

מקדם ההספק (Power factor) ושיפורו



כתיבה ועריכה: סגל אריאל

מבוא

במתקני חשמל מבחינים בין 2 סוגי צרכנים:

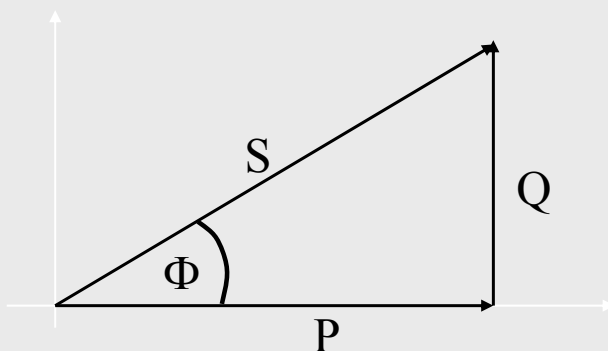
1. צרכנים בעלי צריכת הספק פעיל P - המבצע עבודה.
 2. צרכנים בעלי יכולת אגירת אנרגיה כמו סלילים וקבלים גורמים להספק עיוור (ריאקטיבי) Q - שאינו מבצע עבודה.
- מרבית צרכני החשמל כמו מנועים, נורות פריקה, שנאים מכילים סלילים. גם למוליכים עצמם השראות עצמית ניכרת. צרכנים אלה גורמים להספק ריאקטיבי שנע הלך ושוב בקווי ההולכה והחלוקה מנקודת הייצור ועד לנקודת הצריכה.

מבוא

הנזקים לחברת החשמל ולמשק הלאומי בעקבות ההספק הריאקטיבי:

- צורך בבניית תשתית רחבה יותר של מערכת אספקת החשמל של חברת החשמל ושל הצרכנים, תוך הגדלה בהוצאות הבניה.
- גידול בהפסדי האנרגיה של המערכת מגדיל את השימוש בדלקים לייצור החשמל וכפועל יוצא מכך גדלה התלות בדלק מיובא וגדלות ההוצאות במטבע זר,
- שריפה מוגברת של דלקים והגדלת הפגיעה באיכות הסביבה.

מקדם הספק



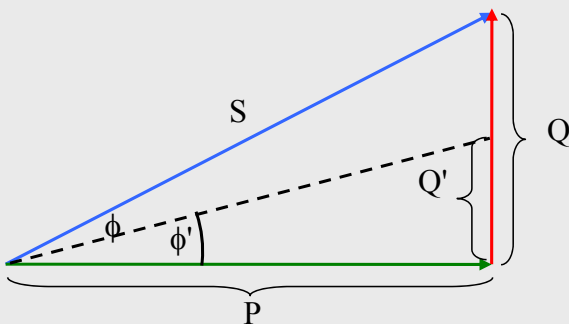
$$\cos\phi = \frac{P}{S}$$

- ככל שערכה של הזווית ϕ גדול יותר גדל ההספק המדומה S והזרם המגיע בקווים. גודל הזרם כזכור מכתוב את שטחי חתך המוליכים, כיוול ההגנות, הספקי השנאים, הספקי הגנרטורים וגודל המתקן.

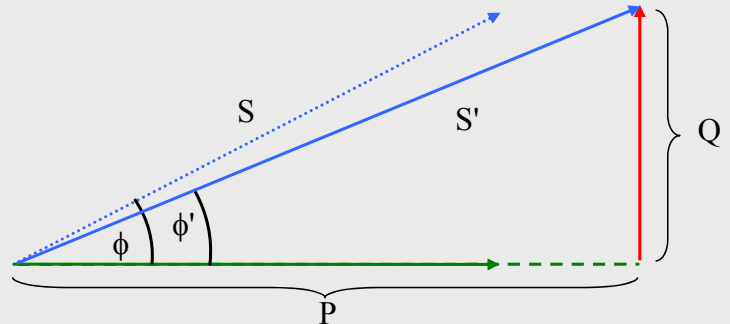
מקדם הספק

- מקדם ההספק נובע מצריכת אנרגיה ריאקטיבית על ידי הצרכן. חברת החשמל מחייבת בתוספת תשלום למחיר החשמל צרכני מתח נמוך שמקדם ההספק שלהם קטן מ-0.92.
- תוספת התשלום יכולה להגיע למספר עשרות אחוזים למחיר החשמל (פרוט התוספת בתשלום מופיע בהמשך). על מנת להקטין את ההספק הריאקטיבי, להגדיל את מקדם ההספק ולהימנע מתשלום תוספת במחיר החשמל נדרש הצרכן לשפר את מקדם ההספק לערך הגדול מ-0.92.
- כיצד ניתן לבצע את הגדלת מקדם ההספק?
- אם נבחן את משולש ההספקים הרי שכדי להקטין את הזווית ϕ בין P ל-S יש לבצע אחת משתי חלופות:
- הגדלת ההספק הפעיל P ללא שינוי בגודל ההספק העיוור Q.
- הקטנת ההספק העיוור Q בלי הגדלת ההספק הפעיל P.

שיפור מקדם ההספק



הקטנת ההספק Q ללא שינוי ב-P



הגדלת ההספק P ללא שינוי ב-Q

הקטנת ההספק P ללא שינוי ב-Q מגדילה את צריכת החשמל במתקן וכמובן את התשלום בגין השימוש בו

שיטות להגדלת מקדם ההספק

2 שיטות מקובלות לשיפור מקדם ההספק:

1. הקטנת ההספק ההגבי ההשראי במתקן.

2. הוספת הספק הגבי קיבולי לקיזוז חלק מההספק ההגבי ההשראי.

