

# כיצד לבחור פילטר הרמוניות מתאים?

קצב הגדילה הגובר של העומסים הלא ליניאריים שניתן למצוא ברשת החשמלית המפעלית, כגון ווסתי מהירות, מעלה את השאלה לגבי איכות ואמינות רשת ההזנה החשמלית. תשומת לב יתרה ניתנת להרמוניות מכיוון שהן מעמיסות את תשתית הרשת החשמלית, גורמות לבעיות אמינות של הציוד, ובנוסף, מבזבזות אנרגיה. יצרנים עושים שימוש בפילטרי הרמוניות אקטיביים ופאסיביים על מנת שהבעיות שגורמת ההרמוניה יהיו תחת שליטה.

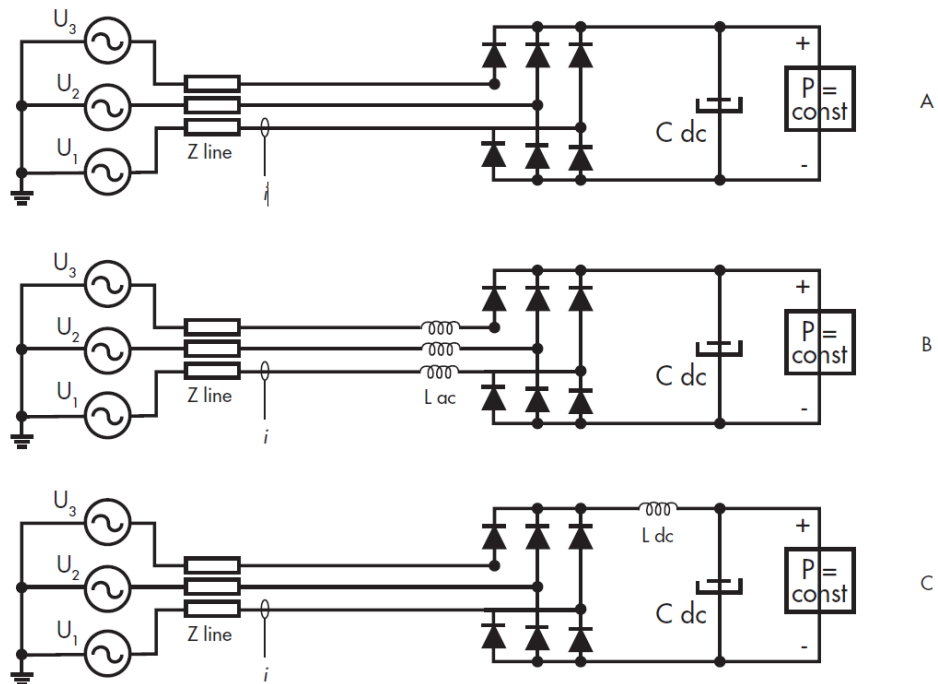
האתגר הוא לדעת כיצד לבחור בצורה נכונה את פילטר ההרמוניות המתאים וכיצד לקבל את התוצאות המיטביות. מטרת כתבה זו היא לעזור להתמקד בפרמטרים החשובים בעת בחירת פילטר הרמוניות ברשת מתח נמוך, וכן, לעזור להימנע משגיאות נפוצות.

## איכות חשמל והרמוניות

זרמים הרמוניים נגרמים על ידי עומסים לא ליניאריים. בעת צריכת הספק, תחת מתח סינוסואידלי, רכיבים אלו גורמים לזרמים אי-סינוסואידליים ברשת. זרמי הרמוניה אלה גורמים להפסדים נוספים בתשתיות החשמל ויכולים לגרום להעמסת יתר תרמית.

זרמי הרמוניות העוברים דרך עכבת הרשת החשמלית גוררים מפלי מתח אי-סינוסואידליים העשויים לסכן את איכות מתח הרשת. מכשור רגיש, כגון, ציוד רפואי, מחשוב וכדומה, הניזון מרשת חשמלית כזו, עלול להיפגע.

## מבנה עקרוני של עומס לא ליניארי



איור 1: מבנה נפוץ של עומס לא ליניארי (גשר מיישר – 6 פולסים). A - ללא צ'וק, B - עם צ'וק AC בכניסה, C - עם צ'וק DC-link.

