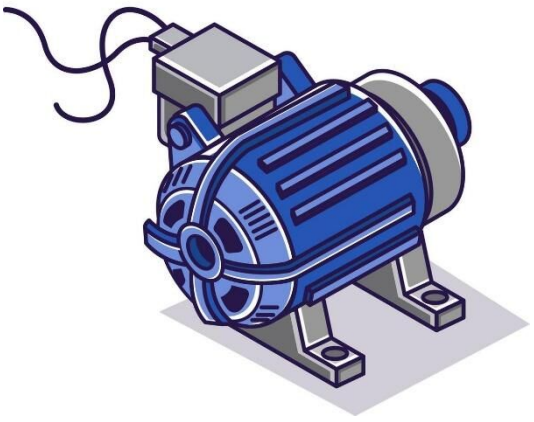
נוסחאון מה"ט לבחינה

במכונות חשמל והינע

לטכנאי והנדסאי חשמל



מספר שאלון	מהדורה מספר	תאריך
97161 , 97163 , 93619	1	03/25

<u>מבוא</u>

חוברת נוסחאות זו נועדה ללוות את הקורס "מכונות חשמל והינע" להנדסאי חשמל במהלך שנת הלימודים ועד לבחינה החיצונית .

החוברת בנויה לפי פרקים , כאשר לכל מכונת חשמל מוקדש פרק משלה.

פרק 1 - שנאים 4

פרק 2 - מנוע השראה 18

פרק 3 - גנרטור סינכרוני 31

פרק 4 - מנוע סינכרוני 41

פרק 5 - מנוע DC 46

פרק 6 - גנרטור DC 59

פרק 7 - הינע חשמלי 64

נספח - נוסחאות כלליות בחשמל..... 80

כללי הכתיבה בחוברת זו :

1. בכל המכונות בזרם חילופין (שנאים , מכונת השראה ומכונה סינכרונית) , אם לא מצוין **<u>בפירוש</u>** ערך פאזי בנוסחה הרי שמדובר על ערך קו (ערך שלוב).

לדוגמה : בנוסחה $S = \sqrt{3}\, U \cdot I$ המתח והזרם הם קוויים (שלובים) לעומת זאת בנוסחה $S = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph}$ הזרם והמתח הם מופעיים (פאזיים).

2. בכל המכונות בזרם חילופין (שנאים , מכונת השראה ומכונה סינכרונית) , אם לא מצוין סימון של פאזור (חץ מעל האות $\vec{U}$) אז מדובר על **<u>הגודל</u>** בלבד , ללא זווית.

לדוגמה : בנוסחה $S = \sqrt{3}\, U \cdot I$ הכוונה **לגודל** המתח והזרם (ללא פאזורים וזוויות) לעומת זאת בנוסחה $\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I}^{*}$ יש להשתמש בפאזורים , גודל וזווית.

ערכים פיזיקליים – סימונים ויחידות

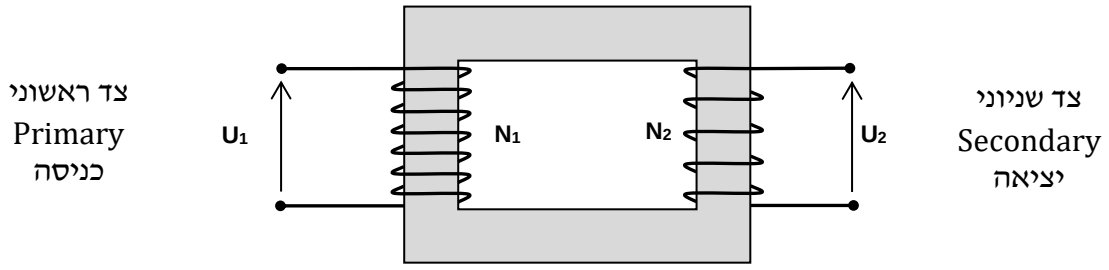
כינוי	סימון	יחידות במערכת SI	יחידות במערכת SI בעברית
מרחק , רדיוס , אורך	l, r, d	m	מטר
זווית	φ, α, δ	rad , °	רדיאן , מעלה
מתח , כא״מ	U, V, E	v	וולט
זרם חשמלי	I	A	אמפר
הספק פעיל	P	W	וואט
הספק נדמה	S	VA	וולט-אמפר
הספק היגבי	Q	VAR	וולט-אמפר-ריאקטבי
התנגדות	R, r	Ω	אוהם
היגב	X	Ω	אוהם
עכבה	Z	Ω	אוהם
שטף מגנטי	ϕ	Wb	וובר
מומנט	T, M	Nm	ניוטון-מטר
כוח	F	N	ניוטון
משקל	G	N	ניוטון
מסה	m	Kg	קילוגרם
מהירות	n	rpm	סל״ד
מהירות קווית	v	m/s	מטר לשניה
זמן	t	sec	שניה
זמן מחזור	T	sec	שניה
תדר , תדירות	f	Hz	הרץ
תדר זוויתי , תדר מעגלי	ω	rad/sec	רדיאן לשניה
טמפרטורה	Θ	°C	מעלת צלזיוס
קיבול	C	F	פאראד
השראות	L	H	הנרי

חוברת הנוסחאות נכתבה על ידי נדב אברני , מכללת אשקלון.

פרק 1 - שנאים

1.1 שנאי אידיאלי

בשנאי אידיאלי אין הפסדי הספק $S_1 = S_2$, הנצילות עומדת על 100% ואין מפל מתח בסלילים



K – יחס השנאה

שווה ליחס המתחים או הזרמים

הפאזיים או ליחס הליפופים

$$K = \frac{U_{1\,ph}}{U_{2\,ph}} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{I_{2\,ph}}{I_{1\,ph}}$$

חיבור השנאי למתח שונה מהנקוב:

$$\frac{U_{1\text{ חדש}}}{U_{2\text{ חדש}}} = \frac{U_{1\,n}}{U_{2\,n}}$$

מציאת זרמים נקובים בשנאי תלת מופעי

אלה הם הזרמים המירביים המותרים לזרום בסלילי השנאי. חריגה מעבר לזרם הזה תגרום נזק לסלילים ולקיצור חיי השנאי.

$$I_{1\,n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1\,n}} \qquad I_{2\,n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2\,n}}$$

הערה : בשנאי חד פאזי , אין $\sqrt{3}$

הקשר בין זרמים ומתחים בשנאי

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

יחס הזרמים הפוך מיחס המתחים (הנוסחה תקפה לשנאי אידיאלי בלבד)

הקשר בין מתח הסלילים לבין השטף בליבת השנאי

$$E = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{max}$$

E – כא״מ מושרה בסליל (ראשוני או שניוני) , f [Hz] – תדירות הרשת

N – מס׳ ליפופים בסליל (ראשוני או שניוני) , Φ [Wb] = שטף

חיבור שנאי למתח נמוך מהנקוב

אסור לחבר את השנאי למתח יותר גבוה מהמתח הנקוב מחשש שיתחמם יותר מהמותר ויינזק.

מותר לחבר את השנאי למתח נמוך מהנקוב , אבל במקרה זה אסור להעמיס אותו בהספק נקוב כי הזרם יחרוג מ I_n .

במקרה כזה צריך לעדכן את ההספק המרבי המותר :

$$S_{n\ \text{מעודכן}} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_{\text{חדש}}$$

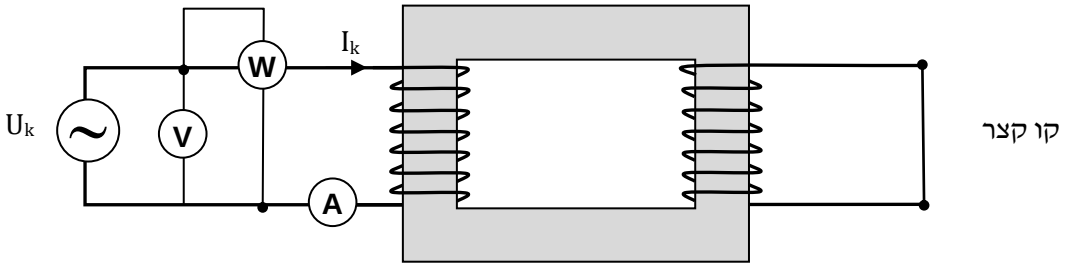
נוסחה חלופית למצב זה :

$$S_{n\ \text{מעודכן}} = \frac{U_{\text{חדש}}}{U_n} \cdot S_n$$

1.2 ניסוי קצר בשנאי (שנאי מעשי)

אם לא מצוין אחרת , הניסוי מתבצע מצד המתח הראשוני (צד שניוני מקוצר).

בניסוי קצר **נקוב** : זרם הקצר הוא הזרם הנומינלי $I_K = I_n$. מתח הקצר U_K הוא מתח קצר נקוב וההספק בניסוי הוא הפסדי הנחושת הנקובים בסלילים $P_K = \Delta P_{Cu\,n}$.



מתח קצר באחוזים

$$U_{K\,\%} = \frac{U_K}{U_n} \cdot 100\%$$

חישוב הפסדי נחושת (הפסדים משתנים, הפסדים חשמליים בסלילים)

$$\Delta P_{Cu} = \ P_K \ = \sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K \cdot cos\varphi_K$$

הערה : בשנאי חד פאזי , אין $\sqrt{3}$

הפסדי נחושת נקובים

$$\Delta P_{Cu\ n} = S_n \cdot \frac{U_{Kn}(\%)}{100} \cdot cos\varphi_K$$

אם ניסוי קצר לא נערך בזרם קצר נקוב ($I_K \neq I_n$) יש להשתמש בגורם בגורם תיקון β_K כדי לחשב מתח קצר והפסדי נחושת נקובים.

גורם תיקון בניסוי לא נקוב ($I_K \neq I_n$)

$$\beta_K = \frac{I_K}{I_n}$$

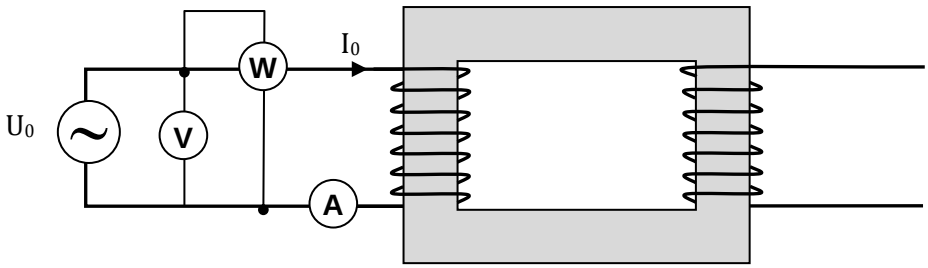
מציאת הפסדי נחושת <u>נקובים</u> ומתח קצר <u>נקוב</u> בניסוי לא נקוב

$$\Delta P_{Cu\,n} = \frac{\Delta P_{Cu}}{{\beta_K}^2} \quad , \quad U_{K\,n} = \frac{U_K}{\beta_K}$$

1.3 ניסוי ריקם בשנאי (שנאי מעשי)

אם לא מצוין אחרת , הניסוי מתבצע מצד המתח הראשוני (צד שניוני פתוח).

בניסוי ריקם **נקוב** : מתח הריקם הוא המתח הנומינלי $\mathbf{U_0 = U_n}$ וההספק בניסוי הוא הפסדי הברזל הנקובים בליבה $P_0 = \Delta P_{Fe\,n}$.



ריקם

זרם הריקם באחוזים

$$I_{0\,\%} = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100\%$$

חישוב הפסדי ברזל (הפסדים מגנטיים בליבה , הפסדים קבועים)

$$\Delta P_{Fe} = \ P_0 \ = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot cos\varphi_0$$

הערה : בשנאי חד פאזי , אין $\sqrt{3}$

הפסדי ברזל נקובים

$$\Delta P_{Fe\ n} = S_n \cdot \frac{I_{0n}(\%)}{100} \cdot cos\varphi_0$$

מציאת הפסדי ברזל נקובים בניסוי לא נקוב

אם ניסוי ריקם לא נערך במתח נקוב **($\mathbf{U_0 \neq U_n}$)** אז יש להכניס גורם תיקון $\left(\frac{U_0}{U_n}\right)^2$

$$\Delta P_{Fe\,n} = \frac{\Delta P_{Fe}}{\left(\frac{U_0}{U_n}\right)^2}$$

1.4 שנאי מועמס

מקדם העמסה β

היחס בין הספק העומס להספק הנקוב

$$\beta = \frac{I_{LOAD}}{I_{2n}} \approx \frac{S_{LOAD}}{S_n}$$

מציאת הספק העומס מתוך β

$$S_{LOAD} \approx \beta \cdot S_n$$

הפסדי נחושת בעומס כלשהו

תלויים בזרם ולכן משתנים בעומסים שונים.

$$\Delta P_{Cu} = \beta^2 \cdot \Delta P_{Cu\,n}$$

הפסדי ברזל במתח שונה מהנומינלי

הפסדי ברזל תלויים במתח הזנה.

אם משנים את מתח השנאי,

גם הפסדי הברזל ישתנו.

$$\Delta P_{Fe} = \left(\frac{U_{\text{חדש}}}{U_n}\right)^2 \cdot \Delta P_{Fe\,n}$$

נצילות השנאי

נוסחה כללית.

היחס בין ההספק הפעיל ביציאה להספק הכניסה.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}}$$

נוסחת הנצילות מתוך הערכים הנקובים ונתוני העומס

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot cos\varphi_2}{\beta \cdot S_n \cdot cos\varphi_2 + \Delta P_{Fe} + \beta^2 \cdot \Delta P_{Cu\,n}}$$

$cos\varphi_2$ - מקדם הספק של העומס

נצילות מכסימלית

מקדם העמסה שבו מתקבלת נצילות מרבית

$$\beta_{\eta-max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cu\,n}}}$$

- למציאת העומס S שבו הנצילות מרבית : $S = \beta_{\eta\text{-}max} \cdot S_n$
- אם מבקשים לחשב את הנצילות המרבית, אז מציבים את $\beta_{\eta-max}$ בנוסחת הנצילות.
- מבין כל העומסים שניתן לחבר , הנצילות המרבית הגבוהה ביותר תתקבל כאשר העומס התנגדותי (אקטיבי) , $cos\varphi_2 = 1$.

מפל מתח על שנאי

$$\Delta U_{\%} = \beta \cdot U_{Kn\,\%} \cdot \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

φ_K – זווית המופע של ניסוי קצר. מחושבת מתוך $cos\varphi_K$. ואם מקדם ההספק לא נתון , אז ניתן לחלץ אותו מהנוסחה $P_K = \sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K \cdot cos\varphi_K$.

φ_2 – זווית המופע של העומס. מחושבת מתוך $cos\varphi_2$. אם העומס הוא קיבולי אז φ_2 היא **<u>שלילית</u>** ובנוסחה יהיה חיבור.

חישוב המתח על העומס (לאחר נפילת מתח)

$$U_2 = U_{2\,n} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100\%}\right)$$

המתח הראשוני הנדרש לקבלת מתח שניוני <u>נקוב</u> בעומס (כדי לפצות על נפילת המתח בשנאי)

$$U_1 = U_{1\,n} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{\%}}{100\%}\right)$$

במצב זה שורר בצד השניוני על העומס מתח נומינלי $U_{2\,n}$

נוסחאות נוספות לחישוב מפל מתח $\Delta U_{\%}$

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

(+) באופי עומס השראי , (-) באופי קיבולי

$$\Delta U_{R\%} = \frac{\Delta P_{Cu\,n}}{S_n} \cdot 100\% \quad , \quad \Delta U_{X\%} = \sqrt{(U_{K\%})^2 - (\Delta U_{R\%})^2}$$

1.5 חיבור שנאים במקביל

התנאים ההכרחיים לחיבור שנאים במקביל:

1. מתחי השנאים (ראשוניים ושניוניים) חייבים להיות שווים וסדר פאזות זהה .

ניתן לחבר את כל השנאים למתח רשת שנמוך או שווה מהמתח הנקוב שלהם ובתנאי שיש לכולם אותו יחס מתחים (U_{1n}/U_{2n}) . במקרה כזה יש **לעדכן** את ההספק הנקוב של השנאים שחוברו למתח שונה מהנקוב שלהם.

2. מספרי קבוצות החיבורים צריכים להיות שווים בכל השנאים.

תנאים רצויים :

1. יחס ההספקים הנקובים לא עולה על 3.

2. מתחי קצר באחוזים קרובים זה לזה עד פער של $\pm 10\%$ לכל היותר

חלוקת העומס המשותף בין שנאים מקבילים

$$S_X = \left(\frac{S_{LOAD}}{\frac{S_{n\,1}}{U_{Kn\,1}} + \frac{S_{n\,2}}{U_{Kn\,2}} + \frac{S_{n\,3}}{U_{Kn\,3}} + \cdots} \right) \cdot \frac{S_{n\,X}}{U_{Kn\,X}}$$

S_{LOAD} - העומס הכולל המשותף לכל השנאים

S_X – תרומת של שנאי מס׳ x לעומס המשותף

$U_{Kn\,x}$ - מתח קצר **<u>נקוב</u>** של כל שנאי (אפשר לעבוד באחוזים או בוולט , אך לא לערבב)

לחישוב β של כל שנאי : $\beta_X = \frac{S_X}{S_n}$. אם $\beta_X > 1$ אז השנאי עובד בעומס יתר.

עדכון ההספק הנקוב ומתח הקצר הנקוב באחוזים

אם אחד מהשנאים מחובר למתח **נמוך מהמתח הנקוב** שלו , אז צריך לעדכן את ההספק הנקוב שלו (כדי שהזרם שלו לא יחרוג מהנקוב). רק אז יהיה מותר להציב בנוסחה של חלוקת העומס. מתח הקצר באחוזים גם צריך לעבור עדכון (מתח הקצר בוולט נשאר זהה).

$$S_{n\ \text{מעודכן}} = \frac{U_{\text{חדש}}}{U_n} \cdot S_n \qquad U_{kn\%\ \text{מעודכן}} = \frac{U_n}{U_{\text{חדש}}} \cdot U_{kn\%}$$

העומס <u>המכסימלי</u> שאפשר לחבר לשנאים מקבילים

חישוב הספק העומס המירבי שמותר לחבר לקבוצת השנאים , מבלי שאף אחד יעבוד במצב של עומס יתר.

$$S_{max} = \left(\frac{S_{n\,1}}{U_{Kn\,1}} + \frac{S_{n\,2}}{U_{Kn\,2}} + \frac{S_{n\,3}}{U_{Kn\,3}} + \cdots \right) \cdot U_{Kn\,\boldsymbol{min}}$$

$U_{Kn\,min}$ - זהו מתח הקצר הקטן ביותר בקבוצת השנאים המחוברים במקביל.

במצב זה השנאי בעל <u>מתח הקצר הנמוך ביותר</u> עובד בהעמסה מלאה $\beta=1$.

הוספת עכבה לשנאי כדי להגדיל את מתח הקצר שלו (לשני שנאים במקביל)

המטרה : <u>הגדלת</u> מתח קצר של אחד השנאים כדי ליצור **<u>שוויון</u>** בין מתחי הקצר של השנאים. כך העומס המכסימלי שניתן לחבר לבנק השנאים יהיה גדול יותר וחלוקת העומס תהיה יעילה יותר.

העכבה תהיה בעלת אופי השראי , עם אותו cosφ כמו של השנאי ומחוברת על כל אחד מהקווים בצד הראשוני או השניוני .

