



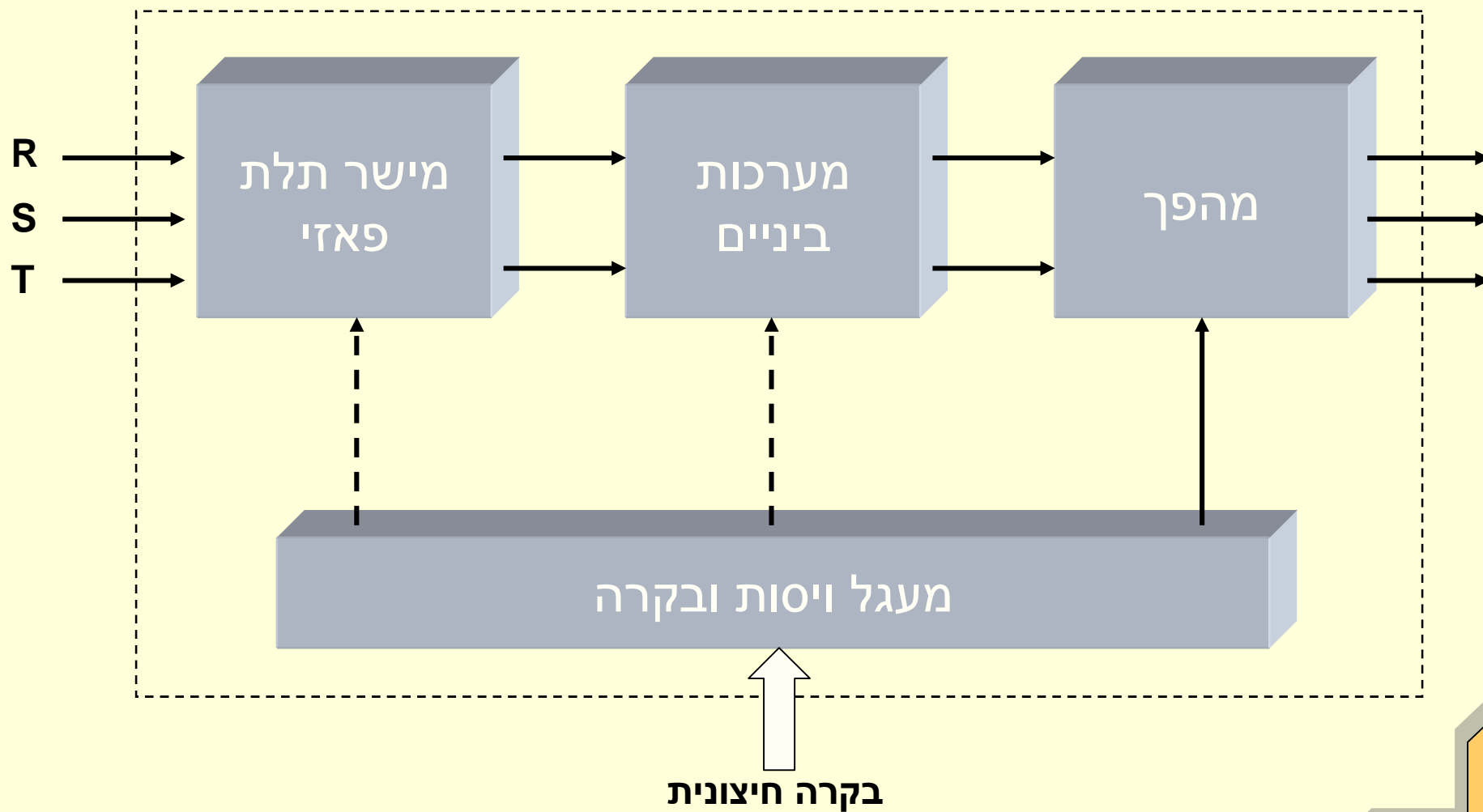
בקרת מהירות
מנועי השראה

כתיבה ועריכה:
סגל אריאל

מבוא

- ויסות אלקטרוני של מהירות הסיבוב במנועי זרם חילופין מבוסס על שינוי תדר מתח ההזנה המגיע לסטטור של המנוע. פעולה תקינה של המנוע דורשת גם שינוי של מתח ההזנה בהתאם לשינוי המהירות (יוסבר בהמשך).
- בבקר המהירות מבוצעת המרת מתח חילופין של הרשת (בעל תדירות קבועה) למתח ישר קבוע או משתנה, ולאחר מכן הפיכתו של המתח הישר למתח חילופין בעל תדירות ומתח משתנים.

סכמת מלבנים של בקר מהירות



סכמת מלבנים של בקר מהירות

- מיישר – הופך מתח חילופין (חד פאזי או תלת פאזי) למתח ישר (בעל ערך קבוע או משתנה). דרגת הישור מבוססת על מישר מבוקר או על מישר דיודות. כאשר המישר מכיל גשר דיודות מתבצע ויסות המתח ע"י מקטם. אחרת שליטה על המתח מתקבלת באמצעות מהפך מסוג PWM.
- מעגל ביניים - ממלא תפקידים שקשורים במכשיר כמו הגנות, סינון וכד'.
- מהפך – הופך מתח ישר למתח חילופין בעל תדירות וערך ניתנים לשליטה. בקרי מהירות ישנים מכילים מהפך ואילו הבקרים המודרניים מכילים כולם מהפך PWM.
- מעגל פיקוד ובקרה – מיועד לבקר את מעגלי ההספק ברוב המקרים מוטלת משימה זו על מיקרופרוססור.

הזנת מנוע השראה בתדר משתנה

- שניו תדירות מתח ההזנה של מנוע השראה מבטיח שינוי מהירות השדה המסתובב בהתאם לקשר:

$$n_s = \frac{60 * f}{P}$$

- שינוי התדירות משפיע גם על מיגנטו של מנוע ההשראה. כידוע הכא"מ המושרה בסלילי הסטטור מתקשר עם התדירות והשטף המגנטי בצורה הבאה:

$$E_1 = 4.44 * N * f_1 * \phi_m$$

- ערכו של הכא"מ E_1 קרוב מאוד לערכו של מתח ההזנה ולכן מקובל לרשום:

$$V_1 \cong E_1 = 4.44 * N * f_1 * \phi_m = k * f_1 * \phi_m$$

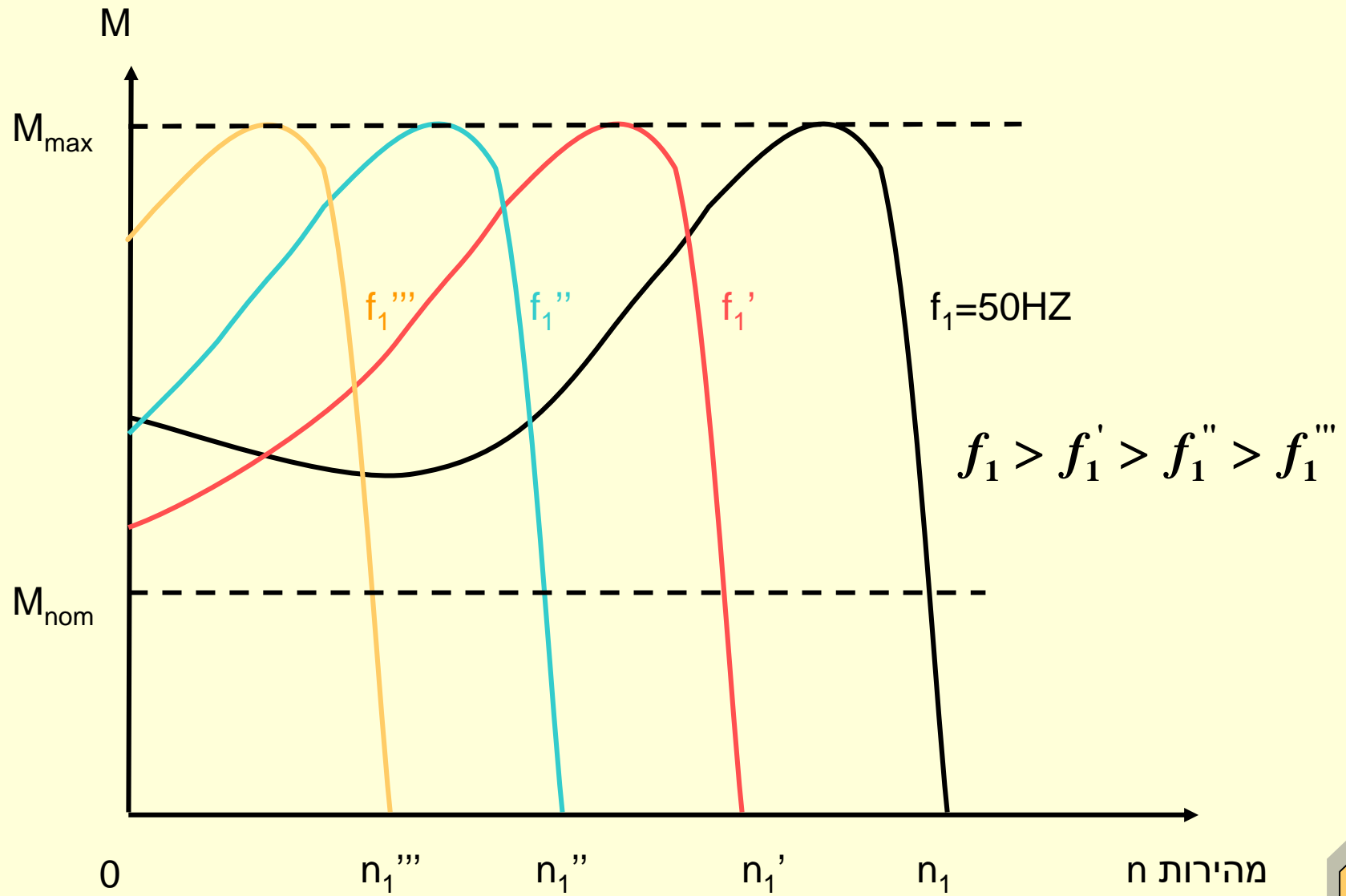
הזנת מנוע השראה בתדר משתנה

- מהביטוי המקשר את המתח, התדירות והשטף נובע כי כדי לשמור על שטף קבוע במנוע תוך מניעת מצב רוויה מגנטית במנוע חייב להתקיים התנאי:

$$\frac{V_1}{f_1} = k * \phi_m$$

- לפיכך חייב בקר המהירות לשנות את הערך היעיל של מתח ההזנה למנוע יחסית לשינוי המהירות.
- עם הקטנת התדירות מתחת ל- 50Hz מבלי לשנות את המתח, יגדל השטף המגנטי במכונה, המעגל המגנטי יכנס לרוויה וזרם המגנוט יעלה בצורה תלולה. הדבר יביא לחימום יתר של המנוע. לעומת זאת כאשר מגדילים את התדירות ללא שינוי מתח ההזנה, יקטן השטף המגנטי ובהתאם לכך גם מומנט המנוע.

אופיינים מכניים



אופיינים מכניים

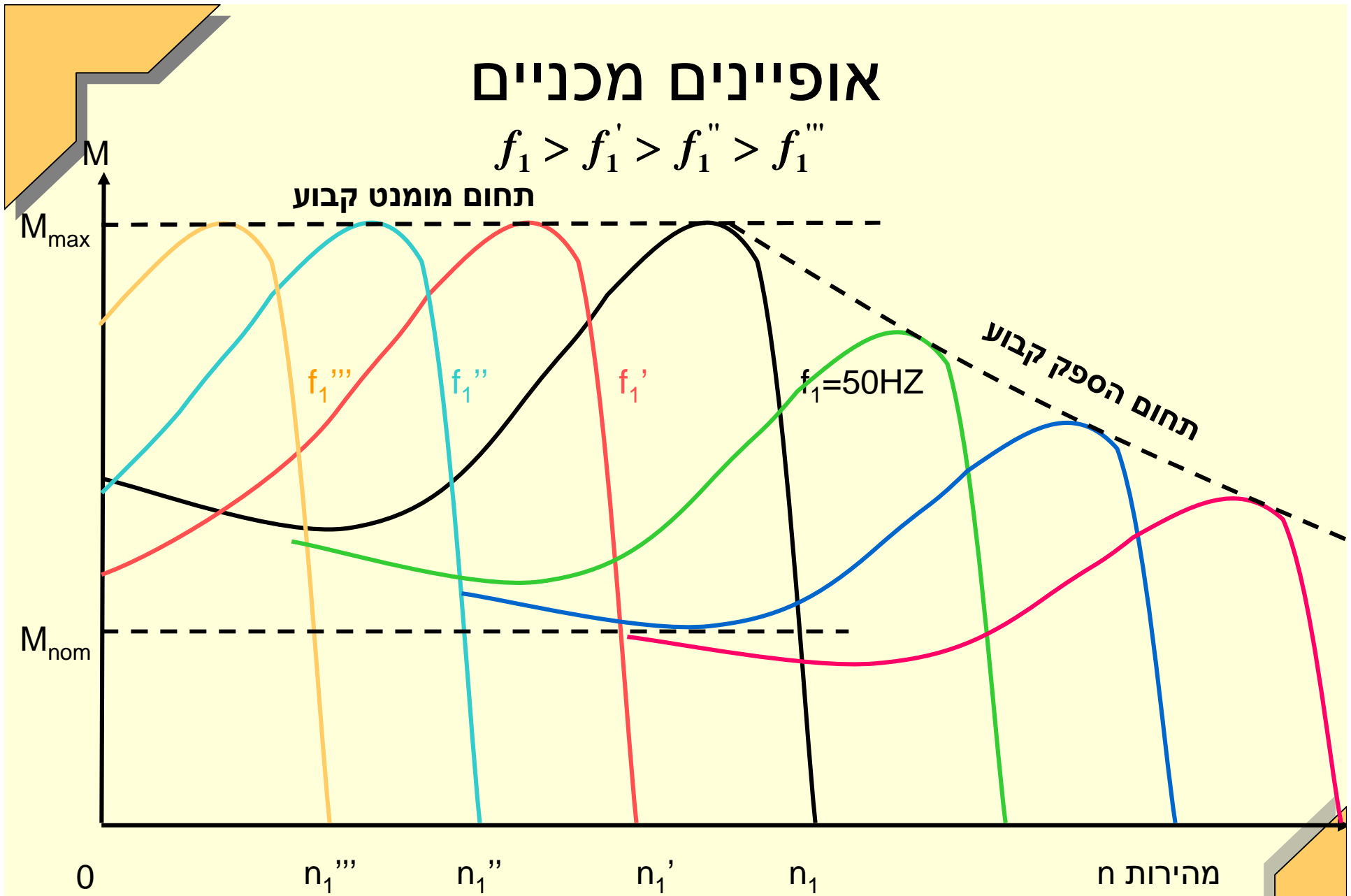
- פעולת המנוע בתחום זה נקראית פעולה במומנט קבוע.
- במידה ונגדיל את התדירות מעל ל- 50Hz, המנוע יסתובב במהירות גבוהה מהמהירות הנומינלית שלו.
- הקשר בין ההספק למומנט הינו:

$$P = 1.026 * M * n$$

- בתדירות 50Hz פועל המנוע במתח נומינלי, על מנת לא להעלות את המתח מעבר לנקוב וכדי למנוע עלית ההספק מעבר לנקוב (עובדה שתחמם את המנוע) מפירים את היחס הקבוע בין מתח לתדר, והמתח אינו עולה מעל הנקוב למרות עלית התדר מעבר ל- 50Hz.