נתמקד בגשר מיישר תלת פאזי, 6 פולסים. מיישר תלת פאזי הוא דוגמה קלאסית. בחיבור עומס אופייני לסוג מיישר זה, חלק גדול מההספק מוחזר לרשת בצורה של הרמוניות זרם. ממיר תדר הוא עומס אופייני שכן מספרם הולך וגדל בקצב מהיר בכל תחומי התעשייה.

איור 1 מראה את שלושת התצורות הנפוצות ביותר של גשר מיישר תלת פאזי 6 פולסים. בחלק הימני של השרטוט ניתן לראות את העומס הקבוע  $P=Const$ . העומס מייצר את ההספק הנצרך על-ידי המהפך ומנוע ההשראה שמחובר אליו, נניח שערך זה שווה ל- 20kW.

תצורה A באיור 1 אינה מכילה כל רכיב מגנטי להחלקת הזרם. תצורה B עושה שימוש בסליל AC בכניסת מעגל היישור ( $L_{ac}$ ). תצורה C, בעלת סליל DC מובנה ( $L_{dc}$ ). שימוש בסליל זה נעשה בדרך כלל בווסתי מהירות עוצמתיים יותר. בכל שלושת התצורות הרשת החשמלית והיגב הרשת החשמלית מופיעים בחלקו השמאלי של השרטוט.

$Z_{time}$  מייצג את העכבה הכוללת של שנאי החלוקה, קווי החלוקה, הגנות וכו'. אנו נניח, בדוגמה שלנו, שחלוקת העכבה הזו היא חצי התנגדותית וחצי השראית ( $L=18\mu H$ ;  $R=6m\Omega$ ). נעשה שימוש בערכים הבאים:

- קבל DC-link ( $C_{dc}$ ) - 2,000uF

- סליל ה- AC-reactor בתצורה B ( $L_{ac}$ ) - 500uH (2%)

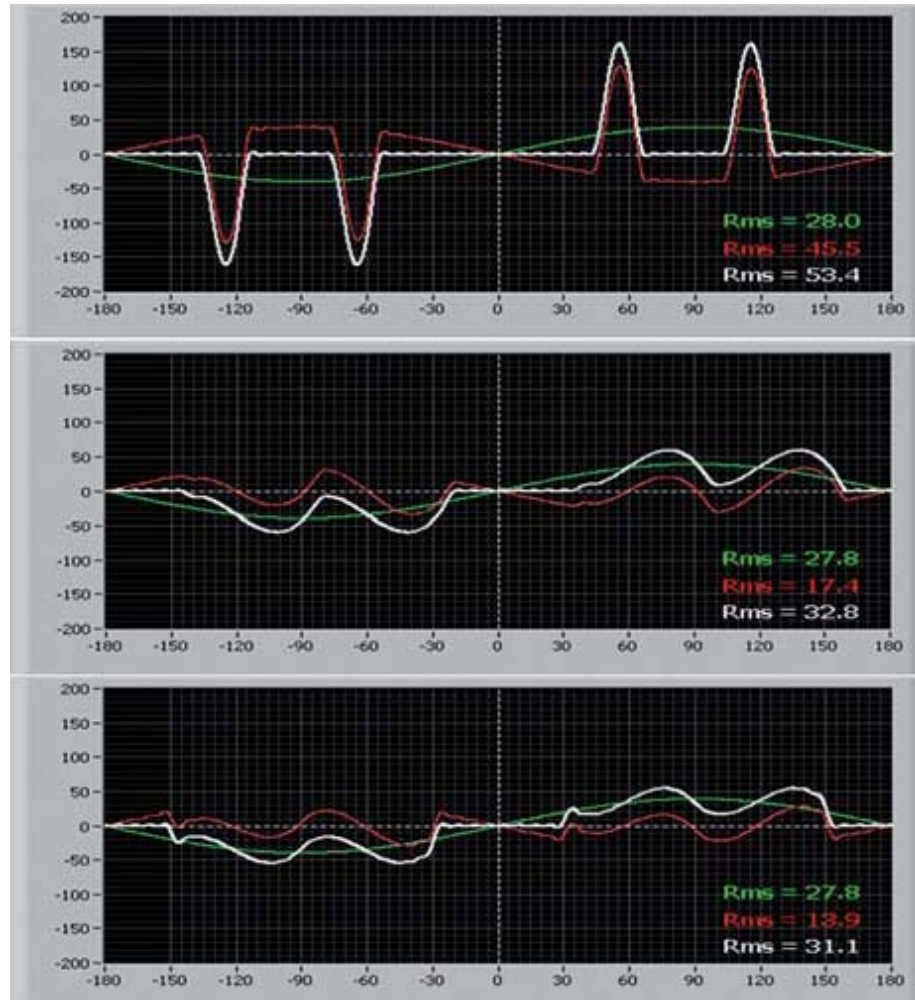
- סלילה DC-link בתצורה C ( $L_{dc}$ ) - 1mH

