

המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר

אלקטרוניקה של מערכות הספק חלק א'

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים
2011

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

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

כתובת אינטרנט: <http://s.ort.org.il>

אורט ישראל- חברה לתועלת הציבור חל"צ / 174

תוכן עניינים:

פרק 1 - מבוא

עמ' 3

פרק 2 - ממירים AC to DC:

עמ' 4-15	2.1.0- מישרים חד מופעיים
עמ' 16	2.4.0- מתח פריצה אחורי PIV
עמ' 17-20	2.5.0- מישרים מעשיים
עמ' 21-27	2.6.0- מישרים תלת מופעיים

פרק 3 - תריסטורים בבקרת הספק

עמ' 28	3.1.0- מבוא לתריסטורים
עמ' 28-42	3.1.1- רכיב ה- SCR
עמ' 43-47	3.2.1- רכיב ה- Triac
עמ' 48-58	3.3.1- רכיב ה- Diac
עמ' 59-62	3.4.0- מיתוג בנקודת האפס Z.V.S
עמ' 63-65	3.5.0- מתגים אלקטרוניים נוספים
עמ' 66-67	3.6.0- תריסטורים מיוחדים

תודתי נתונה למר יאשי יוסי בעזרתו באיסוף החומר.

פרק 1-מבוא

בראשית דברים

כאשר נחבר מנורה לרשת החשמל הארצית היא תידלק בעוצמה מלאה. זו אומנם בקרת הספק אך לא בצורה יעילה. ז"א בכל מצב של עוצמת המנורה זורם זרם דרך הפוטנציומטר והספק המתפתח על הפוטנציומטר מהווה בזבוז הספק, וכאשר מדובר על זרמים גבוהים התוצאה בזבוז הספק גדול.

אלקטרוניקה של מערכות הספק זהו תחום אשר דואג לבצע בקרת הספק רציפה במעגלי הספק עם מינימום בזבזי הספק.

בכל מעגל בתחום באלקטרוניקה של מערכות הספק קיימים תמיד 2 ערוצים:

א. ערוץ ההספק- זהו הערוץ המכיל את מקור האנרגיה, רכיבי ההספק השונים והעומס כמובן.

ב. ערוץ הבקרה- זהו אותו ערוץ המכיל את אותם הרכבים הדואגים לשלוט על רכיבי ההספק.

רכיבי ההספק יכולים להיות מסוגים שונים: ממסר, טרנזיסטורי הספק למינם, תריסטורים. מבחינה מעשית על אותם רכיבי הספק המבצעים את בקרת ההספק יש בזבזי הספק קטנים מאוד ומבחינה אידיאלית בזבזי הספק אלו זניחים.

פרק 2- ממירים AC to DC

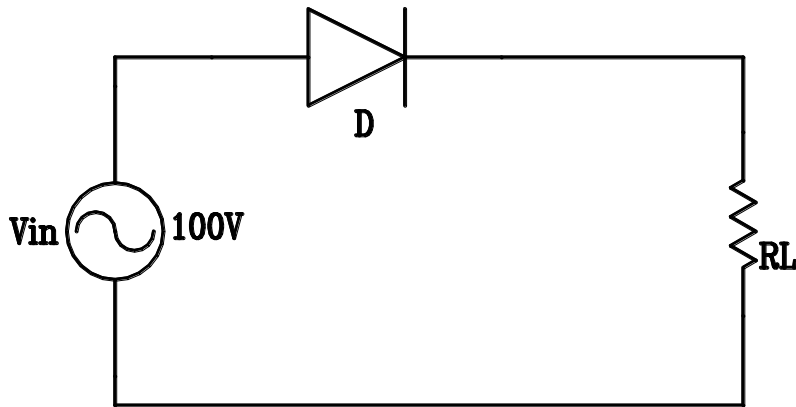
2.1.0- מישרים חד מופעיים

2.1.1- מבוא

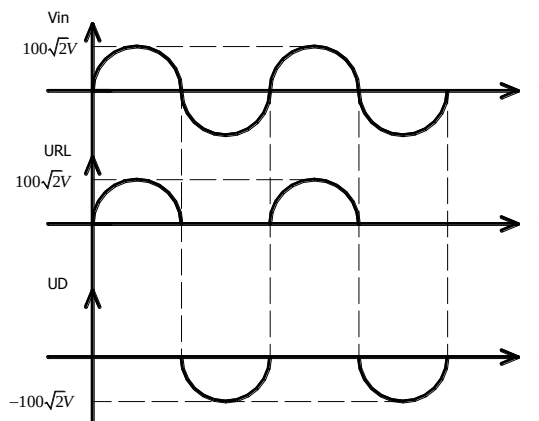
כאשר קיים צרכן הפועל במתח ישר חיבורו לרשת מחייב שימוש בממיר שתפקידו להמיר את מתח הרשת מ-AC ל-DC. פעולה זו נקראת "ישור".
ברשת חד מופעית קיימים 2 סוגים עיקריים של מישרים:
א. מישר חד דרכי.
ב. מישר דו דרכי.

2.2.1- מישר חד דרכי חד פאזי

מישר זה נחשב למישר הפשוט ביותר שקיים ולכן הוא בעל חסרונות רבים.
מישר זה מכיל סה"כ דיודת ישור והוא נראה באיור הבא:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע גל חצי פועם ולכן ניתן לחשב עליו גם ערכים ממוצעים (av) וגם ערכים יעילים (rms).

$$U(av) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{U(max)}{\pi}$$

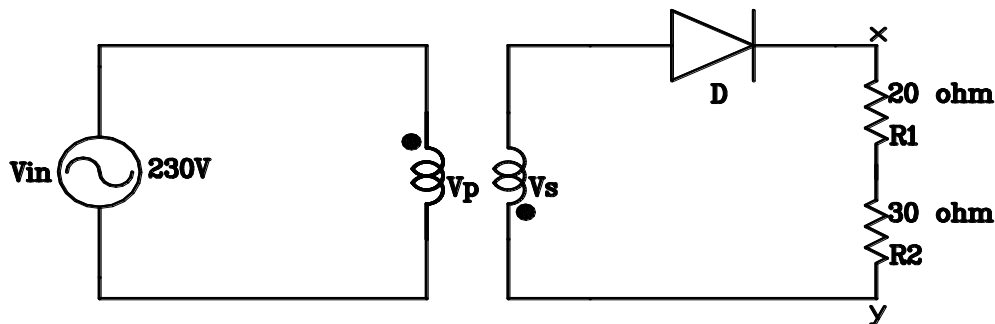
$$U(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = \frac{U(max)}{2}$$

זרמים נחשב לפי חוק אום בהתאמה.

הספקים בנגדים טהורים נחשב לפי חוק אום באמצעות ערכים יעילים בלבד.

תרגיל דוגמא

נתון המעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי השנאי הוא בעל יחס תמסורת של 2.

א. שרטט באופן איכותי את האותות הבאים:
 $V_{in}, V_p, V_s, U_{xy}, U_{R1}, U_{R2}, U_D$

ב. חשב את ההספק המתפתח בנגד R_2 .

ג. חשב את הזרם הממוצע דרך נגד R_1 .

פתרון תרגיל דוגמא

הערות:

1. קיימים שנאים אשר יכולים לעלות, להוריד או לשמור מתח. וזה נקבע לפי יחס הליפופים של השנאי.

$$2. \text{ לכל שנאי קיים מקדם השנאה (K). } K = \frac{N1}{N2} = \frac{U1}{U2} = \frac{I2}{I1}$$

כאשר $K=1$ - $U1=U2$ - השנאי שומר מתח.

כאשר $K>1$ - $U1>U2$ - השנאי מוריד מתח.

כאשר $K<1$ - $U1<U2$ - השנאי מעלה מתח.

3. בשנאים גם ניתן לקבוע האם השנאי שומר מופע או הופך מופע. על פעולה זו אחראי האופן בו ליפופו את הסלילים.

בשרטוטים חשמליים סימון הנקודה על יד הסליל קובע:

- אם 2 הנקודות באותו מיקום-השנאי שומר מופע

- אם 2 הנקודות במיקום שונה-השנאי הופך מופע.

בתרגיל זה השנאי הופך מופע כאשר מתח המוצא של השנאי קטן פי 2 ממתח המבוא של השנאי.

חישובי מתח מקסימאליים:

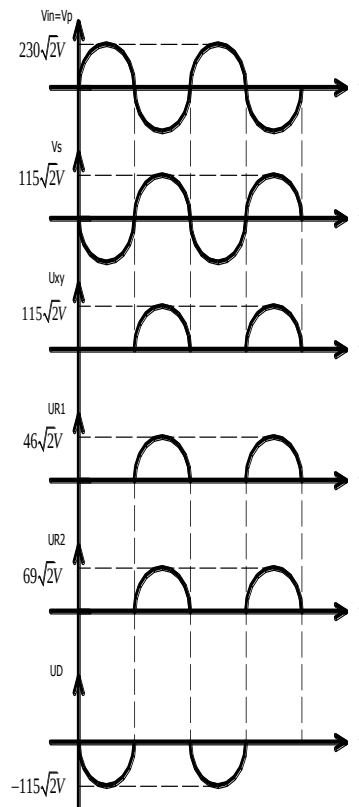
$$Vs(\max) = \frac{Vp(\max)}{K} = \frac{230\sqrt{2}}{2} = 115\sqrt{2}V$$

$$Uxy(\max) = Vs(\max) = 115\sqrt{2}V$$

$$UR1(\max) = \frac{Uxy(\max) \cdot R1}{R1 + R2} = \frac{115\sqrt{2} \cdot 20}{20 + 30} = 46\sqrt{2}V$$

$$UR2(\max) = \frac{Uxy(\max) \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{115\sqrt{2} \cdot 30}{20 + 30} = 69\sqrt{2}V$$

א. צורות גלים



ב. חשבו הספק המתפתח על נגד R2

$$PR2 = \frac{UR2(rms)^2}{R2}$$

$$UR2(rms) = \frac{UR2(max)}{2} = \frac{69\sqrt{2}}{2} = 48.79V$$

$$PR2 = \frac{48.79^2}{30} = 79.35W$$

ג. חישוב זרם ממוצע דרך נגד R1

$$IR1(av) = \frac{UR1(av)}{R1}$$

$$UR1(av) = \frac{UR1(max)}{\pi} = \frac{46\sqrt{2}}{\pi} = 20.7V$$

$$IR1(av) = \frac{20.7}{20} = 1.035A$$

2.3.0- מישר דו דרכי חד פאזי

כאשר נדרשת פעולת ישור כמעט ולא משתמשים במישר חד דרכי כיוון שחצי מהאנרגיה לא מנוצלת.

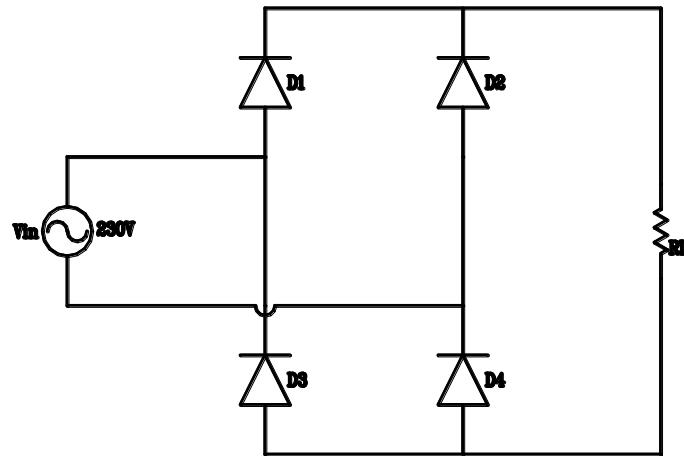
לשם כך קיים המישר הדו דרכי שבאמצעותו ניתן לבצע פעולת ישור על כל האנרגיה.

קיימים 2 סוגים של מישרים דו דרכי:

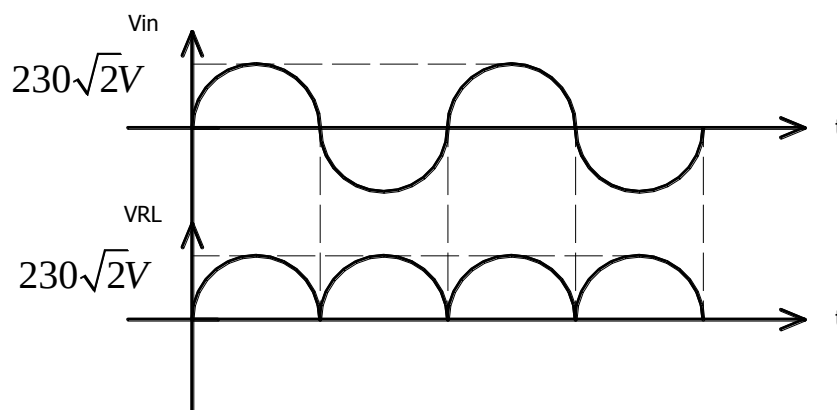
- א. מישר דו דרכי באמצעות המודל של גשר דיודות.
- ב. מישר דו דרכי באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי.

2.3.1- מישר דו דרכי באמצעות המודל של גשר דיודות

מישר זה בנוי מ-4 דיודות כמתואר באיור הבא:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר הנקרא גל פועם.
ניתן לחשב עבור גל זה גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל:

$$U(av) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{2 * U(max)}{\pi}$$

$$U(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = \frac{U(max)}{\sqrt{2}}$$

זרמים נחשב לפי חוק אום בהתאמה.

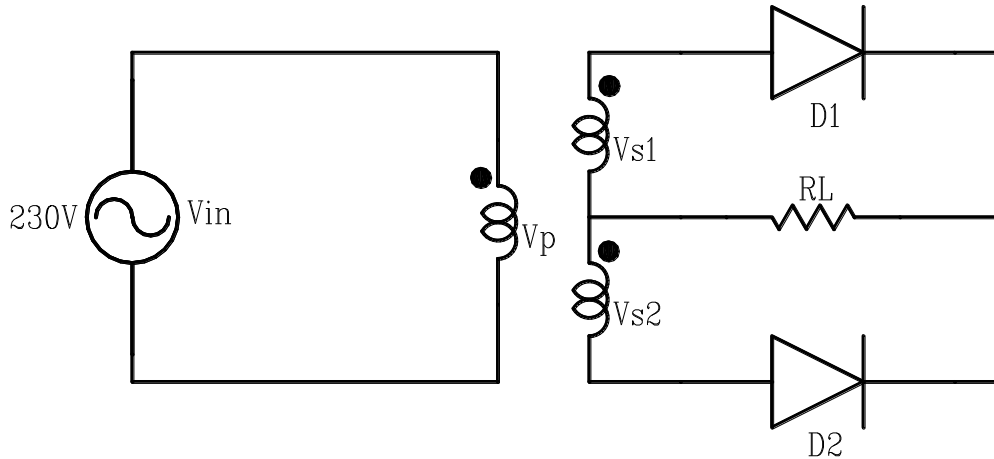
הספקים בנגדים טהורים נחשב לפי חוק אום באמצעות ערכים יעילים בלבד.