אופיינים מכניים

$$f_1 > f_1' > f_1'' > f_1'''$$

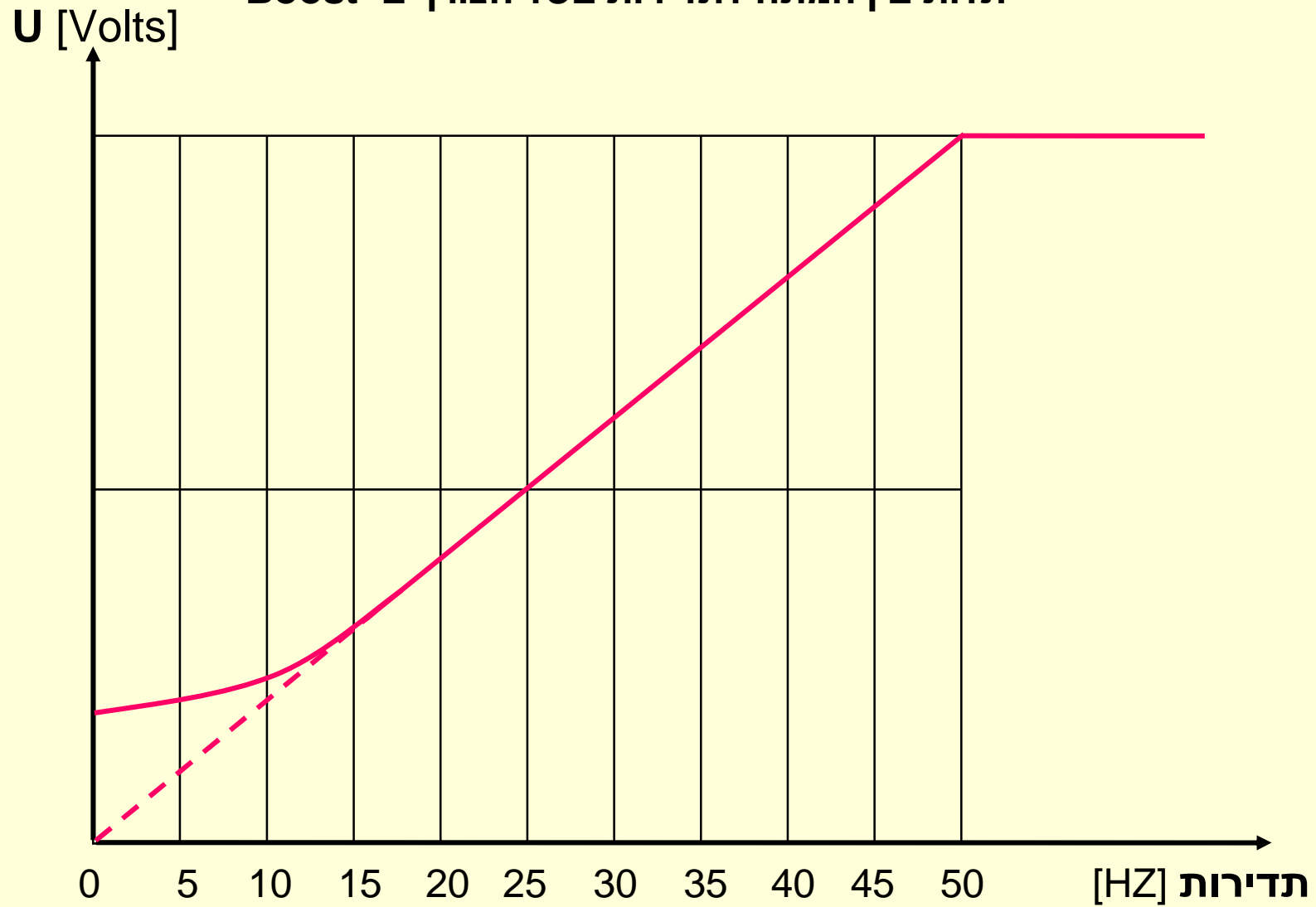


Boost

- מעגל המיגנוט של מנוע השראה ניתן לתיאור ע"י התנגדות פעילה והיגב השראי. בתדירות קרובה ל-50HZ, ההיגב ההשראי גדול בהרבה מההתנגדות הפעילה לפיכך הזרם בעל אופי השראי. לעומת זאת בתדרים נמוכים עכבת המעגל הופכת יותר התנגדותית (ההיגב ההשראי תלוי בתדירות). ואז חלקו של הזרם ההשראי בתוך הזרם הנצרך קטן יותר. כזכור השטף המגנטי נוצר ע"י הזרם ההשראי בלבד.
- על מנת לשמור על אותו זרם עוור בתדירויות נמוכות חייב הזרם הנצרך לגדול משמעותית. הדבר מחייב להפר את היחס הקבוע בין המתח לתדירות תוך הגדלת המתח (כדי לשמור על שטף קבוע וגם מומנט), בתחום התדירויות הנמוך. תהליך זה נקרא Boost.

Boost

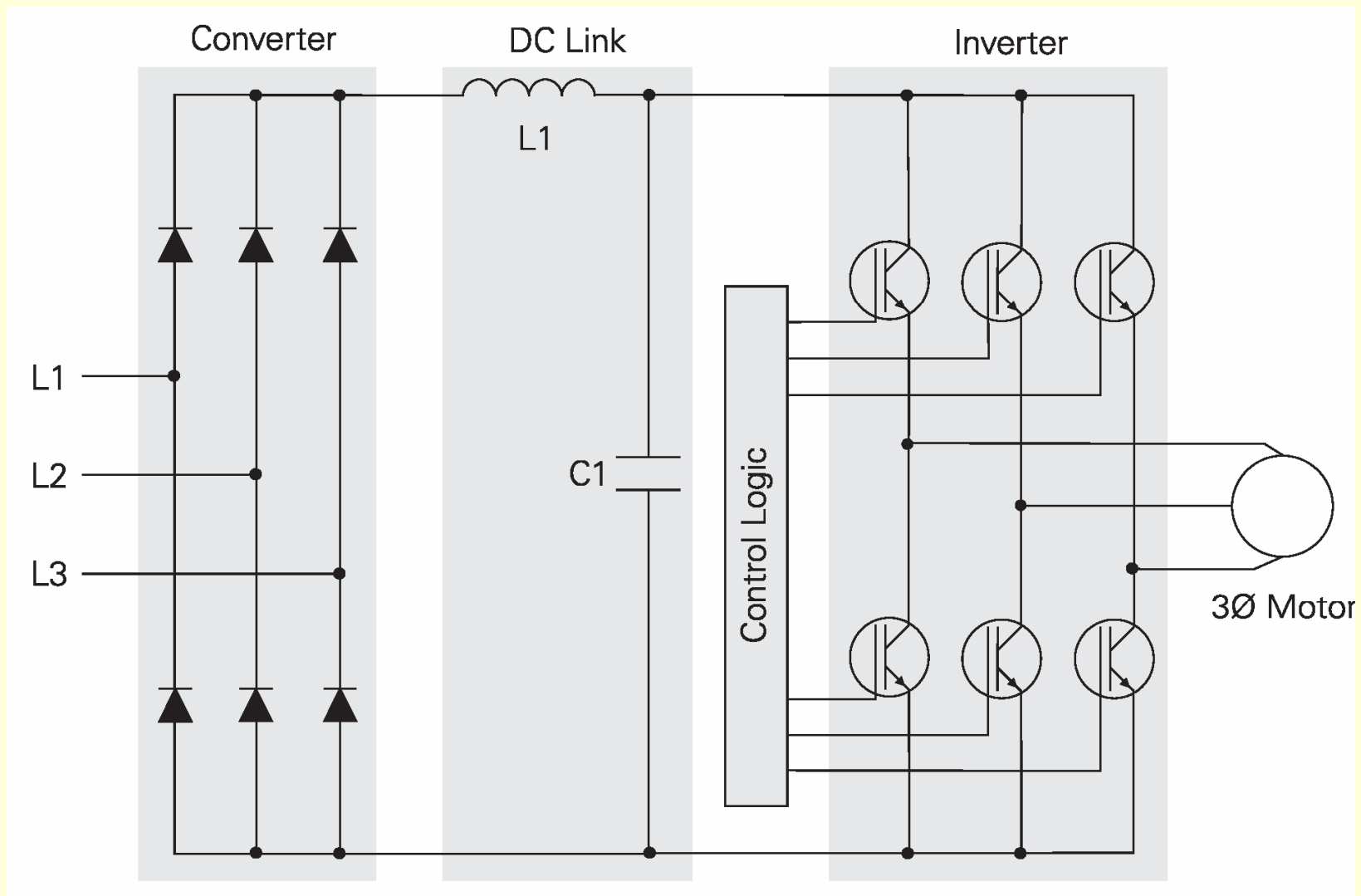
תלות בין המתח לתדירות בשל הצורך ב- Boost



יתרונות השימוש בבקר מהירות

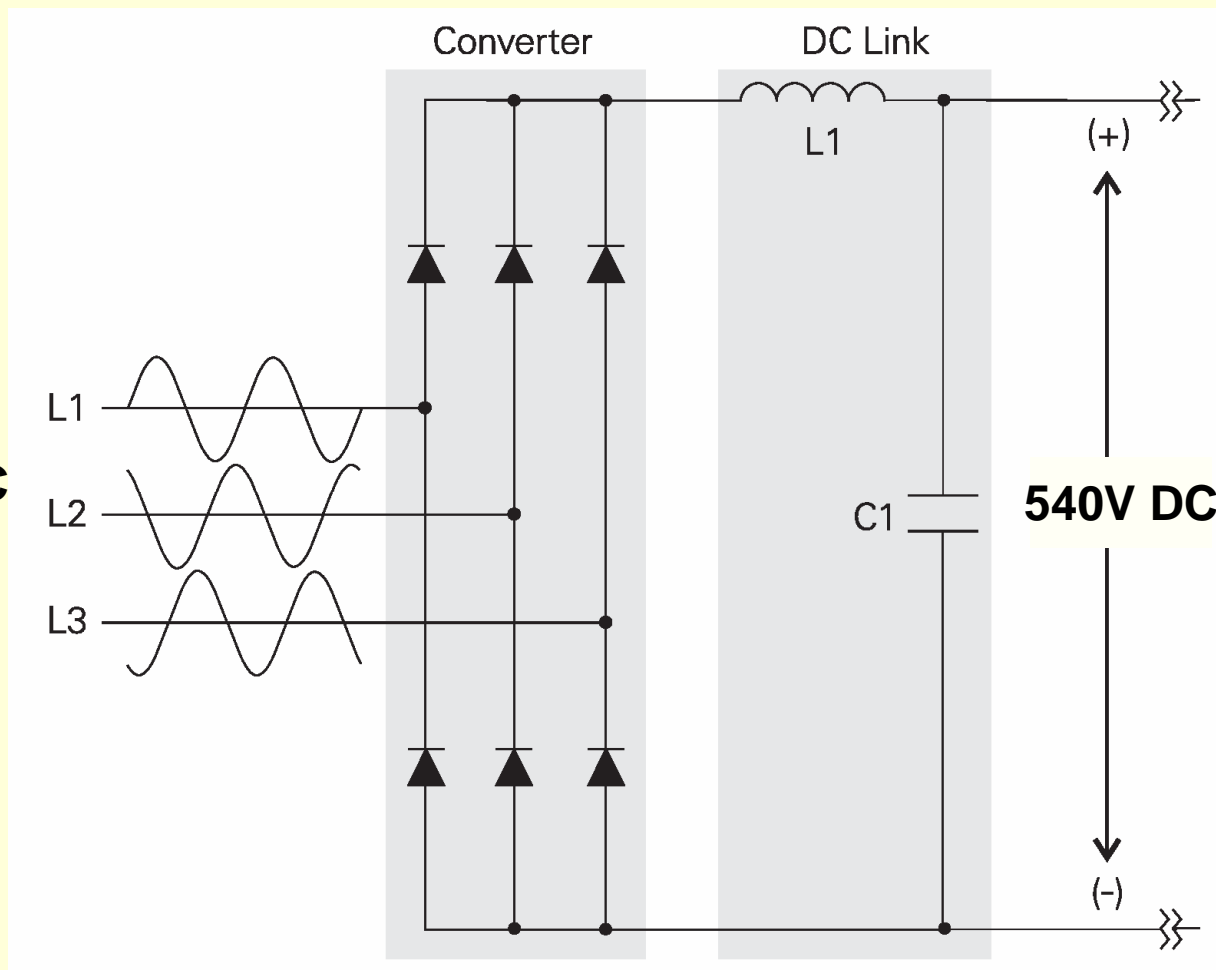
- התנעה רכה
- הדממה רכה
- המנוע מספק מומנט נומינלי גם במהירויות נמוכות ומומנט גבוה מהנומינלי בהתנעה.
- דרגת הכניסה בנוי מגשר דיודות (ישור תלת פאזי דו דרכי).
דרגה זו גורמת לגורם הספק קרוב ל-1 ללא תלות בעומס.
- שינוי מהירות בטווח רחב בדר"כ 5% עד 200% מהמהירות הנקובה.