1. הקטנת ההספק ההגבי ההשראי במתקן יכולה להתבצע על ידי הפסקת עומסים הגביים כשאינם בשימוש, או במצב ריקם כמו שנאים בריקם, מכונות ריתוך וכדומה. דרך נוספת היא לבחור מנועים מתאימים להספק המתקן אותו הם מיועדים להניע ולא גבוה מכך (כפי שנהוג במקומות רבים). כשהמנוע אינו עמוס או שהספקו גבוה מהספק העומס מקדם ההספק שלו נמוך (ההספק ההגבי של המנוע נותר קבוע ללא קשר להעמסה בעוד שההספק הפעיל שהוא לוקח מהרשת תלוי בעומס המכני עליו).

שיטות להגדלת מקדם ההספק

מקדם ההספק $\cos\phi$	אחוז העמסת המנוע
0.17	ריקם 0%
0.55	25%
0.73	50%
0.80	75%
0.85	100%

2. הוספת היגב קיבולי כדי לקזז את ההספק ההגבי ההשראי יכולה להתבצע בשתי דרכים:

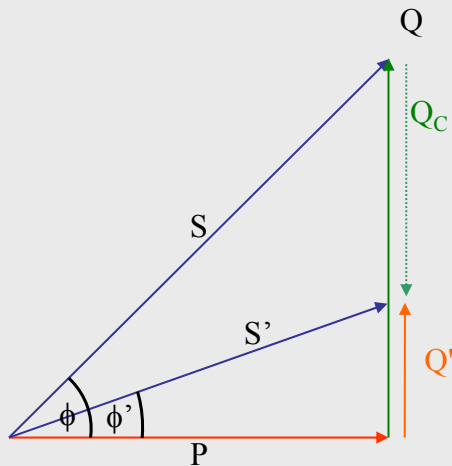
(1) שילוב קבלים במתקן החשמל בדרכים שיפורטו בהמשך, לקיזוז ההספק ההשראי, לערך שיבטיח מקדם הספק גדול מ-0.92.

(2) שימוש במנועים או גנרטורים סינכרוניים במשטר של עירור יתר. בתנאים כאלה עובד המנוע או הגנרטור כקבל כלפי הרשת כשהקיבול נקבע על פי ערך זרם העירור של המכונה.

ערך הקבלים לשיפור מקדם ההספק

במתקן שההספק העיוור שלו Q ונדרש לשפר בו את מקדם ההספק לערך מרבי השווה ל- Q' , יש להוסיף הספק הגבי קיבולי השווה ל- Q_C .

ההספק העיוור Q במתקן שווה ל: $Q = P \cdot \tan \phi$
 ההספק העיוור Q' אחרי הוספת קבלים: $Q' = P \cdot \tan \phi'$



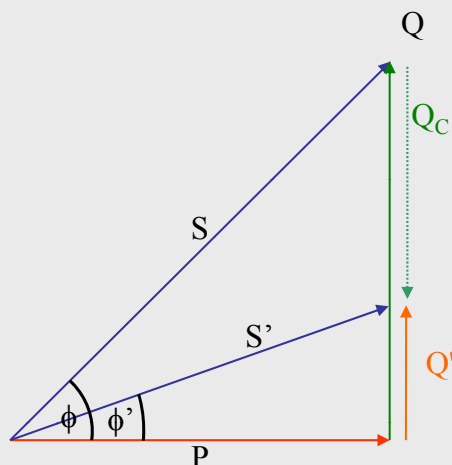
P – הספק פעיל של המתקן [W]
 Q – הספק עיוור של המתקן [VAR]
 S – הספק מדומה של המתקן [VA]
 Q' – הספק עיוור של המתקן לאחר הוספת קבלים [VAR]
 Q_C – הספק עיוור של הקבלים [VAR]

ערך הקבלים לשיפור מקדם ההספק

• ההספק ההגבי של הקבלים שיש להוסיף במתקן יהיה:

$$Q_C = Q - Q' = P \cdot \tan \phi - P \cdot \tan \phi'$$

$$Q_C = Q - Q' = P \cdot (\tan \phi - \tan \phi')$$



P – הספק פעיל של המתקן [W]
 Q – הספק עיוור של המתקן [VAR]
 S – הספק מדומה של המתקן [VA]
 Q' – הספק עיוור של המתקן לאחר הוספת קבלים [VAR]
 Q_C – הספק עיוור של הקבלים [VAR]

