

השלכות חיבור מערכות פוטו-וולטאיות על רשת חשמל במתח נמוך, והצגת התופעות הנובעות מריבוי מערכות PV בנקודת רשת אחת

גיא רט

הקדמה

מאמר זה דן בהשלכות, הנובעות משילוב מתקנים פוטו-וולטאים ברשת חשמל במתח נמוך, שילוב מערכות פוטו-וולטאיות לצד צרכנים ברשת החשמל מהווה יתרון, בכך שאספקתם המקומית לצרכנים מקטינה את הזרם הנצרך מהרשת ואת האיבודים הנלווים לו. אולם, במצב שבו קיים ריכוז גבוה של מערכות בנקודת רשת אחת, עלולות להיווצר כמה תופעות בעלות השפעה ניכרת על הרשת, אשר יוצגו במאמר זה. כללי אספקת החשמל ונתוני רשת החשמל נקבעים בהתאם לתקנים שונים כדי להבטיח אחידות ורמת איכות אספקת חשמל גבוהה ללקוחות.

המהפך (inverter) במערכת סולרית מהווה את הרכיב המרכזי, המסנכרן את הזרם הישר (DC), שמגיע מהקולטים הפוטו-וולטאים, לתדר ואמפליטודת רשת החשמל (AC). כדי להבטיח אמינות ואיכות חשמל תקינה, על המהפך לעמוד בסטנדרטים רבים. בישראל התקן של מערכות פוטו-וולטאיות (ומהפכים ת"פ בגודל של עד KVA30) הוא ת"י 4777, שאומץ מהתקן האוסטרלי AS 4777. בתקן נמצאת הפניה לתקנים נוספים והתייחסות ספציפית למאפיינים הקשורים למהפך כגון: הגנת "אי בודד" אקטיבית או פסיבית (בהעדר מתח רשת תפסק המערכת), בקר המבטיח שהמערכת תעבוד אך ורק בגבולות המותרים של נתוני הרשת - יתר/תת מתח (OUV) ו-יתר/תת תדר (OUF), מדידה של רמת רכיב ה-DC המזוהם אל הרשת, משאח לבדיקת רמת הבידוד (או זליגה) בין מוליכי החשמל, גלאיי ומסנני הרמוניות.

המאמר נחלק לארבעה חלקים: חלק I - רקע. חלק II - הצגת ארבע תופעות ברשת הנובעות מחיבור מתקני PV: א. הרמוניות, ב. הזרמת רכיב DC לרשת החשמל, ג. תופעת "אי בודד", ד. עליות מתחים ברשת. חלק III - הצעת דרכי פתרון לתיקון תופעת עליית המתח, הנובעת מייצור עודף של מערכות ה-PV. חלק IV - הצגת מודל לתיאור תופעת עליית המתח ברשת, הכולל כמה מערכות פוטו-וולטאיות והשפעת מקדם ההספק של המערכות על המתח והעומס בקו. כמו כן, יוצגו פרמטרים, שאותם יש לקחת בחשבון בשלב התכנון, טרם שילוב המתקנים הפוטו-וולטאים ברשת החשמל.

חלק I - שילוב מתקנים במשק החשמל

בעולם בכלל ובמדינת ישראל בפרט קיים גידול מסיבי בהתקנת מערכות פוטו-וולטאיות. הדבר נובע מיוזמה של רגולטורים רבים בעולם, אשר מעודדים את הטכנולוגיה הירוקה באמצעות תמלוגים שונים, כחלק מתפיסה חדשה, הקוראת לשלב אנרגיה ירוקה במערך

ייצור החשמל. בארץ, הנושא תפס תאוצה משום שחברת החשמל, בהתאם לאמות המידה, מחוייבת לרכוש את החשמל המיוצר בטכנולוגיה פוטו-וולטאית ומוזרם לרשת בתעריף מסובסד, הגבוה מתעריף צריכה רגיל. הגידול בכמות המערכות הפוטו-וולטאיות הביא לתפיסה חדשה בכל הקשור לתכנון רשת החשמל. בתפיסה החדשה, רכיבי התמסורת במערכת (קווי מתח נמוך וגבוה, שנאים מונים וכו') לא רק מוסרים אנרגיה, אלא באופן דו-כיווני גם מקבלים ומשנאים את האנרגיה בצורה הפוכה מהמקובל עד היום.