מבנה עקרוני של בקר מהירות מנוע השראה תלת פאזי



דרגת הישור והסינון

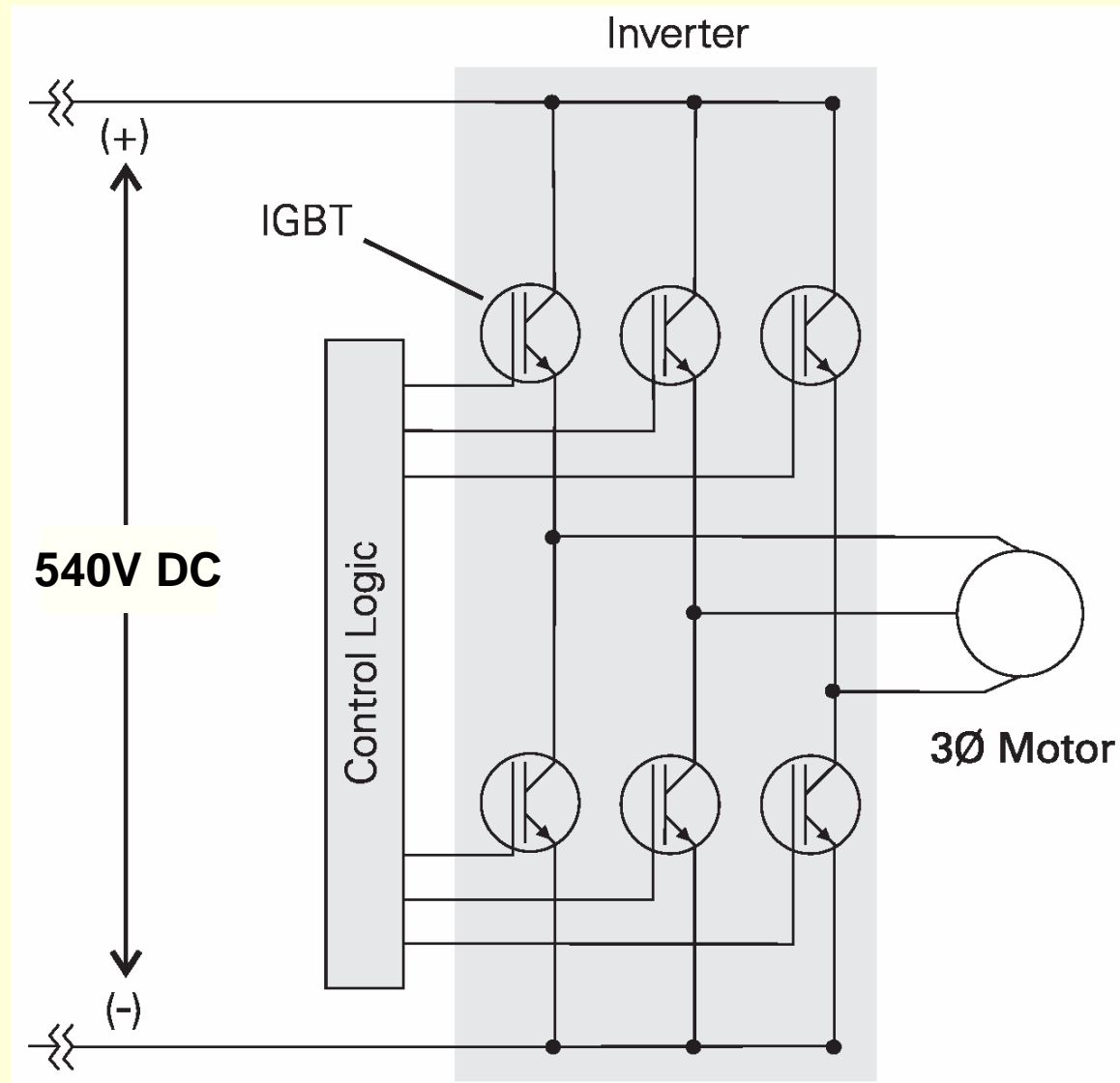
400 VAC
3~



דרגת הישור והסינון

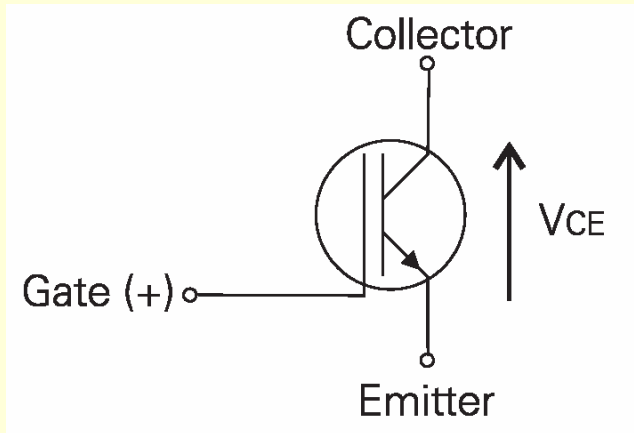
- בעזרת בקרי מהירות המבוססים על ישור באמצעות גשר דיודות ומהפך PWM משיגים גל זרם יותר סינוסואידלי ונצילות פעולה גבוהים יותר.
- דגמי הממירים הישנים יותר הכילו גשר ישור המבוסס על SCRים ודרגת המהפך ביצעה מיתוג לקבלת גל דמוי מלבני במדרגות.
- הסליל L1 והקבל C1 משמשים להחלקת מתח המוצא של המישר. מתח זה שווה בקירוב לפי 1.35 ממתח הרשת השלוב. ברשת 400V A.C שווה מתח זה ל- 540V D.C.

דרגת המהפך



רכיבי המהפך

טרנזיסטור IGBT

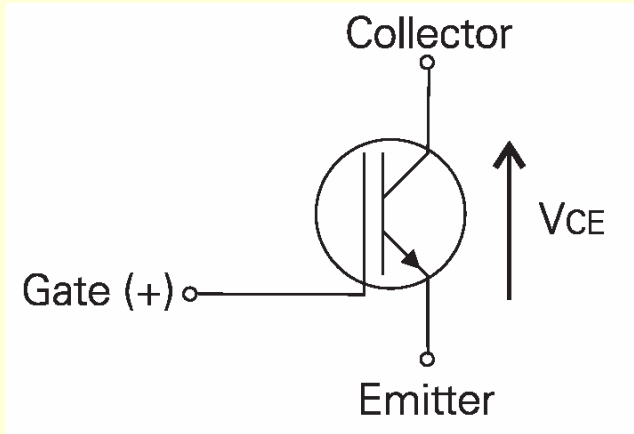


מתח המוצא והתדר נשלטים ע"י מערכת בקרה המספקת פולסי פעולה למהפך. המהפך מבוסס על רכיבים כמו תריסטורים, טרנזיסטורים ביפולאריים, טרנזיסטורי MOS ו-IGBT.

טרנזיסטורי IGBT – Insulated gate bipolar transistor הינם המקובלים ביותר בשימוש בבקרי המהירות המודרניים. הם מאפשרים מהירות מיתוג גבוהה הנדרשת עבור PWM. טרנזיסטורים אלה מאפשרים מספר אלפי מחזורי מיתוג בשניה עם זמן הפעלה והפסקה של כ- 400nSec.

רכיבי המהפך

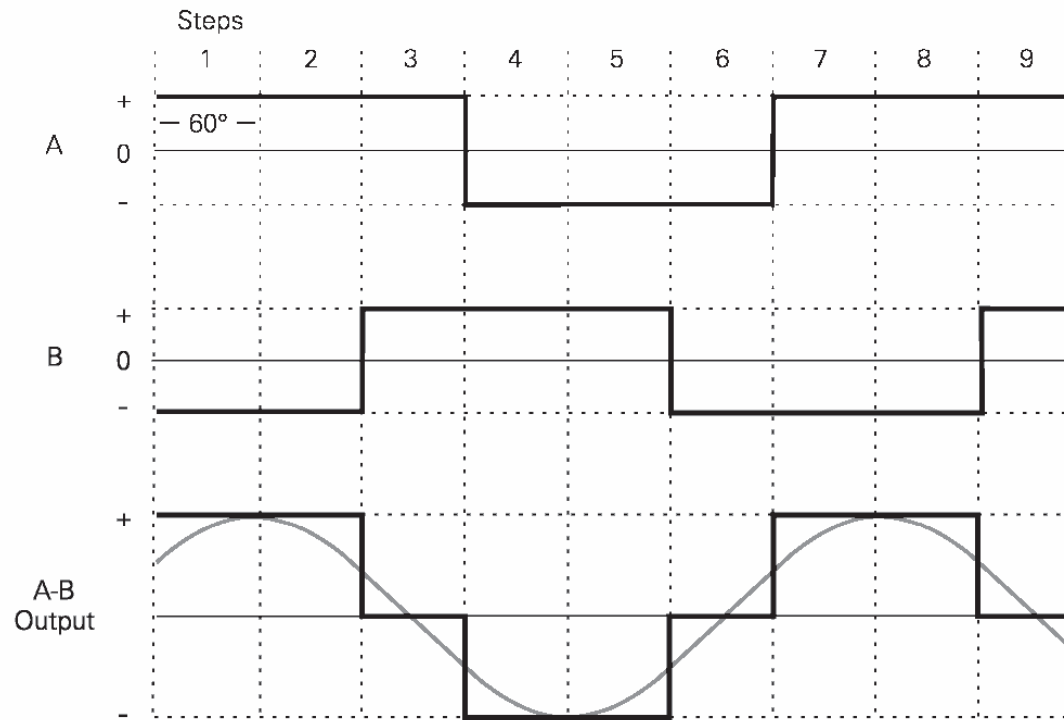
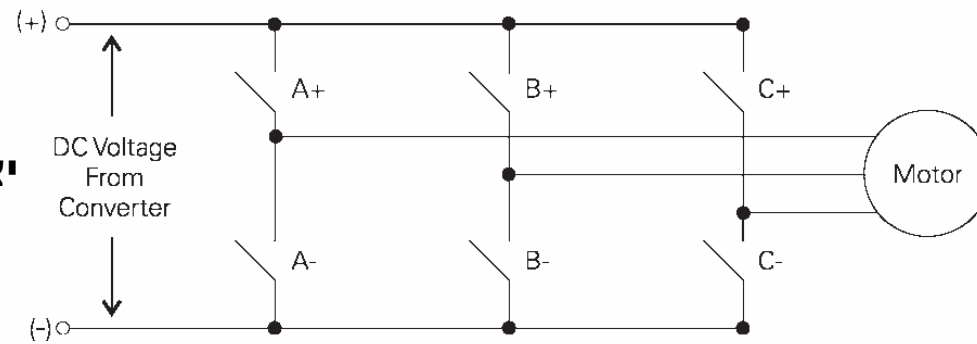
טרנזיסטור IGBT



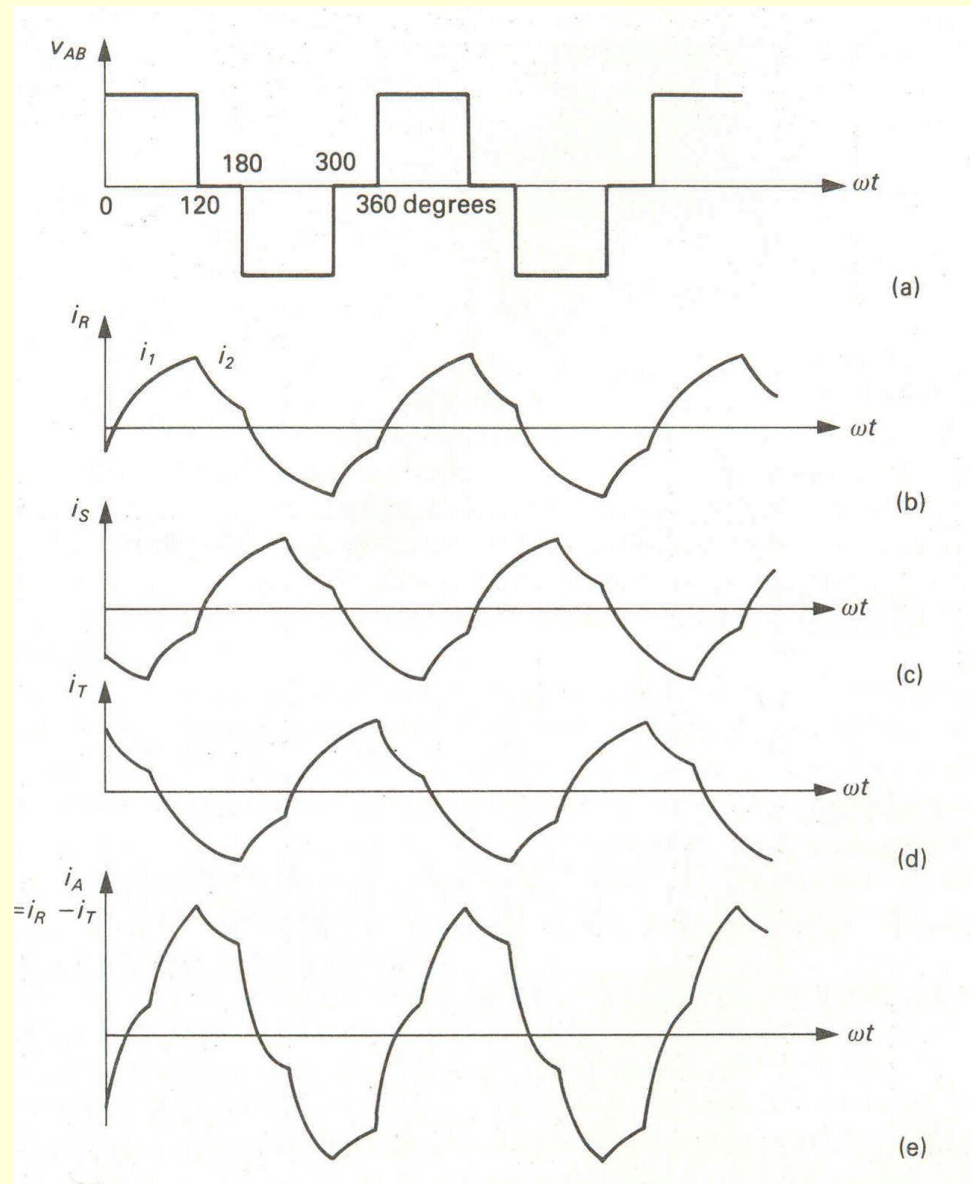
טרנזיסטור IGBT מבוסס על שער, קולקטור ואמיטר. כאשר מתח חיובי (ערך אופייני 15V מסופק לשער, הטרנזיסטור מוליך וזרם מוליך בין קולקטור לאמיטר. הרכיב מפסיק להוליך בעת הסרת המתח בשער. בעת שהרכיב לא מוליך נהוג לספק מתח שלילי של -15V כדי למנוע מהרכיב הפעלה מקרית.