גודל העכבה הנוספת לכל קו

$$|Z_{add}| = \frac{{U_n}^2}{S_n} \cdot \left[\frac{U_{Kn\,\%}\,(\text{גבוה}) \; - U_{Kn\,\%}\,(\text{נמוך})}{100} \right]$$

מרכיבי העכבה (הנגד והיגב המשרן)

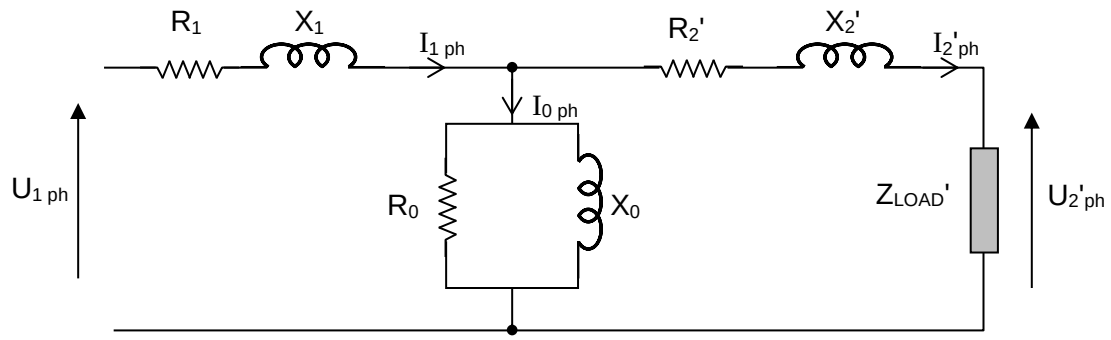
$$R_{add} = |Z_{add}| \cdot cos\varphi_K \qquad , \qquad X_{add} = |Z_{add}| \cdot sin\varphi_K$$

<u>הערה חשובה</u> : אם לאחר הוספת העכבה יש לחשב את <u>חלוקת העומס</u> ביו השנאים מחדש, אז יש להציב בנוסחת החלוקה מתח הקצר **<u>החדש</u>** של אותו שנאי.

1.6 מעגל תמורה של שנאי

מעגל תמורה מייצג <u>פאזה אחת בלבד</u>. לכן צריך לעבור לזרמים ומתחים פאזיים (כמובן להתייחס לחיבור Δ או Y) . בכל הנוסחאות פה מדובר על ערכים פאזיים.

מעגל תמורה מדויק – מעגל T



R_1 , R_2- התנגדות של הסליל הראשוני ושניוני בהתאמה

ההספקים של הנגדים האלו הם הפסדי הנחושת של השנאי.

X_1 , X_2 ההשראות של כל סליל

R_0 , X_0 - ענף המיגנוט

R_0 התנגדות המייצגת את הפסדי הברזל בליבה. ההספק של נגד זה הוא ΔP_{Fe}

X_0 השראות המייצגת את ייצור השטף המגנטי Φ הדרוש לפעולת השנאי.

שיקוף ערכים לצד הראשוני

$$R_2' = k^2 \cdot R_2 \quad , \quad X_2' = k^2 \cdot X_2 \quad , \quad Z_{LOAD}' = k^2 \cdot Z_{LOAD}$$

$$U'_{2ph} = k \cdot U_{2\,ph} \quad , \quad I'_{2ph} = \frac{I_{2ph}}{k}$$

k במעגל התמורה הוא יחס המתחים <u>הפאזיים</u> (או יחס הליפופים)

$$K = \frac{U_{1n\,ph}}{U_{2n\,ph}} = \frac{N_1}{N_2}$$

חישוב ערכים אמיתיים – יציאה משיקוף

$$U_{2ph} = \frac{U'_{2\,ph}}{k} \quad , \quad I_{2ph} = I'_{2ph} \cdot k$$

חישוב הספקים במעגל תמורה

ברכיבים המשוקפים – ניתן לחשב את ההספק ישירות במעגל התמורה או לפי הערכים האמיתיים.

חישוב הפסדי נחושת בסלילים

$$\Delta P_{Cu\,1} = 3 \cdot \left(I_{1\,ph}\right)^2 \cdot R_1$$

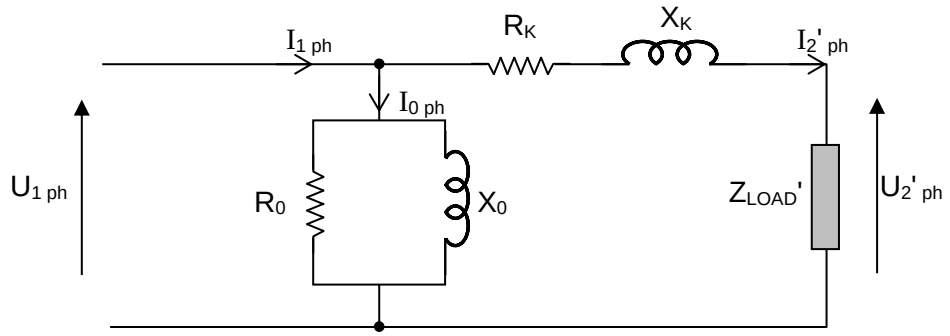
$$\Delta P_{Cu\,2} = 3 \cdot \left(I_{2\,ph}\right)^2 \cdot R_2 \quad = \quad 3 \cdot \left(I'_{2\,ph}\right)^2 \cdot R'_2$$

חישוב הספק כניסה P_1 והספק יציאה P_2

$$P_1 = 3 \cdot U_{1ph} \cdot I_{1ph} \cdot cos\varphi_1$$

$$P_2 = 3 \cdot U_{2ph} \cdot I_{2ph} \cdot cos\varphi_2 \quad = 3 \cdot U'_{2ph} \cdot I'_{2ph} \cdot cos\varphi_2$$

מעגל תמורה מקורב (מעגל גאמא Γ)



$$R_K = R_1 + R'_2 \qquad X_K = X_1 + X'_2$$

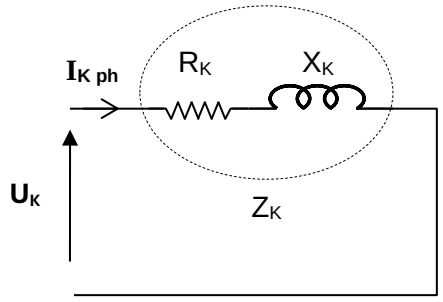
חישוב הפסדי נחושת כוללים של השנאי (במעגל המקורב)

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot \left(I'_{2\,ph}\right)^2 \cdot R_K$$

חישוב הפסדי ברזל של השנאי (במעגל המקורב)

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot \frac{\left(U_{1\,ph}\right)^2}{R_0}$$

<u>מעגל תמורה בניסוי קצר</u>



התנגדות והיגב קצר (אם נתונים R_1 , R_2) :

$$R_K = R_1 + R'_2$$

$$X_K = X_1 + X'_2$$

חישוב רכיבי קצר מניסוי קצר (Z_K , R_K , X_K)

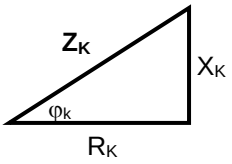
<u>גודל</u> עכבת הקצר Z_K :

$$Z_K = \frac{U_{K\,ph}}{I_{K\,ph}}$$

לחישוב X_K , R_K נעבוד עם מספרים מרוכבים :

$$\vec{Z}_K = Z_K \angle \varphi_K = R_K + jX_K$$

φ_K – זווית המופע של ניסוי קצר. מחושבת מתוך $cos\varphi_K$. ואם מקדם ההספק לא נתון , אז נחלץ אותו מהנוסחה $P_K = \sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K \cdot cos\varphi_K$



$$tg\varphi_K = \frac{X_K}{R_K}$$

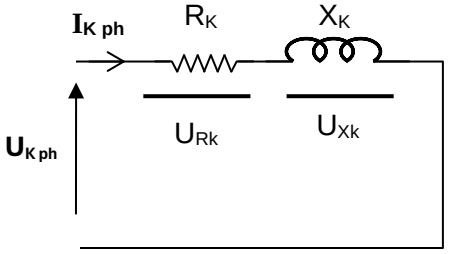
$$Z^2 = R^2 + X^2$$
פיתגורס

חישוב הפסדי נחושת (P_K , ΔP_{Cu}) :

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2_{K\,ph} \cdot R_K$$

<u>הערה</u> : מתוך הנוסחה הזו ניתן לחשב את R_K אם נתון ההספק.

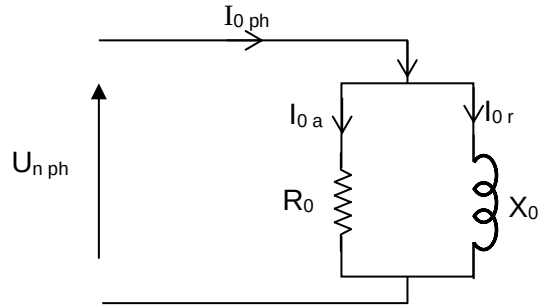
חישוב רכיבי מתח קצר :



בונים את פאזור המתח ומפרידי לשני רכיבים : אקטיבי וראקטיבי.

$$\vec{U}_K = U_K \angle \varphi_K = U_{RK} + jU_{XK}$$

מעגל תמורה בניסוי ריקם



$I_{0\,r}$ - רכיב ראקטיבי (זרם מיגנוט)

$I_{0\,a}$ - רכיב אקטיבי ,

גורם להפסדי הברזל בליבה

מציאת רכיבי זרם ריקם

$$\vec{I}_{0\,ph} = I_{0\,ph}\angle -\varphi_0 = I_{0a} - j \cdot I_{0\,r}$$

בהנחה שלמתח ניתנה זווית $0°$

חישוב רכיבי ריקם :

לפי חוק אוהם :

$$R_0 = \frac{U_{n\,ph}}{I_{0\,a}} \quad , \quad X_0 = \frac{U_{n\,ph}}{I_{0\,r}}$$

חישוב הספק בריקם P_0 (ΔP_{Fe} הפסדי הברזל בליבה):

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot I^2_{0\,a\,ph} \cdot R_0 \quad , \quad \Delta P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U^2_{n\,ph}}{R_0}$$

<u>הערה</u> : מתוך הנוסחה הזו ניתן לחשב את R_0 אם נתון ההספק.

פרק 2 – מנוע השראה (אסינכרוני) תלת מופעי

2.1 מהירות המנוע וחליקה

מהירות השדה המסתובב בסטטור:

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

f - תדירות הרשת [Hz]

p – מספר זוגות קטבים בסטטור

n_1 - מהירות **סינכרונית** (של השדה) [rpm] , סל״ד

סדרת המהירויות הסינכרוניות (בסל״ד) עבור תדר 50 Hz :

p=10	p=9	p=8	p=7	p=6	p=5	p=4	p=3	p=2	p=1
300	333.33	375	428.57	500	600	750	1000	1500	3000

חליקה :

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

n_1 - מהירות השדה בסטטור

n_2 - מהירות הרוטור

s=1 מתקבל כאשר מהירות הרוטור היא 0 (בהתנעה או כשהרוטור בלום)

מהירות ציר המנוע n_2 :

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s)$$

תדירות הזרם והמתח ברוטור f_2 :

$$f_2 = s \cdot f_1$$

כאשר הרוטור לא מסתובב (עומד, בלום) אז $s=1$ ולכן $f_2 = f_1$ (תדר הרשת).

כא"מ מושרה בסלילי הרוטור:

$$E_{2\,ph} = 4.44 \cdot f_2 \cdot N_{2\,ph} \cdot \Phi_{max}$$

$N_{2\,ph}$ - מס' הליפופים למופע בסלילי הרוטור

Φ_{max} - השטף במנוע [Wb]

$$E_{2\,ph} = s \cdot E_{20\,ph}$$

$E_{20\,ph}$ - הכא"מ המושרה בסלילי הרוטור כשהוא עומד (בלום, ללא תנועה). משמש כנקודת ייחוס למציאת הכא"מ המושרה בכל מהירות אחרת.

2.2 הספקים במנוע השראה

מעבר מכוח סוס (כ"ס , HP) לוואט [W] :

$$HP \xrightarrow{\times 736} W$$

$$1\,HP = 736\ W$$

ההספק הנקוב P_n של המנוע הוא הספק הציר של המנוע P_{out} .

הספק הכניסה P_{in} שנצרך מהרשת בסטטור :

$$P_{in} = \sqrt{3}\, U_{L1} \cdot I_{L1} \cdot \cos\varphi$$

U_{L1} , I_{L1} - המתח והזרם **הקוויים** (שלובים) בסטטור , הנצרכים מהרשת.

נצילות המנוע η :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \qquad P_{out} = P_{in} \cdot \eta$$

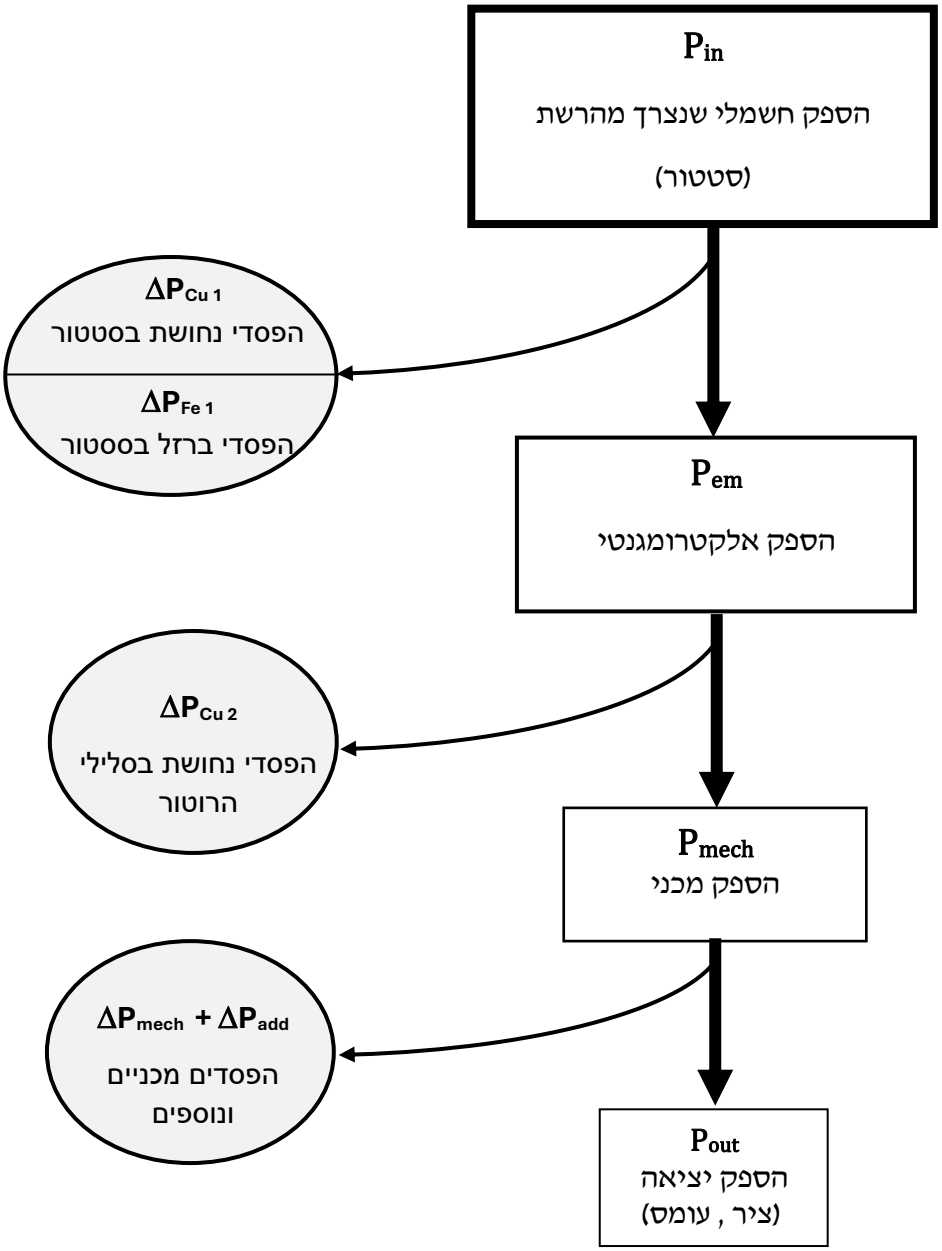
P_{out} - הספק יציאה , **הספק העומס , ההספק של ציר המנוע**

P_{in} - הספק כניסה , **ההספק החשמלי שצורך המנוע**

מציאת זרם הסטטור I_1 שנצרך מהרשת (כאשר נתונה הנצילות) :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \longrightarrow I_1 = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} \cdot U_{L1} \cdot cos\varphi}$$

תרשים זרימת הספק :



- **אם הפסדים מכניים זניחים אז** $P_{mech} = P_{out}$.

- חיסור של שני הספקים סמוכים , נותן את ההפסדים ביניהם :

$$\Delta P_{stator} = P_{in} - P_{em} \quad , \quad \Delta P_{Cu\,2} = P_{em} - P_{mech} \quad , \quad \Delta P_{mech} = P_{mech} - P_{out}$$

- חיסור הספקי כניסה ויציאה נותן את סך כל ההפסדים של המנוע

$$P_{in} - P_{out} = (\Delta P_{Cu\,1} + \Delta P_{Fe\,1} + \Delta P_{Cu\,2} + \Delta P_{mech})$$

הספק מכני P_{mech} :

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

הספק אלקטרומגנטי P_{em} :

$$P_{em} = \frac{P_{mech}}{1 - s}$$

הפסדים במנוע :

$\Delta P_{Fe\,1}$ - הפסדי הברזל בסטטור . אלה הפסדים קבועים (אם לא משנים את מתח המנוע).

ΔP_{mech} - הפסדים מכניים של הרוטור (בעיקר חיכוך). אלה הפסדים קבועים.

$\Delta P_{Cu\,1}$ - הפסדי הנחושת בסלילי הסטטור (בגלל ההתנגדות שלהם R_1), אלה הפסדים שמשתנים ותלויים בזרם .

$\Delta P_{Cu\,2}$ - הפסדי הנחושת בסלילי הרוטור (בגלל ההתנגדות שלהם R_2) אלה הפסדים שמשתנים ותלויים בזרם .

$$\Delta P_{Cu\,2} = s \cdot P_{em}$$

$$\Delta P_{Cu\,2} = \frac{s}{1 - s} \cdot P_{mech}$$

מציאת הפסדי נחושת מתוך התנגדות הסלילים

$$\Delta P_{Cu\,1} = 3 \cdot I_{1\,ph}^2 \cdot R_1$$

$$\Delta P_{Cu\,2} = 3 \cdot I_{2\,ph}^2 \cdot R_2$$

2.3 מומנטים במנוע השראה

המומנט המכני T_2 שהעומס מפעיל על הציר [N·m] :

$$T_{out} = \frac{9.55 \cdot P_{out}}{n_2}$$

המומנט האלקטרומגנטי T_{em} שמתפתח ברוטור [N·m] :

$$T_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n_1}$$

מומנט ריקם T_0 :

הוא המומנט שמפתח המנוע בגלל כוחות חיכוך ברוטור המסתובב. נקרא גם מומנט חיכוך.

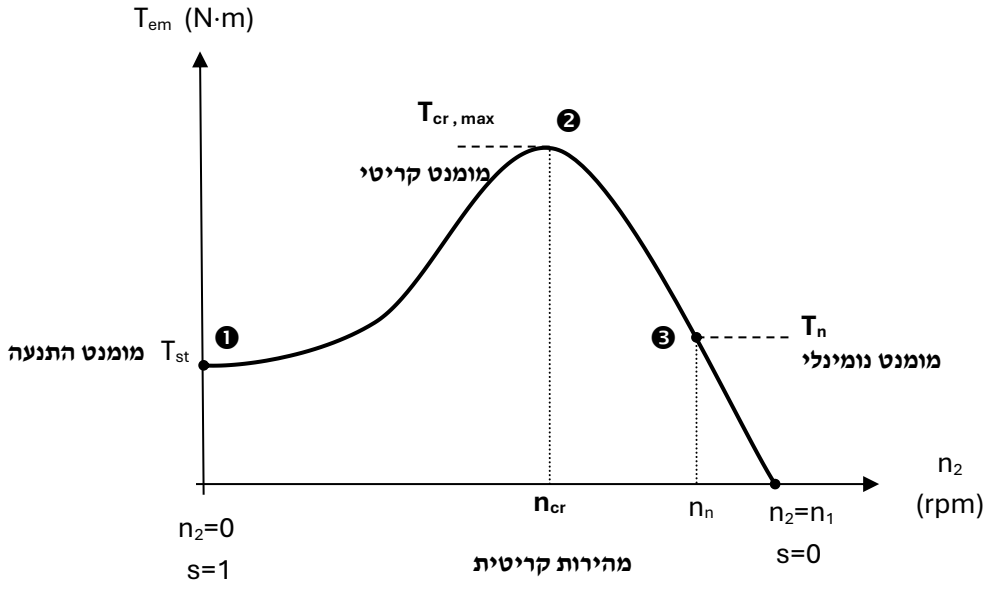
$$T_0 = T_{em} - T_{out}$$

$T_{em} = T_{out} + T_0$ המנוע מפעיל מומנט גדול יחסית כדי להתגבר על מומנט העומס + מומנט הריקם .