ברוב המקרים, מערכות ה-PV משולבות בתוואי רשת קיים. מצב זה אינו אידאלי ומגביל את העיקרית היא: אי-היכולת לצפות ולקלוט את הגידול במערכות המתחברות לרשת. לעתים, כפתרון מוצא האחרון, נדרש לשדרג את הרשת המזינה.

ניתן לחלק את סוג המערכות המותקנות ומחוברות לרשת חברת החשמל לשתי קטגוריות: [1] "מתקנים פוטו-וולטאים קטנים לשימוש עצמי ומכירת עודפים לרשת החשמל בגודל של עד KW50" המחוברים דרך מונה ייצור ללוח הפרטי של הלקוח.

[2] "מתקנים פוטו-וולטאים בינוניים, הגדולים מ-KW51" ומחוברים דרך מונה ייצור ראשי ישירות לרשת החשמל עם חיבור ייעודי ובלעדי (במתח גבוה או נמוך). מצב של ריבוי מערכות קטנות בנקודת רשת אחת מתייחס לסוג הראשון של המערכות. במקרים מסוימים, המערכות הגדולות עושות שימוש במספר רב של מהפכים (בדומה לריכוז מערכות קטנות).

חלק II - סקירה של התופעות הנגרמות כתוצאה מחיבור מקבץ של מערכות PV

א. הרמוניות

בארץ התקן המקובל בעבור מאפייני רשת החשמל הוא ת"י 50160. בתקן קיימות דרישות רבות ומפורטות שמטרתן להבטיח איכות ואמינות אספקה אחידות לכלל הצרכנים. בהתאם לתקן זה, נדרש להבטיח שברשת לא יופיעו סך ההרמוניות במתח מעבר ל-THD<8%. מקור ההפרעות ברשת הם הצרכנים, ולכן נדרש מכל משתמש ברשת החשמל לחבר אך ורק ציוד העומד בדרישות ובתקנים מקובלים.

המהפך, אשר הופך את הזרם הישר של הפנלים הפוטו-וולטאים למתח חילופין של רשת החשמל, הוא רכיב אלקטרוני ומקור להרמוניות.

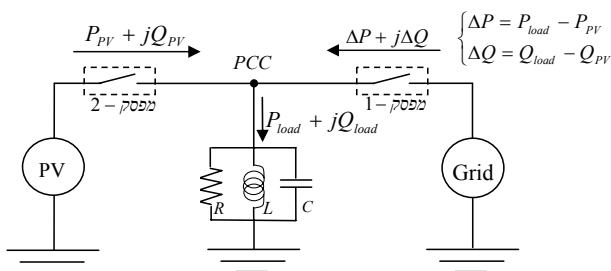
בת"י 4777-2 [4] מצוינת טבלה, המפרטת את הערך המירבי

מהתנהגות בלתי צפויה של הרשת בזמן התופעה, ומאופיינת בחוסר איזון של המתחים, התדר ומקדם ההספק.

כדי למנוע את תופעת האיבוד, קיימות שתי שיטות הגנה עיקריות: (1) **הגנות מחוץ למהפך**, המבוססות על בקרים ומגענים המותקנים ברשת החשמל. בקרים אלו פועלים על פי תרשים מצבים והסכם תפעולי, שנבנה לאחר בחינה ספציפית של תנאי הרשת במקום. (כגון בקרים המיושמים במקרה שבו נדרש להבטיח שלא תתרחש תופעה של איבוד אצל צרכן עם גנרטור באספקה מקבילה או חלופית).

(2) **הגנות בתוך המהפך**, המיושמות כחלק אינטגרלי בהתאם לתקנים.

כמוצג באיור I, נקודת ה-PCC (point of common coupling) מהווה את הנקודה שבה נפגשת המערכת הסולרית עם העומס ועם רשת החשמל. במידה ומפסק מס' 1 נתחם והמערכת הסולרית ממשיכה לעבוד במקביל לעומס (ללא רשת החשמל) מתרחשת התופעה הקרויה איבוד.