קבלים לשיפור מקדם ההספק

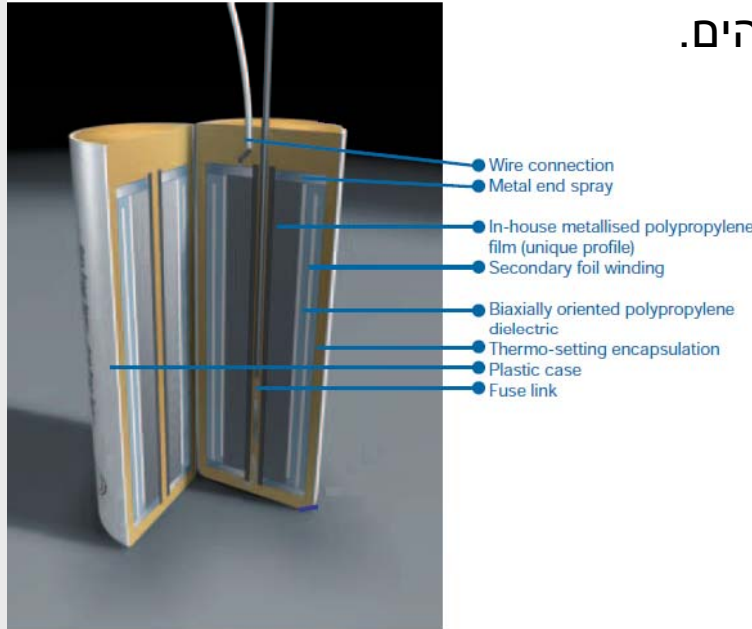
- קבלים המשמשים לשיפור מקדם הספק מוצגים בקטלוגי היצרנים על פי ההספק העיוור הקיבולי שהם תורמים למתקן (Q_C) ולא על פי קיבולם. לכן אין צורך על פי רוב לחשב את קיבול הקבלים.
- המתכנן צריך לבחור מתוך קטלוג היצרן קבלים מתאימים. יש לבחור קבלים שההספק העיוור הקיבולי שלהם גדול במעט מהרצוי ולא קטן יותר.
- שיפור לערך מקדם הספק גדול מ-0.92 אינו גורם לתוספת תשלום בעוד שערך נמוך מדי יגרום לתוספת מחיר בחשבון החשמל.
- אין משלבים קבל יחיד בגודל ההספק העיוור שיש לשפר אלא בוחרים מספר קבלים שהספקם הכולל שווה להספק העיוור הנדרש. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שההספק הפעיל וההספק העיוור במתקן משתנים באופן מתמיד. לפיכך יש צורך לגרוע או להוסיף קבלים. ערך קיבול גדול מדי גורם למתחי יתר במתקן. שיפור מקדם ההספק לערך אחד, יוצר תופעות תהודה בין הקבלים והסלילים במתקן והופעת מתחים גבוהים ממתח המקור.

קבלים לשיפור מקדם ההספק

- בתקנות החשמל נדרש לשלב בקר במתקן בו מותקנים קבלים לשיפור מקדם הספק בקיזוז מרכזי. הבקר מודד את מקדם ההספק ברשת, מחבר ומפסיק קבלים באמצעות מגענים כדי להתאים את כמות הקבלים לערך מקדם ההספק אליו הוא מתוכנת.
- מחלקים את הקבלים למספר דרגות שישולבו על ידי הבקר בהדרגה עד לערך ההספק המרבי שניתן. באופן זה מונעים מצב של מעבר להספק קיבולי במתקן.
- רצוי שהדרגות הראשונות יכילו קבלים קטנים יחסית ואילו הדרגות הסופיות קבלים גדולים יותר. בכך מונעים מצב שבעת שהמפעל מופסק, כמו בלילות, או סופי שבוע, גורמים הקבלים להספק היגבי קיבולי גדול מההספק ההיגבי ההשראי שקיים במתקן.

מבנה ותקנים

- מרבית הקבלים המיוצרים היום מיוצרים בטכנולוגית: metallized polypropylene film בטכנולוגיה זו מבוצע הבידוד בין 2 שכבות המוליך באמצעות סרט מפוליפרופילן.
- הקבלים הנמכרים בארץ עונים לתקן EN60831-1&2 ולתקן IEC 60831-1&2. התקנים זהים.



דף קטלוג של קבלים לשיפור מקדם ההספק

RATED VOLTAGE 440V, 50 Hz, 3-PHASE, DELTA CONNECTION can be used also for 415V

TYPE	ARTICLE No.	OUTPUT kVar 440 V	OUTPUT kVar 415 V	CAPACITANCE μF	CURRENT A 415/440 V	DIMENSIONS $\varnothing \times H$ (mm)	WEIGHT kg
PhMKP440.3.05	33989	5	4.4	3*27.4	6.1/6.6	64*190	0.8
PMKP440.3.08,33	46231	8.33	7.4	3*45.7	10.3/10.9	64*190	0.8
PhMKP440.3.10	36130	10	8.9	3*54.8	12.4/13.1	64*265	1.1
PhMKP440.3.11,2	33307	11.2	10	3*61.4	13.9/14.7	64*265	1.1
PhMKP440.3.12,5	45747	12.5	11.1	3*68.5	15.4/16.4	64*265	1.1
PhMKP440.3.14,0	45748	14.05	12.5	3*76.7	17.4/18.4	64*265	1.1
PhMKP440.3.12,5	35597	12.5	11.1	3*68.5	15.4/16.4	84.4*190	1.4
PhMKP440.3.14,0	35465	14.05	12.5	3*76.7	17.4/18.4	84.4*190	1.4
PhMKP440.3.15	46219	15	13.3	3*82.2	18.5/19.7	84.4*190	1.4
PhMKP440.3.16,9	45749	16.9	15	3*92.6	20.9/22.2	84.4*190	1.5
PhMKP440.3.18,8	35467	18.8	16.67	3*103.0	23.2/24.7	84.4*265	1.9
• PhMKP440.3.20	35599	20	17.8	3*109.6	24.8/26.2	84.4*265	1.9
• PhMKP440.3.22,5	45750	22.5	20	3*123.3	27.8/29.5	84.4*265	1.9
• PhMKP440.3.25	45751	25	22.2	3*137.0	30.9/32.8	84.4*265	1.9
• PhMKP440.3.28,1	45752	28.1	25	3*154	34.7/36.9	84.4*265	1.9
PhMKP440.3.30	35470	30	26.7	3*164.4	37.1/39.4	84.4*340	2.3

זרם חיבור

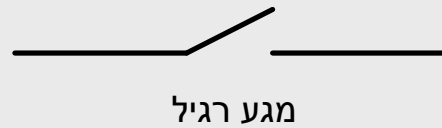
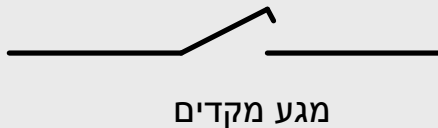
- על מנת למזער את ההפסדים בקבלים נדרשת התנגדות מינימלית של הקבל.
- מכאן שזרם החיבור של הקבלים יכול להיות גבוה מאוד. ערך מקובל בחיבור סוללה ראשונה הוא 80In ובחיבור סוללה שניה 200In .
- גורמים נוספים המשפיעים על גודל זרם החיבור הם:
 - מתח שיורי על פני הקבל.
 - הספק הקצר של השנאי.
 - הספק קבוצת הקבלים המחוברים בו זמנית.
 - התנגדות מערכת ההזנה עד הקבל.
- חיבור קבל ללא מערכת להגבלת זרם החיבור גורמת לנזק רב לקבל.