באיור 2 ניתן לראות את זרם הכניסה  $i$  של תצורות A, B, ו-C ברשת תלת פאזית מאוזנת. הזרם האי-סינוסואידלי  $i$  (אות לבן באיור 2), נגזר ממקור מתח סינוסואידלי. ניתן לפרק זרם זה לשני רכיבים אורטוגונליים:  $i_a$  (אקטיבי) ו-  $i_b$  (ריאקטיבי).

$$i_a + i_b = i$$

הזרם האקטיבי  $i_a$  (ירוק) הינו אות סינוסואידלי בתיאום פאזי עם אות המתח, זוהי ההרמונית הבסיס, והיחידה שאחראית להעברת ההספק מהמקור אל העומס.

הזרם הריאקטיבי  $i_b$  (אדום) הינו הרכיב הנותר של הזרם. הוא מבטא את חיסור הזרם האקטיבי (ירוק) מזרם הכניסה  $i$  (לבן). זרם זה מעביר הספק מדומה בתוך הרשת (הלוך ושוב) ואינו מעורב בהעברת הספק ממשי.



איור 2: השרטוט מראה זרם כניסה  $i$  ברשת תלת פאזית מאוזנת. זרם כניסה  $i$  (לבן), זרם אקטיבי  $i_a$  (ירוק) וזרם ריאקטיבי  $i_b$  (אדום), עבור תצורות A, B ו-C מאיור 1. כל הערכים הנתונים הם  $A_{rms}$ .

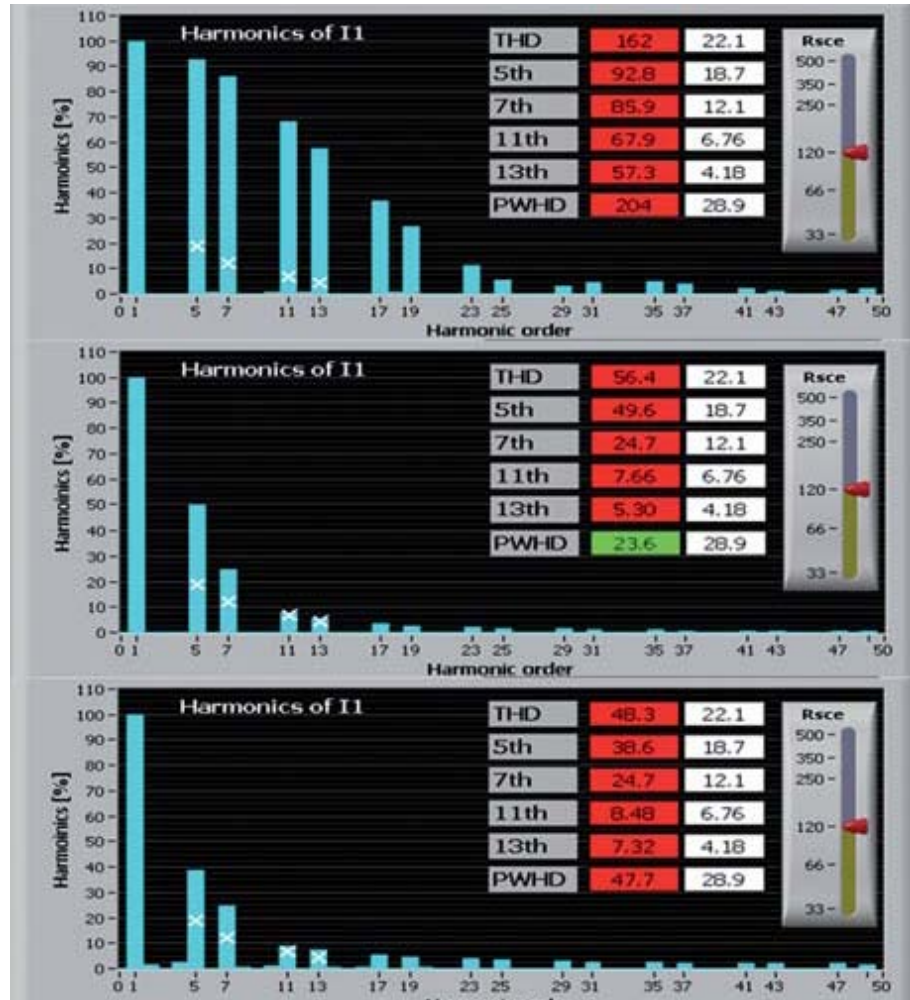
הספקטרום של הזרם הריאקטיבי מוכל מהרמוניות ורכיבים ריאקטיבים של זרם הבסיס (ראה איור 3). יחד עם זאת, ניתן להזניח את אותם רכיבים ריאקטיבים של תדר הבסיס. הזרם הריאקטיבי  $i_b$  מכיל את ההרמוניות ה-5,7,11,13,19,23 ו-25, כאשר ניתן למצוא הרמוניות גבוהות יותר מההרמוניה ה-25, אך אלו זניחות.