איור I

לצורך יישום הגנת היעדר רשת ("LOM") למניעת תופעת האיבוד, בכל המהפכים קיימת הגנה פסיבית, שמבטיחה שהמהפך יעבוד אך ורק בגבולות מתח ותדר (UF/OF, UV/OV) מותרים בנקודת ה-PCC. החיסרון בשיטה נובע מכך שבמצב שבו העומס זהה לייצור, הסבירות להיווצרות תופעת איבוד היא הגבוהה ביותר [8]. כאשר מפסק מס' 1 פתוח (ו-2 נשאר סגור) מתקבלות הנוסחאות:

$$(2) \quad P_{PV} = \frac{V_{load}^2}{R}$$

$$(3) \quad Q_{PV} = V_{load}^2 \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = V_{load}^2 \frac{1 - 4\pi^2 f^2 LC}{2\pi f L}$$

ניתן לראות שגם המתח וגם התדר, שני פרמטרים שעליהם מתבססת ההגנה הפסיבית, תלויים באופן ישר ב- P_{PV} ו- Q_{PV} . לכן, כאשר נפסקת אספקת רשת החשמל ברגע שבו העומס זהה לכושר הייצור של המערכת הסולרית – קיים החשש למצב של איבוד.

מדידה של היסט מופע (Voltage Phase Jump Detection) ומדידה של סך ההרמוניות (Detection of Harmonics-DH) הן שתי שיטות נוספות המוגדרות כשיטות פסיביות. בשתי השיטות, במקרה של איבוד (שבו המערכת עובדת מול העומס בלבד ללא רשת), צפויה עכבת הרשת להשתנות באופן שיוצא את הפרמטרים הנ"ל מהגבולות המותרים ויביא להפסקת המהפך [9]. הגנה אקטיבית היא הגנה נוספת במהפך, המיועדת להתגבר על תופעת איבוד כאשר העומס שווה לייצור. ההגנה יכולה לבוא לידי ביטוי באופנים רבים

המותר לכל הרמוניה (עד הרמוניה ה-50), וכן דרישה לכך שסך ההרמוניות בזרם, "שמייצר" המהפך, צריך להיות קטן מ-5% THD. כאשר מותקנות מספר רב של מערכות (ומספר רב של מהפכים קטנים יחסית), נוצר יחס הדדי בין עכבת הרשת, עכבת הצרכנים ועכבת המהפכים הפוטו-וולטאים. יחס זה עלול לגרום לתהודה מקבילית, שתגרום לעליות משמעותיות במתח, או לתהודה טורית שתגרום לעליות משמעותיות בזרם [5]. ההרמוניה המקבילית או הטורית, המחושבות מהנוסחה, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (1) עלולות להתרחש בזמן.

מניסוי שבוצע [6] עולה שככל שמתווסף עומס לא לינארי, הנוצר ממוגון רחב של מכשירים אלקטרוניים, ה-THD מוגבר משמעותית על ידי המהפכים של המערכות הפוטו-וולטאיות (ובמיוחד כאשר חובר עומס RC). בנקודת רשת, הכוללת מקבץ של מערכות, אותן הרמוניות, המיוצרות על ידי המהפכים, "מזהמות" את הרשת באופן שמביא לניתוקים לא רצויים של המערכות וכמובן להזדקנות ולפגיעה בציוד.

כמו כן, בהתאם לאופן פעולת ההגנה האקטיבית בפני איבוד (יפורט בהרחבה בהמשך המאמר), משדרים המהפכים אות לרשת, אשר פוגע באיכות החשמל. התופעה מתגברת, כאשר מדובר בריכוז גבוה של מהפכים, המשתמשים באותה שיטת הגנה.

ב. הזרמת רכיב DC לרשת החשמל

במהפכים רבים, המחוברים לרשת, קיים שנאי מבדל, המבטיח הפרדה גלוונית בין צד ה-DC ל-AC. שנאי זה, המותקן בתוך המהפך, פוגע בנצילות ומביא לכך שהמהפך גדול יותר, כבד יותר ויקר יותר. במהפכים חדשים יחסית, ללא שנאי מבדל (TL – Transformer Less), קיים החשש של הזרמת זרם ישר לרשת החשמל. רכיב ה-DC ברשת גורם לחימום ובלאי מואץ של המוליכים ופוגע בנצילותם, מביא לקורוזיה מוגברת, זרמי מערבולת ורוויה מוגברת של שנאים ומנועים. מסיבה זו מגביל התקן ת"י 2-4777 [4] את ערכו של זרם ה-DC, המוזרם לרשת, ל-0.5% מהספק המהפך אך לא יותר מ-5mA. במהפכים מסוג TL קיימים מסננים ושיטות קיזוז למניעת התופעה, אך כאשר מדובר בריכוז של מערכות התופעה גדלה בהתאם [7].