עיקרון פעולת מהפך

יציאה ממישר
מבוקר



מתח מדורג וזרמים בסלילי המנוע



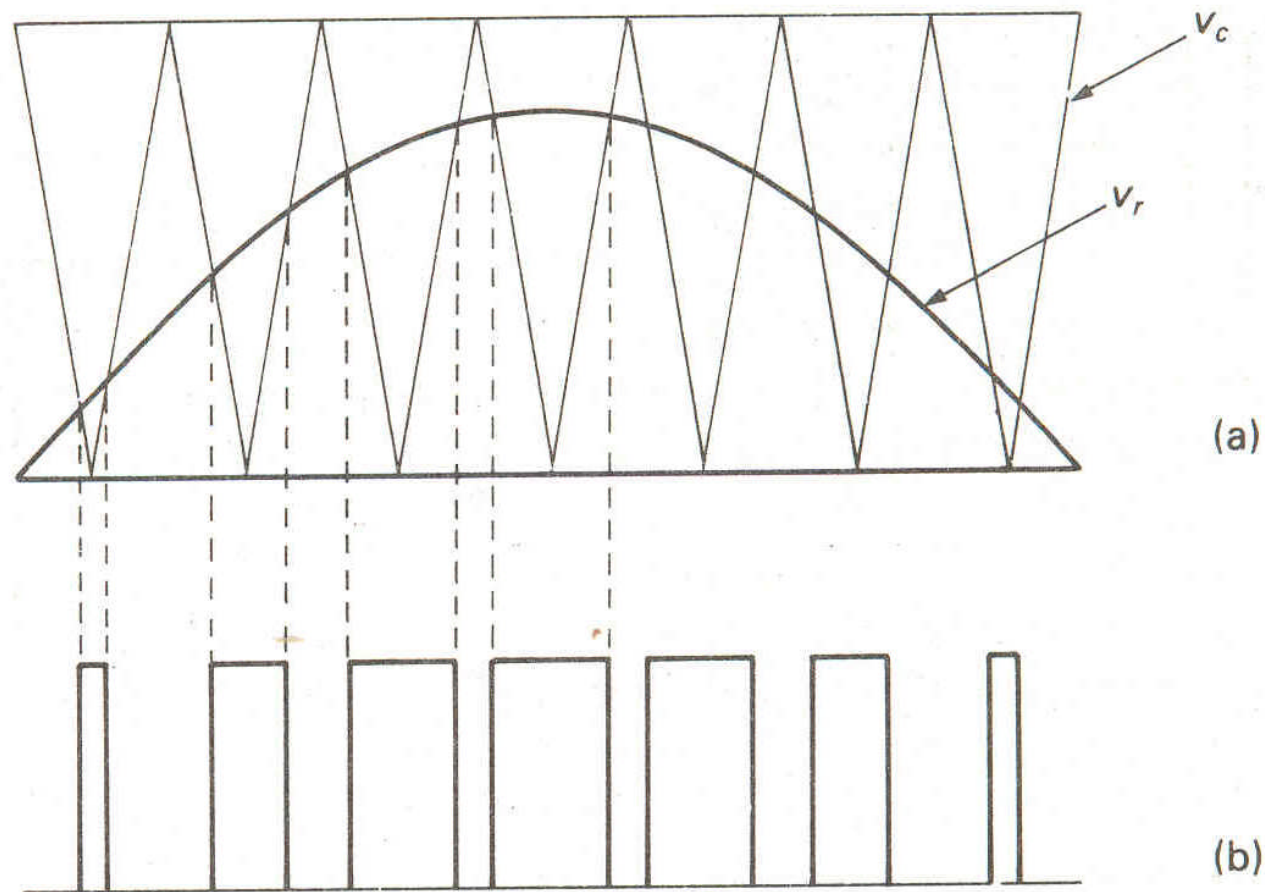
עיקרון פעולת מהפך

- בשרטוט הקודם מתואר אופן קבלת מתח חילופין תלת פאזי. המפסקים בשרטוט מדמים את טרנזיסטורי IGBT שקיימים בממיר. המתח A הנע בין ערך חיובי לשלילי נוצר ע"י סגירה ופתיחה של המתגים בסדר מסוים.
- לדוגמא במהלך שלבים 1 ו-2 A+ ו- B- סגורים. המתח במוצא הינו חיובי. בשלב 3 סגורים A+ ו- B+ ולכן מתח המוצא השלוב הוא אפס. בשלב 4 סגורים A- ו- B+ ולכן המתח הוא שלילי.

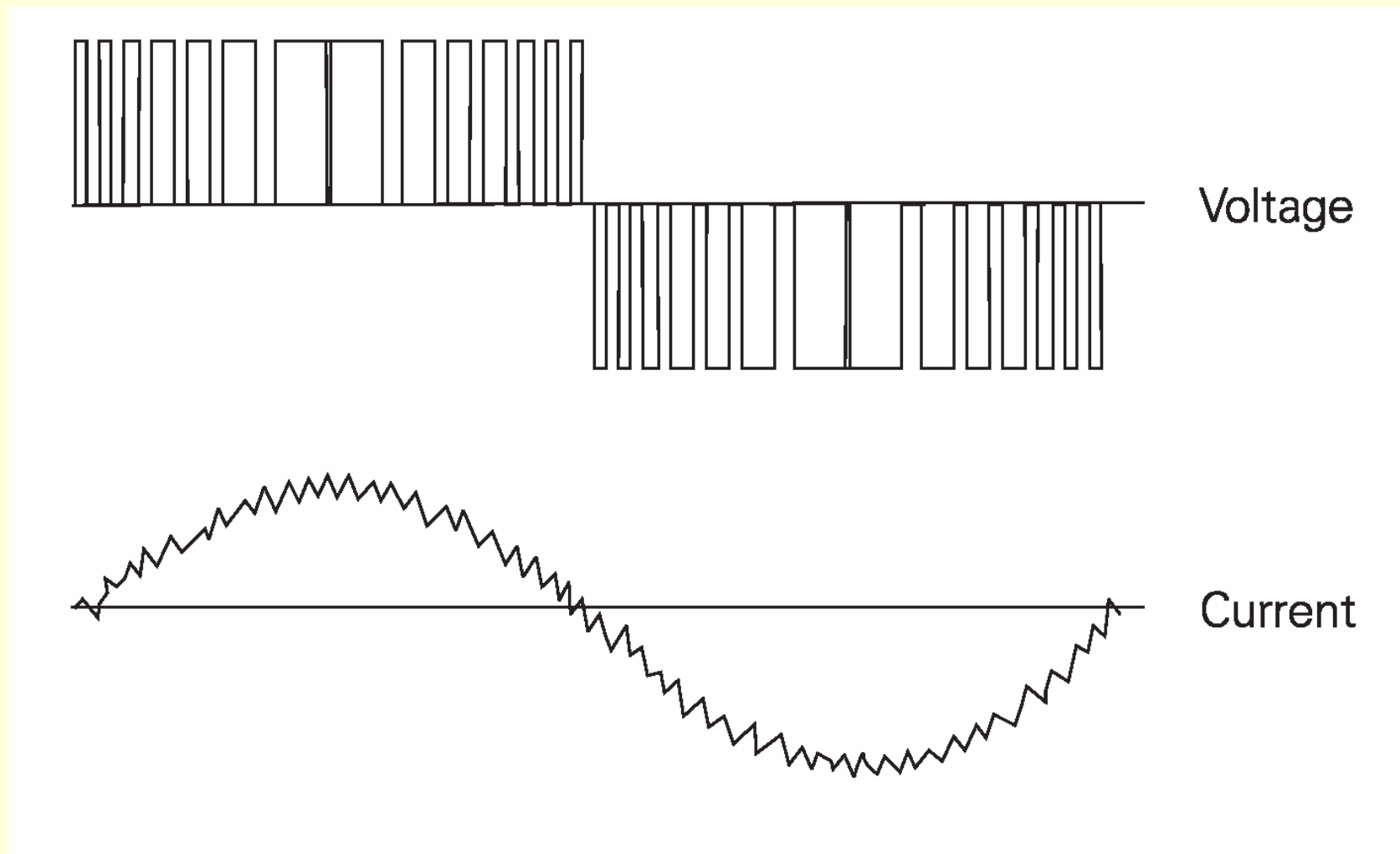
עיקרון אפנון רוחב פולס

- בתהליך זה מופעל אמצעי המיתוג למשך זמנים משתנים, הולכים ומתארכים ברבע הראשון של הגל ולאחר מכן הולכים ומתקצרים. בצורה זו למרות מתח ההזנה בצורת פולסים הזרם הינו בקירוב סינוסואידלי.
- שינוי הערך היעיל של המתח מתבצע באמצעות שליטה על רוחב הדפקים. דפקים בעלי שטח רחב יותר מפיקים מתח יעיל גבוה יותר.

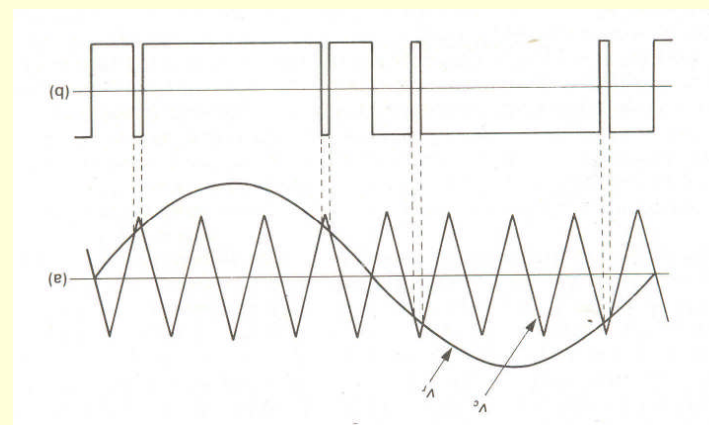
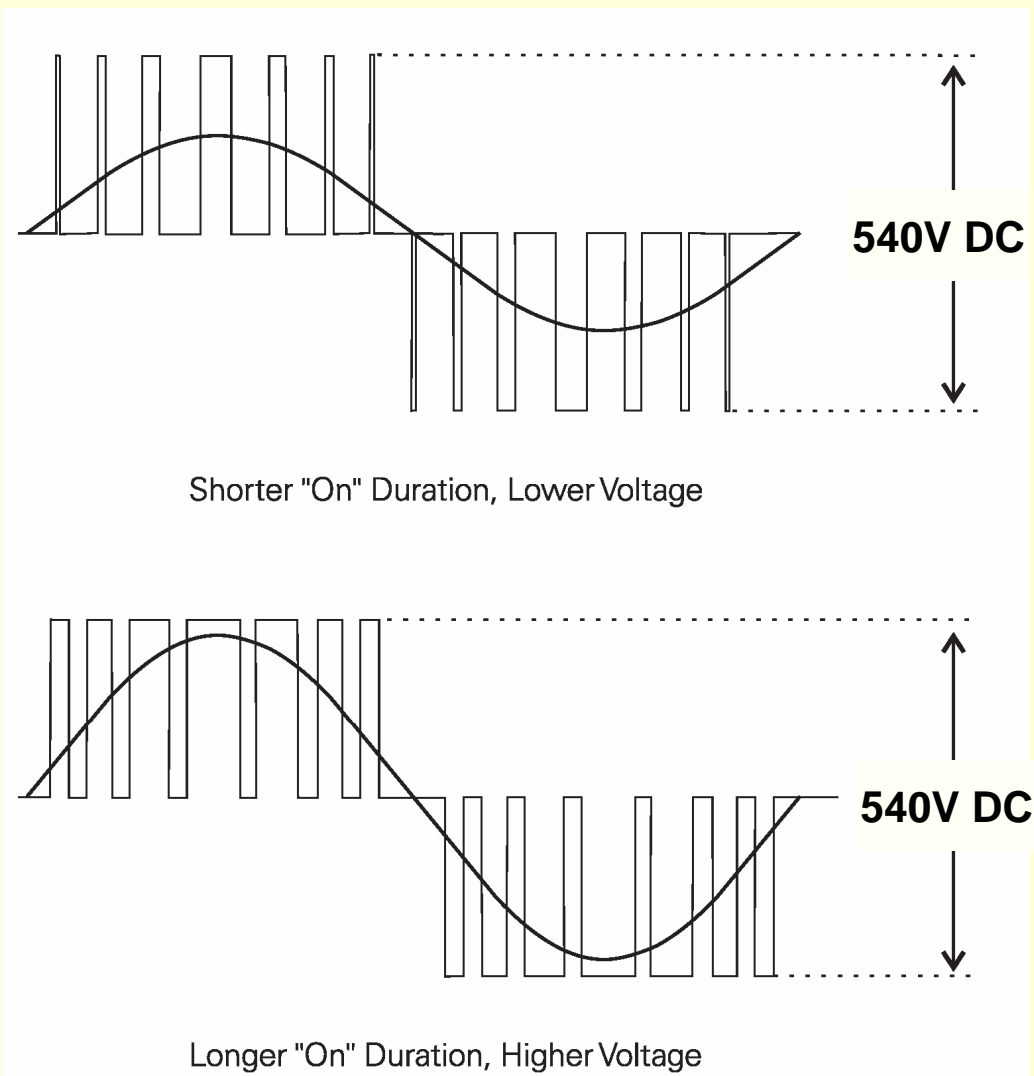
עיקרון אפנון רוחב פולס