לסיכום שימוש בנוסחאות בתאם לצורת הגל:

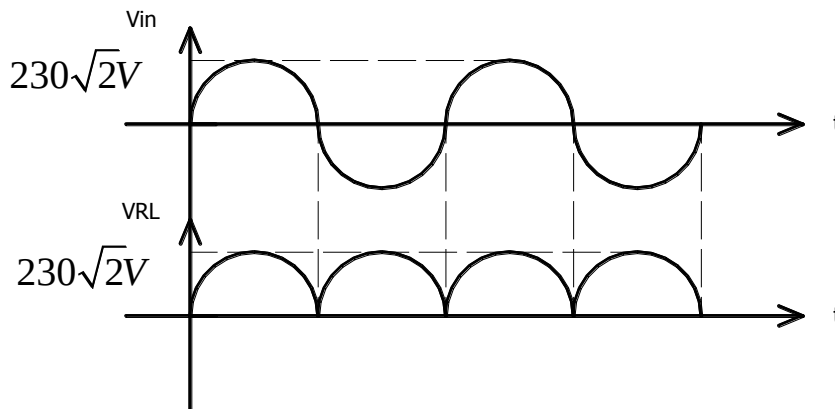
גל סינוס	גל חצי פועם	גל פועם	
0	$\frac{U(max)}{\pi}$	$\frac{2 * U(max)}{\pi}$	ערך ממוצע
$\frac{U(max)}{\sqrt{2}}$	$\frac{U(max)}{2}$	$\frac{U(max)}{\sqrt{2}}$	ערך יעיל

2.3.2- מישר דו דרכי באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי

ניתן לבצע פעולת ישור דו דרכי לאות סינוס גם באמצעות שנאי בעל סנף אמצעי מעגל זה מכיל 2 דיודות והיתרון שלו שניתן בעזרת השנאי לשמור להוריד או לעלות את המתח בכניסה למישר ביחס למקור.
מישר זה כמתואר באיור הבא כאשר לדוגמא $K=1/2$:



צורת הגלים כמתואר באיור הבא :



הערות:

1. יחס ההשנאה בשנאי בעל סנף אמצעי יכול להופיע ב- 2 צורות:

א. לדוגמא- $\frac{V_P}{V_S} = 2$ המשמעות היא שמתח שמופיע על כל הסליל V_S

קטן פי 2 מהמתח המופיע על V_P . ולכן $V_{S1} = V_{S2} = \frac{1}{2} V_S$

ב. לדוגמא- $\frac{V_P}{V_{S1}} = \frac{V_P}{V_{S2}} = 3$ המשמעות היא שהמתח על כל סליל

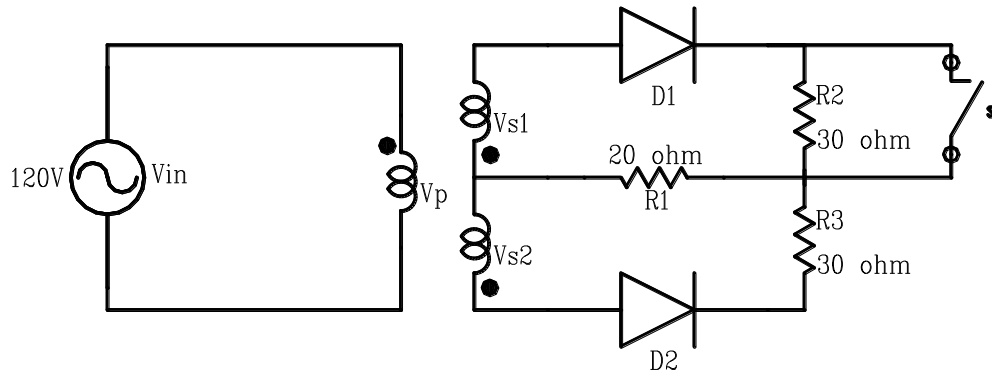
בנפרד של V_S קטן פי 3 מאשר המתח המופיע על V_P .

2. על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר-גל פועם ולכן הנוסחאות הן אותן נוסחאות בדיוק כמו מישר גשר דיודות.

3. במידה וכיוון ליפוף הסלילים של V_S היה מנוגד המתח על נגד העומס היה מתאפס.

תרגיל דוגמא

נתון מישר הבנוי משנאי בעל סנף אמצעי כמתואר באיור הבא:



נתון כי יחס התמסורת של השנאי: $K = \frac{1}{3}$

- א. שרטט באופן איכותי את צורת האותות הבאים:
 $V_p, V_{s1}, V_{s2}, V_{R1}, V_{R2}, V_{R3}, I_{D1}$
- ב. חשב זרם ממוצע בנגד R_1 .
- ג. חשב הספק המתפתח בנגדים R_1, R_2, R_3 .
- ד. סוגרים את המתג S מה יקרה להספק בנגד R_1 .

פתרון לתרגיל דוגמא

$$K = \frac{1}{3} \quad \text{ולכן} \quad 3V_p = V_s = 3 * 120 = 360V$$

$$\text{ומכאן} \quad V_{s1} = V_{s2} = \frac{V_s}{2} = \frac{360}{2} = 180V$$

לפי מיקום הנקודות בשנאי הסליל V_{s1} וסליל V_{s2} הופכים מופע.

וחישובי מתח וזרם מקסימאליים:

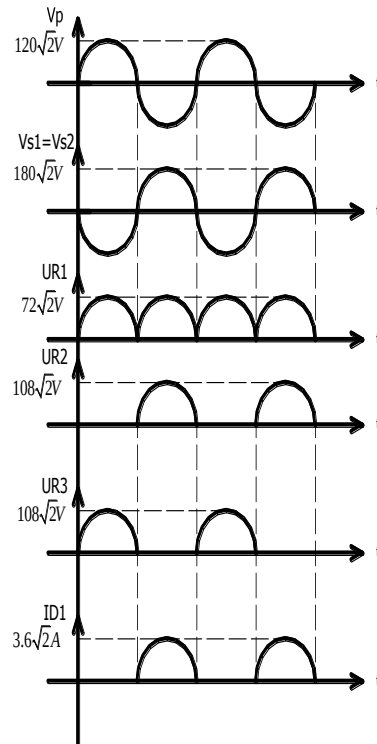
$$UR1(max) = \frac{Vs1(max) * R1}{R1 + R2} = \frac{180\sqrt{2} * 20}{20 + 30} = 72\sqrt{2}V$$

$$UR2(max) = \frac{Vs1(max) * R2}{R1 + R2} = \frac{180\sqrt{2} * 30}{20 + 30} = 108\sqrt{2}V$$

$$UR3(max) = \frac{Vs2(max) * R3}{R1 + R3} = \frac{180\sqrt{2} * 30}{20 + 30} = 108\sqrt{2}V$$

$$ID1(max) = IR2(max) = \frac{UR2(max)}{R2} = \frac{108\sqrt{2}}{30} = 3.6\sqrt{2}A$$

.א



ב. חישוב זרם ממוצע בנגד R_1 .

$$IR_1(av) = \frac{UR_1(av)}{R_1}$$

$$UR_1(av) = \frac{2 * UR_1(max)}{\pi} = \frac{2 * 72\sqrt{2}}{\pi} = 64.82V$$

$$IR_1(av) = \frac{64.82}{20} = 3.24A$$

ג. חישוב הספק המתפתח בנגדים R_2, R_1 ו- R_3 .

$$PR_3 = PR_2 = \frac{UR_2(rms)^2}{R_2}$$

$$UR_3(rms) = UR_2(rms) = \frac{UR_2(max)}{2} = \frac{108\sqrt{2}}{2} = 76.36V$$

$$PR_3 = PR_2 = \frac{76.36^2}{30} = 194.39W$$

$$PR_1 = \frac{UR_1(rms)^2}{R_1}$$

$$UR_1(rms) = \frac{UR_1(max)}{\sqrt{2}} = \frac{72\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 72V$$

$$PR_1 = \frac{72^2}{20} = 259.2W$$

ד. ממוצע המתח $UR_1(rms)$ בשני חצאי הגל יגדל ולכן ההספק על R_1 יגדל בהתאמה.

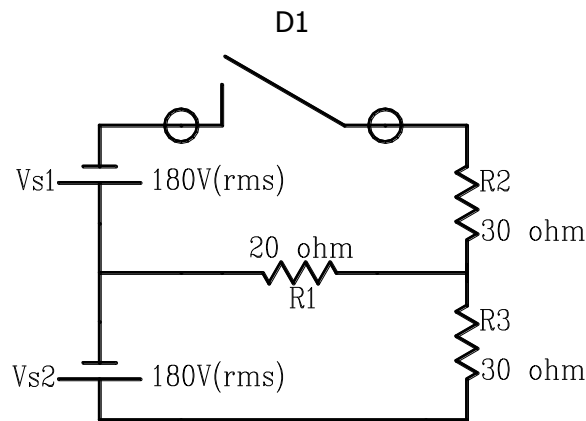
2.4.0- PIV (Peak Inverse Voltage) מתח פריצה אחורי

לכל דיודה יש את ה-PIV שלה זהו נתון יצרן. ככל שה-PIV יהיה גדול יותר כך הדיודה איכותית ויקרה יותר.

PIV זהו נתון שקיים רק בממתח אחורי של הדיודה, כאשר המתח על פני הדיודה עולה מעל ה- PIV שלה היא נשרפת והופכת לקצר.

על מנת לקבוע PIV על דיודה מסוימת יש לחשב את המתח על פניה כערך מקסימאלי כאשר היא במצב אי הולכה (בקטעון).

נשתמש בנתוני התרגיל הקודם ונבחן את ה-PIV של דיודה D1:



$$PIV_{D1(max)} > |U_{R1(max)} + U_{D1(max)}|$$

$$U_{R1(max)} = \frac{V_{s2(max)} * R1}{R1 + R3} = \frac{180\sqrt{2} * 20}{20 + 30} = 72\sqrt{2}V$$

$$PIV_{D1(max)} > |72\sqrt{2} + 180\sqrt{2}|V$$

$$PIV_{D1(max)} > |252\sqrt{2}|V$$

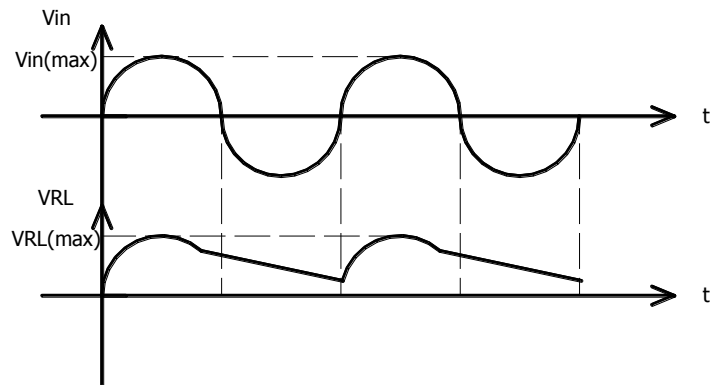
2.5.0 מישרים מעשיים

2.5.1 חיבור מסנן קיבולי במוצא מישר

במוצא המישר מתקבל גל חצי פועם או גל פועם בהתאם לסוג המישר.
על מנת לשפר את הגליות (אדווה) על נגד העומס ניתן להשתמש במסננים.
המסנן הפשוט ביותר שמבצע פעולה זו הוא הקבל. את הקבל יש לחבר
במקביל לנגד העומס.

נבחן את פעולת הסינון עבור מישר חד דרכי כמתואר באיור הבא:

התפרקות הקבל על נגד העומס



הערה:

מסנן זה הינו מסנן פשוט וברגע שנחבר אותו במקביל לעומס במישר דו דרכי נקבל ישור טוב יותר (גליות נמוכה יותר).

החיסרון של מסנן זה שהוא תלוי בגודל העומס, ז"א הוא מתאים בעיקר לעומסים בעלי התנגדויות גבוהות (שאז קצב התפרקות הקבל ארוך יותר).

2.5.2 חיבור מסנן השראתי למישר

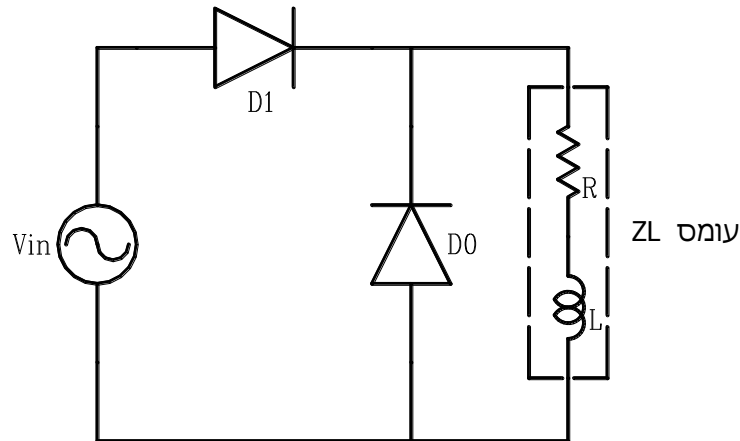
עבור מסנן הקיבולי שמחובר במישר דו דרכי מתקבלת צורת גל לזרם המקור שהוא מכיל הרמוניות רבות (גל הזרם יהיה מעוות). הרמוניות אלו יוצרות הפרעות אלקטרומגנטיות וכאשר מדובר על זרמים גבוהים מדובר על הפרעות גדולות.

לצורך זה קיים המסנן השראתי הבנוי מסליל שמחובר בטור לרשת. תפקידו לצמצם את אותן הרמוניות ובכך להקטין את ההפרעות.

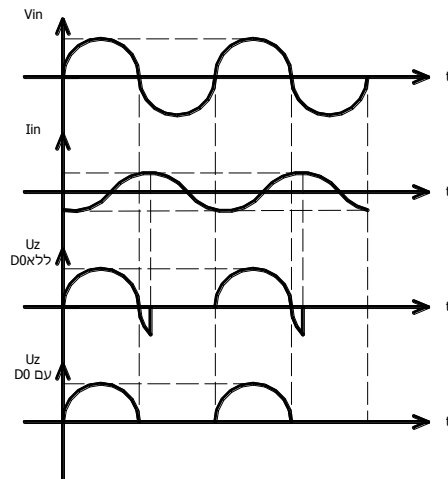
השילוב בין המסנן הקיבולי למסנן השראתי יוצר את המישר המעשי.

(עבודת בית מס' 1 בגמר לימוד פרק זה)

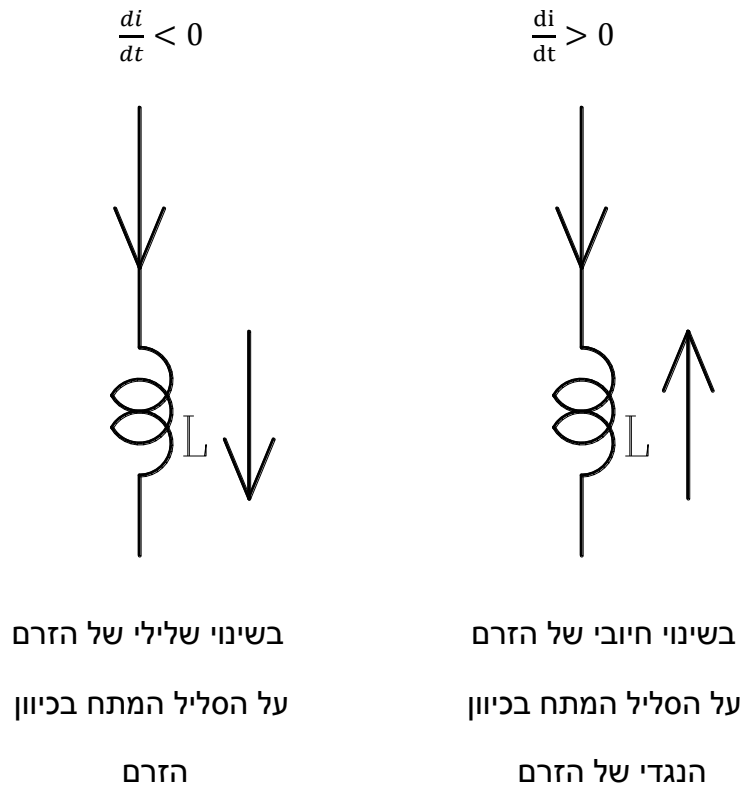
2.5.3 חיבור עומס השראתי במוצא מישר חד דרכי



כאשר מחברים עומס השראתי במוצא מישר חד דרכי המתח הממוצע על פני העומס קטן. הסיבה לכך היא שכאשר מתח הרשת מתחיל את המחזור השלישי שלו ישנו פרק זמן מסוים שהדיודה D1 בהולכה וזאת בכל אופי הסליל. וכתוצאה מכך נוצרים "ספיקים" קטנים בעומס במחזור השלישי של המקור. על מנת להתגבר על בעיה זו יש לחבר במקביל לעומס דיודת איפוס D0 דיודה זו תפקידה לאפס את המתח על פני העומס כאשר מתח הרשת מתחיל את המחזור השלישי שלו. ובכך לקבל מתח DC גדול יותר שהוא כתוצאה מגל חצי פועם.



הספיקים השלישיים נגרמים מכיוון שהמתח על העומס ההשראתי יכול לשנות את כיוונו וזאת מכיוון שלפי פארדי- $UL = L \frac{di}{dt}$. ז"א שהמתח על הסליל תלוי בשינוי הזמן.