במנוע ללא הפסדים מכניים ובהזנחת מומנט הריקם ($T_0 = 0$) :

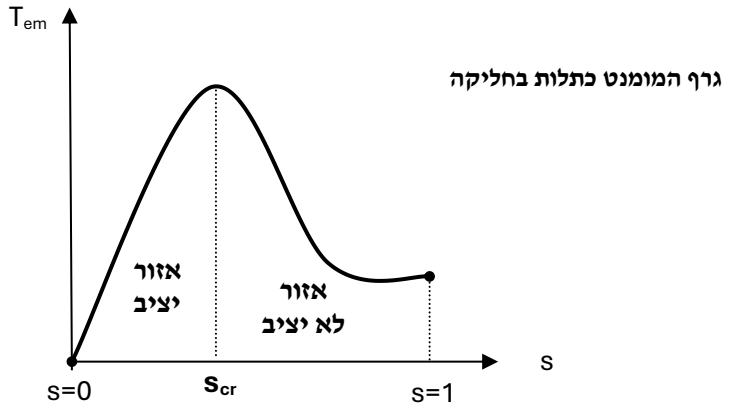
$$T_{out} = T_{em}$$

2.4 אופיין מכני של מנוע



המומנט הקריטי T_{cr} הוא המומנט המרבי T_{max} שיכול להתפתח במנוע.

המהירות הקריטית n_{cr} והחליקה הקריטית s_{cr} מחלקות את העקום לאזור יציב ואיזור לא יציב.

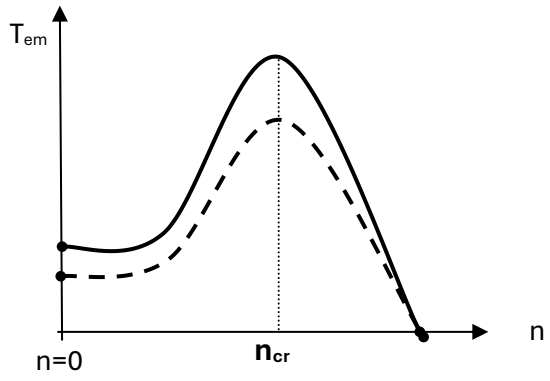


המנוע חייב לעבוד תמיד בתחום היציב ולכן החליקה חייבת להיות קטנה

מהקריטית : $s < s_{cr}$

השפעת פרמטרים שונים על האופיין המכני

1. שינוי מתח ההזנה



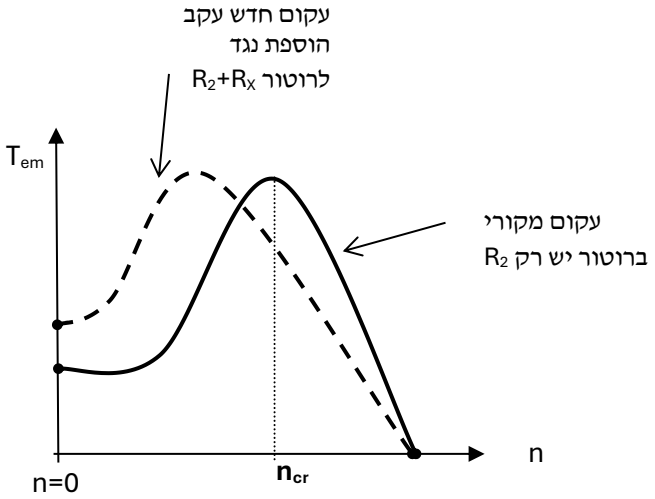
הקטנת מתח ההזנה

גורמת להחלשת המומנטים

ולהנמכת הגרף . מהירות קריטית לא משתנה.

$$T_{\text{חדש}} = T_{\text{ישן}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ph חדש}}}{U_{\text{ph ישן}}}\right)^2$$

2. הוספת נגד R_x בטור לסלילי הרוטור



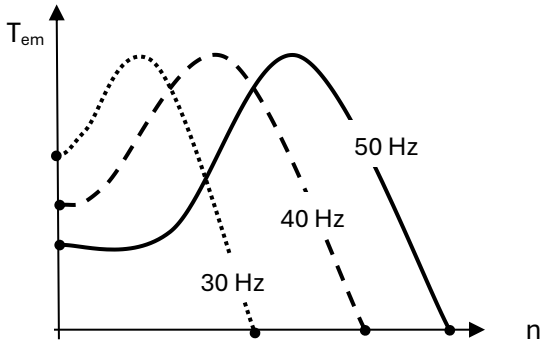
הוספת נגד גורמת להקטנת

המהירות הקריטית.

$$R_x = R_2 \cdot \left(\frac{T_n}{T_x} \cdot \frac{s_x}{s_n} - 1\right)$$

T_x , s_x - המומנט והחליקה **<u>המבוקשים</u>**.

3. הורדת תדר ההזנה (יחד עם הורדת מתח ההזנה באותו יחס)



הורדת התדר גורמת להקטנת מהירות המנוע

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

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s)$$

$$\frac{U_{1\ \text{חדש}}}{U_{1\ \text{ישן}}} = \frac{f_{1\ \text{חדש}}}{f_{1\ \text{ישן}}}$$

2.5 נוסחת קלוס

זוהי נוסחה חשובה המקשרת בין המומנט שמפתח המנוע T_{em} לבין החליקה s .

צורה 1 : שימושית בעיקר כאשר מחפשים את החליקה s_{cr} או s_x

$$2 \cdot \frac{T_{cr}}{T_x} = \frac{s_{cr}}{s_x} + \frac{s_x}{s_{cr}}$$

T_x , s_x - החליקה והמומנט **במצב עבודה מסוים** (לדוגמה- מצב נקוב , התנעה או מצב אחר) .

כאשר מחפשים חליקה s , מתקבלת משוואה ריבועית. **כדי להבטיח שהמנוע יעבוד באזור היציב יש לבחור את הפתרון המתאים : $s_x < s_{cr}$**

צורה 2 : שימושית בעיקר כאשר מחפשים את המומנט T_{cr} או T_x

$$T_x = \frac{2 \cdot T_{cr}}{\frac{s_{cr}}{s_x} + \frac{s_x}{s_{cr}}}$$

לחישוב מומנט ההתנעה שמייצר המנוע ברגע הראשון להפעלתו, T_{st} , נציב $\underline{s_{st} = 1}$

מציאת חליקה קריטית מתוך נוסחת קלוס

$$s_{cr} = s_x \cdot \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad , \quad \lambda = \frac{T_{cr}}{T_x}$$

חישוב מהירות קריטית n_{cr}

$$n_{cr} = n_1 \cdot (1 - s_{cr})$$

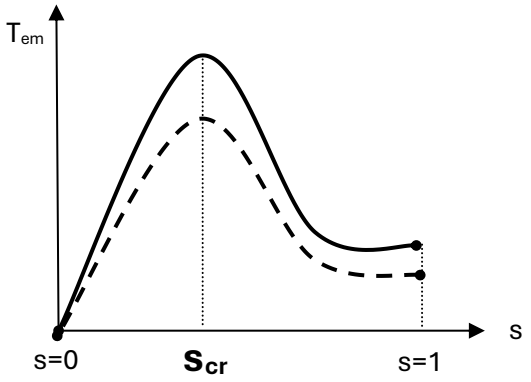
2.6 <u>שינוי מתח הזנה של מנוע השראה</u>

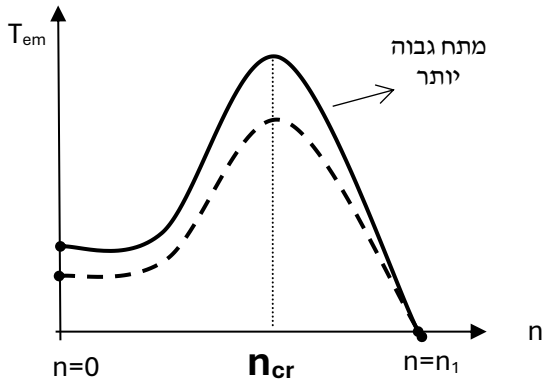
המומנט שמייצר המנוע T_{em} משתנה לפי יחס המתחים **הפאזיים** בריבוע :

$$\frac{T_{\text{חדש}}}{T_{\text{ישן}}} = \left(\frac{U_{\text{ph חדש}}}{U_{\text{ph ישן}}}\right)^2$$

$$T_{\text{חדש}} = T_{\text{ישן}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ph חדש}}}{U_{\text{ph ישן}}}\right)^2$$

החליקה הקריטית s_{cr} <u>אינה משתנה</u> , גם כשהמומנט הקריטי משתנה .





2.7 מתנע כוכב משולש

בזמן ההתנעה הסטטור מחובר בכוכב ובסיום ההתנעה עובר למשולש.

זרם התנעה בחיבור Y :

$$I_{st\,Y} = \frac{I_{st\,\Delta}}{3}$$

מומנט התנעה בחיבור Y :

$$T_{st\,Y} = \frac{T_{st\,\Delta}}{3}$$

2.8 שינוי מהירות במנוע

1. שינוי מהירות על ידי שינוי מספר קטבים p :

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

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s)$$

2. שינוי מהירות על ידי שינוי תדר אספקה f_1 :

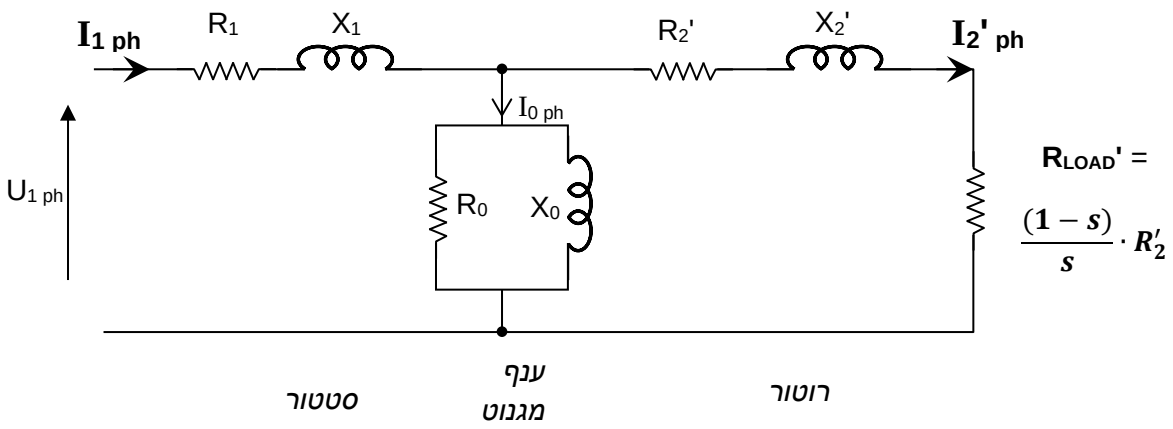
זו השיטה הנפוצה כיום על ידי משנה מהירות אלקטרוני המבוסס על שינוי תדר . על ידי הורדת התדר , ניתן להקטין את מהירות המנוע על פי הנוסחאות הרשומות קודם.

במקרה כזה חייבים לשנות גם את הגודל של מתח ההזנה שהמומנט שמייצר המנוע לא ייפגע.

$$\frac{U_{1\,\text{חדש}}}{U_{1\,\text{ישן}}} = \frac{f_{1\,\text{חדש}}}{f_{1\,\text{ישן}}}$$

2.9 מעגל תמורה של מנוע השראה

מעגל התמורה מייצג פאזה אחת של המנוע ולכן בעבודה עם מעגל תמורה, עובדים רק עם מתחים וזרמים פאזיים.



- R_1 – התנגדות סלילי הסטטור. הספק הנגד הזה הוא הפסדי הנחושת בסטטור ΔP_{Cu1} .

$$\Delta P_{Cu\,1} = 3 \cdot I_{1\,ph}^2 \cdot R_1$$

- R_2' – התנגדות סלילי הרוטור משוקפת לצד הראשוני. הספק הנגד הוא ΔP_{Cu2} .

$$\Delta P_{Cu\,2} = 3 \cdot I_{2\,ph}^{2\,\prime} \cdot R_2'$$

- R'_{LOAD} – התנגדות המייצגת את העומס המכני. **אחראי על ההספק המכני** P_{mech} .
הנגד הזה תלוי במצב העבודה של המנוע – כלומר במהירותו (דרך החליקה s)

$$P_{mech} = 3 \cdot I_{2\,ph}^{2\,\prime} \cdot R'_{LOAD}$$

- R_0 - התנגדות המייצגת את הפסדי הברזל בסטטור .

$$\Delta P_{Fe\,1} = 3 \cdot I_{ph\,R_0}^2 \cdot R_0$$

- חישוב ההספק האלקטרומגנטי של המנוע

$$P_{em} = 3 \cdot I_{2\,ph}^{2\,\prime} \cdot \frac{R_2'}{s}$$

- X_1 - ההיגב של כל סליל בסטטור
- X_2 - ההיגב של כל סליל ברוטור
- X_0 - היגב המייצג את ייצור השטף במנוע

דגשים לפתרון בעזרת מעגל תמורה

1. המעגל מייצג פאזה אחת. כל הזרמים והמתחים בו הם פאזיים.

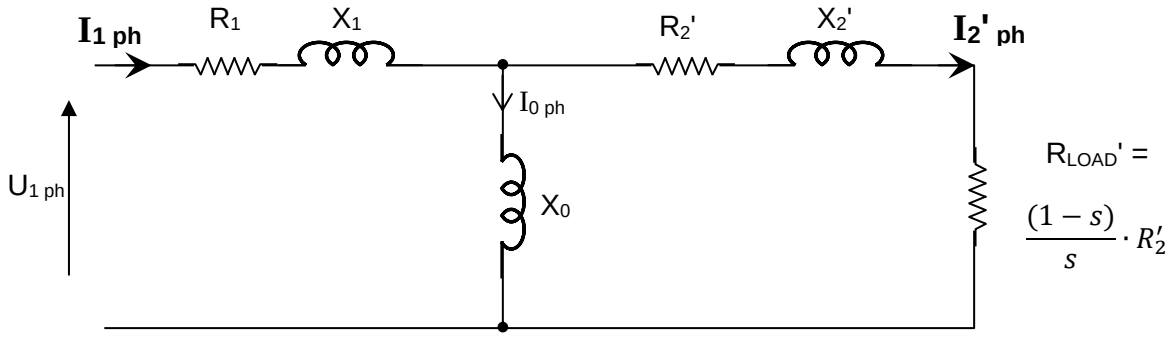
2. גורם ההספק $\cos\varphi$ של המנוע מחושב על ידי הפרש המופע בין מתח וזרם הסטטור או בעזרת הזווית של עכבת המנוע השקולה Z_T .

3. הספק כניסה מחושב על ידי $P_{in} = \sqrt{3}\, U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi$ **(ערכים קווים)** או

$P_{in} = 3\, U_{1ph} \cdot I_{1ph} \cdot \cos\varphi$ **(ערכים פאזיים)**

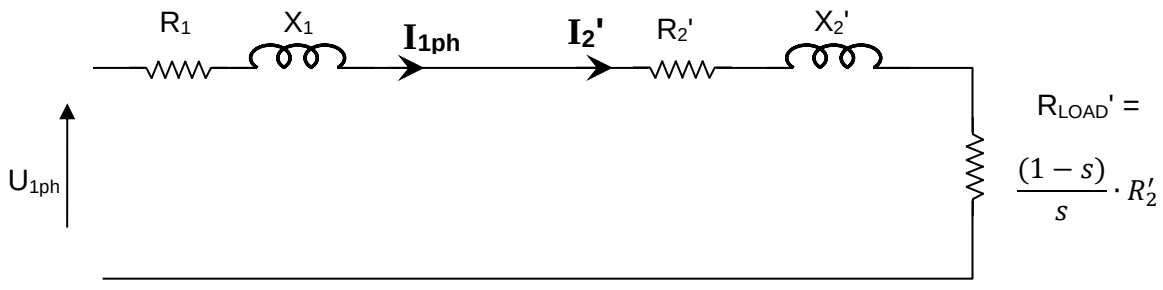
מעגל תמורה מקורב - הזנחת הפסדי הברזל

לפעמים הפסדי הברזל בסטטור זניחים $\Delta P_{Fe} = 0\ w$ במקרה כזה הנגד $R_0 \to \infty$ כלומר נתק ולכן לא מופיע במעגל התמורה.



מעגל תמורה מקורב - הזנחת ענף המיגנוט

אם רשום בשאלה <u>שניתן להזניח את ענף המיגנוט</u> אז מקבלים מעגל טורי :



פרק 3 – גנרטור סינכרוני

העוגן הוא כינוי לסטטור, אליו מתחבר העומס והזרם בו I_a (AC). ברוטור זורם זרם עירור I_f (DC).

3.1 כא״מ הגנרטור

מהירות הרוטור ומהירות השדה המסתובב בסטטור:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

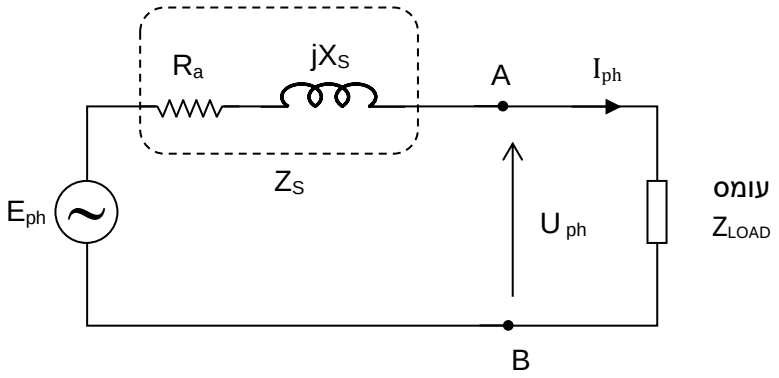
f - תדירות הרשת [Hz]

p – מספר זוגות קטבים בסטטור

n - מהירות הרוטור או השדה [rpm] , סל״ד

מעגל תמורה של הסטטור:

המעגל התמורה יש לעבוד עם ערכים פאזיים בלבד.



R_a – התנגדות אוהמית של סלילי הסטטור (למופע).

X_S – היגב סינכרוני של סלילי הסטטור (למופע).

$Z_S = R_a + j \cdot X_S$ עכבה סינכרונית של הגנרטור.

E_{ph} - הכא״מ המושרה הפאזי שנוצר בסלילי הסטטור.

U_{ph} - מתח הדקים של הגנרטור (המתח על העומס). המתח הנקוב U_n הוא מתח הדקים.