זרם חיבור

- השפעות שליליות נוספות של זרם חיבור גבוה:
 - מאמצים בקבל וקיצור אורך חייו (עלויות קניה ואחזקה גדולת).
 - בלאי מואץ למגענים ולמגעיהם.
 - שקיעות מתח במערכת הנגרמות מחיבור הקבל ושיבוש פעולתם של צרכנים.
 - הפרעות אלקטרומגנטיות שגורמות להפרעות במתקן.
 - שקיעות המתח עשויות לשבש פעולתם של מתקנים הפועלים על עיקרון חציית האפס.

מגענים למיתוג קבלים

- הקבלים במתקן מבוקר באמצעות בקר ממותגים על ידי מגענים.
- להקטנת זרם החיבור משתמשים במגענים מיוחדים.
- חיבור הקבלים מתבצע בשני שלבים: בשלב הראשון דרך מגעים מקדימים שאליהם מחוברים בטור נגדים להפחתת זרם החיבור ובשלב השני מתחברים מגעי העבודה שעוקפים את מגעי השלב הראשון ואת הנגדים.
- הנגדים עשויים ממוליכים בעלי התנגדות גבוהה. הפרש הזמנים בין סגירת המגעים מושג מכנית על ידי מרחק תנועה קצר יותר של המגעים המקדימים לעומת מגעי העבודה. הסימון המקובל למגעים מקדימים הוא סימון של מגע עם תוספת קו בקצהו.



מיתוג הקבלים על ידי מגענים מיוחדים



חיבור הקבלים

- הקבלים במתקנים תלת מופעיים מחוברים על פי רוב במשולש. בחיבור משולש המתח על כל קבל הינו מתח שלוב. בתנאים אלה עבור קיבול זהה יתקבל הספק קיבולי פי 3 גדול יותר מאשר בחיבור כוכב.

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad \text{הגדרת הספק הגבי קיבולי:}$$

$$Q_{C_{Star}} = \frac{U_{PH}^2}{X_C} \quad \text{הספק הגבי קיבולי בחיבור כוכב:}$$

$$Q_{C_{Delta}} = \frac{(\sqrt{3} \cdot U_{PH})^2}{X_C} = \frac{3 \cdot U_{PH}^2}{X_C} = 3 \cdot Q_{C_{Star}} \quad \begin{array}{l} \text{הספק הגבי קיבולי} \\ \text{בחיבור משולש:} \end{array}$$

קבלים לשיפור מקדם הספק

קבלים תלת מופעיים



קבלים חד מופעיים



בקר למדידה ומיתוג קבלים



- באיור מופיע בקר בעל 8 דרגות למיתוג קבלים למטרת שיפור מקדם הספק מתוצרת חברת Satec. בנוסף לשיפור מקדם ההספק מציג הבקר בחזיתו את מקדם ההספק, מתח המתקן זרם בכל מופע, הספק פעיל, עוור ומדומה, הספקי שיא, אנרגיה ועוד.

- הבקר ניזון מנתוני המתח והזרם של המתקן. המתח מתקבל דרך 3 מא"זים להדקים 2 ו-5 ו-8 (כפי שניתן לראות בהמשך).

בקר למדידה ומיתוג קבלים

- את זרם המתקן מספקים לבקר באחת מ-2 שיטות:
- שיטת ארון (Aron) הזרם מגיע לבקר על יד 2 שנאי זרם המורידים את זרם המתקן לערך שהבקר יודע לעבד. שנאי הזרם מורכבים על מופעים L_1 ו- L_3 ומספקים לבקר את המידע לגבי הזרם ב-2 מופעים אלה. שיטה זו הינה המקובלת ביותר למדידת הספקים במערכות תלת מופעיות סימטריות
- שיטת 3 הזרמים: הזרם מגיע לבקר על יד 3 שנאי זרם המורידים את זרם המתקן לערך שהבקר יודע לעבד. שנאים אלה, מספקים לבקר את המידע לגבי הזרם ב-3 המופעים. שיטה זו הינה המקובלת ביותר למדידת הספקם של מערכות תלת מופעיות בלתי סימטריות כאשר מעורב גם מוליך האפס.

בקר למיתוג הקבלים והגנתם

- הקבלים מתחברים באמצעות מגענים כאשר כל מגען מחובר לאחת מיציאות הבקר. הממסרים הפנימיים בבקר מפעילים את המגענים המחוברים אליהם, מגען אחד (דרגת קבלים אחת) לכל יציאה. באיור משורטטות דרגות 1,2 ו-8. סוללות הקבלים מחוברות במשולש כאשר כל סוללה מוגנת מפני קצר באמצעות נתיכים. ערך הנתיכים נגזר מהזרם הנקוב של כל סוללה. בתקנות החשמל בפרק מעגלים סופיים מופיעה הנחייה על בחירת מפסקים, נתיכים או מגענים המיועדים לזרם נקוב הגדול לפחות פי 1.43 מהזרם הנקוב של הקבל.
- חתך המוליכים במעגל הזינה יכול להתאים לזרם הנקוב של הקבל, אין חובה להתאימו לזרם המבטח.