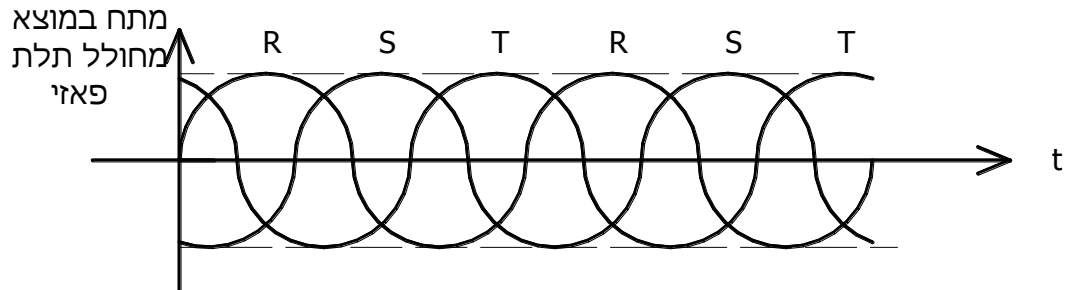
אם שינוי הזרם יהיה חיובי המתח על פני הסליל יהיה לכיוון D1 ובמצב זה הקתודה למרות שינוי בקוטביות המקור היא שלילית ביחס לאנודה והדיודה D1 עדין לפרק זמן מסוים נשארת במצב הולכה וזאת עד אשר הזרם משנה את כיוונו לשלילי המתח על פני הסליל משנה את כיוונו ואז הקתודה חיובית ביחס לאנודה והדיודה D1 נכנסת לקטעון.

הדיודה D0 דואגת שבשינוי קוטביות המקור הקתודה של D1 תהיה בכל זמן המחזור השלילי של המקור חיובית ביחס לאנודה ושדיודה D1 תהיה במצב קטעון בכל זמן המחזור השלילי של המקור.

הערה- כאשר מחברים עומסים השראתיים במעגלים חשמליים ברגע ניתוקם מהרשת מופיע עליהם קפיצת מתח שמתבטאת באנרגיה אלקטרומגנטית. ההסבר הפיזיקאלי לכך-שבעת ניתוק הסליל הזרם דרכו יורד ב-0 זמן (באופן תאורתי) ולכן השינוי יהיה- $\frac{di}{dt} = -\infty$. מתח זה מסוכן עבור רכיבים מסוימים ולכן במצבים כאלה מחברים במקביל לרכיבים השונים דיודת איפוס שתפקידה לאפס את האנרגיה האלקטרומגנטית ובכך להגן על הרכיבים.

2.6.0 מישרים תלת מופעיים

2.6.1- מבוא



מחולל תלת מופעי(פאזי) זהו מחולל הבנוי מ-3 מחוללים חד פאזי הנמצאים בהפרש מופע של 120° זה מזה.

הפונקציות המתמטיות המבטאות המתח הרגעי עבור כל מופע:

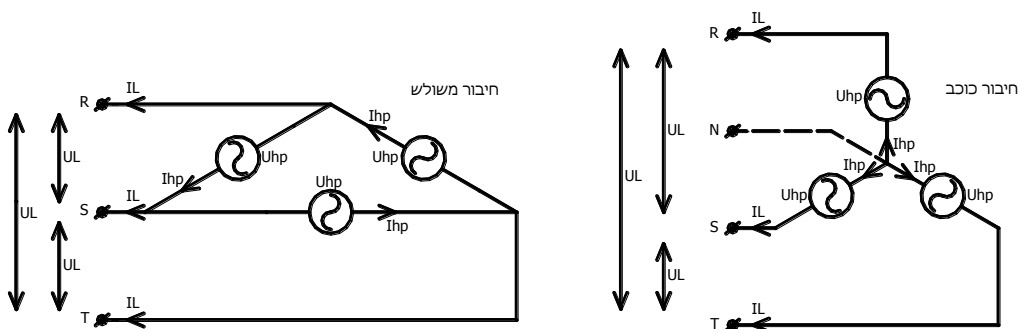
$$R \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t)$$

$$S \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$T \text{ פאזה } V(t) = V(\max)\sin(\omega t + 120^\circ)$$

צורות חיבור ברשת תלת פאזית

המחולל התלת פאזי יכול להיות מחובר או בצורת כוכב או בצורת משולש.



מושגי יסוד:

- א. מתח שלוב (קווי)-מסומן UL – זהו המתח שמופיע בין 2 פאזות.
ב. זרם שלוב (קווי)-מסומן IL – זה הזרם שזורם בקווים הראשיים.
ג. מתח מופע(פאזי)-מסומן U_{ph} – זהו המתח המופיע על פני מחולל בודד.
ד. זרם מופע(פאזי)-מסומן I_{ph} – זהו הזרם זורם דרך מחולל בודד.

הערות:

1. לרשת תלת פאזי ניתן לחבר גם צרכנים חד פאזי בתנאי שקיים מוליך N .
2. צרכנים שהם תלת פאזי חייבים להיות מחוברים או בצורת כוכב או בצורת משולש.
3. צרכן שהוא תלת פאזי סימטרי זהו צרכן המוגדר כצרכן מאוזן כזה שעוצמת הזרם שתופיע במוליך ה- N תהיה שווה ל-0 (כסכום ווקטורי). לכן צרכנים אלו אינם צריכים את מוליך ה- N .
4. ניתן לסכם את 2 צורות החיבור בטבלה הבאה:

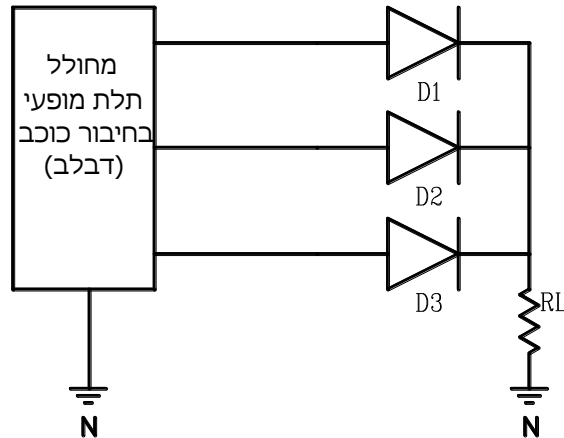
חיבור משולש	חיבור כוכב
$UL = U_{ph}$	$UL = \sqrt{3} * U_{ph}$
$IL = \sqrt{3} * I_{ph}$	$IL = I_{ph}$

גם ברשת תלת מופעי קיימים 2 סוגי מישרים:

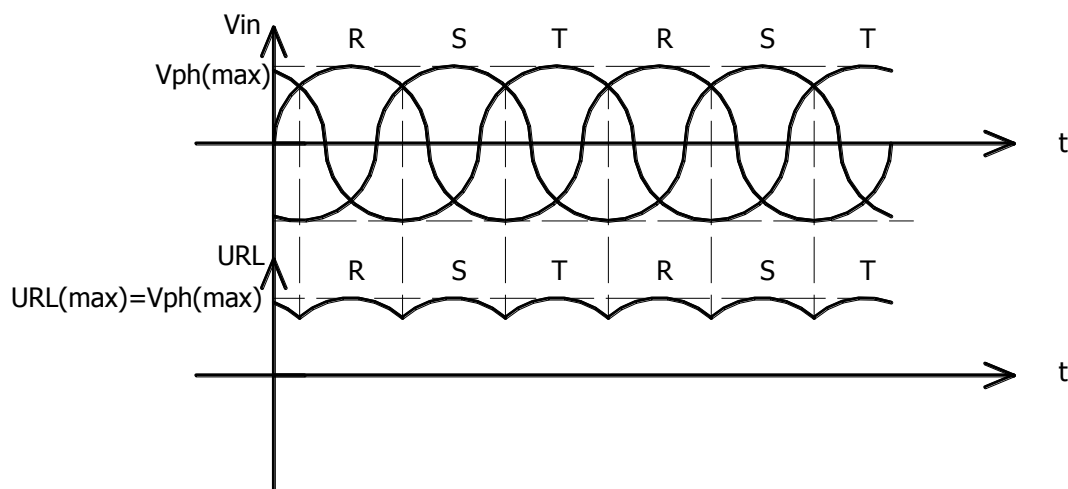
- א. מישר חד דרכי
ב. מישר דו דרכי

2.6.2- מישר חד דרכי תלת מופעי

מישר זה בנוי מ- 3 דיודות ישור והוא נראה באיור הבא:



צורת הגלים נראה באיור הבא:



עבור מישר זה מקבלים שבכל $\frac{1}{3}$ מחזור דיודה אחת תהיה פעילה ואילו השתיים האחרות תהינה בנתק.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מתקבל אות DC שניתן לחשב עליו גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל.

$$URL(av) = \frac{3\sqrt{3} * URL(max)}{2\pi}$$

$$URL(rms) = URL(max) * \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} * \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}$$

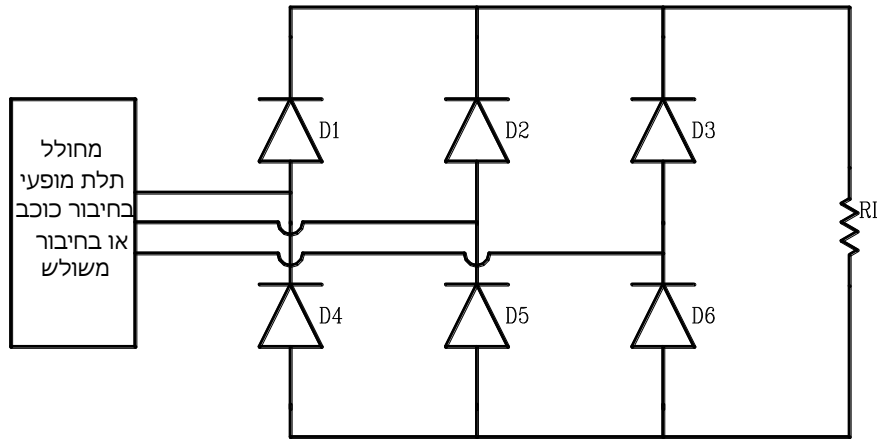
בעבודה במחשבון במצב degree (מעלות) בתוך פונקציה ה-sin בלבד במקום π יש להציב 180°.

הערות:

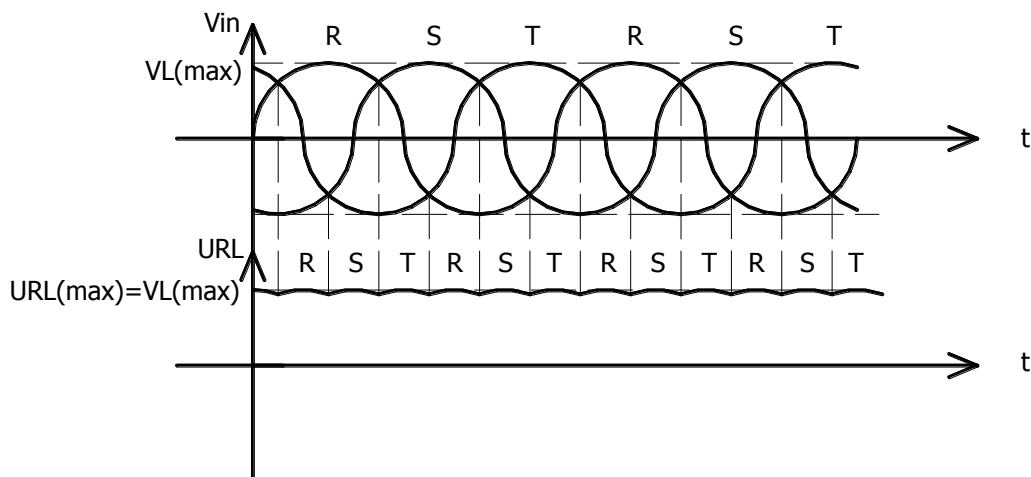
1. את הזרמים ניתן לחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.

2.6.3- מישר דו דרכי תלת מופעי

מישר זה מבצע פעולת ישור טובה יותר והוא מכיל 6 דיודות כמתואר באיור הבא:



צורות הגלים מתוארת באיור הבא:



עבור מישר זה תמיד 2 דיודות פועלות –אחת מהקומה העליונה והאחרת מהקומה התחתונה. כל $\frac{1}{6}$ מחזור מתבצעת תחלופה בין הדיודות אבל כל דיודה פועלת ברצף $\frac{2}{6}$ המחזור.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע אות DC טוב יותר שניתן לחשב עבורו גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל בהתאם לנוסחאות הבאות:

$$URL(av) = \frac{6 * URL(max)}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$URL(rms) = URL(max) * \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}$$

בעבודה במחשבון במצב degree (מעלות) בתוך פונקצית ה-sin בלבד במקום π יש להציב 180°.

הערות:

1. את הזרמים ניתן לחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.

תרגיל דוגמא

נתון מישר תלת פאזי המוזן ממחול תלת פאזי המחובר בחיבור כוכב בעל מתח שלוב של 400V המתואר באיור:



חשב:

- זרם ממוצע בנגד העומס.
- הספק המתפתח בנגד העומס.

פתרון לתרגיל דוגמא

א.

$$URL(max) = UL(rms) * \sqrt{2} = 400\sqrt{2}V$$

$$URL(av) = \frac{6 * URL(max)}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{6 * 400\sqrt{2}}{\pi} * \sin\left(\frac{180}{6}\right) = 540.19V$$

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL} = \frac{540.19}{50} = 10.804A$$

ב.

$$URL(rms) = URL(max) \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 400\sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi} * \sin\left(\frac{180}{3}\right)} = 540.665V$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{540.665^2}{50} = 5846.37W$$

(עבודת בית מס' 2 בגמר לימוד פרק זה)

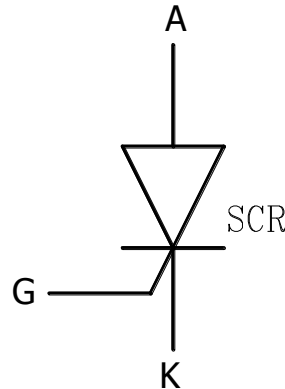
פרק 3- תריסטורים בבקרת הספק

3.1.0-מבוא

במערכות המבצעות בקרת הספק הדרישה היא שהבקרה תהיה רציפה וללא איבודי הספק. ישנם רכיבי הספק שונים היכולים לבצע פעולה של בקרת הספק במינימום איבודי הספק והם נקראים תריסטורים. התריסטור זה שם כולל לרכיבי הספק מוליכים למחצה הבנויים בעיקר מאותן שכבות PN.

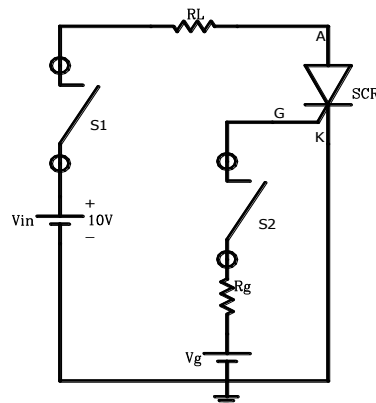
3.1.1-מישר סיליקון מבוקר- SCR-(Silicon Controlled Rectifier)

המס"מ או SCR זהו רכיב העיקרי במשפחת התריסטורים. רכיב זה מבצע את אותה פעולה של הדיודה אך בצורה מבוקרת. לרכיב יש 3 רגלים: אנודה-A, קתודה-K, שער-G. סימון הרכיב באיור הבא:

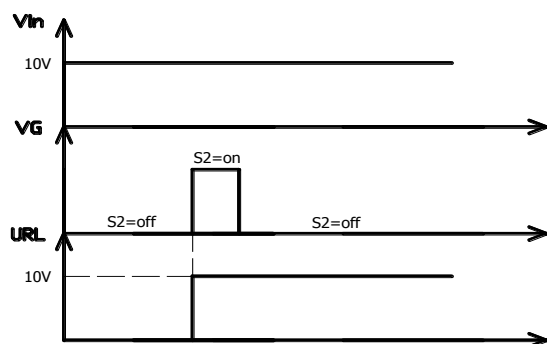


3.1.2- עקרון פעולת SCR

על מנת להבין את פעולת ה-SCR נחבר את המעגל המתואר באיור הבא:



במעגל הנתון עם סגירת מפסק S1 ה-SCR מחובר אומנם בממתח קדמי אך הוא לא יוליך עד הרגע שיקבל אות ממערכת הבקרה. במצב זה $V_{URL}=0V$. ברגע שנסגור את מתג S2 ואפילו לזמן קצר יכנס פולס של זרם לרגל השער של ה-SCR ובכך יצית אותו. במצב זה $V_{URL}=V_{in}$. ומכאן ניתן להבין שעל מנת להצית את ה-SCR אחת השיטות היא לספק דופק זרם לרגל השער שלו. אסור שדופק זה יהיה ממושך כיוון שזה מסוכן לרכיב. חשוב שדופק זה לא יהיה בעוצמה כזו שתזיק לרכיב ולכן קיים במעגל נגד R_g שתפקידו להגביל את עוצמת הזרם הנכנס לרגל השער של הרכיב. כיבוי ה-SCR במעגל זה היא ע"י פתיחת מפסק S1. ניתן לתאר את פעולת המעגל באמצעות האופינים הבאים:

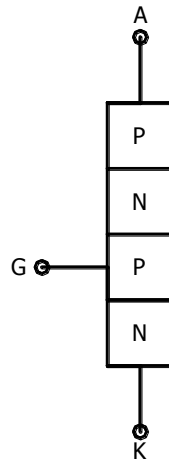


אנו מבחינים במעגל ב-2 ערוצים:

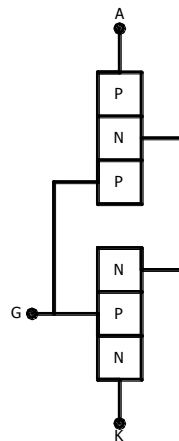
- ערוץ ההספק- זהו אותו ערוץ המכיל את מקור האנרגיה V_{in} המתג S1 את העומס R_L ואת החלק ברכיב הבקרה עצמו SCR הצמת בין A ל-K.
- ערוץ הבקרה- בערוץ זה זורמים זרמים נמוכים יחסית לערוץ הבקרה סדר גודל קטנים פי 1000. ערוץ זה כולל את מקור המתח V_g הנגד R_g מפסק S2 ואותו צמת שקיים בין G ל-K ברכיב ה-SCR.