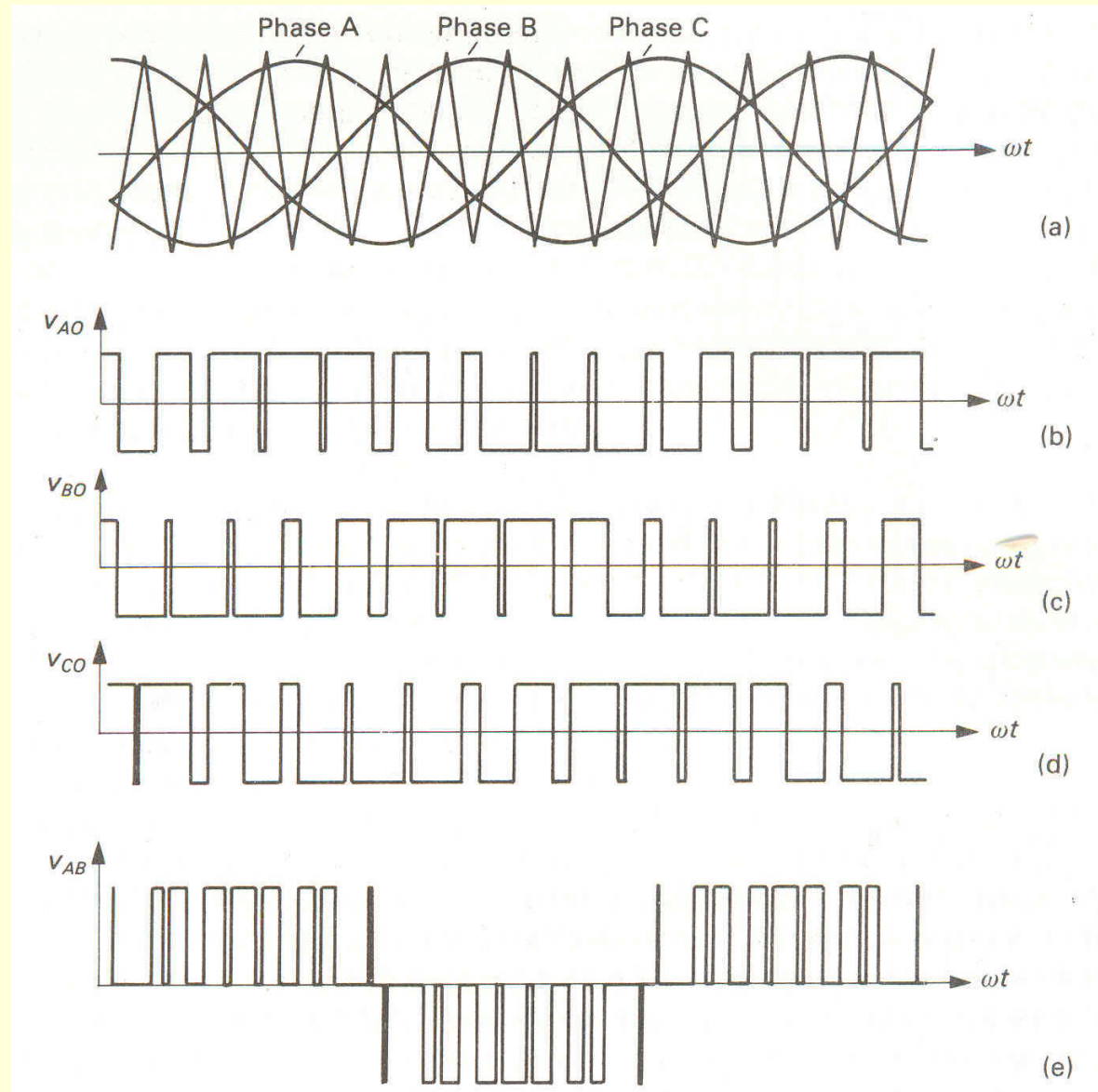
צורת המתח והזרם במוצא מהפך PWM



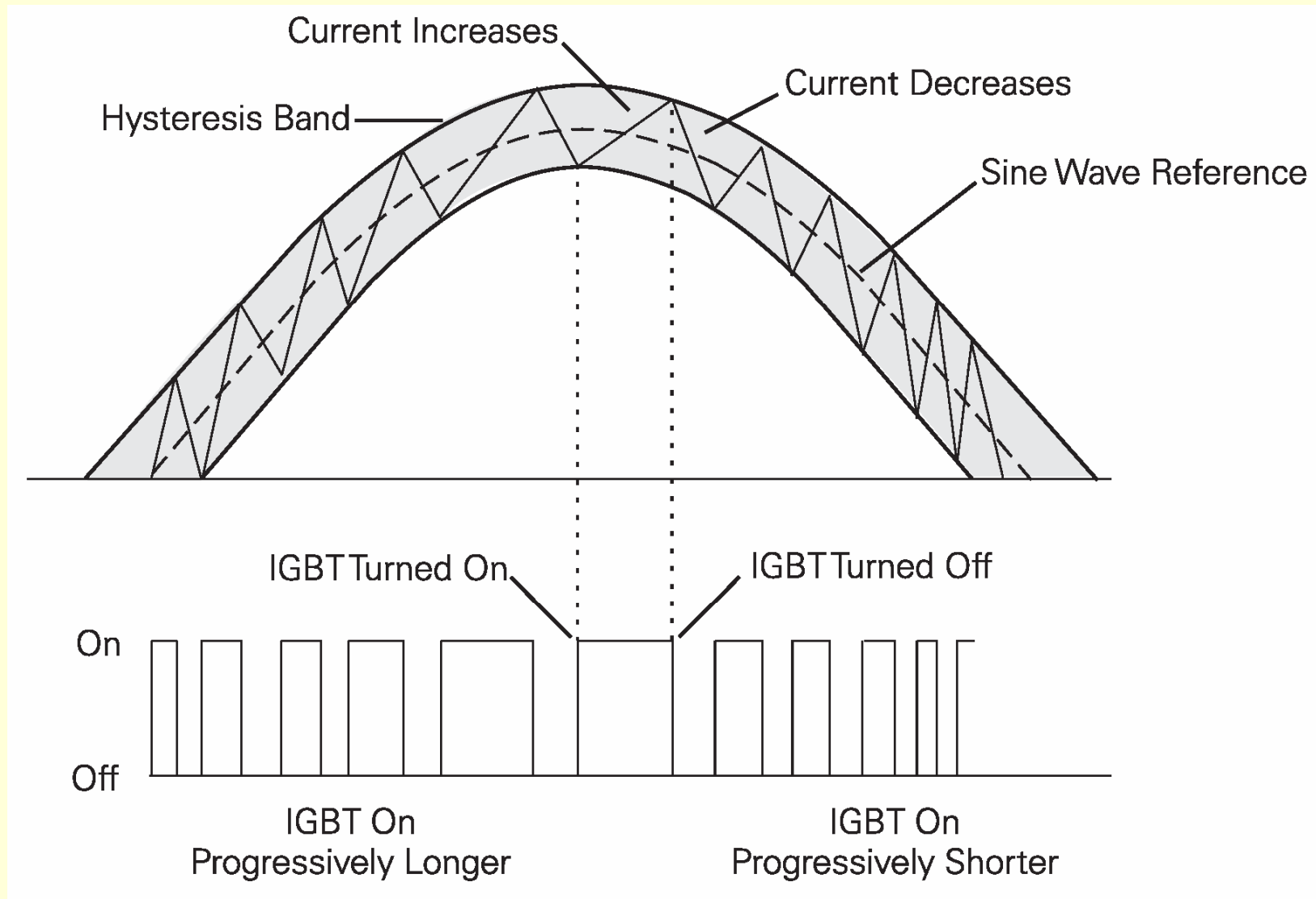
ויסות המתח בתהליך PWM



מתחים פאזיים ושלובים במהפך תלת פאזי



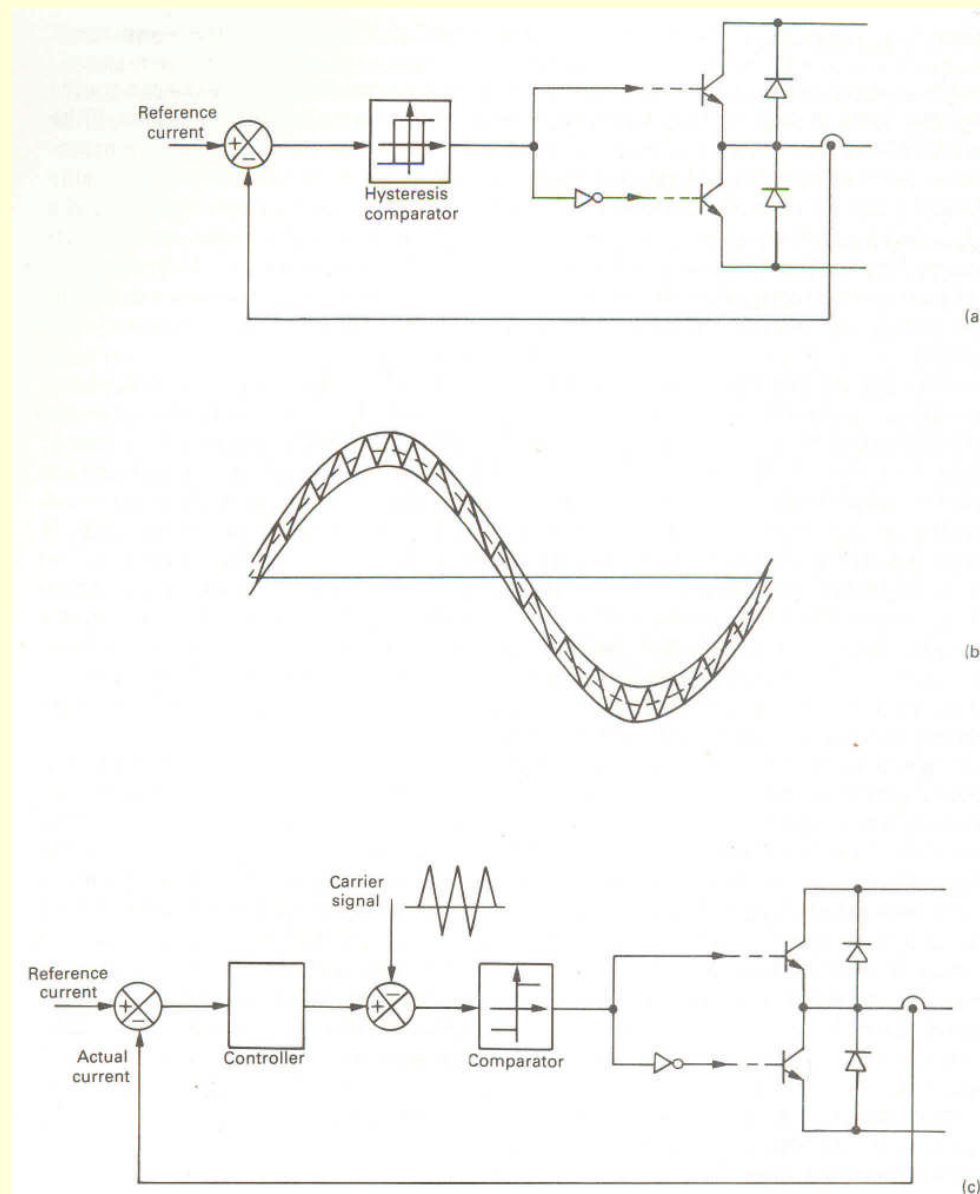
מהפך PWM מבוקר זרם

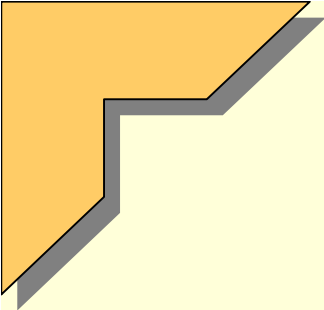


מהפך PWM מבוקר זרם

- מהפך זה מבוסס על מהפך רגיל עם מערכת בקרה לשליטה על זרם המוצא. בתהליך זה מושגת בקרה טובה יותר על מהירות הסיבוב ותגובה דינמית טובה יותר בדומה למנועי ז"י וסרוו. בנוסף מושגת רציפות וחלקות הויסות עד למהירות אפס.
- בתהליך זה קיים גל זרם יחוס סינוסואידלי המזין משווה. יחד עם משוב מזרם המנוע. הגישה הבסיסית ביותר מנצלת את שגיאת המשווה להפעלת הרכיבים בגשר להגבלת השגיאה.

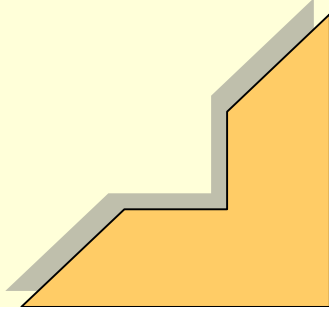
מהפך PWM מבוקר זרם





חיסכון באנרגיה בעזרת בקרי מהירות

סגל אריאל



מבוא

הרבה ממנועי זרם חילופין פועלים במהירות מירבית גם בעת שהעומס עליהם קטן מהנקוב. שימוש בבקרי מהירות הינו השיטה היעילה ביותר לחיסכון באנרגיה מבוזבזת.