הזרם הריאקטיבי מייצר הפסדים נוספים בקווי המתח וגורם למפלי מתח אי-סינשוואידליים על עקבת הרשת החשמלית. אלו גורמים להפרעות במתח הקו ולפיכך מורידות את איכות ההספקה. לאור הנתונים הללו, ניתן לקבוע שזרם ריאקטיבי אינו מועיל במערכת ויש לבטלו.

ערכי ה-RMS של הזרמים  $i$ ,  $i_a$ ,  $i_b$ , מוגדרים כ-  $I$ ,  $I_a$ ,  $I_b$  ומקושרים על פי הנוסחה הבאה:

$$I_a + I_b = I$$

הזרם הריאקטיבי  $I_b$ , יכול להכיל מגוון רחב של ערכים שונים, זאת בתלות בתצורה שעושים בה שימוש. בדוגמא שלנו ערכי זרמי ה-RMS הינם  $17.4A$ ,  $45.5A$  ו- $13.9A$  (איור 2). לזרם הריאקטיבי יש השפעה גדולה על זרם הכניסה  $I$ . ערך ה-RMS של זרם הכניסה משתנה בתלות בתצורה (עבור עומס זהה) מ- $53.4A$  ועד ל- $31.1A$ . ואילו רק הזרם האקטיבי  $I_a$  כמעט וזהה בשלושת התצורות וערכו נותר סביב ה- $28A$ .



איור 3: הגרף מראה ספקטרום הרמוניות של זרם הקו  $i$  עבור תצורות A, B ו-C מאיור 2. בנוסף להצגת ההרמוניות (עמודות כחולות) הטבלה מייצגת את מגבלות תקן EN61000-3-12 (תאים לבנים), וערכי ה-THD המעשיים, בתוספת הערכים של ההרמוניות בודדות (5, 7, 11, 13) וערכי ה-PWHD. תאים בעלי רקע אדום מייצגים ערכים שאינם עומדים בתקינה. תאים בעלי רקע ירוק מייצגים ערכים עומדים בתקינה. הבורר בחלקו הימני של הגרף מייצג את ערך יחס הקצור ( $R_{scE}$ ) אשר בדוגמא שלנו שווה ל-120.

המסקנה שניתן להגיע אליה מהתבוננות בנתוני הזרם השונים היא שהזרם האקטיבי  $I_{\alpha}$  (הפרופורציונאלי להספק הממשי שהעומס צורך), במקרה של עומס לא ליניארי כמו מיישר 6 פולסים, יכול להיות משמעותית נמוך יותר מזרם הכניסה /.

