" תכונה זו יכולה להיות מנוצלת לשיפור גורם ההספק של רשת חשמל אליה מחובר המנוע. יש לציין כי מחירו של מנוע סינכרוני בשל מורכבותו והטיפול בו מבטל את השימוש בו לצורך שיפור גורם ההספק. המנוע כדאי אך ורק כאשר דרושה מהירות סיבוב קבועה ללא תלות בתנאי העמסה. מבנה המנוע-

כמו כל מנוע הוא בנוי מ-2 חלקים עיקריים: סטטור ורוטור (עוגן). הסטטור דומה בכל לסטטור שבמנוע אסינכרוני, ואילו העוגן דומה בכל לעוגן של מחולל זרם חילופין הכולל סלילים, טבעות החלקה ופחמים. מספר הסלילים בעוגן יהיה כזה שייוצרו בהם מספר קטבים מגנטיים זהה למספרם בסטטור. לכן לסיבוב העוגן חייב להתקיים העיקרון שקוטב מגנטי כלשהו המשתנה בסטטור ימצא תמיד מול קוטב שונה מימנו בעוגן.