חישוב הכא"מ המושרה של גנרטור:

$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} \cdot \vec{Z}_S$$

בנוסחה הזו יש לעבוד עם זוויות ופאזורים. **כל הערכים בנוסחה הם פאזיים !**

זווית פיסוק (זווית העמסה):

זו הזווית בין הכא"מ המופעי לבין מתח ההדקים המופעי. זווית הפיסוק במחולל היא תמיד חיובית.

$$\delta = \varphi_E - \varphi_U$$

כא"מ מושרה בסלילי הסטטור:

$$\mathrm{E_{ph}} = 4.44 \cdot \mathrm{f} \cdot \mathrm{N} \cdot \Phi_{max}$$

N - מס' הליפופים למופע בסלילי הסטטור

Φ_{max} – השטף המגנטי במחולל [Wb]

מציאת זרם העומס מתוך הערכים הנקובים של המחולל :

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot cos\varphi_n} \quad \text{או} \quad I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

מציאת זרם סטטור

מתוך כא"מ ומתח הדקים :

$$\vec{I}_{ph} = \frac{\vec{E}_{ph} - \vec{U}_{ph}}{\vec{Z}_S}$$

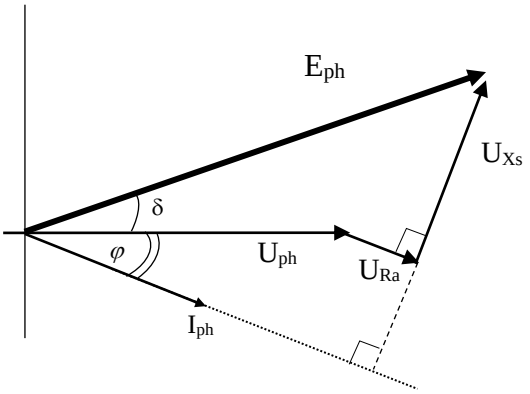
3.2 בניית דיאגרמת פאזורים של המתחים בגנרטור

א. בדיאגרמה מופיעים 4 מתחים (פאזורים) $\vec{E}_{ph}$, $\vec{U}_{ph}$, $\vec{U}_{Ra}$, $\vec{U}_{Xs}$ והזרם I_{ph} . אפשר לתת לזרם זווית $0°$ או למתח U_{AB} .

ב. למתח U_{Ra} יש **אותו כיוון** כמו של הזרם . המתח U_{Xs} מאונך לזרם I וגם למתח U_{Ra} .

ג. זווית המופע φ נמצאת בין המתח U_{ph} לזרם I . זווית הפיסוק δ נמצאת בין הכא"מ E_{ph} למתח ההדקים U_{ph}.

דוגמה לשרטוט דיאגרמת פאזורים של מחולל עם עומס השראי



$$U_{Ra} = I_{ph} \cdot R_a$$

$$U_{Xs} = I_{ph} \cdot X_s$$

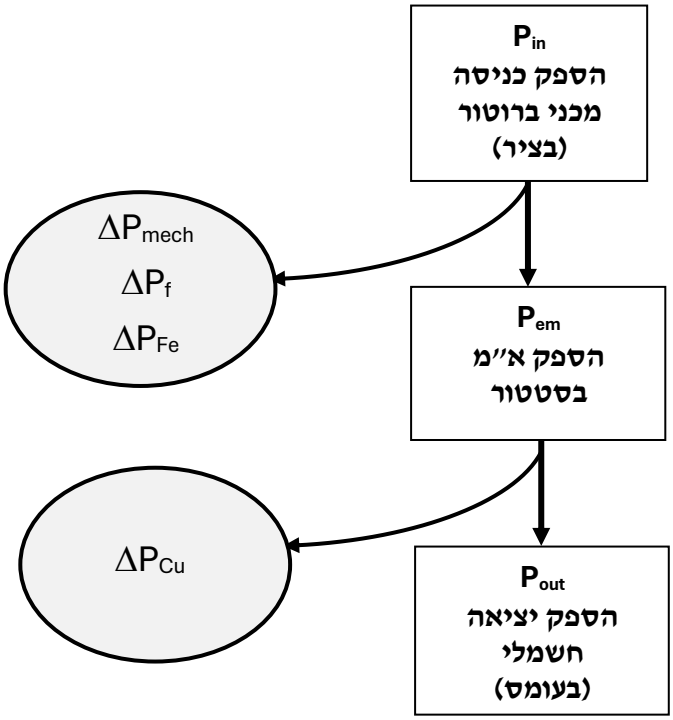
נוסחה נוספת לכא"מ המופעי :

$$E_{ph} = \sqrt{(U_{ph} \cdot cos\varphi + I_{ph} \cdot R_a)^2 \ + \ (U_{ph} \cdot sin\varphi + I_{ph} \cdot X_S)^2}$$

בנוסחה זו מציבים **<u>גדלים</u>** בלבד (ולא פאזורים)

עבור אופי עומס קיבולי יש להציב זווית עומס φ שלילית . עבור עומס התנגדותי $\varphi=0$

3.3 הספקים בגנרטור סינכרוני



P_{out} - ההספק החשמלי בעומס שמחובר לגנרטור בעל גורם הספק $cos\varphi$.

$$P_{out} = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot cos\varphi \qquad \text{או} \qquad P_{out} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot cos\varphi$$

P_{in} - הספק הכניסה בציר הגנרטור (של הטורבינה או הגורם המסובב)

נצילות:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

ΔP_{mech} - הפסדים מכניים ברוטור עקב חיכוך.

ΔP_{Fe} - הפסדי ברזל בגוף הסטטור

ΔP_f - הפסדי נחושת בסליל הרוטור (זרם עירור DC):

$$\Delta P_f = I_f^2 \cdot R_f$$

ΔP_{Cu} - הפסדי הנחושת בסלילי הסטטור

I_a – זרם העוגן , הסטטור (זרם העומס).

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I_{a\,ph}^2 \cdot R_a$$

כאשר אין התנגדות לסטטור $R_a=0\ \Omega$, אז :

- $P_{em} = P_{out}$.
- נוסחה המקשרת בין הספק הגנרטור וזווית הפיסוק δ

$$P_{em} = P_{out} = 3 \cdot U_{ph} \cdot E_{ph} \ \frac{sin\,\delta}{X_S}$$

הנוסחה בתוקף רק כאשר $R_a=0\ \Omega$

מומנט אלקטרומגנטי :

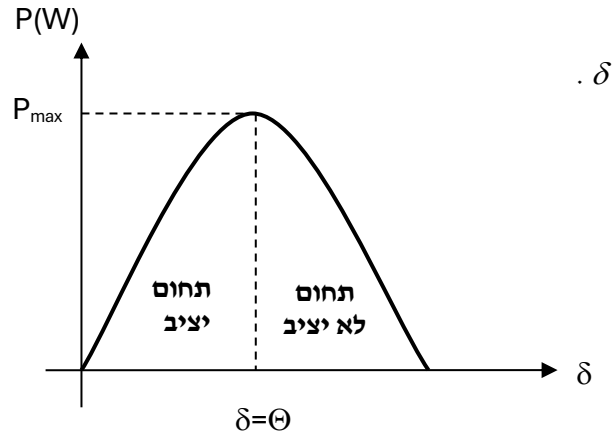
$$T_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n}$$

מומנט כניסה המופעל על ציר הרוטור :

$$T_{in} = \frac{9.55 \cdot P_{in}}{n}$$

3.4 אופיין זוויתי של גנרטור

זהו גרף שמתאר את ההספק P של הגנרטור כתלות בזווית הפיסוק δ .



בדיקת יציבות :

התנאי ליציבות של גנרטור

$$\delta \leq \Theta$$

- Θ היא הזווית של העכבה Z_S : $Z_S = R_a + j \cdot X_S = |Z_S| \angle \Theta$

  אם $R_a = 0$ אז $\Theta = 90°$.

- מחשבים את זווית הפיסוק δ (בערכה המוחלט) ובודקים האם היא יותר קטנה מ-Θ. אם כן הגנרטור יציב.
- ניתן להגדיל את זרם העירור I_f וכך להקטין את δ ולגרום לגנרטור להיות יציב יותר.

חישוב ההספק המרבי P_{max} של הגנרטור :

זהו ההספק המרבי שיכול הגנרטור לספק.

$$P_{max} = \frac{3U_{ph}}{|Z_S|} \cdot \left[E_{ph} - U_{ph} \cdot cos\Theta\right]$$

- אם $P_{LOAD} < P_{max}$ אז המצב תקין והמחולל יפעל כשורה.

3.5 זרם העירור של גנרטור

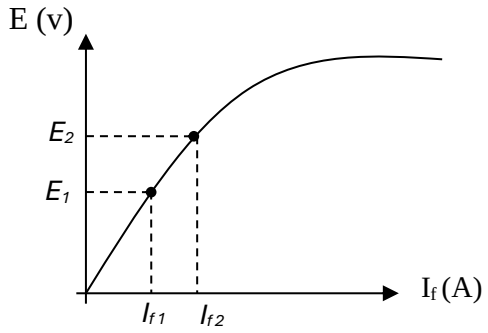
זהו זרם DC שזורם בסלילי הרוטור ותפקידו לייצר את השטף המגנטי של המכונה. בעזרת שינוי זרם העירור ניתן לווסת את הכא"מ E , את מתח ההדקים U ואת ההספק ההיגבי Q של הגנרטור.

ישנם סימונים שונים לזרם העירור ברוטור : I_f , I_{ex} , I_μ

עקום מיגנוט:

זהו גרף של הכא"מ E

כתלות בזרם העירור I_f



בתחום הלינארי או בהנחת עקום מיגנוט לינארי :

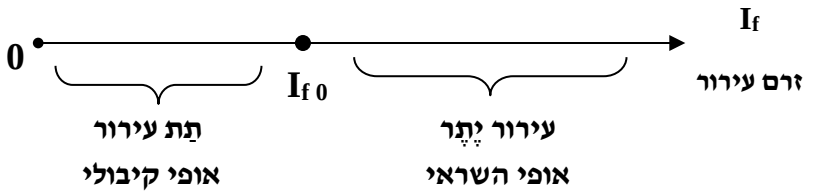
יחס כא"מים (בשני מצבים) שווה ליחס זרמי העירור.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{I_{f\,2}}{I_{f\,1}}$$

ויסות ההספק ההיגבי Q של הגנרטור

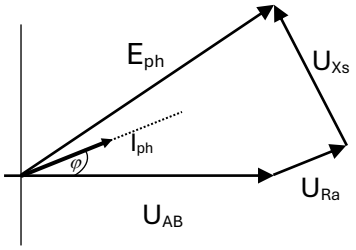
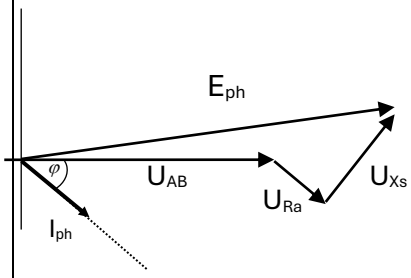
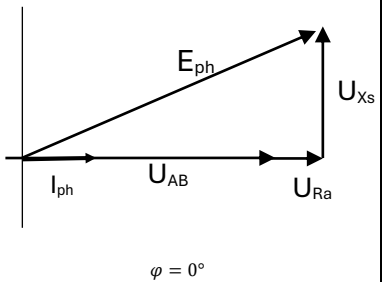
על ידי שינוי זרם עירור I_f ניתן לשלוט על כמות ההספק ההיגבי Q וגם על אופיו.

- $I_{f\,0}$ - זרם עירור שבו האופי של הגנרטור <u>אוהמי טהור</u> , $Q=0$.
- **עירור יֶתֶר** –אופי הגנרטור <u>השראי</u> (מספק הספק היגבי , $Q>0$) מתקיים כאשר $I_f > I_{f0}$
- **תת עירור** –אופי הגנרטור <u>קיבולי</u> (צורך הספק היגבי , $Q<0$) מתקיים כאשר $I_f < I_{f0}$



איפיון פעולת הגנרטור :

בדיאגרמות הבאות נתנו למתח U_{AB} זווית $0°$

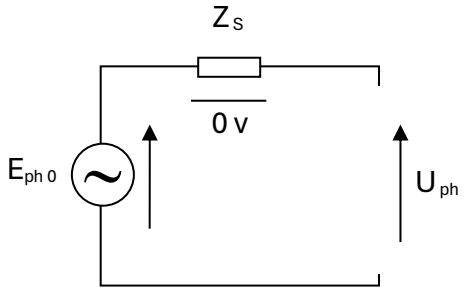
אופי	התנאי הנדרש	משמעות	דיאגרמת פאזורים
תת עירור	$I_f < I_{f0}$	אופי **קיבולי** זרם מקדים את המתח המחולל צורך הספק היגבי שלילי $Q<0$	
עירור יֶתֶר	$I_f > I_{f0}$	אופי **השראי** מתח מקדים את הזרם המחולל מספק הספק היגבי חיובי $Q>0$	
	$I_f = I_{f0}$	אופי התנגדותי מתח וזרם באותה זווית אין הספק היגבי $Q=0$	

3.6 ניסוי ריקם וניסוי קצר בגנרטור

מניסוי ריקם וקצר ניתן למדוד ולחשב פרמטרים שונים כמו כא״מ או עכבה סינכרונית Z_S .

ניסוי ריקם בגנרטור:

ההדקים פתוחים (אין עומס) ואין זרם בסטטור . לכן הכא״מ המושרה שווה למתח ההדקים .

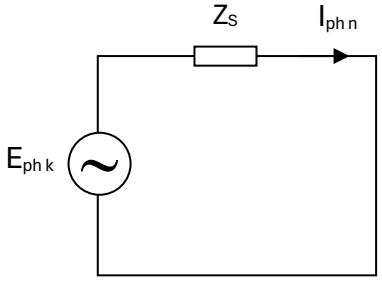


$$E_{ph\,0} = U_{ph}$$

ניסוי קצר נקוב בגנרטור:

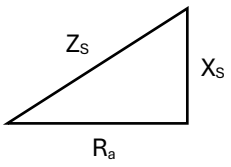
ההדקים מקוצרים והזרם נקוב I_n . כל הכא״מ נופל על העכבה Z_S .

מניסוי קצר ניתן לחשב את העכבה Z_S .



$$|Z_s| = \frac{E_{ph\,k}}{I_{ph\,n}}$$

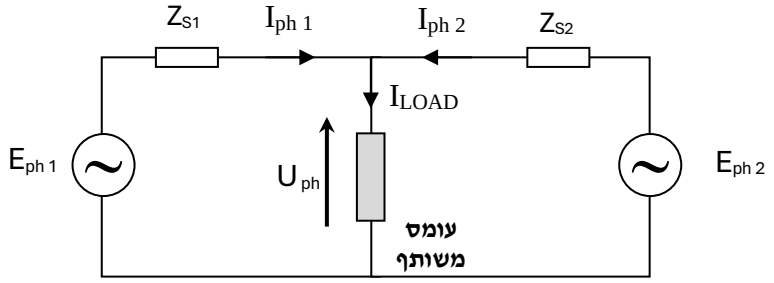
לאחר חישוב Z_S ניתן לחשב את R_a או X_S בעזרת משולש עכבות



$$R^2 + X^2 = Z^2$$

3.7 חיבור גנרטורים במקביל

החיבור נועד לספק לעומס גדול יותר הספק (מבלי להיכנס למצב של עומס יתר). לכל גנרטור זרם משלו , כא״מ משלו והספק משלו.



עקרונות חשובים :

- מתח ההדקים U_{ph} זהה ומשותף לגנרטורים ולעומס. לכן כדאי לתת לו זווית $0°$.
- זרמי הגנראטורים מתחברים וביחד הם מרכיבים את זרם העומס (חיבור פאזורי !).

$$\vec{I}_{LOAD} = \vec{I}_{ph\,1} + \vec{I}_{ph\,2}$$

- לכל גנרטור מתקיים : $\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} + \vec{I}_{ph} \cdot \vec{Z}_S$
- תרומת ההספק של כל גנרטור לעומס המשותף מחושבת לפי $P = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot cos\varphi$

כאשר φ היא הזווית בין המתח U והזרם I של אותו גנרטור.

פרק 4 – מנוע סינכרוני

4.1 הכא״מ במנוע סינכרוני

מהירות הרוטור ומהירות השדה המסתובב בסטטור:

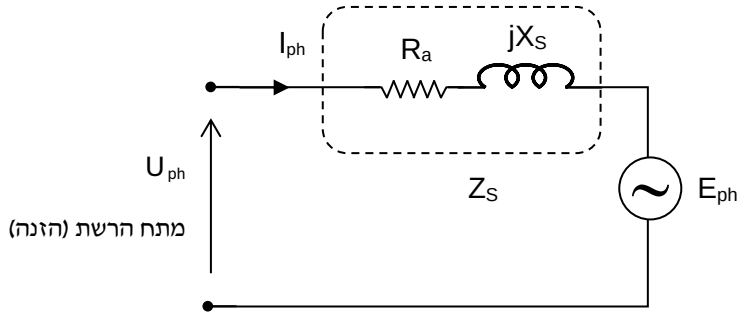
$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

f - תדירות הרשת [Hz]

p – מספר זוגות קטבים בסטטור

n - מהירות הרוטור או השדה [rpm] , סל״ד

מעגל תמורה של הסטטור וחישוב כא״מ מושרה:



$$\vec{E}_{ph} = \vec{U}_{ph} - \vec{I}_{ph} \cdot \vec{Z}_S$$

U_{ph} - מתח הרשת (הפאזי) שאליו מחובר הסטטור.

E_{ph} – הכא״מ המושרה הנוצר בסלילי הסטטור.

I_{ph} - הזרם הפאזי בסטטור , הזרם שצורך המנוע מהרשת.

$Z_S = R_a + j \cdot X_S$ עכבת הסטטור.

זווית פיסוק (זווית העמסה):

$$\delta = \varphi_E - \varphi_U$$

זווית הפיסוק במנוע היא שלילית $\delta<0$ והיא מוגדרת בשתי צורות:

1. הפרש זוויות של הכא"מ ומתח ההדקים (מתח ההזנה) $\delta = \varphi_E - \varphi_U$.

2. זו הזווית <u>המכנית</u> בין השדה המגנטי של הרוטור לבין השדה המסתובב בסטטור.

ערכים נקובים במנוע:

U_n - המתח שאליו מתחבר המנוע (הסטטור). זהו מתח <u>הרשת</u>.

I_n – הזרם שצורך הסטטור מהרשת.

P_n - ההספק המכני של העומס (הספק ציר , הספק יציאה P_{out}).

5.2 <u>הספקים ומומנטים של מנוע סינכרוני</u>

הספק כניסה (שנצרך מהרשת) :

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot cos\varphi$$

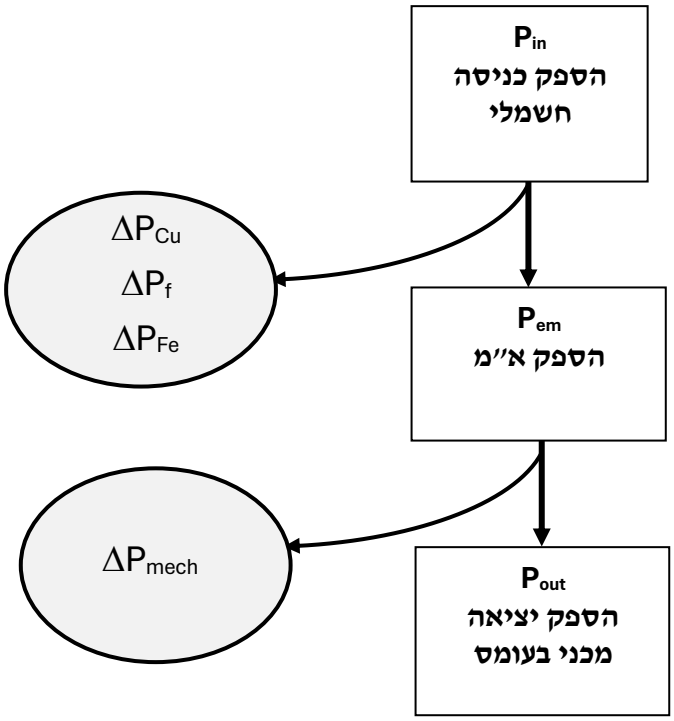
נצילות :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad ; \quad P_{out} = \eta \cdot P_{in} \quad ; \quad P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

מומנט ציר :

$$T_{out} = \frac{9.55 \cdot P_{out}}{n}$$

תרשים זרימת הספק במנוע סינכרוני



ΔP_{Cu} - הפסדי הנחושת בסלילי הסטטור

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I_{a\,ph}^2 \cdot R_a$$

ΔP_f - הפסדי נחושת בסליל הרוטור (זרם עירור DC):

$$\Delta P_f = I_f^2 \cdot R_f$$

ΔP_{Fe} - הפסדי ברזל

ΔP_{mech} - הפסדים מכניים ברוטור עקב חיכוך.