בקר למיתוג הקבלים והגנתם

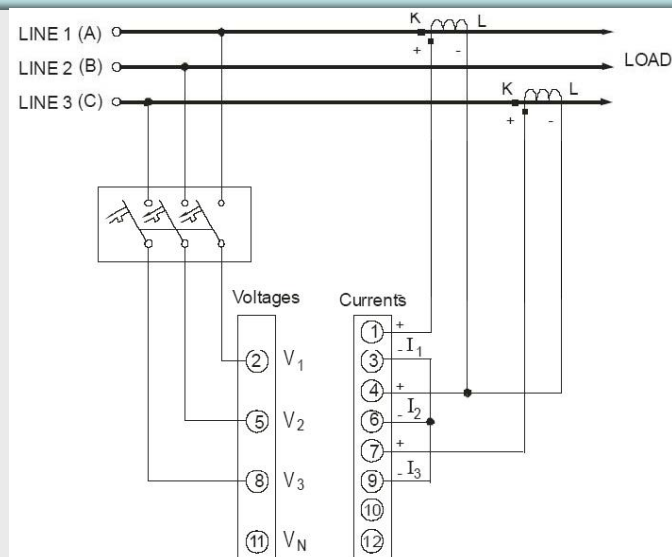
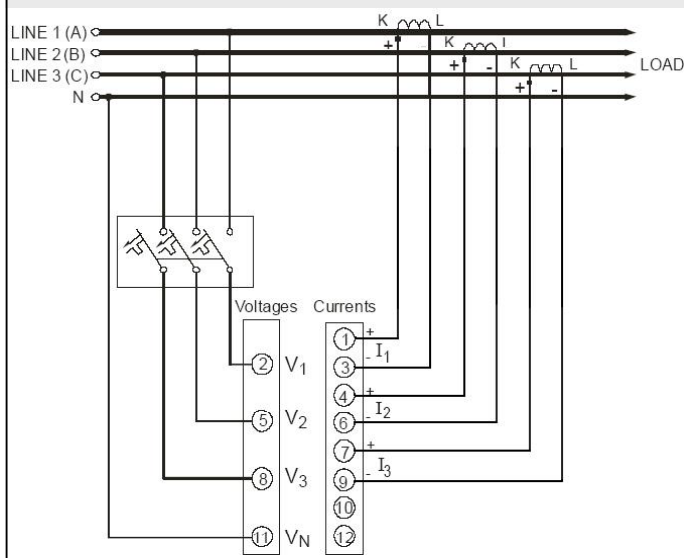
- יכולת הפסקת זרם קצר של מפסקים/נתיכים נגזרת מזרם הקצר הצפוי בלוח בו מותקנים הקבלים.
- לדוגמא להגנה על סוללת קבלים בהספק 30kVAR וזרם קצר צפוי בלוח השווה ל-25kA, במתח 400V נשתמש בנתיכים/מפסקים בערך של:
$$I_{fuse} \geq 1.43 \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} = 1.43 \cdot \frac{30,000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 61.9 A$$
- ערך תקני של נתיכים/מפסקים קרוב לתוצאה שחושבה יהיה: 63A. מפסקים אלה חייבים להיות בעלי יכולת הפסקת זרם קצר העולה על 25kA.

הערות:

- כשהקבלים מותקנים בלוחות ראשיים נוהגים במקרים רבים להגן על סוללות הקבלים באמצעות נתיכים בשל זרמי הקצר הגבוהים הצפויים בלוחות אלה.
- הקבלים יוגנו בפני הצטברות לכלוך ובפני רטיבות ויותקנו בתנאי אוורור נאותים ובאופן שיאפשר גישה נוחה אליהם.