3.1.3-מבנה הרכיב

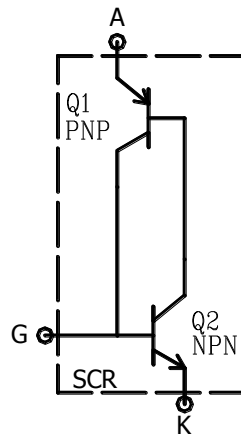
ה- SCR בנוי ממבנה רב שכבתי PNPN כמתואר באיור הבא:



את מבנה הרכיב ניתן גם לתאר באופן המתואר באיור הבא:



מבנה זה מזכיר חיבור של 2 טרנזיסטורים בי-פולארים האחד מסוג PNP והשני מסוג NPN אשר מחוברים בניהם כמתואר באיור הבא:



ניתן להסביר כיצד פועל ה- SCR באמצעות מימושו בעזרת 2 הטרנזיסטורים:

- א. עבור $I_G = 0$ - במצב זה 2 הטרנזיסטורים בקטעון ולכן ניתן לראות את ה- SCR כמפסק פתוח שמחובר בין האנודה לקתודה.
- ב. עבור $I_G \neq 0$ (לפרק זמן קצר) במצב זה נכנס זרם לבסיס של הטרנזיסטור Q2 זרם זה מוגבר פי β ומופיע בקולקטור של Q2 ניתן לראות שזרם זה מהווה את זרם הבסיס של טרנזיסטור Q1 שהרי גם הוא מוגבר פי β ויוצר את הזרם בקולקטור של Q1. זרם זה נכנס שוב לבסיס של Q2 וכך באופן מחזורי מוגבר עד אשר 2 הטרנזיסטורים נכנסים למצב רוויה. במצב זה ניתן לומר שה- SCR "מוצת" כלומר הוא משמש כמתג סגור בין האנודה לקתודה.

הערות:

1. על פי שרטוט זה ניתן להבין מדוע מספיק פולס קצר של זרם ברגל ה- G על מנת להצית את ה- SCR.
2. מבחינה תאורתית כאשר ה- SCR מוצת המתח על פניו שווה ל- 0V אך באופן מעשי המתח על פני ה- SCR שווה בערך ל- 1V והסיבה לכך היא:

$$V_{AK} = V_{BE}(Q1) + V_{CE}(Q2) = 0.7 + 0.3 = 1V$$
3. מבחינה תאורתית ניתן לממש SCR באמצעות 2 טרנזיסטורים כפי שמתואר בשרטוט. אך מבחינה מעשית דבר זה אינו בר ביצוע כיוון שקיימים זרמי זליגה בתוך הטרנזיסטורים דבר הגורם להמצאות תמידית של הטרנזיסטורים במצב רוויה כך שגם ללא מתן פולס ברגל ה- G ה- SCR יהיה מוצת.

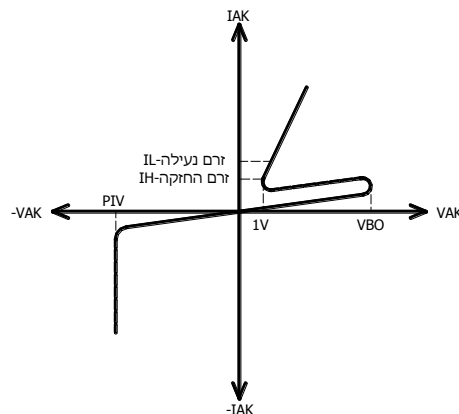
3.1.4-שיטות להצתת SCR

1. השיטה הנפוצה ביותר היא לתת פולס של זרם המגיע מערוץ הבקרה לתוך רגל השער של ה-SCR.
2. ניתן להצית SCR גם ללא רגל השער וזה בתנאי שהמתח על פניו בממתח קידמי יהיה גדול מאותו מתח VBO הנתון ע"י היצרן.
3. SCR הנמצא בטמפ' גבוהות עלול להיות מוצת מעצמו. טמפ' גבוהות יוצרות זרמי זליגה ברכיב אשר גורמות להצתתו.
4. ישנו רכיב הנקרא בשם LASCR רכיב זה בעל חלון שקוף המקושר לרגל השער של הרכיב כך שכאשר מאירים לתוך חלון זה ה-SCR מוצת.

3.1.5-שיטות לכיבוי SCR

1. לדאוג לכך שהזרם דרך הרכיב ירד ל-0A.
2. לדאוג לכך שהמתח על פני הרכיב ירד ל-0V.
3. כאשר דואגים לשנות את כיוון הזרם דרך הרכיב.

3.1.6-אופיין התנגדות מעשי ל-SCR



IL- זרם נעילה- Latch- בערוץ הבקרה

IH-זרם החזקה- Hold- בערוץ ההספק

הסבר לאופיין

א. עבור ממתח קידמי- עבור חיבור זה כאשר מעלים את המתח על פני הרכיב הוא עדין בנתק אך מבחינה מעשית מצליחים כן לזרום דרכו זרמי זליגה קטנים. ברגע שהמתח על פני הרכיב יגיע לערך VBO (Voltage Break Over) הרכיב מוצת ולכן המתח על פניו יורד מבחינה מעשית ל- 1V.

אנו מבחינים בין 2 ערכים של זרם:

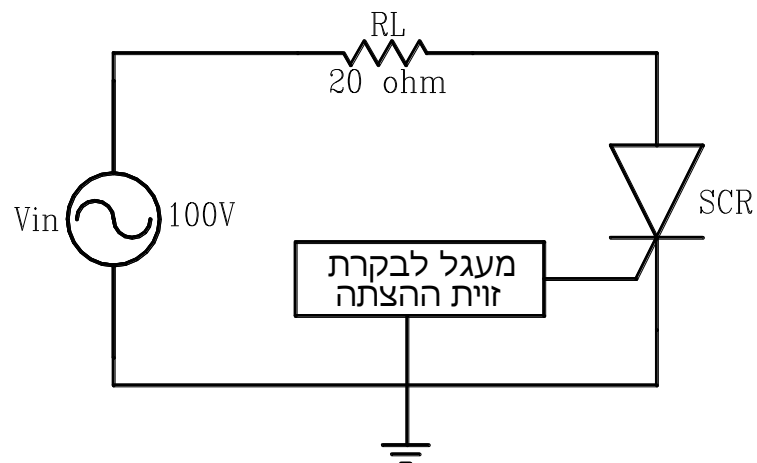
1. זרם נעילה IL- זהו נתון שקשור לערוץ הבקרה והוא מציין את אותו זרם מינימאלי הדרוש להצתת ה-SCR.

2. זרם החזקה IH- זהו נתון שקשור לערוץ ההספק והוא מציין את אותו זרם מינימאלי הדרוש לזרום דרך ה-SCR שמתחתיו ה-SCR כבה.

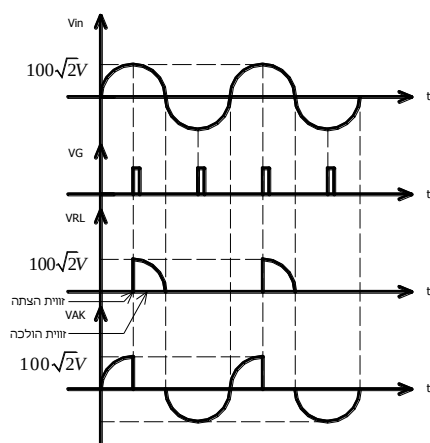
ב. עבור ממתח אחורי- עבור חיבור זה ה-SCR מתנהג כמו דיודה בממתח אחורי ולכן מבחינה מעשית ישנם זרמי זליגה קטנים דרך הרכיב אך כאשר המתח על פני הרכיב בחיבורו האחורי עובר את הערך PIV שלו הרכיב נשרף והופך לקצר.

3.1.7-בקרת חצי גל מיושר בז"ח

המעגל כמתואר באיור הבא:



צורות הגלים כמתואר באיור הבא:



הסבר למעגל

במעגל ישנה יחידה שקשורה לערוץ הבקרה (מעגל לבקרת זווית ההצתה) שתפקידה ליצר פולסים בכל פרק זמן קבוע.

עבור החצי מחזור חיובי- עד שלא מתקבל פולס ה-SCR כבוי ולכן $V_{RL}=0$. ברגע הופעת הפולס ה-SCR מוצת והוא מוליך וכן המתח על פני נגד העומס שווה למתח המקור. המתח על פני ה-SCR מבחינה אידיאלית במצב זה שווה ל-0. הזרם דרך נגד העומס זהו הזרם גם דרך ה-SCR ולכן כאשר הזרם דרך נגד העומס יורד ל-0 גם הזרם בערוץ ההספק של ה-SCR יורד ל-0 וה-SCR כבה.

עבור החצי מחזור השלילי- אין חשיבות לפולסים ממעגל הבקרה כיוון שה-SCR מלכתחילה בחיבור הפוך (ממתח אחורי).

אנו מבחינים בין 2 סוגים של זוויות:

א. זווית הצתה α - זו אותה זווית שמימנה מוצת ה-SCR. זווית זו יכולה להיות בתחום $0^\circ-180^\circ$.

ב. זווית ההולכה β - זו אותה זווית שקיימת מרגע הצתת ה-SCR ועד לכיבויה. זווית זו יכולה להיות בתחום $0^\circ-180^\circ$.

תמיד יתקיים הכלל- $\alpha+\beta=180^\circ$.

הערות:

1. במעגל זה לא מנוצל חצי מהגל ולכן מעגל זה לא שימושי.
2. ניתן לראות שמבחינה אידיאלית בכל פרק זמן נתון אין בזבז הספק על פני ה-SCR.
3. שינוי זווית ההצתה α מתבצע במעגל הבקרה. עבור $\alpha=0^\circ$ מתקבל הספק מרבי בנגד העומס ואילו עבור $\alpha=180^\circ$ מתקבל הספק 0.

חישובים עבור נגד העומס

על פני נגד העומס מופיע חצי גל מבוקר שעבורו ניתן לחשב גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל לפי הנוסחאות הבאות:

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{2\pi} * [1 + \cos \alpha] \quad \text{ערך ממוצע}$$

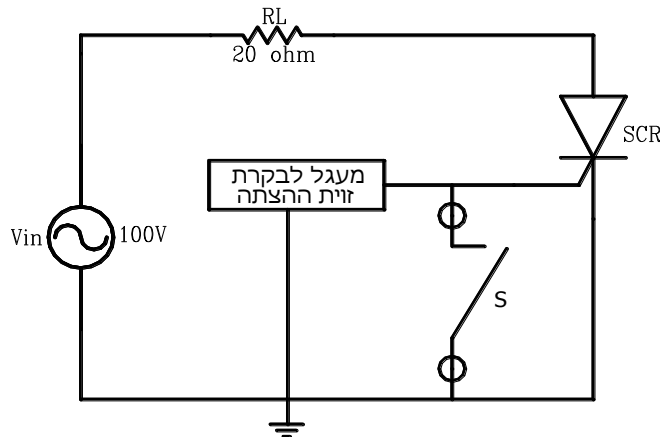
$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{2} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad \text{ערך יעיל}$$

הערות:

1. זרמים נחשב על פי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים נחשב באמצעות ערכים יעילים בלבד.
3. בשימוש במחשבון ניתן לבצע את החישובים בנוסחאות גם כאשר המחשבון נמצא במצב degree (מעלות). במצב זה במקומות בהם קיימת הפונקציה sin או cos α תוצג במעלות ואילו ביתר המקומות α תוצג ברדיאנים (כתלות בפרמטר π). את ההמרה מרדיאן למעלות נבצע על פי המשוואה הבאה: $\alpha (rad) = \frac{\alpha(deg)\pi}{180}$

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק וכן נתון כי $\alpha = 60^\circ$ כמתואר באיור הבא:

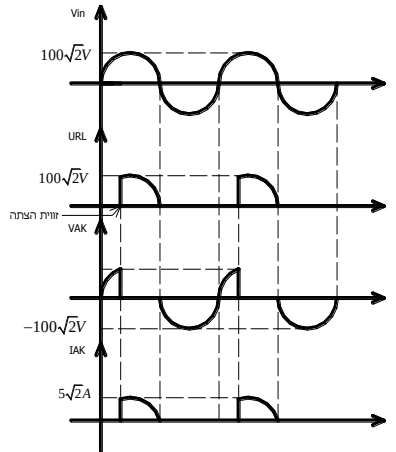


- א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורות הגלים הבאות: V_{in}, URL, UAK, IAK .
- ב. חשב את הזרם הממוצע דרך נגד העומס.
- ג. חשב את ההספק המתפתח בנגד העומס.
- ד. חשב את המתח המופיע על פני נגד העומס ברגע הצתת ה-SCR.
- ה. חזור על הסעיפים: ב, ג, ד, כאשר סוגרים את המתג S.

פתרון לתרגיל דוגמא:

חישוב ערך מקסימאלי של הזרם בעומס: $IRL(max) = \frac{URL(max)}{RL} = \frac{100\sqrt{2}}{20} = 5\sqrt{2}$

א. צורות גלים



ב. חישוב זרם ממוצע בנגד העומס:

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL}$$

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{2\pi} * [1 + \cos \alpha] = \frac{100\sqrt{2}}{2\pi} * [1 + \cos 60] = 33.76$$

$$IRL(av) = \frac{33.76}{20} = 1.688A$$

ג. חישוב הספק בנגד העומס:

$$URL(rms) = \frac{100\sqrt{2}}{2} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{60\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2} \right)} = 63.42V$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{63.42^2}{20} = 201.1W$$

ד. חישוב המתח ברגע ההצתה:

$$U(t) = U(max) * \sin \omega t$$

$$U(\alpha) = U(max) * \sin \alpha$$

$$U(\alpha) = 100\sqrt{2} * \sin 60 = 122.47V$$

ה. כאשר מפסק S סגור הפולסים המתקבלים ממערכת הבקרה מקוצרים ולא מגיעים ל-SCR ולכן ה-SCR לא מוצת ולכן:

$$IRL=0, URL=0, PRL=0$$

3.1.8- בקרת גל שלם מיושר בז"ח

באמצעות המעגל לבקרת חצי גל ניתן לקבל אומנם בקרה רציפה בנגד העומס אך רק על חצי מהאנרגיה.

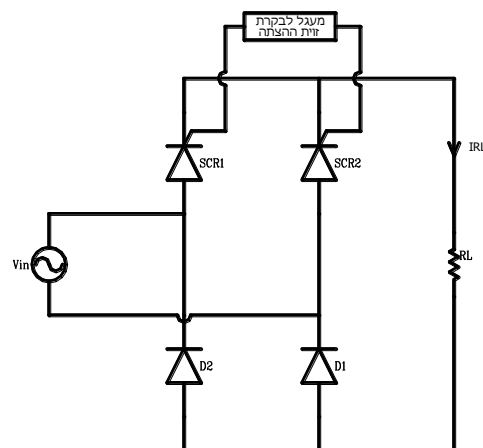
כאשר מעוניינים לבצע בקרת הספק על כל הגל באמצעות SCR נדרשת פעולת ישור.