## בחירה נכונה של פילטר הרמוניות פאסיבי

בחירת הדרגה של פילטר הרמוניות פאסיבי נגזר מדרגת העומס הלא ליניארי ללא פילטר ההרמוניות. ההשוואה בין שתי הטבלאות באיור 4 מראה לנו שלא ניתן לעשות שימוש בזרם הכניסה של המערכת כפרמטר לבחירת הדרגה, שכן זה משתנה מתצורה לתצורה. למעשה רק הזרם האקטיבי  $I_{\alpha}$  וההספק הממשי  $P$  נשארים זהים עבור כל שלושת התצורות, ולכן, הם יכולים לשמש כפרמטר לבחירת דרגת הפילטר. לצערנו, הזרם האקטיבי  $I_{\alpha}$  (שהוא למעשה זרם הכניסה של פילטר ההרמוניות הפאסיבי) בדרך כלל אינו נתון בנתוני יצרן של העומסים הלא ליניאריים (לדוגמא ווסת מהירות). לפיכך, הנתון היחיד שניתן לעשות בו שימוש כפרמטר לבחירת דרגת פילטר ההרמוניות הפאסיבי הוא ההספק הממשי  $P$  של העומס הלא ליניארי.

Rectifier	Line Current $I [A_{rms}]$	Active Current $I_a [A_{rms}]$	Reactive Current $I_b [A_{rms}]$	Output Real Power [kW]
A (without magnetics)	53.4	28.0	45.5	20
B (with $L_{ac}$ )	32.8	27.8	17.4	20
C (with $L_{dc}$ )	31.1	27.8	13.9	20

Rectifier	Line Current $I [A_{rms}]$	Active Current $I_a [A_{rms}]$	Reactive Current $I_b [A_{rms}]$	Output Real Power [kW]
A (without magnetics)	28.3	28.3	1.1	20
B (with $L_{ac}$ )	28.3	28.3	1.2	20
C (with $L_{dc}$ )	28.3	28.3	1.2	20

איור 4: הטבלה העליונה מראה את הפרמטרים של העומס הלא ליניארי בתצורות A, B ו-C ללא פילטר הרמוניות. הערכים באדום בדרך כלל אינם נתונים בדפי המפרט של היצרן עבור העומסים הלא ליניאריים. הטבלה התחתונה מראה את הערכים של פילטר הרמוניות הפאסיבי בתצורות A, B ו-C. הערכים באדום בדרך כלל אינם נתונים בדפי המפרט של היצרן עבור פילטר הרמוניות.

## בחירה נכונה של פילטר הרמוניות אקטיבי

שלא כפילטר הרמוניות פאסיבי, פילטר הרמוניות אקטיבי מותקן במקביל לקו המתח (פילטר הסטה). רק תצורות B ו-C מיוצגות באיור 5. תצורה A אינה מיוצגת ממניעים כלכליים מכיוון שפילטר הסטה דורש רכיבים מגנטיים על העומס. קל לראות את הסיבה לכך גם מהתבוננות על צורות הגל באיור 2. במידה ואין רכיבים מגנטיים (תצורה A), זרם התיקון של פילטר הרמוניות האקטיבי מאוד גדול ובכל יגדיל את הגודל הפיזי של פילטר הרמוניות האקטיבי בצורה משמעותית. לצורך הפשטות, אם פילטר הרמוניות אקטיבי אידיאלי בהתחשב בתצורות B ו-C באיור 5, ניתן לראות בקלות שהבא מתקיים:

- זרם הקו תואם לזרם האקטיבי  $I_a$  באיור 2 (C ו-B).