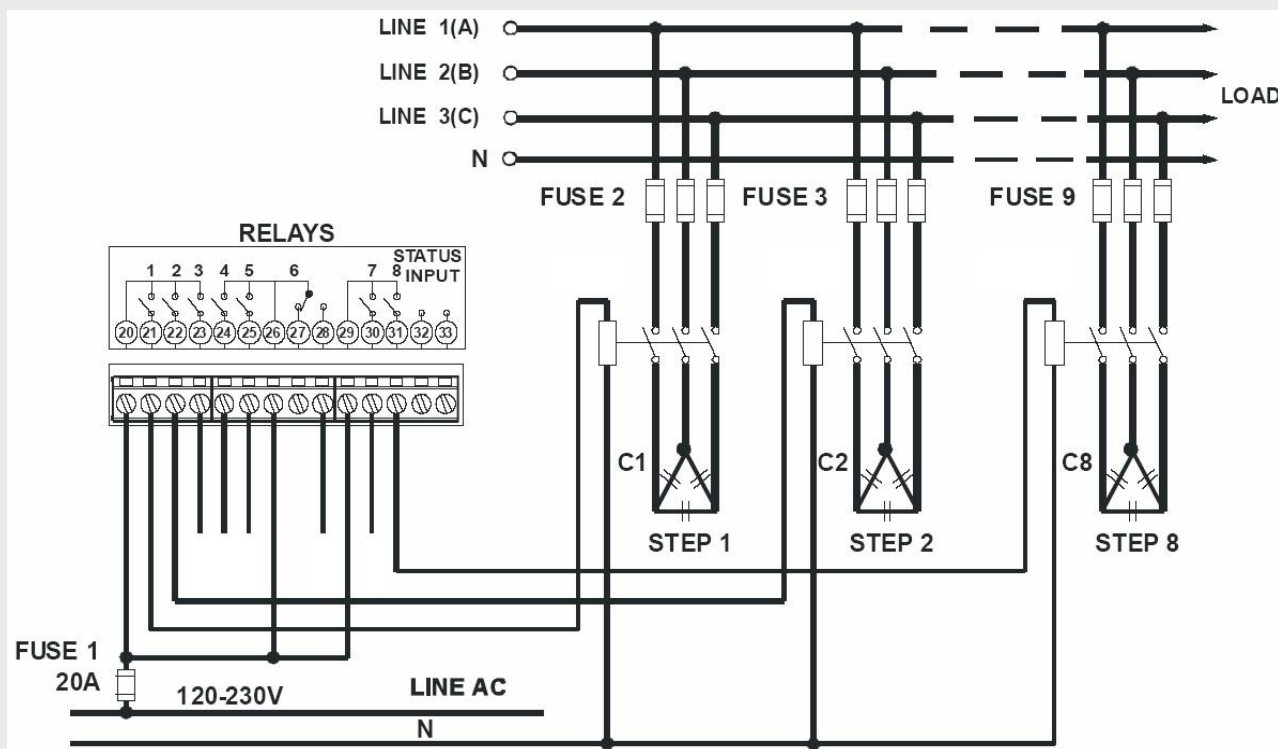
הזנת נתונים לבקר שיפור מקדם הספק

שיטת 3 שנאי זרם

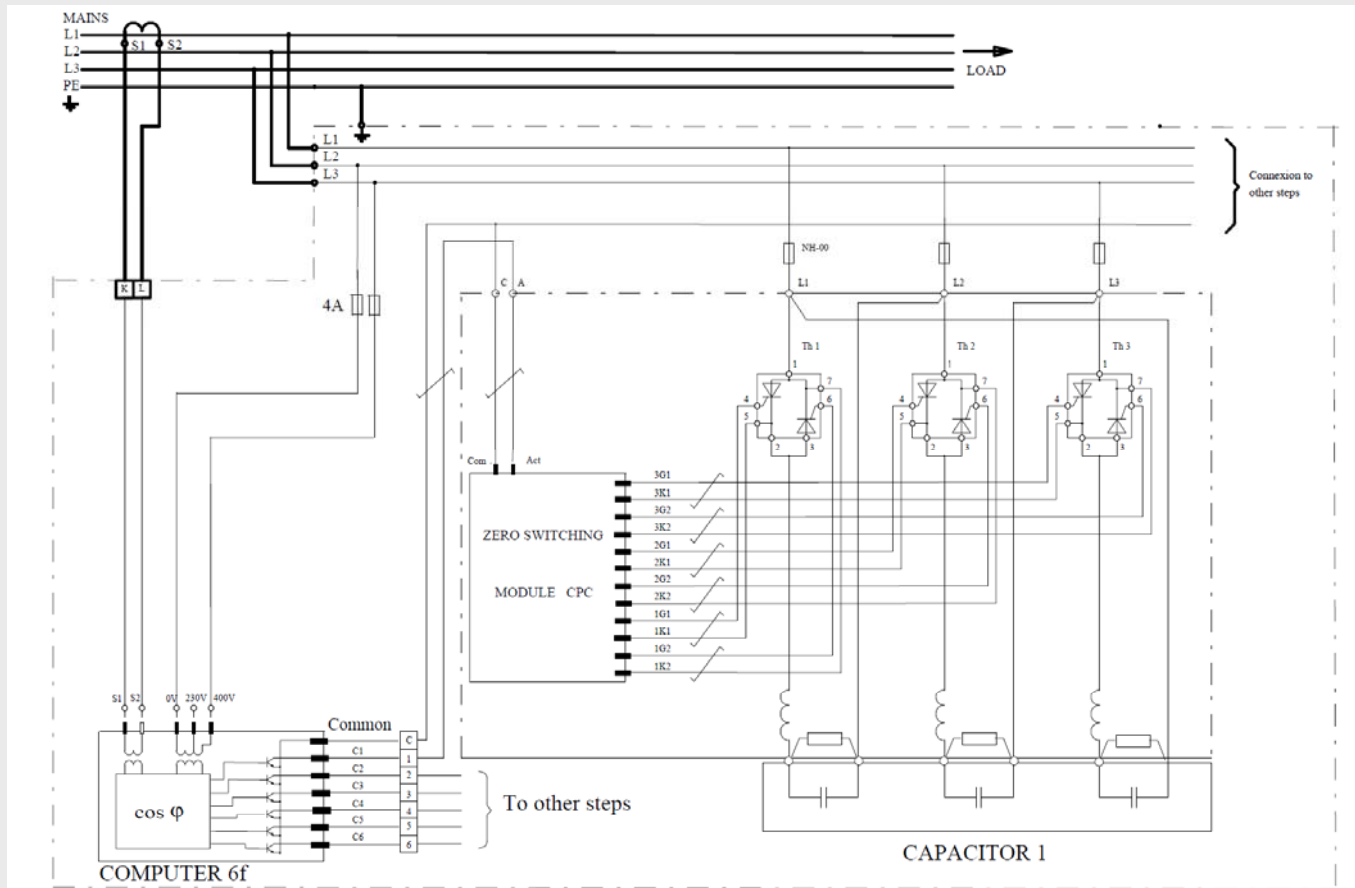


שיטת ארון

אופן חיבור סוללות הקבלים לבקר



בקר שיפור מקדם הספק עם מתגים סטטיים



27

שיפור מקדם הספק

סגל אריאל

אמצעים לפריקת מטענו של קבל

- על פי תקנות החשמל, קבלים חייבים להיות מצוידים באמצעים לפריקת מטענם.
- אמצעי הפריקה חייב להבטיח כי אחרי דקה אחת לכל היותר מהפסקת הקבל, המתח על הדקיו ירד אל מתחת ל-50 וולט.
- אמצעי הפריקה חייבים להיות מחוברים בקביעות לקבלים או, יתחברו אליהם אוטומטית בעת ניתוק של הקבל מהזינה.
- בקבל המחובר ישירות להדקים של מכשיר חשמלי ההתייחסות תהיה שהמכשיר מספק פריקה מספקת.