ג. תופעת "איבוד"

מערכות פוטו-וולטאיות, המזרימות אנרגיה לרשת (במסגרת אחת ההסדרות של הרשות לשירותים ציבוריים), עובדות במקביל לרשת החשמל. במקרה של הפסקת חשמל (זיומה או בגלל תקלה), על המערכות הפוטו-וולטאיות להפסיק את מתח המוצא באופן מיידי, למניעת היווצרות איבוד חשמלי. הסיבה לכך נעוצה בסיכונים הקיימים במשטר עבודה מסוג זה, והם: (1) סכנת התחשמלות כתוצאה ממגע עם מוליכים שנותרו מאספקה וכתוצאה מהמערכת הסולרית נשארים מחושים. (2) חיבור חוזר באנטי פאזה יכול לגרום להפסקות בלתי מתוכננות ולפגיעה בציוד ובאדם. (3) חוסר תפקוד של ההגנות יכול להיגרם כתוצאה מהיעדר הספק מתאים במערכת, הדרוש להפעלת המבטחים במקרה של תקלה. (4) איכות חשמל ירודה, הנובעת

ומבוססת בעיקר על שליחת אות לרשת ושימוש במשוב חיובי של היסט תדר או מופע כדי לבחון את מצב הרשת.
 בת"י 3-4777 [4], (הזהר כמעט לחלוטין למקבילו האוסטרלי), מופיע שינוי בסעיף, הקובע את נתוני הרשת (מתח ותדר) המאפשרים סינכרון ופעולה של המהפך (הגנה פסיבית);
 1) **מתח הרשת**, המאפשר סינכרון ייקבע בהתאם לטבלה שבאזור II, המופיעה בתקן IEC 61727 [13].
 2) **תדר הרשת** יהיה בגבולות 1 ± 50 [Hz], אחרת המהפכים יפסיקו את פעולתם בתוך 0.2 שניות.

מסך זמן נדרש להפסקת המהפך [שניות]	סטייה ב-% של מתח נומינלי בנקודת החיבור לרשת
0.1	$V < 50\%$
2.0	$50\% \leq V < 85\%$
עבודה סדירה	$85\% \leq V \leq 110\%$
2.0	$110\% \leq V \leq 135\%$
0.05	$135\% \leq V$

איור II

איור II - גבולות מתח הרשת המאפשרים סינכרון המערכת בהתאם לתקן (IEC 61727)

כמו תקנים בין-לאומיים, ת"י 4777 דורש הגנה פסיבית (גבולות מתח ותדר) ו**בנוסף** אחת מתוך מספר שיטות אקטיביות מקובלות: frequency shift/instability, power-variation, current-injection. בנקודת רשת שבה קיים ריכוז גבוה של מערכות פוטו-וולטאיות, קיים החשש להתאבכות של האותות, המשוודרים על ידי המהפכים (שבהם קיימת הגנה אקטיבית בפני אי בודד), שעלולה להביא לכשל בזיהוי ובפעולת ההגנה [10]. בנוסף, מספר רב של מהפכים, העושים שימוש בהגנה פסיבית, הכוללת משוב חיובי לזיהוי פרמטרים שונים ברשת, עלול להחליש את המשוב החיובי של כל מהפך וליצור אינרציה בייצור באופן שיפגע בזמן תגובת ההגנה במהפך. (לצורך מזעור התופעה, יצרנים עושים שימוש בלוגיקה וחומרה מהירה יחסית).

ד. תופעת עליות המתח

בתכנון רשת אספקה נדרש להבטיח רמת מתח תקינה. (בהתאם לת"י 50160 [3], בנקודת החיבור לרשת יהיה מתח של $V_{230} \pm 10\%$ ב-95% מהזמן). לצורך כך, נלקחים בחשבון שני פרמטרים עיקריים המשפיעים על מפל המתח בקו: 1) מצד הצרכן - העומס הנדרש (בהתאם למקדמי ביקוש), סוג ואופיו. 2) מצד הרשת - סוג המוליכים וחתכם, בהתאם לסוג השנאים והספקם, בהתחשב בנתוני הרשת הקיימת.