קיימים 2 סוגים עיקריים של מעגלים המבצעים בקרת גל שלם מיושר:

- א. באמצעות המודל של גשר דיודות.
- ב. באמצעות המודל של שנאי בעל סנף אמצעי.

א. בקרת גל שלם מיושר באמצעות מודל גשר דיודות

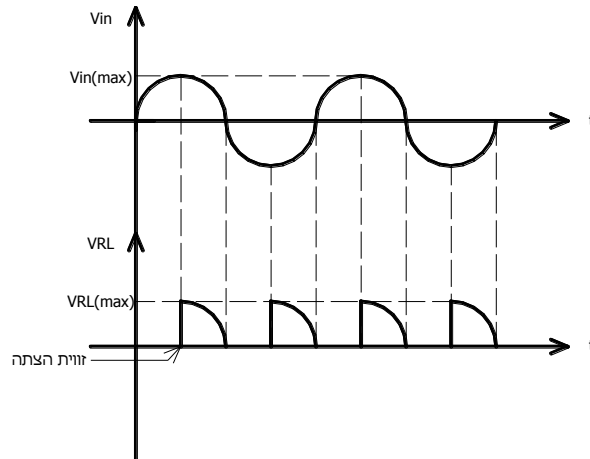
מעגל זה נראה באיור הבא:



הסבר למעגל:

- א. עבור החצי מחזור החיובי- בחצי מחזור זה הדיודה D1 בהולכה ואילו SCR1 יכול להוליך ברגע שיתקבל פולס ממערכת הבקרה. במצב זה הדיודה D2 ו- SCR2 בקטעון.
- ב. עבור החצי מחזור השלילי- בחצי מחזור זה הדיודה D2 בהולכה ואילו SCR2 יכול להוליך ברגע שיתקבל פולס ממערכת הבקרה. במצב זה הדיודה D1 ו- SCR1 בקטעון.

המתח המתקבל על פני נגד העומס הוא גל שלם מבוקר הנראה באיור הבא:



חישובים עבור נגד העומס

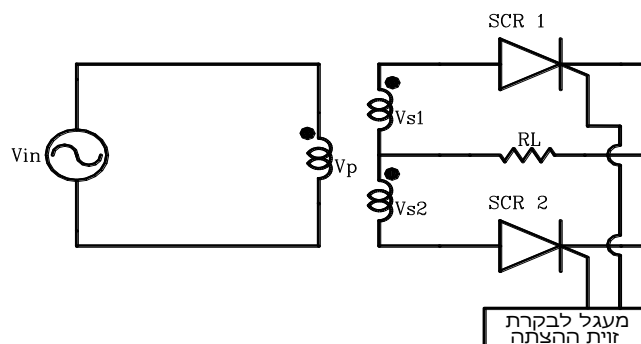
על פני נגד העומס מופיע חצי גל מבוקר שעבורו ניתן לחשב גם ערך ממוצע וגם ערך יעיל לפי הנוסחאות הבאות:

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{\pi} * [1 + \cos \alpha] \quad \text{ערך ממוצע}$$

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} \quad \text{ערך יעיל}$$

הערות:

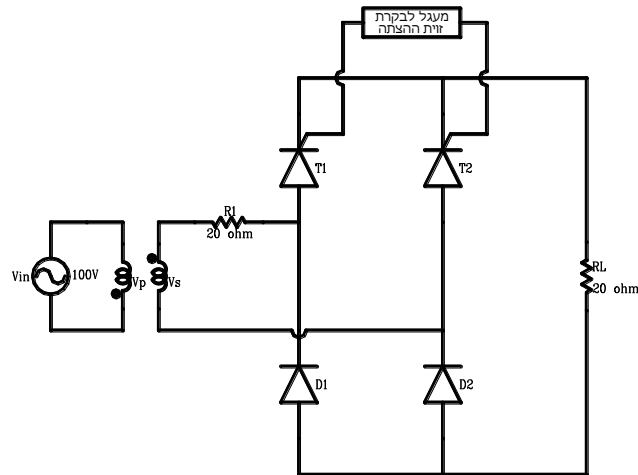
1. זרמים לחשב לפי חוק אום בהתאמה.
2. הספקים בנגדים טהורים יחושבו באמצעות ערכים יעילים בלבד.
- ב. בקרת גל שלם מיושר באמצעות מודל שנאי בעל סנף אמצעי



על פני נגד העומס מתקבל גל שלם מיושר ולכן חישובים נבצע בדיוק באותן נוסחאות כמו במודל גדר דיודות.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי: $\alpha = 60^\circ$, $K=1:2$.

א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורות הגלים הבאות:

V_p , V_S , U_{R1} , U_{RL} , I_{T2}

ב. חשב זרם ממוצע דרך בכל נגד.

ג. חשב הספק המתפתח בכל נגד.

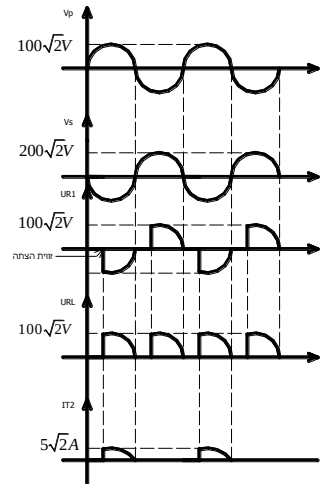
פתרון לתרגיל דוגמא:

א. חישוב ערכים מקסימאליים:

$$V_S(max) = 2 * V_p(max) = 2 * 100\sqrt{2} = 200\sqrt{2}V$$

$$U_{R1}(max) = U_{RL}(max) = \frac{V_p(max)}{2} = \frac{200\sqrt{2}}{2} = 100\sqrt{2}V$$

$$I_{T2}(max) = I_{R1}(max) = I_{RL}(max) = \frac{U_{RL}(max)}{R_L} = \frac{100\sqrt{2}}{20} = 5\sqrt{2}A$$



ב. חישוב זרם ממוצע דרך כל נגד

$$IR1(av) = \frac{UR1(av)}{R1} = \frac{0}{20} = 0A$$

$$IRL(av) = \frac{URL(av)}{RL}$$

$$URL(av) = \frac{URL(max)}{\pi} * [1 + \cos \alpha] = \frac{100\sqrt{2}}{\pi} * [1 + \cos 60] = 67.52V$$

$$IRL(av) = \frac{67.52}{20} = 3.376A$$

ג. חישוב הספק המתפתח בכל נגד

$$PR1 = PRL$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL}$$

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$URL(rms) = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{60\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2} \right)} = 89.69V$$

$$PR1 = PRL = \frac{89.69^2}{20} = 402.21W$$

3.1.9-תנאים קיצוניים ב-SCR

לכל SCR ישנם נתונים שונים הניתנים ע"י היצרן.

חלק מהנתונים מתייחסים לאותם תנאים קיצוניים שקיימים ברכיב.

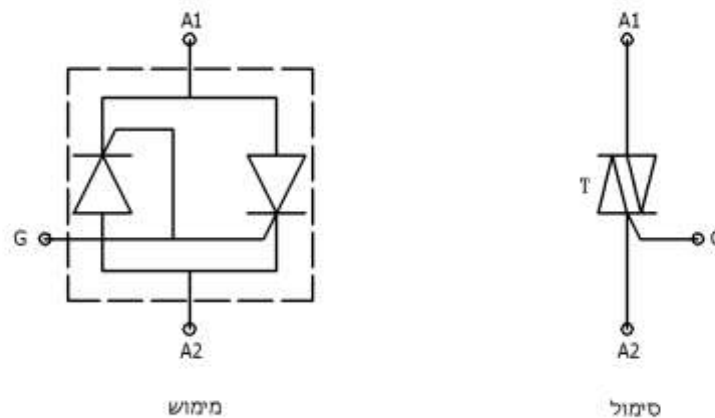
ל-SCR יש 2 תנאים קיצוניים והם:

- א. קצב שינוי המתח ברכיב $\frac{dV_{AK}}{dt}$ - במידה ועל פני הרכיב מופיעים שינויי מתח מהירים, הדבר עלול לגרום להצתה בלתי רצויה. ולכן היצרן מעדכן לגבי קצב זה כדי שאנחנו כמשתמשים ברכיב לא נאפשר שינויי מתח מהירים על פני הרכיב מעבר לנתוני היצרן. על מנת להגן על הרכיב מפני שינויים פתאומיים אלו יש לחבר במקביל אליו קבל, שהרי ידוע כי קבל מתנגד לשינויי מתח על פניו. את גודל הקבל ניתן לחשב באמצעות הביטוי הבא: $I_c = C \frac{dvc}{dt}$.
- ב. קצב שינוי הזרם ברכיב $\frac{di_{AK}}{dt}$ - במידה ודרך הרכיב מופיעים שינויי זרם מהירים, הדבר עלול לגרום ל"מכות" של זרם ברכיב הגורם להתחממותו ובך מסכן ומקצר את אורך חייו. גם כאן היצרן מעדכן לגבי שינויי קצב הזרם המאקסימלים המותר הרכיב כך שלא יסכן אותו. על מנת להגן על הרכיב מפני שינויים פתאומיים של זרם יש לחבר בטור אליו סליל, שהרי ידוע כי סליל מתנגד לשינויי זרם דרכו. את גודל הסליל ניתן לחשב באמצעות הביטוי הבא: $VL = L \frac{di}{dt}$

3.2.1-רכיב ה- Triac

רכיב זה שייך למשפחת התריסטורים והוא מסוגל לבצע בקרה דו כיוונית.

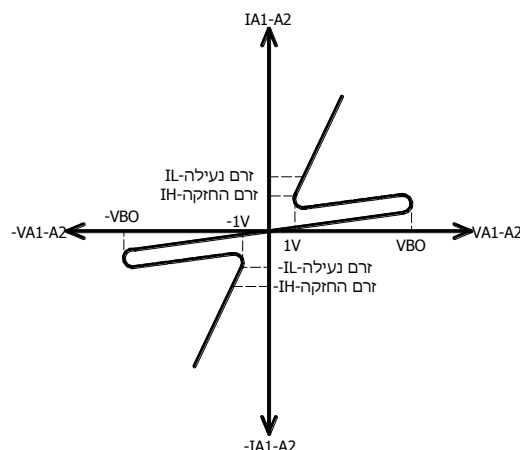
רכיב זה ממומש באמצעות 2 SCR-ים שמחוברים בחיבור מקבילי אך בצורה הפוכה, ובאמצעות רגל שער משותפת. רכיב זה מסומן בצורה הבאה:



הערה:

רכיב ה-Triac מיוצר לזרמים הרבה יותר קטנים מרכיב ה-SCR אך הוא עדין נחשב כרכיב הספק. בשימוש בעומסים גדולים הצורכים זרמים $>15A$ נעזרים במימוש ה-Triac באמצעות SCR-ים.

3.2.2-אופיין מעשי של רכיב ה-Triac



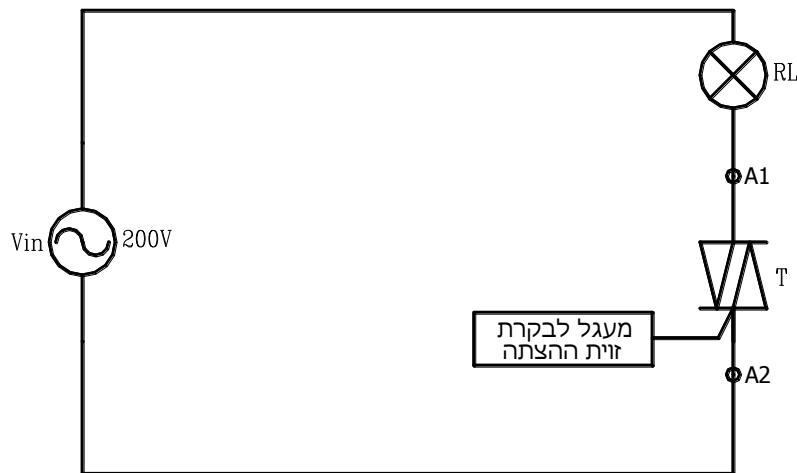
הערות:

א. גם עבור רכיב זה ישנם תנאים קיצוניים שנתונים ע"י היצרן, מעגלי הגנה לתנאים אלו זהים ל-SCR.

ב. אותן שיטות להצתה וכיבוי שתקפה ב-SCR קיימים גם כאן.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון:

1. על המנורה נקובים הערכים הבאים: $200V/100W$.
2. מעגל הבקרה מייצר פולסים בהתאם לביטוי המתמטי הבא:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + k\pi \quad \text{כאשר } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$
- א. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגלים הבאות:
 $V_{in}, U_{RL}, V_{A1-A2}, I_{A1-A2}$.
- ב. חשב את הזרם הממוצע במנורה.
- ג. חשב את ההספק המתפתח במנורה.
- ד. חשב בצורה אינטואיטיבית את זווית ההצתה במעגל אם ידוע שההספק המתפתח במנורה הוא $50W$.
- ה. קבע את תחום זווית ההצתה כך שתחום ההספק שיתפתח במנורה יהיה $20W-50W$ העזר באופנים.

פתרון לתרגיל דוגמא:

הערות:

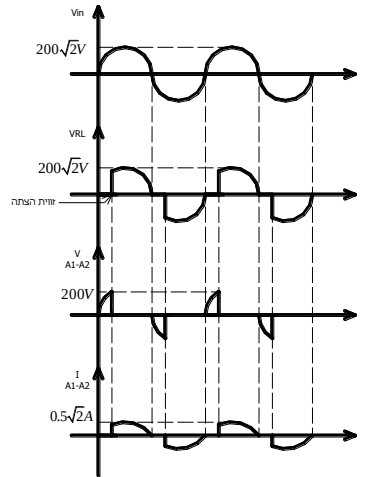
1. מנתוני המנורה הנקובים ניתן לקבוע שכאשר היא תחובר ישירות לרשת יתפתח עליה $100W$.
2. מנתוני המנורה הנקובים ניתן למצוא את התנגדותה (בטמפ' העבודה שלה) $RL = \frac{U_{RL}^2}{P_{RL}} = \frac{200^2}{100} = 400\Omega$.
3. מהביטוי המתמטי של מערכת הבקרה ניתן לקבוע שהפולס הראשון יופיע בזווית- $\alpha = \frac{\pi}{4} + k\pi = \frac{180}{4} + 0 * 180 = 45^\circ$ וממנו יופיעו פולסים נוספים בצורה מחזורית אך בתוספת 180° .

א. צורות גלים:

$$U_{A1-A2}(\alpha) = U_{AK(max)} * \sin \alpha$$

$$U_{A1-A2}(45^\circ) = 200\sqrt{2} * \sin 45 = 200V$$

$$I_{A1-A2(max)} = I_{RL(max)} = \frac{U_{RL(max)}}{RL} = \frac{200\sqrt{2}}{400} = 0.5\sqrt{2}A$$



ב. חישוב זרם ממוצע דרך המנורה

$$I_{RL(av)} = 0A$$

שטחים זהים מבטלים זה את זה.

ג. חישוב הספק המתפתח במנורה

$$P_{RL} = \frac{U_{RL(rms)}^2}{RL}$$

$$U_{RL(rms)} = \frac{U_{RL(max)}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

$$U_{RL(rms)} = \frac{200\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{45\pi}{180} + \frac{\sin 90}{2} \right)} = 190.7V$$

$$P_{RL} = \frac{190.7^2}{400} = 90.916W$$

ד. ההספק הנקוב של המנורה הוא 100W ללא בקרת הספק. וכאשר מתבצעת בקרת הספק וההספק המתפתח על המנורה הוא 50W המשמעות היא שזווית ההצתה היא 90° וזאת משיקולי שטחים.

ה. עבור $PRL=50W$

$$URL(rms) = \sqrt{PRL * RL} = \sqrt{50 * 400} = 141.42V$$

$$\frac{URL(rms)}{Vin(rms)} = \frac{141.42}{200} = 0.707$$

לפי האופיין עבור מקדם -0.707 $\beta=90^\circ$ ולכן $\alpha=180-90=90^\circ$.