28

שיפור מקדם הספק

סגל אריאל

שיטות נוספות להתקנת קבלים

ניתן לשלב קבלים במתקן בשתי דרכים נוספות:

שיטה יחידנית: קיזוז כל עומס בנפרד:

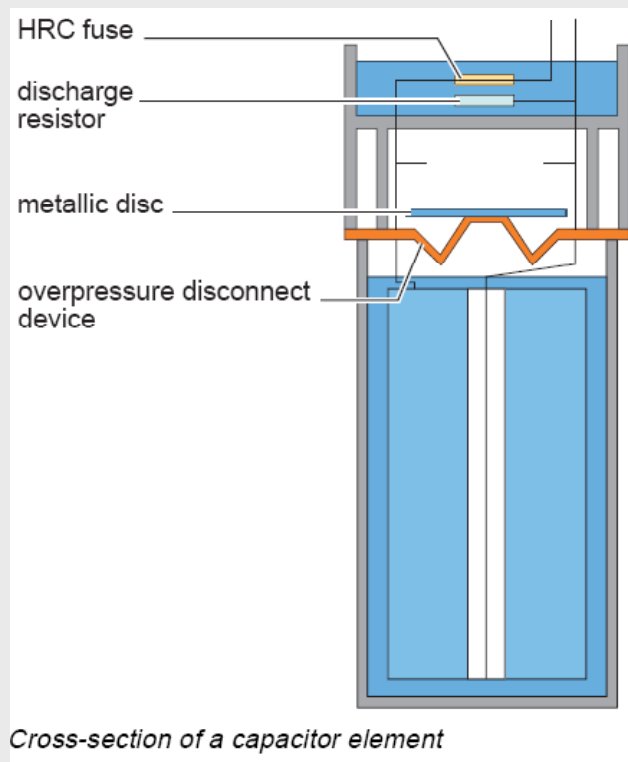
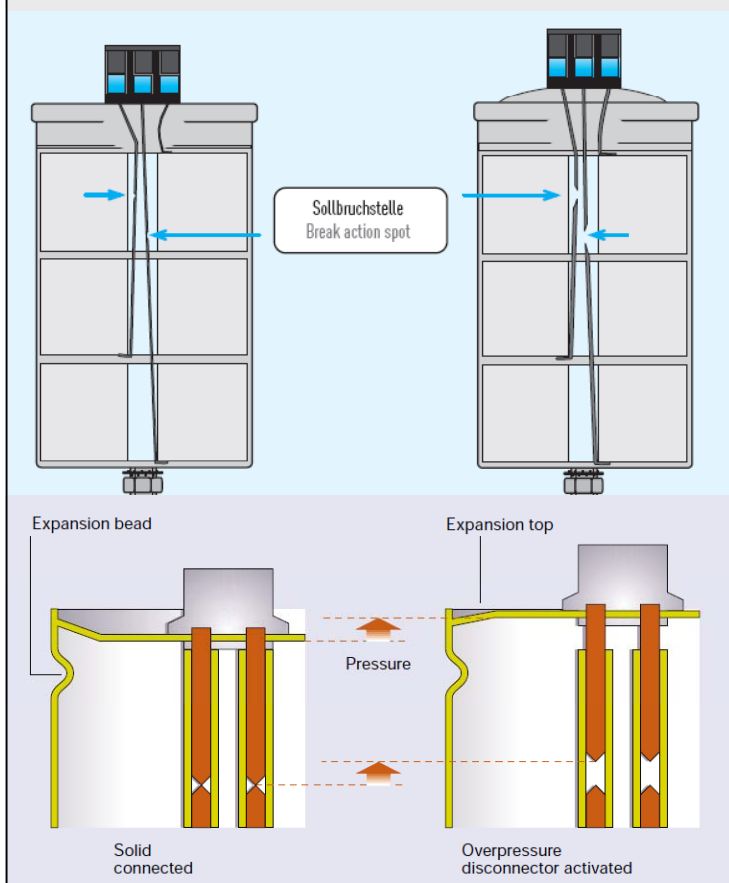
- בשיטה זו מתקינים קבלים לכל עומס לחוד, בסמוך לו או בתוכו. באופן זה משפרים הקבלים את מקדם ההספק לכל צרכן, מקטינים את גודל הזרם אליו ומפחיתים את מפל המתח. כשהצרכן פועל הקבל מתחבר עימו ועם הפסקת הצרכן, נפסק גם הקבל. לכן, אין צורך במערכת בקרה ובמערכת פריקה לקבל (הוא נפרק דרך הצרכן). מההיבט הטכני נחשבת בדרך כלל שיטה זו לטובה ביותר אולם כלכלית יש בה חיסרון בשל הצורך בקיזוז כל צרכן והשקעה בקבל בכל אחד מפרטי הצידוד. במכשירים ביתיים שיש להם תו תקן מחויב היצרן להתקין בתוכם קבלים לשיפור מקדם הספק. כך ניתן למצוא קבלים כאלה בתוך גופי תאורה פלואורסצנטיים, גופי תאורה למנורות פריקה אחרות, בתוך מזגנים, מקררים ומכשירים ביתיים נוספים המכילים מנועים ו/או סלילים

שיטות נוספות להתקנת קבלים

שיטה קבוצתית: קיזוז כל קבוצת צרכנים בנפרד:

- בשיטה זו מתקינים קבלים בנפרד לכל קבוצת עומסים הממוקמים באותו אזור או מחוברים לאותו פס של לוח משני. באופן זה משפרים את מקדם ההספק עד ללוח מקטינים את גודל הזרם ומפחיתים את מפל המתח אליו. בשיטה זו אין בדרך כלל צורך בבקר, אולם אין תלות בין פעולת הצרכן וחיבור הקבלים.