מפל המתח בקו ΔV , המוצג בנוסחה (4)

$$\Delta V = I(R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$$
 תלוי בעכבת הקו (R ו- X), בזרם I אשר מהווה את צריכת ההספק של הצרכנים ובזווית φ (שהיא הפרש המופע בין המתח לזרם $\varphi = \varphi_v - \varphi_i$ ומבטאת את היחס בין ההספק האקטיבי לריאקטיבי הזורם בקו). בהתאם לנוסחה (4), ניתן לראות שלצורך

הקטנת מפל המתח נדרש: (א) הקטנת העכבה הכוללת בקו, המבוצעת על ידי שדרוג השנאים, חתך המוליכים ושיטת התקנתם. (ב) הקטנת הזרם בקו, בזווית מתואמת בהתאם לנתוני הקו. **הקטנת הזרם האקטיבי** - פירוש, הקטנת העומס או הגבלת כושר הייצור של מערכות ה-PV. **ויסות הזרם הריאקטיבי** - פירוש, התקנת מקור אנרגיה ריאקטיבית כגון סוללת קבלים נקודתית (אקטיבית או פסיבית), שתשמש מקור כתחליף לרשת החשמל.

שילוב מערכות פוטו-וולטאיות לצד צרכנים ברשת החשמל מהווה יתרון בכך שאספקתם המקומית לצרכנים מקטינה את הזרם הנצרך מהרשת ואת האיבודים הנלווים לו. אולם, כאשר יש ריכוז גבוה של מערכות פוטו-וולטאיות באופן שכושר הייצור של המערכות הסולריות עולה על הביקוש, תתקבל זרימת הספק הפוכה (מכיוון הצרכן לרשת החשמל) שתביא לעליות מתח. **באופן הפוך למפל מתח, הנגרם כתוצאה מהספק הנצרך מהרשת, זרימת הספק הפוכה מלווה במפל מתח הפוך [11].** כשם שקיים סף העמסה של קו, שבו רמת המתח קרובה לסף המתח התחתון, כך גם קיים סף הספק שאותו ניתן להזרים לרשת ובו רמת המתח נושקת לגבול העליון המותר. תופעה זו נפוצה בעיקר בנקודת רשת קיימת, שתוכננה על ידי חישוב ספציפי של העומסים ומקדמי הביקוש, ואינה ערוכה לקלוט את הספק המערכות שהתווספו לרשת. עליית המתח מביאה לניתוק ההגנות של מהפכי המערכות הסולריות, העובדים רק בגבולות מתח מותרים, ומונעת מהן להזרים את האנרגיה "הירוקה" אל רשת החשמל.

חלק III – דרכי התמודדות עם תופעת עליית המתח:

א. ויסות המתח על ידי שינוי דרגה בשנאי.

פתרון "נוח" לוויסות מתח בקו הוא הורדת דרגה במתח השנאי, המזין אותו. פתרון זה הוא חלקי, מפני שאינטרוול המתחים בשנאי לא מתאים לאופי הדינמי של משטר עבודת המערכות הפוטו-וולטאיות (מתח עבור הצרכן המרוחק מהשנאי: במצב של כושר ייצור PV מקסימלי ללא עומס, לעומת עומס מלא ללא ייצור PV). שנאי משנה דרגות בעומס יכול להיות פתרון טוב, אך פחות ישים (בארץ, שנאים כאלה קיימים בעיקר בתחמ"ש של חח"י ובמתחים KV161/24 ו-KV400/24).

ב. ויסות המתח על ידי תאום מקדם ההספק של המערכות הפוטו-וולטאיות.

רוב המערכות בעולם הן מחוברות רשת ונדרשות לעמוד בתקנים או בהנחיות של בעל הרשת לפיהם הפרמטרים של המהפכים הם קבועים ולא ניתנים לשינוי. מקדם ההספק של מהפכים הוא אחד, $P.F=1$ המייצר אנרגיה אקטיבית בלבד.

על אף שהפרמטרים במהפכים לכאורה קבועים, יכולים המהפכים לצרוך או לספק אנרגיה ריאקטיבית לרשת.