עבור $PRL=20W$

$$URL(rms) = \sqrt{PRL * RL} = \sqrt{20 * 400} = 89.44V$$

$$\frac{URL(rms)}{Vin(rms)} = \frac{89.44}{200} = 0.442$$

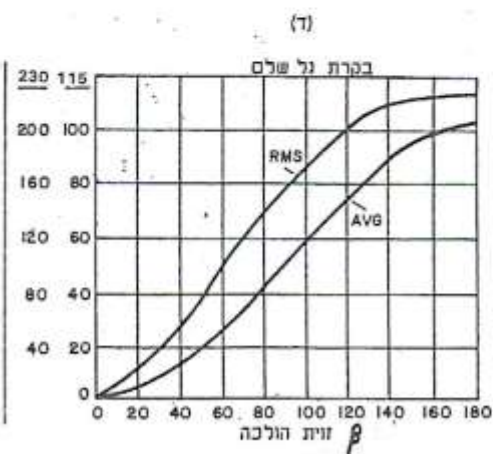
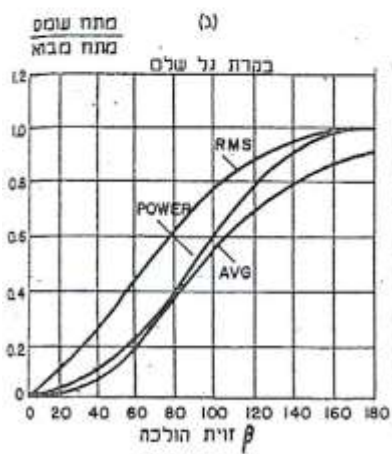
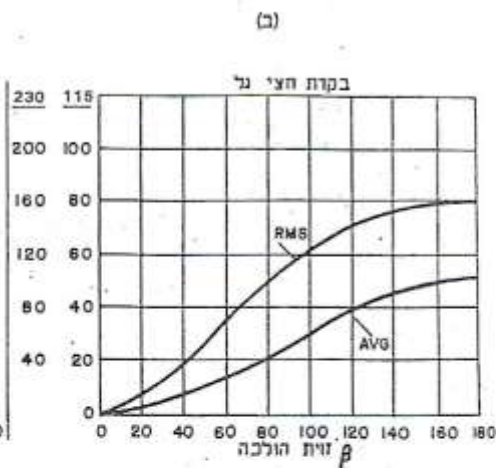
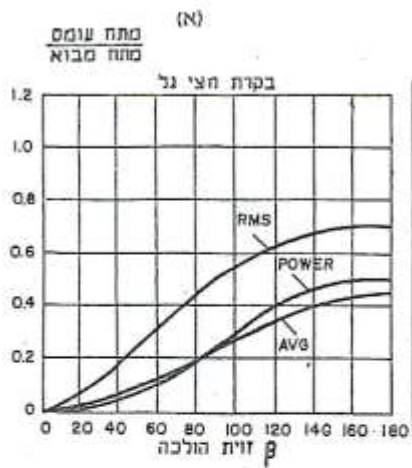
לפי האופיין עבור מקדם -0.442 $\beta=60^\circ$ ולכן $\alpha=180-60=120^\circ$.

ומכן תחום זווית ההצתה יהיה: $90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

קורס- אלקטרוניקה של מערכות הספק-חלק א'

בקרית הספק בקרית גרפית

$$\phi + \beta = 180^\circ$$

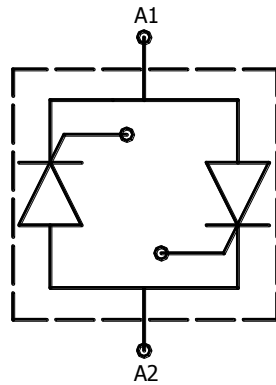


גרפים (ב) ו- (ד) מוצגים אך ורק עבור מתח
הנני של $230V_{rms}$ (ישראל) או $115V_{rms}$ (ארצות)

3.3.1- רכיב ה- Diac

ה-Diac זהו רכיב שמשתייך לקבוצת התריסטורים אך הוא לא נחשב כרכיב הספק אלא אך ורק כרכיב עזר לערוץ ההספק.

ה-Diac מסומן באופן הבא:



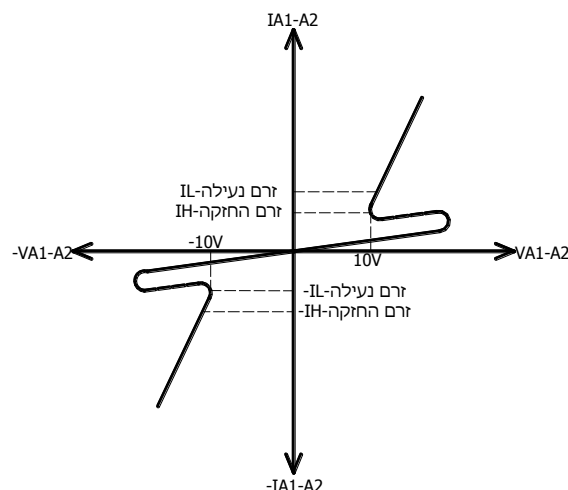
מימוש



סימול

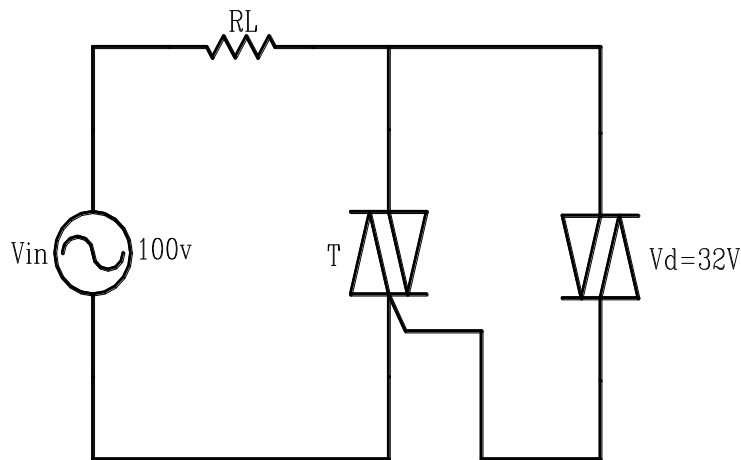
ניתן לראות על פי המימוש ה-Diac בעזרת ה-SCRים שאת ה-Diac ניתן להצית רק כאשר המתח על פניו עולה מעל מתח ההצתה שלו (אין ל-Diac רגל שער). ה-Diac אינו מהווה מתג אידיאלי, כלומר כאשר הוא מוליך המתח על פניו בערך 10V. דבר זה נוצר על חשבון מתחי ההצתה הנמוכים שלו, סדר גודל של מתחי הצתה של ה-Diac נע 15-60V וזאת הסיבה שאת ה-Diac נוהגים שלא לחבר לערוץ ההספק.

3.3.2- אופיין מעשי של רכיב ה-Diac

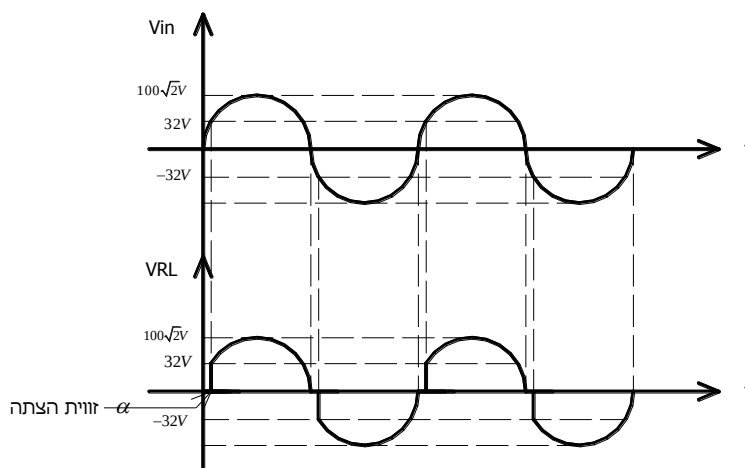


3.3.3-מעגל Trimmer-מעגל לבקרת הספק בעל זווית הצתה אחת בלבד.

המעגל כמתואר באיור הבא:



צורת גלים:



הסבר למעגל:

במעגל מחובר Diac בעל מתח הצתה של 32V. ניתן לראות שה-Triac יוצת רק אם יגיע לרגל השער שלו פולס של זרם. פולס כזה יכול להגיע רק כאשר ה-Diac מוצת. בהתחלה ה-Triac במצב כבוי ולכן המתח על פניו הוא כמו מתח המקור ובקרב טוב זה גם המתח הנופל על ה-Diac. עד למתח הפריצה של ה-Diac $V_{RL} = 0V$. ברגע שהמתח על ה-Diac עובר את מתח הפריצה שלו הוא מוצת ומצית איתו את ה-Triac וככה וזאת כי הזרם יעדיף לעבור דרך ה-Triac. רק כאשר המתח על פני נגד העומס יורד ל-0V ה-Triac כבה. אותה פעולה בדיוק נקבל עבור החצי מחזור השלישי.

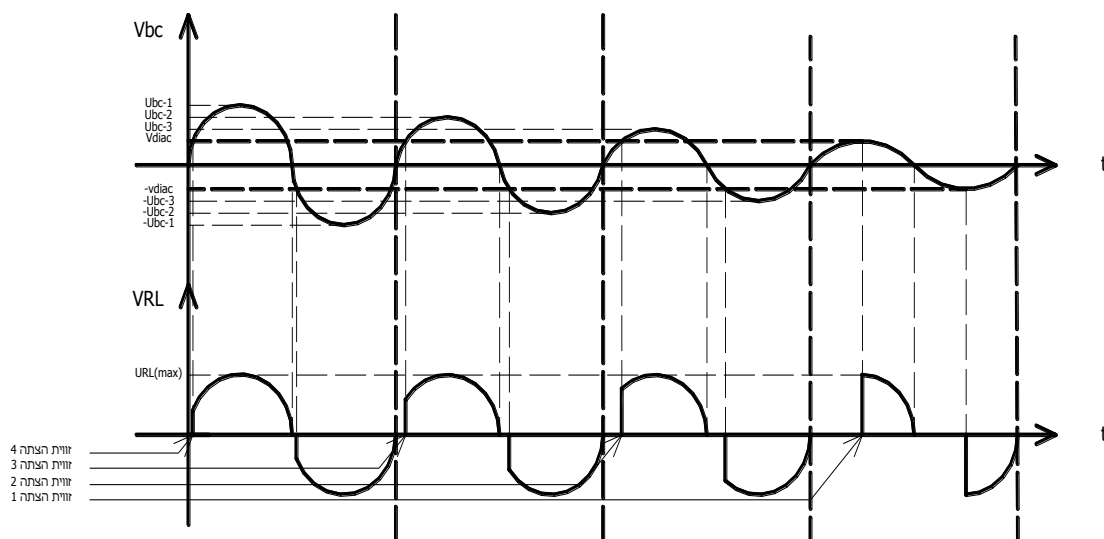
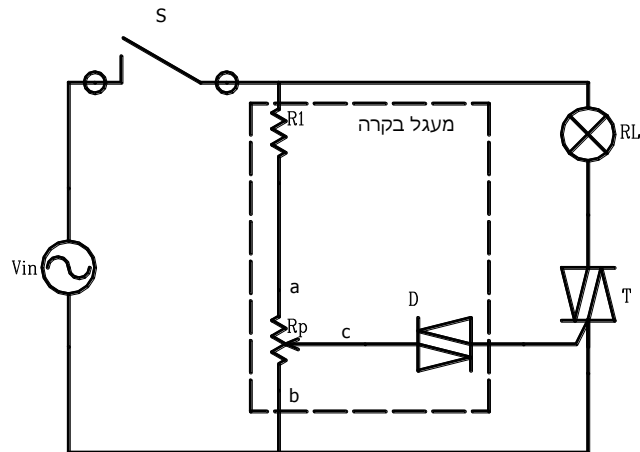
הערות:

1. מעגל זה איננו שימושי בהספקים גבוהים והסיבה לכך היא שזרם ההצתה שנכנס לרגל השער של ה-Triac מגיע מערוץ ההספק.
2. מי שקובע את זווית ההצתה במעגל הוא אותו מתח הצתה של ה-Diac. ככל של-Diac מתח הצתה גבוה יותר זווית ההצתה שתתקבל תהיה גדולה יותר.
3. זווית ההצתה המקסימאלית שיכולה להופיע במעגל זה היא 90° .
4. על מנת לחשב את זווית ההצתה במעגל לעזר בביטוי הבא:
$$U(\alpha) = U(max) * \sin \alpha$$
$$U(diac) = U(max) * \sin \alpha$$
$$\sin \alpha = \frac{U(diac)}{U(max)}$$
$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{U(diac)}{U(max)} \right)$$
5. חיבור טורי של Diac-ים גורם לכך שזווית ההצתה במעגל הולכת וגדלה (המעגל מוצת כאשר מתח המקור מגיע לסכום של מתחי ההצתה של ה-Diac-ים שחוברו בטור), אך דבר זה בו זמנית מגדיל את איבודי ההספק במעגל.

3.3.4-מעגל Dimmer-מעגל לבקרת הספק בעל זווית הצתה הניתנת לשינוי.

קיימים סוגים שונים של מעגלים אשר מבצעים את פעולת הדימר (עמעם). במעגלים אלו הרעיון ביצוע בקרת הספק לגל שלם לא מיושר תוך כדי אפשרות לשינוי הזווית ההצתה של המעגל.

המעגל נראה באיור הבא:



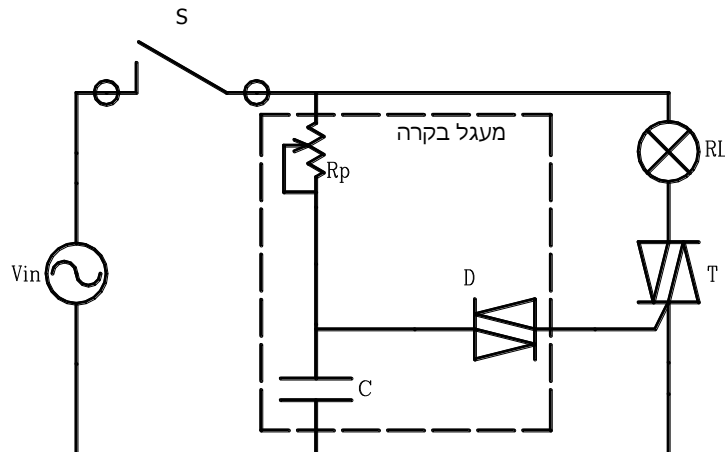
הסבר למעגל:

המעגל מבצע את פעולת בקרת ההספק במנורה על פי שיטת ה-Dimmer. כאן שינוי במצב הפוטנציומטר משנה את רמת המתח בין הנקודות b ו- c שזה המתח שמופיע על ה-Diac. רק כאשר המתח בנקודות b ו- c מגיע למתח ההצתה של ה-Diac הוא מוצת ומצית אחריו את ה-Triac.

הערות:

1. מעגל זה איננו מהווה דימר מעשי בגלל חסרונות רבים. החיסרון הבולט הוא שזווית ההצתה במעגל יכולה לנוע קצת יותר מ- 0° ועד למקסימום 90° .
2. חיסרון בולט נוסף הוא ששינויים עדינים במצב הפוטנציומטר גורמים לשינויים חדים בזווית ההצתה.
3. ערוץ ההספק במעגל זה מכיל את מקור המתח, המתג הראשי, רכיב ה-Triac ורכיב העומס עצמו. לעומתו ערוץ הבקרה מכיל את הנגדים R1 ו-Rp ואת רכיב ה-Diac.
4. במעגל זה קיימים בזבזי הספק גבוהים בתוך מעגל הבקרה, והפיתרון לכך לחבר שנאי במערכת כך שמתח ההזנה למעגל הבקרה יהיה נמוך יותר ומכאן שהספק המתבזבז יהיה נמוך יותר.

3.3.5- מעגל לבקרת הספק מסוג Dimmer משופר.