כאשר אין התנגדות לסטטור $R_a=0\ \Omega$

$$P_{em} = 3 \cdot U_{ph} \cdot E_{ph} \frac{\sin \delta}{X_S}$$

אם אין הפסדים מכניים, אז $P_{em} = P_{out}$

הספק מכסימלי של המנוע P_{max} :

אם נעמיס את המנוע יותר מההספק הזה על הציר, אז הוא לא יצליח להסתובב.

זה קורה כאשר $\delta = 90°$ ולכן :

$$P_{max} = 3 \cdot U_{ph} \cdot E_{ph} \cdot \frac{1}{X_S}$$

הנוסחה תקפה כאשר $R_a = 0\ \Omega$

מומנט מכסימלי :

$$T_{max} = \frac{9.55 \cdot P_{max}}{n}$$

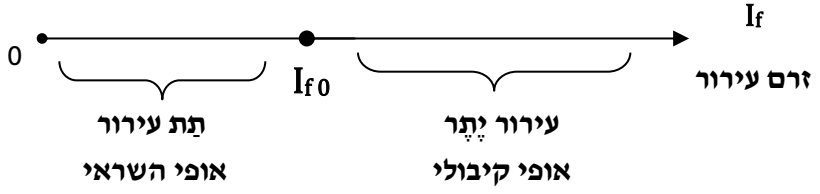
5.3 ויסות ההספק ההיגבי Q של מנוע סינכרוני

על ידי שינוי זרם עירור I_f ניתן לשלוט על כמות ההספק ההיגבי Q וגם על אופיו.

- I_{f0} - זרם עירור שבו האופי של המנוע אוהמי טהור , $Q=0$.
- **עירור יֶתֶר** –אופי המנוע קיבולי (מספק הספק היגבי , $Q<0$) מתקיים כאשר $I_f > I_{f0}$
- **תת עירור** –אופי המנוע השראי (צורך הספק היגבי , $Q>0$) מתקיים כאשר $I_f < I_{f0}$

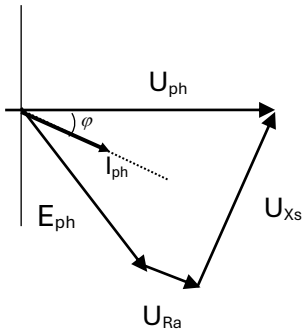
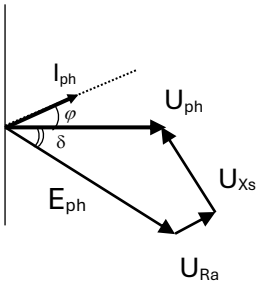
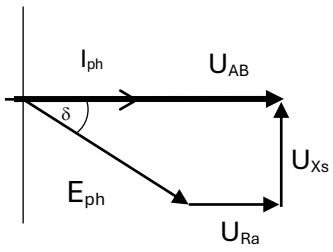
ניתן לשפר גורם הספק $\cos\varphi$ של רשת על ידי שימוש במנוע סינכרוני "כקבל סינכרוני" . במצב שבו מגדילים את זרם העירור של המנוע מעל הערך I_{f0} , אופי המנוע יהיה קיבולי והוא מחזיר Q לרשת.

אפיון פעולת המנוע :



הקשר בין כא"מ לזרם עירור בתחום הלינארי :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{I_{f\,2}}{I_{f\,1}}$$

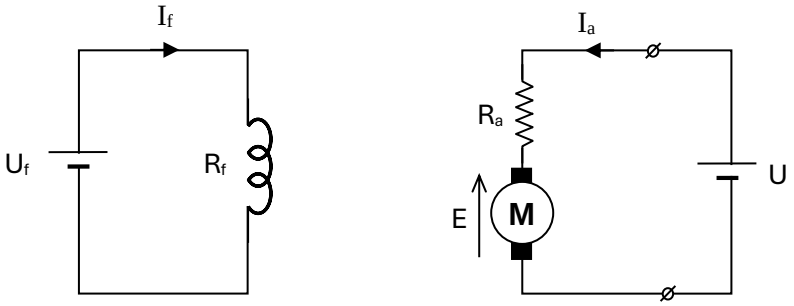
אופי	התנאי הנדרש	משמעות	דיאגרמת פאזורים
תת עירור	$I_f < I_{f0}$	אופי **השראי** המתח מקדים את הזרם המנוע צורך הספק הגבי חיובי $Q>0$	
עירור יֶתֶר	$I_f > I_{f0}$	אופי **קיבולי** הזרם מקדים את המתח המנוע מספק הספק הגבי שלילי $Q<0$	
	$I_f = I_{f0}$	אופי התנגדותי מתח וזרם באותה זווית אין הספק היגבי $Q=0$	

פרק 5 – מנוע DC (זרם ישר)

5.1 סוגי עירור

מנוע DC בעירור נפרד (זר)

סליל העירור וסליל הרוטור מחוברים לשני מקורות מתח נפרדים.



מעגל העירור (סטטור) **מעגל העוגן (רוטור)**

$$I_f = \frac{U_f}{R_f}$$

$$E = U - I_a \cdot R_a \quad -\Delta U_b$$

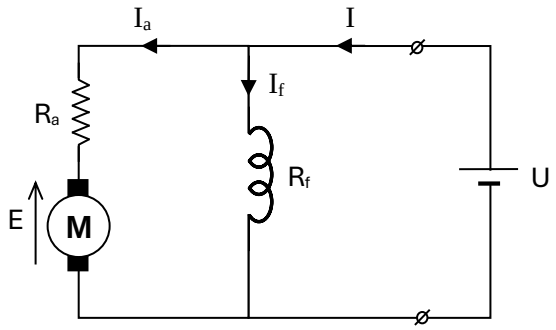
R_a - התנגדות סליל הרוטור (עוגן) , I_a - זרם העוגן

R_f - התנגדות סליל העירור , I_f - זרם העירור

ΔU_b - מפל המתח על המברשות (פחמים , brushes) . בדרך כלל קטן וזניח.

עירור עצמי (מקבילי)

סליל העירור מחובר במקביל לרוטור (עוגן) והם מוזנים ממקור מתח אחד.



$$E = U - I_a \cdot R_a \quad -\Delta U_b$$

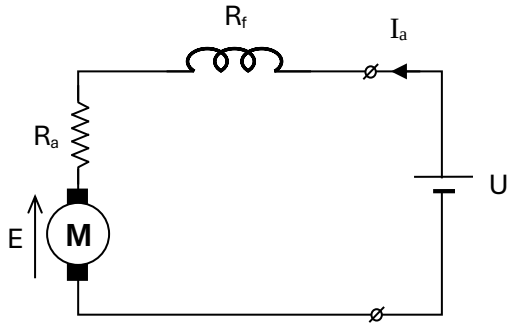
$$I_f = \frac{U}{R_f}$$

$$I = I_a + I_f$$

בעירור מקבילי - כל שינוי במתח ההזנה U מוביל לשינוי זרם העירור I_f ולשינוי השטף Φ במנוע.

עירור טורי

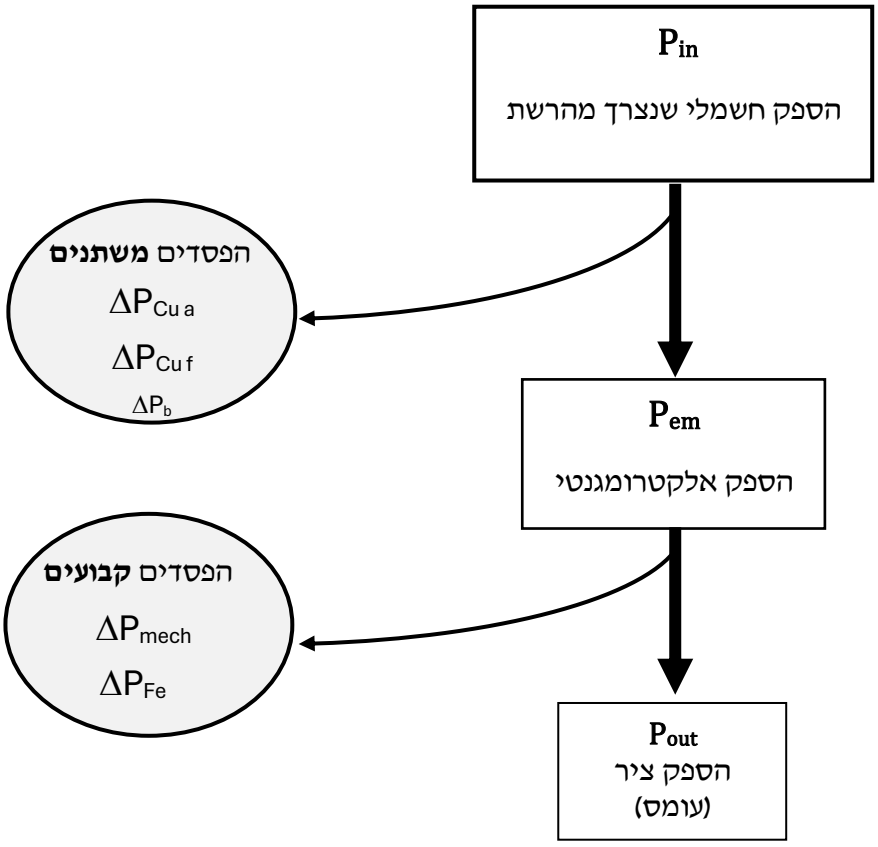
סליל העירור מחובר בטור לסליל הרוטור (עוגן).



$$E = U - I_a \cdot (R_a + R_f) \quad -\Delta U_b$$

בעירור טורי - כל שינוי בזרם העוגן I_a מוביל לשינוי השטף Φ במנוע.

5.2 הספקים במנוע DC



ההספק החשמלי שנצרך מהרשת :

$$P_{in} = U \cdot I_a$$

<u>הערה</u> : בעירור <u>זר</u> יש להוסיף ל- P_{in} גם את הספק מקור העירור $P_f = U_f \cdot I_f$.

הספק אלקטרומגנטי :

$$P_{em} = E \cdot I_a$$

נצילות :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad ; \quad P_{out} = \eta \cdot P_{in} \quad ; \quad P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

הפסדי נחושת (הפסדים משתנים) :

בסלילי הרוטור :

$$\Delta P_{Cu\,a} = I_a^2 \cdot R_a$$

בסלילי העירור :

$$\Delta P_{Cu\,f} = I_f^2 \cdot R_f$$

הפסדים במברשות (אם קיימים) :

$$\Delta P_b = \Delta U_b \cdot I_a$$

הפסדים קבועים :

ΔP_{mech} - הפסדים מכניים עקב חיכוך

ΔP_{Fe} - הפסדי ברזל

5.3 מומנטים במנוע DC

מומנט ציר:

(המומנט שמפעיל העומס על הציר)

$$T_{out} = \frac{9.55 \cdot P_{out}}{n}$$

מומנט אלקטרומגנטי :

(המומנט שמייצר המנוע)

$$T_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n}$$

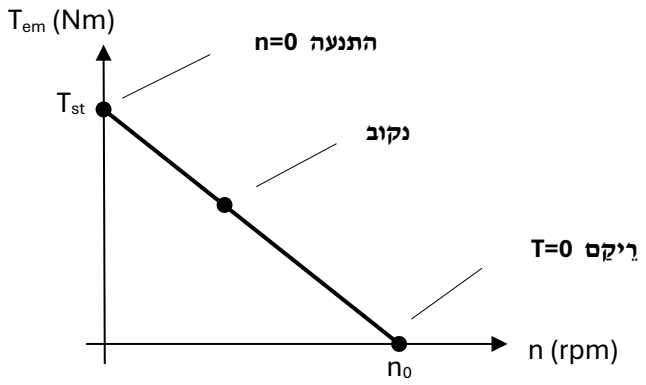
באופן כללי , המומנט האלקטרומגנטי שמייצר המנוע צריך להתגבר על שני מומנטים : מומנט מכני של העומס T_2 ומומנט ריקם T_0 שנגרם עקב חיכוך .

מומנט ריקם (חיכוך) :

$$T_0 = T_{em} - T_2$$

אם מומנט הריקם זניח אז : $T_{em} = T_2$

אופין מכני של מומנט המנוע כתלות במהירות :



האופיין הזה מתאים לעירור זר או מקבילי.

5.4 שינויי מומנט ומהירות במנוע DC

כא״מ מושרה בסלילי העוגן :

$$E = K_e \cdot \phi \cdot n$$

K_e - קבוע הכא״מ , ϕ – השטף במנוע [Wb] , n - מהירות הרוטור [rpm]

שינוי מהירות במנוע

בעזרת יחס כא״מים בשני מצבים שונים , ניתן לחשב מהירות מנוע נדרשת. בדרך כלל משתמשים בכא״מ **הנקוב** ובמהירות **הנקובה** כבסיס לחישוב היחס.

אם זרם העירור I_f קבוע ולא משתנה , אז השטף ϕ קבוע וניתן לצמצם אותו .

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_e \cdot \phi_2 \cdot n_2}{K_e \cdot \phi_1 \cdot n_1}$$

אם זרם העירור משתנה , אז יחס השטפים שווה ליחס זרמי העירור :

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{I_{f\,2}}{I_{f\,1}}$$

מהירות ריקם n_0 :

מצב של רֵיקם הוא מצב שבו לא מחובר עומס לציר.

בריקם **אידיאלי** , אין מומנט ריקם (חיכוך) $T_0 = 0\ Nm$ ולכן אין זרם בעוגן $I_a = 0\ A$. במצב זה נקבל ש- $E_0 = U$.

בריקם לא אידיאלי , כאשר יש מומנט ריקם במנוע , אז יהיה גם זרם חלש יחסית בעוגן $I_{a\,0}$.

חישוב מהירות ריקם בעזרת יחס כא"מים

$$\frac{E_0}{E_1} = \frac{K_e \cdot \phi_0 \cdot n_0}{K_e \cdot \phi_1 \cdot n_1}$$

מומנט אלקטרומגנטי של מנוע DC :

$$T_{em} = K_a \cdot \phi \cdot I_a$$

K_a - קבוע המומנט , ϕ – השטף במנוע [Wb] , I_a - זרם העוגן [A]

הקשר בין קבוע המומנט K_a וקבוע הכא"מ K_e

$$\frac{K_e}{K_a} = 0.1047 \qquad \frac{K_a}{K_e} = 9.55$$

ניתן להשתמש ביחס מומנטים בשני מצבי עבודה שונים על מנת לחשב זרם או מומנט במצב עבודה מסוים. בדרך כלל משתמשים במומנט ובזרם **הנקובים** כבסיס לחישוב היחס.

$$\frac{T_{em\,2}}{T_{em\,1}} = \frac{K_a \cdot \phi_2 \cdot I_{a\,2}}{K_a \cdot \phi_1 \cdot I_{a\,1}}$$

- אם אין שינוי שטף המנוע אז אפשר לצמצם את השטפים.
- אם נתון בשאלה שמותר להזניח את מומנט הריקם , אז המומנט האלקטרומגנטי שווה למומנט הציר המכני $T_{em} = T_{out}$.
- במנוע DC בעירור **טורי** , כל שינוי בזרם המעגל גורר גם שינוי שטף באותו יחס.

מומנט התנעה

ברגע ההתנעה הראשוני , מהירות הרוטור היא אפס $n=0$ לכן גם הכא״מ $E=0\ v$ כל מתח המקור נופל על הנגד (או הנגדים) בעוגן.

חישוב זרם התנעה I_{st} :

$$E = 0 \quad \rightarrow \quad I_{st} = \frac{U}{R_{a\,T}}$$

R_{aT} - התנגדות העוגן **השקולה** . אם הוסיפו נגד R_x בטור לעוגן אז $R_T = R_a + R_x$

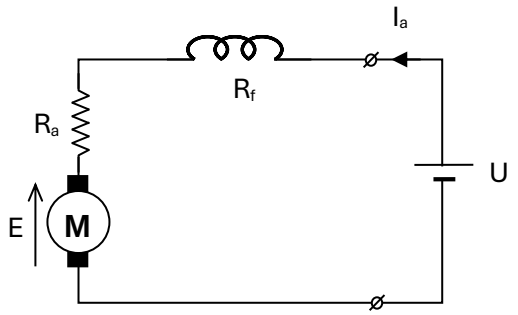
חישוב מומנט התנעה T_{st} :

(בעזרת זרם ההתנעה)

$$\frac{T_{em\,st}}{T_{em\,1}} = \frac{K_a \cdot \phi_2 \cdot I_{a\,st}}{K_a \cdot \phi_1 \cdot I_{a\,1}}$$

5.5 מנוע בעל עירור טורי

חשוב לזכור : בעירור טורי , כאשר זרם המעגל משתנה, אז גם השטף משתנה. יחס השטפים שווה ליחס הזרמים במעגל.



$$E = U - I_a \cdot (R_a + R_f)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_e \cdot \phi_2 \cdot n_2}{K_e \cdot \phi_1 \cdot n_1} \qquad \frac{\boldsymbol{\phi_2}}{\boldsymbol{\phi_1}} = \frac{\boldsymbol{I_{a\,2}}}{\boldsymbol{I_{a\,1}}}$$

כאשר משנים את זרם העוגן בעירור טורי , אז המומנט T משתנה לפי יחס הזרמים <u>בריבוע</u> !

$$\frac{T_{em2}}{T_{em1}} = \left(\frac{I_{a2}}{I_{a1}}\right)^2$$

5.6 תלות מהירות – מומנט וקבוע המנוע K_M

לפי הגישה הזו עובדים עם נוסחאות אחרות שמבוססות על **קבוע המנוע** K_M :

$$E = \underbrace{K_a \cdot \phi}_{K_M} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad , \quad T = \underbrace{K_a \cdot \phi}_{K_M} \cdot \boldsymbol{I_a}$$

הקשר בין מהירות n (rpm) למהירות זוויתית ω $\left(\frac{rad}{sec}\right)$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \Longleftrightarrow \quad n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

שלבי עבודה – חישוב קבוע מנוע K_M מתוך ערכים נקובים

1. משרטטים את המעגל המתאים ומחשבים את הכא״מ מתוך הנתונים : $E = U - I_a \cdot R_a$

   במידה ויש מפל מתח על הפחמים : $E = U - I_a \cdot R_a - \Delta U_b$

2. עוברים למהירות זוויתית $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

3. מחשבים את הקבוע $K_M = \frac{E_n}{\omega}$

בכל מקרה של שינוי שטף יש לעדכן את הקבוע K_M באותו יחס כמו שינוי השטף

$$K_{M\ \text{מעודכן}} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \cdot K_M$$

בעירור מקבילי , כל שינוי במתח ההזנה , יוביל לשינוי השטף ולעדכון קבוע המנוע.

הקשר בין כא״מ למהירות זוויתית

$$E = K_M \cdot \omega$$

הקשר בין מומנט א״מ T_{em} שמייצר המנוע לזרם I_a

$$T_{em} = K_M \cdot I_a$$

הקשר בין מהירות , זרם ומתח

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot R_a}{K_M}$$

אם מחברים נגד נוסף R_x בטור לעוגן , אז מחליפים את R_a ב- $(R_a + R_x)$

הקשר בין מומנט א״מ T_{em}, מהירות n , מתח הזנה U

$$T_{em} = \frac{K_M \cdot U}{R_a} - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

אם מחברים נגד נוסף R_x בטור לעוגן , אז מחליפים את R_a ב- $(R_a + R_x)$

הקשר בין מומנט א״מ T_{em}, מהירות ω , מתח הזנה U

$$T_{em} = \frac{K_M \cdot U}{R_a} - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \omega$$

מציאת מומנט התנעה

בהתנעה המנוע עדיין לא מסתובב $n=0$ rpm

1. נבנה את הביטוי $T_{em} = \frac{K_M \cdot U}{R_a} - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$

כאשר T_{em} ו- n נשארים נעלמים.

2. נציב בביטוי $n=0$ ונמצא את מומנט ההתנעה של המנוע T_{st} .