הגנה בפני מתחי יתר וחום יתר

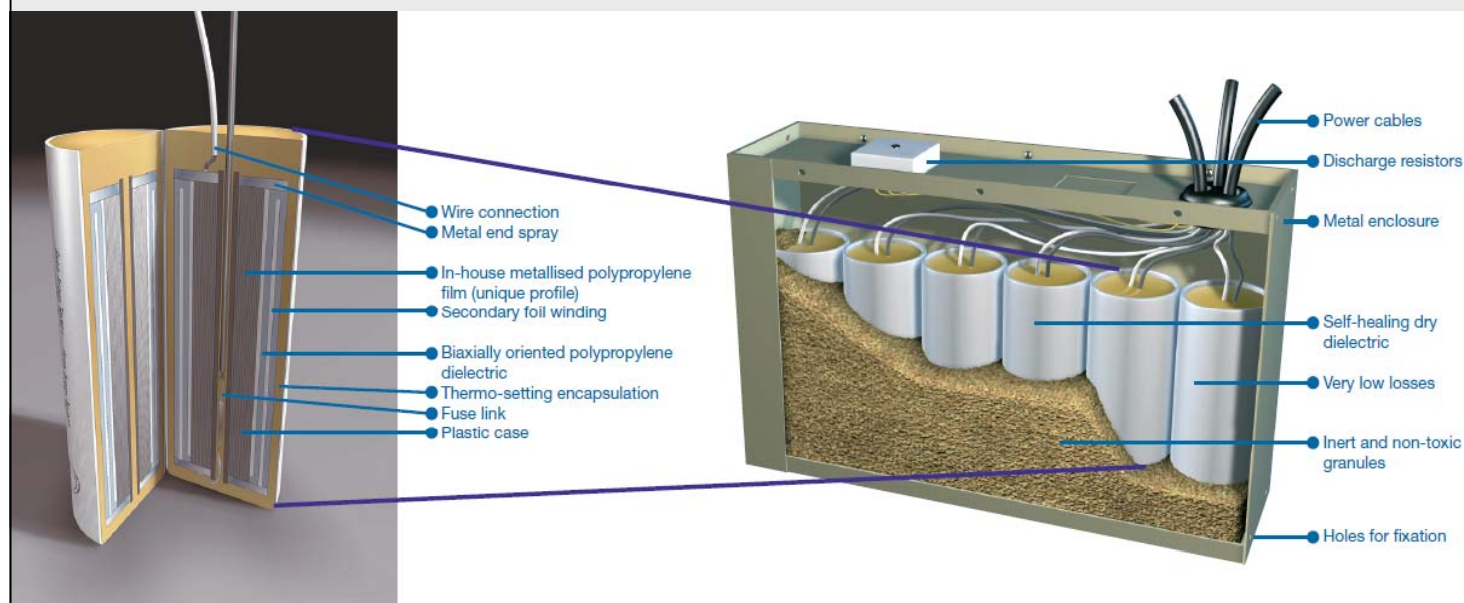


43

שיפור מקדם הספק

סגל אריאל

מניעת התפוצצות קבלים



44

שיפור מקדם הספק

סגל אריאל

השפעת הטמפרטורה על אורך חיי הקבל

- בקבלים מגדירים טמפרטורת סביבה מזערית ומרבית.
- הטמפרטורה המזערית היא בדרך כלל -25°C .
- הטמפרטורה המרבית מצוינת על ידי class A-D.
- Class A מצוין טמפ' סביבה מרבית של 40°C ו- 55°C D.
- אורך החיים של הקבל תלוי במידה רבה בטמפ' סביבת התקנתו. יש להקפיד להרחיק את הקבלים ממקורות חום כמו משנקים, פסי צבירה וכד'

קטגוריה		טמפרטורת סביבה		
		מרבית	טמפרטורה מרבית ממוצעת לאורך תקופה של	
			24 שעות	1 שנה
-25/A	$-25^{\circ}\text{C} \div 40^{\circ}\text{C}$	40	30	20
-25/B	$-25^{\circ}\text{C} \div 45^{\circ}\text{C}$	45	35	25
-25/C	$-25^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$	50	40	30
-25/D	$-25^{\circ}\text{C} \div 55^{\circ}\text{C}$	55	45	35

תוספת תשלום בגין מקדם הספק נמוך

- מקדם ההספק התקני שנקבע על ידי חברת החשמל על מנת לצרוך אנרגיה ללא תוספת בתשלום הוא 0.92.
- בטבלה מפורט התעריף לתוספת שתיכלל בחשבון החשמל, עבור סטייה של כל 0.001 בין מקדם ההספק שנמדד במונה הלקוח לבין הנתונים בטבלה זו.

תוספת לחשבון החשמל לכל 0.001 עד ל- 0.92	אספקה במתח נמוך
0.100%	$0.80 \leq$ מקדם ההספק < 0.92
0.125%	$0.70 \leq$ מקדם ההספק < 0.80
0.150%	< 0.70 מקדם ההספק
תוספת לחשבון החשמל לכל 0.001 עד ל- 0.90	אספקה במתח גבוה
0.100%	$0.78 \leq$ מקדם ההספק < 0.90
0.125%	$0.68 \leq$ מקדם ההספק < 0.78
0.150%	< 0.68 מקדם ההספק
תוספת לחשבון החשמל לכל 0.001 עד ל- 0.87	אספקה במתח עליון
0.100%	$0.75 \leq$ מקדם ההספק < 0.87
0.125%	$0.65 \leq$ מקדם ההספק < 0.75
0.150%	< 0.65 מקדם ההספק