פיתוח נוסחאות:

$$X_c = \frac{1}{j\omega c}$$

$$\vec{U_c} = \frac{V_{in} * X_c}{X_c + R_p} = \frac{V_{in} * \frac{1}{j\omega c}}{\frac{1}{j\omega c} + R_p} = \frac{V_{in}}{1 + jR_p\omega c}$$

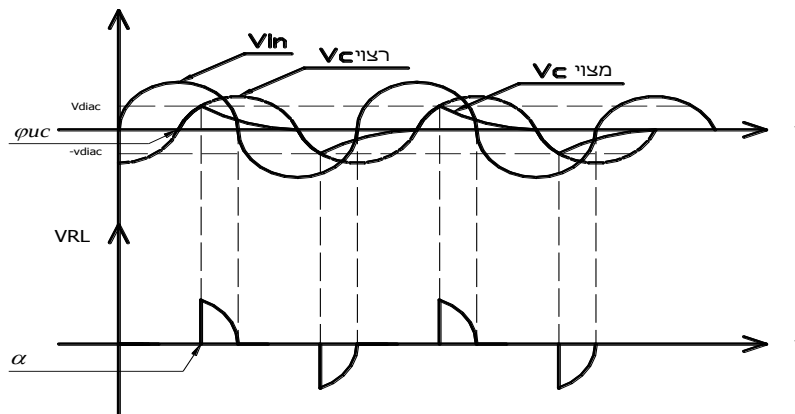
$$\vec{U_c} = \frac{V_{in}}{1 + \frac{1}{j\omega c}} = \frac{V_{in} \angle 0}{\sqrt{1^2 + (R_p\omega c)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{R_p\omega c}{1}\right)}$$

$$|U_c|(max) = \frac{V_{in}(max)}{\sqrt{1 + \underbrace{(R_p\omega c)^2}_{\mathcal{T}}}}$$

$$\varphi_{uc} = -\tan^{-1}\left(\underbrace{R_p\omega c}_{\mathcal{T}}\right)$$

$$U_c(\alpha) = U_c(max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

צורות גלים:



הערות:

1. גם במעגל זה שינוי במצב הפוטנציומטר גורם לשינוי בזווית ההצתה.
2. המתח על הקבל משתנה גם מבחינת הגודל וגם מבחינת המופע כאשר משנים את ערך הפוטנציומטר. כאשר ערך הפוטנציומטר שווה ל-0 המתח על הקבל שווה ערך למתח המקור הן מבחינת הגודל והן מבחינת המופע, ככל שמגדילים את ערך הפוטנציומטר המתח על הקבל מתחיל לקטון ואילו זווית המופע שלו מתחילה לגדול לכיוון ה- -90° . רק כאשר ערך הפוטנציומטר גדול מאוד המתח על הקבל קטן מאוד אך זווית המופע שלו בקרוב טוב שווה ל- -90° .
3. ניתן לבטא כאמור את המתח הרגעי שבקבל באמצעות הביטוי המתמטי:

$$U_c(\alpha) = U_c(max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$
 באמצעות ביטוי זה ניתן למצוא את זווית ההצתה במעגל עבור מצב מסוים של הפוטנציומטר. יש לזכור שעד לרגע הצתת ה-Diac המתח על פניו בקרוב טוב כמו המתח על הקבל ורק כאשר המתח על הקבל מגיע למתח ההצתה של ה-Diac, ה-Diac מוצת וזה קורה בזווית ההצתה α . את זווית ההצתה ניתן לחשב באופן הבא:
 ברגע ההצתה-

$$U_c = U_{diac}$$

ולכן-

$$U_{diac} = U_c(max) * \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

$$\frac{U_{diac}}{U_c(max)} = \sin(\alpha + \varphi_{uc})$$

$$\sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(max)}\right) = \alpha + \varphi_{uc}$$

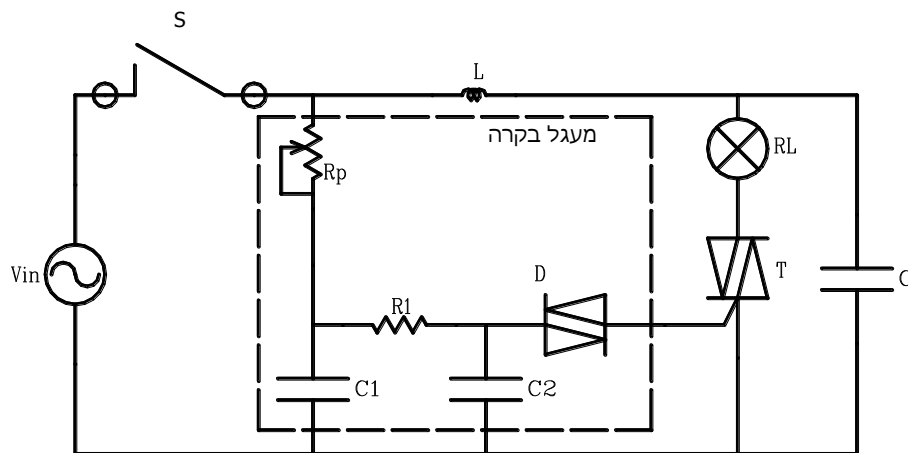
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(max)}\right) - \varphi_{uc}$$

4. יש לזכור שהמתח על הקבל מתנהג על פי אותו ביטוי רגעי עד לרגע ההצתה, מהרגע שה-*Diac* מוצת הוא בעצם מקצר את הקבל וגורם להתפרקותו.
5. יתכן כי לא יופיע ערך הקבל ומצב הפוטנציומטר אלא ערך קבוע הזמן $\mathcal{T}$ שהרי ידוע כי: $\mathcal{T} = R p * C$.
6. על פני נגד העומס מופיע בקרת גל שלם (לא מיושר), ועל מנת לחשב ערכים יעילים בנגד העומס נעזר בנוסחאות המתאימות.
7. גם במעגל זה תחום הוויסות הוא 90° אבל יש לו יתרון על המעגל ה-*Dimmer* הקודם בכך ששינויים קטנים במצב הפוטנציומטר גורם לשינויים עדינים בזווית ההצתה, וכמו כן מעגל הבקרה מכיל קבל במקום נגד נוסף וזה מקטין את איבודי ההספק במעגל הבקרה.

3.3.6-מעגל לבקרת הספק מסוג Dimmer סופי.

אחד החסרונות הגדולים במעגל הקודם הוא שתחום הוויסות של זווית ההצתה אינו יכול להיות גדול מ- 90° אך ידוע שכאשר מחברים חוליות RC בשרשרת (קסקדה) ניתן לקבל הזזת מופע רחבה יותר.

באופן עקרוני מעגל הדימר נראה באיור הבא:



הערות:

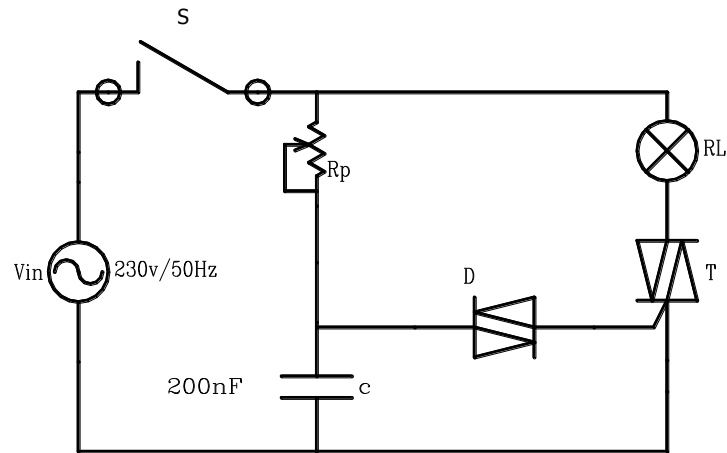
1. באופן מעשי מחוברים למעגל גם סליל הגנה בפני שינויים פתאומיים של זרם על רכיב ההספק $\frac{di(Triac)}{dt}$ וגם קבל בפני שינויים פתאומיים של מתח על רכיב ההספק $\frac{dv(Triac)}{dt}$ (ראה התייחסות לתנאים קיצוניים בתרסטורים).
2. גם מעגל זה שינוי המצב הפוטנציומטר יגרום לשינויים בזווית ההצתה, אלא שכאן נוכל לקבל תחום וויסות רחב יותר כמעט 180° .
3. ניתן להוסיף שנאי בכניסה למעגל הבקרה על מנת להקטין את איבודי ההספק במעגל הבקרה.

שימושים במעגל ה-Dimmer

1. פעולת הדימר נפוצה בשימוש בעמעם אורות ביתי או מסחרי (עבור נורות ליבון או הלוגן).
2. בקרת מהירות למנועים אוניברסאליים. מנוע אוניברסאלי זהו מנוע לזרם ישר המחובר בערעור טורי, מנועים כאלה ניתן למצוא במברגות או מקדחות יד בעלי הדק אלקטרוני לוויסות מהירות הסיבוב.

תרגיל דוגמא:

נתון מעגל לבקרת הספק כמתואר באיור הבא:



נתון כי:

- א. על הנורה הנתונים הבאים - $230V/500W$.
- ב. מתח הפריצה של ה-Diac הינו $64V$.
- ג. ערכו של הפוטנציומטר הינו $60K\Omega$.

חשב:

- א. זווית ההצתה במעגל.
- ב. שרטט באופן איכותי ובהתאמה את צורת הגל בעומס.
- ג. הספק בעומס.

פתרון לתרגיל דוגמא:

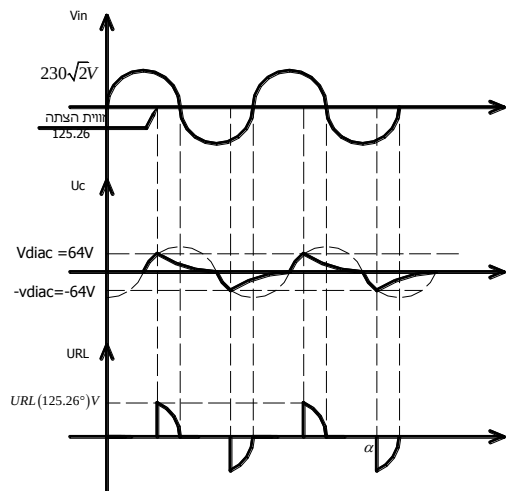
א. חישוב זווית ההצתה:

$$|U_c|(\max) = \frac{V_{in}(\max)}{\sqrt{1 + (R_p \omega c)^2}} = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{1 + (60 \cdot 10^3 * 2\pi * 50 * 200 * 10^{-9})^2}} = 83.4V$$

$$\varphi_{uc} = -\tan^{-1}(R_p \omega c) = -\tan^{-1}(60 \cdot 10^3 * 2\pi * 50 * 200 * 10^{-9}) = -75.14^\circ$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{U_{diac}}{U_c(\max)}\right) - \varphi_{uc} = \sin^{-1}\left(\frac{64}{83.4}\right) - (-75.14) = 125.26^\circ$$

ב. צורות גלים:



ג. חישוב ההספק המתפתח בעומס:

$$URL(rms) = \frac{URL(max)}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)} =$$

$$URL(rms) = \frac{230\sqrt{2}}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \frac{125.26\pi}{180} + \frac{\sin(2 * 125.26)}{2} \right)} = 90.278V$$

$$RL = \frac{URLn(rms)^2}{Pn} = \frac{230^2}{500} = 105.8\Omega$$

$$PRL = \frac{URL(rms)^2}{RL} = \frac{90.278^2}{105.8} = 77W$$

3.4.0- מיתוג בנקודת האפס (Z.V.S (Zero Voltage Switching

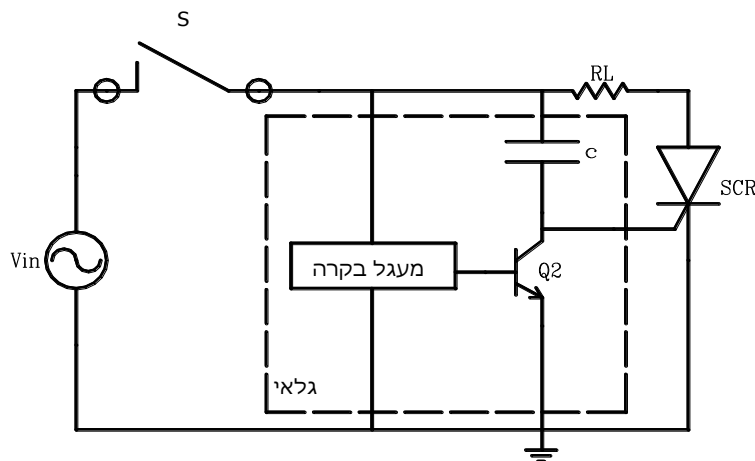
3.4.1- מבוא

על מנת לבצע בקרת הספק בצרכנים מסוימים בז"ח אנו נעזרים באותם מעגלים בבקרת הספק שקיימים כאשר השימושי מבין כולם הוא ה-Dimmer. Dimmer יש חיסרון בצורת הגל שהוא מייצר, על פי "פורייה" לכל אות מחזורי שהוא לא סינוס יש הרמוניות בתדרים שהם כפולות תדר הסינוס המקורי. המשרעת (U_{max}) של הרמוניות אלו הולכת וקטנה כאשר תדר ההרמוניה הולך וגדל. ידוע שאותות מתפשטים באוויר בקלות רבה כאשר הם נמצאים בתדרים גבוהים, ובמידה ולאותות אלו הספק גבוה, הוא יבוא לידי ביטוי בהפרעות רדיו שונות. תופעה זו יוצרת הפרעות אלקטרומגנטיות שמורגשות בעיקר במכשירי שמע. החוק אוסר לבצע בקרת הספק בדרך הרגילה (בקרת זווית) בעומסים הגדולים מ-10KW.

לכן קיימת שיטת מיתוג נוספת הנקראת בשם "מיתוג בנקודת האפס", הרעיון בשיטה זו היא להעביר לעומס סינוסים שלמים בזמנים שונים.

3.4.2- מעגל בשיטת Z.V.S חצי גל

מעגל זה מתואר באיור הבא:



הסבר פעולת המעגל:

ברגע סגירת המפסק S הגלאי מחובר ישירות לרשת ותפקידו לדגום את מתח הרשת. בנגד העומס הנמצא בערוץ ההספק לא יזרום זרם עד אשר ה-SCR יוצת. ברגע שהגלאי חש שמתח הרשת חצה את נקודת האפס במגמת עליה בלבד הוא שולח פולס לרגל השער של ה-SCR ובכך הוא מצית אותו. התוצאה שעל פני נגד העומס יכולים להופיע אך ורק חצאי סינוסים שלמים.

הגלאי מכיל בתוכו קבל, מתג אלקטרוני שהוא בדך כלל טרנזיסטור מסוג Fet וכן מעגל בקרה שבאמצעותו ניתן לשלוט על בקרת ההספק בנגד העומס. במוצא מעגל הבקרה יכול להתקבל או "0" או "1".

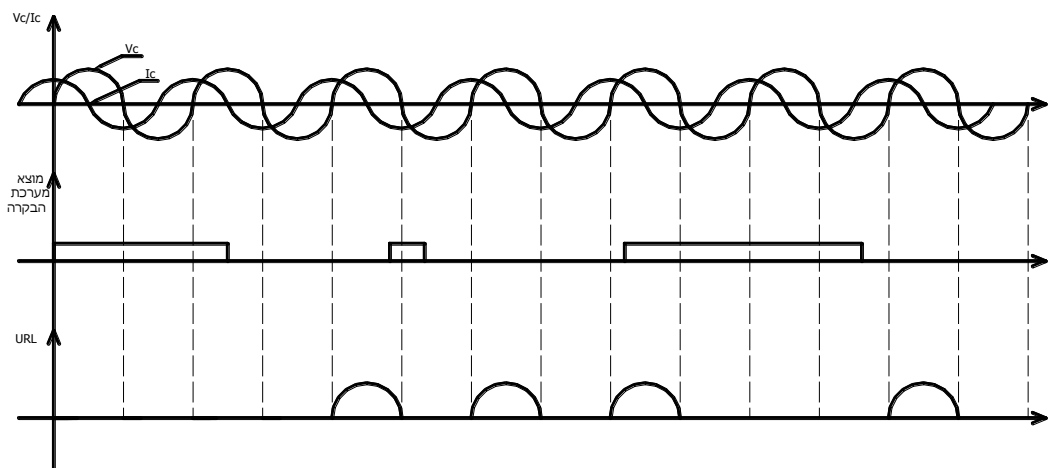
1. עבור מצב שבמוצא הבקרה מופיע "1":

במצב זה הטרנזיסטור נמצא ברוויה וניתן לראות אותו כמתג סגור. במצב זה הקבל מחובר ישירות לרשת ואילו רגל השער של ה-SCR מקוצרת לאדמה. המשמעות היא שה-SCR במצב זה לעולם לא יוצת כלומר אין הספק בנגד העומס.