מציאת מהירות ריקם

בריקם המנוע לא מועמס $T=0$ ומהירות המנוע גבוהה n_0 , מהירות הריקם שלו.

1. נבנה את הביטוי $T_{em} = \frac{K_M \cdot U}{R_a} - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$

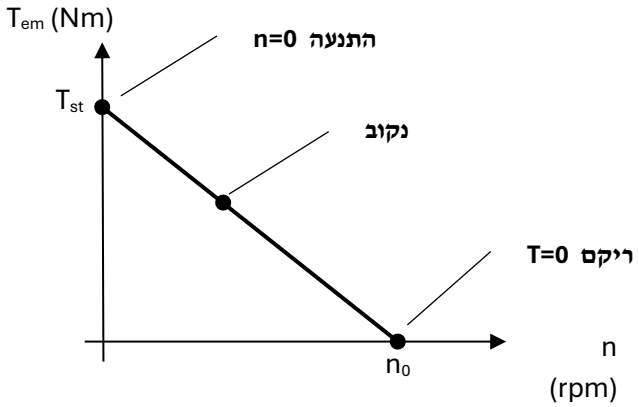
כאשר T_{em} ו- n נשארים משתנים.

2. נציב בביטוי $T=0$ ונמצא את מהירות הריקם n_0 של המנוע .

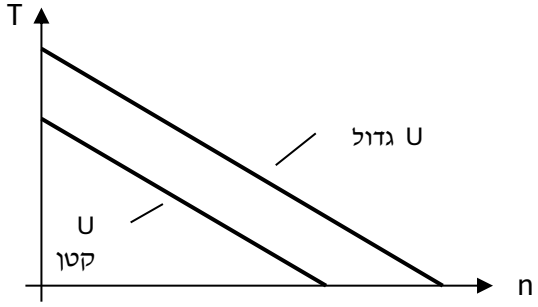
הערה : אם יש מומנט חיכוך T_0 במנוע אז נציב אותו במצב ריקם ולא נציב 0 .

5.7 אפיינים של מנוע DC בעירור זר

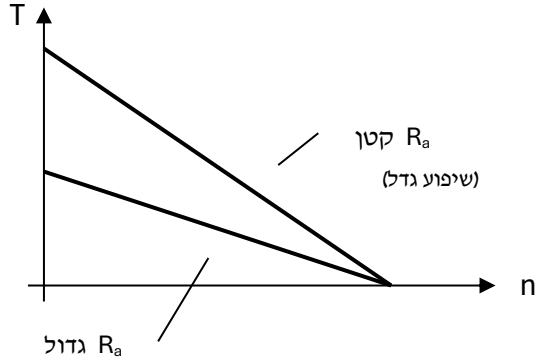
אופין מכני מומנט – מהירות :



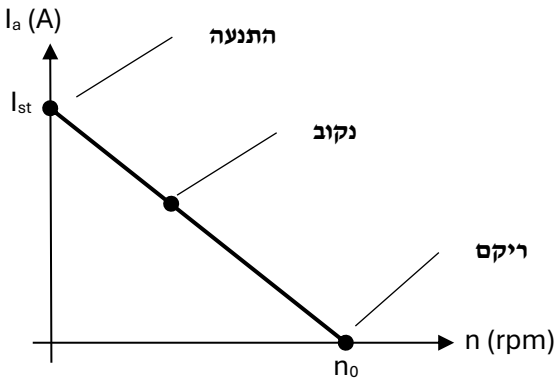
השפעת שינוי מתח :
(גרפים מקבילים)



השפעת שינוי התנגדות עוגן R_a :
(שינוי השיפוע)



גרף זרם - מהירות :



5.8 בלימה של מנוע DC

קיימים 3 סוגי בלימה :

1. בלימה דינאמית - מנתקים את העוגן ממקור המתח ומחברים אותו לנגד . סליל העירור פעיל.

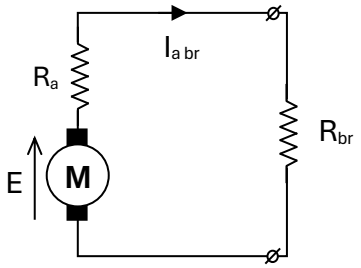
2. בלימה גנרטורית - הכא"מ E גדול יותר ממתח ההזנה. יש החזר אנרגיה לרשת.

3. בלימה בחיבור נגדי – הופכים את קוטביות המקור . ברגע העצירה יש לנתק מהמקור.

בכל הבלימות יש להוסיף נגד בלימה R_{br} כדי להקטין את זרם הבלימה.

1. בלימה דינמית

בבלימה הזו הרוטור מנותק ממתח ההזנה ומחובר לנגד R_{br} .

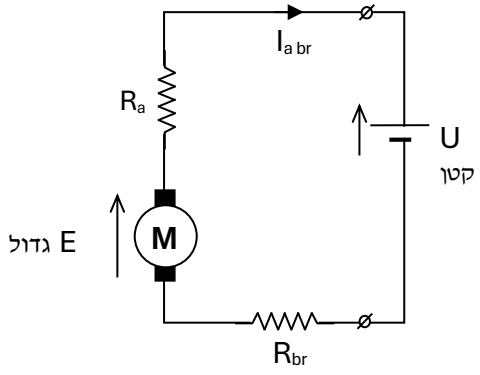


$$I_{a\,br} = \frac{E}{R_a + R_{br}}$$

$$E = I_a \cdot (R_a + R_{br})$$

2. בלימה גנרטורית

בבלימה הזו הכא"מ E בסלילי הרוטור הופך להיות גדול יותר ממתח ההזנה U .

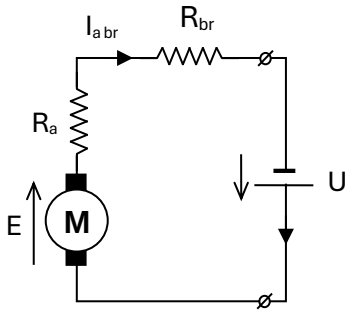


$$I_{a\,br} = \frac{E - U}{R_a + R_{br}}$$

$$E = U + I_a \cdot (R_a + R_{br})$$

3. בלימה בחיבור נגדי

בשיטה הזו הופכים את הקוטביות של מתח ההזנה. בבלימה בחיבור נגדי חייבים לנתק את המנוע מהרשת ברגע שהמהירות מגיעה לאפס, אחרת הוא יתחיל להאיץ בכיוון הפוך.



$$I_{a\,br} = \frac{E + U}{R_a + R_{br}}$$

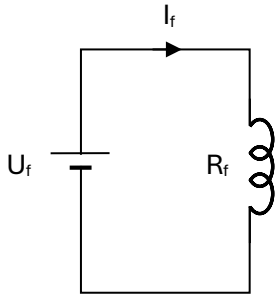
$$E = -U + I_a \cdot (R_a + R_{br})$$

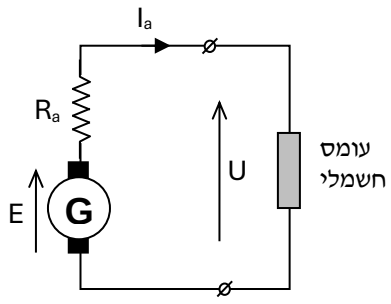
פרק 6 – גנרטור DC (זרם ישר)

U הוא מתח ההדקים של הגנרטור , המתח שמסופק לעומס המוזן מהגנרטור.

6.1 גנרטור בעירור נפרד (זר)

סליל העירור מחובר למקור מתח נפרד.





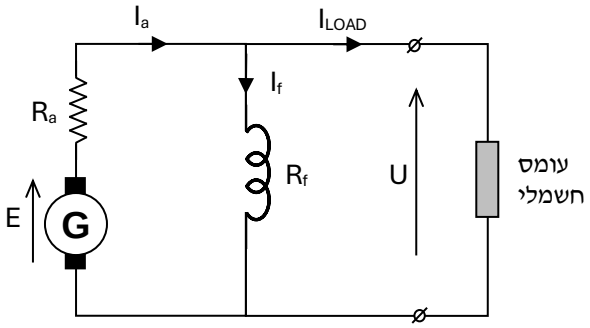
$$I_f = \frac{U_f}{R_f}$$

$$E = U + I_a \cdot R_a \quad +\Delta U_b$$

ΔU_b - מפל המתח על המברשות (פחמים , brushes) . בדרך כלל קטן וזניח.

6.2 עירור עצמי (מקבילי)

סליל העירור מחובר במקביל לרוטור (עוגן) .



$$E = U + I_a \cdot R_a \quad +\Delta U_b$$

$$I_f = \frac{U}{R_f}$$

$$I_a = I_f + I_{LOAD}$$

מצב ריקם – לא מחובר עומס להדקי הגנרטור

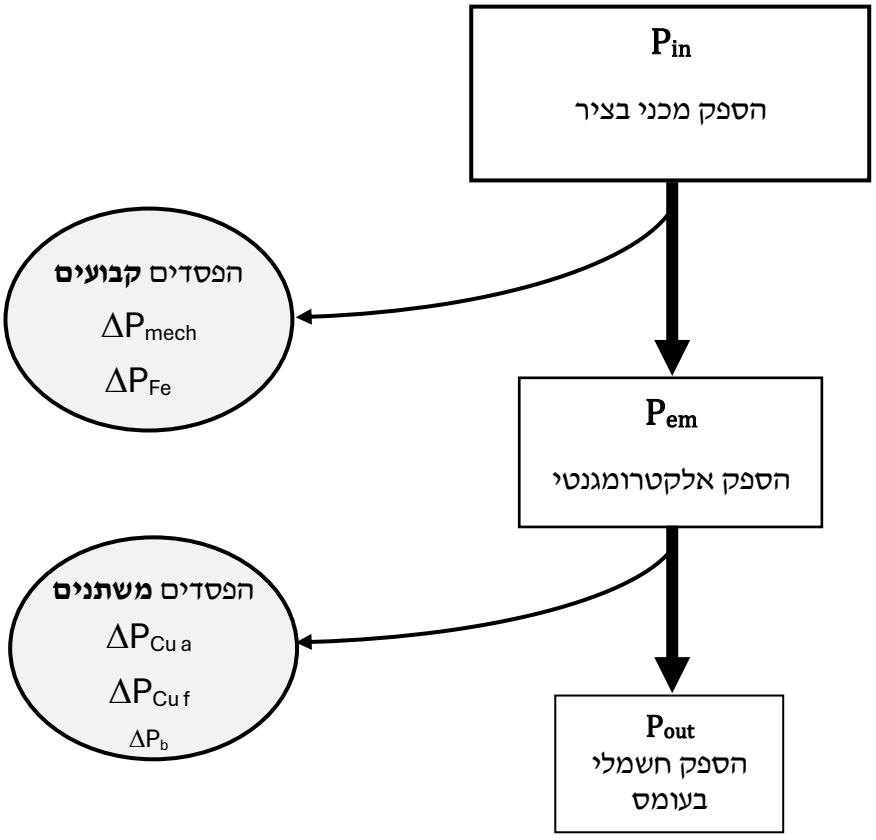
$$E_0 = U$$

6.3 הספקים ומומנטים בגנרטור DC

P_{in} - הספק כניסה מכני , הספק הציר של הגנרטור (מועבר מטורבינה , מנוע בנזין וכו').

P_{out} - הספק יציאה חשמלי . זה למעשה הספק העומס.

תרשים זרימת הספק בגנרטור DC



P_{em} - הספק אלקטרומגנטי שמתפתח ברוטור:

$$P_{em} = E \cdot I_a$$

P_{out} - הספק יציאה חשמלי , הספק העומס.

$$P_{out} = U \cdot I_{LOAD}$$

נצילות :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad ; \quad P_{out} = \eta \cdot P_{in} \quad ; \quad P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

הפסדים משתנים

$\Delta P_{Cu\,a}$ - הפסדי נחושת בסליל הרוטור

$$\Delta P_{Cu\,a} = I_a^2 \cdot R_a$$

$\Delta P_{Cu\,f}$ - הפסדי הנחושת בסליל העירור

$$\Delta P_{Cu\,f} = I_f^2 \cdot R_f$$

הפסדים במברשות (אם קיימים) :

$$\Delta P_b = \Delta U_b \cdot I_a$$

הפסדים קבועים

ΔP_{mech} - הפסדים מכניים ברוטור עקב חיכוך.

ΔP_{Fe} - הפסדי ברזל .

מומנט ציר (מומנט כניסה) :

$$T_{in} = \frac{9.55 \cdot P_{in}}{n}$$

מומנט אלקטרומגנטי :

$$T_{em} = \frac{9.55 \cdot P_{em}}{n}$$

6.4 השפעת השטף על הגנרטור

כא״מ מושרה בסלילי העוגן :

$$E = K_e \cdot \phi \cdot n$$

K_e - קבוע הכא״מ , ϕ – השטף במנוע [Wb] , n - מהירות הרוטור [rpm]

שינוי מהירות בגנרטור

בעזרת יחס כא״מים בשני מצבים שונים , ניתן לחשב מהירות רוטור נדרשת. בדרך כלל משתמשים בכא״מ **הנקוב** ובמהירות **הנקובה** כבסיס לחישוב היחס.

אם זרם העירור I_f קבוע ולא משתנה , אז השטף ϕ קבוע וניתן לצמצם אותו .

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_e \cdot \phi_2 \cdot n_2}{K_e \cdot \phi_1 \cdot n_1}$$

אם זרם העירור משתנה , אז יחס השטפים שווה ליחס זרמי העירור (בהנחת עקום מגנוט לינארי) :

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{I_{f\,2}}{I_{f\,1}}$$

מומנט אלקטרומגנטי של גנרטור DC :

$$T_{em} = K_a \cdot \phi \cdot I_a$$

K_a - קבוע המומנט , ϕ – השטף במנוע [Wb] , I_a - זרם העוגן [A]

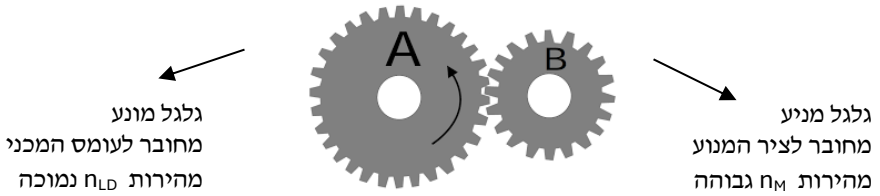
ניתן להשתמש ביחס מומנטים בשני מצבי עבודה שונים על מנת לחשב זרם או מומנט במצב עבודה מסוים. בדרך כלל משתמשים במומנט ובזרם **הנקובים** כבסיס לחישוב היחס.

$$\frac{T_{em\,2}}{T_{em\,1}} = \frac{K_a \cdot \phi_2 \cdot I_{a\,2}}{K_a \cdot \phi_1 \cdot I_{a\,1}}$$

פרק 7 – הינע חשמלי

7.1 מערכת תמסורת להפחתת סיבובים

זהו מנגנון מכני המחובר בין ציר המנוע לעומס ותפקידו להוריד מהירות סיבוב בעומס ולהגדיל את המומנט שמופעל על העומס. המנגנון יכול להיות גלגלי שיניים , רצועה וגלגלים ועוד.



יחס תמסורת

$$TR = \frac{n_{LD}}{n_M} = \frac{r_M}{r_{LD}}$$

יחס התמסורת שווה ליחס המהירויות של המנוע ושל העומס (או ליחס הרדיוסים של הגלגלים)

n_M - מהירות ציר המנוע n_{LD} - מהירות סיבוב העומס.

r_M - רדיוס הגלגל שמחובר למנוע r_{LD} - רדיוס הגלגל שמחובר לעומס.

אם ידועה מהירות העומס אז ניתן לחשב את מהירות ציר המנוע :

$$n_M = \frac{n_{LD}}{TR} \qquad n_{LD} = TR \cdot n_M$$

שיקוף מומנטים לציר המנוע

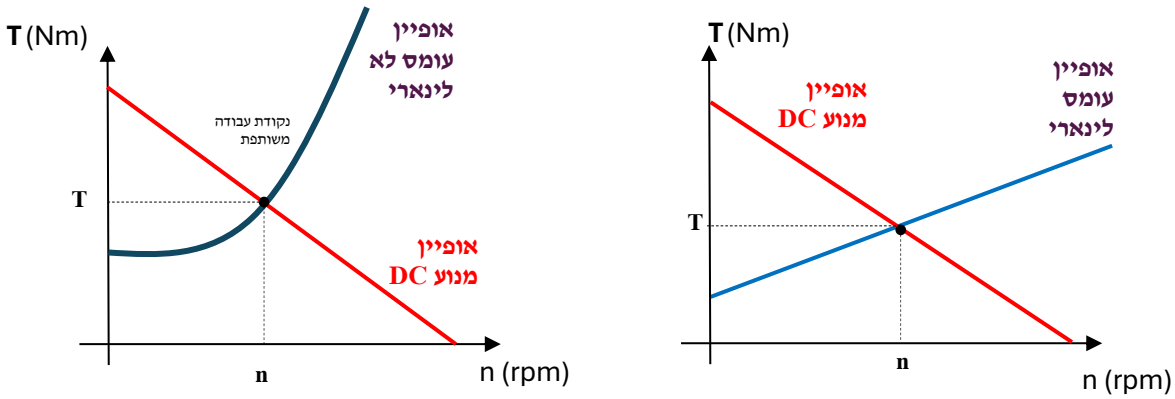
אם ידוע מומנט העומס T_{LD} אז

ציר המנוע ירגיש מומנט אחר , קטן יותר .

$$T_{M\ \text{ציר}} = (TR) \cdot T_{LD}$$

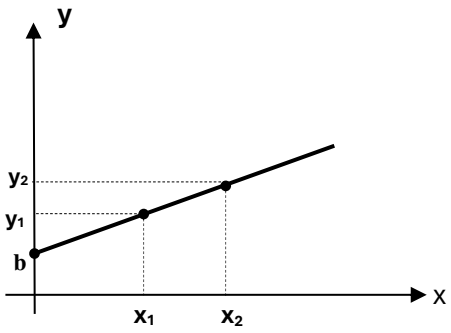
7.2 עבודה משותפת של מנוע ועומס

המנוע יספק לעומס את המומנט שהעומס דורש בהתאם לאופיין העומס ושניהם יסתובבו במהירות משותפת. מבחינה גרפית מדובר על נקודת החיתוך בין שני האופיינים – של המנוע ושל העומס.



רקע מתמטי – מציאת משוואת קו ישר

מציאת משוואת ישר $y=a\cdot x+b$ לפי 2 נקודות (x_1 , y_1) , (x_2 , y_2)



1. חישוב שיפוע הקו a

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

2. b הוא נקודת החיתוך אם ציר y .

3. משוואת קו ישר על פי שיפוע ונקודה : $y - y_1 = a \cdot (x - x_1)$

4. על מנת למצוא נקודת חיתוך בין שני אופיינים , יש לפתור מערכת משוואות .

5. למעבר ממהירות n למהירות זוויתית ω , מחליפים את n בביטוי הבא : $n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$

6. למציאת משוואת האופיין המכני של מנוע DC $T=f(n)$, משתמשים בנוסחה :

$$T_{em} = \frac{K_M \cdot U}{R_a} - \frac{K_M^2}{R_a} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

7.3 נוסחאות פיזיקליות הקשורות להינע חשמלי

מומנט מכני : מכפלת הכוח ברדיוס.

$$T = F \cdot r$$

F - הכוח שמופעל [N] , r – הרדיוס , ביחידות מטר [m] , T – מומנט [N·m]

אם נתון **קוטר** אז צריך לחלק אותו ב-2

משקל של גוף

$$G = m \cdot g$$

המשקל G הוא כוח המשיכה של כדור הארץ . נמדד בניוטון [N]

מסה m היא כמות החומר ונמדדת ביחידות ק״ג [Kg]

g - תאוצת הכובד , מספר קבוע ששוה ל- $10\ m/s^2$

סוגי מהירויות ומעבר ביניהן

n - סל״ד , rpm ω - מהירות זוויתית [rad/s] v – מהירות קווית [m/s]

r - רדיוס במטרים [m]

$$v = \omega \cdot r \qquad \Longleftrightarrow \qquad \omega = \frac{v}{r}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \qquad \Longleftrightarrow \qquad n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi}$$

7.4 השפעת הטמפרטורה על הספק המנוע

בהחמרת קירור , כשטמפ׳ הסביבה גבוהה מהטמפ׳ התקנית (בדרך כלל טמפרטורה 30-40 °C) , חייבים להוריד את הספק ההעמסה של המנוע מתחת ל- P_n .