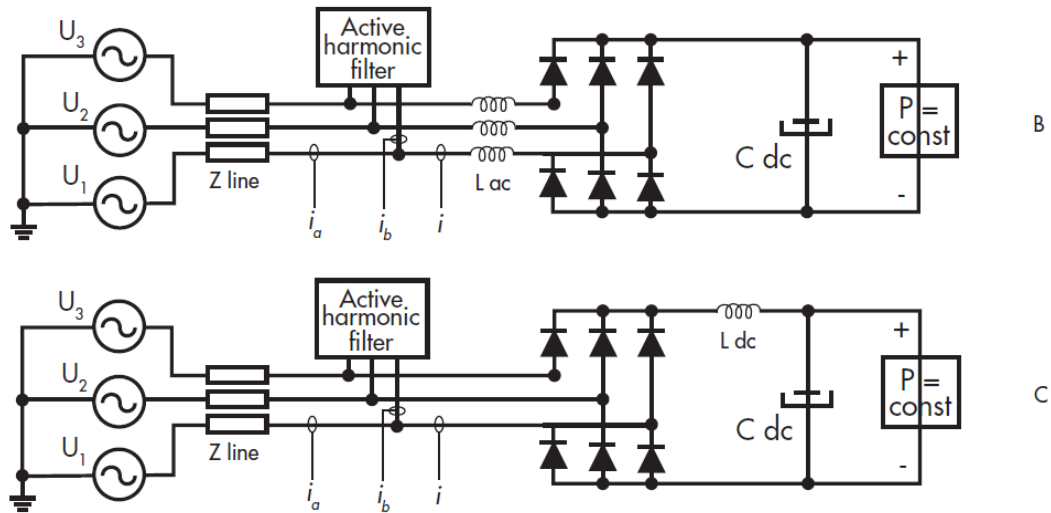
- זרם ההסטה של הפילטר תואם לזרם הפאסיבי  $I_b$  באיור 2 (C ו-B).

- זרם הכניסה למיישר תואם לזרם הכניסה  $i$  באיור 2 (C ו-B).

ההצהרות לעיל נכונות כתלות בתנאי שעכבת הקו  $Z_{line}$  זניחה ביחס לעכבה של  $L_{ac}$  (תצורה B) ו-  $L_{dc}$  (תצורה C). בדוגמה שלנו התנאי מתקיים.

כאשר בוחרים את דרגת פילטר הרמוניות האקטיבי, בדיוק כמו בפסיבי, יש להתחשב בפרמטרי המיישר ללא הפילטר.

באיור 6 ניתן לראות רשימת פרמטרים עבור תצורות B ו-C (ללא פילטר). הערך היחיד שיש בו שימוש ממשי הינו הזרם הריאקטיבי  $I_b$ , אשר מייצג את הפרמטר החשוב ביותר בפילטר ההרמוניות האקטיבי: זרם התיקון (זרם ההסטה). שלא כמו בפילטר ההרמוניות הפאסיבי, בפילטר ההרמוניות האקטיבי דרגת הפילטר משתנה כתלות בתצורה B או C. זרם התיקון הנדרש עבור תצורה B הינו: 17.4A, בזמן שבתצורה C, נדרש פילטר בעל זרם תיקון של 13.9A בלבד. תוצאות החישוב זהות לחלוטין לערכים המתקבלים באיור 2 אשר חושבו על-ידי ביצוע התמרת פורייה.



איור 5: מתאר מיישר 6 פולסים עבור תצורות B ו-C עם פילטר הרמוניות אקטיבי המחובר במקביל (פילטר הסטה).

Rectifier	Line Current $I [A_{rms}]$	Active Current $I_a [A_{rms}]$	Reactive Current $I_b [A_{rms}]$	Output Real Power [kW]
B (with $L_{ac}$ )	32.8	27.8	17.4	20
C (with $L_{dc}$ )	31.1	27.8	13.9	20

איור 6: טבלה זו מראה את הפרמטרים של פילטר הרמוניות אקטיבי עבור תצורות B ו-C. הערכים באדום בדרך כלל אינם נתונים בדפי המפרט של היצרן.

## יחס עלות תועלת

אי ידיעת פרמטרים מסוימים של העומס הלא ליניארי יכולה להוביל לבחירה לא נכונה של פילטר הרמוניות, בין אם הוא פאסיבי או אקטיבי. בחירת פילטר הרמוניות נכון ובדרגה הנכונה היא צעד חשוב בשמירת האיזון של עלות תועלת במערכת שלנו. בהינתן העובדה שחלק מהפילטרים כמו EMC, פילטר יציאה, צ'וק כניסה, נבחרים כתלות בזרם הכניסה I, חלק מהאנשים שוגים בהנחתם כי גם בחירת פילטר הרמוניות צריכה להיעשות דרך פרמטר זה. הדרך הנכונה, כאמור, הינה בחירת פילטר הרמוניות פאסיבי בהתחשב בפרמטר ההספק הממשי P, ובחירת פילטר הרמוניות אקטיבי בהתחשב בזרם הריאקטיבי המחושב  $I_b$ .