איך זה פועל?

במנוע השראה נוצר בסטטור שדה מגנטי מסתובב בהתאם למספר זוגות הקטבים המגנטיים. בעקבות שדה זה נוצר ברוטור כא"מ מושרה שיוצר ברוטור זרם ושדה מגנטי משלו. פעולת הגומלין בין השדות גורמת לסיבוב הרוטור. שינוי מהירות סיבוב המנוע אפשרית ע"י שינוי מספר זוגות הקטבים המגנטיים או שינוי תדר מתח ההזנה.

$$n_s = \frac{60 * f}{P}$$

מבוא - המשך

בקר מהירות משנה את תדר ומתח ההזנה למנוע תוך שמירה על יחס קבוע ביניהם עד למתח נקוב. כמעט כל בקרי המהירות המיוצרים כיום משתמשים בשיטת אפנון רוחב פולס Pulse Width modulation להזנת המנוע. בשיטה זו מופקים ביציאת הבקר פולסי מתח בעלי רוחב משתנה.

הפעלת מנוע במהירותו המירבית בעוד היציאה מוצרת בעזרת שסתום דומה לנהיגה במכונית כשרגל אחת לוחצת על דוושת התאוצה והשניה על הבלם. במצב זה חלק מהתפוקה הולך מיידית לבזבז. ממחקרים עולה כי וסת מהירות יכול לחסוך עד 60% מהאנרגיה הדרושה לפעולת המנוע. זאת אם נשכיל להפעיל את המנוע במהירות ובמומנט הנדרשים בדומה לויסות מהירות מכונית בעת נהיגה.

דוגמאות לחיסכון

בקרת זרימה

רוב יישומי בקרת המהירות הינו לתחום בקרת משאבות צנטריפוגליות ומפוחי אויר. פוטנציאל החיסכון בהתקנים אלה הינו הגדול ביותר מאחר והספק המבוא התיאורטי משתנה בהתאם לנפח ומהירות של המפוח או המשאבה.

לדוגמא: מפוח הפועל בחצי מהירותו הנקובה יצרוך הספק השווה לכ-13% מהספקו המלא. ההפסדים בבקר המהירות יקטינו במקצת את החיסכון אך החיסכון בכל מקרה מרשים.

דוגמאות לחיסכון

בקרת זרימת אויר ונוזלים, מושגת בדרכים שונות הכוללות סיחרור חוזר של חלק מהזורם, היצרות, שינוי זווית להבים וויסות מהירות.

בסיחרור חלק מהזורם עובדת המשאבה או המפוח בהספק מירבי כל זמן פעולתה, רק חלק מהזורם משמש את התהליך והיתרה מוחזרת חזרה לכניסה של המשאבה או המפוח. שיטה זו הינה הפחות יעילה האפשרית לויסות הזרימה.

היצרות יציאת המשאבה או המפוח, מקטינה את הזרימה בדיוק כמו לחיצה על צינור בעת השקיית הגינה. הלחץ עולה והזרימה קטנה. כתוצאה קיים חיסכון מסויים באנרגיה ביחס לשיטת הסיחרור אך זו עדיין שיטה בזבזנית.

דוגמאות לחיסכון

שינוי זווית הלהבים אפשרית רק במפוחים או דחסנים ואינה אפשרית במשאבות. בשיטה זו קיימת יעילות גבוהה יותר אך אינה מגיעה לזו של ויסות מהירות.

תהליך ויסות מהירות של משאבה צנטריפוגלית בעזרת בקר מהירות מלווה בחיסכון ניכר באנרגיה. ההספק החשמלי הנצרך על ידי המשאבה הינו יחסי למומנט M ולמהירות הסיבוב n .

$$P_{in} = K * M * n$$

התלות בין המומנט למהירות (כאשר הספיקה היא ביחס ישר למהירות) היא בקירוב ריבועית:

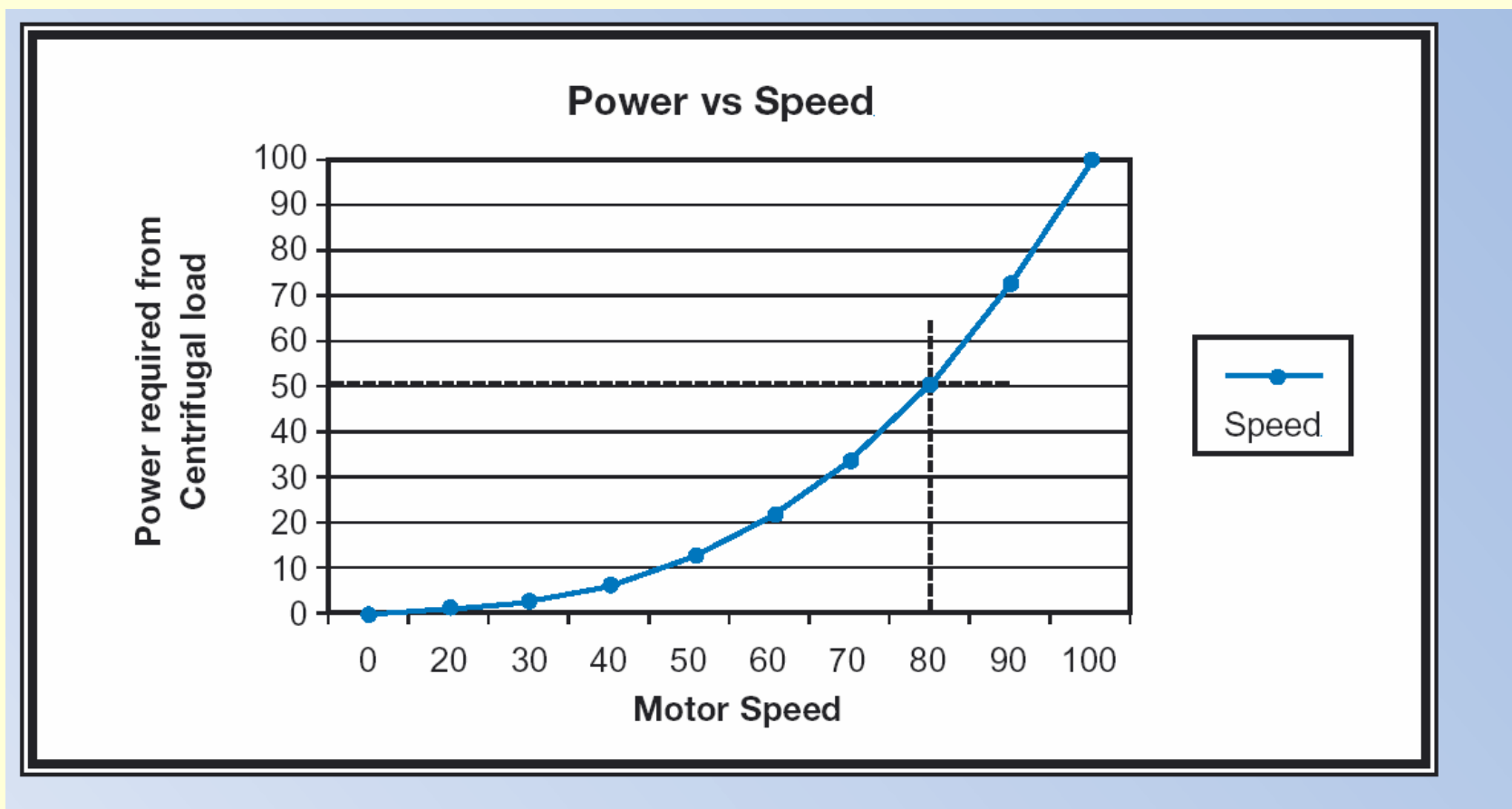
$$M = n^2$$

מכאן מתקבל שההספק הנצרך תלוי במהירות בחזקה שלישית.

$$P_{in} \approx n^3$$

מכאן נובע כי הקטנת המהירות מקטינה באופן ניכר את ההספק.

השתנות צריכת ההספק כתלות במהירות הסיבוב במנוע השראה

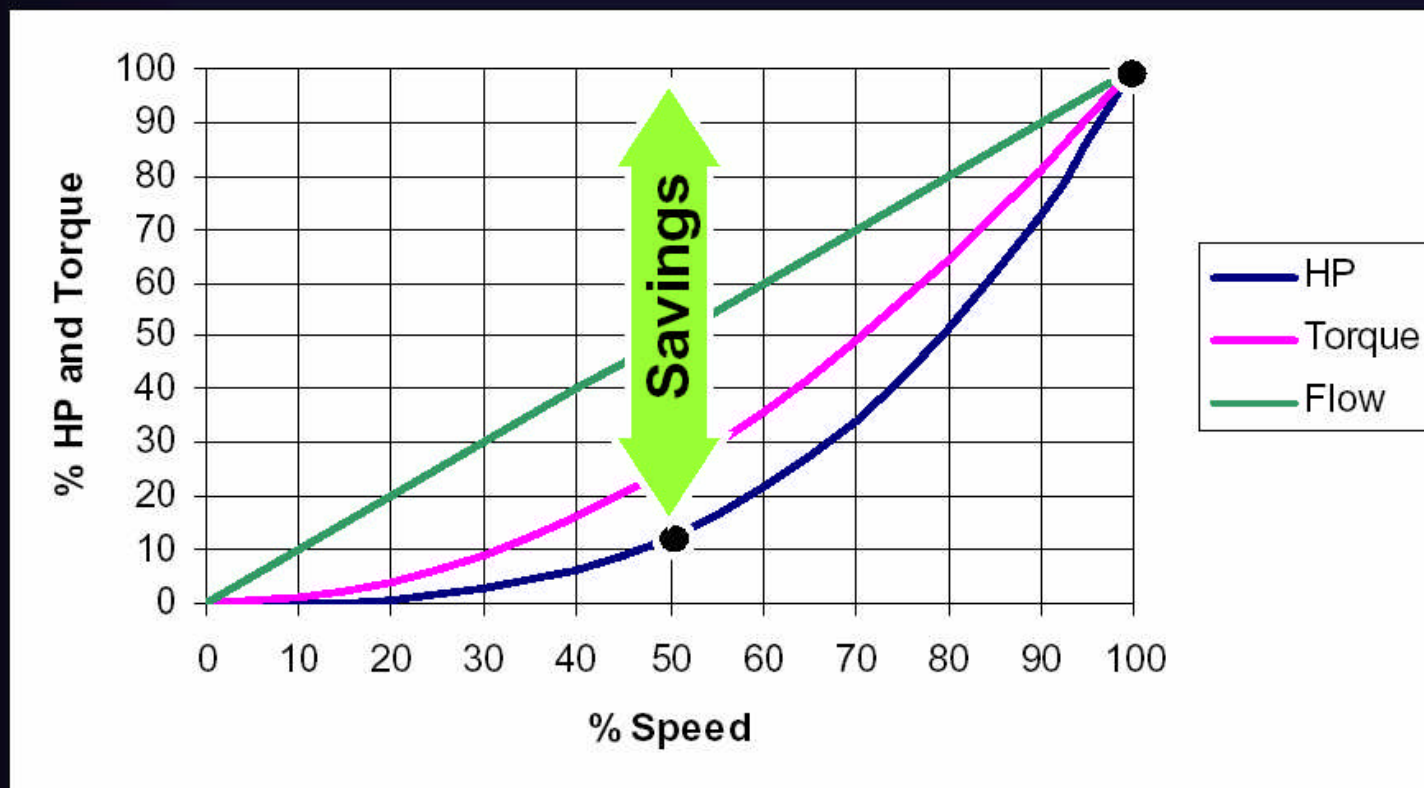


דוגמאות לחיסכון

- כזכור ההספק הנדרש להפעלת משאבה או מפוח הינו יחסי למהירות בחזקת שלוש.
- המשמעות הינה כ שב-100% זרימה נצרך הספק מירבי, ב-75% זרימה נצרך 42% מההספק בעומס מלא $(0.75)^3 = 0.422$ וב 50% זרימה נצרך הספק השווה ל- 12.5% מההספק בעומס מלא. $(0.5)^3 = 0.125$