מיון חומרי הבידוד לקבוצות :

קבוצת חומרי בידוד	Y	A	E	B	F	H	C
טמפ׳ מכסימלית (°C)	90°	105°	120°	130°	155°	180°	מעל 180°

קבוע ההפסדים הקבועים K_1 :

איזה חלק מהווים ההפסדים הקבועים מסך כל ההפסדים (בשבר עשרוני)

$$K_1 = \frac{\Delta P_0}{\Delta P}$$

קבוע ההפסדים המשתנים K_2 :

איזה חלק מהווים ההפסדים המשתנים (נחושת) מסך כל ההפסדים (בשבר עשרוני)

$$K_2 = \frac{\Delta P_{Cu}}{\Delta P}$$

K_1 , K_2 תמיד משלימים ביחד ל-1 (100%) .

הפסדים כוללים במנוע :

$$\Delta P = \frac{P_n}{\eta} - P_n$$

קבוע זמן תֶּרְמִי של מנוע τ - זהו פרמטר הקשור לקצב עליית הטמפ׳ של המנוע. קבוע זמן תרמי של מנוע הוא הזמן שלוקח למנוע להגיע ל- 63% מהטמפ׳ הסופית שלו. קבוע הזמן τ יכול להימדד בדקות או בשעות. לאחר חמישה קבועי זמן 5τ טמפ׳ המנוע מתייצבת על ערכה הסופי.

מציאת הספק עומס מרבי בטמפרטורת סביבה לא תקנית

כשטמפרטורת הסביבה תקנית (בדרך כלל $\Theta=30°\text{-}40°$) , אז ניתן להעמיס את המנוע בהספק נקוב . אם יש הרעת קירור , וטמפ׳ הסביבה גבוהה מהטמפרטורה התקנית, אז ההספק המרבי של שמותר לחבר לציר המנוע יהיה קטן מההספק הנקוב.

מקרה 1 – משטר עבודה ממושכת של המנוע

במצב זה המנוע עובד זמן רב , ללא הפסקות וטמפרטורת העבודה שלו מתייצבת על טמפרטורה הגבוהה מהטמפרטורה התקנית.

$$P_{max} = P_n \cdot \sqrt{\left(\frac{\Theta_{motor} - \Theta_{air\ 2}}{\Theta_{motor} - \Theta_{air\ n}} - K_1\right) \cdot \frac{1}{K_2}}$$

P_{max} - ההספק המרבי שמותר להעמיס מנוע, כאשר טמפ׳ הסביבה שונה מהתקנית.

Θ_{motor} - הטמפ׳ של גוף המנוע לפי הנתון בתרגיל או <u>בהתאם לסוג הבידוד</u> לפי הטבלה בעמוד הקודם.

$\Theta_{air\ n}$ - טמפ׳ סביבה **<u>תיקנית</u>** (בדרך כלל $30°\text{-}40°$ כפי הנתון בתרגיל).

$\Theta_{air\ 2}$ - טמפ׳ סביבה **<u>חדשה</u>** (לא תקנית) .

K_1 - קבוע ההפסדים הקבועים , K_2 - קבוע ההפסדים המשתנים

מקרה 2 – משטר עבודה עם הפסקות ממושכות

במשטר עבודה עם הפסקות ארוכות המנוע עובד זמן <u>קצר</u> בלבד, ומייד אחר כך נכנס למנוחה <u>ארוכה</u> עד התקררות מוחלטת <u>לטמפ׳ הסביבה</u>.

התנאי לנוסחה הבאה הוא שזמן המנוחה t_0 יהיה גדול מ- 5τ שזה הזמן שלוקח למנוע להתקרר לחלוטין.

בצורת עבודה כזו אפשר להעמיס את המנוע מעל הספקו הנקוב.

התנאים להשתמש בנוסחה הבאה , המתאימה **למשטר עם הפסקות ממושכות** הם :

$t_0 \geq 5\tau$ **וגם** $t_w \leq 2\tau$

$$P_{max} = P_n \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{t_W}{\tau}}\right)} \cdot \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}$$

K_1 -קבוע ההפסדים הקבועים , K_2 - קבוע ההפסדים המשתנים

t_W - זמן העבודה הקצר של המנוע . יכול להימדד בדקות או בשעות.

τ - קבוע זמן תרמי . יכול להימדד בדקות או בשעות.

מקרה 3 - משטר עבודה עם הפסקות מחזוריות (שה"מ)

במשטר עבודה עם הפסקות מחזוריות המנוע עובד במשך t_W ואז נכנס למנוחה במשך t_0 עד התקררות חלקית וחוזר חלילה , במחזוריות של עבודה והפסקה לסירוגין.

התנאי לנוסחה $t_0 \leq 5\tau$, כך המנוע לא מספיק להתקרר לטמפ' הסביבה .

$$P_{max} = P_n \cdot \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_W + t_0}{\tau}}}{\left(1 - e^{-\frac{t_W}{\tau}}\right)} \cdot \frac{1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2}}$$

K_1 -קבוע ההפסדים הקבועים , K_2 - קבוע ההפסדים המשתנים

t_W - זמן העבודה של המנוע t_0 - זמן המנוחה של המנוע

τ - קבוע זמן תרמי . יכול להימדד בדקות או בשעות.

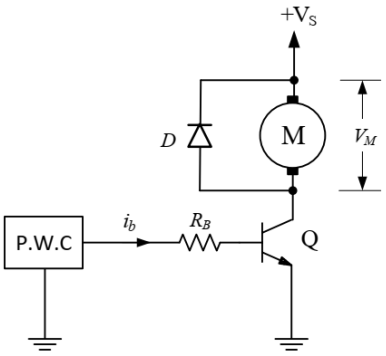
7.5 ויסות מהירות של מנוע DC

שינוי מהירות יזומה של מנוע זרם ישר מתבצעת על ידי שינוי התנגדות העוגן (על ידי הוספת נגדים) או על ידי שינוי מתח ההזנה על פי הנוסחה הבאה :

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{K_M}$$

מעגל בקרה לשינוי המתח

מעגל הבקרה chopper או בשם נוסף ממיר Buck או Step Down הוא ממיר מתח DC-DC אלקטרוני המקבל מתח גבוה בכניסה ומוריד את המתח ביציאה שלו.



הוא בנוי מטרנזיסטור המשמש כמתג הנשלט על ידי בקרת PWC (Pulse Width Control) .

בקרת PWC יוצרת אות ריבועי שאפשר לשנות את t_{on} שלו ועל ידי כך את גורם המחזור שלו (Duty Cycle) $D = \frac{t_{on}}{T}$. בצורה כזו הטרנזיסטור עובר מהולכה לקיטעון בתדר מיתוג גבוה .

מעגל ה- chopper שמחובר למנוע מייצר אות מתח ריבועי על המנוע ותפקידו להוריד את המתח הממוצע שמגיע למנוע לפי הנוסחה $V_{av} = D \cdot V_{in}$. בעזרת שינוי המתח , משנים את מהירות המנוע לערך הרצוי לפי הנוסחה :

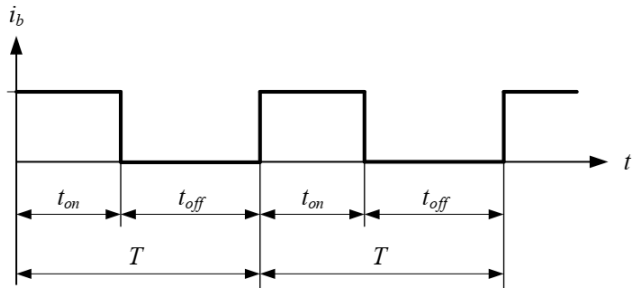
$$\omega = \frac{V_{av} - I \cdot R}{K_M}$$

תפקיד הדיודה במעגל – להגנה על הטרנזיסטור מפני קפיצת מתח גדולה ושריפתו. הדיודה מאפשרת מסלול פריקה לזרם שאגור בסלילי המנוע כאשר המתח על המנוע יורד לאפס.

נוסחאות הממיר :

1. גורם מחזור D Duty Cycle

זהו היחס בין t_{on} לזמן המחזור T שיוצר בקר PWC המזין את הדק הבקרה של הטרנזיסטור.



$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

2. חישוב המתח הממוצע של המנוע

$$V_{av} = D \cdot V_{in}$$

V_{in} - מתח ההזנה DC שאליו מחובר המעגל .

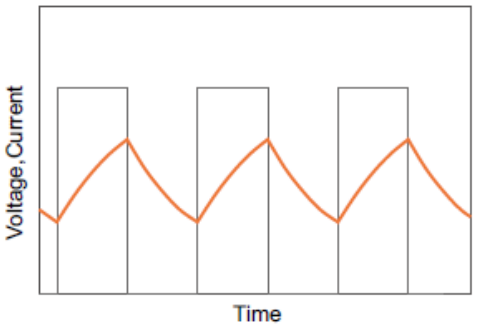
3. הקשר בין זמן מחזור ותדירות המיתוג

$$f = \frac{1}{T} \qquad T = \frac{1}{f}$$

4. חישוב מהירות המנוע כתלות במתח ההזנה הממוצע

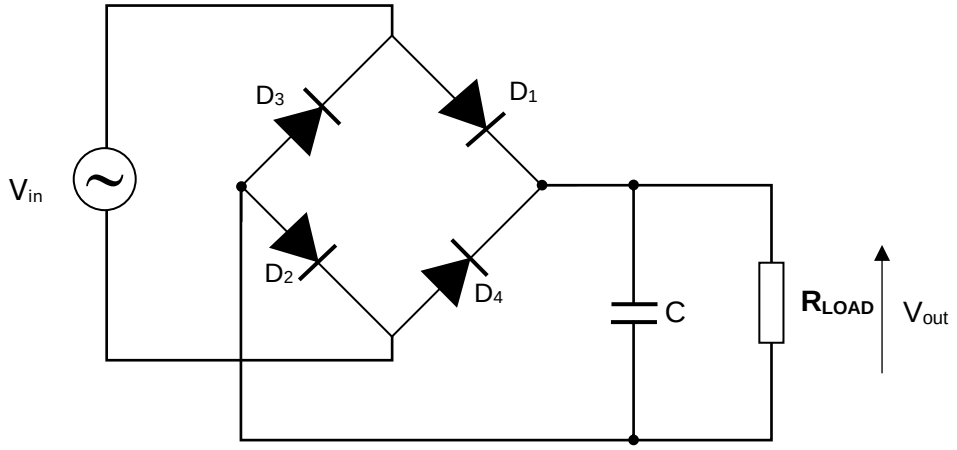
$$\omega = \frac{V_{av} - I \cdot R}{K_M}$$

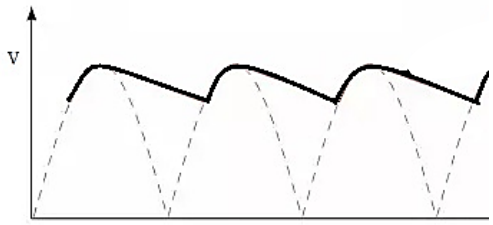
שרטוט אות המתח הריבועי ואות הזרם במנוע



7.6 מיישר דו דרכי (גשר דיודות)

תפקידו להפוך מתח רשת סינוסואידלי למתח ישר DC .





שרטוט של מתח המוצא V_{out} - יישור גל שלם עם/בלי קבל סינון

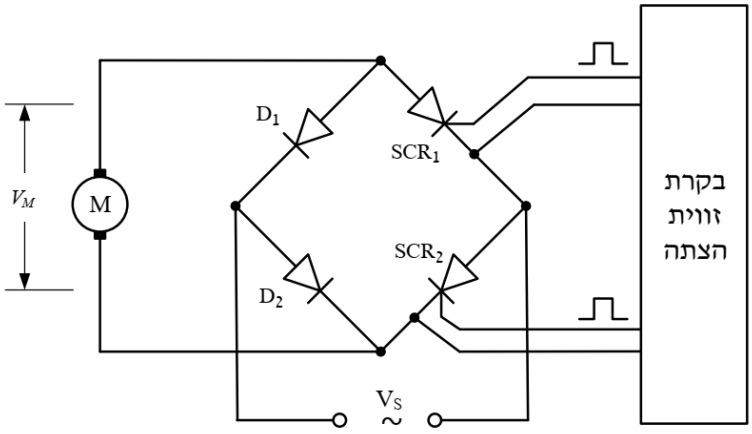
$\Delta V = \frac{V_{max}}{2 \cdot f \cdot R \cdot C}$	גובה האדווה
$V_{out} = V_{max} - \frac{\Delta V}{2}$	המתח הישר בעומס
$V_{out} = V_{max}$: $C \to \infty$	עבור קבל גדול

V_{max} - המתח המכסימלי של האות הסינוסיאידלי בכניסה למיישר. $V_{max} = \sqrt{2} \cdot V_{eff}$

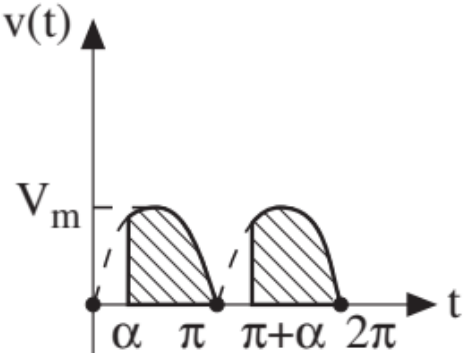
C – ערך קבל הסינון [F] R - התנגדות העומס [Ω]

7.7 מיישר דו דרכי מבוקר (עם רכיבי SCR)

תפקידו להפוך מתח רשת סינוסואידלי למתח ישר DC ולשלוט על עוצמתו.



איור לשרטוט מתח המוצא – בקרת גל שלם מיושר



α - זווית ההצתה (במעלות ברדיאנים) של רכיבי SCR . זו הזווית בה רכיב SCR מקבל פולס הצתה להדק השער שלו ומתחיל להוליך.

מתח ממוצע $$V_{av} = \frac{V_{max}}{\pi} \cdot (1 + cos\alpha°)$$

מתח יעיל $$V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha°}{180} + \frac{\sin 2\alpha°}{2\pi}}$$

V_{max} - המתח המכסימלי של האות הסינוסיאידלי בכניסה למיישר. $V_{max} = \sqrt{2} \cdot V_{eff}$

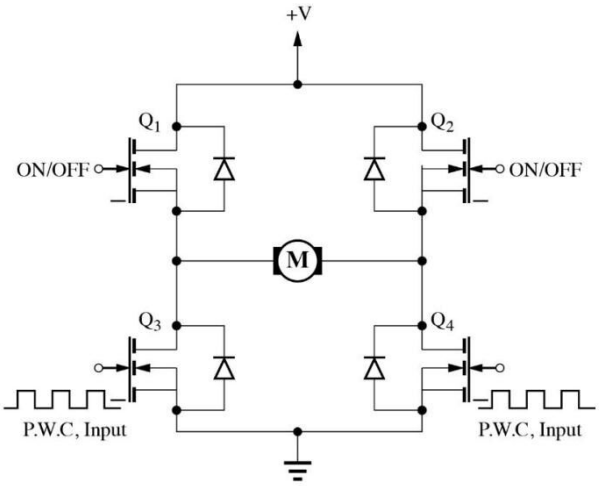
$\alpha°$ - זווית ההצתה **במעלות**. אם α נתונה ברדיאנים אז ממירים למעלות (π מוחלף ב- $180°$)

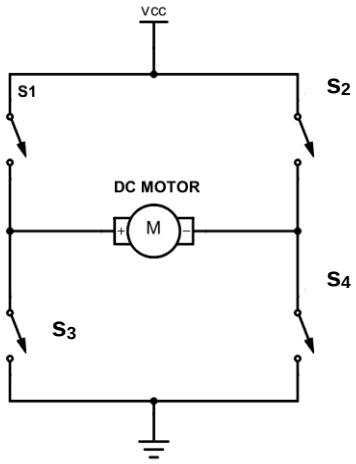
7.8 מעגל בקרת מהירות מסוג H Bridge

המעגל בנוי מארבעה טרנזיסטורים מסוג MOS FET (או IGBT) המשמשים כמתגים.

תפקידי גשר H :

1. היפוך כיוון הסיבוב של המנוע.
2. בלימת המנוע והבאתו לעצירה מהירה.
3. שליטה על מהירות המנוע.



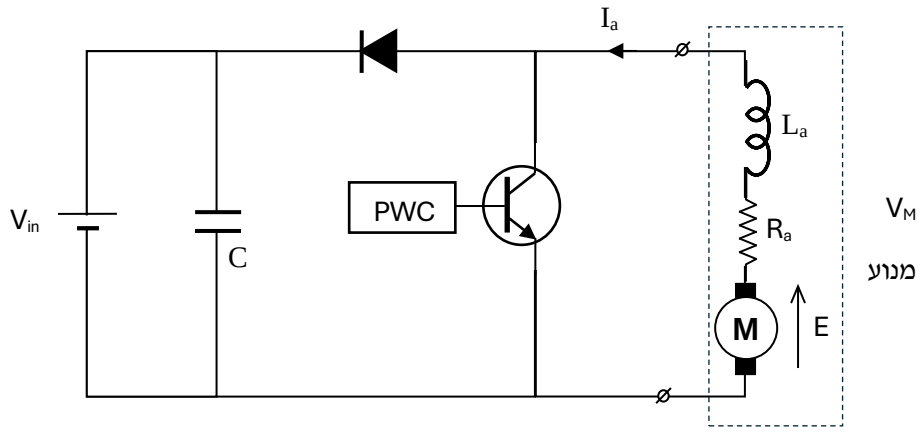


אם הטרנזיסטורים משולבים עם בקרת PWM המעגל יוכל לשלוט על שינוי מהירות המנוע על ידי שינוי המתח הממוצע.

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	השפעה על המנוע
1	on	off	off	on	סיבוב בכיוון אחד
2	off	on	on	off	סיבוב בכיוון שני
3	off	off	on	on	בלימה
4	off	on	off	on	מצב אסור – קָצָר לאדמה
5	on	off	on	off	מצב אסור – קָצָר לאדמה

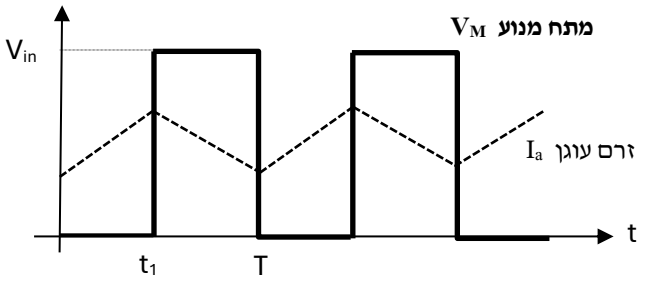
7.9 מעגל בלימה רגנרטיבית של מנוע DC

במעגל בלימה רגנרטיבית יש האטה במהירות המנוע תוך כדי ניצול של האנרגיה הקינטית של המנוע והפיכתה לאנרגיה חשמלית לצורך טעינה של מצבר. האנרגיה הקינטית מומרת לאנרגיה אלקטרומגנטית שמומרת לאנרגיה חשמלית ואז נאגרת בסוללה.



בקטע זמן $0< t < t_1$ הטרנזיסטור נמצא בהולכה וכל זרם העוגן I_a עובר דרכו. הזרם גדל והסליל L_a נטען באנרגיה. מתח המנוע בזמן זה שווה אפס.

בקטע זמן $t_1< t < T$ הטרנזיסטור נמצא בקיטעון וכל זרם העוגן I_a עובר דרך הדיודה לתוך מקור במתח V_{in} . הזרם קטן והסליל L_a נפרק מאנרגיה ואילו מקור המתח בתהליך טעינה. מתח המנוע בזמן זה שווה ל- V_{in}.