באופן הנ"ל, כפי שהוצג קודם, ניתן לווסת את המתח וההספק בקו [14].

אם נתייחס אל המהפך כמקור אקטיבי וריאקטיבי, ניתן להגיד שהספק המהפכים הוא S [KVA], ההספק הנדרש בפועל לפנלים

לסוללת קבלים ברשת. נוסף לעובדה שהפתרון הוא נגיש, קל וזול (המערכת כבר קיימת), קיימים יתרונות נוספים כגון:

- א. אספקת אנרגיה ריאקטיבית באופן רציף, המתאימה יותר לצרכנים בניגוד לדרגות קבועות של קבלים.
- ב. מיתוג אלקטרוני מהיר של המערכות, המקטין את תופעות המעבר המאופיינת בסוללת קבלים.
- ג. מקדם הספק מבוקר במערכות פוטו-וולטאיות, אשר ימנע סכנת עודף אספקה ריאקטיבית (Overcompensation).

תכנון נכון של שילוב מערכות פוטו-וולטאיות הוא כזה שדורש מינימום אפשרי של השקעה בתשתיות. באופן זה יהיה ניתן למצות למקסימום האפשרי את הפוטנציאל, הגלום במקורות אנרגיה ירוקים אלו.

יש לבחון את האפשרות של תיאום מקדם ההספק בעבור מתקנים ספציפיים, בנקודות רשת שנבדקו ונמצאו מתאימות לביצוע השינויים הנ"ל, באישור ובתיאום עם חברת החשמל.

מקורות:

[1] ספר אמות המידה, פרק ח', סימן ג', "ייצור חשמל מבזר לצריכה עצמית והעברת עודפים לרשת באמצעות מערכת פוטו-וולטאית או באמצעות מערכת טורבינת רוח". הרשות לשירותים ציבוריים-חשמל.

[2] ספר אמות המידה, פרק ח', סימן ד' ו-ה'. "ייצור חשמל סולארי לבעלי רישיונות יצור בעלי מתקנים המחוברים לרשת החלוקה וההולכה". הרשות לשירותים ציבוריים-חשמל.

[3] "מאפייני מתח החשמל המסופק מרשתות ציבוריות לאספקת חשמל". ת"י 50160 אוק' 2010. (זהה חלקית ל EN 50160)

[4] "חיבור מערכות אנרגיה לרשת חשמל באמצעות ממירים", ת"י 4777 אוק' 2008. חלק 2 "דרישות לממירים", 4777-2, חלק 3 "דרישות להגנת רשת החשמל, 4777-3.

[5] J.H.R. Enslin and P.J.M. Heskes. "Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network" IEEE Trans. Power Electron, vol. 19, no. 6, pp. 1586-1593, Nov. 2004.

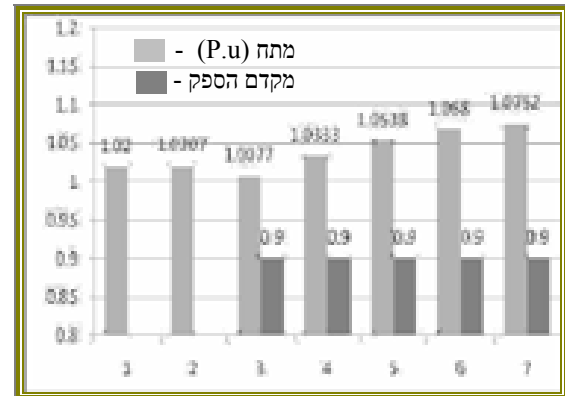
[6] M.C.Benhbab; J.M.A.Myrsik and J.L.Duarte. "Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV Network" 9th International Conference. Electrical Power Quality and Utilisation. October 2007.

[7] V.Salas; E.Olias; M.Alonso; F.Chenlo and A.Barrado. "Dc current injection into The network from pv grid inverters" Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference. Vol. 2, pp. 2371-2374, May 2006.

[8] Y. Zhou; L.Liu and H.Li. "Autonomous Control Integrating Fast Voltage Regulation and Islanding Detection for High Penetration PV Application" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 26th annual IEEE. Pp. 606-612, March 2011.