מידת החיסכון בהספק ב-50% עומס

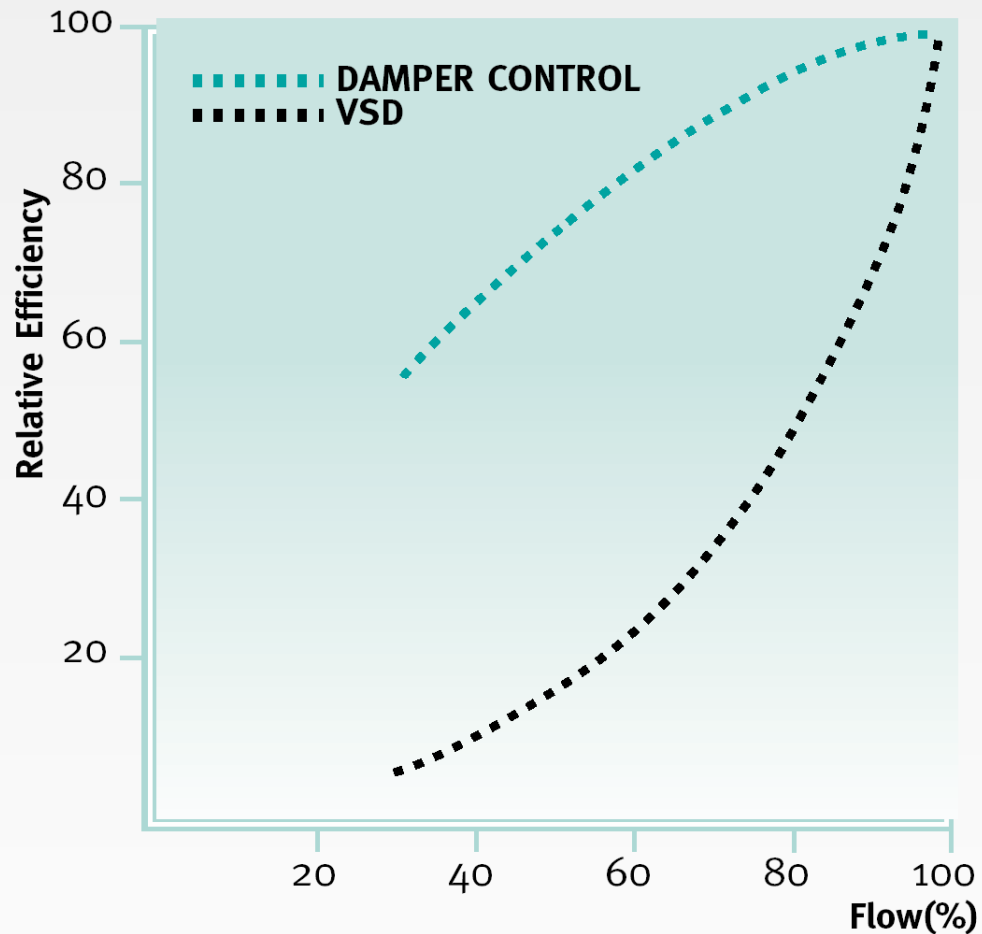
Variable Torque Load Characteristics



At 50% Speed (Flow) the Power consumption is 12.5% of rated

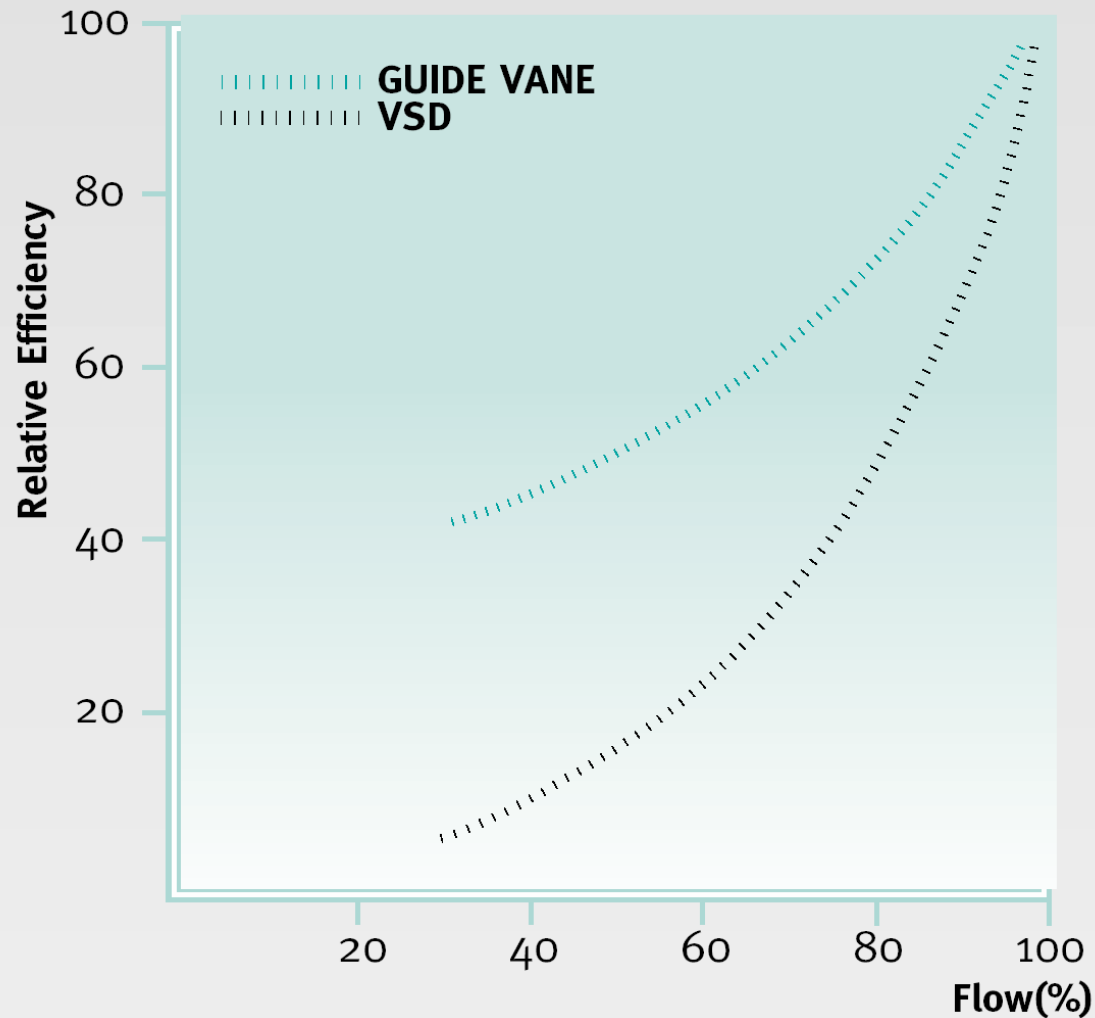
נצילות המתקן ב-2 משטרי עבודה ויסות באמצעות מגוף לעומת ויסות בעזרת VSD

FIG 2. TYPICAL ENERGY SAVING VSD
COMPARED WITH DAMPER CONTROL



הפרש בנצילות כתלות בשיטות ויסות

FIG 2. ENERGY SAVING - GUIDE VANE vs. VSD CONTROL



דוגמאות לחיסכון

בקרי מהירות ניתנים ליישום גם בעומסים הדורשים מומנט קבוע. שלא כמו מפוחים ומשאבות שהספקם משתנה עם שינוי המהירות בשלישית, ביישומים הדורשים מומנט קבוע משתנה הספקם יחסית ישר למהירות. עובדה זו מקטינה את החיסכון באנרגיה למרות שהוא עדיין משמעותי. כדוגמא לעומסים בעלי מומנט קבוע ניתן לציין: מסועים, ומכונות הזרקה המופעלות בעזרת מנגנונים הידראוליים.

דוגמאות לחיסכון

• מערכות ויסות נפח אויר

במערכת הפועלת בממוצע 3000 שעות בשנה מוחזרת ההשקעה בגין קניית בקר מהירות בזכות חיסכון בחשמל תוך כשנתיים עד 5 שנים. ככל שבקר המהירות גדול יותר ההחזר יהיה קצר יותר.

• בקרת משאבות סיחרור מים חמים במבנים לצורך חימום הינה דוגמה טובה מאוד לשימוש בבקר מהירות. החיסכון הינו מירבי כשהצרכים קטנים וקטן כאשר הביקוש למים הוא גבוה.

• בקרת משאבות סיחרור מים קרים במערכות מיזוג אויר יכולה גם היא להפיק חיסכון ניכר במיוחד בתקופות מעבר. (יש לציין כי בעת שידרוג מע' קיימת יש צורך להחליף את הברזים התלת מצבים לדו מצבים).

דוגמאות לחיסכון

- מערכות הזרקת פלסטיק- בשידרוג מערכות הזרקת פלסטיק הידראוליות, יש צורך בהתאמת בקר המהירות לתהליך. החיסכון במקרה זה מתבטא בכ-33% עד כ-50%.
- מגדלי קירור- חיסכון ניכר יכול להיות מושג במערכות אלה בזכות ויסות מהירות המאווררים.

חיסכון באנרגיה שהושג במפעל פריקלס באירלנד

2 x 30 kW Sea Water Feed Pumps

	Power (kW avg.) (based on 727 hours data logged running)	Financial (IR£) annual costs at 4.2p/kWhr. 8000 hrs. p.a.
Before (Throttle valve control)	21.0kW	£7,056
After VSD control	16.2kW	£5,443
Annual savings (two pumps) % Reduction 23%		£3226

75kW Primary Air Fan

	Power (kW avg.) (based on 931 hours data logged running)	Financial (IR£) annual costs at 4.2p/kWhr. 7500 hrs. p.a.
Before (Damper vane control)	63.0kW	£19,850
After (VSD control)	36.5kW	£11,500
Annual savings % Reduction 42%		£8,350

נתוני שיפור בעלויות בגין הוספת בקר מהירות

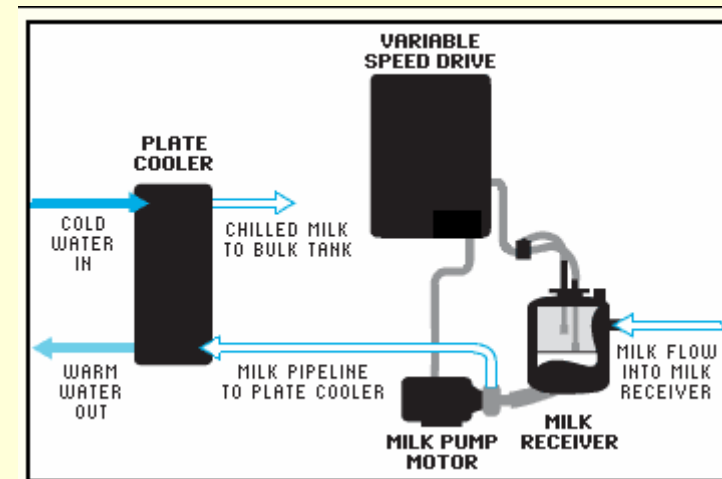
TABLE 2. SAVINGS AT PROJECT COMPLETION

Average Load Reduction - 8 AHUs:	159.0 kW
Energy Savings Per Year:	£31,200
Savings in Heat Gain:	£823
Maintenance Savings	£1,160
TOTAL:	£33,183

מחשבונים לחישוב חיסכון באנרגיה

www.wisconsinpublicservice.com/farm/calculator.asp

Calculator for Vacuum Pumps	
Horse Power of Motor (Hp)	<input type="text" value="100"/>
Cost of Electricity* (\$/kWh)	<input type="text" value="0.09262"/>
Hours of Operation per Day	<input type="text" value="12 hours"/>
Cost of Installation (\$)	<input type="text" value="10000"/>
<input type="button" value="Calculate"/>	
Annual Energy Savings	163374 kWh
Annual Cost Savings	\$15,131.70
Payback Period	0.66086 years
Return on Investment	151.317%



מחשבונים לחישוב חיסכון באנרגיה

חיסכון בהפעלת מפוחי אויר

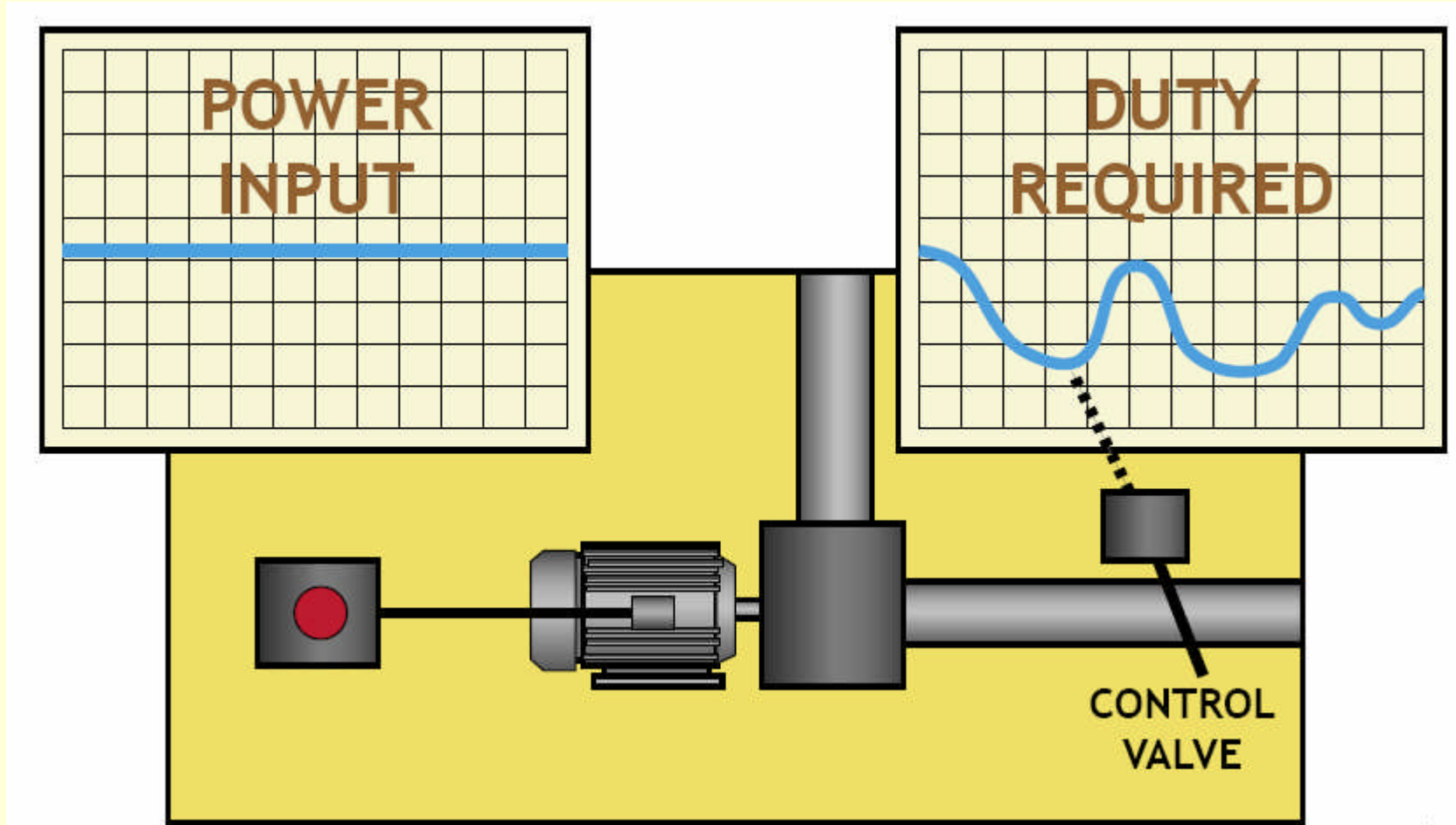
Calculator for Ventilation Systems	
Size of Fan	48" ▾
Single or Three Phase Power	Three ▾
Number of Fans	16
Thermostat Control	Yes ▾
Average Electric Rate* (\$/kWh)	0.09262
<input type="button" value="Calculate"/>	
Annual Energy Savings (kWh)	80640
Annual Cost Savings (\$)	7468.88