גורם מחזור D Duty Cycle

זהו היחס בין t_{on} לזמן המחזור T שיוצר בקר PWC המזין את הדק הבקרה של הטרנזיסטור.

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

הקשר בין זמן מחזור ותדירות המיתוג

$$f = \frac{1}{T} \qquad\qquad T = \frac{1}{f}$$

חישוב המתח הממוצע של המנוע

$$V_M = (1 - D) \cdot V_{in}$$

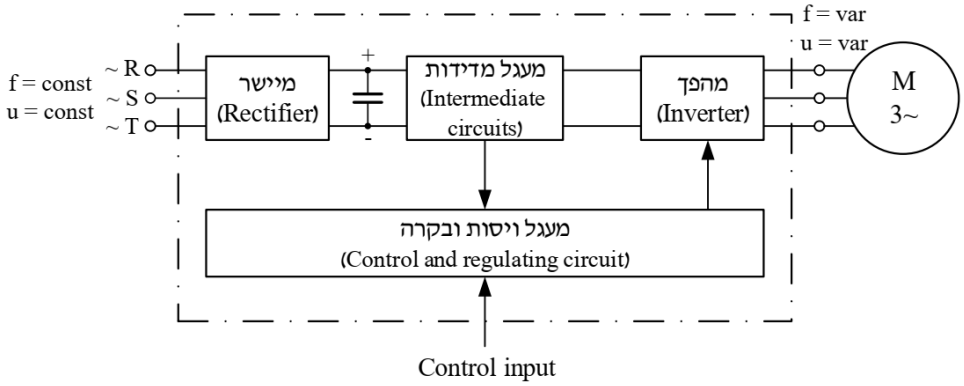
חישוב זרם העוגן הממוצע I_a

$$I_a = \frac{E - (1 - D)V_{in}}{R_a}$$

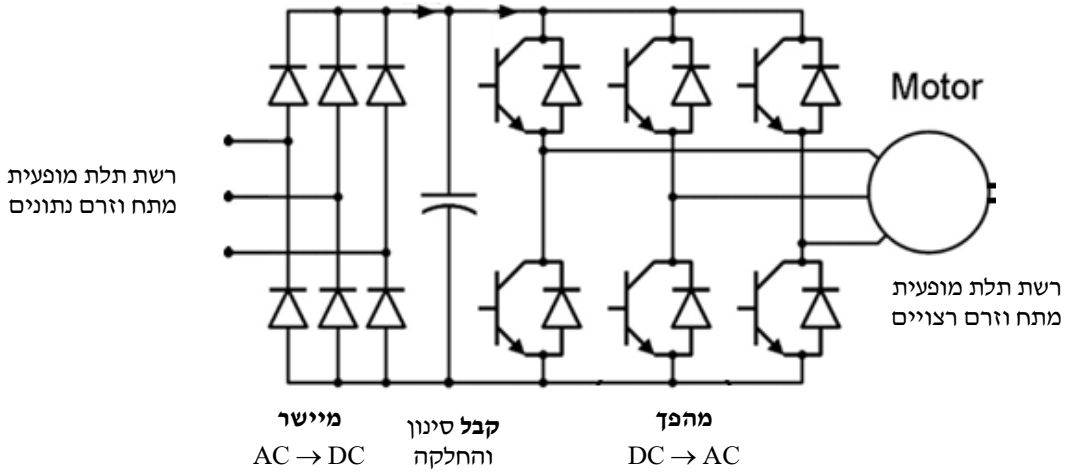
E – הכא״מ המתפתח במנוע

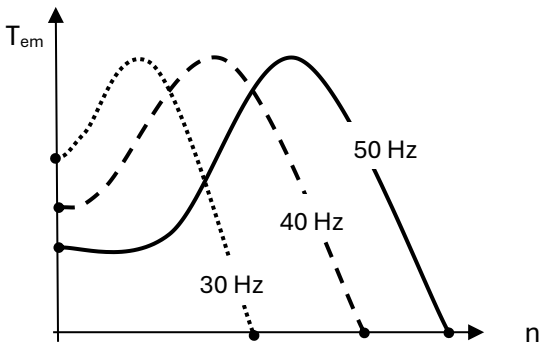
7.10 משנה מהירות אלקטרוני למנוע AC

משנה המהירות מוזן ממקור זרם חילופין בעל מתח ותדירות קבועים. במשנה התדירות מתבצע יישור מתח החילופין על ידי מיישר (rectifier) והפיכת המתח הישר לאחר מכן למתח חילופין בעזרת מעגל מהפך (inverter) שמשנה את התדירות והמתח בהתאם למהירות הנדרשת מהמנוע.



שרטוט רכיבי המעגל





הורדת התדר גורמת להקטנת מהירות המנוע

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

$$\frac{U_{1\ \text{חדש}}}{U_{1\ \text{ישן}}} = \frac{f_{1\ \text{חדש}}}{f_{1\ \text{ישן}}}$$

עם שינוי התדר יש לשנות את המתח באותו יחס על מנת שהמומנט שמייצר המנוע לא ייפגע.

7.11 התנעת מנוע השראה – מתנע רך אלקטרוני

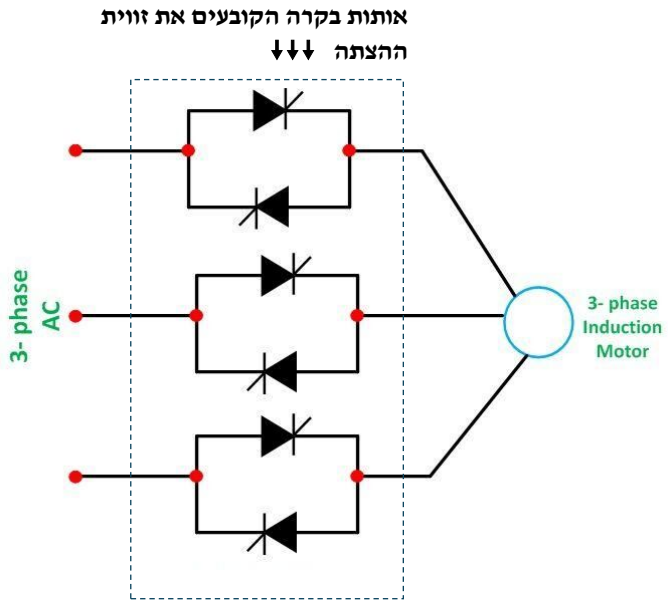
בהתנעה של מנוע השראה (בחיבור ישיר לרשת , ללא מתנע) , המנוע צורך זרם גבוה מאוד , פי 5-6 מהזרם הנקוב . הדבר הזה גורם למפלי מתח גבוהים בקוי החשמל ולהפרעות לצרכנים שכנים שנמצאים בסביבה ואפילו להקפצת הגנות. עוד בעיה שיכולה להיווצר זה מומנט התנעה חזק מאוד בגלל הזרם הגבוה, דבר שעלול לשבור או לכופף את ציר המנוע.

כדי למנוע את הבעיות החשמליות והמכניות של התנעה בחיבור ישיר לקו , צריך לחבר מתנע שתפקידו להוריד את הזרם הגדול בזמן ההתנעה ואז להעלות אותו בהדרגה.

מבנה המתנע הרך

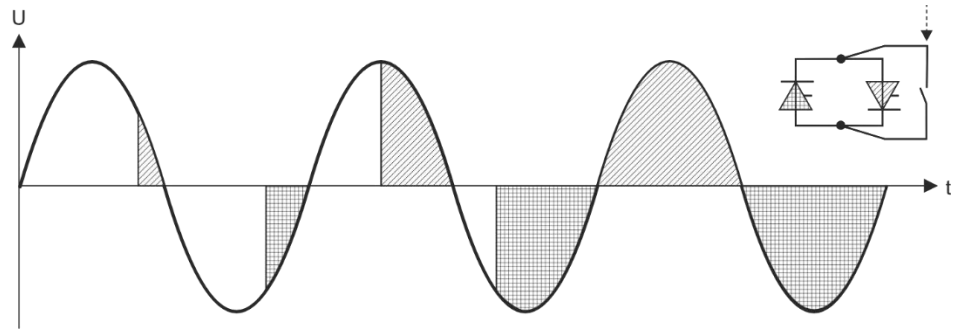
זהו מתנע אלקטרוני המבוסס על רכיבי SCR ותפקידו לשנות את **המתח** על הדקי המנוע בהדרגה , ממתח נמוך ועד למתח הנומינלי. הגדלת המתח מתרחשת בצורה רציפה , חלקה ומבוקרת. כשהמתח עולה בהדרגה אז גם הזרם יעלה בהדרגה.

המתנע הרך מבוסס על רכיבי הספק מסוג SCR . בכל פאזה מחוברים שני תיריסטורים SCR גב אל גב (חיבור מקבילי הפוך). לחלופין , ניתן להשתמש ברכיב TRIAC אחד.

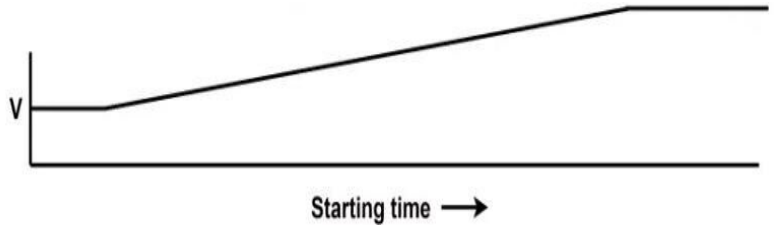


אופן פעולת המתנע הרך

- התיריסטור SCR משמש כמתג מוליך רק כאשר נותנים לו פולס הצתה בכניסת השער שלו.
- בכל פאזה יש זוג SCR גב אל גב כדי שאחד יהיה פעיל בחצי גל חיובי והשני בחצי גל שלילי.
- זווית ההצתה כל הזמן משתנה . בהתחלת הפעולה היא גדולה ואז מעגל הבקרה מקטין אותה בהדרגה. זה גורם למתח האפקטיבי של הגל כל הזמן לגדול עד למתח הנומינלי.



אופיין של המתח היעיל של המנוע כתלות בזמן



התנעה של מנוע סינכרוני

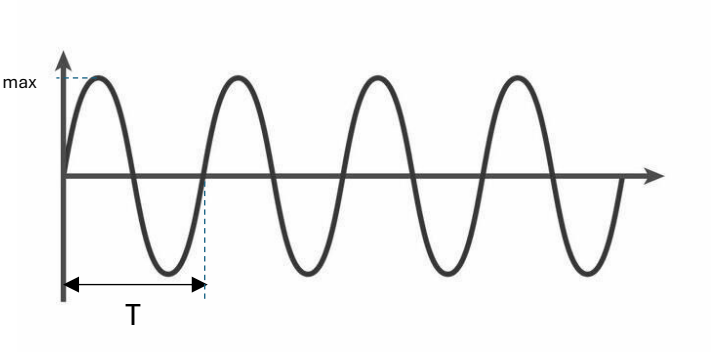
1. התנעה באמצעות מנוע עזר שמחובר לציר המנוע הסינכרוני.

2. התנעה אסינכרונית – בעזרת רוטור כלוב , מתחילה התנעה אסינכרונית בדומה למנוע השראה ואז סליל העירור של המנוע מתחיל לפעול ומסנכרן את המנוע.

3. התנעה באמצעות מתנע אלקטרוני המעלה את התדירות בהדרגה וכך מהירות הרוטור גדלה בהדרגה לפי הנוסחה $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$ עד למהירות סינכרונית נקובה.

נספח – נוסחאות כלליות בחשמל

אות סינוסואידלי



$$u(t) = U_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

קשר בין זמן מחזור , תדירות ותדר זוויתי

$$f = \frac{1}{T} \qquad T = \frac{1}{f} \qquad \omega = 2\pi f$$

ערך יעיל וערך מכסימלי

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \qquad U_{max} = U_{eff} \cdot \sqrt{2}$$

היגב ועכבה של משרן ושל קבל

$X_L = \omega L$	$Z_L = j\omega L$	משרן
$X_C = \frac{1}{\omega C}$	$Z_C = \frac{-j}{\omega C}$	קבל

הספקים (<u>חד פאזי</u>):

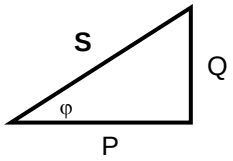
$$S = U \cdot I$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$\vec{S} = \vec{U} \cdot \vec{I}^*$$

I^* - הזרם <u>הצמוד</u> , הופכים סימן בזווית של הזרם

משולש הספקים :

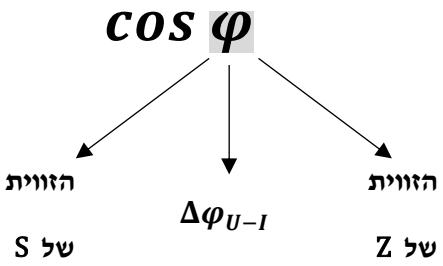


$S^2 = P^2 + Q^2$ (פיתגורס)

$$cos\varphi = \frac{P}{S} \quad , \quad sin\varphi = \frac{Q}{S} \quad , \quad tan\varphi = \frac{Q}{P}$$

מקדם הספק (גורם הספק , PF) $\cos\varphi$:

הגדרה : גורם ההספק הוא היחס בין הספק פעיל P להספק נידמה S $cos\Phi = \frac{P}{S}$



$$cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \rightarrow \quad S = \frac{P}{cos\varphi} \quad \rightarrow \quad P = S \cdot cos\varphi$$

מעבר מכוח סוס לוואט:

$$HP \xrightarrow{\times 736} W$$

אופי העומס

אופי	יחס מתח -זרם	cosφ
השראי , inductive	מתח מקדים את הזרם	φ>0° , cosφ מפגר
קיבולי, capacitive	זרם מקדים את המתח	φ<0° , cosφ מקדים
התנגדותי , אקטיבי	זרם ומתח באותו מופע	φ=0° , cosφ=1

צמצום עכבות

יש לעבוד עם מספרים מרוכבים z=a+bj

צימצום בטור

$$\bar{Z}_T = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 + \cdots$$

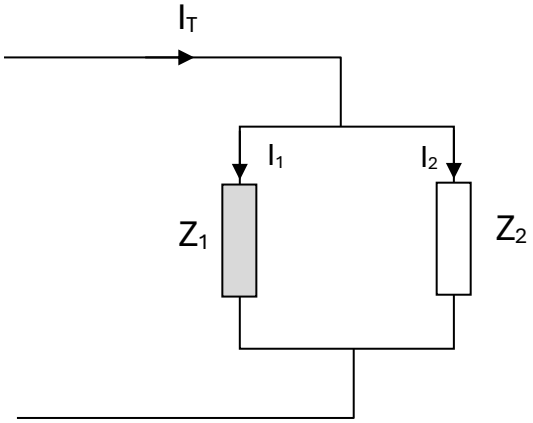
צימצום במקביל

$$Z_T = \frac{1}{(\bar{Z}_1)^{-1} + (\bar{Z}_2)^{-1} + (\bar{Z}_3)^{-1} + \ \ldots}$$

נוסחת מחלק זרם

מתאימה רק לשתי עכבות במקביל.

יש לעבוד עם מספרים מרוכבים ופאזורים.

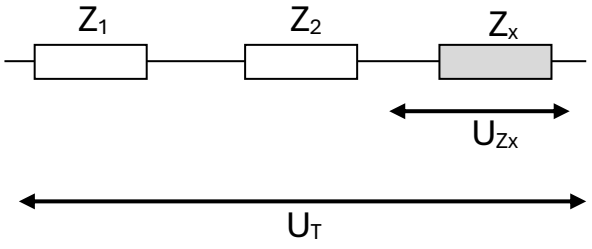


$$\vec{I_1} = \frac{\boldsymbol{Z_2}}{Z_1 + Z_2} \cdot \vec{I_T}$$

$$\vec{I_2} = \vec{I_T} - \vec{I_1}$$

נוסחת מחלק מתח

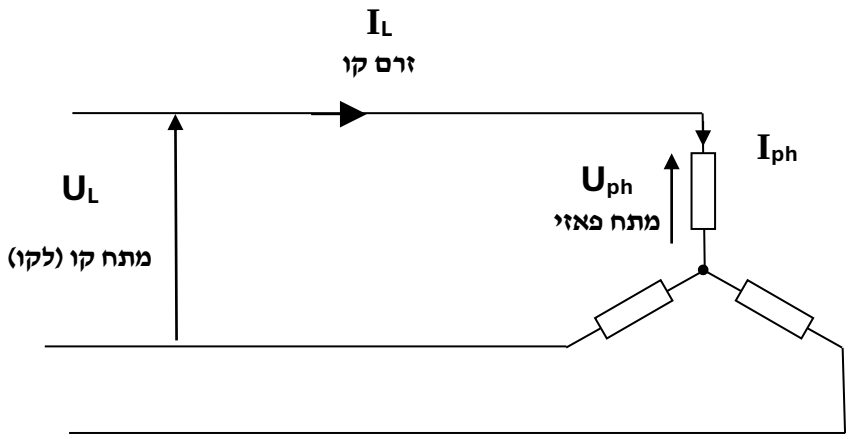
מתאימה רק לעכבות בטור.



$$\vec{U}_{Zx} = \frac{\boldsymbol{Z_x}}{Z_1 + Z_2 + Z_3 \cdots} \cdot \vec{U}_T$$

חיבור כוכב Y וחיבור משולש Δ

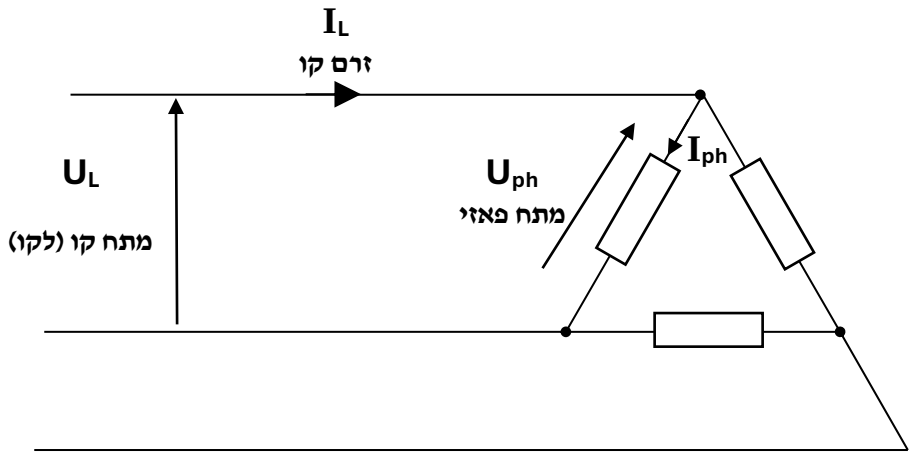
תכונות חיבור כוכב



בחיבור כוכב זרם הקו והזרם הפאזי שווים .

$$I_{ph} = I_L \qquad U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

תכונות חיבור משולש



בחיבור משולש מתח הקו והמתח הפאזי שווים .

$$U_{ph} = U_L \qquad I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

חישוב הספקים ברשת תלת פאזית

הנוסחאות הבאות מתייחסות לערכים **שלובים** (ערכי קו) **וגדלים בלבד** (בלי זויות)

$$S = \sqrt{3}\, U_L \cdot I_L$$

$$P = \sqrt{3}\, U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

אם משתמשים בערכים **פאזיים** ph אז :

$$S = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph}$$

$$P = 3 \cdot U_{ph} \cdot I_{ph} \cdot \cos\varphi$$

אם מחשבים הספק של רכיבים (R, X) אז חייבים לעבוד בערכים **פאזיים** :

$$P = 3 \cdot I_{ph}^2 \cdot R$$

בנוסחה הבאה חייבים לעבוד עם **זויות ופאזורים** :

$$\vec{S} = 3 \cdot \vec{U}_{ph} \cdot \vec{I}^*_{ph}$$

I^* - הזרם <u>הצמוד</u> , הופכים סימן בזווית של הזרם