[9] I.J.Balaguer; H.G.Kim; F.Z.Peng, and E.I.Ortiz. "Survey of photovoltaic power systems islanding detection methods" Industrial

$$S = 5 \cdot \left(\frac{P}{\cos \varphi} \right) = 5 \cdot \left(\frac{67.5}{0.9} \right) < 375 KVA = 150\% \cdot 250 KVA$$



גרף II

תרחיש שלישי ($P_{pv} = 70.7 KW, \cos \varphi = \text{fix}$): בדומה לתרחיש השני, מאפשרים למהפכים "לצרוך" אנרגיה ריאקטיבית, אך בהתאם לתנאי הרשת ולא באופן שרירותי קבוע של 0.9. בגרף (III) ניתן לראות שבהתאם לאופיין מפל מתח הפוך, ההספק הריאקטיבי של המערכת הקרובה ביותר לשנאי (נקודה 3) הוא הנמוך ביותר. בתרחיש זה העומס על השנאי יורד ומאפשר ההספק ייצור אקטיבי של עד 70.7 KW לכל מערכת. גם במקרה זה המתחים לא היוו בעיה, אלא החסם לכוח הייצור היה עומס יתר על השנאי.

סיכום

קיימים כמה היבטים שאותם יש לקחת בחשבון בתכנון שילוב מערכות פוטו-וולטאיות ברשת חשמל.

ניתן ללמוד מכל תופעה שהוצגה את ההשלכה של חיבור מקבץ מערכות בקו, וכיצד היא באה לידי ביטוי באופן הבא:

א. הרמוניות ברשת מתגברות משמעותית ככל שמחוברים יותר מהפכים. ההרמוניות, הקיימות בקו, מוגברות על ידי מהפכי המערכות, ולכן יש לקחת בחשבון את אופי וסוג הצרכן בקו שאליו יחוברו המערכות.

ב. הזרמת רכיב DC לרשת יורדת משמעותית, כאשר מותקן שנאי מבדל (השנאי יכול להיות אינטגרלי במהפך או חיצוני ברשת).

ג. אי בודד היא תופעה שניתן למנוע באמצעות שימוש במהפכים, שעומדים בתקנים מתקדמים יחסית, ודורשים הגנה אקטיבית בנוסף להגנה פסיבית.

ד. עליות מתח בקו הן תוצאה של מפל מתח הפוך, הנובע מזרימת ההספק הפוכה.

בטרם ביצעו שינויים ברשת (או במתקן הסולרי), שיאפשרו את שילובו ברשת החשמל, מוצעות חלופות נוספות לבעיית עליות המתח:

(א) שינוי דרגת מתח בשנאי המזין את הקו. (ב) ויסות מקדם ההספק של המערכות הפוטו-וולטאיות באופן נקודתי ובהתאם לתנאי הרשת.

קיים קשר בין מקדם ההספק של מערכות ה-PV לבין המתח וההספק בקו. מערכות פוטו-וולטאיות יכולות להוות תחליף או גיבוי

[13] "Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface", IEC 61727, 2004.

[14] Y.Liu; J.Bebic; B.Kroposki; J.de Befout and W.Ren. "Distribution system voltage performance analysis for High-Penetration PV" IEEE Energy 2030 Conference. pp. 1-8. Nov 2008.



גיא בן-שאי, 33, נשוי ואב לשניים, בוגר הפקולטה להנדסת חשמל במכון הטכנולוגי חולון, בעל רישיון חשמלאי בודק סוג 3, עובד כבודק מתקנים במחלקת שירות הנדסי ללקוחות בחברת החשמל, מנהל האתר "מאגר מידע לעוסקים בחשמל" www.doctorat.co.il

Electronics, 34th Annual Conference of IEEE. pp.2247-2252, Nov 2008.

[10] M.E.Ropp; J.G.Cleary and B.Enayati. "High penetration and Anti-islanding Analysis of Multi-single Phase inverters in an Apartment complex" Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply. pp.102-109, Sept 2010.

[11] S.Conti; S.Raiti; G.Tina and U.Vagliasindi "Study of the Impact of PV Generation on Voltage Profile in LV Distribution Networks" IEEE Porto Power Tech Conference. Vol 4(6), September 2001.

[12] E.Demirok; R.Teodorescu; U.Borup; D.Sera and P.Rodriguez. "Evaluation of the voltage support Strategies for Low Voltage Grid Connected PV Generation" IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. pp.710-717. Sept 2010.