מחשבונים לחישוב חיסכון באנרגיה

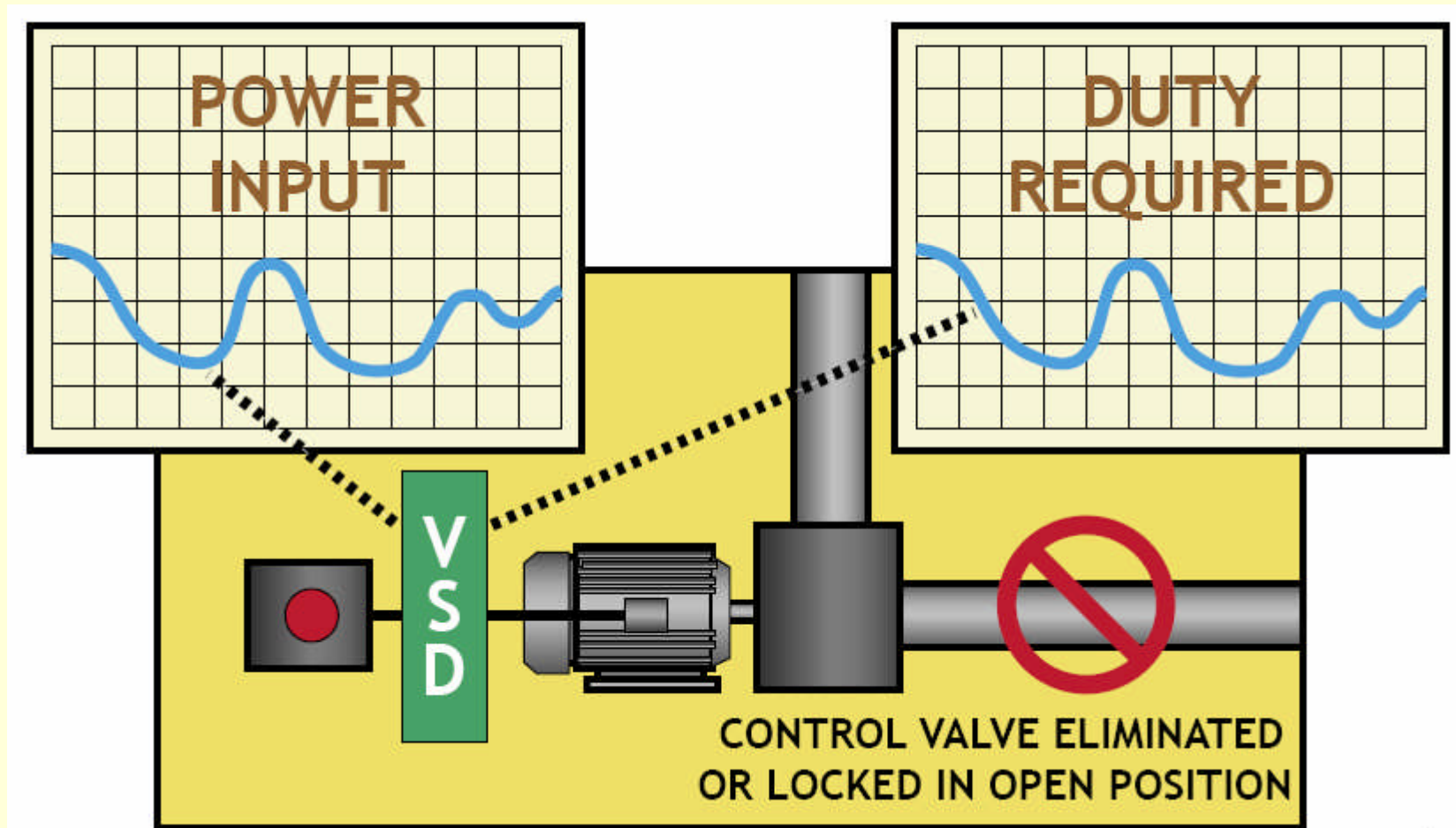
חיסכון בהפעלת מפוחי אויר

Calculator for Ventilation Systems	
Size of Fan	48" ▾
Single or Three Phase Power	Three ▾
Number of Fans	16
Thermostat Control	Yes ▾
Average Electric Rate* (\$/kWh)	0.09262
<input type="button" value="Calculate"/>	
Annual Energy Savings (kWh)	80640
Annual Cost Savings (\$)	7468.88

ויסות ללא בקר מהירות



ויסות עם בקר מהירות



מבוא להנע חשמלי

- בקר מהירות שולט על 2 פרמטרים: מהירות ומומנט.
- מומנט מציין את הכוח שציר המנוע מפעיל בעת הסיבוב. המומנט תלוי בצפיפות השטף המגנטי במכונה. הגדלת השטף מגדילה את המומנט. השטף תלוי בתדר ובמתח. הספק המנוע תלוי בכמות העבודה ליחידת זמן והוא תלוי במומנט ובמהירות.
$$P = 1.026 * M * n$$
- מחלקים את העומסים ל-3 סוגים אופייניים: בעלי הספק קבוע, בעלי מומנט קבוע ובעלי מומנט משתנה.

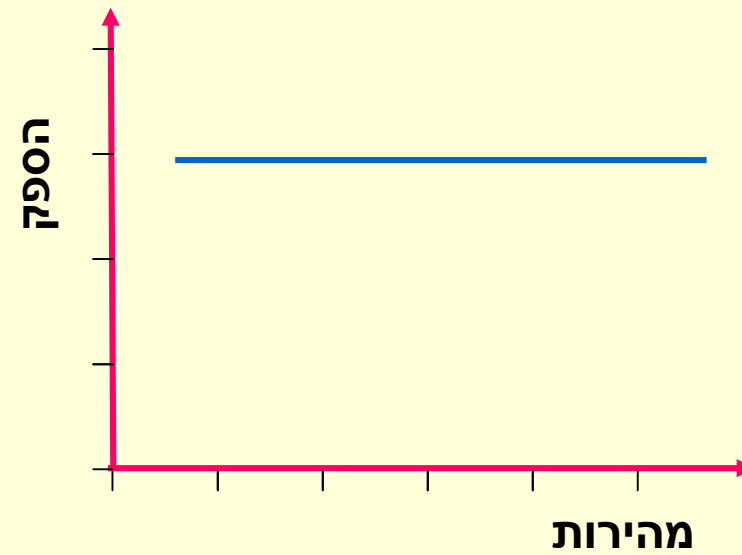
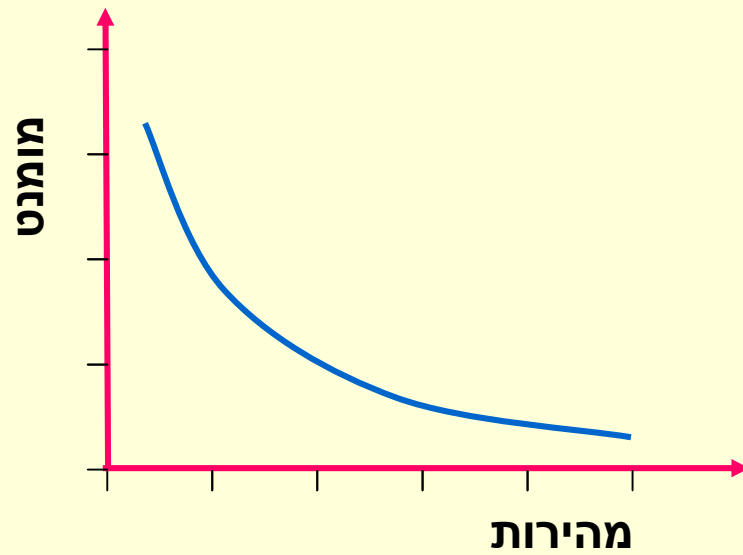
מבוא להנע חשמלי

עומס מסוג הספק קבוע:

- בעומסים אלה כמות העבודה המבוצעת, אינה תלויה במהירות ובמומנט. עומסים אלה מצטיינים בדרך כלל בשמירה על מתיחות קבועה, דוגמא לעומס כזה הינה סלילה על גלילים בתעשיית הנייר, החוטטים, הסיבים וכד'. בתהליכים אלה שכבות נוספות מצטברות על הגליל, קוטר הגליל עולה, מהירות הסיבוב של הגליל יורדת תוך שמירה על מתיחות קבועה (אחרת החומר יקרע, ישקע או ימתח יתר על המידה). העבודה במקרה זה חייבת להשאר קבועה היות וקצב היצור קבוע.
- עומסים נוספים המצטיינים בהספק קבוע הם: מקדחות, מטחנות, מכונות תפירה, מכונות גזירה, מנסרות ועוד.

מבוא להנע חשמלי

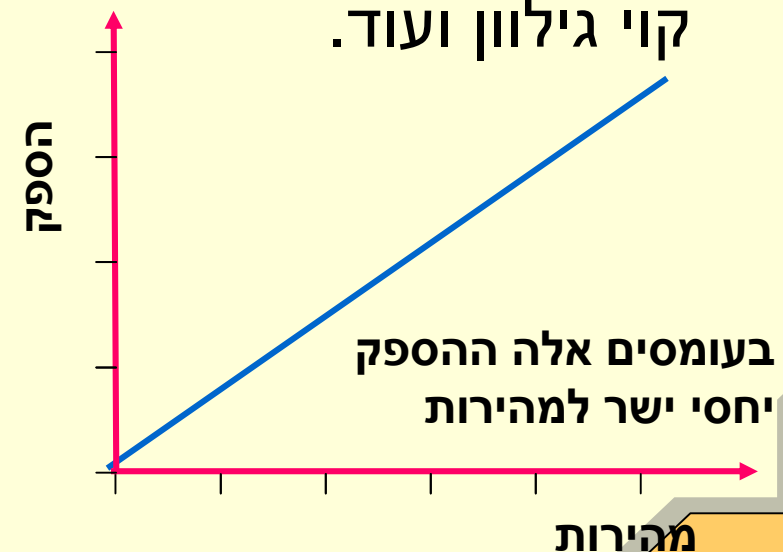
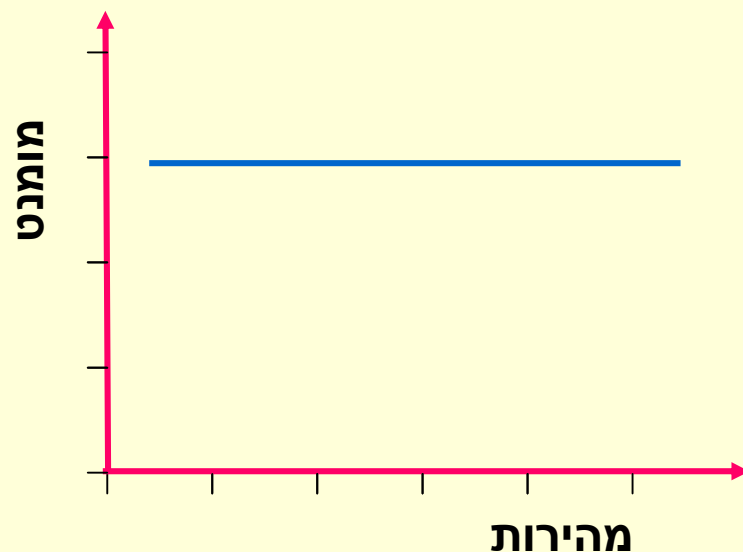
עומס מסוג הספק קבוע:



מבוא להנע חשמלי

עומס מסוג מומנט קבוע:

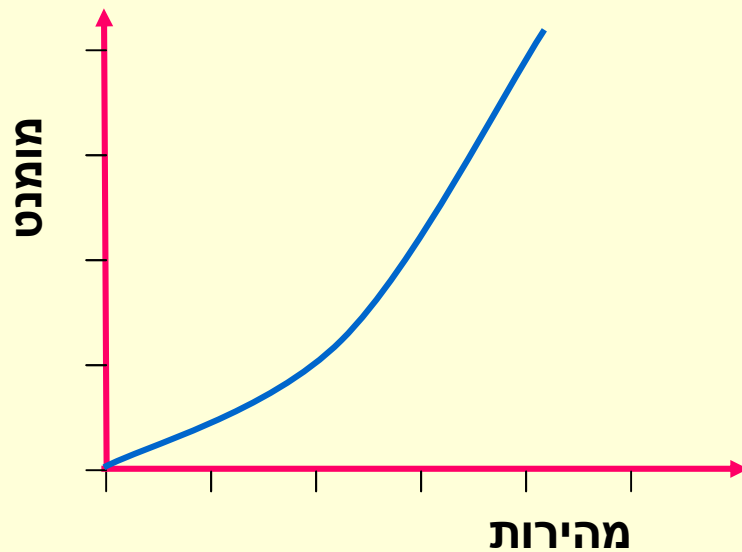
- עומסים אלה הם הנפוצים ביותר בתעשייה. בעומסים אלה ההספק הנדרש מהמנוע אינו תלוי במהירות. דוגמא לסוג כזה של עומס הינה הנעת מסוע: בלי קשר למהירות התנועה הנדרשת או העומס הנדרש, המסוע חייב ליצר כח זהה כדי שינוע חלק ללא טילטול העומס.
- ישומים נוספים הדורשים מומנט קבוע הם: מנופים, מעליות, קוי גיליון ועוד.



מבוא להנע חשמלי

עומס מסוג מומנט משתנה:

- בעומסים אלה עולה ההספק והמומנט עם עלית המהירות. דוגמא בולטת לסוג זה של עומס הינה אווררים. בסוג זה של צרכנים ככל שהמהירות עולה, עולה גם התנגדות האויר וגם הכוח הצנטריפוגלי. גם משאבות הם דוגמא טובה לסוג זה של עומס.



שילוב בקר מהירות בעומסים אלה הינו המשתלם ביותר.