2. עבור מצב שבמוצא הבקרה מתקבל "0":

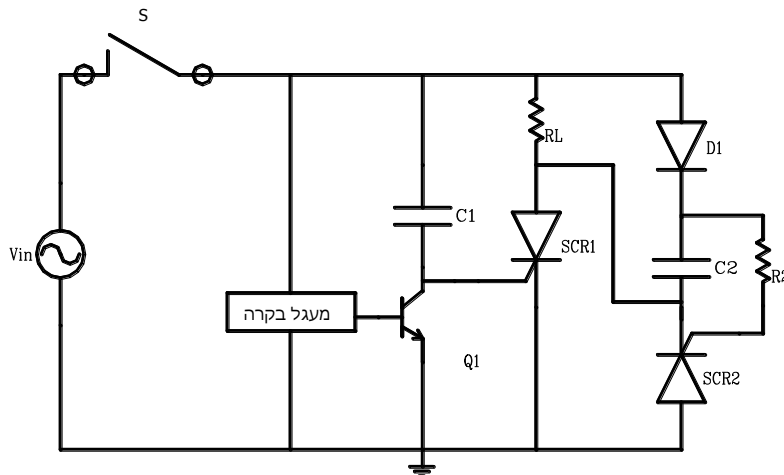
במצב זה זורם זרם באופן תמידי ברגל השער של ה-SCR. על הקבל בקירוב טוב נופל מתח הרשת, אך ידוע שבקבל הזרם מקדים את המתח ב- 90° , כלומר כאשר מתח הרשת חוצה את נקודת האפס הזרם בקבל הוא מקסימאלי. המעגל נבנה כך שעוצמת הזרם המקסימאלית דרך הקבל היא כזו שדרושה כדי להצית את ה-SCR $I_c(max) \geq IL$.

צורות גלים:



3.4.3-בשיטת Z.V.S גל שלם

מעגל זה מתואר באיור הבא:



הסבר לפעולת המעגל:

גם מעגל זה במוצא מעגל הבקרה מתקבלים פולסים הרמות של "0" ו-"1". שליטה על בקרת ההספק בנגד העומס תתבצע ע"י שינוי כמות הפולסים שיוצאים ממערכת הבקרה.

1. עבור מצב שבו במוצא מערכת הבקרה מתקבל "1"

במצב זה קבל $C1$ מחובר ישירות לרשת ואילו רגל השער של $SCR1$ מקוצרת לאדמה, המשמעות היא שלא ניתן להצית את $SCR1$. בהמשך להסבר יובן שאם $SCR1$ לא מוצת גם $SCR2$ לא יוצת.

2. עבור מצב שבו במוצא מערכת הבקרה מתקבל "0"

הסבר זה יתחלק ל-2 חלקים:

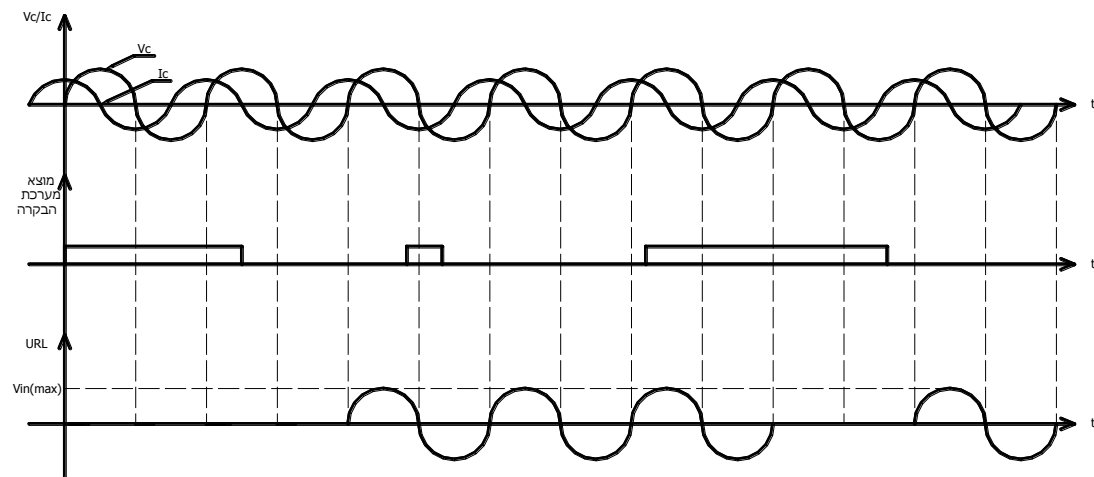
א. עבור החצי מחזור החיובי של המקור- במצב זה $SCR1$ מאופשר, $SCR2$ לא מאופשר והדיודה $D1$ בהולכה. גם במעגל זה ניתן לראות שבאופן תמידי זורם זרם לתוך השער של $SCR1$ דרך הקבל $C1$. ז"א שמתח הרשת בחצי מחזור החיובי חוצה את נקודת האפס במגמת עליה בלבד הזרם בקבל $C1$ במצב מקסימאלי וזה השלב שבו $SCR1$ יוצת. מרגע זה קורים מספר דברים: $V_{in}=U_{RL}$, והקבל $C2$ נטען באנרגיה חיובית.

ב. עבור החצי מחזור השלילי של המקור- במצב זה $SCR1$ כבה הדיודה $D1$ בקטעון ואילו הקבל $C2$ מתפרק מאנרגיה שאגר בחצי מחזור החיובי, וזאת דרך הנגד $R2$ לתוך רגל השער של $SCR2$ ובכך הוא מצית אותו. כתוצאה מכך עדין $V_{in}=U_{RL}$. כך פעולה זו מתבצעת באופן מחזורי עד לרגע ששוב במוצא מעגל הבקרה מופיע "1".

הערה:

במעגל זה ל-SCR1 קוראים Master (אדון) ואילו ל-SCR2 קוראים Slave (עבד). הסיבה לכך היא ש-SCR2 יכול להיות מוצת רק כאשר SCR1 מוצת.

צורות גלים:



(עבודת בית מס' 3 בגמר לימוד פרק זה)

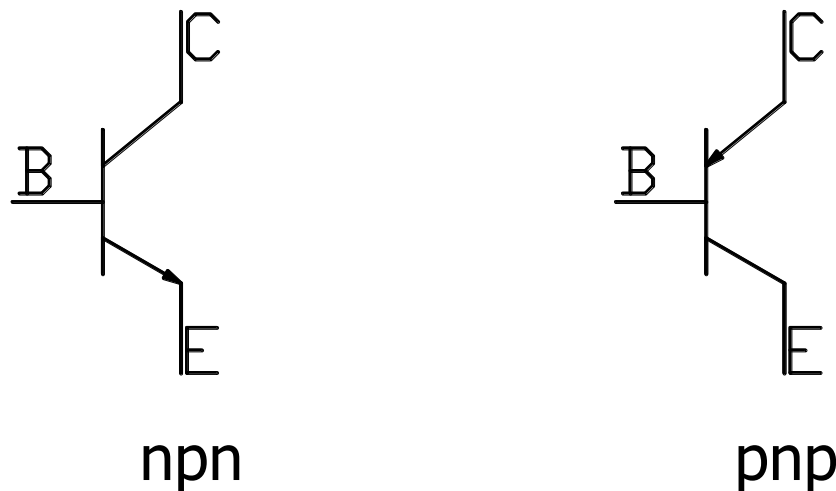
3.5.0- מתגים אלקטרוניים נוספים בבקרת הספק

חוץ ממתגים אלקטרוניים ממשפחת התריסטורים (SCR ; TRIAC ; DIAC) שנדונו בפרק זה קיימים באלקטרוניקה של מערכות הספק מתגים אלקטרוניים נוספים. רכיבים המבוססי טרנזיסטור הם רכיבים חד כיוונים כלומר הזרם יכול לזרום דרכם רק בכיוון אחד. בסימול הרכיבים מופיע חץ המצביע על כיוון הזרם המותר ברכיב (למעט ברכיב ה-Power Mosfet שכיוון הזרם המותר בניגוד לכיוון החץ).

בתריסטורים מגדירים את מצבו : "מתג סגור"-מוצת , "מתג פתוח"-כבוי.
בטרנזיסטורים מגדירים את מצבו : "מתג סגור"-רוויה , "מתג פתוח"-קטעון.

3.5.1- הטרנזיסטור הביפולארי (BJT Bipolar Junction Transistor)

סימולו:



טרנזיסטור זה אינו מתג אידיאלי המתח בין הקולקטור לאמיטר שהמתג סגור (במצב רוויה) נע בגבולות $V_{CE(set)}=0.3V-2V$.

לדוגמא בטרנזיסטור הספק מסוג זה ל-100A

ההספק המתבזז עליו יכול להגיע ל- $P_{(set)}=V_{CE}*I_{CE}=2*100=200W$.

חסרון נוסף הוא הצורך בזרם בסיס קבוע להפעלתו. בטרנזיסטורים ההגבר β

מוגדר- $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ והוא נמוך בסביבות 25 בלבד. ומכאן לפי הדוגמא על מנת

להחזיק את הטרנזיסטור ברוויה עבור זרם קולקטור של 100A יש צורך בזרם

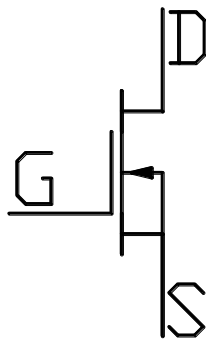
בסיס של- $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{100}{25} = 4A$. וזה זרם גבוה למערכת בקרה.

עבור חק- כאשר $V_B="1"$ המתג ברוויה , כאשר $V_B="0"$ המתג בקטעון.

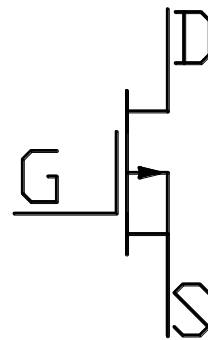
עבור חק- כאשר $V_B="0"$ המתג ברוויה , כאשר $V_B="1"$ המתג בקטעון.

3.5.2- טרנזיסטור Power Mosfet (טרנזיסטור תוצר שדה)

סימולו:



n-ch



p-ch

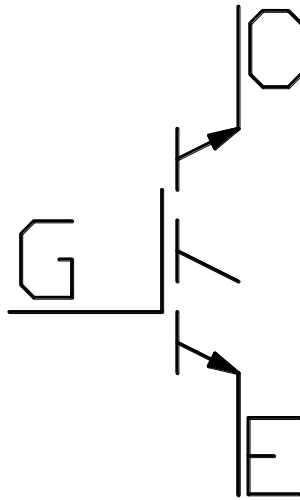
רכיב זה נחשב למתג כמעט אידיאלי. בין ההדקים - D (שפך) ו-S (מקור) קיימת התנגדות קטנה מאוד במצב רוויה של המתג. צריכת הזרם ברגל G קטנה מאוד וקיימת רק בזמן העברת המתג ממצב קטעון לרוויה וגם זאת לפרק זמן קצר מאוד. בכל הזמן שהמתג במצב רוויה או בקטעון (לאחר המעבר) אין זרם ברגל ה-G. צריכת זרם זו היא יחסית לקצב המיתוג. המשמעות לכך שאין בזבז הספק (כמעט) על הטרנזיסטור. ה-Power Mosfet הוא המהיר מבחינת קצב המיתוג לאחר מכן ה-IGBT ובסוף ה-BJT.

עבור p-ch - כאשר $V_{GS}=1$ המתג ברוויה, כאשר $V_{GS}=0$ המתג בקטעון.

עבור n-ch - כאשר $V_{GS}=0$ המתג ברוויה, כאשר $V_{GS}=1$ המתג בקטעון.

3.5.3- טרנזיסטור IGBT

סימולו:



מתג זה הוא למעשה מעגל משולב המתנהג בין ה-C (קולקטור) לבין ה-E (אמיטר) כטרנזיסטור מסוג BJT (ביפולארי) אך התנהגות רגל ה-G היא כמו בטרנזיסטור Power Mosfet (תוצר שדה). לכן מתג זה מוגדר כטרנזיסטור בעל שער מבודד.

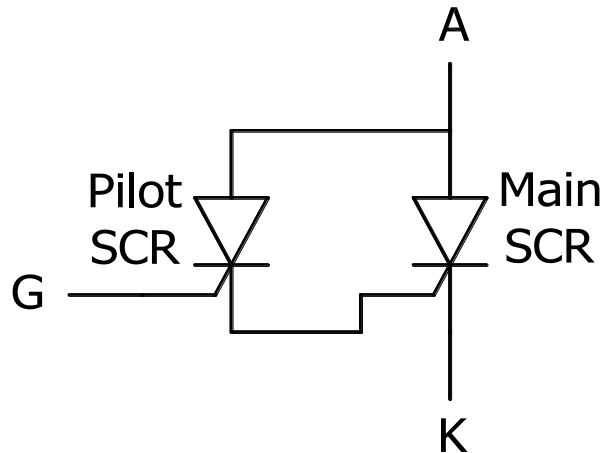
רכיב זה אינו נכנס "לרשימה עמוקה" ולכן במצב רוויה המתח בין הקולקטור לאמיטר ינוע בגבולות $V_{CE(set)} = 1.5V - 3.5V$. המשמעות היא שכאשר המתג סגור קיים בזבז הספק על הטרנזיסטור. בזבז הספק זה גדול יותר מבזבז ההספק בטרנזיסטורים ביפולריים אך יתרונו הבולט קצב מיתוגו הגבוה יותר.

3.6.0- תריסטורים מיוחדים בבקרת הספק

קיימים 2 סוגים של SCR-ים. כאלה המיועדים לבקרת פאזה והם פועלים במתח הרשת ובקצב שלה, וכאלה המיועדים ל-Inverters והם בעלי קצב מיתוג גבוה יותר שאינו עולה בכל מקרה על 20KHz. שהעיקרים שבהם מפורטים להלן.

3.6.1- תריסטור Amplifying Gate SCR

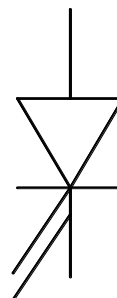
במהפכים (Inverters) דרושים SCR-ים בעלי מהירות הצתה גבוהה לשם כך פותח הרכיב Amplifying Gate SCR שהוא למעשה צרף של 2 SCR-ים כמתואר באיור הבא:



3.6.2- תריסטור GTO (Gate Turn Off)

קיים רכיב נוסף במשפחת התריסטורים שנקרא GTO רכיב זה שמיועד לזרמים גבוהים (100A ויותר). רכיב זה הוא SCR על ידי מתן דופק שלילי ברגל השער שלו ניתן להביאו למצב כיבוי (מה שאסור עבור SCR-ים רגילים לפי הוראות היצרן). חסרונו הגדול הוא זקוק לעוצמת זרם גבוה ברגל השער שלו כדי שהוא יכבה $I_g = \frac{I_n}{6}$ כאשר I_n הוא הזרם הנומינאלי הזורם במעגל הספק. ובכך מצריך מעגל בקרה מיוחד לצורך הכיבוי.

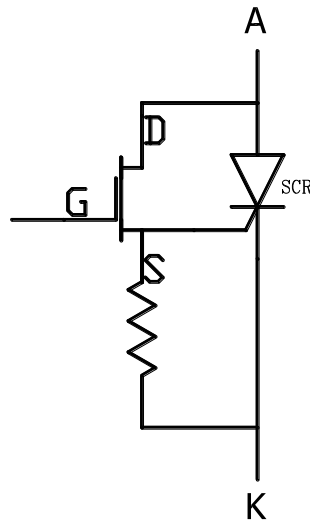
סימולו:



3.6.3- תריסטור MCT (Mos Controlled Thyristor)

רכיב זה דומה ל-GTO ובתוספת של Power Mosfet ברכיב זה מספקים מתח קבוע לרגל השער של הטרנזיסטור כדי לגרום לכיבוי הרכיב.

רכיב זה מתואר באיור הבא:



3.6.4- LASCR (Light Activated SCR)

רכיב זה הוא SCR שבצומת G-K שלו מותקן תא סולרי הרגיש והמוצת ע"י אור. רכיב זה מיוצר לזרמים של עשרות אמפרים.

רכיב זה מתואר באיור הבא:

